

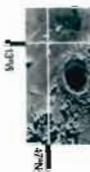
# MISTERIOS DEL COSMOS Y OTROS ENSAYOS

MUSEO  
DE LA  
CIENCIA Y  
EL COSMOS

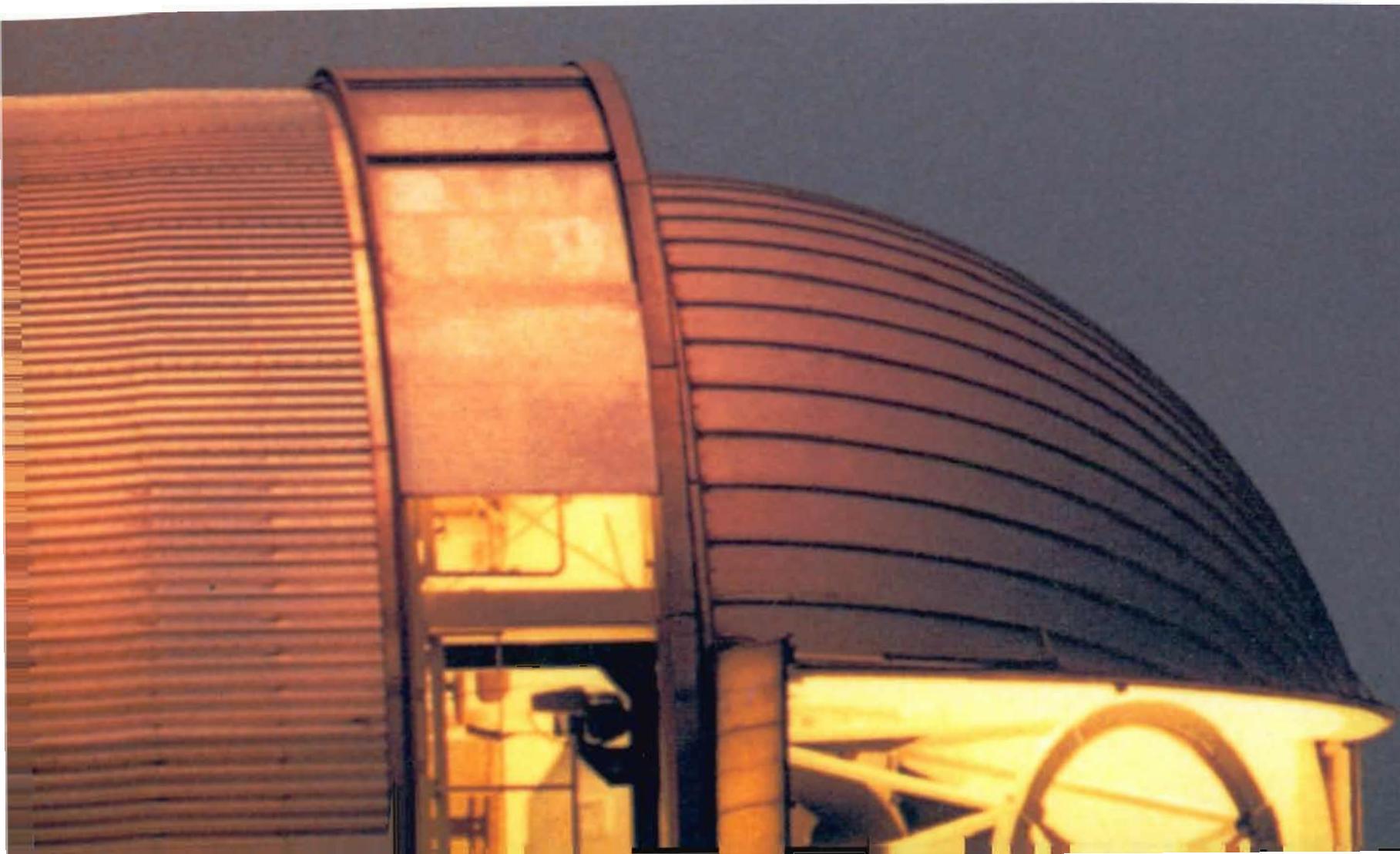


ORGANISMO  
AUTONOMO DE  
MUSEOS Y CENTROS

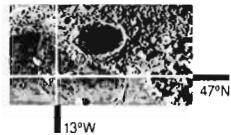
MUSEO  
DE LA  
CIENCIA Y  
EL COSMOS



MISTERIOS DEL COSMOS  
Y OTROS ENSAYOS







MUSEO  
DE LA  
CIENCIA Y  
EL COSMOS

# MISTERIOS DEL COSMOS Y OTROS ENSAYOS

Resultado del ciclo de conferencias del curso

## LA ASTRONOMIA EN CANARIAS

con sede en el  
Museo de la Ciencia y el Cosmos en 1996

ORGANISMO  
AUTONOMO DE  
MUSEOS Y CENTROS





COORDINADOR DE LA OBRA:  
Juan Antonio Belmonte

COLABORAN:  
Instituto de Astrofísica de Canarias  
Centro de Profesores de La Laguna

DISEÑO Y MAQUETACION:  
Gonzalo Manuel Ruiz Ortega

PREIMPRESIÓN:  
Contacto

IMPRESIÓN:  
Producciones Gráficas S.L.

© OACIMC  
Organismo Autónomo:Complejo  
Insular de Museos y Centros

ISBN:  
84-88594-13-5

Depósito legal:  
160-97



## Í N D I C E G E N E R A L

PRÓLOGO D. Artemio Herrero	9
HISTORIAS DEL ZODIACO D. Juan Antonio Belmonte	13
EL TALLER DEL ASTRÓNOMO D. Ramón García López	27
UNA ESTRELLA ENTRE UN MILLÓN Dña. Inés Rodríguez Hidalgo	43
NUESTRO BARRIO, EL SISTEMA SOLAR D. Antonio Eff-Darwich	63
ASTRONOMÍA Y JUVENTUD D. José Navarro García	75
LA ASTRONOMÍA EN LA PREHISTORIA DE CANARIAS D. César Estéban	87
VIDA Y MUERTE DE LAS ESTRELLAS D. Teodoro Roca Cortés	103
ASTROFOTOGRAFÍA PARA TODOS D. Federico Fernández Porredón	117
LA MÚSICA DE LAS ESTRELLAS D. Pere L. Pallé	131
ASTRONOMÍA Y EL CINE D. Héctor O. Castañeda	143
CANARIAS: UN LUGAR PRIVILEGIADO Dña. Antonia María Varela Pérez	157
UNIVERSOS ISLA D. Evencio Mediavilla Gradolph	173
MISTERIOS DEL COSMOS D. Rafael Rebolo	189
¿HAY ALGUIEN AHÍ? D. Manuel Vázquez Abeledo	199
CANARIAS Y LA DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA Dña. Carmen del Puerto	223
EL I.A.C., UNA VENTANA DE CANARIAS AL UNIVERSO D. Francisco Sánchez	241

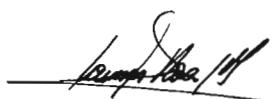


El Museo de la Ciencia y el Cosmos acogió este año y durante seis meses a una amplia serie de científicos y estudiosos de primer nivel con el propósito de definir de la forma más exacta posible el panorama astronómico canario y sus repercusiones científicas. Este libro que tienen en sus manos engloba todos aquellos ensayos de una forma precisa, convirtiéndose en pionero a la hora de ofrecer una visión de las Islas como una meca en la investigación de los astros a escala mundial.

El Organismo Autónomo de Museos y Centros del Cabildo Insular de Tenerife que represento, y que acoge al Museo de la Ciencia y el Cosmos, se muestra orgulloso de iniciativas como ésta. El trabajo de varios meses por parte de los miembros del museo, ha visto sus frutos reflejados en un medio de consulta perenne que nace con vocación de estudio referencial. La excepcional participación de una institución como el Instituto de Astrofísica de Canarias, que ha aportado a sus mejores expertos, avala tal aseveración y, si cabe, le otorga un carácter más riguroso.

La importancia de esta iniciativa reside, fundamentalmente, en el aspecto de conservación y divulgación de unos conocimientos expuestos de una forma aislada por una serie de expertos. Por ello, la unidad temática de este volumen le otorga un carácter excepcional. El avance y el conocimiento necesitan de una difusión que los acerque más a un público poco habituado a estas materias, al mismo tiempo que los investigadores del todo el mundo tengan acceso de forma directa y sin necesidad de desplazamiento. A estos dos colectivos se dirige este ansiado proyecto que ya es una gozosa realidad.

El papel de las instituciones públicas debe ir encaminado hacia un mayor acercamiento a los estudios de las ciencias como medio de solucionar las grandes incógnitas que aún acechan al mundo del siglo XXI, sobre todo en un campo como el astronómico donde aún quedan una infinidad de secretos por descubrir.



**Carmen Rosa García Montenegro**  
Presidenta del Organismo Autónomo de Museos y Centros



## PRÓLOGO

Artemio Herrero

Director del Departamento de Astrofísica de la  
Universidad de La Laguna

La Astronomía es una ciencia tan antigua como la propia humanidad. Probablemente se inició cuando los primeros antepasados del hombre actual vieron atraída su atención por el Sol y la luna -tan brillantes- y por los sorprendentes cambios de apariencia de ésta. Así comenzaron a seguir los ritmos celestes, aun antes de que despertara su inteligencia, llegarán a ser conscientes de ellos y se preguntaran el porqué de su existencia.

Desde entonces la Astronomía y la más moderna Astrofísica no han dejado de progresar y de ofrecer nuevos conocimientos para satisfacer la curiosidad del hombre y su sed de saber. Y ello hace siempre actual y de interés permanente la organización de cursos y seminarios sobre Astronomía, labor en la que el Dr. Juan Antonio Belmonte, director del Museo de la Ciencia y el Cosmos y coordinador del curso "La Astronomía en Canarias" resulta incansable. Con el consiguiente temor de todos sus colegas, que sospechamos ocultas intenciones en Juan Antonio en cuanto lo vemos acercarse.

No debe pensar usted por ello, amigo lector, que la mayoría de nosotros huimos de tales responsabilidades. Al contrario, las propuestas de Juan Antonio de dar charlas, conferencias y cursos suelen ser bien recibidas. Y es que en general a todos nos gusta hablar de nuestra actividad: dé usted cuerda a un supuesto experto en algo, y en cuanto cobre confianza puede quedar desbordado por un torrente de palabras más o menos técnicas. Y atrapado en una explicación mortalmente aburrida.

Aunque la verdad es que raramente he encontrado a nadie que afirmara encontrar aburrida la descripción de lo que vemos en los cielos, quizás porque sabían, o imaginaban, que yo siento una íntima satisfacción cuando la gente se interesa por el Cosmos, y en su amabilidad no quisieron desilusionarme. Creo sin embargo que el interés de la mayoría de la gente es sincero y por eso pienso que si usted se está acercando ahora a la Astronomía por primera vez a través de este libro, lo disfrutará plenamente.

Una introducción acerca de las herramientas de que se vale el astrónomo profesional le ayudará a comprender la dificultad del trabajo y las limitaciones de lo que sabemos. Pero eso hará todavía más interesante el recorrido por el Universo de la mano de este libro. Hallará en él una visita a nuestro Sol, que le acercará a esa estrella tan igual a muchas y a la vez tan singular, pues de ella depende buena parte de lo que creemos saber sobre el Universo. Paseará por los alrededores de nuestra casa en el capítulo dedicado al Sistema Solar, gráficamente señalado como 'nuestro barrio' en su título. Barrio que sólo en las últimas décadas de historia hemos comenzado realmente a conocer, gracias a los satélites. Saltará a continuación a nuestro universo cercano, cuyo componente fundamental son las estrellas, y conocerá como nacen, viven, mueren y se reproducen, por este orden, en un ciclo con grandes semejanzas e importantes diferencias con el ciclo biológico. Conocerá cuál es la música que las estrellas interpretan, y aprenderá como esa música caracteriza a una estrella del mismo modo que es posible identificar a un compositor por su obra y a un intérprete por su modo de ejecutarla. Y después comenzarán las grandes escalas, aquéllas de las que no tenemos experiencia cercana, siquiera aproximada como con el Sol y las estrellas. Primero serán las galaxias, cuya identidad como Universos-Islands fue ya intuida por Kant en el siglo XVIII, pero que sólo pudo ser confirmada por Hubble en la tercera década de nuestro siglo, allá por 1924. Por encima de ellas quedarán ya las grandes preguntas acerca del origen del Universo, su evolución temprana, y el posible desarrollo de vida (y sobre todo, de vida inteligente) en otros lugares del Universo.

Claro que también habrá muchos lectores para los que este libro no constituya un primer acercamiento al tema, sino que su lectura se acercará más a la visita a un paraje ya conocido, y quizás usted, amigo lector, sea uno de ellos. En tal caso es igualmente recomendable leerlo sin prisas, pues hallará en él sin duda multitud de nuevos detalles. Unos habrán estado siempre ahí, pero los advertirá tan solo ahora, como ocurre a veces, cuando al contemplar por enésima vez un cuadro famoso o al pasar por una calle que recorremos habitualmente, nos sorprendemos preguntándonos a nosotros mismos como no nos habíamos dado cuenta antes de ese pequeño motivo o de ese encantador rincón. Otros detalles en cambio serán nuevos e incrementarán su comprensión del Cosmos. No me cabe duda de que

quedara no menos sorprendido por ellos, pues nada merece tanto nuestro asombro como la explicación de un hecho antes ininteligible.

Permitame también recomendarle una lectura relajada. Le ayudará a detenerse en los cuidados del estilo de cada uno de los autores, en general de mejor nivel que este texto de astrofísico metido a prologuista aficionado. Resulta un verdadero placer leer a alguno de estos autores, hasta el punto de que apetece intentar convencerles de que dediquen mayores energías a estas actividades. Cosa que, lamentablemente, suelen rechazar aduciendo una justificada falta de tiempo. Lo que nos priva a usted y a mi, querido lector, de disfrutar de ellos más a menudo.

Pero con ser la descripción del Cosmos contenida en el presente libro muy interesante, no me cabe duda de que la inclusión de dos aspectos menos habituales lo hace mucho más valioso. Se trata de su referencia a las Islas Canarias y a la relación de la Astronomía con la sociedad y la cultura. Y esta referencia debe entenderse no como algo circunstancial, sino consustancial al curso.

El primero de estos aspectos resalta el papel de Canarias en la Astrofísica actual, papel que se basa en la calidad y transparencia de su cielo, pero para el que ha resultado vital el trabajo serio y constante de muchas personas. Donde sólo existían potencialidades se levantan hoy unos observatorios, el del Teide y el del Roque de los Muchachos, que han propiciado uno de los desarrollos científicos más espectaculares de las últimas dos décadas: el de la Astrofísica española. Y que han contribuido significativamente al avance de esta ciencia en el mundo.

El segundo de los aspectos comienza retomando la relación que desde el principio de las civilizaciones ha unido Astronomía y sociedad. Esta unión ha sido siempre muy fuerte, como lo revelan los restos de muchas culturas antiguas, incluyendo la de los aborígenes de las Islas Canarias. Y como queda patente en las numerosas huellas que la Astronomía deja incluso en las manifestaciones culturales de las sociedades modernas, como el cine. El capítulo dedicado a este tema es sin duda uno de los más originales y entretenidos.

Pero desde que se comprende la Ciencia como un servicio más a la sociedad, la importancia de esta unión ha ido incrementándose al tiempo que la sociedad misma exige comprender lo que sus científicos se traen entre manos. Gracias sin embargo a la mencionada antigua relación entre Astronomía y sociedad, esta rama científica es una de las que se encuentra en mejor posición para satisfacer dicha demanda, pues su comunidad está acostumbrada a comunicarse con el público, y éste está acostumbrado a tales intentos de comunicación, e incluso suele reclamarlos. Si bien puede entenderse que las motivaciones de unos y otros han ido cambiando con los siglos.

Ambos aspectos, el cultural y el local, quedan también engarzados en alguno de los capítulos. Así pues, el curso acaba contemplando la Astronomía, su relación con la cultura y la sociedad, y el aspecto local que en Canarias ofrece, de un modo global en que todo esta relacionado, sin por ello perder cada cosa su identidad propia.

Solo me resta, amigo lector, animarle a que aproveche usted el esfuerzo de tantos profesionales, a los que felicito ahora y cuya capacidad conozco directamente en la mayoría de los casos, lo que me permite recomendarle a usted sin reservas esta pequeña pero valiosa muestra de su trabajo.

Y que usted lo disfrute.

La Laguna, Julio de 1996



# HISTORIAS DEL ZODIACO

Juan Antonio Belmonte Avilés

Director del Museo de la Ciencia y el Cosmos  
Investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias

¿De que Signo Zodiacal eres? ..... soy Tauro  
(por poner el ejemplo del que subscribe)

Quien no se ha enfrentado alguna vez en su vida a esta pregunta y la ha contestado con un grado mayor o menor de escepticismo, preguntándose por qué nuestro interlocutor querrá saber eso. La verdad es que entre esta pregunta y ¿cuándo es tu cumpleaños? no hay la más mínima diferencia desde el punto de vista de la Ciencia, en general, y de la Astronomía, en particular. ¿Por qué entonces se siguen usando los signos zodiacales como una componente más de nuestra vida diaria?. La respuesta es sencilla, somos una especie apegada a las tradiciones en la que la persistencia de la memoria colectiva es, en muchas ocasiones, más poderosa que la razón y, en este caso, estamos además hablando de una memoria que se pierde en la noche de los tiempos y que parece tan antigua como el propio ser humano.

Desde tiempo inmemorial, la Humanidad ha vivido obsesionada por gobernar el tiempo, en el sentido más amplio de la palabra, es decir cronológico y meteorológico pues, de hecho, ambos están íntimamente relacionados. Desde nuestra perspectiva de seres humanos de finales del Siglo XX, con nuestros sofisticados relojes y nuestras agendas electrónicas de bolsillo, no nos damos cuenta de lo obsesionados que llegamos a estar con este tema, y eso, que, en nuestro caso, creemos tenerlo todo bajo control. Imaginense entonces a un agricultor en los comienzos de la Era Neolítica, hace unos 10000 años, cuando se hiciese a sí mismo una pregunta tan trivial como, por ejemplo, ¿cuándo sembrar?. Por fortuna para los pobladores neolíticos, el cielo ofrece una serie de patrones en los movimientos del Sol, la Luna y las estrellas que, una vez observados y entendidos, permiten responder a la pregunta anterior con un cierto grado de credibilidad, es decir, permiten elaborar un calendario. Es aquí en el intento de establecer un patrón con el que gobernar el tiempo, y así poder responder a las necesidades productivas y alimenticias de la población, donde debemos buscar el origen de los signos zodiacales.

Los signos zodiacales, como muy bien explica Manuel Toharia en su libro "Astrología: ciencia o creencia?", no son más que 12 sectores de la Bóveda Celeste, de 30° de longitud y 34° de latitud, situados a lo largo de la Eclíptica (la intersección del plano de la órbita de la Tierra con la Esfera Celeste o, lo que es lo mismo, la trayectoria aparente del Sol a lo largo del año). El origen se sitúa en el llamado Punto Aries que se corresponde con la posición que ocupa el Sol en el comienzo de la primavera (Equinoccio de Primavera) para los habitantes del Hemisferio Norte. A partir de este punto, los 12 signos son los siguientes:

Primavera		Aries		Taurus		Gemini
Verano		Cancer		Leo		Virgo
Otoño		Libra		Scorpius		Sagittarius
Invierno		Capricornus		Aquarius		Pisces

que se podrían traducir como: el Carnero, el Toro, los Gemelos, el Cangrejo, el León, la Virgen, la Balanza, el Escorpión, el Flechador o Arquero, Capricornio (la imagen habitual es la de cabra con un cuerno en la cola o con cola de pez), el Aguador y los Peces, respectivamente. Se suelen clasificar, desde el punto de vista astronómico y para los habitantes del Hemisferio Norte de la Tierra, en signos primaverales, signos de verano (a partir del Solsticio Vernal en que el Sol entra en Cancer), signos de otoño (a partir del Equinoccio Otoñal en que el Sol entra en Libra) y signos invernales (a partir del Solsticio Hienal en que el Sol entra en Capricornus). Las estaciones en el Hemisferio Sur están invertidas y, por tanto, los signos también lo estarán.

Por lo que al origen del Zodiaco se refiere se han lanzado diversas hipótesis a lo largo de los dos últimos siglos. Así, la expedición napoleónica a Egipto descubrió en el templo de Jator en Dendera (Figura 1) una representación monumental de la Bóveda Celeste donde aparecían claramente representados como constelaciones los 12 signos zodiacales. La respuesta parecía asegurada, el Zodiaco, como tantas otras cosas, se había generado en Egipto. Cálculos relacionando la posición de los signos con la posición de las constelaciones correspondientes,

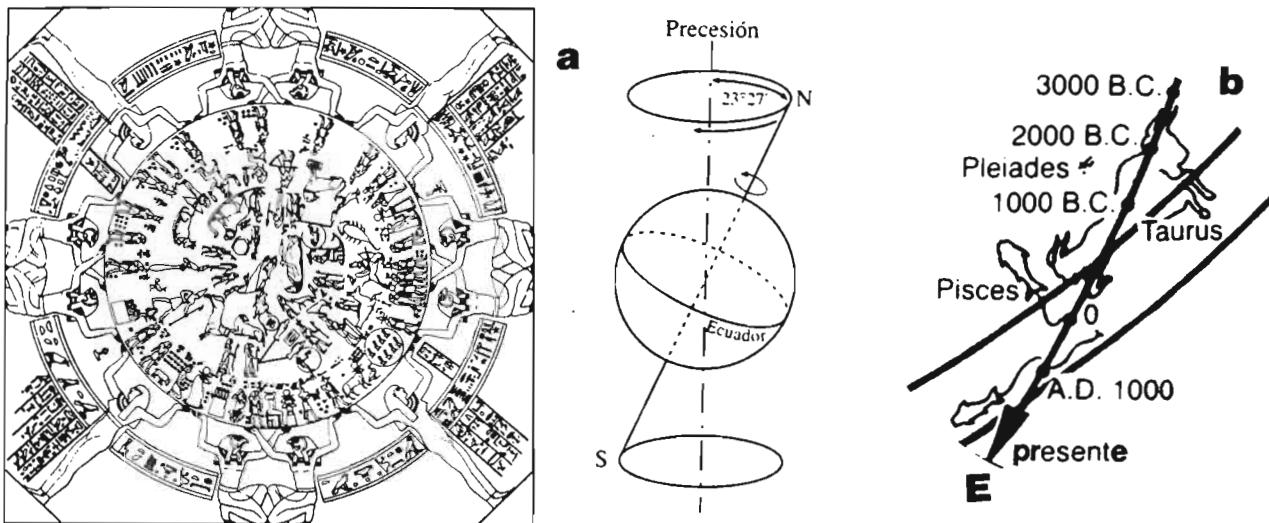


Figura 1 (dcha): El "Zodiaco" de Dendera. Esta es, quizás, la representación monumental del Zodiaco más antigua que se conoce. Data de época imperial romana y fue hallado en el techo de una sala situada en la terraza del templo de Jator en Dendera (Egipto). En él, junto a representaciones de grupos de estrellas (constelaciones) típicamente egipcias como el "Muso" (nuestro Carro) u Osiris (nuestro Orión), se pueden ver representadas las 12 constelaciones zodiacales en la posición que tenían en el cielo más o menos en la época en que se crearon los Signos (S. VII-VI a.C.).

Figura 2 (izq): (a) Imagen esquemática del fenómeno conocido como "Precesión de los Equinoccios". La Tierra se comporta como una peonza de forma que las posiciones relativas de las estrellas respecto al ecuador y a los polos varían a lo largo de un ciclo de unos 26000 años en que la Tierra da una vuelta completa alrededor del Eje de la Eclíptica (línea trazo punto). (b) Este hecho hace que el Punto Aries "preceda" sobre la Eclíptica (E) de forma que, por ejemplo, una constelación que en una época determinada marcaba el Equinoccio de Primavera, marcará el Solsticio de Verano unos 6500 años más tarde.

proporcionaban una fecha en torno al S. VII a.C. para la "construcción" del "Zodiaco". Sin embargo, la demostración de que las partes más antiguas del templo de Dendera databan del reinado de Cleopatra VII y que, probablemente, el propio techo astronómico databa de la época de Nerón restó importancia a este hallazgo y significó un jarro de agua fría para la teoría egipcia del origen del Zodiaco.

Si bien hay autores actuales que aún postulan un origen egipcio de los signos (ver Desroches-Noblecourt 1993) la opinión unánime hoy en día es que el Zodiaco se originó por primera vez, en la versión que hoy en día conocemos, en algún lugar de Mesopotamia (posiblemente Seleucia o Babilonia) durante los primeros años de dominación helenística que siguió a la conquista del Imperio Persa por Alejandro Magno a finales del Siglo IV a.C. De hecho, la palabra Zodiaco proviene del griego *Zodiakos Kiklos* que significa "Círculo de los Animales", ya que 7 de los 12 signos son representaciones figuradas de animales, 4 lo son de seres humanos (o mixtos, como Sagitarius) y, tan sólo uno, Libra, representa un objeto (aunque en la antigua Roma este signo recibía el nombre de *Chelae*, las Pinzas -del escorpión se entiende- y por tanto entraría dentro de los signos zoomorfos). A estas alturas del texto, la mayoría de los lectores ya habrán reconocido el origen de los signos. Por supuesto, éstos provienen de constelaciones, agrupaciones aparentes de estrellas que los antiguos reconocieron en la Bóveda Celeste y, en particular, de 12 de las 13 constelaciones por las que atravesía el "Camino" del Sol, la Eclíptica (a las 12 anteriores habría que sumar Ophiuchus, el Serpentario). Los trabajos posteriores de Eratóstenes e Hipparchos (S. III a.C.), y el poema de Arato (Los Fenómenos) contribuyeron a expandir el Zodiaco por todo el Mundo Mediterráneo, llegando hasta Roma de donde lo heredaría la civilización Occidental (Ovenden 1966, Roy 1984, Martos Rubio 1992).

Es de suponer que casi desde el principio de los tiempos, el ser humano reconociera grupos de estrellas más o menos significativos a los que daría un nombre de acuerdo a ciertas características o propiedades de los mismos (forma, época de visibilidad, tarea agropecuaria asociada, etcétera). En este sentido, hay quien postula que algunas de nuestras constelaciones ya eran conocidas en el Paleolítico como Taurus, que podría estar ya representada en las Cuevas de Lascaux, con más de 17000 años de antigüedad (Antequera 1994), o la Osa Mayor a la que se ha postulado un origen aun mucho más antiguo que se remontaría hasta 50000 años atrás (ver Gurstein 1995 para un buen ensayo sobre el origen remoto de las

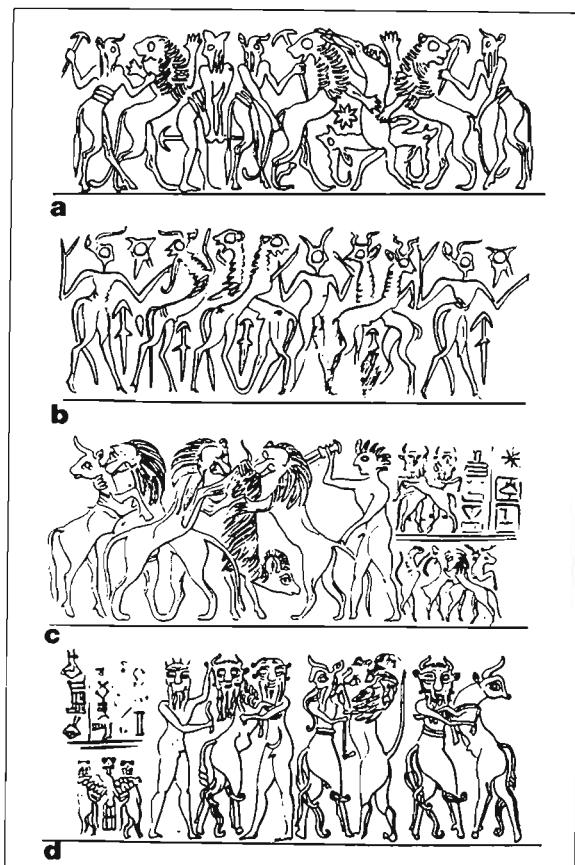


Figura 3. Diversas representaciones de cilindros sello de época arcaica (h. 3000 a.C.) procedentes de yacimientos del antiguo Elam (a y b), en la Persia actual, y la antigua Sumeria (c y d), en lo que hoy en día es Irak. En todos ellos se puede observar, como referente común, la lucha entre diversas criaturas mitológicas (toros, hombres, leones y cabras o carneros). Según la interpretación astronómica, se trataría de las más tempranas representaciones de Gemini, Taurus, Leo y una constelación perdida (Ibex o Cabra) cuya lucha sería una metáfora del continuo cambio estacional.

constelaciones zodiacales?, ¿cómo y por qué se generaron?, ¿son todas igual de antiguas?, si no lo son, ¿cuáles son más recientes?. La respuesta a estas preguntas hay que buscarla en las raíces de nuestra civilización y, siguiendo la opinión de Alexander Gurshtein (1993), el origen debe encontrarse en la creación del calendario agrícola, el descubrimiento de los jalones estacionales (Equinoccios y Solsticios) y el desplazamiento de éstos con respecto a las estrellas debido a la Precesión de los Equinoccios (Figura 2).

Ya en los primeros registros "históricos" de la humanidad, como es la gliptica más arcaica de las primeras civilizaciones del Creciente Fértil (Elam y Sumer) nos encontramos con imágenes de lo que pudiera ser la representación más antigua de algunas constelaciones zodiacales (ver Figura 3). Si aceptamos la interpretación de algunos autores (Hartner 1965), las luchas entre leones y toros, leones e íbices, hombres y leones, toros y hombres, etc..., debieran interpretarse como representaciones del cambio estacional en que "constelaciones" imperantes en una época son "derrotadas" por otras, proporcionando así una evolución continua a la naturaleza.

La existencia de estos sellos, junto a las representaciones mucho más realistas de constelaciones zodiacales en los denominados "kudurrus" de época cassita (S. XV-XI a.C.), donde se pueden ver claramente representadas (ver Figura 4) constelaciones como Sagittarius, Scorpius o Capricornus, llevó a Alexander Gurshtein (1993) a postular una teoría sobre el

constelaciones). En particular, los grupos de estrellas situados sobre el "camino" del Sol o de la Luna debieron ser reconocidos tempranamente sobre todo por aquellas sociedades dependientes de la agricultura y, de todos éstos, es de suponer que aquellos relacionados con las posiciones extremas y medias (Solsticios y Equinoccios) serían especialmente relevantes.

El origen de la mayor parte de las constelaciones zodiacales (o eclípticas) hay que buscarlo en Babilonia, donde hacia el S. VII antes de la Era, en plena época imperial asiria, se comenzaron a escribir (o quizás a recopilar) textos sobre piedra (los llamados "Astrolabios") y sobre tablillas de arcilla (conocidas como las Tablas *MulApin* por el nombre del primer grupo de estrellas que aparece) donde se describen "constelaciones" pertenecientes a las tres grandes áreas en que dividían el cielo los antiguos babilonios, el Camino de Anu, dios del Cielo, el Camino de Enlil, dios del Aire (que se corresponde con el Ecuador Celeste) y el Camino de Ea, dios de las Aguas y del Inframundo. Ya en época neobabilónica (h. S. VI a.C.) las tablas se reducen a enumerar un total de 18 constelaciones, que se sitúan en el denominado "Camino de la Luna" (ver Tabla 1), entre las que, encabezadas por las Pléyades (la Estrella -*Mul-* por excelencia), encontramos ya claramente reconocibles 9 de las 12 constelaciones zodiacales posteriores. Pisces aun no está muy bien definido, si bien existe un grupo denominado "Las Colas de Pez", mientras que Cancer y Aries no aparecen en absoluto, siendo remplazados por una Daga y un Aparcero, respectivamente.

En este momento, si bien ya parece establecido el origen de los signos, en número de 12 (posiblemente por ser el número mínimo de meses de un año y por ser divisor de 360°), a partir de 10 constelaciones integradas en el "Camino de la Luna", más los signos de Aries y Cancer, a los que habría que añadir un origen distinto (posiblemente egipcio, como se verá más tarde), aun nos queda una serie de preguntas importantes por realizar: ¿cuál es el origen de todas y cada una de las



Figura 4. Representación babilónica de Pabilsag (el dios "Flechador"), que acompañaba al alma de los muertos al más allá, y del escorpión de la diosa Ishara, en un "kudurru" (estela fronteriza) de época de la dinastía cassita (S. XV al XI a.C.) Estos son, presumiblemente, los antecedentes inmediatos de nuestras constelaciones zodiacales de Scorpius y Sagittarius, marcadores otonales durante el periodo formativo de nuestra civilización.

constelaciones zoomorfas, posiblemente relacionadas con las anteriores).

Partiendo de esta base, es como vamos a plantear nuestra hipótesis sobre el origen de las constelaciones zodiacales que, a modo de resumen, está plasmada en la Tabla 3. Ya habíamos visto que era posible que la constelación del Toro tuviese un origen muy antiguo y, de hecho, ya en los primeros santuarios neolíticos que podemos encontrar, como los de la aldea de Chatal Huyuk, en Turquía, (ver Figura 5), hallamos bucráneos como exponentes importantes de su religiosidad. En estos mismos santuarios, se han encontrado figuras exentas de lo que podría ser la representación más antigua de la Diosa Madre, la Cibeles frigia o la Inanna sumeria, ya representada junto a su animal totémico, el león (Figura 6).

Las estaciones siguen anualmente un ciclo muy determinado que se podría resumir claramente en cuatro fases aparentes: nacimiento o resurrección, plenitud, decrepitud (muerte) y letargo. En nuestra hipótesis, las sociedades neolíticas asociaron cada una de estas fases a una divinidad cuya residencia principal se encontraría en los Cielos.

En primer lugar, ocupando la posición del Equinoccio de Primavera, tendríamos una pareja de divinidades creadoras (el mito de Adán y Eva) que, para muchas culturas, serían los dos gemelos primordiales (unas veces hombre y mujer, otras veces dos varones, generadores de la civilización -mito de Caín y Abel-). Esta figura dual evolucionaría con el tiempo en los héroes míticos Gilgamesh y Enkidú, antecesores inmediatos de Cástor y Pólux, nuestros Gemelos.

En segundo lugar, asociada a la plenitud del verano y a la recolección del grano, tendríamos a la representación divina de la Madre Tierra (Ver Figura 5), la Gran Diosa portadora de las cosechas que, con su brillante estrella Spica (la Espiga) se situaba en la posición del Sol en el Solsticio de Verano.

A este respecto, es curioso ver como la figura de una mujer en su plenitud, dadora de vida, evolucionó, en tiempos grecorromanos, hacia una figura joven, de aspecto virginal, que es la que ha permanecido en la memoria colectiva hasta nuestros días (las "Virgo" suelen ser -según los astrólogos- de carácter tímido y reservado, curioso ¿verdad?).

En tercer lugar, ocupando la posición del Equinoccio de Otoño, y por tanto el comienzo de la decadencia de la naturaleza, se situaría el dios "Flechador", nuestra posterior constelación de Sagittarius (ver Figura 4). La "metáfora" que muchas autores creen reconocer

origen de Zodiaco tremadamente sugerente que se basa en la existencia de tres grupos distintos de constelaciones zodiacales (los Grupos Géminis, Tauro y Aries, respectivamente) que se habrían generado en épocas sucesivas, debido al cambio de posición de los jalones estacionales asociado a la precesión. Los resultados de su hipótesis se resumen en la Tabla 2.

Un hecho que llama la atención desde el primer momento es lo extraño que resulta una constelación zoomorfa (Pisces) dentro de un grupo de constelaciones "humanas" (Gem, Vir, Sag), frente a una constelación "humana" (Aquarius), dentro de un grupo de constelaciones zoomorfas (Tau, Leo, Sco). Si bien el autor basa su hipótesis en la dualidad de Pisces (que también se podría atribuir a Aquarius -un hombre con un cántaro- o incluso a Capricornus); en esa misma tabla mostramos que si, simplemente, intercambiamos las posiciones respectivas de Pisces y Aquarius, encontramos un ajuste tanto o más razonable de los parámetros (área y longitud eclíptica sobre todo) y, además, una mayor coherencia interna de los grupos de constelaciones (un primer grupo de "dioses" humanos, seguido de un grupo de

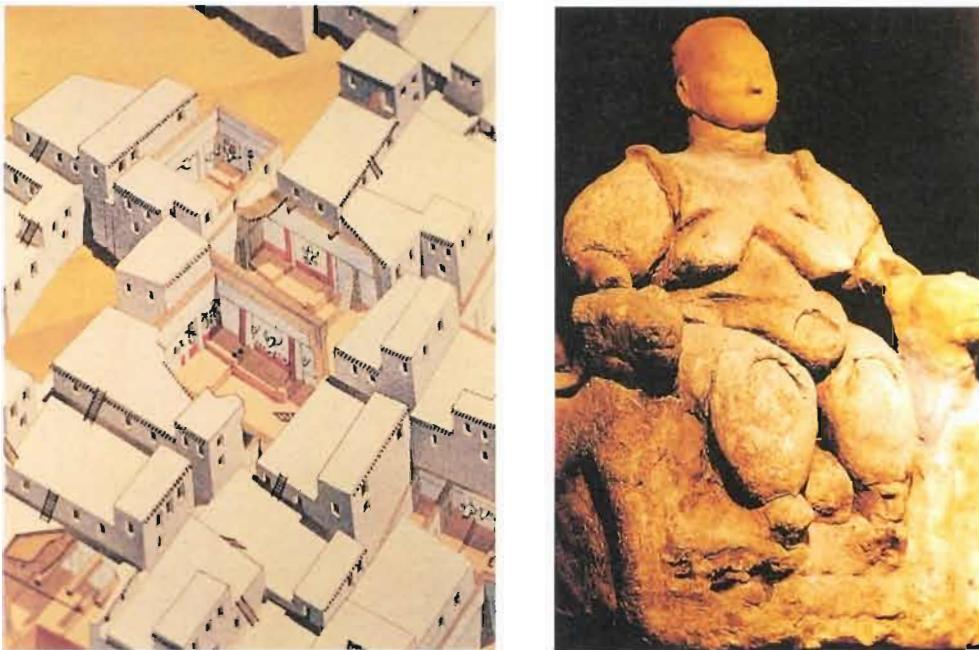


Figura 5 (izq): Representación de una sección del poblado neolítico de Chatal Huyuk, cerca de Konya (Turquía). La imagen muestra la zona de posible uso religioso donde se observan, dos habitaciones, una de ellas con numerosos bultos (representaciones de cabeza de toro) y la otra con una representación de una "Diosa" en actitud de dar la vida. Las primeras constelaciones zodiacales quizás se originaron, como marcadores estacionales, en aldeas como ésta en la época de nacimiento de la agricultura en el Círculo Fértil.

Figura 6 (dcha): La "diosa de los Leones"; posible representación de la Gran Madre, de unos 9000 años de antigüedad, encontrada en uno de los santuarios de la figura anterior. Diosa beneficiaria de las cosechas, con el tiempo evolucionaría en las figuras clásicas de Cibeles. Ella, y su animal totémico el león, podrían estar en el origen de las 2 constelaciones asociadas a la plenitud del verano y a las cosechas, Virgo con la brillante estrella Espiga, y Leo el "rey" de los animales, avatar del Sol en su apogeo.

en esta figura es que el Sol es herido de muerte por un "flechazo" (más tarde veremos que un papel similar puede hacer la picadura de un escorpión), pasando al Inframundo (el sector sur de la bóveda celeste), por lo que la Naturaleza empieza a decaer. En este sentido, es importante constatar que esta divinidad, denominada Pabilsag en la antigua Mesopotamia, era la encargada de acompañar a los muertos en su viaje hacia el más allá.

Para terminar, nos encontramos con Ea (o Enki, en Sumeria), dios del Inframundo, pero también dios de las Aguas Celestes. El Sol durante varios meses, y singularmente en el Solsticio de Invierno, se encuentra en compañía de Ea, momento en que éste, como Señor de las Aguas, abre las compuertas del cielo y renueva la tierra a través de la lluvia. Nos encontrariamos claramente ante la figura del Aguador que derrama su cántaro, permitiendo la renovación de la Naturaleza (ver Figura 7a).

Estas antiguas divinidades (Los Gemelos, la Madre Tierra, el Dios Flechador y el Señor de las Aguas) habrían conservado su carácter primordial durante varios miles de años hasta que la Precesión de los Equinoccios les hubiese hecho inservibles como marcadores de los Solsticios y Equinoccios. Casualmente, esto empezó a ocurrir justo en la época en que las primeras civilizaciones comenzaban a desarrollarse (h. 3500 a.C.). Estas divinidades conservaron una importancia muy especial (ver Figura 7b) pero debieron ceder su papel como jalones estacionales a otras constelaciones que, si bien es posible que ya existiesen, ahora pasaron a jugar un papel determinante en el ciclo de la Naturaleza.

En este sentido, en la cultura India, se reconocía antiguamente la existencia de las llamadas Estrellas Reales. Estas eran un total de 4 estrellas, todas ellas de primera magnitud que, en un momento determinado del alba de la civilización, ejercieron un papel fundamental como marcadores estacionales: Aldebarán, Régulo, Antarés y Fomalhaut (ver Tabla 3). Resulta sorprendente que, en base a nuestra hipótesis, cada una de estas estrellas sea la más brillante de una "constelación" de carácter zoomorfo que hacia el 3500 a.C. (comienzos de la civilización en Egipto y el Círculo Fértil) se situaban en las posiciones medias y extremas del recorrido del Sol.



Figura 7(a): Cilindro-sello de época neosumeria (S. XX a.C.) donde se puede apreciar a una divinidad con un cántaro dando de beber a un toro. Esta es, probablemente, una de las representaciones conjuntas más antiguas de las constelaciones del Toro (representando a la Primavera) y el Aguador (dador de vida gracias a las lluvias invernales) que se conocen.



Figura 7(b): Imagen de un cilindro-sello de época acadia (S. XXIV a.C.) donde se puede apreciar cuatro divinidades del panteón paleobabilónico que podrían estar en el origen de los 4 signos "zodiacales" de carácter humano: (1) Apzu, el dios de las dos Caras (Gemini 1), Inanna, la Gran Diosa, luego identificada con el planeta Venus como uno de sus principales avatares (Virgo 2), El dios "Flechador" (Sagitarius 3) y, finalmente, Enki o Ea, el dios de las Aguas (Aquarius 4) representado con unos peces. Estas "constelaciones" divinas habrían ocupado en los cielos, en los comienzos del Neolítico (h. 7000 a.C.), las posiciones del Equinoccio de Primavera, Solsticio de Verano, Equinoccio de Otoño y Solsticio de Invierno, respectivamente.

La primera sería el Toro (Taurus), receptor del agua en el sello de la Figura 7a e importante figura mitológica, asociada a la Primavera, de muchos pueblos de la Antigüedad (recordemos el toro Apis de Egipto o la figura del Vellocino de Oro de la Biblia). La segunda sería el León (Leo), que ya veíamos como animal totémico de la Gran Diosa (ver Figura 6) y que, por tanto, también puede que fuera más antigua. El León, como rey de los animales, se asociaría al Sol en su momento de máximo poder en el Solsticio de Verano (Régulo, de hecho, significa reyezuelo -Heuter 1986-). Al mismo tiempo, la situación relativa de Leo, en su primera aparición matutina trás haber estado en conjunción con el Sol (orto heliaco), con respecto a Taurus, en el céntit, que ocurre a principios del Otoño, sería la causa que justificase las continuas representaciones de la lucha entre el León y el Toro que se repiten sin solución de continuidad desde los primeros cilindros-sello (h. 3000 a.C.), hasta época aqueménida, casi 3000 años más tarde (ver Figura 8).

La tercera constelación, el Escorpión, ya la hemos visto representada en la Figura 4 junto a otra constelación "otoñal", Sagitarius. El nombre mesopotámico de Scorpius, Gir-tab ("El que pincha") nos lleva a la misma metáfora que habíamos usado en el caso del "Flechador". El Escorpión pincha y hiere al Sol. Éste, herido de muerte, atraviesa el Ecuador y

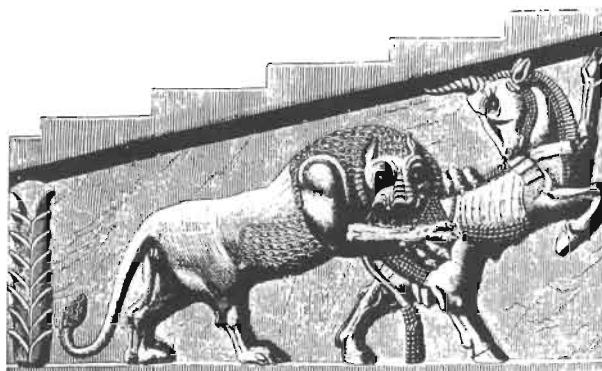


Figura 8: Imagen del combate de un león frente a un toro de la escalera de la gran apadana del palacio de Persépolis en Irán (época aqueménida, S. VI a.C.). Este tipo de representación procede de una tradición antiquísima como se demuestra en la figura 3c. Según numerosos autores (Hartner 1965, Gingerich 1984), ésta sería una forma de representar el cambio estacional y la decadencia de la naturaleza a principios del otoño, mediante la imagen de un león (Leo), atacando y matando a un bóvido (Taurus).

quedaron finalmente integrados en el Zodiaco. Sin embargo, esta solución aparentemente trivial dejaría sin solución la existencia de otra "constelación" que, aquí, hemos considerado como de la tercera generación, la "Cabra-Pez" (ver Tabla 1), antecesora de nuestro Capricornus. Al analizar los cilindros sellos de época más antigua vimos que en las "luchas" estacionales entre hipotéticas "constelaciones" zodiacales aparecía repetidamente un ibex, una cabra o un carnero (ver Figura 3). Nuestra hipótesis es que este ovicáprido representaría a una cuarta constelación zoomorfa, asociada al Solsticio de Invierno, momento en que, al igual que las cabras escalan las montañas, el Sol vuelve a "escalar" el cielo. Esta constelación que, a partir de ahora, denominaremos simplemente la Cabra, podría encontrarse representada a los pies de Ea en el cilindro-sello de la Figura 7b; por lo que sería factible una hipotética relación entre ambos, similar a la que vimos entre la Gran Diosa y el León.

Con todo, el principal apoyo a la existencia de una constelación "Cabra" en el cielo del Hemisferio Sur, y situada entre el Escorpión y el Toro, no lo encontramos en Mesopotamia, si no en Egipto. En los denominados relojes estelares, que datan del Primer Periodo Intermedio (h. 2200 a.C.) así como en los techos astronómicos de numerosas tumbas del Imperio Nuevo (S. XV a.C. en adelante) se han encontrado pruebas de la existencia de una constelación

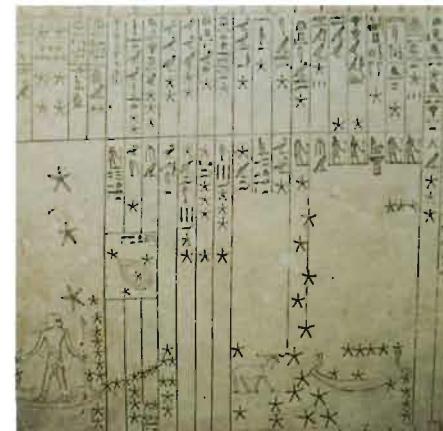


Figura 9 (dcha.): Sector sur del techo astronómico de la tumba de Senmut, arquitecto real de la reina Jatsepsut (S. XV a.C.). En él se puede ver la constelación del "Ibex" o la Cabra (Srt en jeroglíficos), tras la Gran Barca Celeste y antes de las Hadas y Orión. Según nuestra hipótesis, esta antigua constelación también habría sido conocida en Mesopotamia en los albores de la civilización, tal como demuestra la gliptica más antigua (ver Figura 3). En fechas posteriores, la 4ª constelación "zoomorfa", indicadora del invierno, evolucionaría en la figura de Suhur-mesh, la Cabra-Pez, antecedente inmediato de nuestra constelación zodiacal Capricornus.

Figura 10 (izq.): Avenida de las esfinges y primer pilono del gran templo de Amón-Ra en Karnak (Alto Egipto). En plena época imperial egipcia (h. S. XIV a.C.), el Equinoccio de Primavera abandonó la constelación del Toro para introducirse en una región celeste "sin nombre" hasta ese momento. Dicha región sería ocupada más tarde por la constelación del Carnero (Aries), animal totémico del Dios Amón, imperante en amplias zonas del Mediterráneo Oriental desde ese momento y hasta fechas muy posteriores. El origen no mesopotámico de Aries se demuestra por la constelación de El Aparcero que los antiguos babilonios reconocían hacia el S. VII a.C. en esa región del cielo (ver Tabla 1).

entra en el Inframundo. La figura del Escorpión es un referente común a muchas culturas del antiguo Oriente (de hecho, ya aparece en cerámica del periodo Hassuna -h. 6000 a.C.-) y, casi siempre, como figura negativa. Así, por ejemplo, el dios egipcio del mal, Set, toma figura de escorpión cuando trata de atacar a Isis y a Horus (el joven Sol) refugiados en los pantanos, y es también un escorpión (de hecho nuestro Scorpius), enviado por Artemisa (de nuevo la Gran Diosa en juego), el que hiere y mata a Orión en la mitología griega (recordemos que, en la constelación de Orión, los egipcios reconocían a Osiris, el dios de la Renovación, asesinado por Set).

La cuarta constelación requiere un estudio más detallado. Si consideramos lo que expusimos al analizar los datos de la Tabla 2, ahora debiera corresponder el turno a la constelación de Los Peces, pues, de hecho, Fómaljaut se traduce como "Boca del Pez del Sur" y, por tanto, nos encontraríamos ante un conjunto de peces de los que sólo dos



denominada Srt o Syt (traducible por la Oveja o la Cabra), representada de una forma que recuerda mucho a las de la glíptica mesopotámica (ver Figura 9). Esta constelación, claramente situada entre la Barca de Set (¿Scorpius+Sagittarius?) y las Hiades, tendría como estrella principal a Fomalhaut (denominada Estrella Srt en el Zodiaco de Dendera), que habría jugado un papel relevante en la astronomía del Antiguo Egipto (Belmonte 1996). Por tanto, si en Egipto la 4<sup>a</sup> Estrella Real recibía el nombre de "Cabra", puede resultar razonable suponer que esa misma constelación era conocida por la misma época en el resto del Fértil Creciente, cumpliendo su papel como marcador estacional del Solsticio de Invierno. Un hecho a destacar es que este conjunto de 4 constelaciones zoomorfas (ver Tabla 3) podría estar en el origen del nombre "Círculo de los Animales", con que en fechas posteriores se reconocería a todo el conjunto de constelaciones que marcan el "Camino del Sol".

Pero, hacia el 2000 a.C., el reloj de la precesión había vuelto a dejar fuera de hora a los marcadores estacionales. Nuevas "constelaciones zodiacales" eran necesarias para ocupar el vacío dejado por los marcadores "inservibles". Sin embargo, en este momento numerosos cambios técnicos y políticos estaban comenzando a producirse en todo Oriente Próximo. Uno de los más importantes es la entrada en escena, como gran potencia hegemónica durante casi 1000 años, a través de sus Imperios Medio (S. XX a XVIII a.C.) y Nuevo (S. XVI a X a.C.), del Egipto faraónico. Así, mientras que en Babilonia se creaban nuevas constelaciones, como el Aparcero, la Daga, la Balanza o la Cabra-Pez (luego incidiremos sobre estas dos últimas), en el

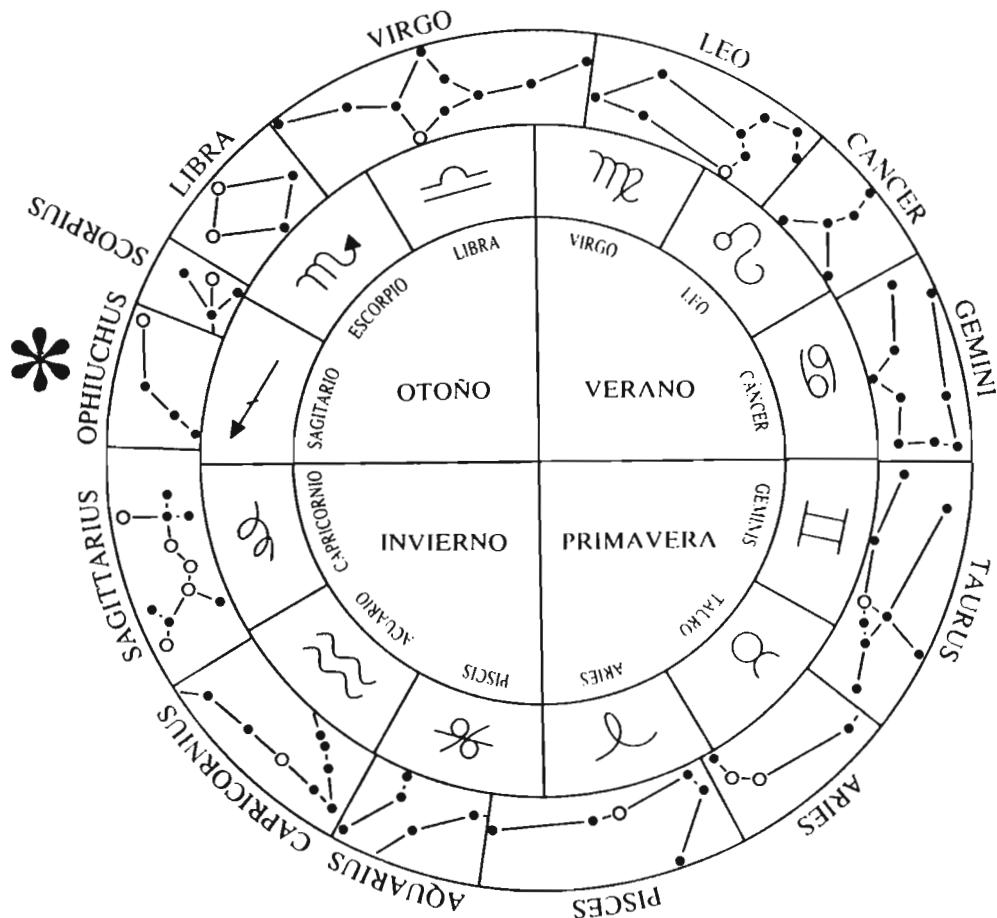


Figura 11. Representación de la posición actual de los Signos Zodiacales frente a las Constelaciones Zodiacales (o Eclípticas) que, como se puede apreciar, no son 12 si no 13 al atravesar la Eclíptica también la constelación de Ophiuchus (El Serpentario\*). Debido a la Precesión de los Equinoccios, el Punto Aries (en la frontera entre los signos de Aries y Piscis) se sigue moviendo en sentido horario de forma que, hoy en día, existe un desfase de un signo por constelación. Así, por ejemplo, el signo Cáncer, se sitúa frente a la constelación Géminis, mientras que el Signo Géminis cae de lleno en la constelación Tauro. En unos cuantos siglos más, el Punto Aries abandonará la constelación de Piscis para entrar en la de Acuario (Adaptado de Tohara 1993).

lugar ocupado por los jalones estacionales (Equinoccio de Primavera, Solsticio de Verano, Equinoccio de Otoño y Solsticio de Invierno, respectivamente), la Historia del Zodiaco iba a tomar por otros derroteros.

Con el Imperio Medio, cuyos faraones procedían de Tebas, comienza la escalada al poder de un dios destinado a los más altos designios durante más de 2000 años (de hecho, prácticamente hasta la llegada del Cristianismo), Amón, el "Escondido", más tarde identificado con el Sol en la figura de Amón-Ra (ver Figura 10). Uno de los animales totémicos de Amón era el carnero, y como tal es posible que esta divinidad comenzase a ser venerada en el Firmamento. El Carnero sagrado de Amón (nuestro Aries) habría pasado al cielo, ocupando un pequeño espacio entre el dios de las Aguas y el Toro (al que deja sin sus cuartos traseros), como jalón del renacimiento de la Primavera.

Por otro lado, en el Imperio Nuevo, los egipcios celebraban el comienzo del año y, quizás, el nacimiento del Sol, en el Solsticio de Verano. En ese instante, el dios solar Jepri, en forma de escarabajo pelotero, surgía del cuerpo de la diosa celeste Nut, empujando de espaldas al disco solar que surge detrás del horizonte. Parece razonable que la figura (malinterpretada) de un escarabajo pelotero, moviéndose de espaldas (el Sol, a partir del Solsticio de Verano camina hacia atrás) condujese a los griegos a la representación de la nueva constelación zodiacal como un cangrejo (nuestro Cancer) que ocuparía el poco espacio libre, si es que lo había, entre Gemini y Leo (de hecho, entre los árabes, la "constelación" del León -Al Asad- incluye entre sus límites la zona ocupada por Cancer).

Pasemos ahora a analizar las dos últimas constelaciones zodiacales: la Balanza y Capricornio. La Balanza (Zibanitum) parece tener un claro origen mesopotámico (ver Tabla 1) y su elección como jalón del Equinoccio de Otoño podría hacer referencia al equilibrio entre la duración de la noche y del día que se produce en esas fechas (van de Waerden 1974). Sin embargo, hay autores que postulan un posible origen egipcio puesto que la Balanza ocupaba un lugar destacado en los juicios del más allá, al pesarse sobre ella el corazón (ib) del difunto frente a la pluma de la verdad (maat). Si recordamos el papel ejercido por Pabilsag como guía de los muertos, una cierta relación puede entenderse. Finalmente, queremos constatar el hecho de que, tanto en la antigua Grecia como en Roma, una forma alternativa de designar la Balanza (Libra) era Chelae (Las Pinzas). Este es, creemos, un claro ejemplo de como una constelación extensa (Escorpión) fue escindida en dos (Chelae y Scorpius, propiamente dicha) para crear una nueva constelación que sirviese como nuevo marcador de las estaciones una vez la antigua había dejado de ser útil.

Un ejemplo aun más extraño de lo anterior lo encontramos en la última de las constelaciones zodiacales a estudiar, origen de nuestro signo de Capricornus, la constelación Cabra-Pez (Suhur-mesh) de los babilonios. Esta "constelación" debe ser muy antigua al haberse encontrado ya representaciones de ella en los "kudurru" cassitas del S. XII a.C. donde, asociada al dios Ea, actúa también como portadora de los difuntos al Inframundo (recordemos el papel similar ejercido por Pabilsag). En la fase segunda de creación de las constelaciones zodiacales (ver Tabla 3), habíamos propuesto la existencia de una constelación Cabra, asociada al Invierno y, por tanto, al Señor de las Aguas (Ea) quien, a su vez, es representado en numerosas ocasiones asociado a peces (ver Figura 7b).

Nuestra hipótesis final sobre la génesis del Zodiaco consiste en que estas dos figuras, la Cabra y el Señor de las Aguas con sus Peces, se habrían entremezclado y metamorfoseado para dar, finalmente, las 3 constelaciones invernales, la Cabra-Pez, el Aguador (o el Grande) y las Colas de Pez que, más tarde, darian lugar a los signos zodiacales, Capricornus, Aquarius y Pisces, respectivamente. Al tener una declinación demasiado meridional, y por tanto inadecuada para figurar entre el Zodiaco (cuyo límite sur máximo es -40° de declinación), la estrella "Cabra" original quedaría desplazada fuera de éste como Boca del Pez del Sur (Fum-al-Hut, en árabe).

Hacia el cambio de la Era, la Precesión de los Equinoccios iba a jugar aun una mala pasada al sistema zodiacal firmemente establecido. Los signos zodiacales (asociados

estrechamente a los puntos extremos y medios del "Camino del Sol") se iban a separar de las "constelaciones" zodiacales, en un proceso que aun continua hoy en dia. Hace unos 2000 años, el Punto Aries abandonaba la constelación de Aries para internarse en la de Pisces, dando lugar a una nueva "Era" Astrológica, sea lo que sea lo que eso signifique.

El caso es que, para los que gusten del anecdotario, la religión cristiana, inteligente a la hora de asimilar en su propio beneficio los ritos y costumbres de otras religiones, no podía dejar pasar un evento como éste. Por eso, si a Jesús se le denomina acertadamente "Cordero de Dios" (recordemos Aries, el Equinoccio de Primavera y el momento de la Anunciación a María), también es cierto que una pareja de peces fue un símbolo común del cristianismo temprano, no sólo por representar metafóricamente uno de los milagros más importantes de Jesús, si no también por que ICHTIS (Pisces en griego) eran las iniciales de un acrónimo que significaba Jesucristo Salvador.

El "diablo" de la precesión, para mayor confusión de muchos de nosotros, sigue jugando hoy en día con los signos y las constelaciones. Así, uno de los movimientos culturales con más predicamento en nuestro mundo actual es el denominado "Nueva Era" (New Age) que anuncia un cambio en la sociedad asociado a la entrada de la "Era" de Acuario (es decir, cuando el Punto Aries entre en la constelación de Aquarius; hecho éste absolutamente intrascendente desde el punto de vista científico). Eso sí, el pregón es un poco precipitado, pues el Equinoccio Vernal aun permanecerá en Pisces por lo menos 600 años más.

**Tabla 1:** Constelaciones babilónicas de las Tablas mulAPIN (Estrella Arado) que encabezadas por las Pléyades se situaban en el "Camino de la Luna". Se datan hacia el V-VI a.C. en el comienzo de la época neobabilónica. Se reconocen 10 de las 12 constelaciones que luego darían lugar a los signos zodiacales. Las constelaciones de Cáncer y Aries no eran conocidas por los babilonios por lo que se postula un posible origen egipcio de las mismas.

Nº	Nombre	Traducción	Identificación
1	MUL	La Estrella	Pléyades
2	GUD.AN.NA	El Toro de Anu -o Celeste-	Tauro
3	SIBA.ZI.AN.NA	El Verdadero Pastor Celeste (Dumuzi)	OrIÓN
4	SHU.GI	El Hombre Viejo	Sur de Perseo
5	GAM	La Espada	Parte de Auriga
6	MAS.TAB.BA.GAL.GAL	Los Grandes Gemelos (Gilgamesh y Enkidu)	Géminis
7	AL.LUL	El Vacío o la Daga	Cáncer y Proción
8	UR.GU.LA	El Gran León	Leo + ....
9	AB.SIN	Hija de la Luna (Inanna ... Shala)	Virgo con Espica
10	ZI.BA.NI.TUM	Las Balanzas	Libra
11	GIR.TAB	El que pincha	Escorpión
12	PA.BIL.SAG	El Flechador	Sagitario
13	SUHUR.MASH	La Cabra-Pez	Capricornio
14	GU.LA	El Grande (Ea)	Aquario + .....
15	ZIBATTI.MESH	Las Colas de Pez	Parte de Piscis
16	SHIM.MAH	La Golondrina	Pez SW y S de Pegaso
17	A.NU.NI.TUM	La Señora del Cielo (Ereshkigal)	Pez NE y Andrómeda
18	LU.HUN.GA	El Aparcero	Sector de Aries

**Tabla 2:** Origen de las constelaciones zodiacales según A.Gurshtein (1993). En base al área celeste, la longitud eclíptica y el número de días en que el Sol se encuentra en cada una de estas constelación, este autor identifica tres grupos de formación de constelaciones zodiacales, debido a la precesión de los equinoccios. Un primer grupo de grandes constelaciones basado en la dualidad, una característica típica según este autor de las culturas indoeuropeas. Un segundo grupo de constelaciones, mayormente de carácter animalístico y, finalmente, un tercer grupo de pequeñas constelaciones con una génesis distinta. Notar como mejora el ajuste si, según nuestra propuesta, cambiamos Piscis por Acuario, creando una primera generación de constelaciones "divinas" y una segunda generación de constelaciones "zoomórficas".

NOMBRE	AREA (ºXº)	I(h)	Tº SOLAR (días)
Grupo Gem (6000-4000 a.C)			
Gemini	514	2.4	30
Virgo	1290	3.5	44
Sagittarius	867	2.7	34
Pisces	889	3.0	38
MEDIA	890±80	2.9±0.1	36.5±1.5
Grupo Tau (4000-2000 a.C)			
Taurus	797	2.7	38
Leo	947	2.6	27
Scorpio	497	2.1	21
Aquarius	980	3.7	24
MEDIA	805±55	2.8±0.2	27.5±1.9
Grupo Ari (2000-250 a.C)			
Aries	441	1.7	25
Cancer	506	1.3	21
Libra	538	1.6	23
Capricornus	414	1.9	24
MEDIA	475±14	1.6±0.1	23.0±0.4
Cambiando Piscis por Acuario:			
Grupo Gem	913±80	3.1±0.2	33.0±2.1
Grupo Tau	782±50	2.6±0.1	31.0±2.1
Grupo Ari	475±14	1.6±0.1	23.0±0.4

**Tabla 3:** Hipótesis sobre el origen del Zodiaco. Se tendrían tres fases, cada una de ellas asociada al cambio de posición del Equinoccio de Primavera, con respecto a las constelaciones, en períodos de 2100 años aproximadamente. El nombre "Zodiaco" propiamente dicho provendría de la segunda fase en que cada una de las posiciones extremas y medias del Sol se asociaba a una constelación en forma de animal totémico. Finalmente, en la 3<sup>a</sup> fase las "constelaciones" del Señor de las Aguas (1<sup>a</sup> época) y de la Cabra (2<sup>a</sup> época) se habrían mezclado y metamorfosado para dar, finalmente, los Peces Orientales (♓), el Aguador (♒) y la Cabra-Pez (♑). Al tener una declinación demasiado meridional, y por tanto inadecuada, la estrella "Cabra" original habría quedado desplazada fuera del Zodiaco como Boca del Pez del Sur.

Fase 1: En el origen (h. 6000 a.C.)

Estación	Fenómeno	Constelación	Signo
Primavera	Nacimiento	Gemelos Primordiales (¿Adán y Eva?)	♊
Verano	Plenitud	La Madre Tierra (La Cosecha: Spica)	♍
Otoño	Decrepitud	El Flechador (Muerte de la Naturaleza)	♐
Invierno	Fuente de Vida	Señor de las Aguas (Ea y los Peces)	♓,♓

Fase 2: Las Estrellas Reales ... El Círculo de Animales (h. 3500 a.C.)

Estación	$(\alpha, \delta)$	Estrella ( $\alpha, \delta$ )	$m$	Constelación	Signo
Primavera	(0,0)	Aldebarán (0,-5)	0.9	El Toro Celeste	♉
Verano	(6,24)	Régulo (5.5,24)	1.3	El Gran León	♌
Otoño	(12,0)	Antarés (12,-4)	1.1	El que pincha	♏
Invierno	(18,-24)	Fomalhaut (18,-44)	1.2	La Cabra (Ibex)	♑?

Fase 3: Las Nuevas Adquisiciones (h. 1400 a.C.):

Estación	Fenómeno	Constelación	Lugar	Signo
Primavera	Nacimiento	Carnero Dorado	Egipto	♈
Verano	Retroceso del Sol	Escarabajo Pelotero	Egipto	♉
Otoño	Equilibrio N-D	Balanza	Eg. o Bab.	♊
Invierno	Las Aguas	Ver texto	Babilonia	♋

## BIBLIOGRAFÍA:

- Antequera L. "Altamira: Astronomía y Religión en el Paleolítico". En Arqueoastronomía Hispana, Grupo Sirius S.S., Madrid (1994)
- Belmonte J A "Fomalhaut and the Srt Constellations" Jour for the History of Astronomy. Enviado (1996).
- Desroches-Noblecourt C "Le Zodiaque de Pharaon". Archaeología 292, 21 (1993).
- Gingerich O. "The Origin of the Zodiac". Sky and Telescope 67, 218 (1984)
- Gurshtein A.A. "On the origin of the Zodiacial Constellations". Vistas in Astronomy 36, 171 (1993)
- Gurshtein A.A. "Prehistory of Zodiac Dating. 3 strata of upper paleolithic constellations" Vistas in Astronomy 39, 347 (1995)
- Hartner W. "The earliest history of the constellations in the Near East and the motif of the lion-bull combat". Journal of Near Eastern Studies, 24,1 (1965).
- Heuter G "Stars names, origins and misconceptions". Vistas in Astronomy 29, 237 (1986).
- Martos Rubio A. "Historia de las Constelaciones". Tomo VI. Equipo Sirius, Madrid (1992).
- Ovenden M.W. "The Origin of the Constellations". The Phil. Jour. 3, 1 (1966)
- Roy A.E. "The Origin of the Constellations". Vistas in Astronomy 27, 171 (1984).
- Toharia M. "Astrología ¿Ciencia o Creencia?" Colección científica McGraw Hill (1993)
- Van de Waerden B.L. "Science Awakening II. The Birth of Astronomy" Leiden & New York (1974)



# EL TALLER DEL ASTRÓNOMO

Ramón J. García López

Instituto de Astrofísica de Canarias  
Profesor de la Universidad de La Laguna, Departamento de Astrofísica

## RESUMEN

Este trabajo pretende proporcionar una visión realista, aunque asequible en general, del proceso asociado a una observación astronómica, resaltando que ésta es la herramienta clave de la Astrofísica. Pasaremos revista a algunos de los instrumentos y técnicas básicas, haciendo hincapié en las utilizadas en los observatorios de Canarias. Se proporciona también una descripción breve de algunos instrumentos astronómicos desarrollados y/o construidos en el Instituto de Astrofísica de Canarias y, por último, se comentan las diferencias que existen entre las observaciones realizadas desde La Tierra y desde el espacio.

## INTRODUCCIÓN

El primer aspecto importante a resaltar es que la **Astrofísica es una ciencia observational** y no experimental. Esto quiere decir que el astrónomo no puede modificar a su antojo las condiciones de un experimento. Lo único que puede hacer es observar fenómenos que tengan lugar en distintas condiciones físicas (habitualmente también en diferentes posiciones del cielo) y procurar entenderlos en su conjunto.

En general, los astrónomos desean obtener **información** que permita determinar parámetros físicos (temperatura, composición química, etc.) asociados a un cierto objeto celeste. Esta información viaja por el espacio codificada de alguna manera a través de **un canal de transmisión**. Este canal puede transmitir la información en forma **corpuscular** (p. ej. meteoritos que llegan a La Tierra), como **radiación electromagnética** en diferentes longitudes de onda (luz de diferentes colores o niveles de energía), o a través de **efectos gravitatorios** (p. ej. modificación del movimiento de un objeto celeste por efectos de la presencia de otro). Es importante tener en cuenta que el canal de transmisión también **altera o modifica la información** (p. ej. la absorción que sufre la radiación electromagnética a su paso por el medio interestelar es diferente según el color la misma). Por otra parte, el propio **observador distorsiona** también la información que recibe. Y esto está asociado a las técnicas de detección que utiliza.

En este artículo nos preocuparemos exclusivamente de la información que viaja codificada en forma de radiación electromagnética, y nos concentraremos sólo en las regiones **ultravioleta, visible e infrarroja** del espectro (dejando a un lado el radio, los rayos X y los rayos gamma). Estas regiones pueden ser estudiadas básicamente con el mismo tipo de instrumentación, y constituyen fundamentalmente el conjunto de observaciones astronómicas que se llevan a cabo en los **observatorios de Canarias**. En la mayor parte de los casos estas observaciones pueden ser hechas desde La Tierra, pero hay situaciones que requieren la utilización de satélites situados fuera de la atmósfera terrestre.

En este contexto, **el taller del astrónomo** estará constituido entonces por las siguientes herramientas: **telescopios, instrumentación auxiliar y detectores**. De todos ellos nos ocuparemos con cierto nivel de detalle en los siguientes apartados.

## LA OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

Una campaña de observación astronómica consta básicamente de los siguientes pasos:

1.) **Solicitud del tiempo de observación.** En todos los observatorios profesionales existe un comité encargado de repartir los tiempos de observación de manera que haya un aprovechamiento óptimo de los mismos. Hay que tener en cuenta que los tiempos de observación disponibles en grandes instalaciones telescopicas son escasos comparados con la gran cantidad de propuestas interesantes sugeridas por los investigadores, por lo que resulta fundamental que se repartan en función de la valía de las propuestas. En esta primera fase se presenta una solicitud ante el Comité de Asignación de Tiempos en la que figura una

**justificación científica** de las observaciones que se quieren llevar a cabo, y se muestra también que, desde el punto de vista técnico, es posible realizar las observaciones con el(s) instrumento(s) solicitado(s).

2.) **Preparación detallada de las observaciones.** Una vez concedido el tiempo de observación y asignadas las fechas para las mismas, es preciso diseñar detalladamente lo que se va a hacer en el telescopio. Hay que verificar la visibilidad de los objetos a observar y los tiempos de exposición estimados para obtener los resultados deseados. Por otra parte, es importante disponer también de un **segundo programa de observación** que sea menos exigente que el **programa principal**, de manera que pueda llevarse a cabo si las condiciones atmosféricas y/o técnicas no permitiesen realizar el programa principal. La idea que subyace aquí de nuevo es que el tiempo de observación es un bien preciado y que hay que procurar aprovecharlo siempre que se pueda.

3.) **Observación en el telescopio.** Éste es el momento de llevar a cabo las observaciones. El astrónomo debe tener previstos los detalles de las mismas, pero debe tener también la suficiente **flexibilidad** para modificar sus observaciones si surge algún tipo de problema, o si por causas fortuitas se encuentra con la posibilidad de llevar a cabo medidas interesantes de algún fenómeno excepcional que esté teniendo lugar en esos momentos (p. ej. la aparición de una nueva supernova en el cielo).

4.) **Descontaminación de los efectos producidos por las técnicas de observación y detección.** A este proceso se le conoce habitualmente como **“reducción de datos”**, y consiste en entresacar de las medidas realizadas los valores asociados exclusivamente al objeto que estamos observando. El tipo de reducción de datos que se lleve a cabo dependerá fuertemente del tipo de observaciones realizadas y de los instrumentos utilizados en las mismas.

Sólo a partir de este momento, en que ya se dispone de la información observacional requerida, es cuando se realiza el **análisis** de los datos obtenidos para la investigación en curso.

Como se ve, una observación astronómica conlleva un **proceso complejo** desde que un investigador sugiere una idea hasta que se obtienen los datos para desarrollarla. A partir de aquí se puede entender también que, a diferencia de la visión generalizada según la cual los astrónomos pasan la mayor parte del tiempo en los observatorios, el tiempo dedicado individualmente a las observaciones es reducido (generalmente de dos a cuatro campañas por astrónomo a lo largo del año), y que la mayor parte del trabajo científico se realiza en los Institutos de Investigación y Departamentos Universitarios.

## TELESCOPIOS

Los telescopios constituyen el **instrumento principal** en el taller del astrónomo. Desde su invención han posibilitado el estudio sistemático de los objetos celestes. Sus **características** más importantes son:

1.) **Capacidad de colectar de fotones.** Cuanto mayor sea el tamaño del telescopio mayor será la cantidad de radiación que reciba por unidad de tiempo. Por lo tanto, la utilización de mayores telescopios nos permite observar objetos más débiles que, en general, se encuentran más alejados de nosotros por lo que alcanzaremos cada vez zonas más lejanas del Universo. Al recoger una mayor cantidad de energía, los telescopios de mayor diámetro permitirán también obtener más información de fuentes más cercanas, que son detectadas u observadas menos eficientemente con telescopios más pequeños.

2.) **Resolución espacial.** Un telescopio puede considerarse como una abertura que deja pasar a su interior una fracción de la luz que recibe. La radiación electromagnética es un

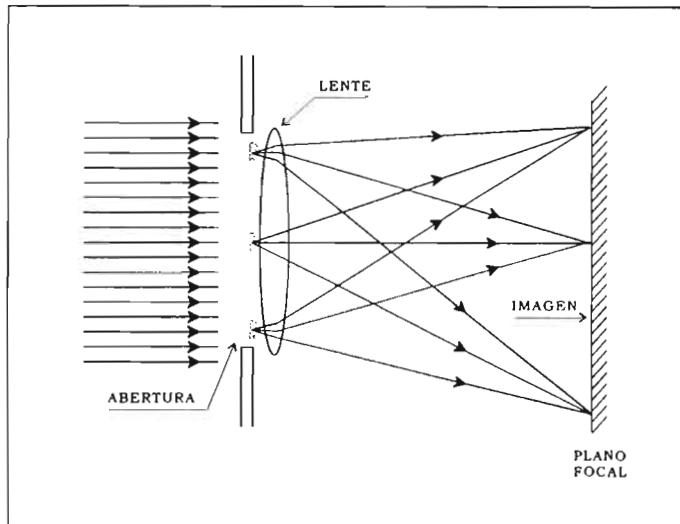


Figura 1.- Esquematización del fenómeno de difracción que sufre la luz procedente de un objeto puntual situado en el infinito al atravesar una abertura tras la que se encuentra una lente convergente. Las líneas parelolas a la entrada de la abertura representan los rayos asociados a un frente de onda plano que llega a la misma. Cada uno de los puntos iluminados de esta abertura se comporta como un nuevo punto emisor, y la imagen que se obtiene en el plano focal es el resultado de la contribución de todos ellos (adaptado de Kitchin 1984; ver bibliografía).

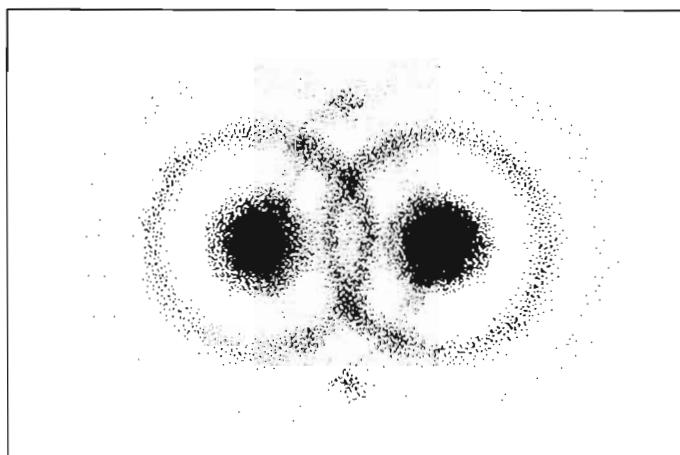


Figura 2.- Imagen de dos objetos puntuales cercanos en el cielo a través de un telescopio de abertura circular (adaptado de Kitchin 1984).

**fenómeno ondulatorio**, por lo que cuando un frente de onda procedente de un punto situado muy lejos de nosotros llega al telescopio se produce un fenómeno de **difracción**. Este proceso consiste básicamente en que cada punto del frente de onda que atraviesa la abertura del telescopio se convierte en un punto emisor de luz, por lo que la imagen que se obtiene al final es la combinación de las contribuciones procedentes de cada uno de estos puntos, tal y como ilustra la Figura 1. Como resultado se tiene que la imagen de un objeto puntual no es un punto sino una distribución de zonas claras y oscuras. Si la abertura del telescopio es circular o anular (que es lo habitual) la distribución que se obtiene se denomina **disco de Airy**, y consiste en un máximo de iluminación central rodeado de anillos concéntricos menos brillantes. La resolución espacial, es decir, la habilidad del telescopio para separar dos puntos cercanos en el cielo, dependerá de esa distribución de iluminación (ver Figura 2). Para una longitud de onda dada (para un color dado) el tamaño de esa distribución disminuye al aumentar el diámetro del telescopio, por lo que será más fácil no confundir la información procedente de dos puntos cercanos en el cielo y, por tanto, la resolución del telescopio será mayor.

3.) **Escala en el plano focal.** La imagen del objeto observado se forma en el plano focal del telescopio. Cuanto más pequeño sea el tamaño de esta imagen más difícil será observar detalles de la misma. De ahí que otra característica importante de los telescopios es que permitan obtener **imágenes suficientemente grandes** de manera que los objetos extensos puedan ser estudiados en detalle. Cuanto mayor sea la distancia focal, esto es, la distancia recorrida por la luz desde que llega al telescopio hasta que se forma la imagen, mejor será la escala en el plano focal (cada milímetro del plano focal recogerá una porción menor de cielo, por lo que se apreciarán más detalles en la imagen).

4.) **Calidad de imagen.** Es importante, por otra parte, que la imagen que se obtenga esté **libre de aberraciones** en la medida de lo posible. Los diferentes componentes ópticos del telescopio (lentes y espejos) deberán ser diseñados y construidos de manera que se minimice la distorsión de la imagen. Además, el tamaño y localización de los distintos componentes deben ser tales que proporcionen un **campo de visión uniformemente iluminado**. Existe también el problema de la **curvatura del plano focal**. En la mayor parte de los telescopios astronómicos la imagen no se forma sobre una superficie plana sino que describe una curva en el espacio. Dado que la inmensa mayoría de los detectores que se usan tienen superficies planas, será necesario dotar a los telescopios de dispositivos ópticos adicionales que actúen como "aplanadores de campo" siempre que se desee observar campos grandes. Si lo que se observa es un campo pequeño en el centro del plano focal, la curvatura es en general despreciable.

En la mayor parte de las ocasiones, sin embargo, la resolución y la calidad de imagen

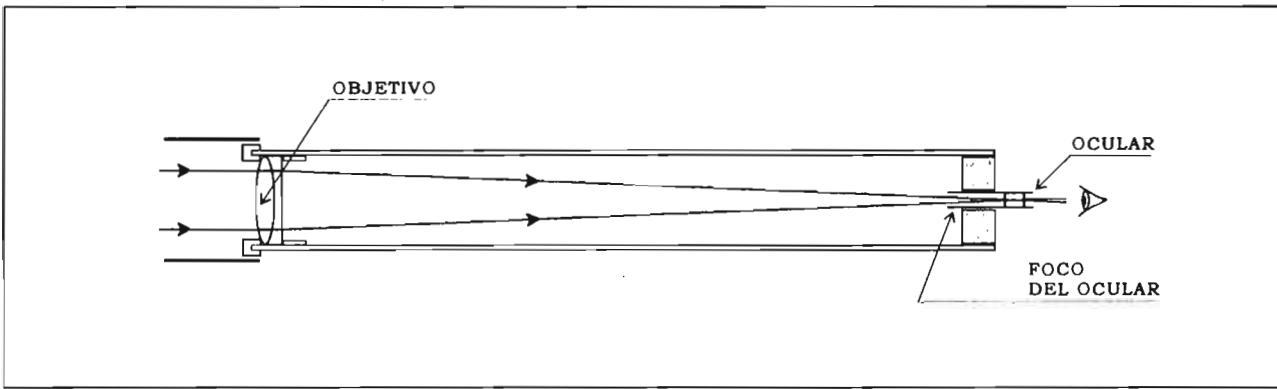


Figura 4.- Esquema básico de un telescopio refractor (adaptado de Kitchin 1984)



Figura 3.- La cúpula del telescopio William Herschel se alza sobre el "mar de nubes" en el Observatorio del Roque de los Muchachos (2400 metros de altitud), en la isla de La Palma.

van a estar limitadas por la **atmósfera terrestre** y no por el telescopio. La atmósfera hará que la imagen de un objeto puntual sea una mancha o distribución de intensidades (denominada disco de **"seeing"**) de mayor tamaño y de diferente forma que la proporcionada por el telescopio. La razón de ello hay que buscarla en las capas turbulentas que atraviesa la luz a su paso por la atmósfera de La Tierra. Resulta entonces fundamental localizar **lugares óptimos** para los observatorios. Este es el caso de las **Islas Canarias** (especialmente las occidentales), en que la capa donde se forman las nubes se sitúa por debajo de las cumbres, aislando el aire húmedo y turbulento cercano al océano, y permitiendo un flujo laminar más estable sobre los telescopios. La Figura 3 muestra la cúpula del telescopio William Herschel sobre el "mar de nubes" en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma).

Actualmente se tiende también a desarrollar técnicas que permitan eliminar los efectos perjudiciales de la atmósfera. Se las denomina **óptica activa** y **óptica adaptativa** y operan de manera que se puede conocer en tiempo real la forma que adquiere el frente de onda a su paso por la atmósfera terrestre, y así se pueden corregir los defectos del mismo mediante el movimiento rápido de espejos y lentes.

Una vez conocidas las características básicas que definen a un telescopio, podemos clasificarlos por su **construcción** en tres clases:

1.) **Telescopios refractores.** El telescopio utilizado por Galileo corresponde a este tipo. Se trata de telescopios que están formados exclusivamente por lentes. En su versión más sencilla están constituidos por un objetivo que enfoca la luz de los objetos celestes en un punto, y un ocular que la hace llegar al ojo como si viniese del infinito, tal y como se aprecia en la Figura 4. Debido a la dificultad de tallar lentes de gran diámetro con un bajo nivel de aberraciones y a los problemas de sujeción mecánica, estos telescopios están **limitados** a tener diámetros máximos en torno a un metro. Se utilizaron mucho en el pasado y actualmente sólo se utilizan en telescopios dedicados a usos específicos (p. ej. círculos meridianos), como buscadores o telescopios guía para otros mayores, o en el mundo de los astrónomos aficionados.

2.) **Telescopios reflectores.** Estos telescopios focalizan la luz que les llega haciendo uso de espejos. Ello ha permitido construir **telescopios de gran diámetro**, pues lo único que se precisa es tallar una superficie sobre la que se deposita una capa de material reflectante (usualmente aluminio). Son más fáciles de sujetar que las lentes ya que se puede aprovechar

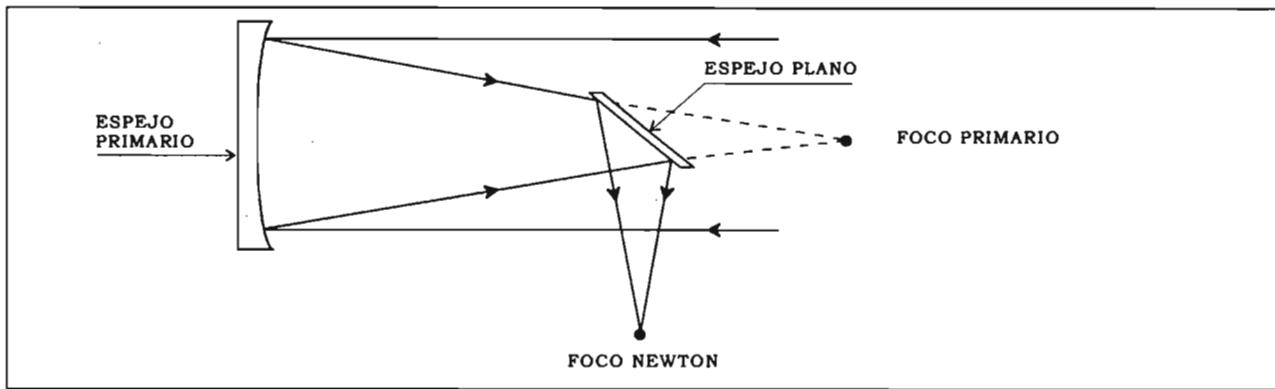


Figura 5.- Esquema básico de un telescopio de tipo Newton (adaptado de Kitchin 1984).

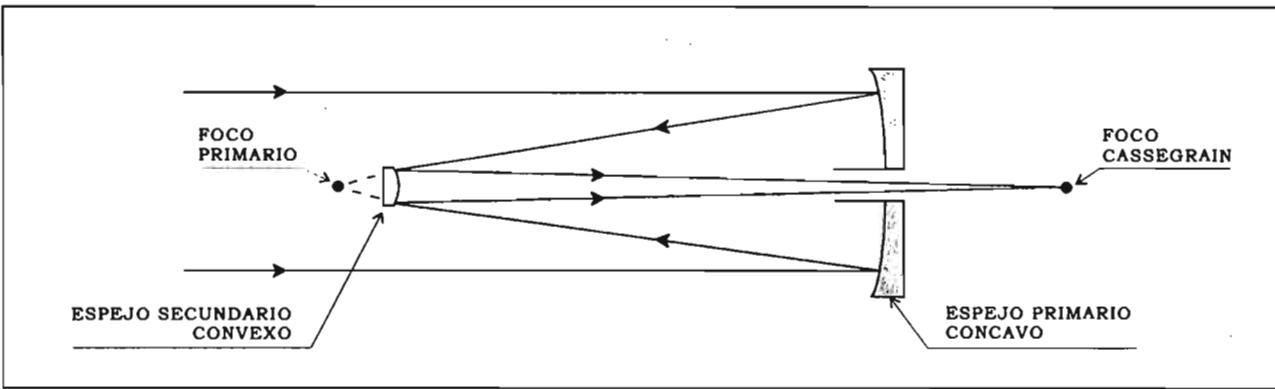


Figura 6.- Esquema básico de un telescopio de tipo Cassegrain (adaptado de Kitchin 1984).

toda su superficie posterior. El primero de ellos fue inventado por Isaac Newton en 1671. Resulta más sencillo pulir superficies de gran diámetro (8 metros hoy en día) para producir espejos, y tienen la ventaja adicional de no presentar aberración cromática (diferentes colores proporcionan imágenes en distintos puntos del plano focal debido al paso de la luz a través de una lente). Existen diferentes diseños entre los que podemos destacar los siguientes:

- a.) **Un único espejo.** Se trata de telescopios formados por un único espejo de superficie generalmente paraboloidal. Proporcionan una gran iluminación en su foco pero están limitados a campos angulares pequeños en el cielo.
- b.) **Tipo Newton.** Se trata del primer diseño práctico de un telescopio reflector. El tipo de imagen que proporcionan es similar a la de los telescopios de un único espejo, y la diferencia radica en que se hace uso de un espejo secundario plano que desvía la posición del foco a un lado del telescopio (ver Figura 5). En el diseño original de Newton el espejo primario tenía superficie esférica. La utilización de un paraboloides disminuye las aberraciones. Por su simplicidad y bajo coste son muy utilizados por los astrónomos aficionados. Desde el punto de vista profesional, no presentan ventajas frente a los telescopios de un único espejo; tienen como desventaja la mala accesibilidad del foco para colocar instrumentación, presentando grandes problemas de contrapesado. Además, la presencia del espejo secundario introduce una pérdida adicional de luz.
- c.) **Tipo Cassegrain.** Son también telescopios formados por dos espejos, pero las superficies de ambos son curvas elegidas de manera que se disminuya al máximo el efecto de las aberraciones. El diseño más eficiente en este sentido incorpora los espejos primario y secundario con forma de hiperboloides (uno cóncavo y el otro convexo). Se le denomina **Ritchey-Chrétien**, y se trata del diseño más utilizado. Además, los telescopios tipo

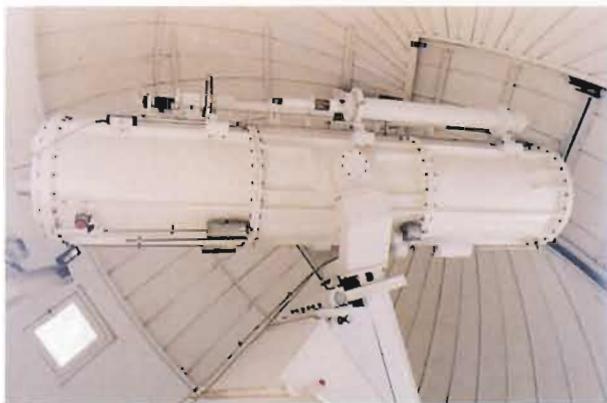


Figura 7(izq).- Telescopio solar tipo Gregory instalado en el Observatorio del Teide (Tenerife). Nótese el tubo metálico que encierra el telescopio de manera que se pueda hacer el vacío en su interior.

Figura 8(dcha).- Vista general de cuatro de las torres en las que están instalados telescopios solares en el Observatorio del Teide.



Cassegrain disponen de un agujero en el centro del espejo primario a través del cual pasa la luz reflejada en el espejo secundario, formando imagen detrás de aquél (Figura 6). Esto proporciona una buena accesibilidad al foco del telescopio y disminuye los problemas de contrapesado al colocar instrumentación en el mismo. La principal ventaja del sistema Cassegrain viene dada por el hecho de que el espejo secundario expande el haz procedente del primario de tal forma que la distancia focal efectiva del sistema es varias veces la del espejo primario, pero utilizando una longitud relativamente corta.

d.) **Tipo Gregory.** En este caso los espejos primario y secundario son elipsoides cóncavos para minimizar el efecto de las aberraciones. Una diferencia importante con respecto a los telescopios de tipo Cassegrain radica en que ahora el foco del espejo primario se encuentra situado entre los dos espejos, y no detrás del espejo secundario como en los anteriores. La calidad de imagen es, en general, mejor en los telescopios de tipo Gregory. Sin embargo, la obstrucción de la luz sobre el espejo primario producida por la presencia del espejo secundario es mayor que en los de tipo Cassegrain, siendo también mayor la longitud del telescopio que proporciona una misma distancia focal.

3.) **Sistemas catadióptricos.** Utilizan una lente correctora que compensa las aberraciones introducidas por los espejos. Esta lámina correctora debe diseñarse de manera que no introduzca aberración cromática. Se encuentran nuevamente limitados en su diámetro (1.2 metros máximo), y proporcionan una excelente calidad de imagen para grandes campos angulares. Un ejemplo de este tipo de sistemas son los telescopios tipo **Schmidt-Cassegrain**, en los que a un telescopio tipo Cassegrain se le ha añadido una lámina correctora y se ha desplazado el diafragma de apertura (que controla la cantidad de luz que entra al telescopio) desde el espejo primario a esta lámina. Se dispone así de una configuración que permite eliminar eficientemente las aberraciones.

Merece la pena detenernos momentáneamente a considerar también algunas características peculiares de los telescopios que se dedican a la observación del Sol. Por el objeto al que apuntan se trata de telescopios que reciben un enorme flujo de energía. De ahí que para evitar tanto que se quemen las lentes y espejos, como que el aire caliente distorsione la calidad de la imagen, suelen operar al vacío. Esto se consigue encerrando el telescopio en una estructura metálica que dispone de una

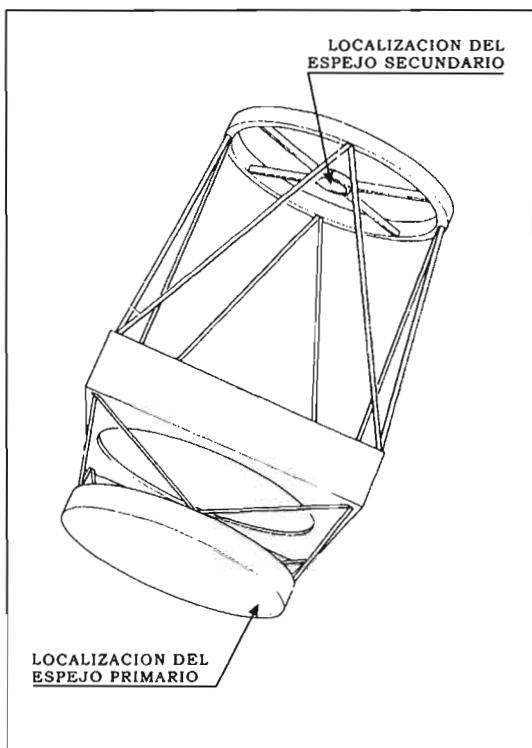
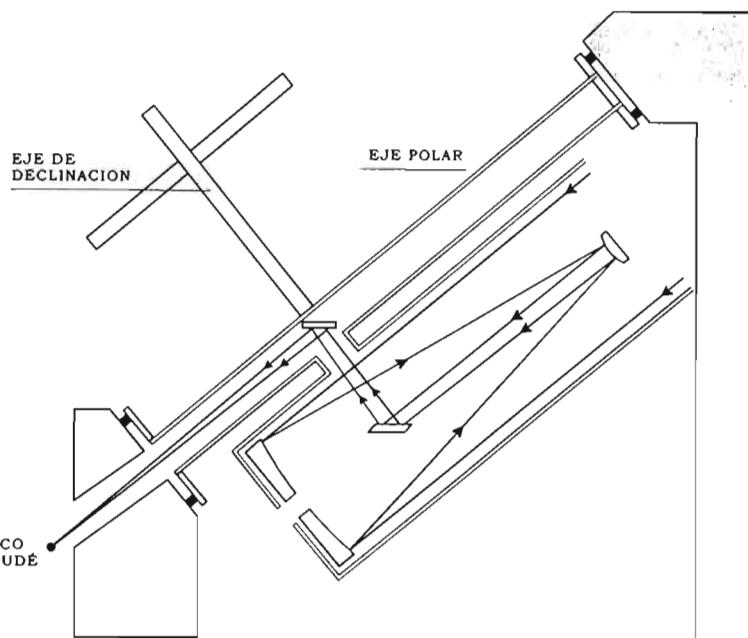


Figura 9.- Estructura de Serrurier ideada para soportar telescopios de dos espejos (adaptado de Kitchin 1984).



Figura 10 (izq).- Telescopio de 3.6 metros del Observatorio de La Silla en Chile. Proporciona un buen ejemplo de montura equatorial en forma de horquilla.  
 Figura 11 (dcha).- Ejemplo de un foco Coude practicado en una montura inglesa modificada (adaptado de Kitchin 1984).



ventana transparente a la entrada del mismo, tal y como se observa en la Figura 7, que muestra el telescopio solar tipo Gregory instalado en el Observatorio del Teide (Tenerife). Por otra parte, estos telescopios suelen tener grandes distancias focales para proporcionar una buena escala en el plano focal. Además, están ubicados a cierta altura sobre el suelo y sus edificios pintados de blanco, para evitar las turbulencias presentes en el aire de los alrededores debidas al calentamiento del suelo y el edificio producido por el Sol (ver Figura 8).

En los observatorios del Teide (OT) y del Roque de los Muchachos (ORM) está instalada la mejor batería de telescopios solares europeos. Entre la instrumentación de la que éstos disponen se encuentra el **Correlador Solar**. Se trata de un dispositivo diseñado y construido en el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) que permite corregir en tiempo real la inclinación del frente de onda producida por la atmósfera terrestre. Esto proporciona una mejora considerable en la calidad de las imágenes solares.



Figura 12 (dcha) - Esquema del telescopio William Herschel, que dispone de montura de norquilla altazimutal. Se ilustra también la localización del foco Nasmyth.

Una vez clasificados los telescopios según sus características y su construcción, pasemos revista a sus **monturas**. El soporte mecánico de los distintos tipos de telescopios, así como el control de sus movimientos, juegan un papel fundamental. Por una parte, las lentes sólo se pueden sujetar por sus extremos lo que hace difícil disponer de telescopios con lentes de gran diámetro. Por otra parte, según va creciendo el diámetro de los espejos resulta cada vez más complicado el soporte de los mismos. Tipicamente, para soportar un espejo primario de diámetro superior a un metro hace falta colocar soportes debajo y a los lados del mismo, para impedir que éste gire o se desplace con el movimiento del telescopio. En el caso de los telescopios en los que se aplica el principio de la óptica activa, estos soportes se transforman en **actuadores** que son capaces de corregir las flexiones producidas en el espejo por el movimiento del telescopio y, además, servirán también para corregir en tiempo real las deformaciones del frente de onda causadas por variaciones lentas de la atmósfera.

La solución adoptada tradicionalmente para colocar los diferentes espejos, lentes y láminas correctoras que constituyen el telescopio ha sido la de

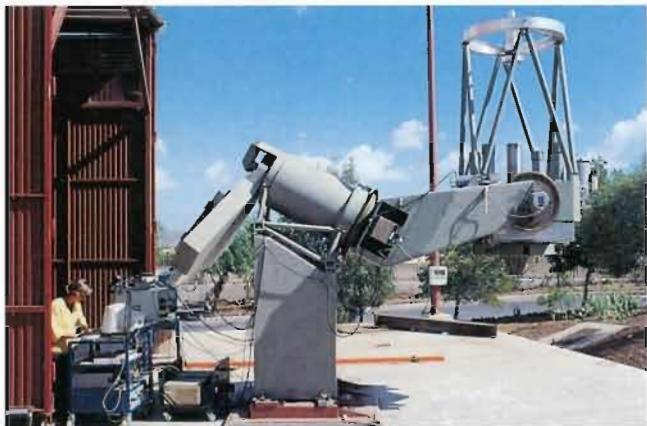


Figura 13.- Telescopio IAC80 durante la fase de prueba en el IAC, antes de su instalación en el Observatorio del Teide.

utilizar un tubo que contenga a todos los componentes. Esta solución es válida para pequeños telescopios (inferiores a un metro), en los que se puede conseguir que el tubo se mantenga rígido frente a las flexiones producidas al moverse el telescopio. Sin embargo, esto no resulta posible según va creciendo el diámetro de los telescopios. La solución consiste entonces en diseñar una estructura abierta en la que las flexiones sufridas por el espejo primario sean iguales a las del espejo secundario, permaneciendo alineados los distintos componentes ópticos. La estructura más comúnmente utilizada que permite este comportamiento es la llamada **estructura de Serrurier**, que se aprecia en la Figura 9.

En lo que se refiere al **movimiento del telescopio**, podemos hablar de dos tipos de **monturas** fundamentales:

1.) **Ecuatorial**. Está constituida por un sistema que tiene dos ejes de rotación que son perpendiculares entre sí. Uno de ellos, el **eje polar o de ascensión recta**, es perpendicular al plano del ecuador y, por tanto, paralelo al eje de rotación de La Tierra. El otro eje se denomina **eje de declinación**. La declinación representa la altura angular de un punto en el cielo respecto al ecuador. Esta montura presenta la gran ventaja de necesitar del **movimiento alrededor de un único eje** (el eje polar) para una declinación dada. En efecto, dado que el movimiento aparente de los objetos celestes es debido a la rotación de La Tierra, si apuntamos el telescopio a un objeto situado en un punto del cielo sólo tendremos que mover el telescopio alrededor del eje polar en el sentido contrario al de la rotación terrestre para mantener siempre el objeto en el campo de visión del telescopio. Dentro de las monturas ecuatoriales podemos distinguir, entre otras, los siguientes tipos: **horquilla, inglesa y alemana**, que representan tres formas distintas de solucionar un mismo problema. La Figura 10 muestra el telescopio de 3.6 metros del Observatorio de La Silla (Chile), donde se aprecia claramente la montura ecuatorial en forma de horquilla. Es posible también alargar la distancia focal del telescopio haciendo uso de una serie de espejos auxiliares. Se desvía el haz de luz siguiendo primero el eje de declinación y luego el eje polar, de manera que el foco esté en un punto fijo situado fuera del telescopio. Se puede disponer entonces de instrumentación voluminosa y pesada que no cuelga del telescopio ni se mueve con el mismo. A este tipo de foco se le denomina **foco Coudé**. La Figura 11 muestra un ejemplo de foco Coudé practicado en una variación de la montura inglesa.

2.) **Altazimutal**. Dispone también de dos ejes perpendiculares entre sí. El eje **azimutal**, que es perpendicular al plano del horizonte del lugar, y el de **altura o elevación**. La elevación representa la altura angular de un punto en el cielo medida respecto al horizonte. En este caso resulta necesario realizar **movimientos en ambos ejes** para poder seguir un objeto celeste. La utilización de ordenadores permite un control exacto de estos movimientos. La ventaja de las monturas altazimutales frente a las ecuatoriales radica en que permiten soportar los movimientos de los espejos de gran diámetro con menos flexiones. Por otra parte, un telescopio con montura altazimutal puede disponer fácilmente de otro tipo de foco. Se trata del **foco Nasmyth**, que se obtiene desviando la luz según el eje de elevación mediante un espejo plano. Esto permite la instalación de instrumentación grande o pesada en plataformas horizontales que giran con el telescopio, tal y como se aprecia en la Figura 12.

Debemos considerar, por último, las **cúpulas** de los telescopios. Su objetivo principal consiste en resguardar éstos del entorno. Sin embargo, la existencia de diferencias entre las condiciones en el interior y el exterior de las cúpulas propiciará una degradación de la imagen. De ahí que cada vez se tenga más conciencia de la necesidad de diseñar las cúpulas de manera que introduzcan la menor distorsión posible en la calidad de imagen.

En el Observatorio del Teide se encuentra instalado el telescopio **IAC80** (80

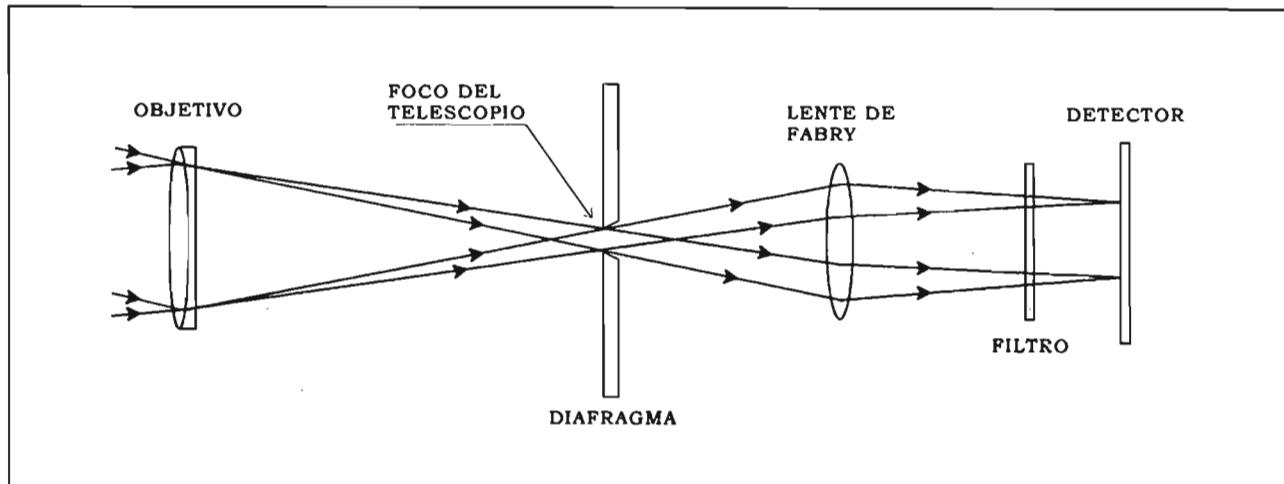


Figura 14.- Esquema de la localización de los componentes básicos en un fotómetro clásico. Por simplicidad en el dibujo el telescopio ha sido sustituido por una lente objetivo. El tamaño del diafragma limita el campo que se puede observar en el cielo (adaptado de Kitchin 1984).

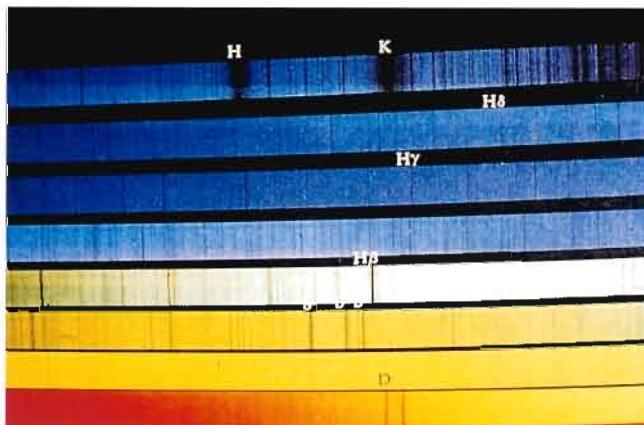


Figura 15.- Porción del espectro solar obtenido con un espectrógrafo de alta resolución. Se observa la variación de longitudes de onda (colores) a lo largo del mismo, así como la presencia de líneas de absorción (bandas oscuras) producidas por la presencia de distintos elementos químicos en la atmósfera del Sol.

centímetros de diámetro) que fue diseñado y construido íntegramente en el IAC. La Figura 13 muestra el telescopio durante su fase de prueba en el IAC antes de su traslado al observatorio. El conjunto de telescopios instalados en los observatorios de Canarias, que van desde telescopios de pequeño diámetro (18 centímetros en el caso del círculo meridiano Carlsberg) al telescopio William Herschel con un espejo primario de 4.2 metros de diámetro, convierten a Canarias en el **Observatorio Europeo del Hemisferio Norte**. Estas instalaciones se verán claramente mejoradas con la construcción, liderada por el IAC, del **Gran Telescopio de Canarias** en el Observatorio del Roque de los Muchachos. Se tratará de un telescopio de tipo Cassegrain con un **espejo primario de 10 metros de diámetro**, formado por 36 segmentos hexagonales de 1.8 metros de diámetro que se controlarán independientemente para mantenerlos unidos entre sí, y optimizado para observaciones en el visible y el infrarrojo cercano y medio. Estará dotado de

óptica adaptativa, y permitirá el acceso a objetos más distantes y débiles. El diseño y construcción del telescopio, que se espera se lleve a cabo en colaboración con otras instituciones europeas, fomentará el desarrollo de tecnología punta y permitirá mantener el ORM como un observatorio de primera línea al iniciarse el próximo milenio.

## DETECTORES DE FOTONES

Una vez que se ha formado la imagen en el plano focal del telescopio, o bien que ésta ha atravesado los componentes ópticos de la instrumentación acoplada al mismo, los detectores de fotones son los encargados de **cuantificar la radiación recibida**. El ojo humano ha sido sustituido hace ya bastante tiempo en esta función por dispositivos mucho más eficientes, y ya no resulta común la imagen del astrónomo mirando directamente a través del telescopio (excepto, quizás, en el mundo de los astrónomos aficionados).

Las parámetros esenciales que caracterizan a un detector son: i) **eficiencia** al detectar la señal que se recibe; ii) **ruido** o señal espúrea que añade de forma sistemática a cada lectura que proporciona y que debe ser mucho menor que la señal real de interés; iii) **tiempo de respuesta** o tiempo que tarda el dispositivo en detectar variaciones en la señal que le llega;

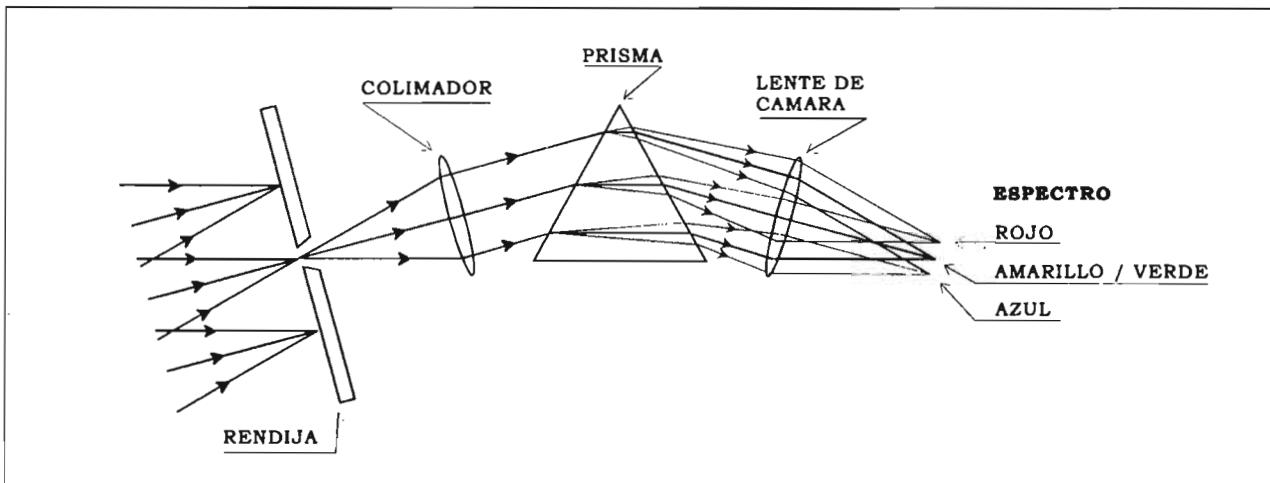


Figura 16.- Disposición básica de los componentes de un espectrógrafo. Nótese cómo las imágenes correspondientes a distintos colores se forman en puntos distintos del plano focal (adaptado de Kitchin 1984).

iv) curva de **respuesta espectral**, que muestra cómo se comporta el detector para diferentes longitudes de onda; v) **linealidad** o intervalo de medida dentro del cual la lectura que proporciona el detector es directamente proporcional a la señal que recibe; y vi) **rango dinámico**, definido por los valores de iluminación mínimo y máximo entre los que puede operar el detector.

Podemos clasificar los detectores inicialmente en dos tipos: detectores con **un único elemento de resolución espacial** (un único "pixel" -contracción de "picture element"-) y detectores **bidimensionales**. Los primeros recogen la radiación que les llega sin posibilidad de diferenciar de dónde procede, mientras que los segundos proporcionan una imagen bidimensional de la radiación recibida. Los detectores de un único elemento de resolución pueden clasificarse a su vez en dos categorías: a) aquellos que están basados en la **interacción radiación-materia** y responden a procesos de tipo microscópico (fotoconducción, fotovoltaicos, fotoemisivos); y b) aquellos otros que están basados en **variaciones mecánicas y de presión**, y responden a procesos de tipo macroscópico (bolómetros, pirómetros, neumáticos). Los primeros tienen una respuesta muy rápida y una fuerte dependencia con la longitud de onda, y los segundos son de respuesta más lenta y no dependen tanto del color de la radiación que les llega.

Históricamente, el primer detector utilizado (además del ojo humano) fue bidimensional: la **placa fotográfica**. Las placas fotográficas presentan dos inconvenientes importantes, por un lado su rango dinámico es bastante limitado y el proceso de revelado influye en el resultado final, y, por otro, es necesario someter a la placa a un proceso adicional que permite medir la cantidad de radiación que ha detectado. Frente a ello tenemos la **imagen electrónica**. La inmensa mayoría de los detectores electrónicos bidimensionales actuales tienen como sustrato un material semiconductor. Este es el caso de los **detectores CCD** ("charge coupled device") ampliamente generalizados en las observaciones astronómicas. La imagen se genera como una señal electrónica que es más fácil de transmitir, almacenar y tratar mediante el uso de ordenadores. El rango dinámico es mucho mayor que el de la placa y es posible también una amplificación intrínseca de la señal. Como desventaja se tiene que el tamaño y el número de elementos de resolución del detector (equivalentes a los granos de la placa fotográfica) son superior e inferior, respectivamente, a los de la placa.

Entre los diversos detectores que operan en los telescopios de los observatorios canarios vamos a mencionar dos, que son fruto del trabajo desarrollado por investigadores, ingenieros y técnicos del IAC. El primero de ellos es la **cámara IACCCD**, que es un detector CCD bidimensional instalado en el plano focal del telescopio Nórdico de 2.5 metros de diámetro en el ORM. Se trata de un detector con 1024x1024 elementos de resolución, cubriendo cada uno de ellos 0.14 segundos de arco en el cielo. Esta cámara estuvo

instalada en el telescopio durante los años 1993-1996 (ha sido reemplazada recientemente por un detector de mayor tamaño), proporcionando imágenes de gran calidad en más de 25 campañas de observación diferentes, que involucraron a investigadores de muy diversas instituciones. Por otra parte, merece destacarse también la **Cámara Infrarroja** que opera en el telescopio Carlos Sánchez (1.54 metros de diámetro) del Observatorio del Teide. Tiene 256x256 elementos de resolución y dispone de una serie de componentes ópticos diseñados para compensar la calidad óptica del telescopio. En el infrarrojo en muchos casos el cielo de los alrededores es más intenso que la fuente que se desea observar, por lo que la corrección de fondo cielo resulta fundamental. Para ello esta cámara dispone de una electrónica que proporciona una lectura muy rápida del detector, lo que facilita la corrección de fondo de cielo midiendo alternativamente cielo y fuente y restando la señal del primero a la de la segunda.

## FOTÓMETROS Y ESPECTRÓGRAFOS

Vamos a pasar revista ahora a dos clases de instrumentos muy importantes para la observación astrofísica, y que son habitualmente utilizados en los observatorios canarios. Aunque existen también otros tipos de instrumentación que proporcionan valiosa información, estos dos son muy representativos y servirán para ilustrar algunas cuestiones básicas.

Los **fotómetros** son instrumentos que permiten **seleccionar bandas espectrales** (colores) en la radiación que recibimos. Podemos hablar de fotometría de banda ancha, intermedia o estrecha, dependiendo del tamaño del rangopectral que se seleccione en cada caso. Este tipo de medidas proporciona información acerca de la distribución de energía del objeto emisor.

Las medidas fotométricas están limitadas por una serie de fenómenos asociados, fundamentalmente, a la presencia de la **atmósfera terrestre**: i) el **seeing**, al que ya nos hemos referido en un apartado anterior; ii) el **centelleo**, que consiste en la modulación de la amplitud de la luz procedente del objeto celeste originada también por su paso a través de capas turbulentas de la atmósfera; iii) el **fondo de cielo**, o luz difusa originada por reacciones químicas que tienen lugar en la atmósfera, por luz procedente de poblaciones cercanas, así como por luz celeste (fondo estelar, luz Galáctica, luz lunar, etc.); y iv) la **extinción** o atenuación que sufre la luz al atravesar la atmósfera terrestre.

Los **componentes básicos** de los que consta un **fotómetro clásico** son: a) **diafragma**, que se coloca sobre el plano focal del telescopio y limita el campo observado a la fuente que nos interesa; b) **lente de Fabry**, que hace que la radiación que pasa a través del diafragma vaya a parar a un único punto del detector; c) **filtro**, que selecciona el intervalo espectral a observar; y d) **detector**, que cuantifica la radiación recibida. La Figura 14 muestra de forma esquemática la disposición de estos elementos. En este tipo de fotómetros los detectores son de un único elemento de resolución, por lo que toda la luz que atraviese el diafragma será registrada sin diferenciar los puntos de donde procede. Este dispositivo puede optimizarse mediante el diseño de fotómetros **multicanal** y **multiobjeto**. En los primeros podremos obtener información simultánea del mismo objeto en diferentes rangos espiraculares, mientras que los segundos permiten observar diversos objetos (o bien cielo y objeto) a la vez. En ambos casos se trata de instrumentos formados por la combinación de varios fotómetros básicos.

La existencia de detectores bidimensionales permite llevar a cabo también **fotometría bidimensional**. En este caso, el detector se coloca en el plano focal del telescopio y delante de él se sitúa el filtro que aísla el intervalo espectral deseado. El diafragma y la lente de Fabry desaparecen por carecer aquí de utilidad. Las medidas del fondo de cielo se podrán obtener, en buena parte de los casos, a partir directamente de alguna zona del campo registrado por el detector.

La descontaminación o **reducción** de las medidas fotométricas consiste fundamentalmente en corregir el fondo de cielo y la extinción atmosférica. Un paso adicional, que resulta importante en muchos casos, es garantizar que el tipo de medidas que se ha realizado **sea compatible con medidas similares** llevadas a cabo con otra instrumentación en el mismo o en otro telescopio. Para ello será necesario armonizar el instrumento que se diseña con aquél con el que se quiere que sea compatible (procurando que los componentes utilizados sean similares, especialmente filtros y detectores), y luego, mediante la experiencia, encontrar las ecuaciones matemáticas que permitan transformar las medidas obtenidas con un instrumento a las que se obtendrían con el otro.

Los **espectrógrafos** son instrumentos que permiten **observar detalles de la distribución de energía de la radiación** recibida. En la distribuciónpectral de la luz procedente de los objetos celestes es donde se encuentra la inmensa mayoría de la información física que podemos obtener de los mismos. La Figura 15 muestra una porción del espectro solar en la que se puede apreciar el cambio en longitud de onda a lo largo del mismo, así como una serie de líneas espectrales producidas por la absorción de energía por parte de distintos elementos químicos presentes en la atmósfera del Sol.

Estos instrumentos se caracterizan fundamentalmente por: a) su **dispersión**, que es la capacidad que tienen para separar la radiación según su longitud de onda (antes de pasar por el espectrógrafo lo que se tiene es, en general, luz "blanca" donde todas las longitudes de onda están mezcladas); b) su **resoluciónpectral**, que proporciona una medida del máximo nivel de detalle con el que se puede conocer la luz procedente de una longitud de onda determinada (capacidad de separar colores muy próximos entre sí); y c) el **rangopectral útil**, que nos dice qué intervalo de longitudes de onda podremos observar eficientemente.

Además del **detector** y de otros dos componentes ópticos (denominados **colimador** y **cámara**, respectivamente), las piezas fundamentales de un espectrógrafo son la **rendija de entrada** y el **elemento dispersor** (ver Figura 16). El ancho de la rendija, que se coloca en el plano focal del telescopio, restringirá la resoluciónpectral, mientras que el elemento dispersor (que será habitualmente un **prisma** o una **red de difracción**) proporcionará la dispersiónpectral. Existen muy diversos diseños de espectrógrafos dependiendo del fin para el que hayan sido concebidos. En algunos casos lo que interesa es cubrir un rangopectral muy amplio con una menor resolución, mientras que en otros se quiere observar con mucho detalle una regiónpectral determinada. Por otra parte, se debe tener en cuenta también si se desea observar fuentes puntuales (estrellas) o fuentes extensas (galaxias, nebulosas, el Sol, etc.) a la hora de diseñar el instrumento. La **reducción de datos espectroscópicos** resulta muy **compleja**, y depende fuertemente del tipo de instrumento utilizado.

El IAC tiene operando actualmente dos espectrógrafos en el telescopio Nórdico del ORM. Uno de ellos es el **espectrógrafo de alta resolución IACUB**, cuyo nombre refiere a una colaboración entre el IAC y la Universidad de Belfast (Irlanda del Norte). Se trata de un diseño compacto, donde todos los componentes ópticos (a excepción de los filtros) son de reflexión, y proporciona una muy alta resoluciónpectral con una buena calidad de imagen. Desde su puesta en funcionamiento en 1991, ha venido operando como un instrumento de uso común durante el tiempo de observación español en dicho telescopio, habiéndose llevado a cabo 19 campañas de observación en las que han participado más de 30 investigadores de muy diversas instituciones. El segundo es el **espectrógrafo FLEX**, cuya característica principal es que utiliza fibras ópticas para llevar la luz desde el plano focal del telescopio al instrumento. Permite realizar espectroscopía multiobjeto (muy útil cuando se observan cúmulos estelares), así como espectroscopía bidimensional en objetos extensos. En cualquiera de los dos casos cada una de las fibras (entre 40 y 100, dependiendo del tipo de aplicación) permite obtener el espectro de un punto determinado del cielo.

## ASTROFÍSICA DESDE EL ESPACIO

Existen regiones espectrales, tales como el ultravioleta o el infrarrojo lejanos, que no pueden ser observadas desde La Tierra porque la atmósfera impide el paso de la radiación electromagnética en esas longitudes de onda. Por otra parte, la presencia de la atmósfera terrestre degrada, como hemos visto, la calidad de las imágenes que obtenemos, haciendo que no lleguemos a utilizar los telescopios al máximo de su resolución espacial. Es preciso en estos casos recurrir a la utilización de vehículos de transporte que soslayen este problema. Durante mucho tiempo se ha recurrido a la utilización de **globos y cohetes**, que llevaban la instrumentación a la altura requerida para que la atmósfera terrestre no impidiese la observación, y que luego eran recuperados para obtener los datos que habían recibido. Desde hace varias décadas, la utilización de **satélites artificiales y sondas espaciales** se ha convertido en otra herramienta fundamental de la observación astrofísica.

De entre todos los ingenios diseñados y puestos en órbita con fines de investigación astrofísica, el **telescopio espacial Hubble** es, sin duda alguna, el más importante. Se trata de un telescopio de 2.5 metros de diámetro, cuyo rangopectral de operación cubre el ultravioleta lejano y el visible, y que está proporcionando las imágenes de campo más profundo (zonas más alejadas) que se tienen del Universo. Resulta muy difícil obtener tiempo de observación con este telescopio, pero ya son varios los grupos de investigación españoles que lo han conseguido.

El IAC ha participado también en la construcción de instrumentos que operan a bordo de satélites de observación astrofísica actualmente. Este es el caso del **satélite infrarrojo ISO**, para el que el IAC fabricó el **espectrofotómetro ISOPHOT-S**, que proporciona medidas simultáneas en dos rangos de longitud de onda (2.5-5 y 6-12 micras). Entre los diversos programas científicos que se están llevando a cabo con este instrumento destaca el estudio de la composición química del polvo interplanetario e interestelar. Por otra parte, el IAC participó también en la construcción de dos instrumentos a bordo del **satélite solar SOHO: GOLF**, que proporciona medidas de las oscilaciones solares a baja frecuencia, y que mide la variabilidad de la irradiancia solar. En el IAC se construyeron las fuentes de alimentación y diversos mecanismos para ambos instrumentos, y se escribieron programas de ordenador para la verificación y fase de vuelo de los mismos.

## EPÍLOGO

Dado que el propósito de este artículo era el de proporcionar una serie de ideas generales acerca de las observaciones astronómicas y de la instrumentación utilizada en ellas, y que, en principio, está dirigido a un grupo de personas con niveles de formación muy heterogéneos, he procurado buscar un equilibrio entre el rigor y la claridad en la exposición. Me sentiría muy satisfecho si ello ha servido para dar respuesta a algunas de las preguntas básicas que las personas no iniciadas en la observación astronómica se hayan podido plantear, así como para despertar su curiosidad en general. Soy consciente, además, de que se han quedado sin tratar técnicas importantes como la polarimetría, la alta resolución espacial o la heliosismología, pero dadas las limitaciones de un artículo como éste, he preferido hacer hincapié en las cuestiones que he considerado más básicas. La lista de libros que se presenta en la bibliografía que viene a continuación puede servir para profundizar en las ideas y técnicas aquí expresadas, y también para abrir las puertas de otras igualmente interesantes.

## BIBLIOGRAFÍA

*A continuación se proporciona una lista con algunos libros de carácter general sobre la instrumentación astrofísica, así como otros que se refieren a algunas de las técnicas tratadas aquí.*

- “An Introduction to Astronomical Photometry”, E. Budding, Cambridge University Press, 1993
- “Astronomía Moderna”, L. Oster, Reverté, 1984
- “Astronomical Observations, an Optical Perspective”, G. Walker, Cambridge University Press, 1993
- “Astronomics Optics”, D.J. Schroeder, Academic Press, 1987
- “Astrophysical Techniques”, C.R. Kitchin, Adam Hilger Ltd., 1984; IOP Publishing Ltd., 1991 (segunda edición)
- “Aventuras con la Astronomía”, P. Seymour, Labor Bolsillo Juvenil, 1987
- “Observational Astronomy”, D.S. Birney, Cambridge University Press, 1991
- “Observational Astrophysics”, P. Léna, Springer-Verlag, 1988
- “Optical Radiation Detectors”, E.L. Delenik y D.G. Crowe, John Wiley and Sons, 1984
- “Telescope Optics”, H. Rutten y M. Van Venrooij, William-Bell Inc., 1988
- “The Telescope”, L. Bell, Dover Publications, Inc., 1981
- “The Sun: an Introduction”, M. Stix, Springer-Verlag, 1991



# UNA ESTRELLA ENTRE UN MILLÓN

Inés Rodríguez Hidalgo

Investigadora del Instituto de Astrofísica de Canarias  
Profesora de la Universidad de La Laguna, Departamento de Astrofísica

## PRESENTACIÓN

Existe una estrella entre los aproximadamente 100000 millones de astros similares que forman nuestra galaxia que, aun siendo una estrella ordinaria, más bien pequeña, no muy masiva ni demasiado luminosa, madurita, (más o menos en la mitad de su vida estable), merece muy especialmente nuestra atención...por ser nuestra estrella, la más cercana, la "de casa", aquélla a la que llamamos Sol.

El Sol parece haber estado siempre ahí, brillando hermoso e inmutable, "recorriendo" el firmamento de día desde el amanecer al ocaso, y a lo largo del año, proporcionando luz y calor, generando la energía que brota en forma de vida cada primavera, evaporando el agua del mar para que llueva, ... No es raro que ya las culturas primitivas lo consideraran divino y que haya sido siempre objeto de la curiosidad, la observación continua y el estudio por parte de la especie humana. Pero, ¿es el Sol realmente eterno e inmutable?, ¿por qué le salen manchas y el número de éstas aumenta y disminuye cada once años aproximadamente?, ¿está sano?, ¿por qué, sin previo aviso, expulsa grandes cantidades de materia y energía?, ¿cómo está hecho por dentro?, ¿por qué brilla?, ¿es igual que otras estrellas?, ¿cómo nació?, ¿cuándo y cómo morirá?, ¿podemos predecir sus cambios y cómo nos afectaran?.

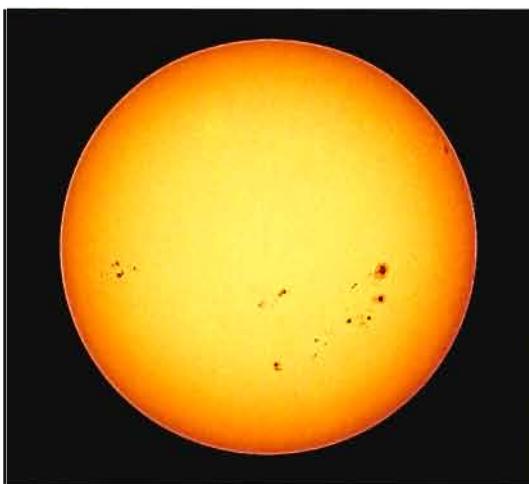


Figura 1: Damas y caballeros, con ustedes ... el Sol, en una imagen en luz blanca, con una excelente resolución espacial que permite identificar claramente la **granulación** que cubre todo el disco, se observan además varios grupos de **manchas** y algunas **faculas** visibles cerca del borde. Resulta evidente también el efecto de oscurecimiento hacia el borde.

(OBTENIDA CON EL TELESCOPIO SOLAR DEL OBSERVATORIO DE KANZELHÖHE, EN AUSTRIA, POR EL DR. TH. PETTAUER DEL INSTITUT FÜR ASTRONOMIE DE GRAZ -AUSTRIA-. EL TRATAMIENTO POSTERIOR DE LA IMAGEN ORIGINAL SE DEBE AL DR. J.A. BONET DEL IAC).

El propósito de las próximas páginas es contagiarles al menos un poquito del interés y la pasión que el Sol despierta en los que nos dedicamos a su estudio. Para ello, realizaremos un recorrido desde el interior hasta las capas más externas del Sol describiendo sus principales características y estructuras, compararemos las predicciones teóricas y las observaciones y presentaremos las instalaciones y los campos de investigación que conforman la Física Solar en el Instituto de Astrofísica de Canarias.

Les sugiero que, a modo de presentación, disfruten de la imagen del Sol que aparece en la **Figura 1**. Pronto podrán comprobar que, cuando se empieza a conocer el Sol y se adquiere la conciencia de su inmenso tamaño, de que su superficie está "hirviendo" y burbujas del tamaño de la Península Ibérica suben y bajan a velocidades de más de 4000 km/h, de que todo el Sol está latiendo como un enorme corazón, pausada pero interminablemente, cuando presenciamos "tormentas" que expulsan llamaradas de casi cien veces el tamaño de la Tierra, uno se siente realmente pequeño. En palabras de un colega (físico solar y buen amigo), "como una hormiga cabalgando a lomos de un dragón"...

### 1. ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE ESTUDIAR EL SOL?

Seguramente en la presentación ya ha quedado claro que el Sol, como todo lo hermoso, lejano e inaccesible, ha sido desde siempre un estímulo para la innata curiosidad humana (que es, al fin y al cabo, el motor de toda la Ciencia). Y que la importancia fundamental del Sol como fuente de energía y razón última de la vida en la Tierra justifica ampliamente que deseemos conocer lo mejor posible su estructura y su funcionamiento.

El Sol es, además, un excelente campo de aplicación de las leyes físicas conocidas. Resulta alentador que la Física "normal" que sirve para explicar lo que sucede en Tierra sea válida también para comprender la mayor parte de los fenómenos solares. Para la Astrofísica el Sol constituye un laboratorio próximo en el que probar la validez de nuestras ideas y predicciones teóricas acerca de las otras estrellas<sup>1</sup>.

Por otra parte, y debido a su cercanía, el Sol es la única estrella que puede ser observada con *resolución espacial*. En la **Figura 1** se ve claramente que el Sol no es sólo un disco uniforme de luz sino que en su superficie se distinguen muchas estructuras. El análisis

<sup>1</sup> La Astrofísica es una ciencia más *observacional* que *experimental*, ya que raramente es posible reproducir en Tierra las condiciones que tienen lugar en las estrellas

detallado de las mismas ha permitido ampliar nuestros conocimientos físicos: por ejemplo, en el Sol se descubrió el elemento químico *helio* (cuyo nombre es, precisamente, Sol en griego); y hemos aprendido que la interacción entre el campo magnético y la materia solares no es exactamente igual que la que tiene lugar en la Tierra.

Por último, no olvidemos que el Sol es una estrella, la unidad estructural en Astrofísica, por lo que sirve como enlace local con el resto del Universo. El conocimiento del Sol es, pues, esencial para una correcta comprensión del funcionamiento del Cosmos.

## 2. SITUEMOS AL SOL EN EL UNIVERSO Y EN NUESTRO SISTEMA SOLAR

El Sol se encuentra en uno de los brazos espirales de la Vía Láctea, casi sobre su plano de simetría, en una posición muy excéntrica (a unos 27000 años-luz, más de  $2 \times 10^{27}$  km, del centro). Participa de la rotación de la galaxia invirtiendo más de 225 millones de años en completar una vuelta alrededor del centro galáctico.

La atracción gravitacional del Sol mantiene a la Tierra y los otros planetas del Sistema Solar describiendo órbitas elípticas a su alrededor. Aunque es una estrella muy "normal", nos parece la más grande y la más brillante por ser la más cercana: la distancia media de la Tierra al Sol es de 1 Unidad Astronómica (U.A.), que equivale "tan sólo" a 149 millones de km (frente a los algo más de 4 años-luz que nos separan de la siguiente estrella más cercana, Próxima Centauri). Así, la luz solar tarda unos 8 minutos en alcanzar nuestro planeta. Visto desde la Tierra el Sol tiene un diámetro angular de unos 32 minutos de arco (aproximadamente  $1/2^\circ$  o, para un adulto normal, la mitad de la anchura de un dedo de la mano tal como se ve con el brazo extendido)<sup>2</sup>.

## 3. EL ESPECTRO SOLAR

La mayor parte de nuestro conocimiento sobre el Sol (y las otras estrellas) procede del análisis de la *radiación electromagnética (EM)* que emiten, de la que la *luz* es sólo una pequeña parte. La distribución de esta radiación en todos los rangos, desde los rayos gamma a las ondas de radio, se denomina *espectro*. En él está escrita de algún modo la información sobre los objetos astronómicos y decodificar este mensaje del Universo es la principal labor de los astrofísicos.

A primera vista, el espectro solar es el característico de un cuerpo calentado a unos 5800 K (unos 5530 grados centígrados)<sup>3</sup>. Conocemos este dato a partir del *color* del Sol (el correspondiente a las longitudes de onda en que la radiación emitida es máxima), y de su *luminosidad*, definida como la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo, en todas las longitudes de onda del espectro. Esta asciende a más de  $10^{26}$  watos, casi 400 billones de veces más energía que la generada por todas las plantas industriales del mundo trabajando a su máxima capacidad. De toda esta energía sólo nos llegan  $1370 \text{ W/m}^2$  (cada metro cuadrado de una esfera imaginaria de 1 U.A. de radio capta la potencia necesaria para hacer lucir unas 14 bombillas de 100 watos), valor llamado *constante solar*. Si bien evidencias geológicas parecen indicar que la luminosidad y el flujo solares han permanecido casi constantes durante los últimos 3500 millones de años, desde hace unos 50 años, medidas proporcionadas por satélites muestran variaciones sólo del orden de un 0.25%. Aunque pequeñas, estas fluctuaciones son importantes en el marco de las relaciones Sol-Tierra.

La porción visible del espectro solar, que llamamos en conjunto *luz blanca*, consiste en un continuo de colores desde el violeta al rojo, cada uno correspondiente a una longitud de onda de la radiación EM. Los colores pueden verse separados cuando la luz del Sol pasa a través de un prisma o de instrumentos más complejos como las redes de difracción. (Véase la **Figura 2**). El Sol emite también en longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X y

<sup>2</sup> Veamos un ejemplo a escala: si el Sol tuviera el tamaño de una pelota de baloncesto, la Tierra sería como una cabeza de alfiler y ambos estarían separados unos 30.5 m. Si se pudiera recorrer la distancia que nos separa del Sol en un coche a 80 km/h, el trayecto duraría unos 176 años. La luz viaja realmente deprisa...

<sup>3</sup> El espectro del Sol sigue con bastante buena aproximación la *Ley de Planck* que establece que el valor total de la energía emitida en forma de radiación EM (equivalentemente, el número total de partículas de radiación EM o *fotones*) y su distribución frente a la longitud de onda vienen determinados por la temperatura de la fuente. Esos 5800 K son la llamada *temperatura efectiva* que, cualitativamente, puede considerarse una medida de la temperatura superficial del Sol.

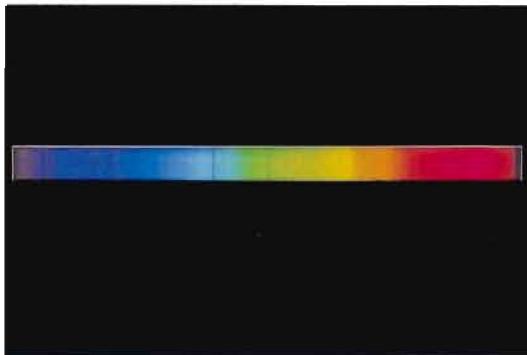


Figura 2: Espectro visible del Sol. Se observa el continuo de colores del azul al rojo surcado por multitud de **líneas de absorción** de distintas especies químicas. Por ejemplo, las dos bandas muy oscuras y gruesas en la zona azul son líneas de calcio una vez ionizado, entre el azul y el verde se observa la línea  $H_{\beta}$  del hidrógeno, tres líneas bastante juntas e intensas en la región verde son de magnesio neutro, una raya doble en la zona naranja corresponde a sodio neutro y en el extremo rojo del espectro es visible la intensa línea  $H_{\alpha}$  de hidrógeno neutro. (OBtenido en la Torre Solar del Observatorio de la Universidad de Göttingen, Alemania, por los Dres. K.F. Jacob y H. Wöhle del Kiepenheuer Institut für Sonnenphysik de Freiburg -Alemania-).

ultravioleta -UV-) y más largas (infrarrojo -IR-, microondas y radio), pero la radiación es más intensa en el rango visible.

La radiación EM (fotones) procedente del interior del Sol no es emitida inmediatamente al espacio, sino que en su camino hacia la superficie solar interacciona fuertemente con la materia, siendo absorbida y dispersada continuamente. Al alcanzarse las zonas más exteriores, cada vez menos densas, la mayoría de los fotones sí son capaces de escapar libremente y llegar hasta nosotros; se llama **photosfera** a la capa de la cual proceden los fotones que originan el espectro visible del Sol. Un estudio detallado del mismo revela la presencia de **líneas de absorción**, estrechas bandas oscuras que surcan el continuo de colores, claramente visibles en la **Figura 2**. Cuando tiene lugar una transición de un electrón desde un nivel de energía a otro superior en un átomo, es absorbido un fotón cuya longitud de onda (y frecuencia, y energía) coincide con la de la transición. Esos fotones absorbidos, incapaces de escapar, dan lugar a "huecos" en determinadas longitudes de onda del espectro. Sin embargo, las líneas de absorción no son totalmente oscuras porque en zonas exteriores a la fotosfera, donde el material solar es menos denso, los fotones sí consiguen salir al espacio y alcanzarnos. Así, fotografías del Sol

tomadas a través de filtros estrechos centrados en líneas espectrales intensas permiten conocer el aspecto de las capas del Sol que rodean a la fotosfera.

Cada especie química (cada ión) se caracteriza por un conjunto diferente de transiciones electrónicas permitidas, su "huella digital" en el espectro, por lo que la identificación de las líneas espectrales conduce a la determinación de la composición química del Sol. Una escala de longitudes de onda colocada en la **Figura 2** permite asociar cada línea a una transición electrónica de un elemento químico, comparando con un patrón de transiciones observadas en laboratorio y clasificadas por su longitud de onda. La intensidad de las líneas de un determinado ión está relacionada con la abundancia del mismo en el Sol y depende también de las condiciones de densidad, presión y temperatura en la región en que se forma la línea.

Además de proporcionar esta información, el análisis del espectro permite detectar campos de velocidades, mediante el efecto *Doppler*, y campos magnéticos, mediante el efecto *Zeeman* y el análisis de la polarización de la luz.

#### 4. CARACTERICEMOS AL SOL POR SUS PARAMETROS FISICOS

El Sol es una estrella *enana* (de clase de luminosidad V), de tipo espectral G2, que se encuentra más o menos en la mitad de su permanencia en la Secuencia Principal del diagrama de Hertzsprung-Russell. Las teorías de evolución estelar predicen que permanecerá en un

Tabla 1: Datos físicos fundamentales del Sol

-Edad	$4.6 \times 10^9$ años
Radio	696000 km (109 veces mayor que el radio terrestre)
-Masa	$2 \times 10^{30}$ kg (prácticamente toda la masa del Sistema Solar)
Gravedad superficial	273 m/s <sup>2</sup> (28 veces mayor que la gravedad terrestre)
-Luminosidad	$3.86 \times 10^{26}$ W
Temperatura efectiva	5780 K
Magnitud absoluta	4.74
-Magnitud aparente	-26.7 ( $10^{10}$ veces más brillante que Sirio)
Periodo de rotación en el ecuador	26 días
cerca de los polos	32 días
Distancias superficiales	725 km/segundo de arco

estado similar al presente durante otros 5000 millones de años, aproximadamente su edad actual, así que podemos estar tranquilos<sup>4</sup>.

Además de su edad, se presentan otros datos característicos del Sol en la **Tabla 1**.

En la Tabla se dan dos valores para el periodo de rotación del Sol. Esto es debido a que el Sol no rota como un cuerpo sólido y rígido, sino que presenta una *rotación diferencial*: la velocidad de rotación varía con la latitud solar, siendo mayor en las zonas ecuatoriales y disminuyendo hacia los polos. Además, modelos teóricos indican que la rotación es también diferencial en profundidad, aumentando la velocidad hacia el centro del Sol.

## 5. ¿DE QUÉ ESTÁ HECHO EL SOL?

El Sol es un enorme globo de "gas" incandescente, con una temperatura superficial cercana a los 6000 K. No se trata, por tanto, de una esfera sólida sobre la que se podría caminar... En él se ha detectado la presencia de casi dos tercios de los elementos químicos conocidos en Tierra. Algo más del 73% de su masa es *hidrógeno* (el elemento más abundante en el Sol y en todo el Universo), aproximadamente un 25% es *helio* y menos de un 2% corresponde a otros elementos y compuestos químicos (de mayor a menor abundancia, oxígeno, carbono, hierro, neon, nitrógeno, silicio, magnesio, azufre y otros).

La materia del Sol se encuentra en un estado físico-químico muy particular. Mientras que un gas ordinario está constituido por partículas sin carga eléctrica neta, una fracción considerable del fluido solar está ionizada, por lo que entran en juego las poderosas fuerzas electromagnéticas. La interacción de los campos electromagnéticos con la materia cambia tan radicalmente el comportamiento del gas que es preferible considerarlo como un estado distinto: el *plasma*, llamado cuarto estado de la materia, en el que se presenta el 99% de la materia del Universo<sup>5</sup>. Un plasma es, pues, una "sopa" de electrones, iones, átomos neutros, moléculas y fotones, en la que las fuerzas electromagnéticas tienen un papel preponderante. Dada la alta conductividad eléctrica del plasma (por los electrones libres procedentes de átomos ionizados), y el gran tamaño y alta velocidad de las estructuras que se mueven en el Sol, se produce el efecto de *congelación* del campo magnético, de crucial importancia para comprender la dinámica solar. Significa que las líneas de campo y el plasma solar se mueven solidariamente: donde domina el campo magnético el flujo de materia ionizada tiende a ocurrir a lo largo de sus líneas; donde domina la energía cinética de la materia estas líneas de campo son distorsionadas por el movimiento del fluido. Volveremos sobre este punto en secciones posteriores.

## 6. EL SOL ESTUDIADO COMO UNA ESTRELLA: UN MODELO ESTÁNDAR

Sólo podemos "ver" la superficie del Sol. Sin embargo, el comportamiento de la misma traduce los fenómenos que ocurren bajo ella. ¿Qué podemos hacer para escudriñar el interior solar?. Y, si lo logramos, ¿somos capaces de presentar una visión de conjunto de nuestra estrella?.

La solución pasa por construir un *modelo*<sup>6</sup> del Sol. Se denomina *estándar* a aquél que utiliza las suposiciones físicas más sencillas y los mejores datos físicos disponibles en el momento en que se elabora. Construir un modelo supone aceptar una serie de *hipótesis* lógicas:

- el Sol es *esférico*: todas las variables físicas de interés (temperatura, presión, densidad, etc.) se expresan como funciones de la distancia radial al centro, y se desprecian los efectos de la rotación y los campos magnéticos, que modificarían esta simetría.

<sup>4</sup> Las estrellas G tienen una temperatura efectiva en el rango de 5.000 a 6.000 K y su color está entre el blanco y el amarillo. En su espectro muestran líneas de calcio muy intensas, junto con líneas de metales neutros e ionizados, y débiles líneas de hidrógeno ionizado. Los detalles sobre el nacimiento y muerte del Sol pueden encontrarse en el ensayo dedicado a la "Vida y muerte de las estrellas" en este mismo libro.

<sup>5</sup> Es habitual referirse al material solar como a un gas. Se trata de un abuso de lenguaje pero está muy extendido y a lo largo del texto aparecen indistintamente los términos plasma y gas.

<sup>6</sup> Un *modelo* en general es un código físico-matemático autoconsistente que permite reproducir las características observables del objeto bajo estudio, llamadas *figaduras* del modelo; para el Sol éstas son su forma, tamaño, masa, color, cantidad y distribución de energía emitida, etc.

- la *generación de energía* tiene lugar mediante reacciones termonucleares de fusión que, además, determinan la evolución de las abundancias químicas en el Sol (que, en su formación, era químicamente homogéneo, con una composición igual a la de la fotosfera).

- el *transporte de energía* se produce por *radiación* (mediante fotones absorbidos y reemitidos continuamente por los iones y electrones) y *convección* (mediante movimientos cílicos del material), cada uno de ellos eficiente en capas diferentes del Sol.

- el Sol está aproximadamente en *equilibrio*: *termodinámico*, según el cual las propiedades del plasma se pueden describir mediante variables de estado locales como la temperatura, presión, densidad, etc.; *hidrostático*, porque la presión del plasma y la de radiación (hacia el exterior) son equilibradas exactamente por la acción de la gravedad (hacia el interior); y *energético*, de forma que en cada segundo se produce tanta energía en el núcleo como la que se pierde por radiación a través de la superficie.

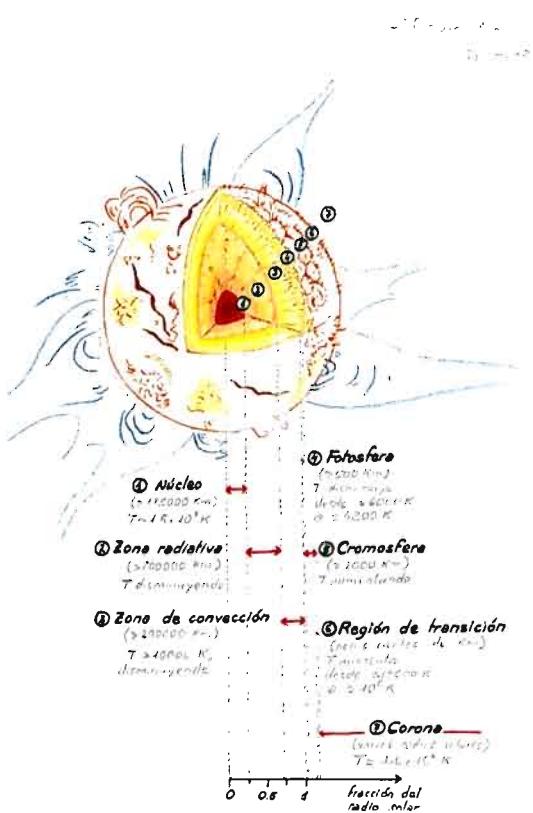


Figura 3: Sección del Sol con sus diferentes capas. Se indica la temperatura de las mismas y su grosor en km y en fracción del radio solar. Manteniendo la escala para todas las capas la fotosfera y cromosfera no resultarían visibles, por lo que la anchura representada es mayor que la que realmente les corresponde  
(DIBUJO REALIZADO POR LA DRA. I. RODRÍGUEZ HIDALGO DEL IAC).

que la densidad de materia solar decrece continuamente hacia el exterior, la temperatura alcanza un mínimo al final de la fotosfera y, desde ahí, aumenta de nuevo.

## 7. "CORTEMOS" EL SOL PARA VER SU ESTRUCTURA

Simplificando bastante podemos considerar el Sol como constituido por una serie de capas concéntricas. En la **Figura 3** "cortamos" el Sol para ilustrar su estructura, indicando el grosor aproximado de cada una de las capas y su temperatura. Mientras

## 8. VIAJE AL INTERIOR SOLAR

El *interior* del Sol es la zona inaccesible a la observación directa. En esta sección se describen las características y funcionamiento del núcleo, zona radiativa y zona convectiva. Se presentan también dos clases de experimentos, desarrollados en las dos o tres últimas décadas, que proporcionan información sobre el interior: el estudio de los neutrinos procedentes de las reacciones nucleares, y el análisis de las oscilaciones solares, al que se dedica la *Heliosismología*.

## 8.1 Núcleo y Zona Radiativa

Si el Sol está constituido esencialmente por los mismos elementos fundamentales que forman la Tierra, ¿cómo es capaz de emitir luz y calor de forma prácticamente inagotable?

Durante el siglo pasado se creía que solo la contracción gravitatoria era capaz de proporcionar grandes cantidades de energía. Sin embargo, la energía resultante de un proceso imaginario que concentrara en el tamaño actual del Sol toda la materia del Sistema Solar inicialmente dispersa hasta el infinito, duraría sólo 10 millones de años. Dado que estudios físicos y químicos de la Tierra indicaban que la edad del Sol debía ser superior a 1000 millones de años, se propusieron diversos mecanismos hasta que, a finales de los años 30, el desarrollo de la Física Nuclear condujo a la respuesta acertada: la energía irradiada por el Sol se genera en su interior mediante *reacciones termonucleares de fusión* que utilizan como combustible el hidrógeno para transformarlo en helio. El *núcleo*, que se extiende hasta aproximadamente 1/4 del radio solar, es, por lo tanto, el corazón del Sol.

El 95% de los núcleos de helio se producen mediante la reacción llamada *cadena protón-protón* o *cadena pp* (existen también otras variantes mucho menos frecuentes en las que intervienen berilio, litio o boro). Esencialmente la cadena pp, que tiene lugar en varias etapas, consiste en la fusión de núcleos de hidrógeno (protónes) para producir núcleos de helio, a razón de cuatro a uno. Cuatro protones son ligeramente más pesados que el núcleo de helio resultante, de modo que la diferencia de masa ( $m$ ) se convierte en energía ( $E$ ) mediante la famosa equivalencia de Einstein  $E = mc^2$  (donde  $c$  es la velocidad de la luz), liberándose unos  $4.3 \times 10^{-12}$  julios por cada reacción. Aunque estas reacciones transforman 4 millones de toneladas de masa en energía por segundo<sup>7</sup>, el Sol es un generador bastante pobre: el máximo valor estimado para el ritmo de generación de energía es del orden de 0.0015 watos por cada kilogramo... y un hombre de 70 kg de peso gasta cada segundo una energía unas 40 veces mayor. A pesar de un ritmo tan bajo, la impresionante masa del Sol hace que la cantidad de energía generada sea muy grande. La cadena de reacciones se detiene una vez formado el núcleo de helio, ya que este elemento es aún estable a la temperatura del interior. Cerca del centro la abundancia de helio es superior a la de las capas más exteriores, a expensas de una disminución de la abundancia de hidrógeno que, en esta zona, es ya del orden de un 36%. Como inicialmente era de un 75%, el núcleo del Sol ha consumido aproximadamente la mitad de su combustible.

El núcleo está envuelto por la *zona radiativa*, que se comporta como un "abrigo". Es semejante a un material "al rojo vivo" y se extiende hasta algo menos de 3/4 del radio solar. A través de esta región, la energía es transportada por radiación: mediante ondas electromagnéticas, es decir, mediante fotones. El proceso comienza con unos pocos fotones muy energéticos que, durante el transporte, originan una avalancha de fotones de menor energía. Los fotones procedentes del núcleo tardan entre 1 y 10 millones de años en atravesar la zona de radiación ya que, en su recorrido, interactúan intensamente con la materia siendo absorbidos, dispersados y reemitidos muchas veces.

## 8.2 Zona convectiva

Las teorías de evolución estelar señalan que una estrella de la masa y luminosidad del Sol debe poseer, rodeando a su núcleo y zona radiativa, una *zona de convección*. El desarrollo de la misma se debe a un cambio drástico en las condiciones físicas: el material solar se vuelve tan opaco que los fotones ya no son capaces de atravesarlo, con lo que el transporte de energía mediante radiación deja de ser eficiente. Entonces comienza a funcionar el mecanismo de la convección, que consiste en la aparición de "burbujas" de material caliente, llamadas *celdas convectivas*, que ascienden hacia la superficie transportando energía muy eficientemente. La zona de convección (algo más del último cuarto del radio solar) es, pues, similar a un "fluído hirviendo", pero es tan compleja que aun nos sorprende su comportamiento y no somos capaces de predecirlo.

<sup>7</sup> Este número parece enorme, pero supone que el Sol sólo convierte en energía  $2 \times 10^{26}$  de su masa total por segundo, es decir, escasamente 3 diezmilésimas de su masa a lo largo de toda su vida.

Debido al fuerte descenso de temperatura hacia la superficie a través de esta región, algunos núcleos son capaces de capturar uno o más electrones en el proceso de *recombinación*. Parece que el súbito aumento de la opacidad puede ser provocado por la recombinación del hidrógeno, helio (una vez) y helio (dos veces), que sucede a profundidades de unos 2000, 6000 y 20000 km, respectivamente. La teoría predice que deben originarse celdas de distintos tamaños, relacionados con dichas profundidades, y que las dimensiones vertical y horizontal de las burbujas han de ser del mismo orden. Esto concuerda con las estructuras convectivas detectables en la superficie solar: de menor a mayor tamaño, *granulación*, *mesogranulación* y *supergranulación*, sobre las que hablaremos al tratar de la fotosfera.

Aunque existe una estructuración de tamaños de las celdas en varias escalas dominantes, el proceso de la convección es, al mismo tiempo, *turbulento* (desordenado), debido a la bajísima viscosidad y alta compresibilidad del plasma solar. Por eso modelar la convección en el Sol es muy complicado. Se han elaborado diversos modelos, algunos bastante simplificados y otros de gran complejidad, así como simulaciones numéricas de convección turbulenta, algunas de las cuales tienen en cuenta, además, su interacción con el campo magnético (*Magnetoconvección*).

### 8.3 El problema de los neutrinos solares

Los *neutrinos* son una clase de partículas elementales con una bajísima probabilidad de interaccionar con la materia. Los generados en las reacciones nucleares del interior del Sol lo atraviesan casi sin ser perturbados, por lo que el estudio de aquéllos que alcanzan la Tierra proporciona información directa sobre las condiciones del interior.

Varios experimentos bastante complejos han sido diseñados para determinar el flujo de neutrinos solares, utilizando grandes cantidades de compuestos de cloro, agua pesada<sup>8</sup> o galio, encerrados en minas a gran profundidad. Estos experimentos, cada uno especialmente sensible a neutrinos de diferentes energías que se producen en diferentes etapas de la cadena pp, han permitido verificar que realmente tienen lugar reacciones nucleares, y que éstas siguen mayoritariamente la cadena mencionada.

El problema es que el flujo de neutrinos detectado es de la mitad a un tercio del esperado según las predicciones teóricas. Se han propuesto diversas soluciones para explicar las discrepancias observadas, de las que destacamos dos: o bien los modelos estándar del Sol no son correctos, o bien no es correcto nuestro modelo de las características y comportamiento del neutrino. Ambas alternativas son de gran trascendencia en el marco de la Astrofísica: la primera, porque exigiría una revisión de las teorías de evolución estelar que, hasta el momento, parecen funcionar bien. La segunda, porque tendría importantes implicaciones cosmológicas: una de las posibilidades barajadas por esta solución es que el neutrino tenga una masa en reposo extremadamente pequeña, pero no nula. De llegar a confirmarse esta última hipótesis, la masa estimada del Universo sería sensiblemente mayor, lo que condicionaría si la expansión del mismo continuará indefinidamente o se invertirá en una contracción por efecto de la atracción gravitacional...

### 8.4 Heliosismología

De igual manera que el estudio de las ondas sísmicas terrestres (terremotos) ha hecho posible el conocimiento de la estructura interna de la Tierra, la aplicación de esas técnicas al Sol ha dado lugar a esta joven rama de la Física Solar dedicada al análisis de las *oscilaciones solares*, que es una de las más potentes herramientas de conocimiento del interior solar<sup>9</sup>.

El Sol, como todo cuerpo, tiene unas frecuencias propias de oscilación que dependen de su geometría, condiciones físicas y composición química: "vibra" como si se tratara de un instrumento musical, tanto globalmente como por zonas, con períodos que van de 5 minutos a más de 1 hora. Es decir, es posible observar regiones que se levantan (con velocidades ascendentes) mientras que otras se hunden (con velocidades de descenso), así como pequeñas variaciones de radio y luminosidad a lo largo del tiempo.

Para poder determinar con precisión la amplitud y frecuencia de los llamados *modos* de

8. Agua formada con oxígeno y *deuterio*, un isótopo del hidrógeno con un neutrón y un protón en su núcleo.  
9. En los últimos tiempos se ha extendido también a las estrellas, recibiendo el nombre de *Astrosismología*.

oscilación del Sol es fundamental disponer de medidas de velocidad e intensidad durante muy largos períodos de tiempo. Con objeto de evitar la interrupción de las observaciones diurnas durante la noche se combinan datos procedentes de observatorios situados alrededor de todo el mundo. Además, las técnicas observacionales utilizadas en estaciones terrestres se aplican a proyectos espaciales.

A partir del análisis e interpretación de las observaciones, y de la elaboración de modelos teóricos compatibles con los resultados, la Heliosismología ha alcanzado logros tan notables como la determinación de la abundancia de helio, de la profundidad de la zona de convección y de la variación de la velocidad de rotación del Sol con la profundidad.

A modo de resumen podemos citar las siguientes conclusiones: las observaciones heliosismológicas apoyan claramente a los modelos estándar y están permitiendo obtener valores altamente fiables de la densidad y opacidad, a partir de las medidas muy precisas de las frecuencias de modos acústicos solares; de la medida del flujo de neutrinos se podrá obtener una medida precisa del perfil de temperatura en el núcleo; conocidas la densidad y temperatura, será posible calcular la velocidad local del sonido (o velocidad de propagación de las perturbaciones de presión). Todo ello nos acerca a un modelo estándar cada vez más correcto que permitirá usar el Sol como una fuente bien calibrada, válida para avanzar en el conocimiento de la física del neutrino, y para revisar y mejorar las teorías de estructura y evolución estelar.

## 9. VIAJE POR LA ATMÓSFERA SOLAR

La atmósfera solar que, al contrario que el interior, sí puede ser observada, supone la transición progresiva del Sol al medio interplanetario. Aunque los antiguos pensaban que el Sol era una esfera perfecta, homogénea y estática, en realidad la atmósfera solar está en continua evolución, y muestra muchas estructuras, importantes fluctuaciones de densidad, temperatura y energía emitida, movimientos turbulentos, ondas y corrientes diversas. La mayor parte de estos fenómenos está relacionada con los movimientos convectivos y con los campos magnéticos.

A continuación se presentan las distintas capas que constituyen la atmósfera solar y se describen las estructuras de carácter convectivo. Al Sol activo se dedica todo un apartado<sup>10</sup>, ya que seguramente los fenómenos solares más espectaculares son los vinculados directamente a la presencia de campos magnéticos. Esta sección finaliza con una revisión del *ciclo de actividad solar* y las interacciones Sol-Tierra más importantes.

### 9.1 Fotosfera, cromosfera y corona

La fotosfera o esfera de luz (denominada así por motivos obvios), es la "piel" del Sol, su superficie visible de la que procede la mayor parte de la radiación solar observada. Aunque el Sol no es un objeto con límites perfectamente definidos, el escaso grosor de esta superficie ficticia, unos 500 km, hace que el borde visible nos parezca tan nítido.

La imagen del Sol de la **Figura 1** corresponde precisamente a la fotosfera. En ella llama la atención el fenómeno del *oscurecimiento hacia el borde*. La explicación de este fenómeno en términos sencillos es la siguiente: aunque la fotosfera permite que la energía procedente del interior solar se libere al espacio en forma de luz, no es del todo transparente, no se puede "ver" completamente a su través. Por eso la luz solar visible viene desde la profundidad correspondiente a la distancia que la radiación EM es capaz de atravesar según la opacidad del material (que depende fundamentalmente de la densidad y temperatura del mismo). Como la temperatura disminuye desde unos 5800 K en la base hasta unos 4300 K al final de la fotosfera -en la región del *mínimo de temperatura*-, cuando observamos el centro/borde del Sol, la luz atraviesa las capas fotosféricas perpendicularmente/oblicuamente, recorriendo una cierta distancia que permite "penetrar" hasta niveles inferiores/superiores, más calientes/fríos y, por lo tanto, más brillantes/oscuros.

<sup>10</sup> La palabra *actividad* referida al Sol lleva implícito el calificativo de magnética. La expresión *en calma* sirve, por oposición, para referirse a las estructuras solares no magnéticas.

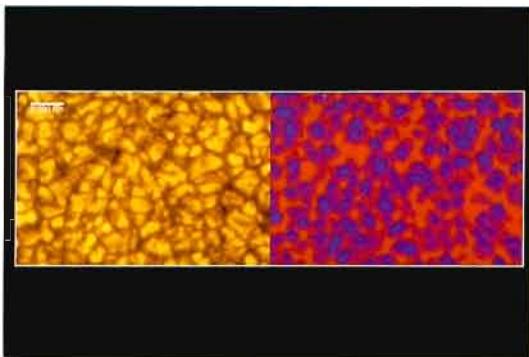


Figura 4: A la izquierda se muestra una imagen de la **granulación** solar con muy buena resolución espacial. A la derecha, el mapa de velocidades correspondiente a la misma región. Las zonas brillantes de la primera fotografía corresponden a material caliente que asciende (en azul que indica velocidad) y las zonas oscuras, a material más frío que desciende (en rojo a la derecha).

(OBETIDA EN EL TELESCOPIO DE LA TORRE SOLAR SUECA DEL ORM, LA PALMA -ESPAÑA-, POR LOS DRES. M. COLLADOS E I. RODRÍGUEZ HIDALGO DEL IAC. EL MAPA DE VELOCIDADES HA SIDO ELABORADO POR LOS DRES. B. RUIZ COBO E I. RODRÍGUEZ HIDALGO DEL IAC).

También en la **Figura 1** puede verse que toda la fotosfera está cubierta de pequeños "granitos". Estas estructuras (y otras no observables en una imagen de luz blanca, pero sí con otras técnicas) son evidencias de la existencia de celdas convectivas de distintos tamaños discretos:

- **granulación**: las más pequeñas de las estructuras convectivas dan a la fotosfera su aspecto de "paella" característico, con gránulos brillantes rodeados por estrechos canales oscuros llamados *espacios intergranulares*. Los gránulos, con formas irregulares, tamaños cercanos a los 2000 km y tiempos de vida de unos 8 minutos, son "burbujas" de material caliente que asciende por la zona central, se enfriá irradiando su calor y se desparrama horizontalmente; por los espacios intergranulares oscuros el material más frío desciende de nuevo, completando los movimientos cíclicos característicos de la convección. Las velocidades típicas del material son del orden de 4000 km/hora. La **Figura 4** es un detalle de la granulación con su campo de velocidades asociado.

- **mesogranulación**: corresponde a celdas convectivas con tamaños de unos 5000 a 10000 km y tiempos de vida de horas. Se detectan principalmente por su pequeño campo de velocidades (unos 60 m/s) pero son difícilmente observables en intensidad.

- **supergranulación**: los tamaños de estas celdas son de unos 30000 km y los tiempos de vida del orden de un día. La velocidad de ascenso y descenso del material es de unos 100 m/s, mientras que los flujos horizontales pueden alcanzar hasta 500 m/s. Son detectables a partir de medidas de velocidad y a través de ciertos filtros estrechos. Su efecto sobre los campos magnéticos es muy importante, como veremos pronto.

Se especula la existencia de otro tipo de celdas convectivas, las llamadas *celdas gigantes*, con tamaños cercanos al grosor completo de la zona de convección y tiempos de vida del orden de un año. Sin embargo, carecemos de evidencias observacionales de este tipo de estructuras.

Por encima de la fotosfera se encuentra la *cromosfera* o esfera de color, que debe su nombre al tono rosado-rojizo que presenta cuando resulta visible durante unos segundos al principio y al final de un eclipse total de Sol. En esta capa muy transparente y poco densa la temperatura aumenta hacia el exterior, por lo que su espectro, llamado *espectro de "flash"*, muestra en *emisión* -más brillantes que el continuo de colores- líneas que aparecen en absorción en el espectro de la fotosfera como, por ejemplo, la intensa línea de hidrógeno neutro llamada  $H\alpha$ .

La cromosfera, que puede verse en la **Figura 5**, ha sido comparada con "una pradera ardiente" y su aspecto está íntimamente relacionado con el campo magnético solar.

Sobre la cromosfera se encuentra la *región de transición* hacia la siguiente capa. Se trata de una estrecha zona en la que la temperatura aumenta tan bruscamente (de unos 10000 a un millón de grados) en unos pocos cientos de kilómetros, que supone prácticamente una discontinuidad.

La corona es la parte más externa de la atmósfera solar, altamente inhomogénea, que se extiende hasta distancias de muchas veces el radio del Sol, incluso hasta la órbita de la Tierra. Sólo resulta visible durante los eclipses totales como un halo blancuzco, claramente no esférico, alrededor del disco solar, porque la luz difusa del cielo diurno enmascara normalmente su brillo, algo menor en promedio que el de la luna llena. En la **Figura 6** puede verse una hermosa imagen de la corona obtenida durante un eclipse. También es observable utilizando coronógrafos, telescopios especiales capaces de simular



Figura 5: Imagen de la **cromosfera** solar, obtenida a través de un filtro centrado en la línea  $H\alpha$ . Se observa la **red cromosférica** cubriendo toda la superficie del disco. **filamentos** oscuros (que corresponden a protuberancias brillantes cuando se observan en el borde del Sol), **plages** y **regiones activas** en general

(CORTESÍA DEL SPACE ENVIRONMENT LABORATORY, NATIONAL AERONAUTIC AND OCEANIC ADMINISTRATION DE BOULDER, COLORADO -EEUU-).

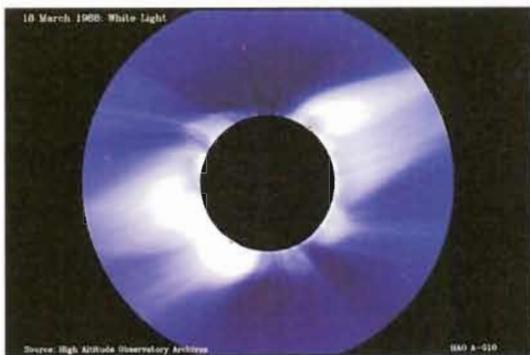


Figura 6: La corona solar observada durante el eclipse de 1988. (Norte arriba, Este a la izquierda), con impresionantes chorros en los bordes SE y NO, inclinados hacia el ecuador solar. Sólo unos pocos chorros más pequeños son visibles sobre los polos N y S.  
(CORTESIA DEL ARCHIVO DEL HIGH ALTITUDE OBSERVATORY, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH, EN BOULDER, COLORADO -EEUU-).

artificialmente un eclipse ocultando el disco luminoso del Sol.

Su apariencia se debe a la luz fotosférica dispersada por gas muy ionizado, muy poco denso y muy caliente, a unos  $2 \times 10^6$  K de temperatura (entendida ésta como la energía cinética media de los electrones libres). En las regiones del UV extremo y rayos X del espectro coronal se han observado líneas de emisión debidas a metales altamente ionizados que solo pueden existir a temperaturas muy altas. Con filtros centrados en esas longitudes de onda es posible observar la corona completa, no sólo alrededor del disco solar.

Además de gas caliente, la corona tiene un componente de polvo (granos de materia interestelar) que, en la zona más interior de la corona, se evapora por la intensa radiación solar y, más hacia el exterior, se concentra hacia el plano ecuatorial del Sol<sup>11</sup>.

## 9.2 El Sol activo

"Los campos magnéticos son para los astrofísicos como el sexo para los psicoanalistas." (H. C. van de Hulst)

Esta significativa frase de un notable científico indica la importancia fundamental del campo magnético en el marco de la Astrofísica en general y de la Física Solar en particular.

La más clara evidencia de que el campo magnético se manifiesta en la atmósfera solar de forma intermitente la constituyen la *red* y las *fáculas*.

La *red* fotosférica o *cromosférica* -según donde se observe- es una trama de puntos brillantes correspondientes a concentraciones de campo magnético (unos 1500 gauss en la fotosfera) en estrechos tubos de unos 150 km de diámetro. Los movimientos horizontales de fluido asociados a la supergranulación empujan y concentran las líneas de campo en los bordes de los supergránulos que son, por tanto, "delimitados" por la red.

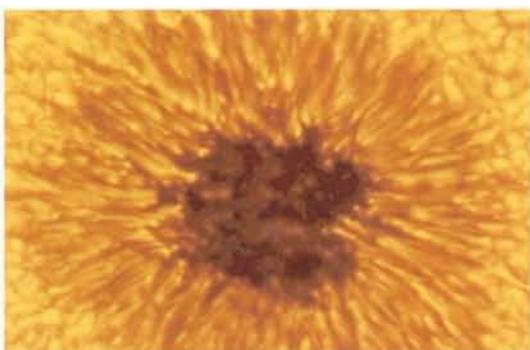


Figura 7: Imagen de una mancha solar con excelente resolución espacial. Se observa claramente la *umbra*, la *penumbra* con sus estructuras radiales claras y oscuras y la *granulación* circundante. Es una de las manchas más bonitas que se han observado, por lo que los autores de la imagen la llaman cariñosamente "Claudia", como la modelo Claudia Schiffer.  
(OBtenida en el TELESCOPIO DE LA TORRE SOLAR SUECA DEL ORM, LA PALMA -ESPAÑA- por los Dres. J.A. BONET y M. VAZQUEZ DEL IAC, A. HANSELMAYER DEL INSTITUT FÜR ASTRONOMIE DE GRAZ -AUSTRIA- y M. SOBOTKA DEL ASTRONOMICKY USTAV AKADEMIE DE ONDREJOV -REP. CHECA-).

Cerca del borde de la fotosfera son visibles estructuras brillantes de aspecto granulado llamadas *fáculas* (véase la **Figura 1**). Estas mismas estructuras se observan también en la cromosfera como extensas regiones brillantes que, en este caso, reciben el nombre de *plages* y son visibles en cualquier parte del disco (véase la **Figura 5**). Están formadas por agrupaciones de pequeñas estructuras magnéticas como las de la red, inmersas en la granulación circundante y situadas preferentemente en los espacios intergranulares.

Se denominan *regiones activas* en general a áreas relativamente extensas del Sol, con un intenso campo magnético local y un tiempo de vida limitado. No se localizan exclusivamente en una capa de la atmósfera solar sino que tienen distintas manifestaciones en la fotosfera, cromosfera y corona, que se describen a continuación.

Sin duda las estructuras más llamativas de la fotosfera son las *manchas solares*, zonas oscuras con tamaños que van desde unos 1500 km hasta unos 50000 km en algunos casos. Pueden verse muchas de ellas en la **Figura 1**. Aunque su existencia ya era conocida por el pueblo chino hace más de dos mil años fue Galileo quien,

observando con un telescopio el desplazamiento de las manchas sobre el disco, demostró que estas estructuras pertenecían realmente a la superficie del Sol y que éste rotaba.

Una mancha individual bien desarrollada como la que muestra la **Figura 7**, tiene una zona central más oscura denominada *umbra*, relativamente homogénea, rodeada por un anillo algo menos oscuro, la *penumbra*, con estructuras filamentosas brillantes y oscuras dispuestas radialmente.

<sup>11</sup> La luz fotosférica difundida por el polvo y los electrones de la corona produce la *luz zodiacal*, una tenue luminosidad visible a simple vista después del ocaso en noches muy claras, cerca del plano de la eclíptica

Las manchas suelen aparecer en grupos, más o menos complejos.

Ya a principios de este siglo, G.E. Hale determinó que las manchas eran intensas concentraciones de campo magnético (unos 3000 gauss en el centro decreciendo monótonamente hasta unos 1500 gauss en el borde exterior), cuyas líneas de fuerza atraviesan la superficie solar. El efecto de congelación del campo inhibe la convección que calienta la fotosfera en calma circundante, lo que produce un enfriamiento relativo de las manchas: por eso se ven oscuras. La temperatura típica en el centro de una mancha grande es de unos 4000 K frente a unos 5800 K en la fotosfera que la rodea<sup>12</sup>. La *Magnetohidrodinámica* (MHD), conjunto de estudios observacionales y teóricos que tratan de explicar cómo se generan y mantienen los campos magnéticos en plasmas, apoya esta explicación de la menor temperatura de las manchas, surgida hacia 1940, aunque admite que debe haber algún tipo de transporte convectivo en la umbra. Se han observado los *puntos umbrales*, pequeñas estructuras aisladas con un campo magnético menor que en el resto de la umbra, un brillo cercano al de la fotosfera y un movimiento ascendente, lo que parece confirmar su naturaleza convectiva.

La estructura de una mancha bajo la fotosfera no puede ser observada directamente, sino que ha de ser modelada. Se ha propuesto un modelo monolítico (con una única estructura magnética vertical y homogénea horizontalmente) y uno fibrilar (con muchas estructuras pequeñas agrupadas como un ramillete, entre cuyos huecos hay plasma no magnético), pero ninguno cumple satisfactoriamente todos los requisitos teóricos ni observacionales, por lo que este tema es todavía un asunto controvertido. Las líneas de campo, prácticamente verticales en la umbra, se abren e inclinan hasta ponerse casi paralelas a la superficie en la penumbra. Aún no está claro si la alternancia de filamentos brillantes y oscuros depende de la inclinación del campo magnético o tiene un origen convectivo.

Generalmente, las manchas no aparecen de repente bien formadas, sino que suelen surgir como pequeñas estructuras de forma irregular, usualmente sin penumbra (*poros*), que crecen durante unos días hasta alcanzar su tamaño total. Todas las manchas aparecen en el seno de fáculas, que son más extensas y de mayor duración que aquéllas, pero no todas las fáculas tienen asociadas manchas. Los grupos son frecuentemente *bipolares*, con una mancha delantera -en el sentido de avance del grupo según la rotación solar- y una trasera, de polaridad magnética opuesta. Suelen aparecer con dos manchas primarias visibles, que van creciendo y desarrollándose, mientras que van surgiendo más pequeñas manchitas en la fotosfera circundante. El máximo desarrollo se alcanza en dos o tres semanas, tiempo desde el cual el número de manchas disminuye por sucesiva fragmentación en estructuras cada vez menores, hasta su desaparición. Normalmente las manchas más grandes tienen tiempos de vida más largos -hasta dos o tres meses-. Los mecanismos causantes del equilibrio y desaparición de las manchas, que dependen de la interacción de la convección con los campos magnéticos, no son todavía bien conocidos, a pesar de los avances de la Magnetconvección.

Cerca de manchas muy intensas y fáculas suelen observarse en la cromosfera *fibrillas*, oscuros filamentos de gas de corta duración que se colocan siguiendo las líneas de campo magnético<sup>13</sup>.

Generalmente en las últimas fases del desarrollo de una región activa aparecen en la alta cromosfera y baja corona *protuberancias*, estructuras brillantes que se extienden desde el borde solar hacia el espacio exterior, en forma de chorros, oleadas, bucles o arcos. Cuando se observan proyectadas sobre el disco solar brillante se ven como oscuras cintas alargadas, llamadas *filamentos*. Pero, físicamente, filamentos y protuberancias son la misma cosa (condensaciones de gas unas cien veces más frío y más denso que su entorno) y su diferente aspecto es solo un efecto geométrico. Se observan fácilmente en imágenes tomadas con un filtro centrado en  $H\alpha$ , como la de la **Figura 5**.

Los filamentos se sitúan sobre las *líneas neutras* (en las que la intensidad del campo es nula y que separan regiones de polaridad magnética opuesta) y, generalmente, sobreviven durante meses tanto a las manchas como a las fáculas. Pueden hundirse, entrar en erupción o desaparecer súbitamente. En la **Figura 8** puede verse una enorme protuberancia de las clasificadas como *estáticas*, muy duraderas. Para evitar que el plasma más denso que la corona

12 Sin embargo, en términos absolutos, las manchas son aún bastante calientes y brillantes si pudiéramos ver en el cielo nocturno una mancha promedio aislada del disco solar sería tan brillante como la luna llena.

13 Su configuración recuerda mucho a la alineación de limaduras de hierro esparsas sobre un papel bajo el que se coloca un imán ordinario

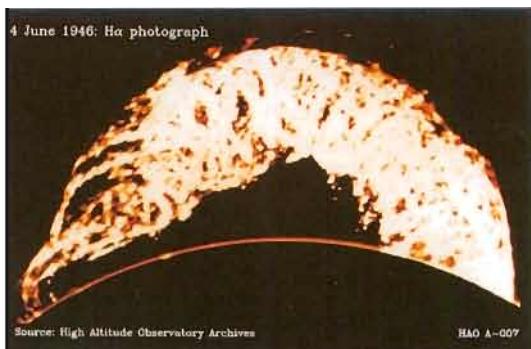


Figura 8: La **protuberancia** solar llamada "Grand Daddy", fotografiada en 1946 a través de un filtro centrado en la línea H $\alpha$ . Se extiende unos 200000 km sobre la superficie solar (la Tierra cabría perfectamente en su hueco). El arco brillante bajo la protuberancia es el borde del Sol.  
(CORTESÍA DEL ARCHIVO DEL HIGH ALTITUDE OBSERVATORY, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH, EN BOULDER -COLORADO, EEUU-.)

líneas de campo que deja a cada lado del punto de reconexión sendas "burbujas" de plasma<sup>14</sup>. Así, partículas cargadas caen de nuevo sobre la cromosfera y otras son expulsadas al espacio transformando gran cantidad de energía magnética en energía cinética y térmica del gas coronal.

El campo magnético es el elemento esencial de la corona: sin él, ésta no existiría. Parece que los bloques básicos que la forman son lazos magnéticos en los que el plasma caliente está atrapado. Las estructuras coronales más comunes son *chorros*, anchos cerca del borde y alargados en forma de huso hacia el exterior, más brillantes que el resto de la corona por tener mayor densidad que sus alrededores, lo que hace que dispersen más luz solar. La parte inferior de los chorros consiste en arcos de campo magnético unos dentro de otros, anclados a ambos lados de una línea neutra, que se abren y se extienden radialmente a partir de una cierta altura. Se cree que los "pies" de los lazos magnéticos deben estar anclados muy profundamente, quizás en el fondo de la zona de convección, donde se generan los campos magnéticos, porque el gas coronal no sigue la rotación diferencial de la fotosfera. En muchas ocasiones se observan en la base de los chorros cavidades oscuras que contienen protuberancias (puede verse un ejemplo en la parte superior derecha del borde solar en la **Figura 6**).

Observaciones de la corona en rayos X muestran *puntos brillantes* en medio de grandes regiones oscuras. Estas zonas de intensa emisión se sitúan casi siempre sobre regiones activas. Son visibles también los *agujeros coronales*, zonas oscuras en que el plasma es menos denso y caliente que en el resto de la corona. Los situados sobre los polos cambian muy poco, pero los que aparecen sobre otras latitudes sí parecen estar directamente relacionados con la actividad. Marcan áreas en que las líneas de campo magnético se abren hacia el espacio exterior en lugar de curvarse de nuevo hacia el Sol (aunque, por supuesto, se cierran a distancias muy grandes), con lo que el gas coronal puede fluir libremente desde estas regiones en forma de *viento solar*. Éste es un flujo variable y racheado de partículas cargadas (sobre todo electrones y protones, y algunos otros iones más pesados) que, viajando a velocidades típicas de más de 1 millón de km/h, tardan unos 4 o 5 días en alcanzar la Tierra<sup>15</sup>.

Una de las más impresionantes manifestaciones de la actividad solar son las *expulsiones coronales de masa*, asociadas a la desaparición de algunos chorros. En una de las más intensas, registrada en 1989, fueron lanzados al espacio unos 20 billones de kg de materia a una velocidad de más de 7 millones de km/h (aunque los valores más habituales son menores).

circundante caiga por efecto de la gravedad, éste debe estar atrapado localmente en el campo magnético y ser mantenido por él.

Las *fulguraciones* son probablemente el fenómeno más espectacular de la actividad solar: súbitas y violentas descargas de energía magnética en la proximidad de regiones activas, a menudo causadas por la repentina desaparición de un filamento. Pueden durar desde unos minutos hasta horas, van asociadas a la emisión de radiación X, UV, visible y ondas de radio, y acompañadas de emisión de partículas cargadas a velocidades de hasta 4 millones de km/h. El abrillantamiento que las caracteriza es fácilmente visible en rayos X o a través un filtro estrecho en H $\alpha$ . No se conoce con precisión el mecanismo capaz de provocar la liberación al espacio de hasta  $10^{25}$  julios de energía (equivalente a la de una bomba de 2000 millones de megatones) y un billón de kg de materia en cuestión de minutos. El modelo más plausible involucra el fenómeno de la *reconexión magnética*, que consiste en una reconfiguración más sencilla de las

<sup>14</sup> Una analogía sencilla de este proceso sería el goteo de agua desde un grifo casi cerrado: cuando el peso del agua supera la tensión superficial, el hilito inicial se rompe dejando caer una gota.

<sup>15</sup> El Sol está perdiendo aproximadamente 1 millón de toneladas de materia cada segundo en forma de viento solar. Aunque la cantidad parece muy grande, si el Sol tuviera que perder así toda su masa tardaría unas 10000 veces más tiempo del que aún permanecerá en su estado actual.

Para terminar este apartado, un breve comentario sobre el mecanismo de calentamiento de la cromosfera y la corona. Una posible explicación es el transporte mecánico de energía mediante ondas de choque: éstas serían generadas a partir ondas sonoras de baja frecuencia procedentes de la zona de convección, y aceleradas por el fuerte descenso de densidad en la cromosfera y corona, hasta superar la velocidad local del sonido (o velocidad de propagación de las perturbaciones de presión). También la caída de parte del material lanzado antes hacia el exterior produciría un calentamiento. Sin embargo, dado que estructuras activas de la cromosfera como las plages o la red aparecen brillantes, parece claro que el proceso que hace aumentar la temperatura desde el final de la fotosfera hacia el exterior debe involucrar necesariamente el campo magnético. El efecto de aniquilación de campo magnético por reconexión y las llamadas ondas magnetohidrodinámicas (capaces de producir una violenta oscilación de las partículas cargadas) parecen procesos válidos, pero aún carecemos de un modelo satisfactorio que combine los distintos mecanismos responsables del calentamiento.

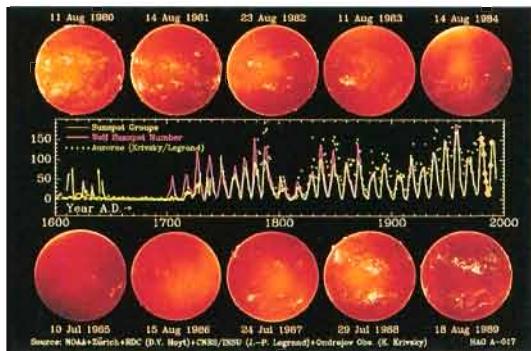


Figura 9. *El ciclo de actividad solar.* la línea amarilla traza el aumento y disminución periódica del número de manchas promediado por años; la línea púrpura es un contador similar, un índice normalizado llamado **número de Wolf**. Las cruces verdes indican número de auroras polares. Se muestran, además, imágenes de la cromosfera solar en  $H\alpha$  espaciadas un año, desde la fase de descenso de un ciclo a la de ascenso del siguiente. En ellas es evidente la diferencia en área cubierta por regiones activas y la latitud en la que éstas aparecen.

(Cortesía del Space Environment Laboratory, National Aeronautic and Oceanic Administration de Boulder, Colorado -EEUU-.)

siguiente es más rápida que la fase de descenso hasta el próximo mínimo. Estas irregularidades en el ciclo se han acentuado en épocas con un número extremadamente bajo de manchas y otros signos de actividad, como la comprendida entre 1645 y 1715, denominada *Mínimo de Maunder*. Se ha propuesto que, superpuestos al periodo de 11 años, pueden existir otros más largos, en concreto uno de casi un siglo. Pero los registros fiables de actividad son todavía cortos como para llegar a una conclusión clara en este aspecto.

Otra característica del ciclo solar es que la polaridad magnética de las manchas delanteras y traseras de los grupos es la misma para todos los grupos de un mismo hemisferio, y opuesta a la de los grupos del otro hemisferio. Además la orientación magnética de los grupos de uno y otro hemisferio se intercambia de un ciclo al siguiente. Por ello se dice que, en realidad, el periodo de actividad magnética es de 22 años, formado por dos ciclos de 11. Por otra parte, las regiones activas sufren una migración en latitud a lo largo del ciclo, más o menos simétrica en ambos hemisferios: al principio del ciclo aparecen hacia unos  $\pm 35^\circ$  o  $\pm 40^\circ$  y al final, más cerca del ecuador solar, entre  $\pm 10^\circ$ . Esta banda de latitudes en que suelen aparecer las manchas solares se denomina *cinturón de actividad*. Un dibujo de la variación con el tiempo de la posición de regiones activas o del porcentaje de área cubierta por manchas en latitud sobre el disco recibe el nombre de *diagrama de mariposa* porque recuerda a una fila de mariposas, cada una correspondiente a un ciclo. El máximo tiene lugar hacia la mitad de cada "mariposa", cuando la mayoría de las manchas se encuentran entre unos  $\pm 15^\circ$  de latitud. Hacia el final de un ciclo se observan las últimos grupos de manchas muy cerca del ecuador, al tiempo que los primeros del siguiente ciclo aparecen a mayores latitudes y con la polaridad magnética opuesta.

### 9.3 El ciclo solar

Los signos de actividad solar no son igualmente observables a lo largo del tiempo. Registros llevados a cabo durante décadas revelan un misterioso *ciclo* de aumento y disminución graduales en el número promedio de manchas visibles sobre el disco solar. Este hecho fue constatado por primera vez por H. Schwabe en 1843, quien estimó un periodo de unos 10 años para estas variaciones cíclicas. En 1848, R. Wolf reunió datos del número de manchas desde 1610, determinando una duración media del ciclo de 11.1 años. Trabajos posteriores han demostrado que la longitud de ciclos sucesivos no es estrictamente constante, sino que varía de unos 9 a unos 14 años, con un periodo medio de 10.8, por lo que normalmente se habla del *ciclo de 11 años*. Se ha observado que no sólo la aparición de manchas, sino de todos los fenómenos de carácter magnético, presenta esta periodicidad.

La imagen de la **Figura 9** es una reconstrucción histórica del número medio de manchas por año desde las primeras observaciones solares a través de un telescopio. En ella puede verse que el número máximo no es el mismo para todos los ciclos y que éstos son asimétricos, es decir, la fase de ascenso desde un mínimo al máximo

La explicación de la existencia del ciclo reside en la teoría de la *dinamo solar*, mecanismo responsable de la continua regeneración del campo magnético en el Sol, que supone una compleja interacción entre el campo magnético, la rotación diferencial y la convección.

Una enorme esfera de gas con gran cantidad de partículas cargadas que siguen el movimiento de rotación se comporta como una dinamo gigante: imaginemos una semilla de campo magnético inicial, residente en el fondo de la zona de convección, y orientado de modo que sus líneas de fuerza unan ambos polos. Este campo *poloidal* se va deformando debido a la rotación diferencial, adelantando la parte ecuatorial de las líneas de campo a la situada en latitudes más altas. Gradualmente este campo termina convirtiéndose en un campo *toroidal*, como un anillo alrededor del ecuador. Dado que la MHD predice que una estructura magnética tiende a ascender a la superficie por flotabilidad (porque para mantener el equilibrio de presiones y ser estable ha de ser menos densa que sus alrededores no magnéticos), los movimientos convectivos de las celdas de mayor tamaño concentran y amplifican más el campo, y lo empujan hasta la superficie formando un lazo en forma de  $\Omega$ . Las manchas son los cortes de estos bucles con la superficie. La fuerza de Coriolis inducida por la rotación rompe la simetría de este proceso tendiendo a torcer de nuevo las líneas de campo hasta recuperar la configuración poloidal, pero con polaridad invertida respecto a la del campo original. Y vuelta a empezar... Los valores concretos para el Sol de las magnitudes físicas involucradas dan lugar a un periodo de 22 años para el ciclo magnético.

Aunque la teoría dinamo explica bastante bien la mayoría de las características del ciclo, épocas como el Mínimo de Maunder y otras irregularidades están aún sin resolver.

#### 9.4 Interacciones Sol-Tierra

Ya los astrónomos del siglo pasado se dieron cuenta de que algunas manifestaciones de actividad solar intensa (como las fulguraciones, en que se liberan grandes cantidades de radiación) eran seguidas, minutos más tarde, por perturbaciones en instrumentos magnéticos de Tierra. Las fulguraciones más fuertes y las expulsiones coronales de masa lanzan al espacio material a velocidades superiores a la del viento solar normal, generando ondas de choque que llegan a la *magnetosfera*<sup>16</sup> y la perturban. Sus cambios se manifiestan en la superficie terrestre como *tormentas geomagnéticas*, que no son catastróficas sino, como mucho, "molestas": se produce un mayor nivel de ionización en la ionosfera que dificulta la transmisión de señales de radio de comunicaciones (que se reflejan en ella) y la recepción de ondas de radio procedentes de objetos astronómicos. También pueden producirse perturbaciones en las órbitas de satélites artificiales y en las redes de fluido eléctrico. La manifestación más común y espectacular de las tormentas geomagnéticas son las *auroras boreales y australes*, hermosas formaciones a modo de cortinas, rayos y arcos de colores que aparecen en el cielo de los polos.

Estos efectos son más frecuentes e intensos en los máximos del ciclo solar: a partir de registros históricos de auroras y del número de manchas se ha encontrado una notable correlación entre la amplitud de los ciclos y la frecuencia de aparición de auroras, como puede verse en la **Figura 9**; en particular se registraron muy pocas durante el Mínimo de Maunder. Estos datos han indicado también la existencia de otros períodos prolongados de baja actividad auroral: el Mínimo de Spörer (de 1420 a 1500) y el Mínimo de Wolf (de 1290 a 1340).

Dado el carácter transitorio de los fenómenos activos citados, salvo que su frecuencia pudiera cambiar drásticamente en períodos prolongados de tiempo, no parece directo que tales sucesos puedan inducir variaciones climáticas a largo plazo.

Es también conocido que la producción de los isótopos  $^{10}\text{Be}$  y  $^{14}\text{C}$  es sensible a la intensidad de rayos cósmicos galácticos que bombardean la alta atmósfera terrestre. El flujo de estos rayos es mayor en el mínimo del ciclo, ya que en el máximo son dispersados fuera del Sistema Solar por el apantallamiento producido por el viento solar. La abundancia de esos isótopos (determinada, por ejemplo, a partir de estudios de los anillos de los árboles) muestra notables incrementos durante los Mínimos de Maunder, Spörer y Wolf.

<sup>16</sup> La Tierra es como un gran dipolo magnético con una intensidad de campo media en los polos de  $\sim 0.6$  gauss. Tiene su propio ciclo magnético aperiódico, caracterizado por épocas de inversión de la polaridad y otras de polaridad fija. La región alrededor de la Tierra en que predomina su campo magnético sobre el del medio interplanetario se llama *magnetosfera* y se extiende hasta unas cien veces el radio terrestre.

El mecanismo que más claramente puede influir en la variabilidad climática en la Tierra son los cambios en la luminosidad global del Sol. Los efectos climáticos más espectaculares en los registros geológicos son las glaciaciones. Se han propuesto muy pocas explicaciones basadas en causas puramente solares y, por el momento, la más plausible parece la variación temporal de los parámetros orbitales de la Tierra, que modifica la cantidad de radiación solar recibida. Dada la importante variación en área cubierta por manchas oscuras a lo largo del ciclo, se podría esperar un descenso de la luminosidad solar cuando hay mayor número de manchas. Pero, de hecho, el Sol es ligeramente más luminoso cerca del máximo del ciclo, posiblemente porque las manchas están rodeadas por fáculas brillantes: el Mínimo de Maunder coincidió con una época de severos inviernos en Europa occidental, llamada a veces la "pequeña edad de hielo".

Ciertas porciones del espectro como el UV varían drásticamente a lo largo del ciclo. La interacción de la radiación UV con el oxígeno y el nitrógeno de nuestra atmósfera produce variaciones en la cantidad de ozono: habitualmente los mecanismos de producción y destrucción de ozono están equilibrados pero en períodos de mucha actividad solar parece prevalecer la producción. Aunque el UV contribuye muy poco a la radiación total del Sol, como la química y el balance energético de la alta atmósfera terrestre -a alturas mayores que 50 km- son dirigidos por el flujo de rayos UV, sus variaciones pueden tener importantes consecuencias sobre nuestro clima.

Desde el punto de vista del modelado teórico la situación es bastante complicada: en primer lugar, es preciso tener en cuenta los efectos geomagnéticos puros; en segundo lugar, es bastante difícil explicar cómo la troposfera (en la que tienen lugar los cambios climáticos) y la superficie terrestre responden a perturbaciones de la alta atmósfera; finalmente, no olvidemos que la tecnología humana está ya en condiciones de poder modificar sensiblemente nuestro clima.

Todas las correlaciones observadas sugieren una relación causa-efecto, pero las conexiones físicas entre el ciclo solar y las variaciones climáticas a gran escala todavía no son del todo claras.

## 10. LA FÍSICA SOLAR EN EL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

En el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) existe un grupo de trabajo al que tengo la suerte de pertenecer, bastante numeroso y bien consolidado, dedicado a investigar el Sol. Además de la biblioteca y medios informáticos disponibles en la sede central del IAC en La Laguna (Tenerife), para realizar nuestra investigación contamos con las instalaciones del Observatorio del Teide (OT), en Tenerife y del Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), en La Palma.

Los temas de investigación en el marco de la Física Solar que se abordan en el IAC pueden agruparse en dos amplias áreas: *Heliosismología* y el estudio de la *Estructura, dinámica y magnetismo solares*.

Dentro de la primera gran línea de trabajo se analizan las oscilaciones solares en velocidad y luminosidad, especialmente (aunque no sólo) a partir de datos obtenidos en el OT; éste es actualmente el único observatorio que colabora en las tres redes mundiales IRIS, BISON y GONG, cuyo propósito es disponer de series temporales de datos sin interrupción. Por otra parte, el IAC ha participado activamente en el diseño y elaboración de parte de los experimentos GOLF y VIRGO, lanzados a bordo del satélite SOHO en noviembre de 1995.

Dentro de la segunda área de investigación se lleva a cabo el análisis de estructuras fotosféricas (granulación, manchas solares, fáculas y red), cromosféricas (fibrillas) y de la baja corona (protuberancias), a partir de observaciones fotométricas, espectroscópicas y espectropolarimétricas. La interpretación de las mismas se realiza fundamentalmente mediante técnicas de inversión, elaboración de modelos teóricos o semiempíricos y realización de simulaciones numéricas complejas. También se realizan estudios de la variabilidad solar a largo plazo y trabajos en el campo de la Magnetohidrodinámica y el Transporte de Radiación.

Por último, el IAC está involucrado en el desarrollo de instrumentación

específica destinada a proporcionar observaciones cada vez de mejor calidad en los campos de máximo interés. Podemos citar los siguientes instrumentos: *Selector Automático de Imágenes Solares (SAIS)*, *Correlador Solar del IAC* (estabilizador de imágenes mediante técnicas de correlación en tiempo real) y *polarímetros* (para los rangos visible e infrarrojo, basados en cristales líquidos).

En la **Tabla 2** se relacionan los instrumentos solares<sup>17</sup> disponibles en el ORM (los dos primeros) y en el OT (todos los demás).

**Tabla 2: Instalaciones solares en los Observatorios de Canarias**

INSTRUMENTO	DIÁMETRO (CM)	PROPIETARIO	OPERATIVO DESDE EL AÑO	PRINCIPAL PRÓPOSITO CIENTÍFICO
SVST	50	Real Academia de Ciencias (S)	1984	Fotometría y espectrometría de muy alta resolución espacial.
DOT	40	Univ. Utrecht (H)	1996	Fotometría con alta resolución espacial.
<i>Laboratorio Solar</i> (diversos fotómetros y espectrómetros)	-	Univ. Birmingham (RU) Univ. Niza (F) NSO (EEUU) Univ. Tsing-Hua (T)	1976, 1989 1989 1986, 1994 1993	Datos que permiten estudiar las oscilaciones solares en luminosidad y velocidad para todo el Sol o por zonas
VNT	40	Inst. Kiepenheuer (A)	1972	Fotometría con alta resolución espacial
GCT	45	Univ. Göttingen (A)	1987	Espectroscopía y espectropolarímetria con alta resolución espacial
VTT	70	Inst. Kiepenheuer (A)	1989	Espectroscopía y espectropolarímetria con alta resolución espacial y espectral.
THEMIS	90	CNRS (F-I)	1996	Especialmente concebido para realizar espectroscopía y polarímetria de alta resolución espacial y espectral.

SVST: Swedish Vacuum Solar Tower, DOT. Dutch Open Telescope, VNT. Vacuum Newton Telescope; GCT Gregory Condé Telescope, VTT: Vacuum Tower Telescope; THEMIS: Telescope Héliographique pour L'Étude du Magnétisme et Instabilités Solaires  
CNRS: Centre National pour la Recherche Scientifique; NSO: National Solar Observatory  
S: Suecia; H: Holanda; RU: Reino Unido, F: Francia, EEUU: Estados Unidos; T: Taiwán, E: España; A: Alemania; I: Italia.

<sup>17</sup> Conviene reseñar algunas características peculiares de los telescopios solares. se construyen generalmente en torres, con objeto de minimizar la turbulencia local que produce el calentamiento diurno del suelo; con el mismo propósito los edificios se cubren de placas de un material especial pintado de blanco, muy reflectante, que se mantiene frío; y dada la gran cantidad de luz colectada, para evitar la distorsión de la imagen causada por el calentamiento del aire en el camino óptico, se hace el vacío en el interior del tubo del telescopio.

## 11. AÚN NO LO SABEMOS TODO SOBRE EL SOL

Como siempre, lo más atractivo e interesante es aquéllo que no conocemos... Entre las excitantes cuestiones abiertas de la Física Solar podemos destacar:

- insuficiente conocimiento del interior solar, aunque las técnicas indirectas que ya hemos mencionado nos acercan cada vez más a su correcta comprensión
- explicación del bajo flujo de neutrinos detectado
- conocimiento detallado de la rotación diferencial, especialmente de su variación con la profundidad
- comprensión de los mecanismos de excitación de las oscilaciones
- determinación de la forma en que se generan, mantienen y se manifiestan los campos magnéticos en el Sol
- conocimiento exhaustivo de la estructura de las manchas y otros signos de actividad
- explicación satisfactoria del mecanismo de desaparición de las manchas
- descripción y comprensión de todas las propiedades del ciclo solar
- explicación precisa del mecanismo de calentamiento de la cromosfera y la corona
- ...

Podemos afirmar, pues, con humildad, que aún no lo sabemos todo sobre el Sol. Afortunadamente, todavía queda entretenimiento, trabajo y alimento para nuestra curiosidad durante mucho tiempo.

## BIBLIOGRAFÍA

Si esta introducción al conocimiento del Sol ha conseguido interesarle y su curiosidad le pide más información, puede encontrarla en los siguientes libros y capítulos dedicados al Sol dentro de textos de Introducción a la Astronomía y Astrofísica:

*El Sol*, 1982, I. Nicolson (Ed. Hermann Blume, Progensa): aunque algo anticuado, es una buena primera aproximación para los aficionados a la Física Solar, muy ameno y bastante completo, con la gran ventaja de estar traducido al español.

*Astronomía Moderna*, 1979, L. Oster (Ed. Reverte S.A.): Cap. 7.

*Curso de Astronomía General*, 1992, P.I. Bakulin, E.V. Kononovich, V.I. Moroz (Ed. MIR): Cap. 9.

*Conceptual Astronomy*, 1993, M. Zeilik (Ed. John Wiley Sons): Cap. 10. Éste es un libro muy pedagógico.

*Introductory Astronomy and Astrophysics*, 1973, E.V.P. Smith y K.C. Jacobs (Ed. Saunders Company): Cap. 9. Éste es un libro bastante "físico" y claro, aunque un poco anticuado.

*The New Cosmos*, 1993, A. Unsöld, B. Baschek (Ed. Springer Verlag): Cap. 4. La información sobre el Sol aparece mezclada con la del resto de las estrellas y el nivel es más elevado que el de los otros libros citados en este grupo.

*The Physical Universe*, 1982, F.H. Shu (Ed. University Science Books): Cap. 5.

*The Astronomy & Astrophysics Encyclopedia*, 1992, S.P. Maran (editor) (Ed. Cambridge University Press): bajo el término "Sun" puede encontrarse información muy actualizada de casi todos los temas solares de interés escrita por especialistas.

*The Cambridge Atlas of Astronomy*, 1988, (Ed. Cambridge University Press): Cap. 1, después de la Introducción. Da una buena visión general, bastante actualizada, de lo que se hace en Física Solar.

*Discovering the Universe*, 1993, W.J. Kaufmann III (Ed. Freeman Company): Cap. 11.

Si desea información más técnica y especializada le pueden resultar útiles los siguientes libros.

*Lecciones de Física Solar*, 1984, M. Collados, J.I. García de la Rosa, P.L. Pallé Manzano, T. Roca Cortés, M. Vázquez y F. Kneer (Ed. IAC, Temas Monográficos, N 5 Serie C): resume conferencias sobre Física Solar impartidas en el IAC durante el curso 1983-84.

*The Sun*, 1989, M. Stix (Ed. Springer-Verlag).

*Astrophysics of the Sun*, 1988, H. Zirn (Ed. Cambridge University Press).

*The Atmosphere of the Sun*, 1988, C.J. Durrant (Ed. Adam Hilger, Bristol and Philadelphia).

*Secrets of the Sun*, 1984, R. Giovanelli (Ed. Cambridge University Press).

*The Sun, our Star*, 1982, R.W. Noyes (Ed. Harvard University Press).

*Solar Astrophysics*, 1990, P.V. Foukal (Ed. John Wiley Sons, Inc.).

*Solar Magnetohydrodynamics*, 1982, E.R. Priest (Ed. Reidel Publishing Company): el capítulo 1 es algo más asequible que el resto del libro.

*Observing the Sun*, 1991, P.O. Taylor (Ed. Cambridge University Press): observación del Sol para aficionados.

*Solar Observations: Techniques and Interpretation*, 1992, F. Sánchez, M. Collados y M. Vázquez (editores) (Ed. Cambridge University Press): presenta las lecciones impartidas por especialistas en la Escuela de Invierno con el mismo título celebrada en el IAC en 1991.

Los avances más recientes en los distintos campos de la Física Solar aparecen publicados en revistas internacionales como *Solar Physics*, *Astronomy & Astrophysics*, *Astrophysical Journal* y otras, así como en las Actas de los numerosos congresos y reuniones científicas que tienen lugar frecuentemente.



# NUESTRO BARRIO, EL SISTEMA SOLAR

Antonio Eff-Darwich

Instituto de Astrofísica de Canarias

## INTRODUCCIÓN.

¿Dónde está?, ¿Qué lo mantiene unido?, ¿Cómo se formó? y ¿Por qué es así?, son las grandes cuestiones que nos vamos a plantear a la hora de estudiar el Sistema Solar. En las preguntas que nos hemos formulado, queda de manifiesto que se va a tratar a nuestro sistema planetario como algo global, más que resaltar las diferencias que existen entre sus diversos componentes, buscaremos sus puntos en común. Que la Tierra tenga vida o que Marte sea de color rojo son hechos aislados que no deben obstaculizar nuestra visión globalizadora de lo que es el Sistema Solar.

No estamos interesados en dar cifras de masas, radios o velocidades de rotación de los planetas, ya que esto es bastante estándar y puede encontrarse en cualquier libro de consulta. Vamos a centrarnos en explicar las propiedades de los diferentes cuerpos del Sistema Solar, más que en describirlos.

Lo más interesante del enfoque que vamos a imponer es que se van a analizar las diferencias entre los componentes de nuestro sistema planetario, a partir de un modelo dinámico y evolutivo común.

## ¿QUÉ ES EL SISTEMA SOLAR?

Someramente, el Sistema Solar se compone de una estrella central, el Sol, alrededor de la cual orbitan una serie de cuerpos ligados gravitatoriamente a ella. Estos cuerpos pueden clasificarse en tres grupos: los planetas, los asteroides y los cometas. Los principales planetas son, ordenados por su cercanía al Sol: Mercurio, Venus, La Tierra, Marte, Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón (Figura 1). Los planetas son de tamaños, masas y composiciones químicas muy diversas; los hay rocosos, como La Tierra, y gaseosos como Júpiter; los hay muy activos como Io aparentemente muertos geológicamente como la Luna.

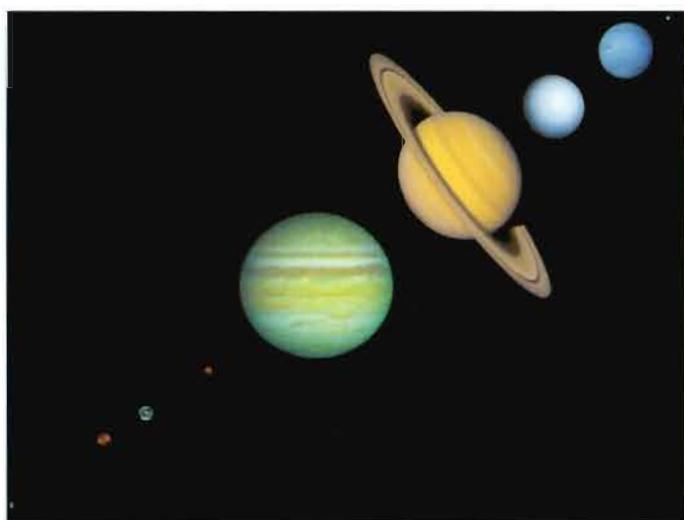


Figura 1. Vista general de Sistema Solar. En la banda izquierda y de amarillo aparece una porción de la superficie solar, para comparar con los tamaños relativos de los planetas.

millones de estrellas más, en lo que encontramos se denomina Vía Láctea. Nuestro Sol se localiza en uno de los brazos, de tamaño que tiene nuestra galaxia, de modo que el viaje desde el Sol a la Tierra lo hace en un instante. Queda patente que las ligaduras gravitatorias no son entre estrellas, sino que es algo más Universal. El hombre está ligado gravitatoriamente a la galaxia, que a su vez está ligada a la galaxia vecina.

Para tener una idea de las escalas relativas entre el tamaño de los planetas, de sus órbitas y el diámetro solar, hemos "comprimido" el Sistema Solar, tal que el Sol tenga un diámetro de 100 mts. El resultado de este experimento lo mostramos en la Figura 2. Parece increíble que el Sol sea capaz de mantener a planetas como Plutón o Neptuno ligados gravitatoriamente a él. En color rojo hemos representado el radio de una estrella gigante, Antares. Queda patente que aunque el tamaño del Sol es enorme comparado con el de los planetas, es insignificante frente a otros cuerpos celestes.

Los asteroides son cuerpos rocosos de tamaño muy inferior al de los planetas y que se localizan principalmente en una banda entre las órbitas de Marte y Júpiter. Los cometas son bolas de hielo y polvo cuyo origen se sitúa más allá de la órbita de Plutón, pero que de vez en cuando saltan de su posición de reposo y entran en el Sistema Solar interno con rumbo hacia el Sol.

El Sol no se encuentra aislado en el espacio, sino que está ligado gravitatoriamente a otros miles de se vienen a llamar galaxias. La galaxia en la que nos Es de tipo espiral, como la representada en la Figura 3, y azos espirales exteriores. Para hacerse una idea del enorme tir que la luz tardaría en atravesarla varias decenas de años; e la luz en 8 minutos. A estas enormes escalas galácticas vitorias no se dan únicamente entre los planetas y las al y que afecta a todo cuerpo o sistema de cuerpos. Así, un a la Tierra, que esta ligada al Sol, que está ligado al centro gada a otras galaxias.

### El problema de las escalas

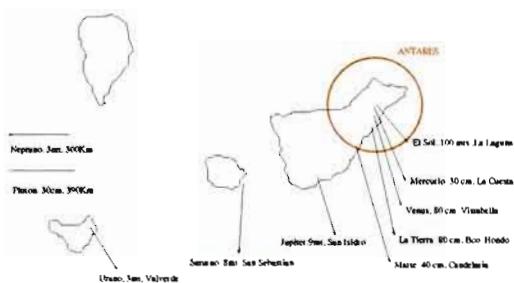


Figura 2. Comparación escalada del Sistema Solar y la provincia de Santa Cruz de Tenerife.

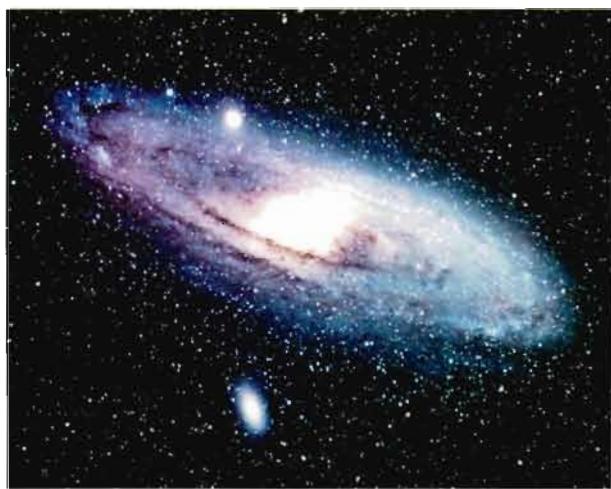


Figura 3: Galaxia de Andrómeda

## CONOCER EL SISTEMA SOLAR

Que la Tierra gire alrededor del Sol es algo que ya damos por supuesto, pero no siempre ha sido así. Desde muy antiguo ha habido teorías, muchas veces dogmas de fe, que han intentado explicar el movimiento de los planetas y del Sol. Las grandes civilizaciones fluviales como Egipto, China o Mesopotamia, conocían con gran precisión el movimiento de algunos planetas, el Sol e incluso el paso de cometas. Este conocimiento era usado con fines religiosos, sociales y políticos. En tiempos de la Grecia Clásica, se vivió una época de gran libertad de pensamiento y se realizaron proezas como la medición del radio de la Tierra (lo que supone decir que ésta es esférica), de la distancia Tierra-Sol o Tierra-Luna. El problema es que se aceptaban todo tipo de ideas, y la que se impuso fue la concepción aristotélica del Universo, con la Tierra como centro. Fue necesario crear un complicado aparato matemático que describiese el movimiento relativo de los planetas alrededor de la Tierra. El encargado de tan ardua labor fue un astrónomo llamado Ptolomeo, que pese a partir de una hipótesis falsa, realizó cálculos de la posición de los planetas de extrema precisión.

Hubo que esperar hasta bien entrado el siglo XVI, para que un monje polaco, propusiese un modelo más sencillo consistente en hacer girar la Tierra y el resto de los planetas alrededor del Sol. Esta idea chocaba frontalmente con los dogmas de fe de la Iglesia Católica, por lo que Copérnico esperó hasta su muerte para publicar sus trabajos, así se ahorraba los tormentos de los que habría sido objeto por parte de la Inquisición. Menos precavido fue Galileo Galilei quien, basándose en medidas del gran astrónomo Tycho Brahe y otras propias, apoyó las hipótesis de Copérnico. Esto le trajo no pocos problemas con el Santo Oficio.

Una vez aceptada la teoría heliocéntrica (los planetas giran alrededor del Sol) y ya en el siglo XVII, Kepler publica sus famosas leyes del movimiento de los planetas, basadas en cuidadosas observaciones. Kepler es la frontera entre el científico moderno y el científico-alquímista del medievo. Pese a que obtuvo con gran precisión las leyes del movimiento planetario, pasó parte de su vida buscando unicornios. Las leyes púramente empíricas de Kepler fueron explicadas por Newton gracias a la Teoría de la Gravitación, verdadero hito científico, por cuanto una teoría tan sencilla es capaz de explicar tal diversidad de fenómenos físicos. Es, sin duda alguna, una de las más importantes contribuciones a la ciencia moderna. Con Newton, el concepto de Sistema Solar que tenemos hoy en día queda definido; las aportaciones posteriores se centran en el descubrimiento de nuevos planetas y otros cuerpos, además de su interacción con otra fuerza muy importante, la asociada al magnetismo.

## INTERACCIONES EN EL SISTEMA SOLAR: GRAVEDAD Y MAGNETISMO.

Ya hemos comentado la enorme importancia de los descubrimientos de Newton. Hasta aquel entonces, existían modelos de como debía estar constituido el Sistema Solar, pero no había una teoría científica que explicase tal disposición. Era necesario conocer porqué los planetas se comportaban dinámicamente siguiendo las leyes de Kepler, que pasamos a enumerar y que podemos ver en la Figura 4:

- Los planetas se mueven en órbitas elípticas alrededor del Sol, que se sitúa en uno de los focos de esa elipse.
- El periodo al cuadrado de rotación de los planetas alrededor del Sol, es proporcional al semieje mayor "a" de la elipse al cubo .

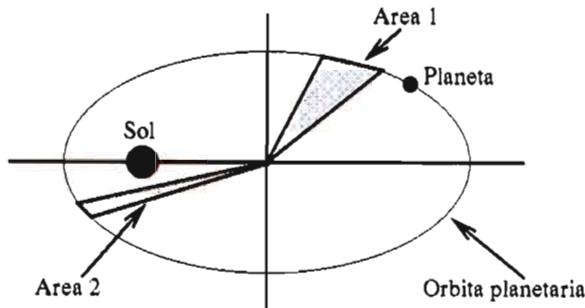


Figura 4: Teoría kepleriana del movimiento de los planetas

- Las áreas barridas por la línea que une un planeta al Sol (por ejemplo las áreas 1 y 2 de la Figura 4), son iguales si los dos intervalos de tiempo del barrido son iguales.

Newton postuló que cualesquiera dos cuerpos sentían una atracción (denominada gravitatoria) que era proporcional a sus masas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que los separa. Matemáticamente, esta genial teoría se puede expresar como:

$$F_{12} = - \frac{Gm_1 m_2}{r_{12}^2}$$

Los números 1 y 2 denotan a las dos partículas que se atraen;  $m$  indica masa y  $r$  la distancia.  $G$  es una constante, denominada de Gravitación Universal. Parece que la relación está equivocada ya que la fuerza  $F$  va a ser negativa. Esto es un simple convenio matemático, donde las fuerzas atractivas son negativas y las repulsivas positivas.

Con esta relación tan simple es posible explicar todas las leyes de Kepler y un montón de fenómenos físicos más, en razón de las interacciones gravitatorias entre el Sol y los planetas. Para ello es necesario introducir un concepto importantísimo en Física: las Leyes de Conservación. Se supone que el Sistema Solar está lo suficientemente aislado como para poder considerarlo un conjunto cerrado del que no entra ni sale nada. De esta forma, si algún cuerpo pierde velocidad, masa o energía, es captada por otro cuerpo o cuerpos. Por lo tanto, aplicando conservación de la energía total que hay entre el Sol y cada planeta, y que viene dada por la energía del movimiento o cinética y la de atracción gravitatoria o potencial, podemos explicar el movimiento elíptico de los cuerpos que rotan alrededor del Sol y las propiedades que ello conlleva.

Que haya una fuerza tan homogénea actuando, hace que las propiedades dinámicas relacionadas con la gravedad sean muy parecidas entre todos los planetas y demás cuerpos del Sistema Solar. Así, por ejemplo, muchos de los planetas rotan con períodos muy parecidos del orden de horas (desde la Tierra a Júpiter o Saturno). Esto también provoca que la inclinación de las órbitas planetarias sea muy baja, al igual que su excentricidad (alejamiento de la forma circular). Hay, por lo tanto, muchas más propiedades comunes a todos los cuerpos del Sistema Solar.

Por conservación de la energía es posible explicar también fenómenos tan curiosos como las interacciones gravitatorias del sistema Tierra-Luna. La Tierra tiene mucha más masa que la Luna, pero de la definición de la fuerza de la gravedad, la Luna también atrae a la Tierra, que tiende a frenarse, lo que provoca que los días en nuestro planeta duran cada vez más (unos 3 milisegundos por siglo); pero si nuestro planeta pierde velocidad, por conservación, esto se debe traducir en algún efecto sobre la Luna, y este efecto es el alejamiento del satélite de nuestro planeta (unos 6 centímetros por año).

La gravedad mantiene unido a todo el Sistema Solar y es su sustento, pero hay otra fuerza muy importante y que es también de carácter universal: el magnetismo. El Sol y muchos planetas poseen importantes campos magnéticos, o sea actúan como potentes imanes. Podemos explicar el origen de tales imanes mediante un sencillo experimento casero consistente en tomar un alambre y enrollarlo en espiral; dicho alambre se conecta a una batería y en el centro de la espiral se coloca un clavo de hierro. Ese clavo se convertirá en un imán que atraerá a cualquier objeto metálico que se le acerque. Dicho fenómeno se debe a que por la espiral circulan partículas cargadas (electrones en este caso) que dan lugar a la aparición del campo magnético.

En general, todos los planetas y el Sol poseen velocidades de rotación relativamente grandes; en su interior hay zonas de altas temperaturas donde circulan (rotan) libremente partículas cargadas (serían como los electrones que se mueven en la espiral) que van a dar lugar al magnetismo observado en los planetas y el Sol.

Estos enormes imanes pueden atrapar partículas cargadas procedentes del espacio interplanetario. Un caso muy espectacular ocurre cuando el Sol emite gran cantidad de



Figura 5: Aurora austral vista desde un satélite espacial

partículas energéticas cargadas procedentes de alguna tormenta solar; la Tierra atrapa muchas de ellas que caen por los sumideros que son los polos terrestres, dando lugar a las conocidas auroras boreales o australes, como la presentada en la Figura 5.

Aunque el Sol sea tan enorme, su campo magnético global es de una magnitud comparable al de los imanes que se ponen en las puertas de las neveras para que se cierren. Este no es el caso de Júpiter; este planeta tiene tal campo magnético (medible en millones de watos), que es capaz de destrozar cuerpo que se adentren en su campo de influencia. Tal desgraciada suerte tiene un satélite de Júpiter denominado Io. De vez en cuando entra en el campo de acción del imán joviano, lo que provoca que literalmente se desprendan pedazos de su superficie.

## EVOLUCIÓN DEL SISTEMA SOLAR.

Hasta el momento, hemos estudiado la estructura y dinámica planetarias y no hemos hecho diferencias entre un cometa, un planeta o cualquier otro cuerpo, ya que se rigen por los mismos patrones. Esto no sólo se debe a que están sujetos a las mismas fuerzas o campos de fuerzas, sino que tienen un origen y evolución en común.

Parece ser que el Sistema Solar empezó a generarse hace unos 5.000 o 6.000 millones de años, a partir de una nube de gas y polvo muy parecida a la Nebulosa de Orión, esa especie de neblina que se puede observar a simple vista, justo debajo de las tres estrellas que forman el "cinturón del guerrero". Estas nubes de gas empezaron a condensarse, a colapsar hacia dentro de sí por algún motivo externo, como puede ser la explosión de una supernova muy cercana o la actividad de alguna gran estrella de las proximidades. El núcleo de la nebulosa se contrae más rápidamente y da lugar a la formación en unos 10.000 años, de una zona muy densa que constituye el primitivo núcleo del Sol. Las partes más externas de la nebulosa siguen un proceso bien conocido en geología y que es la condensación de elementos: en lugares de altas temperaturas, especies como el magnesio, el aluminio y otros se "pegan" formando pequeños gránulos de polvo, que a su vez se condensan en granos cada vez más grandes. Esto ocurrió en el caso de la formación de la Tierra, que vamos a ver con más detenimiento.

Estos granos que hemos comentado se hicieron cada vez más grandes, y en un tiempo de unos 10 millones de años, dieron lugar a "planetoides" con tamaños del orden de metros a kilómetros. Alguno de esos planetoides de mayor tamaño, atraído gravitatoriamente a otros, con lo que la primitiva Tierra aumentaba de tamaño. Conforme el tamaño era mayor, con mayor fuerza eran atraídos los "planetoides", con lo que los impactos eran muy energéticos, tanto que llegaron a fundir por entero al planeta, que se convirtió en una inmensa bola de magma. Al caer los "planetoides" sobre la superficie terrestre, se desintegraban, liberando los gases que contenían en su interior; dichos gases empezaron a formar la atmósfera, en un principio formada principalmente de hidrógeno, nitrógeno y compuestos moleculares pesados.

Llegó un momento, hace unos 1000 millones de años, en que la densidad de "planetoides" descendió lo suficiente como para que cesara el bombardeo sobre nuestro planeta, y este empezara a enfriarse. El proceso de enfriamiento comenzó con la formación de la corteza, que es aún en la actualidad lo suficientemente fina como para que flote sobre el magma interno, dando lugar a la denominada tectónica de placas (movimiento de los continentes, formación de cordilleras y volcanes). Así llegamos al presente, con un planeta muy dinámico, plagado de volcanes y con un aspecto siempre cambiante. La teoría expuesta explica muy bien la evolución terrestre, pero abre muchas incógnitas que vamos a intentar explicar.

Sabemos que hay volcanes y movimientos continentales en la Tierra o Venus, pero no en planetas como Mercurio o la Luna. Esto se debe a que estos dos últimos son mucho más

pequeños que la Tierra, por ello se enfriaron mucho antes. Así, en el tiempo en el que la corteza de la Tierra adquirió su grosor actual, la Luna o Mercurio prácticamente se solidificaron impidiendo el escape del magma que pudiera quedar en su núcleo, de ahí que no haya volcanes en actividad.

Otra cuestión que plantearse es como la Tierra y Venus, siendo tan parecidos en masa, tamaño y composición química, son tan diferentes; uno, la Tierra alberga vida, mientras que el otro es un infierno con nubes perpetuas y lluvias de ácido sulfúrico. La respuesta se llama "efecto invernadero". Remontémonos en el tiempo unos 1000 millones de años, cuando todavía caía algún "planetido" tanto en la Tierra como en Venus, en aquel momento prácticamente mellizos. Los gases desprendidos de los "planetoides" formaban la atmósfera y una gruesa capa de nubes de agua y dióxido de carbono. Llegó un momento en que la densidad del vapor de agua de esas nubes era tan alta en la Tierra que condensaron en lluvia. Diluyó durante años, formándose los océanos actuales. El dióxido de carbono de las nubes se

precipitó a los mares para formar las rocas calcáreas que hoy se encuentran en todas las masas continentales. En el caso de Venus, aunque la densidad del vapor de agua aumentó muchísimo, al estar un poco más cerca del Sol que la Tierra, su temperatura era un poco mayor, por lo que el vapor de agua no condensó en lluvia. Las nubes en Venus actuaron como una pantalla (Figura 6), como las paredes de un invernadero, por lo que la temperatura del planeta subió hasta hacerlo infernal e inhóspito.

Otra pregunta que tenemos en el candelero es porqué hay planetas rocosos como Venus y otros son enormes bolas gaseosas como Júpiter. La explicación es también evolutiva. Ya dijimos que los gránulos de polvo de magnesio y aluminio que dieron lugar a la formación de planetas de tipo rocoso, necesitan de una temperatura elevada. En la zona donde se encuentra en la actualidad Júpiter, las temperaturas son muy bajas, por lo que los gránulos primigenios tienen una alta concentración de hielos de agua, metano y otros compuestos. Estos hielos actúan como un potente pegamento, por lo que en el tiempo en que la Tierra tenía el tamaño de unos kilómetros, Júpiter era una gigantesca masa rocosa de

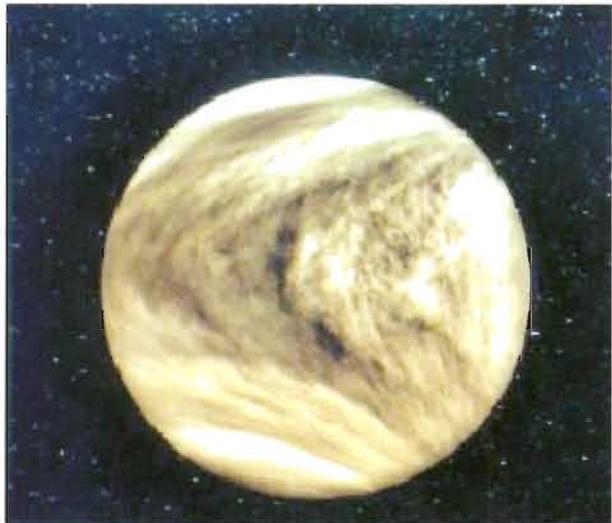


Figura 6: Atmósfera nubosa de Venus

varias veces el tamaño de nuestro planeta. Con tal diámetro y masa, era capaz de atraer el gas interplanetario sobrante de la primitiva nebulosa, con lo que se rodeó de una inmensa capa gaseosa.

La última cuestión que nos planteamos es el origen de asteroides y cometas. Pues simplemente son los deshechos, los ladrillos sobrantes del edificio que supone el Sistema Solar. Los asteroides son "planetoides" formados en zonas de altas temperaturas, de ahí su aspecto rocoso. Los cometas son "planetoides" nacidos en las partes más externas del Sistema Solar, donde las temperaturas son muy bajas, por lo que su principal componente es el hielo.

Una vez estudiado el origen del Sistema Solar, y respondidas bastantes preguntas acerca de su composición, vamos a analizar con más detenimiento sus distintas componentes, para darnos cuenta de que no son en realidad tan distintas.

## DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA SOLAR

Pese a que hemos visto la gran cantidad de semejanzas existentes entre los distintos cuerpos que forman el Sistema Solar, hay que reconocer que también existen claras diferencias entre ellos. Podemos encuadrar a todos los componentes de nuestro sistema planetario en cuatro grupos: los planetas rocosos, los planetas gaseosos, los asteroides y los cometas.

Los planetas rocosos se caracterizan por tener una superficie geológicamente activa. Dicha actividad viene dada por procesos externos (impactos de meteoritos) y por procesos propios del planeta (actividad atmosférica, deriva continental, vulcanismos y actividad de la hidrosfera). Podríamos pensar que todo este tipo de fenómenos se dan únicamente en la



Figura 7: Cráter de Lonar, India.

Tierra, donde nos hemos acostumbrado a ellos, pero se suelen dar en la mayoría de los planetas rocosos.

Quizas, el fenómeno geológico que más nos llame la atención sea el de los cráteres. Son producidos por el impacto de meteoritos que penetran en la atmósfera terrestre a gran velocidad. La combinación de masa y velocidad de estos cuerpos hacen que sus impactos liberen una energía enorme; por poner un ejemplo, si un meteorito de unos 10 metros se acercara a la Tierra a unos 16 kilómetros por segundo, cada gramo de él equivaldría a unos 100 de TNT. Son muy fáciles de distinguir en planetas como la Luna o Mercurio, pero la Tierra está también llena de ellos, aunque hay que saber buscarlos. El problema básico para su detección en nuestro planeta es que la erosión actúa muy rápido, al contrario que en la Luna. La zona menos castigada por estos procesos erosivos es la placa continental canadiense; es por ello que en este país existe una

gran concentración de impactos por meteoritos. En la Figura 7, presentamos uno de estos impactos camuflado en forma de lago.

Un fenómeno muy espectacular de actividad geológica, propia de planetas rocosos, es el vulcanismo. Sabemos que en la Tierra el magma puede ascender a la superficie con gran facilidad a través de grietas en su delgada corteza. También se producen vulcanismos submarinos donde las placas continentales se están formando. Otros planetas presentan también gran actividad volcánica; por ejemplo Marte tiene el mayor volcán del Sistema Solar, el Monte Olimpo (ver Figura 8), un gigantesco cono volcánico de casi 24 kilómetros de altura y 500 de diámetro. ¿Cómo es posible que un volcán alcance tal altura?. La respuesta viene dada por la baja gravedad de este planeta, por lo que el magma que escapa del interior planetario no es tan fuertemente atraido como lo sería en la Tierra, dando lugar a fenómenos geológicos de tal magnitud. Otro planeta con actividad volcánica es Io (ver Figura 9), un satélite de Júpiter. Sin embargo, sus volcanes no provienen tanto de una actividad geológica propia, como del fuerte tirón gravitatorio que ejercen Júpiter y dos grandes satélites suyos, Europa y Ganimedes, que hacen que Io sea muy inestable y por ende muy activo. Un último caso a reseñar es Tritón, un satélite de Neptuno, que tiene la particularidad de poseer volcanes que no expulsan lava, sino hielos de nitrógeno y metano. Esto es debido a que cuando el planeta es calentado por el Sol, los hielos atrapados en su interior subliman dando lugar a esta especie de geysers.

La atmósfera, y muy concretamente el viento, es también un factor moldeador de la superficie de los planetas rocosos. En la Tierra sufrimos muchas veces su demoledor efecto, pero no es la única. En Marte, se han detectado gigantescas tormentas de polvo (ver Figura

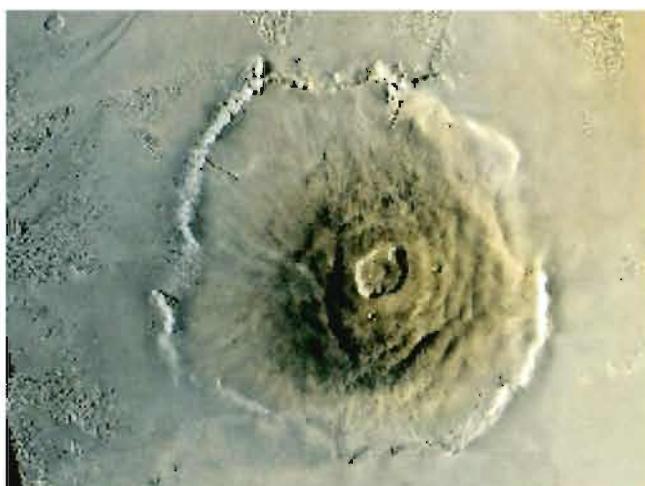


Figura 8: Monte Olimpo

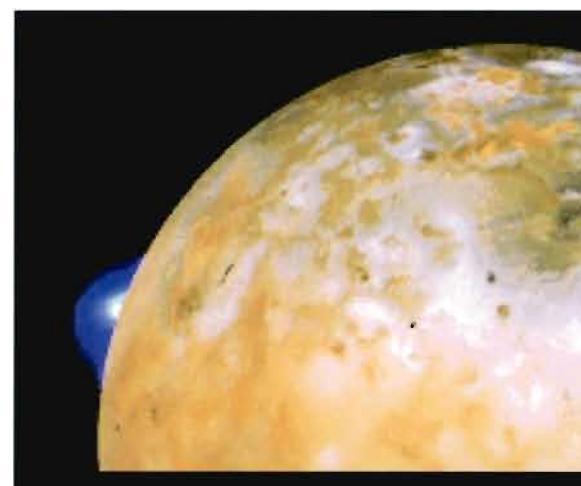


Figura 9: Superficie de Io. La mancha azul es un volcán en erupción

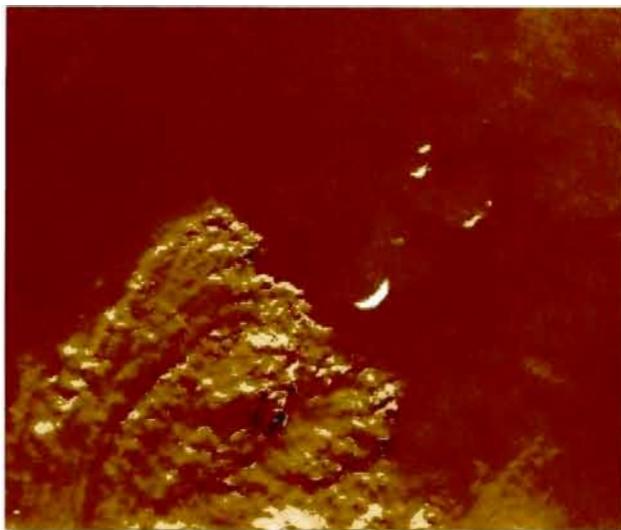


Figura 10. Tormenta de polvo en Marte



Figura 11. Atmósfera de Titán

10), que pueden llegar a cubrir totalmente al planeta. En Venus, el viento puede alcanzar velocidades de varios cientos de kilómetros por hora. Titán, el mayor satélite del Sistema Solar, posee una gruesa atmósfera, visible en fotografías como la mostrada en la Figura 11. La composición de esa atmósfera es muy similar a la del smog o nube de humo que cubre algunas grandes ciudades de nuestro planeta. Parece que Titán es el mejor candidato posible para encontrar vida, debido a la presencia de una atmósfera tan prometedora.

La hidrosfera es también un agente erosionador. Quien piense que la Tierra es el único planeta afectado por este tipo de actividad, está muy equivocado. En Marte existen dos casquetes polares (ver Figura 12) que varían de tamaño con el cambio estacional, actuando como una especie de glaciares. Hay también indicios de antiguos cursos de agua, por lo que parece que en épocas pasadas hubo ríos en la superficie marciana, lo que podría haber supuesto la presencia de alguna forma de vida. Sin embargo, las sondas americanas mandadas a Marte no han detectado satisfactoriamente ningún indicio de vida. Otro ejemplo muy espectacular de actividad hidrálica la encontramos en Europa, otro satélite de Júpiter. Su superficie está totalmente cubierta por una gruesa capa de hielos de agua y metano (ver Figura 13). Destacan en el hielo unos líneas oscuras que parecen zonas donde el hielo se está resquebrajando.

En los planetas gaseosos o jovianos no podemos ver su superficie, oculta por una gruesa capa gaseosa, compuesta principalmente de hidrógeno y helio. Sin embargo tienen muchas propiedades que los definen y diferencian. Son planetas de gran tamaño y masa, por lo que llevan ligados gravitatoriamente un conjunto de cuerpos muy interesantes, los satélites y los anillos. Los satélites asociados a cada planeta varían muchísimo en tamaño y composición. Parece ser que algunos de ellos han sido atrapados por los enormes campos gravitatorios presentes, pero los más grandes se formaron junto con el planeta gaseoso, que actúa como un Sol para ellos. Entre los satélites más destacables están Io, Europa, Titán y Tritón, de los que ya hemos comentado sus principales características.

Los anillos no sólo están presentes alrededor de Saturno, sino que son algo común a todos los planetas gaseosos, incluido Júpiter (ver figura 14). Están compuestos de pequeñas rocas de hielo que nunca llegaron a formar un planeta debido al enorme influjo gravitacional del planeta madre, que literalmente tritura cualquier objeto de tamaño apreciable que esté muy cerca de su superficie.

La última propiedad a destacar de los planetas jovianos es la violenta actividad en sus atmósferas, dominada por vientos que alcanzan grandes velocidades y tormentas ciclónicas de gran envergadura y que pueden permanecer visibles por años, como la Gran Mancha Roja de Júpiter (Figura 15) o la ya desaparecida Mancha

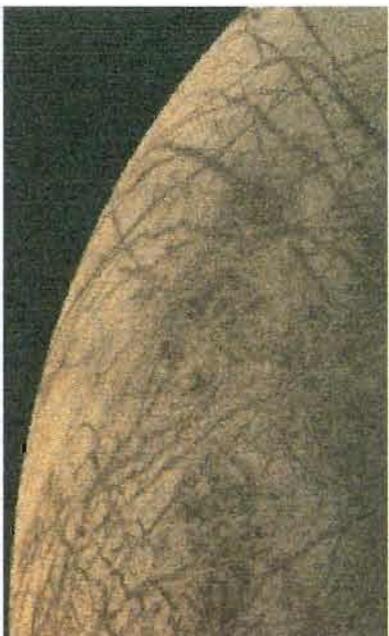


Figura 13. Europa

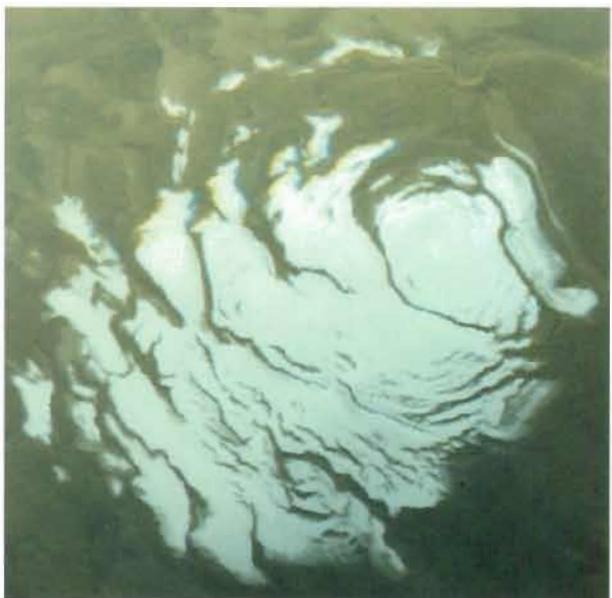


Figura 12: Polo sur marciano

Blanca de Neptuno.

Una vez vistas las propiedades de los planetas, centrémonos en lo que habíamos denominado como escombros planetarios, los asteroides y los cometas. Como ya hemos dicho, los asteroides son enormes rocas con tamaños que van de los cientos de kilómetros, como Gaspra (Figura 16), a las decenas de metros. Se estima que puede haber del orden de 100.000 millones de asteroides que superen el metro de diámetro. Se concentran principalmente en el llamado cinturón de asteroides, una franja situada entre las órbitas de Marte y Júpiter. Se dice que el cinturón es el resto de un planeta destruido, pero la verdad es que en esa zona no se puede formar ningún planeta debido a la acción destructiva conjunta de las atracciones gravitatorias del Sol y Júpiter.

Los cometas, como el de la Figura 17, son bellos espectáculos en el firmamento. Se encuentran concentrados muy lejos, más allá de la órbita de Plutón. Por algún tipo de perturbación empiezan a moverse y a caer hacia el centro del Sistema Solar, hacia el Sol. Cuanto más se acercan mayor es la temperatura, por lo que el hielo que lo forman se empieza a sublimar y a interactuar con partículas del viento solar, generando así una parte de la cola de los cometas; la otra parte

la forman los granos de polvo que el cometa lleva consigo y que se desprenden junto con el hielo. La cola crece de tamaño cuanto más cerca del Sol esté el cometa, pudiendo llegar a medir varias decenas de millones de kilómetros. Una vez que el cometa da la vuelta al Sol (si no es que choca con él) la cola va disminuyendo de tamaño.

Llegará un momento, cuando el cometa haya dado varias vueltas alrededor del Sol, en que se disuelve, ya que habrá perdido gran parte de su masa a través de la cola. Si la Tierra atraviesa accidentalmente la trayectoria de un cometa, se producen las famosas lluvias de estrellas, que no son más que granos de polvo de la cola cometaria. Hablando de accidentes, hay ocasiones en que un planeta no pasa por la trayectoria de un cometa, sino que choca con él, como pasó en el verano de 1995 con el impacto del cometa Shoemaker-Levy con Júpiter (Figura 18). Las probabilidades son bajas, aunque no nulas, ya que son muchos los cuerpos que un cometa se puede encontrar a su paso.

### PLANETAS EN OTRAS ESTRELLAS.

El proceso evolutivo seguido por nuestro Sistema Solar no parece nada exótico, por lo que debería haber otras estrellas que hayan seguido una evolución similar y estén rodeadas



Figura 14: Anillos de Júpiter



Figura 15: Gran Mancha Roja de Júpiter



Figura 16. Gaspra



Figura 17. Cometa West



Figura 18. Impacto del fragmento G del cometa Shoemaker-Levy con Júpiter

de un sistema planetario. La búsqueda directa de planetas extrasolares no es tarea fácil, debido sobre todo al pequeño tamaño de estos frente a su estrella madre. Debemos buscar técnicas indirectas de rastreo. El caso del púlsar PSR1257+12 constituye un ejemplo de búsqueda indirecta. Un púlsar es uno de los estadios evolutivos más avanzados de una estrella; ésta actúa como una especie de faro, emitiendo unos pulsos de energía con una periodicidad que llega a tener exactitudes de millonésimas de segundo. Tal es la precisión de estos pulsos, que se llegó a pensar que los púlsares eran algún tipo de emisor de una inteligencia alienígena. Sin embargo, PSR1257+12 posee cierta aperiodicidad que ha sido achacada a la presencia de un planeta que hace que la estrella se mueva de su posición de equilibrio, y esté en ciertos momentos más cerca de nosotros y en otros más alejada, por lo que el pulso tardará menos o más tiempo en llegarnos. De todas maneras, las estrellas más interesantes son aquellas de tipo solar o similares que puedan albergar vida.

Una segunda forma de localizar planetas extrasolares es buscar desplazamientos en la estrellas provocados por la presencia de algún planeta. Este tipo de técnicas se basa en el hecho de que en realidad un planeta no gira alrededor de su estrella, sino que ambos cuerpos lo hacen en torno a un punto localizado cerca de esta última (cuanto más masa tenga la estrella y menos el planeta, más cerca estará el punto de giro de ella). El movimiento de giro

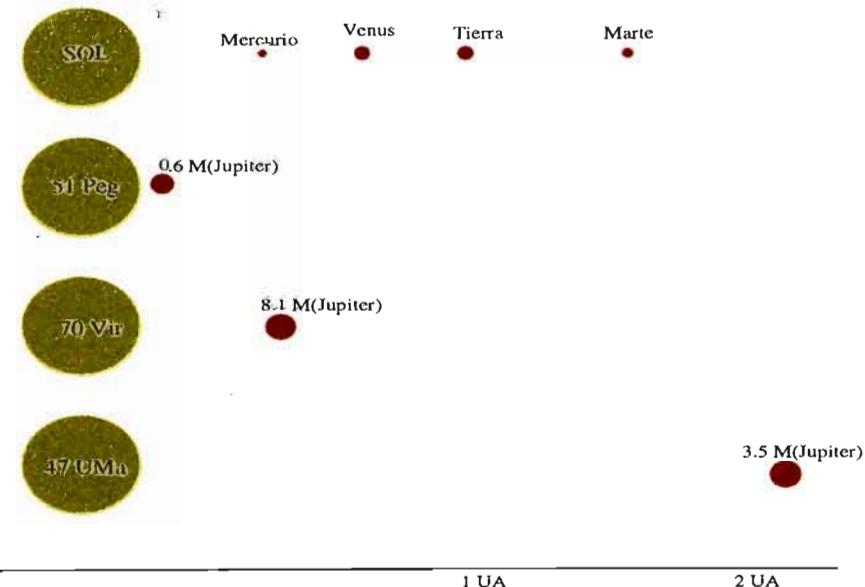


Figura 19. Posibles sistemas planetarios asociados a estrellas de tipo solar

provocado si puede medirse y ya hay primeros resultados para, al menos, tres estrellas de tipo solar (Figura 19): 51 Pegasi, 70 Virginis y 47 Ursae Majoris.

Otro método de búsqueda, se basa en esperar que el planeta eclipse a su estrella al atravesar el eje de visión formado por el observador y la estrella a estudio. Son necesarias muchas coincidencias, pero principalmente que el planeta pase por la línea de visión y que cuando lo haga lo estemos observando.

## EPÍLOGO.

Hemos intentado estudiar el Sistema Solar como un conjunto físico, con unas propiedades dinámicas, unas características fenomenológicas y una evolución comunes. Hemos visto que, cosas que nos parecen tan propias como el viento o una corriente de agua, se dan o han dado en otros planetas. Aunque no se ha indagado en profundidad en las propiedades de cada planeta (que por otra parte no lo teníamos planteado como objetivo), tenemos una idea más general de lo que es un sistema planetario y de las leyes que lo rigen. El Sistema Solar es también un enorme campo de experimentación y podemos ver en él y a gran escala los peligros que acechan a nuestro planeta, el cambio climático, el efecto invernadero o el avance de los desiertos. En definitiva, no hemos centrado en describir muchas cosas, sino que hemos buscado el cómo y el porqué de las cosas más importantes.



## A S T R O N O M Í A Y J U V E N T U D

José B. Navarro García

Coordinador de Didáctica del Museo de la Ciencia y el Cosmos  
Profesor de Programas Educativos de la Consejería de Educación

## I.- INTRODUCCIÓN

El espíritu crítico, la curiosidad, las ansias de saber, la exploración de nuevos caminos, la formulación de nuevas preguntas, etc, son características propias de la actividad científica, pero también de la juventud. La Ciencia -como la juventud- es moderna y debe actualizarse constantemente: sus ideas no son dogmáticas sino flexibles y abiertas a la revisión y reflexión críticas de las nuevas generaciones de científicos y pensadores.

Seguramente todos los jóvenes al contemplar las estrellas se han interrogado sobre ¿Quiénes somos?, ¿Por qué vivimos?, ¿Dónde, vivimos?, ¿Qué es el Universo?, ¿De dónde procede el mundo?... Contestar estas cuestiones conduce a muchos al mundo de la Filosofía o al de las mismas religiones, aunque posiblemente la mayoría de jóvenes buscan hoy en la Ciencia respuestas más plausibles y cabales.

Pero la especialización del conocimiento actual nos obliga a observar lo de arriba separado de lo de abajo, a estudiar lo grande divorciado de lo pequeño, a investigar lo externo desde el desconocimiento de lo interno... Nuestro saber se divide en numerosas materias cada vez más extensas y complejas: Física, Astrofísica, Matemáticas, Geología, Biología, Química, Ecología, etc. De igual forma, nuestro conocimiento del *hecho social* (la respuesta a **¿quiénes somos?**) está ramificado en distintas ciencias o disciplinas: Historia, Filosofía, Sociología, Derecho, Pedagogía, Psicología, etc. Vivimos en un mundo tan altamente especializado, que es muy difícil contestar personalmente a una sola de las preguntas que nos sugiere la simple contemplación de la bóveda celeste cualquier noche de verano.

El sistema educativo, normalmente, ha ido a remolque de esas apetencias de saber que tienen los jóvenes, pues siempre ha habido un desfase, un verdadero abismo, entre el saber científico más actual y lo que se enseña en las aulas. Por ejemplo, teorías que revolucionaron nuestro conocimiento sobre el microcosmos y el macrocosmos formuladas hace más de 70 años como la relatividad y la mecánica cuántica, no se mencionan siquiera en la Enseñanza Obligatoria. Evidentemente, esa mención no debería consistir en su formulación matemática, que es compleja. Deberían mostrarse en cambio las profundas implicaciones que ambas teorías tienen en nuestra manera de ver el Universo, **en nuestra concepción del mundo**.

Las preguntas que provoca la contemplación del Universo lleva a muchas personas a interesarse por la divulgación científica o las novelas de ciencia-ficción. Algunos jóvenes se inician en la observación astronómica, mientras otros tras finalizar sus estudios, se dirigen profesionalmente a la investigación, al mundo de la Ciencia, ya que ésta ha enunciado numerosas teorías para explicar, por ejemplo, que la Tierra se formó a partir de gas y de polvo de estrellas muertas o que la materia y la energía son equivalentes; no obstante, estas ideas son muy recientes, son muy jóvenes, en los dilatados cinco mil años de historia de civilización humana.

Sabemos que no es tarea de la Ciencia responder a esas preguntas más profundas que todos también nos hemos formulado: ¿Cuál es el sentido del Universo?, ¿Cuál es el sentido de la vida? ¿Existe alguna intención detrás de todo lo que sucede?... Estas cuestiones no competen en realidad ni a los sesudos científicos ni a los teóricos cosmólogos, enfascados en complejidades más concretas; sin embargo, algunas de sus solventes descripciones matemáticas y físicas del microcosmos y del macrocosmos contienen, sin duda, profundas implicaciones cosmológicas.

La misma Filosofía en palabras de Wittgenstein, el filósofo más sobresaliente de este siglo, es también incapaz de ofrecer respuestas propias, pues *el método correcto de la filosofía sería propiamente éste: no decir nada más de lo que se puede decir, o sea, proposiciones de la ciencia natural -o sea, algo que nada tiene que ver con la Filosofía- (...) Este método (...) sería el único estrictamente correcto'*.

Como cuenta Jostein Gaarder en *El Mundo de Sofía*, para ser buenos filósofos sólo necesitamos mucha capacidad de asombro, como la tienen los jóvenes añadiría yo, ya que lo único importante en Filosofía son las preguntas, no las respuestas más o menos elaboradas que podamos verbalizar. Aunque parece probable que nadie podrá dar respuestas a determinadas preguntas<sup>2</sup>.

Así pues, las preguntas o el *enigma* que nos provoca la contemplación de los astros,

1 Wittgenstein, L. *Tractatus Logico-Philosophicus* (6.53). Alianza Universidad. Madrid, 19887.

2 Es ilustrativo lo que Ludwig Wittgenstein piensa sobre este tipo de preguntas 6.5. *Respecto a una respuesta que no puede expresarse, tampoco cabe expresar la pregunta. El enigma no existe... 6.52 Sentimos que aun cuando todas las posibles cuestiones científicas hayan recibido respuesta, nuestros problemas vitales todavía no se han rozado en lo más mínimo. Por supuesto que entonces ya no queda pregunta alguna, y esto es precisamente la respuesta.* *Tractatus logico-philosophicus*. Alianza Universidad. Madrid, 1987

nos conduce desde nuestros orígenes, desde la juventud de nuestra especie, hasta las postimerías del siglo XX.

## II. LA HUMANIDAD Y LA VISIÓN DEL UNIVERSO.

Al principio, hace un millón de años, el homo habilis conocedor del fuego y practicante de ritos de enterramiento, era ya un ser **consciente** que contemplaba los movimientos rítmicos de la bóveda celeste intentando comprender tantos movimientos y misterios. Unos ritmos que tenían su prolongación en los sucesos que ocurrían sobre la faz de la Tierra: día y noche, las estaciones secas y húmedas, la maduración de los frutos, etc. Aunque probablemente, estos seres fueron incapaces de establecer ningún tipo de relaciones; no obstante, el primer ritmo, la primera pregunta que se formularon fue, tal vez, el porqué de la sucesión de días y noches, asociados a la actividad y al descanso de la mayoría de seres vivos.

Mucho más tarde, el hombre de Neanderthal, se interrogaría sobre cuestiones más elaborados, por ejemplo, a qué era debida la sucesión de las estaciones frías y cálidas, relacionadas con las migraciones de animales; y buscaría posibles explicaciones en la posición de determinados conjuntos de estrellas en los cielos nocturnos: reconocería las constelaciones de invierno y de verano de aquellos tiempos y gracias a ellas sabría que el invierno se aproximaba (como ocurre en la actualidad con Orión, el Cazador) y que pronto abundaría la caza con la llegada de las manadas de bisontes.

Hace sólo unos pocos miles de años, el hombre de Cromagnon, encontró por fin los principales ciclos anuales de tantos movimientos de la Naturaleza y los relacionó en los primeros calendarios de piedra que construyó como homenaje al orden y ritmo de los cielos<sup>3</sup> (Como el monumental Stonehenge, Neolítico inglés datado hacia el 1845 a. C.).

Durante el Neolítico, el **descubrimiento** de los ritmos de la Naturaleza, de los ciclos agrícolas y ganaderos, la **predicción** de las crecidas periódicas de los ríos, etc, estuvieron asociados indisolublemente al conocimiento del ritmo de los astros, alemerger del saber astronómico.

El posterior nacimiento de la Civilización, de la división social del trabajo, está íntimamente relacionado también con la articulación de una **cosmogonía** (un sistema que explicaba la formación del Universo a través de un conjunto de creencias religiosas o míticas), que confirió un grado más alto de coherencia ideológica o de *pensamiento* al naciente tejido social. En otras palabras, se impuso paulatinamente en cada civilización una singular concepción del mundo con su peculiar sistema ético de valores: se adoraban a ciertos dioses, se realizaban diferentes ritos funerarios, se practicaban determinadas costumbres sociales y familiares, etc<sup>4</sup>.

El común denominador de todas las cosmogonías de la Antigüedad fue explicar, con mayor o menor complejidad, el origen del Universo, asociado al origen de los supuestos dioses (*teogonía*) y del propio ser humano (*antropogonía*). El propio Génesis hebreo o la idea de que la bóveda celeste era sólida, como creían los antiguos babilonios, son ejemplos claros al respecto.

Afortunadamente, ya en el mundo de la Antigüedad hubo personas más inquietas intelectualmente que sobresalieron por buscar otro tipo de preguntas y respuestas. Figuras como Demócrito (460-370 a.C.), cuya teoría atómica fue confirmada por la Ciencia más de dos mil años después; Eratóstenes (276-194 a.C.), que descubre y mide la gran esfera que es la Tierra; Aristarco (hacia el 280-264 a. C.) que postula el heliocentrismo y calcula el tamaño del Sol; Hiparco (160-125 a.C.), fundador de la Trigonometría y descubridor de la precesión del eje de la Tierra<sup>5</sup>. Cada uno de ellos fue desvelando más y más *enigmas* sobre el vasto Universo que nos rodea. Aunque la mayoría de sus ideas fueron olvidadas y relegadas a la trastienda de la Historia durante más de mil años.

La Astronomía y la Ciencia dejaron de progresar en el Imperio Romano. Los romanos se preocuparon más de cuestiones tecnológicas o prácticas, como construir hermosos puentes

<sup>3</sup> Es necesario matizar esta afirmación con una conocida frase de Bertrand Russell. *Orden, unidad y continuidad son inventos humanos exactamente tan verdaderos como los catálogos y enciclopedias.*

<sup>4</sup> Estas formas de conciencia social, unidas al funcionamiento de las instituciones políticas, a las leyes, a la articulación del naciente Estado, etc. conformaron las primeras superestructuras en las sociedades humanas. Harnecker M., *Los conceptos elementales del materialismo histórico*. Siglo Veintiuno Editores. Madrid, 1983.

<sup>5</sup> Algunos investigadores creen que Hiparco utilizó determinadas fuentes egipcias para describir el movimiento de precesión de la Tierra.

o maravillosos arcos de triunfo, que del mundo del conocimiento, olvidándose de esas preguntas que nos sugiere la simple contemplación de la bóveda celeste. Para buscar su tranquilidad y su sosiego, recurrieron a los designios y al favor de sus numerosos dioses, muchos de los cuales fueron tomados de Babilonia y Egipto<sup>6</sup>. El Imperio retrocedió, de esta manera, a los primeros cultos solares de las civilizaciones más antiguas.

Precisamente Ptolomeo (100-170 d.C.), otro gran sabio de la Antigüedad que vivió en Alejandría bajo la dominación romana, acogió el modelo geocéntrico que también había formulado Hiparco y trató de describirlo matemáticamente con una teoría de excentricidades y epícicos que “explicaban” los movimientos planetarios observados. San Agustín, cuyo pensamiento teológico influyó durante muchos siglos, tomó de Ptolomeo muchas ideas para describir un universo de esferas ordenadas cuyo centro era la propia Tierra.

La actividad cultural del medievo se centró en los estudios teológicos. La Iglesia sacralizó el orden social de los tres estamentos (pueblo, nobleza y clero). Se pretendió eliminar toda pregunta con un acto de fe: la Tierra era plana e inmóvil, los cielos estaban ordenados y la sociedad, construida a su imagen y semejanza, también lo estaba. En la Edad Media, el dogmatismo y la irracionalidad se apoderaron de la mayor parte de Europa.

Durante esos siglos, sin embargo, es digna de mención la Astronomía árabe representada por Al Battani (o Albatenius, latinizado). Gracias a la civilización musulmana muchas ideas de la Antigüedad no se perdieron totalmente y pudieron llegar hasta nosotros.

Poco después, hacia el 1609 y en plena revolución copernicana, Galileo apuntó por primera vez con un telescopio hacia el cielo nocturno. Una herramienta fundamental del conocimiento astronómico acababa de surgir. Gracias a los telescopios se pudo comprobar, por ejemplo, que la “osada” teoría heliocéntrica de Copérnico expuesta en 1543 era cierta. Otra vez, el conocimiento científico y observational sobre los astros desvelaba algunos misterios y sustituía a las tradicionales explicaciones religiosas o míticas sobre el Cosmos.

De todas maneras, muchas preguntas estaban por resolver y bullían en las mentes inquietas de aquellos hombres: ¿Por qué la Tierra gira sobre sí misma? ¿Qué la empuja a desplazarse constantemente alrededor del Sol en una órbita elíptica? ¿Por qué se sostiene la Luna en el cielo? ¿Qué hace caer a cuerpos de distinto peso con la misma velocidad? ¿Cuál es el “final” del espacio? etc.

El joven Newton, cuando contaba algo más de veinte años, ya se formulaba este tipo de preguntas, aunque debieron pasar algunos años para que pudiera contestarlas (¿Quién no ha estudiado alguna vez las tres leyes de la mecánica o la Gravitación Universal?). Las ideas de Newton contribuyeron enormemente al desarrollo de la Física. No obstante, *los conceptos fundamentales de espacio y tiempo no tienen definición en los Principia, y Newton se limita a dar unas propiedades que, en contradicción con su propósito declarado de atenerse únicamente a los hechos, establece sin ninguna justificación. Y así dice*

*“El espacio absoluto por su propia naturaleza sin relación con nada exterior, permanece siempre idéntico e inmóvil.*

*El tiempo absoluto, verdadero y matemático, por si mismo y por su propia naturaleza, fluye igualmente sin ninguna referencia externa, y por otro nombre se le llama duración”.*

En el siglo XVIII sobresalen Herschel, descubridor de Urano, Kant y Laplace, que desde la Filosofía y la Ciencia, respectivamente, se formulán una misma pregunta (¿Cuál fue el origen del Sistema Solar?), proponiendo ambos una misma hipótesis: se formó a partir de una nube de gas y de polvo en rotación.

En el siglo XIX destaca John Adams, que aumenta el número de planetas al descubrir Neptuno. El estudio de las rayas de la luz del Sol a través de un telescopio, debido a Fraunhofer, y las investigaciones y registros de Huygens y Kirchoff sobre el espectro de la luz de las estrellas, permitieron la formulación de nuevas preguntas y dieron origen a la Astrofísica moderna; al conocimiento de la luminosidad, tamaño, masa, temperatura y composición química de las distantes estrellas, así como su origen y evolución. La observación en Canarias se inició también con Piazzi Smith (1856). Gracias a este astrónomo británico, el nombre de

6 Como dice E. Averbuj, en Roma se mantiene un permanente culto al Sol, al que hacen ocupar un lugar especialísimo del Universo (pero tan sólo desde el punto de vista religioso). *Con el cielo en el bolsillo*, E. de la Torre, Madrid, 1986.

7 El espacio y el tiempo así concebidos constituyen elementos esenciales de la llamada transformación de Galileo, que es la base de la mecánica newtoniana, que ha habido que revisar con la teoría de la Relatividad, donde ambos son conceptos relativos que se ajustan a la transformación de Lorentz. Pérez García A. *La Edad Dorada (estrellas de la Física) Tomo I*, Centro de la cultura popular canaria, La Laguna, 1994.

Tenerife se encuentra en la Luna (los montes Tenerife, logotipo del Museo de la Ciencia y el Cosmos).

Ya en el siglo XX, en 1929, Hubble gracias a un enorme telescopio pudo comprobar el alejamiento de las galaxias, cuya velocidad es proporcional a la distancia que nos separa de ellas y agrandar increíblemente los límites del Universo observable. Poco después, en 1930, se descubrió Plutón. En 1937 se construyó el primer radiotelescopio. Con uno de ellos, Wilson y Penzias descubrieron, hacia 1964, la radiación de fondo de microondas a tres grados Kelvin, supuesto eco de la Gran Explosión inicial, el Big Bang<sup>8</sup>. Hoy día, las observaciones realizadas por el telescopio espacial **Hubble** están agrandando mucho más los límites del Universo conocido. Habrá que esperar algún tiempo para conocer las sorpresas que, sin duda, el futuro de la investigación astrofísica nos depara a todos.

### III. NUESTRA VISIÓN DEL UNIVERSO.

Debemos realizar una someras reflexiones sobre algo que normalmente nos pasa desapercibido: **nuestra visión de la realidad**. Sabemos que la **visión** del Universo que ha tenido la Humanidad ha ido modificándose a lo largo de la Historia. Pensemos en las concepciones de los babilonios elucubradas sobre aquellos *zigurats* que trepaban a los cielos, en las diferentes escuelas griegas, en la visión medieval del Cosmos basada en las ideas platónicas y aristotélicas, etc. De igual modo, a lo largo de la Historia del pensamiento y de la Ciencia diferentes paradigmas orientaron el trabajo de sabios, científicos o filósofos, hasta que fueron sustituidos por otros que se ajustaban mejor a las observaciones, a cómo se percibía e interpretaba la realidad<sup>9</sup>.

Quien haya visitado la parte del Museo de la Ciencia y el Cosmos del Cabildo de Tenerife dedicada al Cuerpo Humano habrá reflexionado, probablemente, sobre cómo vemos el mundo. A través de nuestros sentidos percibimos la realidad gracias a nuestro cerebro. Pero muchas veces nuestros sentidos y/o nuestro cerebro nos juegan malas pasadas y nos confundimos (al creer que nos quemamos en el módulo del tacto, al ver colores inexistentes, al asomarnos a la habitación insólita, etc). Todos percibimos correcta o incorrectamente, en este caso da exactamente igual, de forma muy similar gracias a poseer un cerebro que tiene unas mismas características anatómicas y funcionales.

La palabra real, deriva del latín *res, rei*, cosa. La realidad, *el mundo de las cosas*, abarca desde el microcosmos hasta el macrocosmos. Un universo vasto y sumamente complejo; no obstante, *un físico de partículas, tratará de convencernos de la maravillosa simplicidad y simetría del Universo, y de que mirándolo de manera adecuada, podemos deducir las leyes de la Naturaleza de una forma muy sencilla*<sup>10</sup>. Efectivamente, la Ciencia ha elaborado importantes ecuaciones o leyes que **predicen** el comportamiento de las cosas. Por ejemplo y siguiendo las ideas del cosmólogo británico John Barrow, sabemos que un palo recto apoyado por su base sobre la palma de la mano tenderá a caer al suelo. La ley de la gravedad es simple y predice el acontecimiento que va a suceder. Ahora bien, ¿hacia qué lado caerá el palo?. Esto es sumamente complejo de contestar, el palo puede caer en una dirección cualquiera de los 360°, siendo difícil **predecir** su comportamiento final. En otras palabras, las leyes de la Naturaleza son sencillas (como la ley de Newton) pero la forma en que éstas se manifiestan en el mundo son complejas (no podemos **predecir** hacia qué lado caerá el bastón finalmente).

Como vemos, John Barrow concilia estas dos visiones: el Universo es simple desde determinados puntos de vista y complejo, desde otros (es simple para el físico de partículas y es complejo para el biólogo, el economista, el sociólogo...).

Podemos diferenciar en el campo de la realidad, en el Universo, cinco "construcciones" o esferas diferentes de experiencia, tal como sugieren L. LeShan, un psicólogo experimental, y H. Margenau, un emérito profesor de Física y Filosofía Natural de la Universidad de Yale:

8 Un hecho que ha sido investigado con éxito por investigadores del I.A.C., encontrándose grumos -inhomogeneidades- en esa radiación de fondo que explican la distribución de materia que se observa en el Universo, cuestión que reafirma la teoría estándar sobre el Big Bang.

9 Este hecho queda manifiesto en *La estructura de las revoluciones científicas* de Thomas S. Kuhn, Fondo de cultura Económica, Madrid 1992. Para Kuhn un paradigma científico es una concepción del mundo, de la realidad, de lo que es Ciencia y de lo que no es. Es, por tanto, una estructura intelectual compleja cuyo núcleo es una teoría esencial más o menos amplia de la que se derivan una serie de teorías auxiliares. De esta teoría se infiere una metodología científica concreta que define los experimentos que hay que realizar. Los paradigmas, según Kuhn, son no explícitos y, en consecuencia, están impregnados por un conjunto de creencias o suposiciones.

10 ¿*Es el Universo simple o complejo?* conferencia pronunciada por el cosmólogo británico John Barrow en el Museo de la Ciencia y el Cosmos con motivo de los coloquios IAC-BBV, el 24 de octubre de 1994

1) *La esfera visual y táctil hasta los límites de la instrumentación. Esta esfera podría llamarse también "sensorial" o de extensión "media".*

2) *Esfera de cosas demasiado pequeñas para ser vistas o tocadas siquiera teóricamente: el microcosmo.*

3) *Esfera de cosas demasiado grandes o cosas que acaecen demasiado deprisa para ser vistas o tocadas, siquiera teóricamente: el macrocosmo.*

*Estas son las tres esferas a las que los físicos aplican su método. Pero hay por lo menos otras dos a las que podrían aplicarlo:*

4) *Unidades de conducta con sentido de cosas vivas, es decir, unidades de conducta que están por encima del nivel de los reflejos. Esta es la esfera en la que los organismos buscan alimentos, corren para escapar del peligro, se acoplan, etc.*

5) *La experiencia interior del hombre, incluso la del propio físico.*

*En cada una de estas cinco esferas, si el físico formula sus preguntas, obtiene respuestas muy diferentes.<sup>11</sup>*

Veamos qué ocurre en el cuadro de las cinco esferas de experiencia<sup>12</sup> cuando formulamos las mismas preguntas o realizamos idénticas operaciones.

OPERACIÓN	MICROCOSMO	VISUAL TÁCTIL	MACROCOSMO	U. CDT C .STDO	VIDA INTERIOR
CUANTIFICACIÓN	SI	SI	SI	SI	NO
RELACION CASUAL POSSIBILIDAD DE PREDICCIÓN	NO	SI	SI	NO	NO
APLICACIÓN DE MODELOS MECÁNICOS	NO	SI	NO	NO	NO

El Universo aparece, pues, como diverso y susceptible de ser analizado desde diferentes **escalas, sistemas de referencia o puntos de vista**.

Estos puntos de vista para abordar el estudio de la realidad (simple/complejo, determinista/aleatorio, finito/ infinito, exacto/approximado, mecanicista/relativista, etc.) pueden parecer y ser **contrapuestos**, pero también son **complementarios** y deben su éxito, en última instancia, a la esfera de experiencia en que deben aplicarse.

Debemos ser, pues, *relativistas* también en lo que concierne a nuestro conocimiento, pues no hay ninguna visión científica única y totalizadora sobre las *cinco esferas de experiencia* que proponen los autores citados anteriormente. Es más, la propia resolución de la unificación de la Física (la Teoría del Todo), que pretende reunir en un único y gran modelo a las cuatro fuerzas<sup>13</sup> fundamentales, es evidente que dejaría huecos notables en los cuadros cuarto y quinto de la tabla anterior.

En otras palabras, *sería muy difícil construir de un golpe una teoría unificada completa de todo el Universo. Así que, en lugar de ello, hemos hecho progresos por medio de teorías parciales, que describen una gama limitada de acontecimientos y omiten otros o los aproximan por medio de números (...)* Una teoría unificada, consistente, es sólo el primer paso: *nuestra meta es una completa comprensión de lo que sucede a nuestro alrededor y de nuestra propia existencia<sup>14</sup>.*

#### IV. LA REVOLUCIÓN CIENTÍFICA DEL SIGLO XX.

Dos teorías revolucionaron en este siglo nuestra manera de ver el Universo: la relatividad y la mecánica cuántica. Nuestra visión del macro y del microcosmos variaron sustancialmente gracias a ellas. Nos hemos referido a ambas y hora es ya de abordarlas,

11 *El espacio de Einstein y el cielo de Van Gogh*, Gedisa Editorial, Barcelona 1991, pp. 35 y 36.

12 *El espacio de Einstein y el cielo de Van Gogh*, p.37.

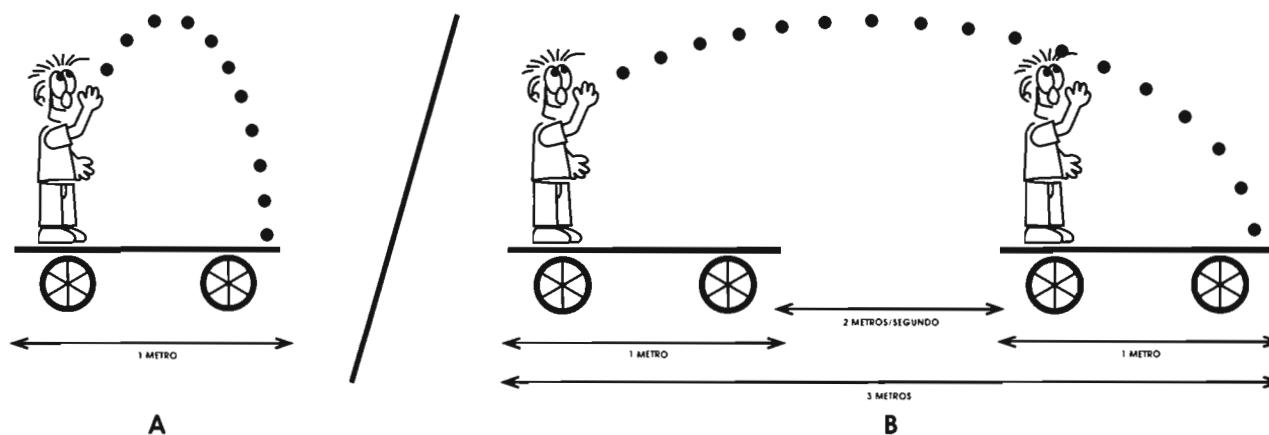
13 Estas cuatro fuerzas que explican el comportamiento del macrocosmo y del microcosmo son: la fuerza gravitatoria, responsable de la gravedad, la fuerza electromagnética, responsable del magnetismo y la electricidad, la fuerza nuclear débil, responsable de la radioactividad y la nuclear fuerte, responsable de las fuerzas que unen las partículas del átomo.

14 Hawking S. *Historia del tiempo*, pp. 201 y 218, Crítica, Barcelona 1989.

aunque sólo trataremos algunos aspectos de las mismas que tienen relación con lo dicho anteriormente.

Comencemos con la revisión de los conceptos de espacio y tiempo a la *luz* de la relatividad especial, que se refiere a reglas y relojes (medidas de espacio y tiempo) que no estén sujetos a campos gravitatorios, ya que éstos perturbarían sus comportamientos. Para adentrarnos en la relatividad obviando la herramienta matemática, debemos partir desde las leyes físicas ya comprobadas. Leyes como la **de propagación de la luz**, que afirma que **en el espacio vacío, la luz se propaga en línea recta con una velocidad constante y cercana a los 300.000 kilómetros por segundo**<sup>15</sup>. Esta velocidad de propagación, además, **no depende de la velocidad de movimiento del cuerpo emisor**, es decir, que la luz de una linterna encendida sobre un carro que avanza con una velocidad de 1 m/seg, viaja tan rápida como la luz emitida por otra linterna encendida desde una nave espacial que viaje a velocidades cercanas a la de la luz ( $c$ )<sup>16</sup>.

**La relatividad del espacio.** El hecho de que el espacio es relativo o que depende de la posición del observador, se sabía mucho antes de que Einstein publicara su teoría, aunque de una manera más sencilla. *Imaginemos* que en un día soleado nos encontramos en un camino de tierra. En una gran carreta, avanzando a una velocidad constante de dos metros por segundo, un niño lanza su pelota al aire (ver dibujo); un segundo después y tras recorrer un metro, cae al suelo de la carreta. Con una cinta métrica, el niño comprueba que la distancia recorrida por la pelota es, efectivamente, de un metro (A). Pero una persona que observa la escena desde el borde del camino realiza también sus mediciones.



Como la carreta se desplaza a una velocidad de dos metros por segundo, el observador inmóvil mide tres metros desde que la pelota salió de la mano del niño hasta que llegó al suelo (B). Como puede verse en el dibujo, el espacio recorrido es distinto para cada observador. La conclusión es simple: **el espacio, las distancias recorridas, dependen del sistema de referencia que empleamos para medirlo**. Ambos observadores tienen, pues, razón en sus mediciones.

Del mismo modo, también la trayectoria seguida por la pelota será diferente para cada observador. Para el niño, desde un sistema de referencia en la carreta, la pelota describe una parábola cerrada, mientras que el observador quieto ve una trayectoria más abierta. Así que los **espacios recorridos y las trayectorias son siempre relativas al sistema de referencia que apliquemos**.

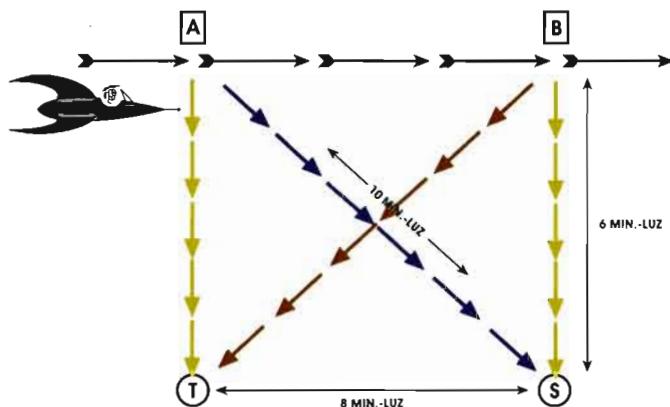
**Pero, y el tiempo ¿Por qué el tiempo no es absoluto como creyó Newton?**

<sup>15</sup> La ley de la constancia de la velocidad de la luz en el vacío no puede aspirar a validez ilimitada, pues los rayos de luz sólo pueden curvarse si la velocidad de propagación de ésta varía con la posición (...) la teoría de la relatividad especial no puede arrogarse validez en un campo ilimitado, sus resultados sólo son válidos en la medida en que se pueda prescindir de la influencia de los campos gravitatorios sobre los fenómenos (los luminosos, por ejemplo). Einstein A. *Sobre la teoría de la relatividad especial y general*, pp. 68 y 69, Alianza, Madrid 1984.

<sup>16</sup> Este hecho choca con el sentido común. Un proyectil lanzado por un cañón desde el suelo tiene menor velocidad que el mismo proyectil lanzado desde una avión en el aire, pues en este caso a la velocidad del proyectil hay que sumarle la velocidad que en ese momento lleva el avión. Pero con la luz nuestro sentido común se tambalea. No se puede sumar la velocidad del cuerpo emisor a la velocidad de la luz, pues, en el vacío y en ausencia de campos gravitatorios, ésta es constante e invariable, independiente del cuerpo emisor.

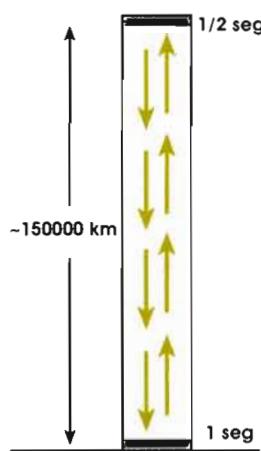
Uno de los pilares en los que se sustentaba el concepto de tiempo absoluto era el de la *simultaneidad*, es decir, lo que ocurre, una serie de sucesos o acontecimientos, ocurren en el mismo orden y con la misma separación temporal para cualquier observador. Este concepto de *simultaneidad* es válido cuando tratamos con velocidades relativamente pequeñas. Pero, ¿Qué pasa con la simultaneidad cuando viajamos a velocidades cercanas a la de la luz?

Imaginemos que viajamos en una fabulosa nave espacial a una velocidad muy próxima a la velocidad de la luz ( $c$ ). Surcamos una distancia de 8 minutos-luz por una trayectoria que discurre paralela a una línea imaginaria que une a dos observadores T y S. La distancia entre la trayectoria de la nave y la línea imaginaria que une a los observadores es de 6 minutos luz (ver dibujo). Supongamos que los dos observadores T y S cuentan con sendos relojes sincronizados.



Nuestra nave, cuando son las 12,00 horas según los relojes de T y S, pasa por el punto A. En ese momento, desde la nave lanzamos señales luminosas a ambos observadores para comunicar un suceso de la nave, que cerramos los ojos por ejemplo. La señal de luz se desplaza siempre a la misma velocidad (*ley de propagación de la luz*) y llegará antes al observador T que al S. Algo más tarde, en B, cuando son poco más de las 12,08 para los relojes de T y S, volvemos a lanzar otras dos señales luminosas para comunicar a los observadores que abrimos los ojos. La luz llegará ahora antes al observador S que al T.

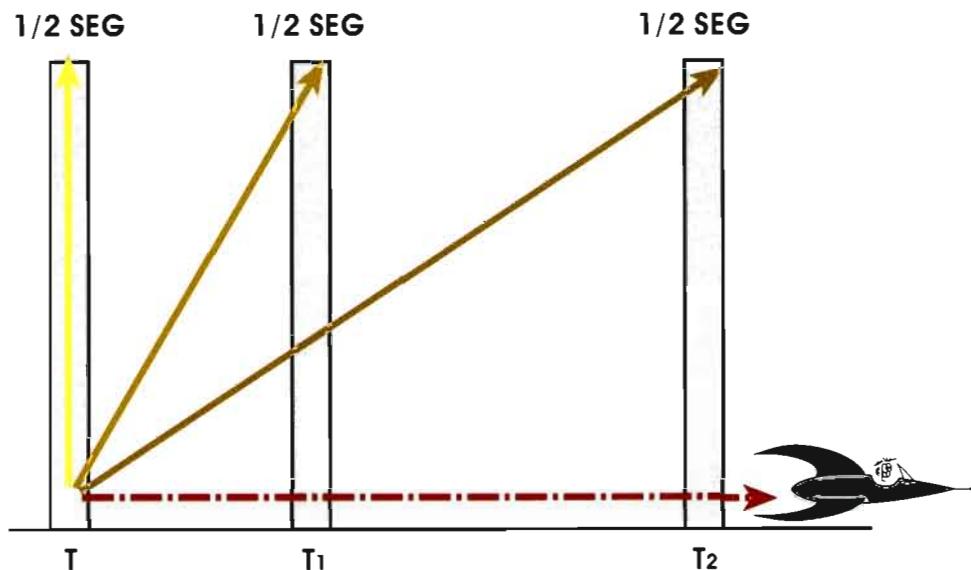
Como podemos apreciar, las señales de luz son registradas por los dos observadores con diferente tiempo (T mide algo más de 12 min. entre ambas señales, mientras que para S las dos señales tienen un intervalo de algo más de 4 min.). La secuencia de sucesos temporales de la nave espacial, abrir y cerrar los ojos (un intervalo de unos pocos segundos en el interior de la nave que viaja a una velocidad cercana a  $c$ ), es registrada por los observadores T y S de manera siempre diferente. La conclusión es tan sencilla como demoledora: **el tiempo, como concepto absoluto, no existe**. El tiempo, como el espacio y la trayectoria, es relativo y depende del observador, del sistema de referencia desde el que lo midamos.



Para entender por qué los sucesos de la nave (abrir y cerrar los ojos) duran sólo unos pocos segundos y, sin embargo, T y S registran varios minutos, debemos suponer ahora que tenemos sendos relojes de cristal transparente. Cada reloj tiene una altura de casi 150.000 km y una sección de 1 metro (como un larguísimo cilindro). En el interior del cilindro se ha practicado el vacío. El imaginario cilindro cuenta con un espejo en la base y otro en la parte superior. Mediante un dispositivo se lanza desde abajo un rayo de luz perpendicular. El rayo de luz emplea 1/2 seg. en llegar al espejo superior, rebota en él y tarda otro 1/2 seg. en llegar abajo (*ley de propagación de la luz*). Cuando la luz llega al espejo inferior el marcador registra 1 seg. y lanza automáticamente otro rayo de luz.

Situamos un reloj en O parado y otro en movimiento, ambos totalmente sincronizados. Fijémonos exclusivamente en las **trayectorias** que describe la luz de estos relojes durante 1/2 seg. para un observador quieto, situado en O.

Como puede apreciarse, la luz que viaja en los relojes que se mueven debe recorrer una trayectoria diferente, más larga, que la luz del reloj quieto en O. Cuanto más rápido viaje el reloj móvil, la trayectoria de la luz se inclinará cada vez más hacia el eje x. Como la **ley de propagación de la luz** es ineludible, la conclusión no puede ser otra: **el reloj, cuanto más rápido viaja, mayor dilatación temporal experimenta: el tiempo transcurre más lento, con respecto al tiempo medido por el reloj en O.**



Al 99,99 % de  $c$ , la trayectoria de la luz apenas levantaría el vuelo sobre el eje x. Suponiendo que nuestro reloj alcanzara la velocidad-luz (**nada puede viajar más rápido que la luz**), la trayectoria sería paralela al propio eje x. En otras palabras, la luz dejaría de moverse hacia arriba o hacia abajo dentro del reloj ¡El tiempo se habría paralizado en el supuesto reloj imaginario!. A velocidades cercanas a  $c$ , recorreríamos la distancia Tierra-Sol (8 min-luz) en unos pocos segundos. Y no notaríamos ninguna dilatación temporal, nuestro transcurrir del tiempo sería completamente normal, como el de ahora mismo. En cambio, si apreciaríamos una contracción en el espacio, en la dirección de nuestro movimiento, gracias a la cual podríamos viajar más rápidamente de lo que supuestamente pensábamos. Aunque un observador quieto no observaría tal fenómeno.

Así pues y aunque resulte paradójico, la Física relativista sugiere que diferentes observadores del Universo pueden coexistir en "experiencias de movimiento" diferentes y medir duraciones (tiempo de rotación, por ejemplo) y distancias (longitud ecuatorial) de los **mismos astros con las mismas leyes** para obtener, sin embargo, resultados **diferentes**.

Tras revisar someramente los conceptos de espacio y tiempo a la *luz* de la relatividad, veamos, para finalizar, algunas consecuencias filosóficas de la mecánica cuántica.

La **mecánica cuántica** revolucionó nuestra visión del Universo en este siglo, tanto por su novedosa formulación matemática como por sus importantes implicaciones cosmológicas. La mecánica cuántica contempló al electrón desde la naturaleza ondulatoria de las partículas (Teoría de De Broglie) y lo consideró como *"una onda que se curvaba alrededor del núcleo de tal forma que estaba a un tiempo, por así decirlo, en todas las partes de su órbita"*<sup>17</sup>.

También, en 1926, otro científico, Heisenberg, formuló el Principio de Incertidumbre cuando se pretendía medir simultáneamente velocidad y posición en las partículas atómicas. Como escribe Stephen W. Hawking, el Principio de Incertidumbre afirma que *"cuanto con mayor precisión se trata de medir la posición de la partícula, con menor exactitud se podrá medir su velocidad, y viceversa (...) El principio de incertidumbre tiene profundas implicaciones sobre el modo que tenemos de ver el mundo. Incluso más de cincuenta años después, éstas no han sido totalmente apreciadas por muchos filósofos, y aún son objeto de mucha controversia. El principio de incertidumbre marcó el final del sueño de Laplace de una teoría de la Ciencia, un modelo del Universo que sería totalmente determinista: ciertamente ¡no se puede predecir los acontecimientos futuros con exactitud si ni siquiera se puede medir el estado presente del Universo de forma precisa! (...) Así pues, en la mecánica cuántica...) las partículas ya no poseen posiciones y velocidades definidas por separado, pues éstas no podrían ser observadas. En vez de ello, las partículas tienen un estado cuántico, que es una combinación de posición y velocidad.*

17 Nueva Guía de la Ciencia, Asimov, p. 376. Plaza Janés, Barcelona, 1985

*(...) La teoría de la mecánica cuántica está basada en una descripción matemática completamente nueva, que ya no describe al mundo real en términos de partículas y ondas; sólo las observaciones del mundo pueden ser descritas en estos términos*<sup>18</sup> (el subrayado es mío).

¿Qué será, pues, el **mundo real** según la mecánica cuántica?. Hawking no dice nada más en Historia del tiempo.

Otra implicación de la mecánica cuántica es que el vacío no existe en el Universo. Si sumamos todas las ondas en una zona cualquiera del espacio vacío, nos encontramos que tienen una cantidad infinita de energía, porque es posible un número infinito de ondas. (...) Si luego calculamos la cantidad de energía que podría haber en el espacio con la longitud de onda más corta posible (según la relatividad general, sería del orden de  $10^{-33}$ ), resulta que la energía contenida en un centímetro cúbico sería inmensamente mayor que la energía de toda la materia conocida en el Universo<sup>19</sup>.

Hasta aquí todos los físicos están de acuerdo, pero David Bohm con su teoría del **orden implicado** va mucho más lejos para intentar contestar a la pregunta anterior: *El vacío contiene toda esta energía que es ignorada (por los físicos) porque no puede ser medida por un instrumento. La filosofía de ello es que sólo lo que puede medirse a través de un instrumento puede considerarse como real, pero los físicos también dicen que existen partículas que no pueden verse mediante aparatos. El estado actual de la física teórica da a entender que el espacio vacío contiene toda esta energía, y que la materia es un leve aumento de energía, por lo que ésta es una pequeña ola en este enorme océano de energía, que tiene una estabilidad relativa y se vuelve manifiesta*<sup>20</sup>.

El Universo que sugiere Bohm es, básicamente, un vasto e incommensurable océano de energía sujeto a *holomovimiento* (movimiento total). En algunas "superficies" de este océano se forman olas de energía más densa (la materia), las cuales se *despliegan* y se *repliegan*, como las olas del mar. Es decir, surgen estrellas, planetas, árboles, animales, olas... Se desarrollan o evolucionan, relacionándose o interactuando con el medio, y desaparecen, dejando el tiempo y el espacio a la sucesión continua de otras olas de materia -energía más densa- que golpearán con su fuerza rítmica las "costas" de todas las galaxias del Universo. *El holomovimiento es la base de lo manifiesto. Lo manifiesto es abstracto y flota en el holomovimiento. El movimiento básico del holomovimiento es el plegarse y el desplegarse. Lo que estoy diciendo es que toda la existencia es básicamente holomovimiento que se manifiesta de forma relativamente estable. (...) Este despliegue es una idea directa de lo que se entiende por la matemática de la mecánica cuántica. Lo que se llama transformación unitaria o descripción matemática básica del movimiento en la mecánica cuántica es exactamente de lo que estamos hablando. Se trata simplemente de la descripción matemática del holomovimiento*<sup>21</sup>.

Como vemos, por intentar contestar a una pregunta que, tal vez, **hoy** no admite respuesta (**¿Qué es el mundo real a la luz de la mecánica cuántica?**), Bohm va mucho más allá y traspasa los umbrales de la Física con sus sugerencias, dando un extraño giro a la forma en que debemos ver el mundo.

Pero prosigamos. El Universo, pues, se nos escapa de las manos, es relativo, impredecible más allá del principio de incertidumbre, no vacío (o repleto de pares de partículas y antipartículas virtuales que pueden tener una energía infinita), sujeto a saltos cuánticos, a mutaciones desfavorables o favorables, que suponen cambios cualitativos en las adaptaciones de la vida al medio. Pues la vida, a nivel cósmico, puede considerarse como "un gran salto" en la organización de la materia-energía cósmica. Y el surgimiento de la conciencia en los seres vivos, constituye otro salto cualitativo más en la escalera evolutiva de la vida. La conciencia, ese darse cuenta de lo que **uno** hace, esa capacidad de "separarse" del objeto y de actuar en función de un nivel más alto de complejidad que el simple instinto, es una estrategia más de los seres vivos para sobrevivir: los sociólogos y los antropólogos sitúan el nacimiento de la conciencia en las costumbres sociales del grupo.

En otras palabras, y como finaliza la conocida obra *Cosmos* de Carl Sagan: *Porque*

18 Hawking, S., *Historia del tiempo*, Crítica, Barcelona, 1989.

19 David Bohm, catedrático de Física teórica en la facultad de Birkbeck de la Universidad de Londres, desarrolla estas ideas en su *teoría del orden implicado en Diálogos con científicos y sabios*, pp. 32 a 60., Ed. Los libros de la liebre de marzo, Barcelona 1990

20 Bohm, D., *Diálogos con científicos y sabios*, pp. 32 a 60., Ed. Los libros de la liebre de marzo, Barcelona 1990

21 Bohm, D., *Diálogos con científicos y sabios*, pp. 32 a 60., Ed. Los libros de la liebre de marzo, Barcelona 1990

*nosotros somos la encarnación local de Cosmos que ha crecido hasta tener conciencia de si. Hemos empezado a contemplar nuestros orígenes: sustancia estelar que medita sobre las estrellas; conjuntos organizados de decenas de miles de billones de billones de átomos que consideran la evolución de los átomos y rastrean el largo camino a través del cual llegó a surgir la conciencia, por lo menos aquí. **Nosotros** hablamos en nombre de la Tierra. Debemos nuestra obligación de sobrevivir no sólo a nosotros sino también a este Cosmos, antiguo y vasto, del cual procedemos.*

## V. A MODO DE CONCLUSIÓN.

Los seres humanos hemos observado el Universo a través de peculiares prismas interpretativos. Desde la Antigüedad, pasando por la Edad Media y la mecánica newtoniana, hasta la física relativista y la mecánica cuántica del siglo XX.

De igual manera que nos pueden resultar ridículas y absurdas determinadas cosmogonías de pueblos primitivos, las personas que viven dentro de 5.000 años podrán pensar, tal vez, que nosotros fuimos sociedades profundamente agresivas, con una visión bastante parcial del Cosmos.

Debemos ser críticos y cautos con nuestro conocimiento actual. Al menos racionalmente, siempre debe quedarnos una duda con las supuestas certezas de hoy, pues tal vez no seguirán siendo la verdad de pasado mañana. No obstante, la revolución científica del siglo XX, nos hace ver la materia y la energía como equivalentes, como una sola cosa. Además, la materia aparece a la luz de la Física como unidad y como diversidad en sus diferentes niveles de complejidad y organización: desde los quarks a los cúmulos de galaxias. Esa naturaleza grande y pequeña al mismo tiempo, una y diversa, sencilla y compleja, parece depender también de nuestro Conocimiento, de la manera en qué vemos el Universo, del paradigma científico y cosmológico imperante.

Por otra parte, esa visión es también dinámica y, a la postre, efímera: en un Universo donde las estrellas nacen y mueren, también los paradigmas y teorías parecen llamados a desaparecer para ser sustituidos por otros mejores. Todo es cuestión de tiempo. Por lo menos, así ha ocurrido hasta ahora en la historia de la Ciencia y del pensamiento humano.

Todo lo anterior nos lleva a la humildad filosófica, a poner en duda, como los viejos sofistas griegos, la propia capacidad de nuestro conocimiento para intentar responder a **todas** las preguntas que nos sugiere la simple contemplación de la bóveda celeste. Pero también nos llena de optimismo al permitirnos hacer **predicciones**, como por ejemplo, que dentro de 5.000 años los jóvenes y los no tan jóvenes, todavía seguirán formulándose muchas preguntas al levantar la cabeza y mirar hacia los constelaciones de un nada firme firmamento<sup>22</sup>.

---

<sup>22</sup> Firmamento es una palabra que proviene de firme, es decir, sin cambio.



# LA ASTRONOMÍA EN LA PREHISTORIA DE CANARIAS

César Esteban

Instituto de Astrofísica de Canarias  
Profesor de la Universidad de La Laguna (Dpto. Astrofísica)

## 1. LA ASTRONOMÍA Y LAS CULTURAS PRIMITIVAS

La observación de la naturaleza es algo inherente a la especie humana y posiblemente a la inteligencia en general. La evolución de esta curiosidad desde el pasado más remoto ha dado lugar, después de muchos avatares, a lo que, hoy en día, denominamos Ciencia. Según sabemos, la Astronomía fue uno de los primeros campos de conocimiento natural que el hombre desarrolló desde los albores del tiempo. Todas las comunidades humanas han sido conscientes del indiscutible papel que el Sol representa como dador y regulador de la vida y han compartido, en mayor o menor medida, la inmensa atracción que la Luna y la bóveda celeste han ejercido sobre la mente humana en todos los lugares y épocas. Por otra parte, no debemos olvidar que el cielo y todo lo que contiene es uno de los pocos bienes comunes a toda la humanidad.

Aunque el hombre actual no necesita escrutar la posición de los astros para saber en qué momento del año o del día se encuentra, esto no siempre fue así. Todas las culturas conocidas del pasado, y sobre todo aquellas que desarrollaron la agricultura, fueron conscientes del comportamiento cíclico de la naturaleza y lo relacionaron con el paso del tiempo. Las estaciones, los ciclos de gestación, tanto humano como animal, el ciclo vegetativo y un largo etcétera de procesos naturales repetitivos determinan diferentes escalas de tiempo relacionadas intimamente con el ritmo económico y vital de cada comunidad. Entre estos ciclos, los relacionados con fenómenos astronómicos son los más exactos y evidentes y parecen regular los demás; así por ejemplo, el ciclo día-noche, las fases de la Luna y las variaciones anuales de la duración relativa entre el día y la noche constituyen las unidades básicas de cómputo de tiempo utilizadas en prácticamente todos los calendarios conocidos. Por tanto, el seguimiento del movimiento y de la apariencia de los astros con el tiempo, es decir, el desarrollo de la Astronomía a un cierto nivel, fue un hito casi obligado para las diferentes culturas del pasado y, desde un punto de vista histórico, puede entenderse como un parámetro indicativo del grado de desarrollo cultural y social alcanzado por una comunidad.

Se denomina Arqueoastronomía a la disciplina científica que intenta desentrañar, desde distintos puntos de vista y utilizando diversas técnicas y herramientas, cuál era el grado de conocimiento astronómico desarrollado por las culturas de la antigüedad. Utiliza elementos de dos campos de conocimiento tradicionalmente inconexos como son el de las ciencias sociales como la arqueología, la historia antigua, la antropología, por una parte, y la astronomía por otra. Aunque los primeros trabajos pioneros se realizaron hace ya más de cien años, no ha sido sino hasta muy recientemente (unos 25 años) cuando la Arqueoastronomía ha alcanzado una cierto grado de madurez y reconocimiento internacional. Como es natural, esta disciplina no se ha desarrollado por igual en todos los países y no todas las culturas ni momentos de la historia y la prehistoria se han estudiado con la misma intensidad. Así, por ejemplo, España todavía queda lejos de estar a un nivel similar al alcanzado en otros lugares como las Islas Británicas o América del Norte y Central, aunque se está produciendo en los últimos años un despegue realmente importante, donde nuestras Islas están jugando un papel muy destacado (ver Esteban et al., 1994 y el libro Arqueoastronomía Hispana que contiene esta referencia). Hasta hace muy pocos años no conocíamos prácticamente nada acerca del conocimiento astronómico que poseían aquellas culturas que poblaron el antiguo solar peninsular e insular de nuestro país. Parece difícil creerlo, pero es realmente muy poco lo que sabemos aun hoy en día acerca de la relación que aquellos iberos, celtas, celtíberos o incluso las gentes anteriores, tenían con los astros. La invasión romana, poco interesada en las culturas que conquistaba, no nos ha dejado apenas nada escrito de esos recuerdos. Algo similar ocurrió con la conquista castellana de las Islas Canarias, aunque en este caso disponemos de bastantes referencias escritas. De todas formas, la mayor parte de los secretos de los antiguos aborígenes canarios permanecen todavía ocultos entre sus ruinas y bajo el suelo. Es nuestro objetivo utilizar la Astronomía para desentrañar parte de ellos.

## 2. SOBRE LA PREHISTORIA DE CANARIAS

El origen de los primitivos habitantes de las Islas ha sido un enigma histórico que solo ha comenzado a despejarse en fechas muy recientes. La moderna arqueología canaria sabe, a partir del análisis y comparación de los restos materiales y del estudio de las antiguas crónicas históricas, que los primeros pobladores del archipiélago llegaron procedentes del noroeste de África, posiblemente en distintas oleadas, a partir de un momento no anterior al siglo V a. C. Estos antiguos habitantes parecen que estaban relacionados con antiguas tribus protoberéberes, quizás con los antiguamente conocidos como libios, mauros, gétulos o garamantes.

A lo largo del siglo XV, casi veinte siglos después de esta primera colonización africana, la Corona de Castilla llevó a cabo la conquista de las Islas, hecho que representó el principio del fin de la cultura aborigen. Los conquistadores castellanos, como ocurrió en otras partes del mundo, pronto comenzaron a escribir relaciones de conquista y "pseudo-etnografías" en las que trataban sobre las costumbres y las estructuras políticas y sociales de las culturas que iban dominando. Estas referencias hacen alusión, básicamente, al momento de los primeros contactos con los europeos, representando la realidad epigonal de las sociedades aborígenes. Desgraciadamente, todo lo ocurrido en los 2000 años de desarrollo libre de esta cultura ha quedado sin voz, y solo podemos intentar adivinarlo por medio de la arqueología, interpretando los escasos restos materiales que todavía nos quedan.

En el momento de la conquista, todas las islas estaban pobladas por distintos grupos culturales que compartían una tecnología propia del neolítico. Esta diversidad cultural de una a otra isla puede explicarse por diversos factores como, por ejemplo, la arribada de distintas oleadas de población, ya sea en distintos momentos históricos o de diferentes etnias; aunque, probablemente, el aislamiento y las fuertes diferencias ecológicas de cada isla contribuyeron sin duda a producir pautas diferentes de adaptación al medio que acabaron por delinear dichas peculiaridades insulares.

Estas diferencias pueden ser rastreadas por medio de diversos aspectos culturales. Respecto a la organización política en el momento de la conquista encontramos que, mientras en Tenerife y La Palma el sistema era muy segmentario, (9 y 12 demarcaciones o territorios gobernados por señores o reyezuelos, respectivamente, los llamados "menceyes" en Tenerife), la figura de un único jefe o rey distribuidor fue la típica en Lanzarote, Hierro y especialmente en Gran Canaria; de hecho, es en esta isla donde encontramos una estructura jerarquizada próxima al protoestado, con la existencia de una importante clase nobiliaria y de los denominados "faycanes", una auténtica casta sacerdotal. Las actividades económicas básicas en el archipiélago eran la agricultura, la ganadería y, en menor medida la recolección. Por ejemplo, en Fuerteventura la ganadería era, con gran diferencia, la actividad más usual; mientras que en Gran Canaria encontramos una agricultura muy desarrollada, que incluso utilizaba regadíos. Los lugares de habitación más comunes solían ser cuevas naturales y cabañas aunque, en las islas orientales existían también poblados de casas de piedra seca, especialmente en Gran Canaria, donde encontramos casas de planta cruciforme. En esta isla fueron también típicos los poblados trogloditas de cuevas artificiales, excavados en toba volcánica.

El enterramiento más común era en cuevas, aunque en las islas orientales se encuentran túmulos. En este sentido, el caso extremo lo muestra, de nuevo, Gran Canaria, donde existen grandes necrópolis de cientos de tumbas. La cerámica también presenta muchas diferencias entre materiales, formas y decoración de unas a otras. En Tenerife encontramos ánforas que se han llegado a definir como "neopúnicas", tipología que no se repite en ninguna otra isla del archipiélago. Por otra parte, las cerámicas pintadas, algunas de gran belleza, sólo aparecen en Gran Canaria.

### 3. "ADORABAN AL SOL, LA LUNA, LAS ESTRELLAS..."

El conocer los distintos aspectos del mundo religioso prehispánico es muy difícil a partir del mero análisis de los restos arqueológicos. Afortunadamente, algunas de las crónicas escritas desde la época de la conquista, e incluso antes (como la del viajero veneciano Aluise Cadamosto, que tomamos como título de la presente sección) recogen elementos sobre los dioses, ritos y lugares de culto prehispánicos. De todas formas y sin restar su indiscutible importancia intrínseca, hay que tener en cuenta que estas referencias fueron recopiladas y escritas principalmente por europeos, y que pueden estar impregnadas de fuertes prejuicios y en algunos casos de manipulación política y religiosa. Aun así, todas las referencias históricas que nos han llegado coinciden en la preponderancia que los cultos y las divinidades astrales tenían en el mundo religioso aborigen. De hecho, podemos decir que el Sol, la Luna e incluso otros cuerpos celestes formaban el núcleo principal del panteón aborigen (ver Serra, 1940; Jiménez, 1990).

También hay multitud de referencias, por lo común bastante difusas y superficiales, sobre la existencia de un calendario y del uso de la posición del Sol, la Luna y algunas estrellas (así como de las fases de la Luna) para la cuenta del tiempo (Morales, 1993; Marín de Cubas, 1993; Abreu Galindo, 1977).

### 4. LUGARES SAGRADOS

La existencia de recintos y lugares sagrados entre los primitivos habitantes del archipiélago está bien atestiguado por los cronistas y por los trabajos de campo arqueológicos. Por lo general, su tipología es diferente de una isla a otra. Así, por ejemplo, en Fuerteventura, según Abreu Galindo (1977) y Torriani (1980), las ceremonias se llevaban a cabo en construcciones circulares con paredes de piedras hincadas llamadas "efequenes". Por otra parte, Abreu Galindo nos habla de una costumbre diferente en La Palma, donde ciertos rituales tenían lugar alrededor de apilamientos de piedras.

Las descripciones de los lugares sagrados son mucho más numerosas y explícitas en el caso de Gran Canaria, Sedeño (Morales, 1993), Abreu Galindo (1977) y Marín de Cubas (1993) nos hablan sobre la existencia de santuarios en las cumbres de ciertas montañas de Gran Canaria, los llamados almogarenos. En estos recintos, posiblemente al aire libre, se realizaban rituales de libaciones, en los que se vertía leche de cabra sobre el suelo en momentos determinados del año. Por otra parte, también es interesante comentar el significado especial que ciertos promontorios rocosos parecían tener para los primitivos habitantes del archipiélago. Por ejemplo, en La Palma, según Tejera Gaspar (1992) el Roque Idafe, situado en el interior de la Caldera de Taburiente, tenía un significado de "sustentador del mundo" ("Axis Mundi") en la cosmovisión de los aborigenes. En el Hierro tenemos otro ejemplo de sacralización geográfica: según Abreu Galindo (1977), los antiguos herreños veneraban dos rocas prominentes, en un lugar denominado Bentayca (hoy desconocido), pues creían que sus dos dioses principales habitaban en ellos cuando bajaban del cielo. En este contexto, resultan especialmente interesantes las analogías que podemos encontrar entre las costumbres religiosas de los antiguos habitantes de las Islas y los primitivos beréberos del norte de África. La sacralización de montañas es una constante plenamente atestiguada en la primitiva religión beréber (ver Camps, 1995). Así, por ejemplo, según Herodoto, el Monte Atlas tuvo el significado de "columna del cielo" para los antiguos libios. Otro historiador, Máximo de Tiro, recoge que esta montaña tuvo el carácter de templo y de dios para los norteafricanos prerromanos. Estos paralelismos no resultan extraños si tenemos en cuenta las raíces norteafricanas de los primeros pobladores de las Islas.

Desde el punto de vista arqueológico, existen varios yacimientos en Gran Canaria que muy bien pudieran corresponder a los denominados almogarenos que recogen las crónicas. Todos estos lugares comparten un contexto y unos elementos similares. Aunque algunos de ellos se sitúan en zonas bajas (como el Almogarén de Jerez), en la mayoría de los casos suelen

encontrarse en lugares elevados (cumbres de montañas) y dominando un vasto panorama. A menudo se encuentran en las cercanías de complejos de habitación trogloditas y/o cuevas de enterramiento. Estos recintos, consisten en plataformas de roca planas o aplanadas artificialmente donde encontramos cazoletas excavadas y conectadas ocasionalmente por medio de canalillos. También es bastante usual el encontrar petroglifos, algunas veces alfabeticos, en sus cercanías. Paralelamente, en Tenerife también encontramos yacimientos con contextos arqueológicos bastante similares a los almogarenos grancanarios.

En Gran Canaria encontramos otros tipos de lugares arqueológicos presumiblemente sagrados como, por ejemplo, las cuevas-santuario y las estructuras cónicas de piedra seca denominadas torretas. Las cuevas-santuario son grutas, generalmente artificiales, situadas en lugares privilegiados, con rasgos constructivos o elementos particulares y, en algunos casos, con su interior pintado o decorado. Ejemplos conocidos de cuevas-santuario son la Cueva Pintada de Gáldar, la Cueva de los Candiles o la cueva principal de Cuatro Puertas, entre otras. Las denominadas torretas están construidas con piedra seca apilada. Sus tamaños típicos pueden variar desde 0.5 metros de ancho y algunos centímetros de alto a algo mas de 1 metro de ancho por 2 metros de alto. Se hallan normalmente en grupos y asociadas a lo que se denominan estructuras en herradura. Están situadas mayoritariamente en la parte suroccidental de Gran Canaria. Según del Arco Aguilar y colaboradores (1992), la situación de las torretas parece responder a razones estratégicas, debido a que suelen estar colocadas en lugares altos y protegidos. Tampoco se puede olvidar su posible carácter funerario, pues ocasionalmente se las encuentra relacionadas con cuevas de enterramiento, como en el caso de los Llanos de Gamona. En la isla de Hierro (así como en la Gomera y La Palma) también encontramos estructuras similares, las denominadas aras de sacrificio pero, en este caso, presentan un agujero en su parte superior relleno con restos de animales quemados, posiblemente incinerados como ofrenda o sacrificio ritual.

Todos estos diferentes contextos donde la vida y el ritual sagrado de los antiguos isleños se llevaba a cabo parecen estar relacionados con diferentes aspectos del mundo religioso aborigen. Se han planteado diversas teorías para explicar la situación, el significado y la utilidad de estos lugares pero, hasta la fecha, no se dispone de un esquema global para explicarlos. Es más que posible que no exista un esquema único, pues somos conscientes que, en cualquier cultura, la religiosidad puede expresarse de diferentes formas y puede aplicarse a distintos conceptos y circunstancias. Sin embargo, estamos convencidos, y en las páginas que siguen intentaremos demostrarlo al lector, que la interpretación arqueoastronómica puede proporcionar un esquema unificador válido para entender aspectos importantes del mundo religioso y cultural del antiguo aborigen.

## 5. ARQUEOASTRONOMÍA Y LUGARES SAGRADOS

La realización de un estudio arqueoastronómico de campo en yacimientos arqueológicos de las Islas aparece como una necesidad natural a la luz de las reveladoras referencias etnográficas sobre cultos celestes y las características "astrales" sugeridas en muchos de los restos arqueológicos encontrados en las islas. La potencialidad astronómica contenida en el legado material aborigen ha sido sugerida por varios prehistoriadores canarios. Así, por ejemplo, J. J. Jiménez (1990), en su trabajo pionero sobre los elementos astrales en la arqueología prehistórica de las Islas, finaliza con la siguiente frase: "... resulta imprescindible abordar un estudio arqueoastronómico como apoyatura a nuestra investigación, que nos permita concretar objetivamente la exacta naturaleza de los restos en el contexto de la Prehistoria insular.". Por otro lado, E. Martín Rodríguez (1992), en su monografía dedicada a la prehistoria de La Palma, comenta las citas de Abreu Galindo sobre los ritos y celebraciones llevados a cabo por los antiguos "auaritas" (naturales de la Palma) indicando: "Esta festividad se celebraría en diferentes épocas del año, posiblemente coincidiendo con determinados fenómenos naturales como pueden ser los solsticios pues, tanto el de verano como el de invierno, coinciden con dos acontecimientos de extraordinaria trascendencia económica como son la fecundación y el parto del ganado". Diversos autores, como por ejemplo Tejera Gaspar

(1992), han reconocido representaciones astrales en la decoración de cuencos cerámicos en el interior de recipientes decorados con técnica impresa y de puntillado localizados en las Cañadas del Teide, y según J. J. Jiménez, en cerámica pintada de Gran Canaria, como por ejemplo el vaso encontrado en Agüimes, que podría corresponder a la representación de un eclipse anular de Sol (Jiménez, 1994). La distinta tipología de grabados rupestres que se encuentran en las Islas tampoco escapan de un posible significado astronómico, como por ejemplo los denominados círculos radiados y su posible significación solar (ver Tejera Gaspar, 1992).

Somos conscientes que la Astronomía no puede explicar la localización y la utilidad de todos los posibles yacimientos arqueológicos. Así por ejemplo, el abastecimiento de agua y víveres, así como la fácil defensa, deben ser los factores determinantes a la hora de establecer la situación de un poblado. Por otro lado, un caso ilustrativo en este sentido es el de los graneros comunales de Gran Canaria (el Cenobio de Valeron es el mas conocido) en que hemos encontrado que la mayoría de ellos se encuentran orientados al Sur (Belmonte et al., 1995), posiblemente debido a que esta orientación permite una mayor insolación y, con ello, una mayor sequedad del ambiente favoreciendo la conservación del grano. En el caso de los lugares de culto, es razonable pensar que las características de la religión de sus constructores puede darnos la clave para entender la localización y/o los distintos elementos que configuran los recintos. En este sentido, el fuerte carácter astral de la religión aborigen sugiere que la astronomía podría ser un elemento considerado por los aborígenes en la construcción de sus santuarios. Esta ha sido la premisa que hemos intentado comprobar en nuestro estudio.

Hasta que comenzamos nuestro proyecto en 1991, no existía ningún estudio publicado dedicado a trabajos de campo arqueoastronómicos en las Islas Canarias. Nuestro grupo de investigación tiene como principal característica y logro su interdisciplinariedad. Su núcleo radica en el Instituto de Astrofísica de Canarias y lo componen Juan A. Belmonte (actualmente Director del Museo de la Ciencia y el Cosmos de La Laguna), y el que subcribe, aunque también contó con la contribución inicial de Antonio Aparicio. Osvaldo González (técnico de planetario del Museo de la Ciencia y del Cosmos) también ha contribuido de una forma muy activa y valiosa, especialmente en el estudio del Roque Bentayga. Así mismo, nuestro compañero del IAC Ricardo Génova se ha sumado recientemente a nuestro grupo. Entre los arqueólogos profesionales canarios que colaboran o han colaborado en el proyecto contamos con el prestigioso profesor Antonio Tejera (catedrático de prehistoria de la Universidad de La Laguna), máximo conocedor del mundo religioso y ritual aborigen; con María Antonia Perera (Unidad de Patrimonio del Excmo. Cabildo Insular de Lanzarote) y Rosa Schlueter (UNED, Las Palmas de Gran Canaria) y, más recientemente, con José J. Jiménez (Museo Arqueológico de Tenerife), todos ellos especialistas en la arqueología de distintas islas del archipiélago.

En el momento de comenzar nuestro proyecto nadie sospechaba el extraordinario potencial astronómico que parece esconderse en los restos prehispánicos de las Islas. Hemos visitado y analizado, en distinto grado de profundidad, alrededor de 60 yacimientos de distinta tipología en todas las islas del Archipiélago y los resultados encontrados, algunas veces impresionantes, han superado plenamente nuestras expectativas iniciales. En lo que resta del presente trabajo intentaremos resumir los resultados mas importantes obtenidos en las tres islas mas estudiadas hasta la fecha: Tenerife, Fuerteventura y Gran Canaria.

### 5.1. Tenerife

Aunque no hay referencias históricas acerca de la existencia de lugares de culto aborigen en Tenerife, algunos yacimientos son considerados como culturales debido a su especial contexto arqueológico (Tejera Gaspar, 1992). Uno de estos lugares se encuentra en la Degollada de Yeje, en Masca (municipio de Buenavista). El núcleo de este yacimiento (que denominaremos "zona ritual") consta de una serie de cazoletas interconectadas y de un petroglifo circular radiado de unos 30 cm de diámetro. Además, en los alrededores, encontramos petroglifos pisciformes y una cueva sepulcral con multitud de cazoletas de



Figura 1 (izq): Puesta de Sol en el solsticio de invierno tal como se vería desde el yacimiento arqueológico de la Degollada de Yeje (Tenerife). El ocaso se produce precisamente sobre el Roque de Los Muchachos, la mayor altura de la isla de La Palma.

Figura 2 (dcha). Teide y Pico viejo tal y como se ven desde la cueva sepulcral de la Degollada de Yeje (ampliada con teleobjetivo). La Luna llena del Benesmer siempre tiene su salida sobre estos dos elementos prominentes del horizonte oriental



pequeño tamaño excavadas en sus cercanías. El horizonte que se domina desde la zona ritual es muy amplio, siendo visibles, hacia el oeste las islas de La Palma, y la Gomera. Otro hecho que consideramos de interés es que el lugar en que se encuentra situada la zona ritual es precisamente el primero donde el pico del Teide comienza a ser visible (hacia el oriente) desde el único punto de acceso al yacimiento. A partir del análisis del horizonte dominado desde la zona ritual encontramos que los ocajos solares en ambos solsticios se producen en las zonas mas elevadas de las islas de La Palma (Roque de los Muchachos: solsticio de verano; ver Figura 1) y de la Gomera (Garajonay: solsticio de invierno), siendo este el único punto de la isla donde se producen los tres hechos comentados (visibilidad del Teide y ocajos solsticiales en las cumbres de ambas islas). Por otro lado, desde la cueva sepulcral (cuya entrada se encuentra orientada al Este) se tiene una visión extraordinaria del Teide y del Pico Viejo. Parece significativo que en el mes de Agosto, época del denominado Beñesmer de los guanches (Torriani, 1980) el orto de la Luna llena se produce siempre entre ambos picos (ver Figura 2). Es de especial importancia el comentar aquí que Alvarez Delgado (1945) propuso la traducción de Beñesmer como "segunda lunación". La existencia de gran numero de pequeñas cazoletas alrededor de la cueva sugiere el marcado carácter ritual del lugar donde se produce este fenómeno lunar. Desde un punto de vista global, la presencia de estos dos núcleos rituales cercanos y la ocurrencia de tres hechos astronómicos destacados en lugares de objetiva relevancia topográfica, hacen que el lugar pueda constituir un ejemplo en que la manifestación de lo sagrado (en este caso hechos astronómicos asociados a cultos astrales) hayan podido definir la erección y utilidad del lugar.



Figura 3: Salida del Sol en el solsticio de verano desde "el altar" en la cumbre de Montaña Tindaya (Fuerteventura). En primer plano se encuentra la cúspide septentrional de Tindaya, el orto se produce justo por una depresión de dicha cúspide en donde es visible la cima de la Montaña Pajara

Otra zona especialmente interesante, desde el punto de vista arqueológico, es el Valle de San Lorenzo (municipio de Arona); lugar donde existen multitud de pequeñas montañas y roques y que constituye la mayor concentración de estaciones de grabados rupestres conocida en la isla. De entre todas las diferentes estaciones del valle, dos parecen tener un carácter especial pues poseen sistemas de cazoletas y canalillos similares a los "almogarenes" grancanarios y a la zona ritual de Masca; estos yacimientos son el del Roque de la Abejera y el de Montaña Cambados. Un elemento común que comparten estos yacimientos con el de Masca es que desde ambos es posible ver el Teide (casi exactamente en el Norte geográfico) algo que no se consigue desde cualquier lugar del Valle. En el Roque de la Abejera existe además un grabado circular radiado, que recuerda formalmente al de Masca, pero de muy diferente tamaño y realización. Hay un hecho astronómico que parece

ligar a ambos yacimientos, y es que el orto solar en el solsticio de verano se produce sobre el mismo lugar desde ambos santuarios, justo sobre la montaña más lejana y llamativa del horizonte oriental visible desde ambos lugares; Montaña Gorda. Este hecho significa que los dos santuarios y Montaña Gorda se encuentran alineados con la línea solsticial (Ver Figura 3).

A la espera de analizar otras posibles zonas rituales en Tenerife (conocidas en escaso número), lo encontrado hasta ahora parece sugerir principalmente dos tendencias, a) la aparente importancia de los solsticios, especialmente el de verano, para el ritual guanche (quizás con importancia calendárica); b) la posible necesidad de la presencia del Teide como ingrediente en el ritual. En este punto podemos traer a colación el posible significado de "Axis Mundi" (eje y sustentador del cielo y de la Tierra) que el Teide pudo tener para los primitivos guanches, según propone Tejera Gaspar (1992). Dentro de esta hipótesis y suponiendo, como parecen indicar nuestros resultados, que los ritos que se llevaban a cabo en estos santuarios fuesen astrales, parece razonable la necesidad de un "intermediario" o "nexo de unión" (en este caso materializado en el Teide) entre el hombre y los entes divinos celestes para la satisfactoria consecución de la actividad ritual. Por otra parte, el que la posición del Teide desde el Valle de San Lorenzo coincida prácticamente con el Norte geográfico (eje polar y zona inmutable de la bóveda celeste) parece proporcionar un apoyo adicional a esta posibilidad.

El tema de la posible existencia de un calendario guanche ha sido tratado en trabajos anteriores de nuestro grupo desde un punto de vista arqueoastronómico (Belmonte et al. 1994; Esteban et al. 1994), aunque el limitado número de santuarios estudiados hasta la fecha no nos permite ninguna conclusión segura. De todas formas, como hemos visto, la importancia del solsticio de verano parece clara a la luz del trabajo de campo realizado. Desgraciadamente, no hay referencias directas de los cronistas que confirmen o refuten esta posibilidad, aunque si existen para otras islas del archipiélago, como Fuerteventura y Gran Canaria. Por otra parte, hay distintas costumbres populares que nos hablan de la importancia del día de San Juan, como la del baño del ganado en el mar (no generalizada) o la celebración de hogueras en la víspera aunque, en este caso podría deberse a una influencia peninsular.

Sin lugar a dudas, un momento importante del año guanche eran las fiestas de recolección que, según Abreu Galindo (1979) y Torriani (1980), se celebraban en Agosto, durante el mes de Beñesmer. De hecho, la actual celebración de la Virgen de Candelaria en el 15 de Agosto se puede interpretar como una continuidad de esta tradición prehispánica. Como comentamos anteriormente y teniendo en cuenta la posible importancia del solsticio de verano, la traducción de Alvarez Delgado (1945) de Beñesmer como "segunda lunación" cobra pleno sentido, pues nuestro Agosto coincide aproximadamente con el segundo período de fase lunar (mes sinódico) posterior al solsticio de verano, por lo que ambos eventos calendáricos estarían relacionados astronómicamente y reflejados en el centro ritual de Masca, lo que proporciona un marco coherente de interpretación. Por otra parte, hay que tener en cuenta que el uso de las fases lunares para la cuenta del tiempo por los antiguos aborígenes de diferentes islas está bien atestiguado en las crónicas, y que un sistema de cuenta del tiempo basado en fases lunares no es sincrónico con el del movimiento anual solar (es decir, un año no tiene un número entero de ciclos de las fases lunares o meses sinódicos) por lo que, de un año para otro, la posición temporal de la "segunda lunación" respecto al solsticio variaría en algunos días aunque siempre ocuparía una parte importante del mes de Agosto, repitiéndose en un ciclo de 19 años aproximadamente (periodo en que los ciclos solares y lunares coinciden).

## 5.2. Fuerteventura

En esta isla hemos estudiado un gran número de yacimientos de muy diferente tipología (círculos de piedra, estaciones de grabados, poblados, estructuras tumulares, etcétera), fruto de la inestimable colaboración de la arqueóloga M. A. Perera, conocedora profunda del patrimonio arqueológico majorero. Aunque en el momento de la redacción de este trabajo todavía nos encontramos analizando datos de las últimas campañas (círculos de piedra y estructuras tumulares), ya tenemos resultados definitivos sobre algunos yacimientos, entre los que destaca la importantísima estación de grabados rupestres de Montaña Tindaya.

Esta emblemática montaña traquítica posee una de las estaciones de grabados rupestres mas extensas de todo el archipiélago. En su cumbre encontramos más de 200 petroglifos con forma de pie esquemático (denominados podomorfos en la literatura especializada) que se encuentran distribuidos en 57 paneles. Tradicionalmente, esta montaña ha sido considerada como mágica por los lugareños, lugar de brujas y de hechos extraordinarios. En nuestra primera visita pudimos comprobar que una gran parte de los grabados se encontraban orientados sistemáticamente hacia el suroeste, hecho que ya fue sugerido en un trabajo previo de M. Cortés (1987), aunque sin ninguna otra discusión al respecto. Desde la cumbre de Tindaya se domina un amplio horizonte, especialmente hacia el oeste, donde son visibles las islas de Gran Canaria y Tenerife, en donde resalta especialmente el lejano Teide.

Nuestro trabajo consistió en calcular la declinación magnética del lugar, analizar el horizonte astronómico y estudiar estadísticamente la orientación de los grabados. Este último parámetro se definió, para cada grabado, como la dirección del eje de simetría de cada podomorfo y el sentido de talón a dedos. El diagrama de orientación general de todo el conjunto de grabados muestra una marcadísima concentración en el octante Oeste-Suroeste del horizonte. De hecho un 80% de los podomorfos presentan acimutes entre 225° y 270°, una distribución claramente no aleatoria. Por otro lado, el perfil de las islas de Gran Canaria y Tenerife se extiende entre los 240° y 265°, por lo que sería posible que una causa geográfica estuviera detrás de esta concentración. De cualquier modo, en este intervalo de acimutes se producen varios eventos astronómicos importantes, como son el ocaso solar en el solsticio de invierno y los ocasos lunares en los lunasticios mayor y menor, entre otros. Respecto al 20% de los grabados restante, tampoco parece que se distribuyan de forma aleatoria sino que se hallan orientados mayoritariamente hacia los puntos cardinales.

Para discernir cual es la razón de la orientación de los podomorfos elaboramos un histograma de las orientaciones y ajustamos matemáticamente la distribución, encontrando que el centro de dicha distribución coincide con el acimut del ocaso solar en el solsticio de invierno, tal y como se observa desde Tindaya. Este resultado también podría interpretarse relacionado con los lugares donde se produce el ocaso de las Lunas nuevas (crecientes tempranos) simultáneas o posteriores al solsticio de invierno que también ocupan un rango de acimutes similar. Es también significativo el que, desde la piedra denominada el "Altar", situada en la cumbre meridional de Tindaya (posiblemente parcialmente tallada), el orto solar del solsticio de verano (el punto simétrico al ocaso solar en el solsticio invernal) se produce justo por una depresión central de dicha cumbre desde donde es posible ver la cima de Montaña Pajarita (ver Figura 3)

En nuestro trabajo dedicado a este yacimiento (Perera et al. 1996, Belmonte et al. 1995) discutimos diferentes interpretaciones del yacimiento de Tindaya a partir de la hipótesis arqueoastronómica. Entre éstas, parece especialmente interesante el posible carácter de Montaña Tindaya como santuario potenciador de lluvias; hipótesis basada en que el comienzo de la época de lluvias en la isla coincide con la época del principio del invierno, hecho especialmente importante en una isla históricamente tan pobre en recursos hídricos.

En Tisajoire, también en Fuerteventura, existe otra estación de grabados podomorfos en medio de un gran poblado prehistórico. De nuevo los petroglifos se encuentran orientados a poniente, pero a un intervalo de acimutes distinto, entre 291 a 305, zona donde se produce el ocaso solar en el solsticio de verano, el ocaso de la Luna nueva más cercana a éste o, también, el ocaso de la Luna llena que sigue al solsticio de invierno. La existencia de esta segunda estación de grabados podomorfos vendría a reforzar las posibles connotaciones astronómicas de este tipo de yacimientos.

Algunos de los múltiples círculos de piedra aborígenes diseminados por Fuerteventura también parecen tener una relación astronómica. Estos círculos bien podrían corresponder a lo que Abreu Galindo (1977) denomina "efequenes" y que este autor describe como construcciones redondas con dos paredes de piedra donde se ofrecía leche y manteca

como ofrenda ritual. Posiblemente estos lugares podrían tener un significado de templos, como parece sugerir la traducción del término libico "Fiquen" que podría asimilarse al de "efequén". El análisis preliminar del conjunto de círculos de piedra prospectados indica relaciones solsticiales en al menos dos de ellos: La Asamblea y El Paso, también encontramos relaciones lunares en el círculo del Llano del Esquinzo, lugar desde donde el orto lunar durante el lunasticio mayor sur se observa sobre Montaña Tindaya.

### 5.3. Gran Canaria. Paradigma arqueoastronómico

Como ya se dijo anteriormente, la población prehispánica de Gran Canaria presenta la cultura material más evolucionada de todo el archipiélago. La riqueza y complejidad de los yacimientos contrasta fuertemente con lo que podemos encontrar en el resto de las islas, principalmente en las occidentales. En Gran Canaria se conoce un gran número de yacimientos de posible carácter ritual y religioso de muy diferente tipología, hecho que nos ha impulsado a que nuestros mayores esfuerzos se hayan encaminado al estudio de esta isla.

Uno de los primeros yacimientos que visitamos fue Cuatro Puertas. Este complejo arqueológico se encuentra en el municipio de Telde y ocupa una pequeña montaña cercana al mar. En la vertiente sur encontramos un extenso poblado troglodita de toba excavada mientras que en la vertiente opuesta, la norte, solo existe la cueva-santuario, con cuatro entradas casi simétricas y que da nombre al lugar. Visitamos el yacimiento durante el solsticio de verano y pudimos comprobar que, solo en estas fechas, los rayos solares iluminan el interior de la cueva. Poco después del amanecer astronómico, y solo durante unos instantes, el Sol entra a través de una de las aberturas, tan oblicuamente, que los rayos sólo pueden proyectar, sobre la pared oeste, una mancha de luz con forma de menisco alargado muy fino de apenas unos centímetros de ancho. Por otro lado, al ser tan simétrica la construcción, un fenómeno similar ocurre al ocaso en esas mismas fechas. En este caso, los rayos del Sol entran por dos aberturas; por la primera de ellas también muy oblicuamente y proyectando otra mancha luminosa alargada y estrecha, similar a la observable en el orto aunque de mayor anchura; mientras que por la segunda abertura la mancha es mayor y presenta una forma de punta de flecha que termina, curiosamente, justo sobre una cazoleta excavada en una plataforma del ángulo suroriental interior de la cueva. Teniendo en cuenta la geometría de los elementos involucrados en este posible marcador solsticial, estimamos que la visibilidad del fenómeno asociado al ocaso podría ser de unos 15 o 20 días alrededor del solsticio. Por otra parte, la duración del fenómeno asociado al orto, al ser mucho más preciso, podría restingirse a unos pocos días antes y después del solsticio.

Por otro lado, en la cumbre de la montaña de Cuatro Puertas existe un almogarén que consiste, como en otros casos, en una plataforma allanada donde encontramos cazoletas y canales excavados donde destaca uno de gran tamaño y profundidad que asemeja un estrecho creciente lunar. En las paredes del almogarén aparecen dos elementos llamativos y especialmente interesantes, en la parte occidental encontramos un curioso grabado de trazo profundo que asemeja una serie de crecientes lunares abiertos hacia arriba y conectados entre si. En el lado opuesto encontramos una muesca a través de la cual, si nos situamos en el grabado, podemos ver la línea del horizonte marino. Ambos elementos parecen relacionados a través de un curioso fenómeno que tiene lugar también durante el orto solar del solsticio de verano. En el momento de la salida del Sol, la sombra de la muesca se proyecta sobre el grabado, de tal forma que el perfil del lado sur de la muesca coincide con el contorno exterior septentrional del petroglifo. Según el disco solar va ascendiendo, la sombra de la muesca sigue delineando el perfil del grabado hasta que lo abandona definitivamente. Hemos estimado que el fenómeno solo puede ser observable unos pocos días antes y después del solsticio de verano, siendo este periodo el único a lo largo de todo el año en que la sombra de la muesca y el contorno del grabado coinciden.

Quizá el lugar hasta ahora más interesante de Gran Canaria, y posiblemente de todo el archipiélago, sea el almogarén del Roque Bentaya, enclavado en el mismo centro de la impresionante Caldera de Tejeda. El contexto arqueológico del yacimiento es realmente



Figura 4: Equinoccio astronómico desde el almogarén del Roque Bentayga. Situados en el petroglifo circular, la salida del Sol se produce por una muesca presente en la cúspide de un promontorio rocoso situado en el extremo este del almogarén. El jalón (vara de referencia) que se muestra en la imagen esta colocado justo en una cazoleta artificial excavada tras la muesca.

extenso. En él encontramos cuevas de habitación y enterramiento, grabados rupestres, una muralla defensiva y el almogarén propiamente dicho, que consiste en una serie de plataformas excavadas, un buen número de cazoletas artificiales y un petroglifo circular (de 75 cm. de diámetro) dominando el centro del recinto. El horizonte visible desde el almogarén, básicamente el oriental, resulta magnífico, dominado por el Roque Nublo (elemento emblemático de Gran Canaria) y el Pico de Las Nieves (la montaña más elevada de la isla). El análisis del horizonte proporcionó unos resultados asombrosos, pues encontramos que la Luna en su posición más meridional posible (lo que se denomina lunasticio mayor sur) tendría su orto justo sobre el Roque Nublo, siendo en su mayor parte ocultada por éste. Este hecho es extraordinariamente significativo, pues esta posición se alcanza cada 19 años aproximadamente, por lo que de no ser una casualidad la elección del lugar implicaría unos sistemas de observación astronómica cuidadosos a largo plazo y un conocimiento relativamente profundo de los movimientos celestes. Debido a

que la anchura angular que presenta el Roque Nublo tal y como se observa desde Bentayga es ligeramente mayor que el diámetro lunar, podríamos esperar que en un momento no muy lejano del pasado la ocultación de la Luna por el Roque Nublo fuera total. Haciendo cálculos estimativos, encontramos que dicho momento tendría lugar alrededor del 400 d.C. siendo visible el fenómeno durante un intervalo de uno o dos siglos antes y después de dicha fecha. Este resultado es consistente con dataciones de C14 realizadas en yacimientos arqueológicos cercanos, que nos dan fechas entre el siglo III y VI d.C.

Ya desde las primeras visitas al lugar, sospechamos la posibilidad de que algún fenómeno marcará la fecha del equinoccio a partir del alineamiento entre el grabado circular y una muesca que existe en la parte superior de un pequeño promontorio rocoso muy cercano. Visitamos el lugar al amanecer del día del equinoccio de otoño de 1995 pudiendo grabar en vídeo la secuencia del orto solar. El fenómeno más llamativo es que, casi una hora después del amanecer, la sombra proyectada por la muesca (ver Figura 4) toca el petroglifo circular y se hace coincidente con su contorno (ver Figura 5). Volvimos a visitar el lugar pero esta vez un día después del equinoccio de primavera de 1996, pudiendo comprobar como ahora la sombra y el grabado ya no eran visiblemente coincidentes. Este hecho nos demuestra, la extraordinaria precisión de este marcador equinocial y nos sugiere la gran probabilidad de que simplemente no sea producto de la casualidad.



Figura 5: Sombra de la muesca sobre el petroglifo del Roque Bentayga poco después del orto solar de los equinoccios. Solo en estos dos días del año se produce la coincidencia entre la sombra y el contorno del grabado. La imagen esta tomada de una secuencia de video, poco antes de la coincidencia total.

Los marcadores encontrados en los almogarenes de Cuatro Puertas y Roque Bentayga (uno solsticial y el otro equinocial) comparten claras similitudes que sugieren técnicas específicas utilizadas por los antiguos grancanarios. En ambos lugares encontramos la misma combinación de dos elementos: una muesca y un grabado, en donde la coincidencia de la sombra de la muesca con algún elemento del petroglifo indica que el evento astronómico importante está ocurriendo. Quizás el seguimiento de la evolución de la sombra proyectada por la muesca podría haber sido utilizado para el cómputo del tiempo y predecir el momento del evento astronómico señalado. No es claro que las muescas en ambos casos sean artificiales, pero en cualquier caso los grabados sí lo son, lo que parece indicar que la elección de la situación del lugar sagrado no fue impuesta por el marcador, sino que éste se pudo construir después. La observación del fenómeno del orto lunar en el lunasticio mayor sur por detrás del Roque Nublo impone una restricción muy fuerte a la elección del lugar del emplazamiento del almogarén del Roque Bentayga. En este caso, la conjunción de dos

objetos naturales (Luna y Roque Nublo) a lo largo de una línea con significación astronómica, deja pocas posibilidades para establecer el lugar de observación. Por lo tanto, si la hipótesis arqueoastronómica es cierta, la elección del emplazamiento del almogarén del Roque Bentayga podría haber obedecido a la posibilidad de observar este fenómeno tan espectacular.

La importancia aparente del equinoccio en la prehistoria de Gran Canaria parece tener un apoyo adicional en la posición relativa de dos yacimientos arqueológicos: La Fortaleza Grande y el almogarén de Amurga. La Fortaleza Grande ocupa la totalidad de una pequeña montaña rocosa situada en el Barranco de Tirajana y presenta un contexto arqueológico similar al del Roque Bentayga pero con la ausencia aparente de un recinto que pudiéramos adscribir como almogarén. El horizonte oeste es especialmente llamativo, pues está ocupado en su mayor parte por la cadena montañosa de Amurga, con alturas que llegan a los 1100 m., situadas a unos 3 km. de distancia. En uno de los picos de esta cadena se encuentra el almogarén de Amurga, situado también sobre una pequeña plataforma rocosa plana y con multitud de cazoletas excavadas de distintos tamaños. El hecho astronómico que relaciona ambos yacimientos parece ser, de nuevo, el equinoccio. Si situamos nuestro punto de observación en una gran cueva (tubo volcánico que parece ser el núcleo del yacimiento) que atraviesa la montaña de lado a lado o en una construcción circular situada justo en su vertical, podremos observar como la puesta de Sol durante los equinoccios se produce precisamente sobre el lugar que ocupa el almogarén de Amurga. Hay que considerar que la extensión aparente del almogarén tal y como se ve desde La Fortaleza, es similar al tamaño angular del diámetro solar, por lo que la precisión del marcador es, nuevamente, del orden de un día.

La presencia de varios marcadores equinociales en Gran Canaria nos sugiere el posible uso calendárico y/o ritual de este momento del año. Su significado preciso todavía se nos escapa aunque una posible respuesta nos la proporciona la referencia recogida hacia 1505 por Sedeño (Morales, 1993), un oficial que participó en la conquista de la isla. Este texto nos dice lo siguiente: "... contaban el año por doce meses y el mes por lunas, y el día por soles, y la semana por siete soles. Llamaban al año Achano. Acababan su año al fin del cuarto mes: esto es, su año comenzaba por el Equinoccio de la primavera, y al cuarto mes que era cuando habían acabado la sementera, que era por fines de junio, hacían grandes fiestas por nueve días continuos, ...". Esta constituye la única referencia escrita que recoge el uso del equinoccio con fines calendáricos por parte de los primitivos canarios. Obviamente, la posibilidad de su uso implica la necesidad de la determinación del equinoccio, siendo ésta la posible finalidad de los marcadores encontrados. Por otra parte, los dos marcadores del solsticio de verano encontrados en Cuatro Puertas también nos sugieren la importancia de este segundo evento astronómico. A la luz del texto citado de Sedeño, este momento del año podría corresponder a las fiestas de recolección y por lo tanto, también con importancia calendárica. De todas formas y para complicar el asunto, tenemos la cita del historiador Marín de Cubas (1993), escrita casi dos siglos después de la conquista, que nos dice que el comienzo del año en Gran Canaria comenzaba en la primera conjunción entre la Luna y el Sol posterior al solsticio de verano. Como podemos observar, nos encontramos ante una diatriba. Por un lado las referencias escritas nos hablan de dos momentos distintos para el comienzo del año aborigen canario y, por otro, encontramos marcadores astronómicos relacionados con ambos eventos astronómicos. Es posible que estemos ante dos calendarios diferentes, quizás coetáneos y empleados por distintos grupos o quizás usados en diferentes momentos a lo largo de la historia de la sociedad prehispánica pero, en cierta forma, recogidos ambos en la tradición oral en tiempos de la conquista. Este problema nos abre nuevos campos de investigación interdisciplinar, donde la comparación de los diferentes elementos materiales y contextos arqueológicos que rodean ambos tipos de marcadores quizás puedan proporcionar pistas para esclarecer este enigmático punto.

## 6. ARQUEOASTRONOMÍA Y MUNDO FUNERARIO EN LA PREHISTORIA DE GRAN CANARIA

El espacio funerario, al menos en algunas islas y algunos yacimientos, también parece presentar relaciones astronómicas, quizás porque compartió un carácter sagrado para el

antiguo aborigen. Un ejemplo ya comentado es el de la cueva sepulcral de Masca y su posible relación con la Luna de Agosto o Benesmer. Por otro lado, estamos llevando a cabo un estudio estadístico de las orientaciones de las cistas en construcciones tumulares en Gran Canaria y Fuerteventura encontrando claras costumbres orientativas, que nos demuestran la deliberada no aleatoriedad en la disposición de las sepulturas. La existencia de una razón astronómica detrás de estas costumbres es algo que todavía no estamos en condiciones de asegurar y que discutiremos en futuros trabajos, aunque parece razonable debido a la aparente repetitividad de ciertas pautas orientativas en lugares distantes y a los resultados que pasamos a comentar a continuación.



Figura 6: Salida del Sol el día del equinoccio justo desde la posición del túmulo "del Rey" en la necrópolis de Arteara. El orto se produce justo sobre la parte inferior de una muesca natural situada en las cumbres de Amurga, el rasgo más llamativo del horizonte oriental.



Figura 7: Salida del Sol en el equinoccio iluminando el túmulo "del Rey". En este caso, la tradición oral y la arqueoastronomía parecen coincidir de una forma extraordinaria. Solo nos queda preguntarnos si este momento tenía un significado especial para los primitivos canarios.

consisten, típicamente, en varios niveles y algunos de ellos divididos por paredes radiales. Todos ellos presentan un pequeño torreón en el centro. El túmulo más grande y complejo tiene alrededor de 20 m de diámetro y se denomina el gran túmulo "de La Guancha". La mitad norte del horizonte es básicamente marino pero el rasgo más llamativo se encuentra hacia el sudeste y corresponde a la cercana montaña cónica de Gáldar (el denominado Teide Chico por la población actual de la isla). Nuestras primeras mediciones sugirieron que la posición de esta montaña (justo desde el gran túmulo) se encontraba aproximadamente en el lugar donde se produce la salida del Sol en el solsticio de invierno. La comprobación directa fue llevada a cabo por nuestro compañero Ricardo Génova, encontrando que dicha salida se produce justo sobre la cúspide de la montaña, dando lugar a un llamativo fenómeno. En este sentido es importante comentar que el solsticio de invierno, quizás por un sentido de "renacimiento" del Sol, ha estado íntimamente ligado al mundo funerario en diferentes culturas separadas en el espacio y el tiempo. Así, por ejemplo, sepulcros megalíticos tan conocidos como el de Newgrange en Irlanda o grandes templos funerarios de Egipto, estaban orientados en esta dirección particular.

En la gigantesca necrópolis de Arteara (situada en el interior del Barranco de Fataga, con más de 800 tumbas tumulares y con dataciones de C14 tan tempranas como el siglo V a. C.) se mantenía una larga tradición oral desde un número indeterminado de generaciones. Esta tradición nos dice que, en una cierta mañana de verano, los primeros rayos del Sol iluminaban uno de los túmulos más significativos de la necrópolis, el único con nombre propio, el denominado túmulo "del Rey". Esta construcción es ligeramente más grande que las que le rodean y está situado en un pequeño promontorio, lo que le da un cierto carácter de preeminencia. Justo desde este lugar, el horizonte oriental está dominado por la cadena montañosa de Amurga. El rasgo más llamativo de este horizonte tan elevado es una gran muesca natural donde los lugareños afirmaban que salía el Sol el día del curioso fenómeno mencionado. Nuestras mediciones en primer lugar y la observación directa del fenómeno más tarde, demostraron que ese día no era otro que el del equinoccio. Justo ese día y situados en el túmulo "del Rey", el disco solar aparece por la zona inferior de la muesca (ver Figura 6), escalando posteriormente la pared meridional y produciéndose una ocultación temporal durante el recorrido, ocultación que no es visible en otro momento del año ni desde otro lugar de la necrópolis.

Otro yacimiento arqueológico espectacular y único en las Islas es la necrópolis de Gáldar (la capital prehispánica de Gran Canaria en tiempos de la conquista). Contiene un cierto número de túmulos circulares monumentales que

## 7. EPÍLOGO. UNA NUEVA VISIÓN DEL MUNDO ABORIGEN

A lo largo de todo lo expuesto en este trabajo y como resultado preliminar de nuestro estudio, creemos que la astronomía constituyó un ingrediente muy importante en el mundo religioso y cultural del primitivo aborigen, al menos en las islas más estudiadas hasta la fecha: Gran Canaria, Tenerife y Fuerteventura. El caudal de relaciones astronómicas encontrado en yacimientos de primera magnitud y la espectacularidad de una buena parte de ellas, hace muy poco probable que sean producto de la casualidad. Además el argumento estadístico juega en favor de esta hipótesis, pues el número relativo de lugares de culto y de carácter funerario en donde se producen fenómenos o hierofanías astronómicas es muy alto. Como suele decirse en lenguaje matemático, su número es estadísticamente significativo. Por todo ello creemos que nuestra interpretación astronómica de los lugares arqueológicos referidos está más allá de ser una mera hipótesis.

La interpretación astronómica de los lugares investigados puede proporcionarnos claves fundamentales para entender distintos aspectos del mundo religioso y cultural del primitivo aborigen como por ejemplo: (a) la localización de, al menos, un número significativo de lugares arqueológico con posible carácter sagrado; (b) la finalidad de ciertos, e incluso los más llamativos, elementos de estos yacimientos; y (c) la relación geográfica entre algunos de estos lugares. Todo esto nos muestra un marco coherente de explicación de todos estos aspectos, poco conocidos hasta la fecha, así como elementos y datos para la posterior utilización en estudios arqueológicos y prehistóricos de marco más general.

La posible existencia de marcadores astronómicos no implica necesariamente el uso o el desarrollo de las matemáticas (geometría y trigonometría) entre los antiguos isleños. Lo que en primera instancia nos sugiere es que estas sociedades desarrollaron la observación sistemática de la posición de los astros. Quizá algunos elementos de estas sociedades, sacerdotes quizás, se encargaron del seguimiento de la posición del Sol, la Luna y, posiblemente, otros astros, para establecer las celebraciones religiosas así como los momentos propicios para realizar distintas actividades agrícolas, en definitiva, para construir un calendario.

Los resultados obtenidos nos hacen plantearnos una última pregunta: ¿Fue este conocimiento astronómico adquirido independientemente por las propias culturas aborígenes o, por el contrario, fue importado por aquellos que arribaron a las islas en las diferentes migraciones desde el continente africano?. Todavía no disponemos de elementos para responder a esta pregunta de una forma mínimamente segura. De todas formas, no podemos olvidar que las antiguas tribus protoberéberes, de las que muy probablemente descendieron los antiguos isleños, formaron parte del antiguo mundo mediterráneo. El conocimiento astronómico de civilizaciones como la fenicia, púnica o romana pudo haber sido adoptado (en todo o parte) por las antiguas colectividades africanas que posteriormente poblaron el archipiélago. Solo un estudio multidisciplinar comparativo a gran escala en el Mediterráneo (Norte de África en especial) y las propias islas nos podría dar las pistas necesarias para esclarecer este aspecto tan importante de la cultura aborigen.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abreu Galindo F.J. Historia de la conquista de las siete Islas de Canaria. Goya Ediciones. 1977.
- Alvarez Delgado, J. Ensayo de Filología Tinerfeña. Teide Press. La Laguna. 1945
- Belmonte, J.A., Esteban, C., Aparicio, A., Tejera Gaspar, A., González, O. Revista de la Academia Canaria de Ciencias VI (Num. 2, 3 y 4), 133, 1994.
- Belmonte, J.A., Perera Betancort, M.A., Esteban, C., Tejera Gaspar, A., IAC Noticias 1, 18, 1995
- Belmonte, J.A., Esteban, C., Schlueter, R., Perera Betancort, M.A., González, O., IAC Noticias 4, 8, 1995
- Camps, G. Les Berèberes. Mémoire et Identité. Editions Errance. 1995
- Cortés Vázquez, M. Los petroglifos podomorfos de Montaña Tindaya (Fuerteventura): características formales y significación. I Jornadas de Historia de Fuerteventura y Lanzarote. Tomo II. Servicio de Publicaciones del Cabildo de Fuerteventura, p. 50. 1987
- del Arco Aguilar M.C., Jiménez Gómez M., Navarro Mederos J.F. La arqueología en Canarias: del mito a la ciencia. Interinsular/Ediciones Canarias. 1992.
- Esteban, C., Belmonte, J.A., Aparicio, A. Astronomía y calendario entre las culturas aborígenes canarias. Arqueoastronomía Hispana. Equipo Sirius. p. 183. 1994.
- Jiménez, J.J. Elementos astrales de la arqueología prehistórica de las Islas Canarias. Investigaciones Arqueológicas Canarias II, 93, 1990.
- Jiménez, J. Sistemas calendáricos, mitos astrales y prácticas adivinatorias en las Islas Canarias prehispánicas. Time and Astronomy at the Meeting of Two Worlds. CESLA. Varsovia. p. 402. 1994
- Marín de Cubas T.A. Historia de las siete islas de Canaria. Canarias Clásica. La Laguna. 1993.
- Martín Rodríguez, E., La Palma y los auaritas. Centro de Cultura Popular Canaria. 1992
- Morales, F. La crónica de Sedeño. En Canarias: crónicas de su conquista. Cabildo de Gran Canaria. 1993.
- Perera Betancort, M.A., Belmonte, J.A., Esteban, C., Tejera Gaspar, A. Tabona IX, en prensa, 1996
- Serra, E. Los Mallorquines en Canarias. Revista de Historia VII, 281, 1940.
- Tejera Gaspar A. La religión de los guanches: ritos, mitos y leyendas. Edicolor. S/C Tenerife. 1992.
- Torriani L. Descripción de las Islas Canarias. Goya Ediciones. 1980.



# V I D A   Y   M U E R T E   D E   L A S E S T R E L L A S

Teodoro Roca Cortés

Catedrático de Astrofísica de la Universidad de La Laguna

El título de la conferencia quiere resaltar que las estrellas no son inmutables, sino que cambian con el tiempo su estructura en lo que podríamos llamar su evolución. Como veremos mas adelante, este cambio temporal es extraordinariamente lento en comparación con la evolución biológica en la Tierra. En esta línea desarrollaré la charla tratando de explicar cual es la estructura de las estrellas, como evolucionan a lo largo del tiempo y, durante este periodo, cual es su aportación a la propia evolución del Universo como un todo.

Las estrellas, en un número aproximado de  $10^{20}$ , son constituyentes básicos del Universo que conocemos. Veremos que su aportación es vital para que el Universo tenga su apariencia actual, evolucione, e incluso aparezcan estructuras biológicas y vida en él. Ya que este ciclo de conferencias es sobre Astrofísica, adoptaré una visión física para explicar y describir el papel que juegan las estrellas en el universo, es decir, intentaré explicar la evolución de las mismas utilizando las leyes físicas básicas que conocemos, estoy seguro, todos los presentes en mayor o menor medida.

Una estrella es, básicamente, una esfera de plasma autogravitante. Expliquemos que entendemos por esta corta, aunque bastante precisa, definición. ESFERA; todos conocemos que una esfera es una forma geométrica en la que todos los puntos de su superficie distan igual cantidad (radio) de uno sólo (centro); tiene la importante propiedad de ser simétrica respecto de su centro, de manera que cualquier observador exterior a ella la ve exactamente igual cualquiera que sea su posición. PLASMA; es el estado de la materia que forma la estrella; es el llamado cuarto estado de la materia que se define como un gas de partículas ionizadas. En efecto, las altas temperaturas que se registran en el interior de una estrella son suficientes para que los enlaces de los electrones a los núcleos atómicos se rompan, de manera que tengamos iones: positivos (los núcleos atómicos), y negativos (los electrones). AUTOGRAVITANTE; quiere decir que la materia que compone la estrella está sujeta solamente, o mejor dicho, principalmente a las fuerzas de su propia gravedad, ya descrita por Newton.

En una estrella, formada por partículas (iones) de masas diferentes, la fuerza de la gravedad actúa sobre ellas siguiendo la ley de Newton, de manera que todas ellas se ven atraídas hacia un punto común con una fuerza que depende solamente de las masas de las partículas que forman la estrella y de su distancia relativa. Asociada a esta fuerza, se define la llamada energía potencial gravitatoria como:  $E_g = -5/3 (GM^2/R)$ , donde M es la masa de la estrella y R su radio. Esta energía, que la consideramos cero cuando todas las partículas están a gran distancia (infinito) entre ellas, es siempre negativa denotando el hecho que la propia estrella, una vez formada y en equilibrio, ha hecho un trabajo para cambiar su estructura inicial, es decir, para acercar las partículas inicialmente dispersas a grandes distancias (que formaban la nube interestelar de la cual se formó). Esta pérdida de energía potencial la tendremos que tener almacenada en alguna otra forma, puesto que sabemos que la energía total de un sistema aislado se conserva siempre. Por esto es tan importante hablar siempre en términos de la energía de cualquier sistema en Física. Ahora bien, la energía sobrante después del trabajo de acercar las partículas, ¿dónde ha ido a parar?.

Pensemos ahora en este proceso de formación de las estrellas en términos dinámicos; las partículas que forman la estrella se ven aceleradas hacia el centro, con lo que su velocidad aumenta rápidamente y, por tanto, su distancia relativa disminuye. Cerca del centro, los choques entre las partículas son cada vez mas frecuentes, con lo que las velocidades cambian la dirección de su movimiento de manera aleatoria; es decir, los choques entre partículas pueden hacer que las partículas viajen en cualquier dirección, en particular, también hacia fuera donde verán caer las partículas hacia ellas rápidamente, aumentando el número de choques que, eventualmente en el transcurrir del tiempo, las irá frenando. Este movimiento caótico irá aumentando a lo largo del tiempo, a medida que el proceso continúa, hasta que llegue incluso a detener la caída libre de las partículas hacia el centro.

Este proceso se describe de una manera más elegante haciendo uso de las propiedades termodinámicas de la materia. Cualquier gas podemos describirlo dando su temperatura, su densidad y su composición química; la ecuación que describe el estado de un gas involucra también la presión. Así pues la ecuación de estado de un gas ideal es:  $P=(k/\mu H) \rho T$ ; donde  $P$  es la presión,  $T$  la temperatura,  $\rho$  la densidad y  $\mu H$  es el peso atómico medio. Asociada a la temperatura de un sistema físico en equilibrio se define la energía interna o energía térmica del plasma. Esta energía térmica se calcula como:  $E_T=3/2 k T$ , donde  $k$  es la llamada constante de Boltzman. Así pues, conociendo la temperatura de la estrella podemos saber la energía térmica que posee. Fueron los trabajos de Maxwell y Boltzman, a principios de siglo, los que relacionaron la temperatura del gas con la velocidad del movimiento caótico de las partículas que lo componen. A mayor velocidad de dichas partículas mayor temperatura. Por otro lado, a mayor velocidad mayor presión ejercerán. Esta presión o mejor dicho, la diferencia en la presión entre una capa situada una distancia  $r$  del centro y otra situada a  $r'$ , mayor que  $r$ , es la fuerza que contrarresta la de la gravedad.

De esta forma, las partículas en una capa determinada están sometidas a dos fuerzas con la misma dirección y sentidos contrarios: una es la de la gravedad, que tiende a llevar a todas las partículas al centro y otra, es la presión que tiende a separarlas. Una tiende a colapsar la estrella comprimiéndola, mientras que la otra tiende a expandirla, disgregándola. Es la diferencia entre ellas la que determinará la estructura y la dinámica de la estrella en cada momento; si la primera es mayor, la estrella colapsará y si es menor se expandirá. Si son iguales, entonces tendremos un equilibrio en el que la estrella no sufrirá cambios importantes. Éste es el estado actual de nuestro Sol y también el de la gran mayoría de estrellas que pueblan nuestro Universo.

Cuando una estrella evoluciona, salvo casos excepcionales, en su formación o en su muerte por ejemplo, siempre lo hace de manera lenta, prácticamente pasando por sucesivos estados de equilibrio. A este tipo de evolución de sistemas en equilibrio se le puede aplicar el llamado "Teorema del Virial" que ya fue descrito por Clausius alrededor de 1860 y que en formas diversas conocemos hoy en día. En el caso de la evolución estelar, puede mostrarse que este teorema tiene la forma siguiente:

$$2 E_T = -E_G$$

que nos relaciona la energía térmica con la energía potencial gravitatoria en una estrella. Cuando ésta evoluciona en el tiempo, desde un estado de equilibrio con radio  $R$  a otro, con un radio menor  $R'$  (comprimiéndose) obtenemos energía, puesto que la energía potencial gravitatoria se vuelve más negativa, es decir:

$$\Delta E_G = E_G' - E_G = -(5/3) G M (1/R' - 1/R) < 0$$

Así pues la energía que aporta el campo gravitatorio,  $-\Delta E_G$ , se reparte, de acuerdo con el teorema del Virial, de forma que la mitad se invierte en aumentar la energía térmica de la estrella, es decir la estrella se calienta; mientras que la otra mitad es la que la estrella emite hacia el medio interestelar. Nótese que en el caso de una expansión, la estrella toma la energía potencial gravitatoria necesaria de la energía térmica de la estrella, con el resultado que la estrella se enfria. Ahora sabemos donde ha ido a parar la energía en el proceso de formación.

Es importante tener un sentido temporal en estos cambios evolutivos. Es decir, ¿cuánto tiempo, o mejor dicho, cuál sería aproximadamente, el tiempo en que se forma una estrella? Si hemos dicho que podemos formar una estrella por colapso gravitatorio de una nube de gas interestelar, de radio inicialmente muy grande, podemos calcular este tiempo característico como el tiempo dinámico característico en el que se produce dicho colapso. Este tiempo  $\tau_{din}$ , lo obtenemos aproximando la ley de Newton que nos relaciona la fuerza gravitatoria con la que la nube atrae a una partícula situada a una distancia  $R$ ,

con la aceleración  $a$  de esta partícula:

$$F = m a \approx G M m / R^2 \approx m a \approx m R / \tau_{\text{din}}^2 \quad > \quad \tau_{\text{din}} \approx R^{3/2} / (G M)^{1/2} \approx 2000 / \sqrt{\rho_m} \text{ seg.}$$

donde,  $\rho_m$  es la densidad media en la estrella; así pues,  $\tau_{\text{din}}$  para una estrella de  $1M_{\text{Sol}}$ , como el Sol, sería de una media hora. En definitiva, este proceso es muy rápido, extremadamente rápido, si lo comparamos con otros que veremos mas adelante. Obsérvese que depende inversamente de la densidad de manera que cuanto mas densa sea la estrella mas rápido es el proceso.

Una vez se ha estabilizado la estrella, es decir, las dos fuerzas: gravitación y presión son de igual magnitud, podríamos calcular cuanto tiempo va a 'vivir' dicha estrella; por ello entendemos durante cuanto tiempo el equilibrio de fuerzas será posible. El tiempo de vida lo podemos calcular dividiendo la energía de que dispone, es decir su energía potencial gravitatoria  $E_{G,\text{Sol}}$ , por el ritmo al que la gasta, es decir, la luz que emite al medio interestelar (su luminosidad  $L_{\text{Sol}}$ ), supuesta ésta constante. En efecto:

$$\tau_K \approx -E_{G,\text{Sol}} / L_{\text{Sol}} \approx 30 \times 10^6 \text{ años}$$

con lo que obtenemos unos 30 millones de años; este número es muy pequeño para poder explicar incluso la presencia de las primeras algas en nuestros océanos. Obviamente, el Sol, el sistema solar y, en particular, la Tierra son mucho mas viejos que esta cantidad puesto que existen fósiles y meteoritos que así lo atestiguan. ¿Cuál es, entonces, la edad real del Sol?; ¿Por qué el Sol continúa aún brillando en la actualidad si ya ha gastado toda su energía?. La solución a este enigma vino de la mano de la física nuclear y fue H. Bethe, entre otros, quien sugirió, al final de la década de los 30, que las estrellas podrían obtener energía de otras fuentes además de la gravitatoria, proponiendo la primera serie de reacciones nucleares que pueden darse en el interior del Sol. En efecto, si el interior de la estrella alcanza la temperatura adecuada, entonces podemos obtener energía de la reacción nuclear:



en la que 4 protones (núcleos de Hidrógeno,  ${}^1\text{H}$ ) se transforman en un núcleo de Helio ( ${}^4\text{He}$ ), y otras partículas como positrones ( $e^-$ ) y neutrinos ( $\nu$ ), como consecuencia, obtenemos energía a partir de la conocida ecuación  $E = \Delta m \cdot c^2$ , donde  $\Delta m$  es la diferencia entre las masas de  ${}^4\text{H}$  y  ${}^4\text{He}$ . La cantidad de energía que puede obtenerse es muy importante puesto que la cantidad de protones que tenemos en el Sol es elevadísima ( $\sim 10^{52}$ ). Aunque solamente una fracción de éstos reaccionan, la energía obtenida ( $\sim 10^{51}$  ergios) es la que suplirá la necesaria para que la estrella brille, y no tendremos que gastar la energía gravitatoria. La estrella brillará y estará en equilibrio con una estructura casi estática, es decir de evolución muy lenta.

De esta forma puede durar, ¿cuántos años?. Es decir, obviamente la estrella quema  ${}^1\text{H}$  y produce  ${}^4\text{He}$  y llegará un momento en que la falta de combustible, el  ${}^1\text{H}$ , detenga las reacciones nucleares antes descritas y, por tanto, la producción de energía se detenga. Cuando va a ocurrir esto?, qué pasará después?. Podemos hacer un pequeño cálculo para contestar la primera pregunta, dividiendo la energía producida por estas reacciones entre la gastada por la estrella:

$$\tau_N = -E_N / L_* = \Delta m c^2 N_r / L_* \propto M_*^{-3}$$

donde,  $c$  es la velocidad de la luz,  $N_r$  es el numero de reacciones que se producen en la estrella cada segundo,  $L_*$  la luminosidad y  $M_*$  la masa de la estrella. En el caso del Sol, este cociente nos daría unos 10000 millones de años aproximadamente; esta cantidad ya explicaría que la Tierra tenga una edad de 4500 millones de años y destruiríamos la paradoja anterior de un sistema solar mas viejo que el Sol. Concluimos, por tanto, que en

el Sol tienen que producirse obligatoriamente reacciones nucleares para que tenga la edad que se le atribuye experimentalmente. Obsérvese, por otro lado, que  $\tau_N$  depende inversa y fuertemente de la masa de la estrella ( $\propto M^{-3}$ ); de esta forma, una estrella dos veces más masiva que otra tendrá un  $\tau_N$  unas 10 veces menor, es decir, la estrella evolucionará unas 10 veces más aprisa.

De esta forma, las estrellas pasan el periodo mas duradero de su evolución. En su núcleo se produce la combustión termonuclear del  $^1\text{H}$  produciendo  $^4\text{He}$ , hasta que el combustible ( $^1\text{H}$ ) se vaya agotando; pero, que pasará después?. Al ir produciendo  $^4\text{He}$  en el interior estelar, el centro de la estrella se irá enfriando y por tanto, la fuerza derivada de la presión no podrá contrarrestar la fuerza de la gravedad y el colapso del núcleo de la estrella se producirá en algún momento. Al colapsar el núcleo, aumentará la temperatura de su interior rápidamente y, si la masa de la estrella es lo suficientemente grande ( $\sim M_{\odot}$ ), es probable que la temperatura, en su núcleo, llegue a ser suficiente como para que se produzca la reacción nuclear siguiente:



en la que la combustión del  $^4\text{He}$ , producido como consecuencia de las reacciones anteriores, produzca Carbono ( $^{12}\text{C}$ ) y Oxígeno ( $^{16}\text{O}$ ) y también más energía. Si esto es así, el núcleo volverá a estar tan caliente que la presión volverá a detener el colapso de la estrella y tendremos una nueva situación de equilibrio. Esta historia puede repetirse otras veces sobre todo si la estrella es lo suficientemente masiva, aunque será con otros elementos, cada vez mas pesados, de manera que obtendremos una estructura de la estrella en forma de "cebolla", en la que las diferentes capas de la misma sean zonas donde la composición química de la estrella sea diferente: en el centro tendremos los elementos mas pesados (hierro  $^{56}\text{Fe}$ , ..) y a medida que nos acercamos a la superficie están los mas ligeros (Silicio, Magnesio, Oxígeno, Carbono, Helio e Hidrógeno).

Querría recapitular aquí, por un momento, lo que hemos dicho desde el principio en cuanto a la acción de las reacciones nucleares. Gracias a ellas obtenemos energía adicional que permite que la estrella "viva" durante un periodo mucho mas prolongado. Por otro lado, cambiamos su composición química, es decir a partir de la composición inicial de la estrella ( $^1\text{H}$ , principalmente) obtenemos una serie de elementos químicos mas pesados que son de importancia fundamental para que en el Universo existan planetas rocosos, con una gran variedad de materiales, y además que la vida sea posible en alguno de ellos.

Un momento, no vayamos tan rápido; hemos visto que las estrellas son una factoría que produce elementos pesados aunque, hasta ahora, sólo los hemos producido pero siguen en la fábrica, es decir en el interior de la estrella. Ahora las preguntas son: ¿Cómo salen de la misma?, ¿es posible que esto suceda?

Cuando la estrella, con una estructura como la anterior en forma de "cebolla", ha llegado a producir hierro ( $^{56}\text{Fe}$ ) en su interior, su centro está extremadamente caliente (alrededor de 1000 millones de grados); en estas circunstancias puede producirse la reacción de descomposición del  $^{56}\text{Fe}$ , que tiene la particularidad de ser endotérmica, es decir en vez de producir energía, la absorbe. Al absorber energía, tomándola de la energía térmica de la estrella, el centro de la estrella se enfriá con lo que disminuye la presión que sujetaba las capas exteriores hasta este momento. Como consecuencia, éstas colapsan cayendo hacia el núcleo prácticamente sin oposición, es decir en caída libre. Este colapso, ahora muy rápido porque la densidad es muy alta ( $\tau_{\text{din}} \ll 1$  segundo), inicia reacciones termonucleares extraordinariamente rápidas que producen una gran explosión, dando lugar al fenómeno de Supernova. Habitualmente, esta explosión es capaz de disgregar toda la estrella y devolver al medio interestelar todo el material que la había formado. Así, la estrella devolvería al medio interestelar, del cual tomó el material para formarse, idéntica cantidad aunque con la peculiaridad de que su composición

química es completamente diferente; ahora es mucho más rica en elementos pesados que antes ni siquiera existían. Con este material se podrán formar nuevas generaciones de estrellas y/o planetas aunque con una mayor presencia de elementos pesados. Nótese que esta abundancia de elementos pesados en las estrellas, es un indicativo de la generación a la cual pertenecen.

No todas las estrellas siguen con detalle esta evolución puesto que ya hemos visto que su ritmo de evolución depende fuertemente de su masa. Aquéllas cuya masa es muy grande, superior a  $\approx 3 M_{\odot}$ , evolucionarán rápidamente ( $\sim 10^8$  años) de la manera descrita. No obstante, las estrellas con una masa inferior a ésta, tendrán una evolución ligeramente diferente. En general, estas estrellas no serán capaces de quemar el  $^{12}\text{C}$  y  $^{16}\text{O}$  formados en la etapa de gigante roja, puesto que la temperatura en su centro nunca será lo suficientemente grande para ello. Como consecuencia, se generará un núcleo compacto en la gigante de  $^{12}\text{C}$  y  $^{16}\text{O}$  inerte que en el momento en que le falte presión, colapsará. Si las condiciones de presión y temperatura no son suficientes como para detener el colapso, llegará a tener un suceso de supernova parecido al explicado anteriormente. No obstante, este núcleo tendrá una densidad muy grande, como consecuencia de las compresiones anteriores, pudiendo obtenerse una estrella con una estructura en equilibrio otra vez, aunque con una estructura interna muy diferente.

En ella, la densidad del núcleo es grande, pero la temperatura no crece con lo que la presión tampoco lo hará y la estrella se volverá inestable, la gravedad hará que colapse sin remedio. Una posibilidad de que la presión aumente, es que el estado en el que se encuentra el material estelar no se asemeje con el de un gas ideal, sino más bien con el de un "superátomo", es decir la densidad es tan alta que la materia se encuentra comprimida como si fuera un inmenso átomo rodeado de múltiples electrones. En esta circunstancia, debemos usar la física cuántica para describir el estado de esta materia. Uno de los pilares básicos de la estructura atómica, es el llamado "Principio de Exclusión de Pauli", que asegura que en un átomo cualquiera no pueden existir dos electrones en el mismo estado cuántico (es decir, con la misma energía y el mismo 'spin'). Este principio obliga a que los electrones, en esta estrella, estén ocupando niveles energéticos cada vez más altos. Esta energía puede llegar a ser suficiente como para producir la presión requerida para detener el colapso estelar y llegar a un equilibrio estable. La materia en estas condiciones, se dice que está en un estado degenerado y las estrellas resultantes son las llamadas enanas blancas. Son estrellas con una masa como la del Sol y un radio como el de la Tierra; su densidad es pues de un millón de veces la del agua !!!.

La existencia de estas estrellas fue predicha por S. Chandrasekhar en 1930, quien calculó su estructura, predijo su existencia y, por ello recibió el premio Nobel de Física en 1983. Más tarde se descubrió que la estrella Sirius B, la compañera de la estrella más brillante del hemisferio Norte (Sirius A) era una estrella con las características de una enana blanca. Este tipo de estrellas serían también las estrellas centrales en la mayoría de las nebulosas planetarias en las que se convierten las gigantes rojas después de expulsar las capas exteriores debido a sucesivas explosiones no catastróficas. Puede demostrarse que sólo las estrellas que llegan a esta fase de su vida con una masa inferior a  $1.4 M_{\odot}$ , podrán detener el colapso y estabilizar la estrella. Esta masa límite recibe el nombre de Masa de Chandrasekhar. ¿Qué pasa con las estrellas que en este momento, tengan una masa superior a ésta? Estas estrellas son demasiado masivas para que los electrones degenerados puedan equilibrar la fuerza gravitatoria. El colapso gravitatorio continuará, la densidad en el centro aumentará brutalmente. Los electrones se unirán a los protones (presentes en los iones) para dar núcleos ricos en neutrones, al tiempo que con los protones darán lugar a neutrones libres, según la reacción:  $e^- + ^1\text{H} \rightarrow ^1\text{n} + v$ . Los neutrones  $^1\text{n}$ , partículas de masa como la del protón y sin carga eléctrica, se comportan igual que los electrones en Física Cuántica, puesto que también están sujetos al Principio de Exclusión antes mencionado. Así pues, estrellas con masas superiores a  $1.4 M_{\odot}$  e inferiores a  $\approx 2.5 M_{\odot}$ , desarrollarán un núcleo rico en neutrones que generará la presión suficiente para detener el colapso. Se formarán las estrellas de neutrones con una

densidad altísima ( $\approx 10^{15}$  g/cm<sup>3</sup>), predichas por Oppenheimer y Volkov y que posteriormente se encontraron en nuestra galaxia formando los objetos conocidos como "pulsars".

Finalmente, estrellas de masa aún superior nunca llegarán a detener el colapso y la fuerza gravitatoria logrará por fin su ansiada meta: llevar a todas las partículas hacia su centro. No obstante, la materia sometida a estas densidades supranucleares, es decir superiores a la del núcleo atómico, no sabemos como se comporta y, lo que es aún peor, no podemos observarlas directamente, puesto que la fuerza de la gravedad es tan grande que ni siquiera la luz puede salir de la estrella; son los llamados agujeros negros.

Hasta aquí la teoría, pero, ¿podemos observar alguna predicción de esta compleja teoría? No perdamos de vista que la estrella emite energía y por ello podemos observarla. La observación y medida del flujo de las emisiones electromagnéticas estelares es el objetivo de técnicas como la fotometría y la espectroscopia. Con ellas podemos medir la luminosidad (si conocemos su distancia), su temperatura y su espectro electromagnético e indirectamente otras magnitudes de interés como la composición química, presión electrónica, aceleración de la gravedad (que nos dará una estimación de su masa), etc.

La observación de estas características en estrellas aisladas, es decir que no forman parte de asociaciones estelares (binarias, sistemas múltiples, cúmulos, etc...) no proporciona toda la información que se podría extraer, puesto que no se conoce su distancia (a no ser que estén muy cerca, menos de 100 parsecs) ni su edad y las determinaciones de su masa y composición química tienen un error grande. El mejor modo de observar la evolución estelar es la observación de las estrellas pertenecientes a cúmulos estelares. Efectivamente, la evolución de una estrella dura tanto tiempo (desde 10 millones de años, para estrellas muy masivas, hasta varias decenas de miles de millones de años, para estrellas de masa inferior a la del Sol) que incluso el más longevo de los humanos no puede apreciar evolución alguna desde que nace hasta que muere; más aún, ni siquiera desde que el hombre empezó a estudiar la evolución de las estrellas, a finales del siglo pasado. De hecho, deberán pasar centenares de miles de generaciones para que esto sea posible. No obstante, tenemos los cúmulos estelares para facilitarnos el estudio. Un cúmulo globular es una asociación de aproximadamente unas 20000 estrellas, que se formaron a la vez de la misma nube de gas interestelar; es decir, están prácticamente a la misma distancia, tienen la misma edad y la misma composición química inicial. Su apariencia en un momento dado, por ejemplo ahora mismo, depende solamente del ritmo al cual ha evolucionado cada una de las estrellas que depende a su vez, como hemos visto, solamente de su masa. De manera que estudiando las estrellas de un cúmulo, como tienen diferentes masas, podemos observar diferentes estados evolutivos y así comprobar si la teoría de la evolución estelar es correcta o no. Es algo parecido al hecho de hacer una fotografía instantánea de un grupo de personas en una ciudad; hay de todo, desde bebés hasta ancianos, pudiendo establecer una conexión temporal entre ellas !!!.

Tomemos la medida del flujo energético estelar en dos longitudes de onda diferentes. En Astrofísica existe un sistema fotométrico estándar, conocido por UVB o de Johnson. Este sistema consiste en medir el flujo estelar en tres longitudes de onda diferentes: la correspondiente al filtro U a 0.3 micras, al filtro B a 0.5 micras y al filtro V a 0.69 micras. Pues bien, la diferencia de energía recogida de la estrella en dos de estos filtros (por ejemplo U-B, B-V, U-V) es una cantidad directamente relacionada con la temperatura superficial de la misma (si suponemos que la estrella está en equilibrio térmico y emite radiación como un cuerpo negro). Ahora, si dibujamos en una gráfica la magnitud observada (proporcional a la luminosidad de la estrella) en V por ejemplo, y en el eje de abcisas la cantidad B-V (proporcional a su temperatura), obtendremos un dibujo, más conocido por diagrama de Hertzsprung-Russell, que denota una distribución no aleatoria de puntos, cada uno de los cuales corresponde a una estrella del cúmulo que

estábamos observando. La mayoría de puntos se agrupan en una banda estrecha e inclinada, llamada Secuencia Principal (SP), lo cual nos dice que en un cúmulo se forman muchas estrellas de masa pequeña. En esta distribución de puntos, al igual que decíamos en el párrafo anterior, puede apreciarse una conexión temporal entre ellos; esta conexión es mas clara si nos ayudamos de las predicciones de la teoría de estructura y evolución de las estrellas. Estrellas mas frías y luminosas corresponden a gigantes rojas, que serían estrellas con masa mayor que las que están en la SP y que por tanto han ido mas rápidas en su evolución. Mas rápidas aún han ido las enanas blancas, muy calientes pero muy débiles. Otras han evolucionado de forma mucho mas lenta, por ser menos masivas, son frías y débiles y se les denomina enanas rojas, etc.

Las observaciones que se realizan de las estrellas, y también del Sol, dan información de las capas mas externas, lo que no permite una comparación con las predicciones de la teoría mas que en un sólo punto, la superficie estelar. Esta situación permite que, aún ajustando los valores observados en ella, el interior no esté ajustado a la realidad, puesto que diferentes soluciones para su estructura interna pueden reproducir los mismos valores en la superficie. Esta penuria de observaciones duró hasta que, en la década de los 70, la situación cambió drásticamente al aparecer dos técnicas de observación nuevas que permitían la observación del interior del Sol y no solamente de su superficie: el flujo de neutrinos y la heliosismología. Los neutrinos son partículas que se producen en gran número en las reacciones termonucleares que tienen lugar en el núcleo solar; además, interactúan poco con la materia escapando con facilidad del Sol y su flujo es críticamente dependiente de la temperatura del núcleo, en donde se producen. La Heliosismología, consiste en el sondeo sísmico de la estructura del Sol, por medio del estudio del amplio abanico de frecuencias de las ondas acústicas y gravitatorias, producidas en su interior y atrapadas entre diferentes capas y la superficie, proporcionan información directa de la estructura y dinámica de aquellas capas que atraviesan.

Para el caso de las estrellas aún no se han conseguido resultados tan importantes como en el Sol para el que se han obtenido perfiles radiales de la densidad, velocidad del sonido, rotación, etc. Las técnicas de la Astroismología están aún en sus comienzos y la extrapolación de las utilizadas con éxito en el Sol no es precisamente sencilla. A pesar de ello se están obteniendo resultados esperanzadores que aunque pueden ser importantes para algún tipo de estrellas en particular (como las del tipo roAp, δScu, enanas blancas, etc..), no es posible obtenerlos en estrellas de tipos espectrales cercanos al del Sol (la gran mayoría de las estrellas). Se han propuesto, y están en marcha, diversos proyectos de cooperación internacional para su observación, tanto desde el espacio como desde observatorios terrestres como las redes de observación, etc.; además se están ensayando nuevos métodos de observación. Pero...., este es el objeto de otra conferencia de este mismo ciclo: la música de las estrellas.

---

## ECUACIONES ESTRUCTURA ESTELAR

a) Equilibrio hidrostático: 
$$\frac{dP_r}{dr} = -\rho G \frac{M_r}{r^2}$$

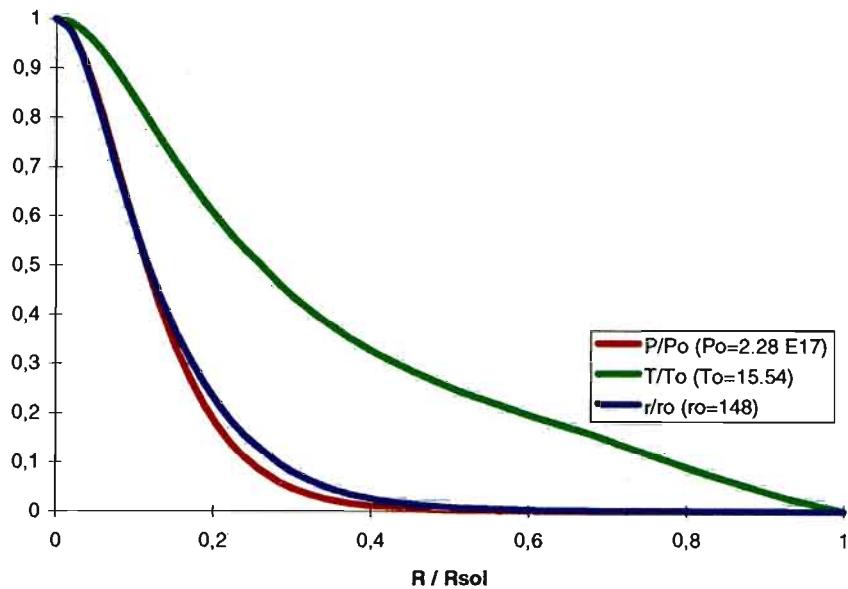
b) Continuidad: 
$$\frac{dM_r}{dr} = 4 \pi \rho r^2$$

c) Equilibrio energético: 
$$\frac{dL_r}{dr} = 4 \pi \rho r^2 \epsilon$$

d) Transporte radiativo: 
$$\frac{dT_r}{dr} = -\frac{3}{4ac} \frac{\kappa \rho}{T_r^3} \frac{L_r}{4\pi r^2}$$

Transporte convectivo: 
$$L_r = 2\pi r^2 C_p \rho \left( G \frac{M_r}{r^2 T_r} \right)^{1/2} \left( \frac{dT_r}{dr} - \frac{\gamma-1}{\gamma} \frac{T_r}{P_r} \frac{dP_r}{dr} \right)^{3/2} (\alpha R_\odot)^2$$

El conocimiento de la estructura y la evolución de las estrellas descansa sobre la teoría física desarrollada para la descripción del comportamiento de la materia en la naturaleza. En el caso de las estrellas, esta descripción presupone que son ciertas las hipótesis de simetría esférica y equilibrio hidrostático y energético a lo largo de su vida, o al menos en su mayor parte. Este modelo debe permitir el cálculo de su estructura, es decir: presión, densidad, temperatura y composición química en función del radio, desde su centro hasta su superficie. El modelo numérico que se construye se fundamenta en las ecuaciones que describen la conservación de la masa y el momento lineal, la producción de energía en el núcleo y su transporte hacia la superficie. Estas cuatro ecuaciones forman un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales de primer orden que, junto con las condiciones de contorno adecuadas (en el centro y en la superficie de la estrella), debemos resolver. Además, en ellas hay tres parámetros o funciones principales que debemos conocer puesto que contienen la física involucrada en el problema, y que determinarán finalmente la validez y precisión con la que construiremos nuestro modelo de estrella. Estas funciones son: el ritmo al cual se produce energía en el núcleo,  $\epsilon$ , la opacidad del plasma solar a los fotones producidos,  $\kappa$ , y la ecuación de estado del plasma que forma la estrella,  $P$ . Todas ellas dependen de las condiciones reinantes de densidad, temperatura y composición química. Una vez calculado un modelo de la estrella debemos hacerlo evolucionar en el tiempo, dejando que las reacciones nucleares cambien la composición química de la misma y aporten diferente cantidad de energía dependiendo de las reacciones que se produzcan en cada momento; la estructura de la estrella irá cambiando a lo largo del tiempo, siendo diferente para las distintas fases de su vida, descritas en el texto.

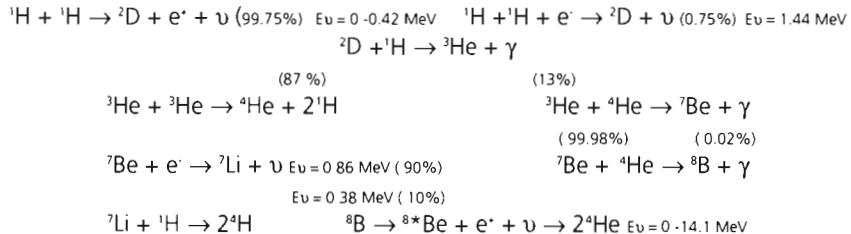


La estructura y la evolución de las estrellas descansan sobre el conocimiento de la estructura del Sol. En efecto, las predicciones de las ecuaciones que definen la estructura del Sol, y también de las estrellas, pueden comprobarse observacionalmente con mejor exactitud en el caso particular del Sol, ya que se conocen con gran precisión su radio, su masa, su luminosidad y su edad actual, además de su espectro electromagnético. Este modelo dibujado aquí, calculado por Bahcall y Ulrich en 1990 a partir de las ecuaciones mencionadas en otro apartado de este mismo artículo, es de los más precisos que se pueden calcular hoy en día; nos da los perfiles de presión, densidad y temperatura, cuyos símbolos ya están definidos en el texto, salvo  $r$  que aquí denota la densidad; los valores en el centro del Sol: presión  $P_0$ , viene en  $\text{dinas/cm}^2$ , temperatura  $T_0$  en grados Kelvin y  $r_0$  en  $\text{g/cm}^3$ . En  $R/R_{\text{Sol}}=1$ , es decir en su superficie, empieza la atmósfera de la estrella (en este caso del Sol), una capa muy compleja cuya estructura debe ser explicada incluyendo efectos de rotación y campos magnéticos. Comprende la llamada fotosfera, que es la capa solar que emite la mayor parte de la radiación electromagnética que llega a la Tierra y es la región mejor estudiada desde observatorios terrestres, sobresaliendo las estructuras oscuras (manchas solares) sobre un entramado granular que es la manifestación de la zona de convección que empieza en  $R/R_{\text{Sol}} \approx 0.72$ . Por encima de ella, la temperatura llega a un mínimo ( $4200\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) para después subir lentamente a través de la llamada cromosfera y más rápidamente en la región de transición hacia la corona. En la corona, la parte más exterior de la atmósfera solar, la temperatura alcanza valores muy altos ( $\sim 10^6\text{ }^{\circ}\text{K}$ ) mientras que la densidad es pequeñísima ( $< 10^8\text{ part/m}^3$ ). Todas estas capas son extremadamente dinámicas y estructuralmente complejas debido a la presencia de campos magnéticos en el plasma, que en forma de tubos de flujo pueden formar estructuras muy complejas (plumas, filigranas, chorros, etc.). Además, no pueden observarse desde observatorios terrestres, principalmente por dos razones: a) son tan tenues, respecto de la fotosfera, que su emisión en luz blanca no puede observarse normalmente, aunque sí durante los eclipses y usando cronógrafos y, b) que las rayas de emisión que se producen son muy energéticas y tienen lugar en el UV y rayos X, región del espectro a la que nuestra atmósfera es opaca pudiéndose, por lo tanto, observar solamente desde el espacio.

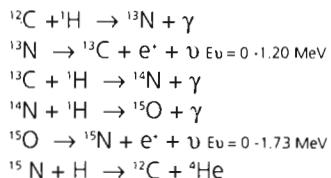
---

## REACCIONES NUCLEARES EN EL INTERIOR SOLAR

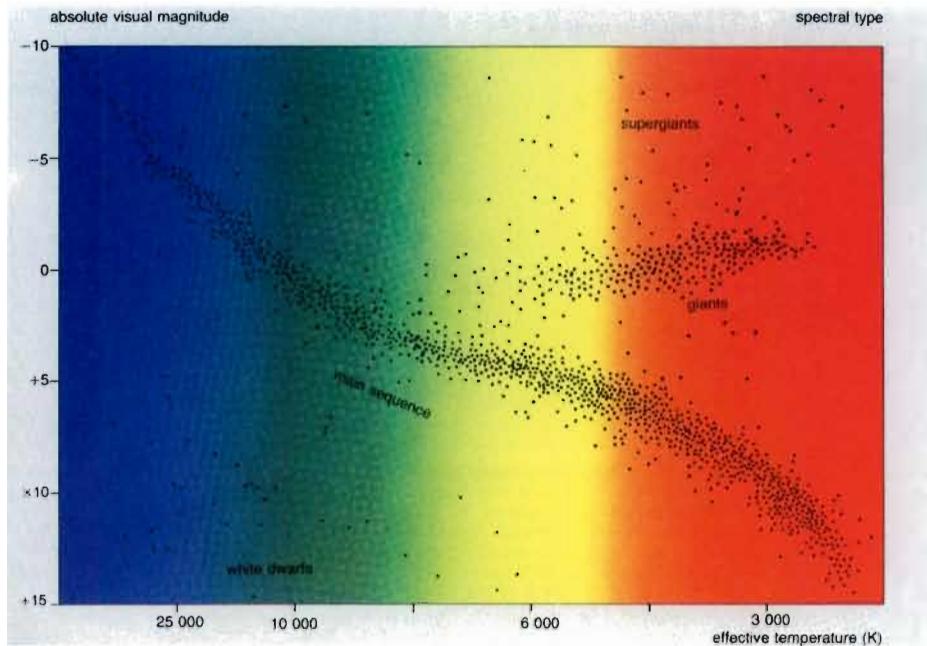
### La cadena PP



### La cadena CNO



El núcleo del Sol es una central nuclear de fusión capaz de proporcionar  $3.9 \cdot 10^{20}$  Mw durante varios miles de millones de años. Utiliza como combustible el hidrógeno  ${}^1\text{H}$ , y lo transforma en helio  ${}^4\text{He}$ . En las altas condiciones de presión y temperatura que reinan en el interior solar, el plasma se encuentra totalmente ionizado ya que los núcleos atómicos están desprovistos de electrones, y de esta manera 4 núcleos de H (protones) se fusionan para producir uno de  ${}^4\text{He}$ , proporcionando en esta reacción una energía de unos 26 MeV. Esta energía se produce en un 98% en forma de radiación electromagnética altamente energética (rayos  $\gamma$ ) y, en el 2% restante, en forma de neutrinos electrónicos. A diferencia de los fotones, los neutrinos atraviesan el Sol en un par de segundos y llegan a la Tierra (en unos 8 minutos), donde el flujo total recibido es de alrededor de  $6.5 \cdot 10^{10}$  por  $\text{cm}^2$  cada segundo. La energía que se produce en forma de fotones, se absorbe y reemite en el plasma circundante (transporte por radiación), de manera que el fotón producido va perdiendo energía a medida que avanza ciasinamente hacia la superficie (tarda varios millones de años en llegar allí), es lo que se conoce como opacidad estelar. Llega un momento que la opacidad es tan grande, que la energía debe transportarse por medio del movimiento macroscópico del gas originándose entonces corrientes de convección. Esto sucede en las capas externas del Sol (alrededor de un 30% del radio solar de espesor).



En la primera década del siglo XX, los astrónomos E. Hertzsprung y H. Russell de manera independiente se dieron cuenta que al dibujar en un diagrama la magnitud aparente de un grupo de estrellas (de distancia conocida) frente a su color, los puntos no se distribuían aleatoriamente, es decir existía una relación entre estas dos magnitudes. La localización de las estrellas en este diagrama dependía de su edad, es decir de su evolución; por esta razón, el llamado diagrama HR, es una herramienta básica para el estudio de la evolución de las estrellas y de la historia de nuestra propia galaxia. El color de las estrellas se puede medir de diversas formas, como se explica en el texto, midiendo B-V por ejemplo, o también midiendo el espectro electromagnético de la luz recibida de las mismas; ambas maneras definen la temperatura de su superficie. Este último puede analizarse cualitativamente, como lo hizo por vez primera A. Secchi en 1863, que más tarde A. Maury y A. Cannon clasificaron en grupos O, B, A, F, G, K, M que hoy se conoce como la clasificación de Harvard (el Sol es una estrella del tipo G); o cuantitativamente, cuyo análisis finaliza con la determinación de la composición química, presión, temperatura, rotación, gravedad, etc. que fue posible en 1920 cuando M. Saha descubrió las leyes de ionización de los átomos. El 80% de los puntos en este diagrama se sitúan en una banda estrecha e inclinada, llamada Secuencia Principal (SP), lo cual nos dice que en un cúmulo se forman mayoritariamente estrellas de masa pequeña. Estrellas más frías y luminosas corresponden a gigantes rojas, que serían estrellas con radio y masa mayores que las que están en la SP y que por tanto han ido más rápidas en su evolución. Más rápidas aún han ido las enanas blancas, muy calientes pero muy débiles. Otras mucho más lentas, por ser menos masivas, son frías y débiles, constituyen las enanas rojas (o las enanas marrones, casi planetas gigantes), etc. Obsérvese que hemos hablado de gigantes y enanas, adjetivos que dan idea del tamaño de una estrella; esto es sólo posible para estrellas del mismo tipo espectral o, lo que es lo mismo, de la misma temperatura superficial ya que la luminosidad de una estrella es proporcional a su superficie ( $4\pi R^2$ ) y a  $T^4$ . Por ello en el diagrama HR se distinguen 5 clases de luminosidad que van desde I (supergigantes) hasta V (enanas); nuestro Sol es una estrella enana V, como casi todas las de la SP.





# A S T R O F O T O G R A F Í A   P A R A T O D O S

Federico Fernández Porredón

Profesor de Astronomía del I.N.B. San Hermenegildo

## RESUMEN

Este ensayo resume los mas de cinco años que llevo observando y realizando registros fotográficos del cielo desde las cumbres de Canarias. Muchas veces en compañía de otros miembros de la Agrupación Astronómica de Tenerife, otras en compañía de mis alumnos de Astronomía del I.B. San Hermenegildo, a veces con mis hijos, otras con mis compañeros del Grupo Estable.....

La enseñanza de la Astronomía admite múltiples enfoques; en el caso de la E.A.T.P. (asignatura optativa de 2º y 3º de BUP ), que imparto se hace especial énfasis en el conocimiento de la bóveda celeste, siendo la astrofotografía un complemento muy útil de las salidas observacionales. En este trabajo trato de describir el porqué y el para qué del uso de diapositivas del Cosmos, obtenidas por medios propios, en la enseñanza-aprendizaje y divulgación de la Astronomía.

## INTRODUCCIÓN

Como decía en el resumen, este trabajo está basado en la experiencia acumulada durante los años que llevo impartiendo la E.A.T.P. de Astronomía en el I.B. San Hermenegildo de La Laguna. De entre todos los recursos didácticos de que he dispuesto, es la fotografía astronómica el que más satisfacción y utilidad nos ha proporcionado. Satisfacción porque al gozo de una noche de observación se puede añadir la obtención de algunos buenos ejemplares fotográficos. Utilidad porque es una forma de familiarizarse con el cielo sin moverse del aula contrastando el contenido de las diapositivas con la información de un planisferio o carta celeste.

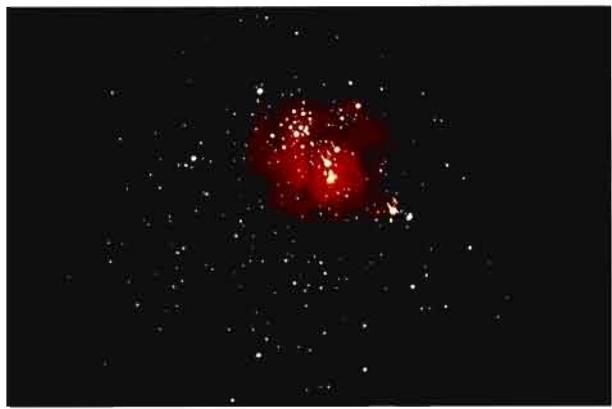
La diapositiva, además de la ventaja obvia de poder ser observada simultáneamente por numeroso público, permite la reproducción más precisa del cielo que se puede proporcionar, superando a veces a la propia realidad. Me explico, si queremos reproducir una zona del cielo tal y como la veríamos desde un lugar con buenas condiciones de observación nos vamos allí (en Canarias en ese sentido somos privilegiados) con nuestra cámara y damos un determinado tiempo de exposición a la foto. Si queremos ver esa zona del cielo pero destacando los colores "reales" que tienen las estrellas y otros objetos, acoplamos un mecanismo de seguimiento que compense el movimiento aparente de la bóveda celeste, debido a la rotación de la Tierra, tendremos así una foto de larga exposición en la que se verá, por ejemplo, el color rojo anaranjado de las nebulosas de emisión (color real, debido al hidrógeno ionizado que constituye la nebulosa) y que nuestro ojo no puede apreciar ni con la ayuda de instrumentos ópticos por limitaciones puramente fisiológicas, pues nuestros conos, (fotorreceptores situados en la retina) que están especializados en la visión del color, son un poco "vagos" y necesitan un umbral de luz para comenzar a trabajar: "por la noche todos los gatos son pardos". Así, solo veremos el resplandor de la nebulosa y no su color. Sin embargo, la cámara fotográfica con el objetivo abierto durante un tiempo, es capaz de acumular suficiente información, del débil foco de luz que le llega, como para reproducir fielmente su color.(FOTO 1).

Ambos tipos de fotografías, sin seguimiento y con seguimiento, se incluyen en este ensayo.

Una vez expuestas algunas de las ventajas de la diapositiva para la reproducción de zonas del cielo, paso a enumerar las cualidades de los lugares desde los que estas diapositivas fueron tomadas: Las cumbres de Canarias.

Las cumbres de Canarias son idóneas para la observación y para la fotografía astronómica, por su baja contaminación lumínica, su aire seco y sin turbulencias, su latitud geográfica, que hace que se pueda observar todo el hemisferio norte celeste y gran parte del hemisferio sur y su gran altura, por encima de los 2.000 metros, hacen que estos lugares superen el denominado "mar de nubes".

Concretamente, las cumbres de la isla de La Palma son, en reñida competencia con las de Hawaii, el lugar que ofrece las mejores condiciones naturales de todo el hemisferio norte para la observación. Así se ha reconocido, tras exhaustivos estudios y análisis comparativos, por parte de la comunidad astrofísica internacional. No en vano se



(Foto 1). Nebulosa de "La Laguna" (M8). Obtenida a través de telescopio reflector de 20 cm de diámetro y 43 minutos de exposición, desde las proximidades de Izaña



(Foto 2). Montaje para realizar astrofotografía sin seguimiento

tendremos que esperar un montón de lustros para que la situación se reproduzca. O captamos a Saturno en Capricornio en 1992 o esperaremos a dentro de treinta años. Y no digamos de Urano que no volverá a encontrarse en Sagitario hasta dentro de 84 años...y es que esto de la astronomía es una formidable excusa para seguir viviendo. No tengo intención de morirme antes de la próxima y previsiblemente espectacular visita que nos hará el Halley...

Casi siempre que pensamos en la observación astronómica la asociamos con mirar a través de un telescopio, y es cierto que nos produce sensaciones inolvidables la primera vez que observamos la superficie de la Luna o los anillos de Saturno. Sin descartar esta práctica, pienso que la manera de empezar a conocer el Cosmos es familiarizarnos con lo que podemos observar a simple vista comenzando por las *constelaciones*, grupos de estrellas que vistas desde la Tierra presentan formas determinadas. Hay que tener en cuenta que su existencia es relativa, pudiendo estar dos estrellas "próximas" de una constelación mas separadas entre sí que una de ellas y la propia Tierra. Aun así es prioritario el conocimiento de las constelaciones, sobre todo por la referencia de situación que tendremos dentro de la bóveda celeste. Conforme nos vayamos introduciendo será familiar usar frases como estas: "El cometa X está en la constelación de *Hércules*", "Las *Perseidas* de este año fueron un desastre", "La galaxia de *Andrómeda* es el objeto mas lejano que se puede apreciar a simple vista", "Júpiter está en *Escorpión*, y Urano en *Sagitario*". En todas ellas se emplea una constelación como referencia a la zona del cielo donde se localiza algún objeto o acontecimiento celeste, sabiendo así hacia donde mirar para encontrarlo. En cuanto localicemos unas cuantas las demás irán encajando como piezas de un gigantesco puzzle, a ello ayudará el conocimiento de las maravillosas

han instalado en La Palma y Tenerife dos grandes observatorios internacionales: El del *Roque de los Muchachos* y el del *Teide* que junto con el Instituto de Astrofísica, en La Laguna, constituyen el *Instituto de Astrofísica de Canarias (I.A.C.)*, Centro de investigación del que todos debemos sentirnos orgullosos y que han hecho de Canarias el *Observatorio Norte Europeo*.

El presente ensayo, incompleto por naturaleza, (pobre de mi si se me ocurriera intentar describir el Universo), trata de familiarizarle con la parte del cosmos que se puede apreciar desde la Tierra a simple vista y con prismáticos, aunque también se incluyen algunas imágenes de cielo profundo obtenidas con un telescopio de 20 cm de diámetro. Mucho respeto me producen las tomas fotográficas de objetos de cielo profundo a través de telescopio, el proceso requiere además de instrumentos de precisión, caros para una economía media, una gran capacidad de sacrificio, pues para capturar una galaxia, cúmulo o nebulosa con todo su color es necesario realizar exposiciones próximas a una hora o mas, a veces a temperaturas bajo cero y en posición corporal bastante forzada, con el ojo pegado al ocular para corregir posibles defectos en el guiado. El resultado es muy vistoso si todo sale bien y ningún colega te patea el trípode en la oscuridad de la noche, pero la nebulosa de La Laguna o la galaxia de Andrómeda van a verse siempre igual (salvo extrañísima excepción). Me complacen más, por su carácter didáctico, otras fotos de campo mas amplio en las que se pueden captar imágenes inéditas, por ejemplo, no se puede improvisar un retroceso de Marte sobre Tauro. No podemos ordenar a Júpiter, Venus y Marte que estén "juntos", danzando sobre el precioso cúmulo del Pesebre (M 44) de la constelación de Cáncer, o hicimos esa foto en junio del 91 o

historias mitológicas, que además de contagiarnos todo el romanticismo de sus protagonistas con narraciones de celos, guerras y pasiones, nos permitirá relacionar las constelaciones próximas entre sí. (Ej: *Cepheus, Cassiopeia, Perseus, Andrómeda, Pegasus*). Sin duda nuestro descubrimiento no se ha terminado ahí, al contrario, ésto no ha hecho mas que empezar, iremos apreciando como hay "estrellas" que cambian de posición respecto a las constelaciones al ser observadas en días diferentes (son los planetas), como el cielo se rompe de pronto por la aparición de un bólido, como hay objetos difusos que nos harán recurrir a prismáticos con los que apreciaremos sus estructuras, reconoceremos las galaxias y pensaremos como con seguridad existen otros corazones palpitando en su interior que se realizan preguntas semejantes a las nuestras y aprenderemos a valorar el lugar excepcional que la Tierra ocupa en el contexto del Cosmos y que le permite albergar vida, ello va a contribuir a que nos mentalicemos a cuidar el delicado equilibrio que la mantiene.

Trato por tanto en este ensayo de contribuir a potenciar el entusiasmo por la observación, sobre todo en la juventud, que espera de nosotros (casi siempre con fundado escepticismo) estímulos positivos. Colaborar en que cada vez sean mas los que descubran diversiones alternativas como el gozo de una acampada bajo la única luz de los cuerpos celestes que, previamente orientados, les conducirá sin duda a cuestiones tan apasionantes como obligatorias para el ser humano como son ser testigos y conocedores de las principales estructuras del Universo del que procedemos y del que formamos parte y proteger las condiciones de habitabilidad del *Planeta Tierra*.

Las fotografías astronómicas que he tomado durante estos años se pueden dividir, como ya se ha indicado, en dos grandes grupos:

- 1º Con la cámara estática (sin seguimiento).
- 2º Usando mecanismos de seguimiento.

#### ASTROFOTOGRAFÍA SIN SEGUIMIENTO:

Este tipo de fotografías están al alcance de todos, ya que el material básico es: Una cámara réflex que trabaje en posición manual y en la que instalaremos una película (de diapositivas preferentemente) de 100 a 400 ASA. Cuanto mayor sea la sensibilidad captará mas astros, pero disminuirá la calidad del color. La cámara irá fijada a un trípode robusto y se dispara con un cable de retención. (Foto 2).

El enfoque se sitúa en el infinito y el anillo de velocidades estará fijado en la posición "B" que hace que el obturador esté abierto mientras el disparador esté presionado. El objetivo ideal es el de 50 milímetros de focal ( $F=50$ ) y debe ser lo mas luminoso posible, es decir que capte la mayor cantidad de luz en el menor tiempo posible. Nosotros empleamos dos cámaras a  $f/1.4$  y  $f/1.8$  ( $f=F/\text{diámetro del objetivo}$ ). Se procurará hacer las fotos preferentemente en zonas alejadas de polución luminosa y a ser posible sin Luna. Es conveniente usar un cuaderno de campo donde anotar las características de las fotos tomadas, como mínimo: Fecha, hora (T.U.), lugar, objeto fotografiado, objetivo y película usados y tiempo de exposición.

Los tiempos de exposición merecen un comentario. El obturador debe estar abierto el mayor tiempo posible, pero éste debe ser tal que el movimiento aparente de la bóveda celeste no quede reflejado en la foto; los astros deben salir puntuales. Como la longitud del trazo del astro va a depender de su declinación, ésta va a influir en el tiempo máximo de exposición. También influirá la distancia focal del objetivo, a mayor focal mas aumento y por tanto deberemos mantener abierto menos tiempo el obturador. Los tiempos máximos aproximados en función de la declinación para diferentes distancias focales son los siguientes:

El objetivo de 200 mm, queda por tanto descartado para este tipo de fotos, salvo las de la Luna.



(Foto 3). Jupiter en Escorpio. F=50mm; f/1.4; 400ASA. Desde el centro de La Laguna. 20/6/95



(Foto 4). Jupiter en Escorpio. F=50mm; f/1.4; 400 ASA; Desde la zona de Izaña. 21/6/95



(Foto 5). Orion y Sirio. F=50mm, f/1.4; 400ASA; 15 seg 11/1/91.



(Foto 6). Osa Mayor y Osa Menor. F=28mm; f/2.8; 400 ASA. 40seg. 28/6/95

OBJETIVO	0° ECUADOR	30°	45°	60°
F=28 mm	35 seg	40 seg	50 seg	75 seg
F=50 mm	20 seg	23 seg	28 seg	40 seg
F=200 mm	5 seg	5,5 seg	7 seg	10 seg



(Foto 7). Rastros estelares. F=28mm; f/2.8; 1 hora y 19 minutos de exposición. 30/7/92 desde las cumbres de Arico.

El objetivo ideal es el de 50 mm, pues aunque admite menos tiempo de exposición que el de 28 mm, su f/50 es más favorable lo hace más luminoso.

Por último ha de tenerse muy en cuenta que es muy conveniente realizar las fotografías en zonas altas, por encima del denominado mar de nubes y distantes de zonas con contaminación lumínosa. En este sentido cabe destacar que el Parlamento Canario aprobó la denominada "Ley de Protección del Cielo de Canarias". Las fotos 3 y 4 están tomadas en idénticas condiciones, excepto que una está hecha en La Laguna y la otra en la cumbre, a 2.300 metros de altura y lejos de zonas de contaminación lumínica.

#### Tipos de objetos fotografiados sin seguimiento:

A) CONSTELACIONES: El objetivo de 50mm abarca  $40^\circ \times 27^\circ$  pudiendo captar casi todas las constelaciones. Su utilidad es contrastar la información de cartas celestes con las fotografías, aportando colores y objetos de cielo profundo. (Foto 5). Además de la referencia topográfica que suponen las constelaciones en el firmamento.

El objetivo de 28 mm capta un campo de  $65^\circ \times 46^\circ$ , pero su menor luminosidad, solo nos permite realizar este tipo de fotografías sin seguimiento en zonas del cielo próximas al polo que permiten, al barrer un arco menor, mas tiempo de exposición. (Foto 6). Esta foto de indudable valor didáctico nos muestra una fácil manera de orientarnos al norte, siguiendo en línea recta unas 5 veces la distancia entre las dos ruedas traseras del "gran carro".

B) MOVIMIENTO APARENTE DE LA BÓVEDA CELESTE: Para captarlo basta dejar abierta la cámara varias horas, debido al movimiento de rotación de la Tierra obtendremos los trazos de los astros, a razón de 15 grados por hora, ya que en 24 horas la Tierra describe una rotación completa, tendremos un curioso ejemplo de la relatividad del movimiento y a la vez una práctica de movimiento angular.

Si dirigimos nuestra cámara hacia la Polar vemos como todas las estrellas se mueven salvo la polar en la que el movimiento apenas se aprecia por estar muy próxima a la prolongación del eje de la Tierra. Si dirigimos nuestra cámara hacia la zona del ecuador celeste apreciamos como hay una inversión en la curvatura entre las estrellas del hemisferio norte y las del sur, correspondiendo las que presentan trazos rectos a astros situados sobre el ecuador celeste. Objetivo recomendado 28mm. (Foto 7).



(Foto 10). Virgo, Júpiter y meteoro. F=50mm. f/1.4; 400ASA; 22seg. Cumbres de Tenerife. 14/6/93

C) SEGUIMIENTO DEL MOVIMIENTO DE LOS PLANETAS RESPECTO A LAS CONSTELACIONES: Es la forma más espectacular y real de estudiar el movimiento retrógrado de los planetas, sobre todo de Marte y Júpiter. Este movimiento ocurre cuando la Tierra adelanta a los planetas exteriores, produciéndose el retroceso, fenómeno debido al paralaje exagerado que produce la posición de máxima proximidad. En el caso de Marte se puede comprobar que comienza el movimiento retrógrado 37 días antes de la oposición y termina 37 días después. En Júpiter es menos



(Foto 8). Marte en Tauro. F=50mm; f/1.4; 100 ASA; 17seg. Desde La Laguna. 16/10/90



(Foto9): Marte en Tauro. F=50mm; f/1.4; 400ASA; 15seg 1800 metros da altura. 11/11/91



(Foto 11). Luna y Venus. F=210mm; 8seg; 100 ASA. La Laguna. 18/3/91



(Foto12) Cráter de Copérnico. F=2.000mm; f/6.3; 100ASA; 1/30s Los Sauces La Palma. 22/8/92.



(Foto 17).Nebulosas M20 y M8 y cúmulos de estrellas recién nacidas asciados a ellas. F=210mm;400ASA;20 minutos.

vistoso al haber menos paralaje, comienza 60 días antes y termina 60 días después de la oposición. Las fotografías fueron tomadas a intervalos de varios días y son relativas a las oposiciones de Marte de noviembre de 1990 y enero de 1993. (Fotos 8 y 9).

D) CONJUNCIÓNES PLANETARIAS: La utilidad didáctica es constatar las diferentes velocidades entre los planetas, así como comprobar la posición de la eclíptica en la bóveda celeste.

E) FOTOGRAFÍAS DE METEOROS: En alguna que otra extraña ocasión, al revelar una foto nos vemos sorprendidos por la presencia de un meteoro. Suele tratarse de una partícula de menor tamaño que la cabeza de un alfiler que fue emitida por un cometa y quedó perdida en el espacio. (Foto 10). Cuando la Tierra, en su movimiento de traslación, pasa por su proximidad la atrae llegando a la atmósfera terrestre con tal velocidad que al ser frenada por ésta se quema ionizando al aire, este efecto es el que realmente apreciamos. Si la Tierra atraviesa un enjambre de estas partículas se produce lo que se denomina una lluvia de meteoros. La más conocida "Las Perséidas" corresponde al 12 de agosto .

F) FOTOGRAFÍA LUNAR A TRAVÉS DE TELEOBJETIVO Y TELESCOPIO: Con teleobjetivo o telescopio y sin seguimiento solo se pueden fotografiar el Sol, la Luna y algún planeta. El interés didáctico es múltiple; en la "luna cenicienta" se constata que la luminosidad de la Tierra (casi llena vista desde la Luna) hace iluminar a la zona oscura de nuestro satélite. También son de utilidad para el estudio de la secuencia de un eclipse y el conocimiento de la geografía lunar.(Fotos 11 y 12).

G) FOTOGRAFÍA DE ESPECTROS: Útiles para la iniciación en la Astrofísica. Las fotos se realizan en el Laboratorio de Físicas del Instituto, con una red de difracción de alta resolución, de 600 líneas por milímetro, cedida gentilmente por la Agrupación Astronómica de Tenerife (A.A.T.).

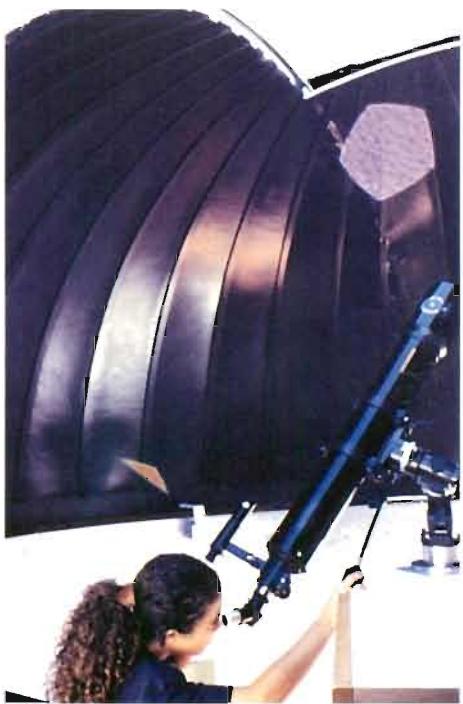
H) FOTOGRAFÍA SOLAR: Se ha de tener gran precaución para realizar observación solar y fotografía solar. En el I.B. San Hermenegildo usamos un filtro solar Mylar que se coloca en el objetivo del telescopio, un refractor de 10cm de diámetro y 1.000mm de focal. (Foto 13). Las fotos nos sirven para seguir el estado y la evolución de las manchas solares. Así como para estudiar los eclipses. (Foto 14).



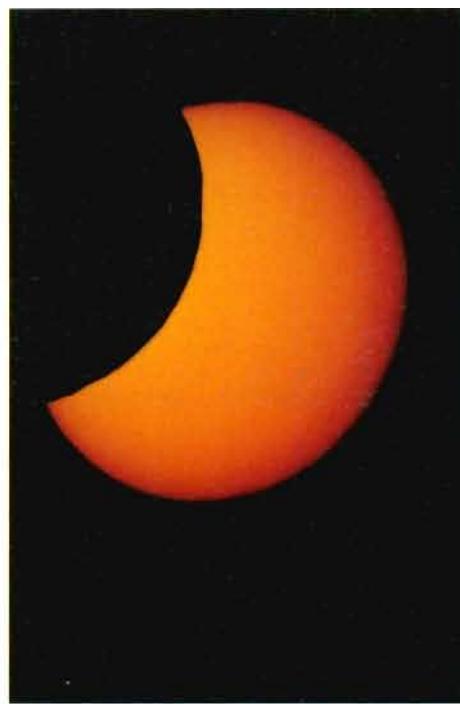
(Foto 18).Montaje para fotografía con seguimiento a través de telescopio.

## ASTROFOTOGRAFÍA CON SEGUIMIENTO

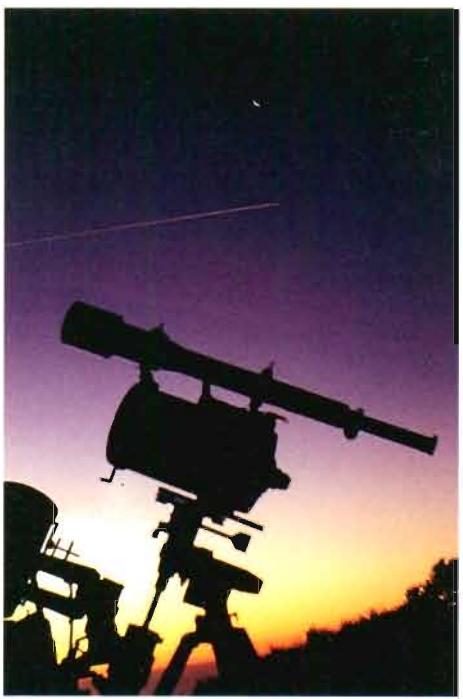
Hasta ahora hemos estado limitados por el corto tiempo de exposición de la fotografía sin seguimiento. Los mecanismos de seguimiento permiten tener el obturador de la cámara abierto por un largo período de tiempo, pudiendo sacar más detalles, sobre todo de cielo profundo, apareciendo objetos que en el caso anterior nos estaban vedados. Para este tipo de fotografías se precisa mayor cualificación material y técnica. Para estas fotografías he utilizado un telescopio, con montura ecuatorial motorizada. Inicialmente obtuve fotos con la cámara en paralelo al telescopio (sobre él) utilizando éste sólo para observar posibles desviaciones en el seguimiento, y así poder corregirlas. Al poder exponer durante mucho



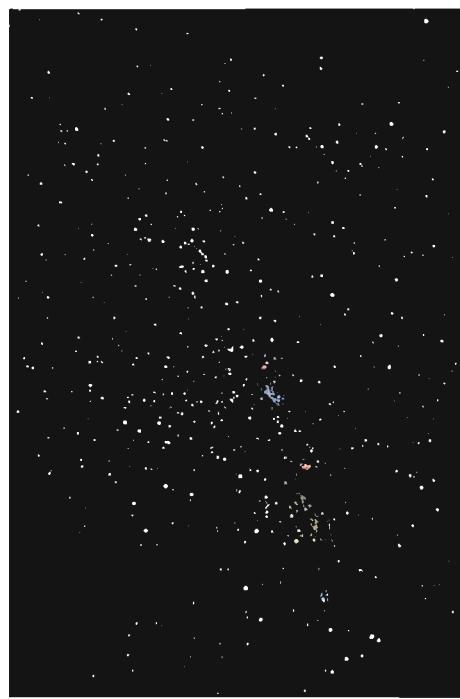
(Foto 13). Alumna de 3º de BUP observando el Sol desde la cúpula del San Hermenegildo.



(Foto 14). Eclipse parcial de Sol a través de telescopio. F=2.000mm, 1seg. 10/5/94.



(Foto 15). Telescopio Schmidt-Cassegrain, con telescopio guía sobre él tras una larga jornada observacional



(Foto 16). Vía Láctea. Centro de nuestra galaxia F=28mm, f/2.8, 100ASA, 45 minutos. 18/4/93



(Foto19).Nebulosa el "Águila" (M16). Telescopio de 20cm de diámetro.  $F=1.000/f16.3; 45$  minutos. 18/4/93

tiempo, es posible usar una mayor gama de objetivos, entre 28 y 500 mm. (Foto 15).

#### Tipos de objetos fotografiados con seguimiento:

A) FOTOS CON OBJETIVOS DE HASTA 50 mm.: Nos permiten ver constelaciones e identificar los objetos de cielo profundo "contenidos" en ellas. Especialmente formativas son las conseguidas con un gran angular (28 mm) en torno al centro de nuestra galaxia.(Foto 16).

También nos permite localizar objetos débiles que se desplazan, como Urano, por comparación de diapositivas tomadas en diferentes fechas.

B) FOTOS CON TELEOBJETIVO: Usando teleobjetivos de 200 a 500 mm, se obtuvieron fotos con mayor detalle de aquellos objetos que en fotos de gran campo apenas aparecían como simples manchas coloreadas. (Foto 17).

El siguiente paso, último que hemos dado, precisa mayor preparación y paciencia, resultando ser muy gratificante para los alumnos más habilidosos.

C) FOTOS A TRAVÉS DE TELESCOPIO A FOCO PRIMARIO: El montaje es el de la Foto 18. La cámara está acoplada al telescopio, que hace de objetivo. Sobre éste se sitúa un telescopio guía, equipado con un lente de Barlow para aumentar su focal, y un retículo iluminado del que no dejaremos salir un astro de referencia, haciendo las correcciones a los errores que ahora son vitales al trabajar con grandes aumentos. La principal aplicación es el estudio detallado de un objeto celeste. Se puede apreciar como en el interior de la nebulosa se están formando cúmulos; éstas por tanto son auténticos criaderos de estrellas. (Foto 19).



(Foto20). Cometa Hyakutake.  $F=50mm/f12; 400$  ASA; 7 minutos; 26/3/9

#### APÉNDICE:

El Hyakutake: Antes de acabar no se puede dejar de citar el reciente paso del Hyakutake por las proximidades de la Tierra. La foto recoge el paso del cometa a tan solo 15 millones de kilómetros de la Tierra la fría madrugada del 26 de marzo de 1996.

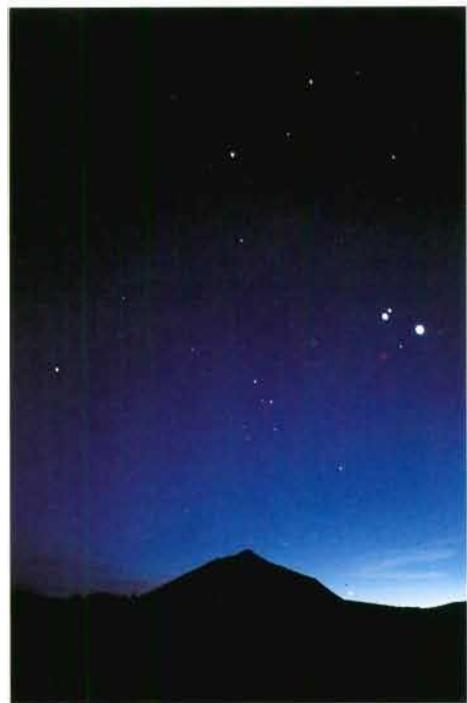
## CANARIAS....CERCA DE LAS ESTRELLAS:

Con esta serie de imágenes trato de poner de manifiesto las inmejorables condiciones para la observación que reunen las cumbres de Canarias, sin las que este trabajo habría sido imposible de realizar.

Nota: La conferencia original dada en el Museo de las Ciencia y el Cosmos constó de 89 diapositivas, las cuales han tenido que resumirse por motivos obvios.







## BIBLIOGRAFÍA

1. Patrick Martinez, *Astrofotografía. Manual de técnicas del amateur*; Ed. Omega, Barcelona, 1990
2. Jean Lacroux y Denis Berthier, *Manual de observación y fotografía astronómica*. Ed. Omega, Barcelona, 1990
3. *Tribuna de Astronomía*, nos. 55-57, 1990 (Varios artículos).
4. Federico Fernández, *El Cielo desde las cumbres de Canarias*; Colección de más de 100 diapositivas originales del autor. La Laguna, 1996



## LA MÚSICA DE LAS ESTRELLAS

Pere L. Pallé

Coordinador de Proyectos del Instituto de Astrofísica de Canarias

## INTRODUCCIÓN.

Al igual que la mayoría de contribuciones del presente volumen, el título de este ensayo pretende, ante todo, estimular y provocar el interés del lector en temas que aún siendo enormemente apasionantes, depende de su presentación el que sean fácilmente asimilables o no. En el presente caso, el título mismo responde a esta motivación: "La Música de la Estrellas". Desgraciadamente las estrellas no emiten melodías armoniosas que nuestro oído pueda captar, pero si, y de ahí viene el título, que están sometidas a perturbaciones (similar al hecho de golpear un tambor o soplar en la boquilla de un clarinete) que provocan una respuesta global de la estrella (el sonido emitido por el instrumento musical). Esta respuesta puede ser observada y medida con la técnica actual, lo que permite diferenciar el tipo de estrellas en función de las características de la señal y además inferir propiedades de la estructura interna de las mismas (nuestro oído es capaz de distinguir que instrumento musical ha emitido un cierto sonido). Este es pues el tema de este ensayo: mostrar que actualmente existe una rama dentro de la Astrofísica que permite estudiar el inaccesible interior de las estrellas utilizando los modos propios de oscilación de las mismas ("los sonidos" emitidos). Esta rama se denomina, en el caso de que la estrella en cuestión sea el Sol, "Heliosismología o Sismología Solar" y "Astrosismología" en los demás. Si bien la Astrosismología se encuentra en fase muy prematura, la Heliosismología, aunque joven, es una rama bien establecida dado que, por una parte, es la única herramienta viable para el estudio del Interior Solar, y por otra los resultados novedosos y altamente precisos que ya se han conseguido.

En el desarrollo del presente ensayo intentaremos familiarizar al lector con conceptos tales como "modo propio de oscilación", "espectro de potencias", etc. que tienen similes adecuados en el terreno de los sonidos y la música, y que son imprescindibles para comprender como se realiza el estudio sismológico tanto de la Tierra como de las estrellas; en particular del Sol. Finalmente describiremos los resultados espectaculares obtenidos en el conocimiento del interior solar y su implicación en el contexto de la Dinámica y Evolución Estelar y de la Astrofísica General.

### LA "MÚSICA" DE LOS OBJETOS

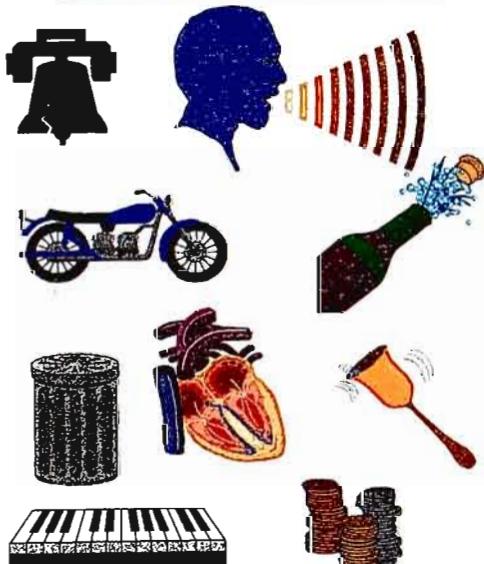


Figura 1.- Los objetos más comunes emiten sonidos característicos

### LA MÚSICA, LOS SONIDOS, LAS ONDAS.....

La experiencia cotidiana nos indica que hay objetos, estructuras físicas, que de modo natural o bien que al perturbarlos (golpearlos) emiten un sonido (Figura 1). En cualquier caso, nuestro oído es capaz de distinguir, en la mayoría de los casos más habituales, que objeto emitió que sonido y, en algunos casos, algunas características del objeto emisor. Así pues, el sonido se convierte en una característica física importante que permite caracterizar al objeto emisor sin necesidad de otras investigaciones (verlo, tocarlo, etc.). En particular, la música emitida por un instrumento musical es capaz de ser discernida por un oyente e incluso asegurar el instrumento particular que lo produjo. Cómo tiene lugar, físicamente, este proceso de detección?. La respuesta es que cualquier sonido al ser emitido, produce un cambio de presión en las particular que componen el medio (en general aire). Esta perturbación se propaga en el medio en forma de onda y al alcanzar nuestro oído, produce pequeños cambios de presión en los órganos ahí presentes, quienes transmiten un impulso nervioso al cerebro. Finalmente, este poderoso ordenador que es el cerebro, interpreta los impulsos y el sonido se convierte en una realidad interpretable para el oyente. Nótese que este proceso de "oír" requiere de: una fuente emisora (el objeto o instrumento musical), un medio físico que transporte la perturbación (en general el aire) y un receptor que sepa interpretar correctamente las perturbaciones (el oído humano y el cerebro).

Cómo se puede analizar de modo más científico y objetivo el sonido?. Cómo diferenciar de modo absoluto las leves sutilezas que puedan existir entre sonidos parecidos?. ¿Cuáles son los parámetros físicos que determinan sus características?. La Física responde a

estas preguntas de modo claro y conciso. Existen "herramientas" que permiten determinar con gran precisión las características de una onda o grupos de ondas, y precisamente el sonido no es más que un movimiento ondulatorio (ondas en movimiento) que se propaga en un medio físico. Es precisamente el llamado "Espectro de Potencias" el que plasma de modo unívoco las características de cualquier sonido (grupo de ondas) y que define a éste de modo inequívoco. El esquema de la Figura 2 permite explicar este concepto.

Un movimiento ondulatorio, tal como el sonido, puede representarse como una onda sinusoidal con un cierto Período ( $T_1$ ), que representa el tiempo transcurrido entre estados equivalentes de la onda: distancia entre máximos, por ejemplo. Esta representación, no es muy conveniente por cuanto que las magnitudes varían con el tiempo. Existe una técnica matemática que permite pasar de la representación tiempo-amplitud de la onda a Frecuencia (la inversa del Período)-Energía de la onda. En esta nueva representación, una onda sinusoidal viene representada por un "pico": su posición en el eje de abcisas (horizontal) nos indica su frecuencia y su altura en el eje de ordenadas (vertical) la energía asociada a esta onda. Obviamente, pese a que la onda evoluciona en el tiempo, en esta nueva representación vendrá constantemente representada por el mismo pico: en la misma posición y de la misma altura si las características de la onda no varían en el tiempo. Esta nueva representación es la que se denomina "Espectro de Potencias" de la señal. Aparte de las ventajas citada anteriormente, tiene otra gran ventaja adicional: supongamos que simultáneamente se emiten dos ondas de períodos distintos  $T_1$  y  $T_2$ . Lo que un observador vería sería, en cualquier instante de tiempo, la suma de las dos señales (esquema inferior izquierdo de la Figura 2), con lo que no sería capaz de decir a priori cuales son las características de las señales sinusoidales que la forman. Sin embargo su espectro de potencias sería claramente revelador. En efecto, el espectro de tal señal está formada por dos picos bien diferenciados, cada uno correspondiente a un período dado y energías también determinadas.

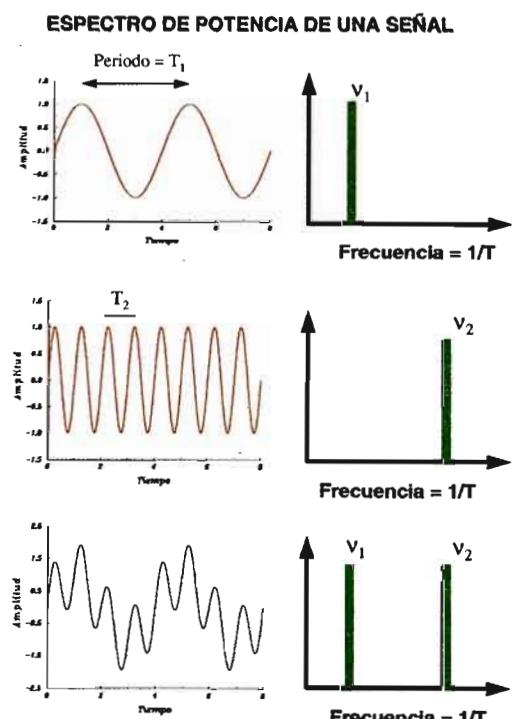


Figura 2.- En la columna de la izquierda, representación de dos ondas de distintos períodos ( $T_1$  y  $T_2$ ) y la suma de ambas. A la derecha se muestran los correspondientes Espectros de Potencia para cada caso.

Los sonidos emitidos por los instrumentos representan un caso particular de ondas, los "modos propios de oscilación". Cuando una cuerda del violín es desplazada de su posición de equilibrio se crean ondas que se transmiten a lo largo de ella. Ésta, al tener dos puntos fijos en

Estas dos características son las que nos permitirían conocer todo lo necesario para determinar las señales que lo originaron. Así pues el espectro de potencias de una señal es una representación en la que se descompone la señal en ondas individuales cada una con una cierta frecuencia y energía. Este último parámetro nos indica cual es la contribución relativa de cada componente espectral a la formación de la señal. Podemos decir, para enfatizar más su importancia, que toda la información contenida en una señal, está contenida, y de modo distinguible, en su espectro de potencias. Veamos algunos ejemplos prácticos y tangibles de tal afirmación.

Imaginemos un instrumento musical (violín) emitiendo una nota pura (Do, Re,...). Para algunos oídos resultará difícil distinguir que nota musical corresponde a que sonido emitido por el violín. Que ocurre si las señales emitidas (las distintas notas musicales) son analizadas y se representan en un espectro de potencias?. El resultado se muestra en la Figura 3 para un caso simple: cuatro notas musicales distintas (Do, Mi, Sol, Si) emitidas por un clarinete. En cada caso existe una componente a más baja frecuencia, que se denomina "frecuencia fundamental" y otra serie de frecuencias múltiplos de la fundamental y con distinta energía : los armónicos. Así, cada nota musical tiene una frecuencia fundamental distinta (mas alta cuanto más agudo es el sonido) y una serie de armónicos. Los armónicos son de un interés especial por cuanto que su distribución y su energía relativa determinan lo que se denomina "timbre": un Do de un clarinete tiene un timbre distinto a un Do de una guitarra aún cuando la frecuencia fundamental para ambos sea la misma.

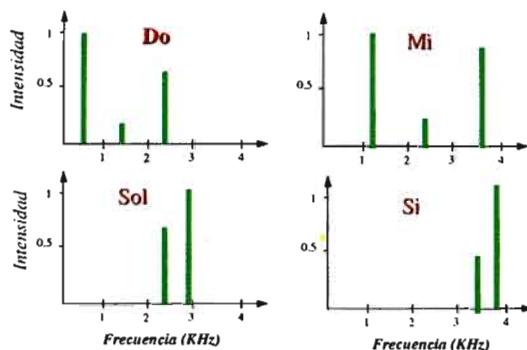


Figura 3.- Representación esquemática de los espectros de potencia correspondientes a notas musicales pures.

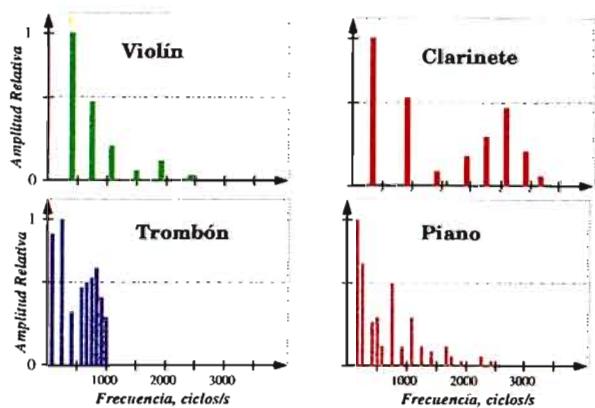


Figura 4 - Representación esquemática correspondiente a los sonidos característicos emitidos por diversos instrumentos musicales

## ESPECTRO DEL SONIDO

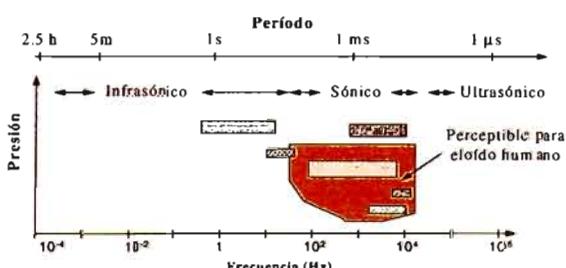


Figura 5.- Representación esquemática de las distintas zonas que componen el Espectro Acústico. La zona coloreada beige, corresponde a la zona de sensibilidad del oído humano. Los recuadros sombreados corresponden a la ubicación espectral de algunos sonidos particulares voz humana (en rojo), sonar submarino (encima del anterior), etc.

Nuestro planeta es una gran esfera sólida de más de 6000 km. de profundidad (radio) y que posee una estructura interna organizada en capas (Figura 6), cada una con unas propiedades bien diferenciadas (composición, temperatura, densidad, etc.). De donde procede este conocimiento? Qué técnicas se han utilizado para inferir las propiedades de unas zonas opacas a las que el ser humano nunca ha accedido? La respuesta es que gracias a las técnicas desarrolladas por la llamada Sismología, ha sido posible en el último siglo deducir de modo

los extremos da lugar a que las ondas se reflejen a llegar a ese punto. La interferencia de estas ondas con las incidentes dan lugar a efectos de cancelación y amplificación, de modo que al final solo permanecen aquellas que han interferido constructivamente y que ajustan su tamaño espacial (longitud de onda) a un múltiplo de la longitud de la cuerda: son ondas estacionarias. Reciben el nombre de modos propios porque sus características dependen únicamente de las condiciones físicas del sistema: longitud de la cuerda, tensión, composición química, temperatura, etc. En general, cada estructura física, objeto, posee sus modos propios de oscilación, que le caracterizan únicamente, y que corresponden a las oscilaciones que libremente se producirían en ellos, aún sin la presencia constante de una perturbación externa e independientemente del tipo. Como ejemplo, pensemos que no importa de que modo golpeemos un cierto diapasón: el sonido emitido es siempre el mismo y además perdura largo tiempo después de golpearlo.

Como ejemplo más complejo, se muestra en la Figura 4 los espectros característicos del sonido emitido por cuatro instrumentos distintos. La estructura de cada uno de ellos es ahora más complicada (se están emitiendo muchas notas distintas a la vez) y claramente distinta.

Como puede apreciarse en las Figuras 3 y 4, el eje de frecuencias en estas figuras abarca la región de 1 a 4 Khz (una a cuatro mil pulsaciones -períodos- por segundo): es la región espectral de frecuencias sensibles al oído humano. Existen además sonidos a más alta (Ultrasónicos) y más baja (Infrasónicos) frecuencia. En la Figura 5 se muestra un espectro de frecuencias del sonido más amplio, de  $10^4$  Hz (periodos correspondientes a varias horas) a  $10^{-6}$  Hz (periodos de millonésimas de segundo), en el que se puede apreciar la pequeña región espectral a la que es sensible el oído humano, así como la región en que se encuentran otro tipo de sonidos (canto de pájaros, sonido emitido por la precipitación del vapor de agua, ultrasonidos utilizados en ecografías, en detectores submarinos, etc.). Así pues, cuando hablamos de sonido, nos estamos refiriendo a una propiedad que tienen los objetos y los sistemas de emitir ondas a través de un medio físico cuando éstos son perturbados, independientemente de que puedan o no ser percibidas por el oído humano. Cada sistema perturbado emite un "sonido" característico y que puede definirle de forma unívoca a través de su reflejo en el Espectro de Potencias.

Vista la utilidad potencial que tiene el estudio de las ondas emitidas por un sistema al ser perturbado, "su sonido", veamos a continuación una de las aplicaciones más importantes: La Sismología Terrestre.

## EL ESTUDIO DEL INTERIOR DE LA TIERRA

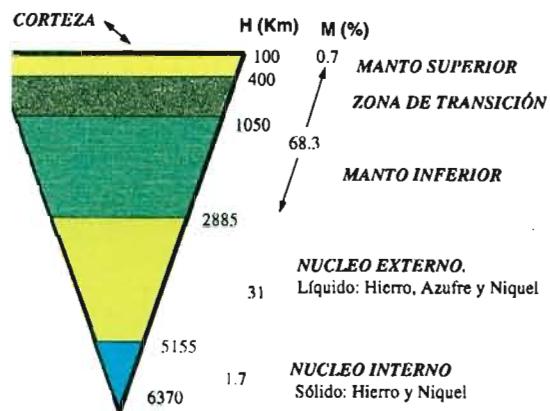


Figura 6.- Ilustración esquemática de la Estructura y características (profundidad (H), masa (M) y composición química) del interior de la Tierra.

ondas longitudinales similares comportan igual para distintos medios. En cualquier caso, las ondas emitidas son finalmente deflectadas hacia la superficie de la Tierra, alcanzando posiciones distintas sobre el globo. Mediante las redes establecidas de Sismógrafos, aparatos sensibles a los desplazamientos de la superficie de la Tierra como consecuencia de ser impactada por las ondas sísmicas, en multitud de emplazamientos distintos, se pueden estudiar las características de las ondas. El posterior cálculo de su espectro de potencias permite aislar los modos individuales: sus frecuencias, energías, desfases, y de ahí deducir las condiciones físicas de las zonas que atravesaron; básicamente la variación de la densidad y el módulo de elasticidad dentro de la Tierra. Gracias a la Sismología disponemos hoy en día de un conocimiento muy detallado del interior de la Tierra que no hubiera sido posible por otros medios o técnicas, y que convierten a esta rama en algo único y fundamental. Como anécdota cabe citar que durante la redacción de este ensayo (Julio 1996) un grupo de sismólogos norteamericanos ha descubierto que el núcleo metálico de la Tierra gira más rápidamente que el resto de las capas, incluida la superficie.

En general, las técnicas sísmicas han venido siendo aplicadas a infinidad de campos y aparte de los propiamente geofísicos, podríamos citar la medicina: estudio de las ondas cerebrales como diagnóstico, la estructura de las múltiples capas que constituyen el ojo humano, la industria: análisis de estructuras, etc. Por añadidura, hay un campo de especial interés en el contexto en que nos encontramos, donde la Sismología ha logrado éxitos muy importantes y novedosos: el de la Astrofísica y en concreto en el de la Física Solar.

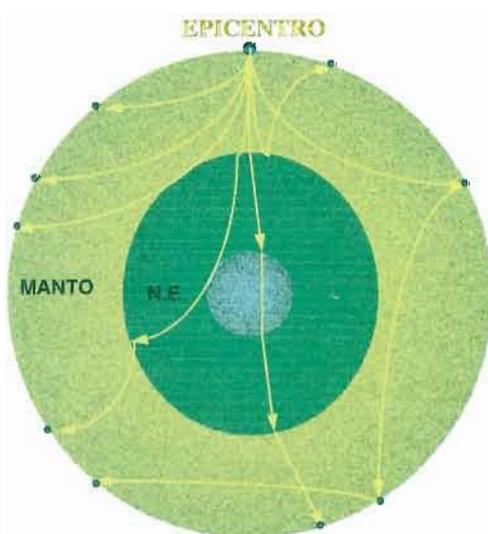


Figura 7.- Ejemplos de la propagación de ondas sísmicas en el interior de la Tierra a través de las distintas zonas que la componen.

directo las propiedades del interior de la Tierra por medio del estudio de las ondas sísmicas que se propagan en su interior. Se sabe en la actualidad que, al igual que un instrumento musical, la Tierra al ser perturbada (terremotos, explosiones de pruebas nucleares, etc.) emite una serie de ondas concretas (modos propios de oscilación). Las características de estos modos responden a las condiciones físicas que encuentran en las zonas en que se propagan, y transportan esta información hasta la superficie de la Tierra, donde son detectadas y analizadas. En la Figura 7 se ilustra esquemáticamente las características de las ondas sísmicas en el interior de la Tierra.

Al producirse una perturbación (terremoto o similar) en un punto determinado (epicentro), se generan ondas que se propagan en todas direcciones. Dependiendo de la dirección de propagación, las ondas son reflejadas en mayor o menor grado por el medio que van encontrando a su paso; zonas de distinta temperatura o densidad, reflejarán las ondas de un modo o de otro. Asimismo, los dos tipos de ondas que pueden darse (S - al sonido- y P -ondas transversales de compresibilidad) no se

comportan igual para distintos medios. En cualquier caso, las ondas emitidas son finalmente deflectadas hacia la superficie de la Tierra, alcanzando posiciones distintas sobre el globo. Mediante las redes establecidas de Sismógrafos, aparatos sensibles a los desplazamientos de la superficie de la Tierra como consecuencia de ser impactada por las ondas sísmicas, en multitud de emplazamientos distintos, se pueden estudiar las características de las ondas. El posterior cálculo de su espectro de potencias permite aislar los modos individuales: sus frecuencias, energías, desfases, y de ahí deducir las condiciones físicas de las zonas que atravesaron; básicamente la variación de la densidad y el módulo de elasticidad dentro de la Tierra. Gracias a la Sismología disponemos hoy en día de un conocimiento muy detallado del interior de la Tierra que no hubiera sido posible por otros medios o técnicas, y que convierten a esta rama en algo único y fundamental. Como anécdota cabe citar que durante la redacción de este ensayo (Julio 1996) un grupo de sismólogos norteamericanos ha descubierto que el núcleo metálico de la Tierra gira más rápidamente que el resto de las capas, incluida la superficie.

## LA HELIOSISMOLOGÍA O SISMOLÓGÍA SOLAR.

El Sol es la estrella de referencia dentro del vasto campo de la Astrofísica. El porqué es simple: es la estrella más cercana a nosotros y su observación puede llevarse a cabo de modo minucioso y con una gran resolución espacial: el disco del Sol ocupa medio grado en el fondo del cielo mientras cualquier otra estrella no pasa de ser un objeto puntual. Además de esta razón puramente astrofísica, resulta que el Sol (Figura 8) es la fuente de la vida en nuestro planeta Tierra, y como tal, nos preocupa enormemente su presente y su futuro. El hombre, desde tiempos de Galileo, ha observado minuciosamente este astro pretendiendo conocer como es, como funciona, como va a evolucionar en el futuro, cuanto de él se puede extrapolar a

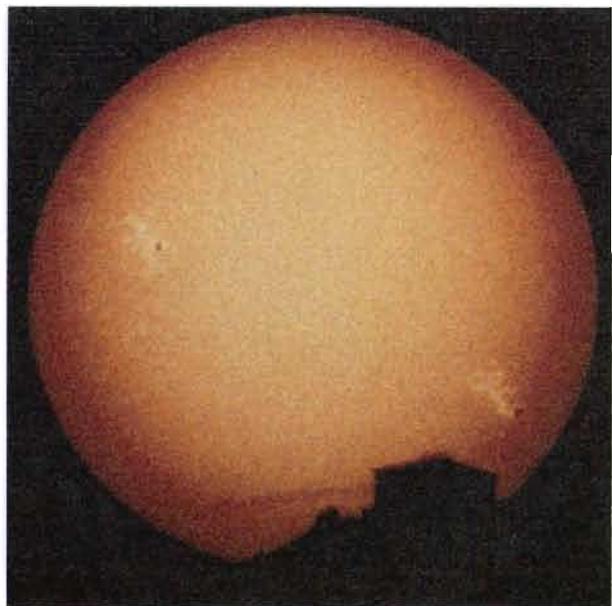


Figura 8.- Imagen del sol tomada en el Observatorio del Teide con un filtro de Calcio. En la parte inferior se aprecia la sombra de la estación del teleférico del Teide en el momento de la puesta de sol tomada en noviembre de 1995.

verdad es que hasta hace poco menos de 20 años, todo lo que se pretendía conocer acerca del interior del Sol estaba basado en el conocimiento adquirido de las numerosas observaciones y estudios de su superficie, la única parte observable del Sol.

Con estas observaciones, los modelos de estructura solar pretendían inferir que propiedades debía cumplir el interior para dar lugar a parámetros y características compatibles con las observadas. De este modo, la interacción teoría-observaciones de la superficie, condujo a la elaboración de distintos modelos de estructura solar (unos más aceptados que otros) pero que en cualquier caso no pasaban de eso: modelos teóricos basados en supuestos muy débiles acerca de la Física que reinaba en el Interior. Este gigante con pies de barro tenía riegos enormes dentro del marco de las Teorías, no sólo de Estructura y Evolución estelar, sino también del Universo. El Sol es y seguirá siendo la estrella patrón, la referencia, que se utiliza al estudiar cualquier parámetro astrofísico en cualquier otra estrella. Cualquier "fallo" en el supuesto patrón bien establecido que es el Sol, implicaría cambios drásticos en multitud de estimaciones estelares y galácticas.

La situación parecía irremediable durante siglos al no haber forma de medir directamente, y no inferir, propiedades de la estructura interna del Sol. En la, década de los 60 hubo un intento observational que pretendía solventar esta problemática: el estudio de los neutrinos (particulares elementales "peculiares" por cuanto que no interferían con la materia) provenientes de las supuestas reacciones nucleares que, convirtiendo Hidrógeno en Helio, proporcionan la fuente de energía al Sol y por ende a la Tierra. La detección y medida del flujo de tales partículas al atravesar la Tierra podría proporcionar datos relevantes acerca de los procesos y las condiciones reinantes en el núcleo solar. Tras más de veinte años de funcionamiento de este primer experimento (y de otros que le siguieron a continuación), parece claro que la

## ESTRUCTURA DEL SOL

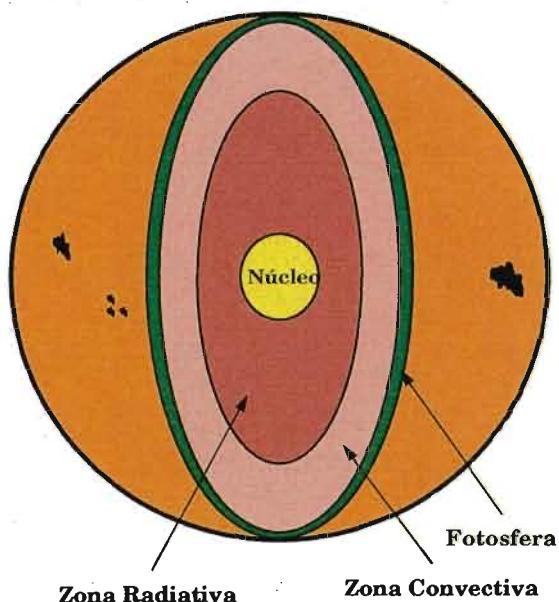


Figura 9.- Representación esquemática de la estructura interna del sol.

discrepancia existente entre el mínimo flujo de neutrinos solares esperados para un Sol "normal" y el realmente medido (un factor 3) es más debido al pobre conocimiento de la física del neutrino que a la posible existencia de un Sol "anormal". La única sonda existente para el estudio del interior solar parecía no ser adecuada, y la puerta de acceso se cerraba definitivamente.

La situación cambia radicalmente en 1979, cuando un grupo de la Universidad de Birmingham y del Instituto de Astrofísica de Canarias se plantean que, al igual que ocurre en la Tierra, si se pudieran medir las vibraciones, modos propios de oscilación, generadas en el interior del turbulento Sol, a través de su efecto al alcanzar la superficie, se podría deducir directamente las condiciones físicas de las zonas internas que atravesaron. Se trataba de hacer Sismología Solar: una palabra ya hoy en día acuñada dentro de la Astrofísica y que implica el uso de una técnica poderosa y única para el estudio de interiores estelares. Tras la idea, el grupo tuvo que desarrollar una técnica espectroscópica muy precisa que permitiera medir los pequeños desplazamientos esperables en la superficie gaseosa del Sol como consecuencia de las vibraciones que en él tuviesen lugar (análogo a los desplazamientos de la corteza terrestre, sacudidas, durante un terremoto). A diferencia de lo que ocurre en la Tierra, en el caso del Sol no es posible colocar el sismógrafo sobre su superficie para registrar los seísmos. Tampoco era posible "escuchar" el sonido emitido por el Sol: los ondas de sonido necesitan un medio por el que propagarse, y el medio físico entre el Sol y la Tierra es prácticamente el vacío. Sin embargo, si que existe una forma de medir a distancia estas ondas sísmicas, y es mediante el estudio de la velocidad Doppler (velocidad de aproximación o alejamiento proyectada en la línea de visión Sol-observador) de la atmósfera solar. Veamos un símil con el sonido: un observador en reposo oye la bocina de un coche en la lejanía. A medida que el coche se acerca a una cierta velocidad hacia el observador, el sonido de la bocina se hace más agudo, cuando pasa enfrente de él percibe el verdadero sonido y cuando éste se aleja el sonido se hace más grave. En otras palabras, cuando

un observador percibe una fuente sonora en movimiento, la frecuencia del sonido aumenta (la longitud de onda disminuye) al acercársele (velocidad relativa móvil-observador negativa) y disminuye la frecuencia al alejarse (velocidad relativa positiva). La luz, en su dualidad onda-corpúsculo, experimenta el mismo efecto Doppler: la radiación emitida por una fuente luminosa en movimiento varía su frecuencia (longitud de onda) en función de la velocidad relativa entre la fuente y el observador. En el caso del Sol, tenemos la fotosfera emitiendo luz en multitud de frecuencias; centrémonos en una cualquiera de ellas y observemos que le pasaría en presencia de una onda sísmica. Imaginemos una perturbación en el Sol, puesto que el Sol tiene materia, la perturbación se propagará en el medio como un movimiento ondulatorio. Las ondas generadas viajarán en todas direcciones y, dependiendo de las condiciones físicas con que se encuentren, sufrirán unos u otros efectos. En cualquier caso una onda dada al alcanzar la superficie del Sol desde la que se emite luz, hará que el gas "tiemble", se desplace hacia fuera o hacia adentro de forma armónica, siguiendo a la onda. Como la fuente emisora, el gas, habrá sido puesta en movimiento, la luz emitida variará su frecuencia dependiendo de que el movimiento sea hacia fuera del Sol o hacia adentro. En concreto un observador en la Tierra observaría que la frecuencia de la luz emitida en esa regiónpectral particular se desplazaría hacia el azul (frecuencias más altas) y el rojo (frecuencias más bajas) respectivamente. Midiendo las variaciones de la velocidad (frecuencia de la radiación) seríamos capaces de estudiar la onda que lo ocasionó y de este modo realizar Sismología del Interior Solar.

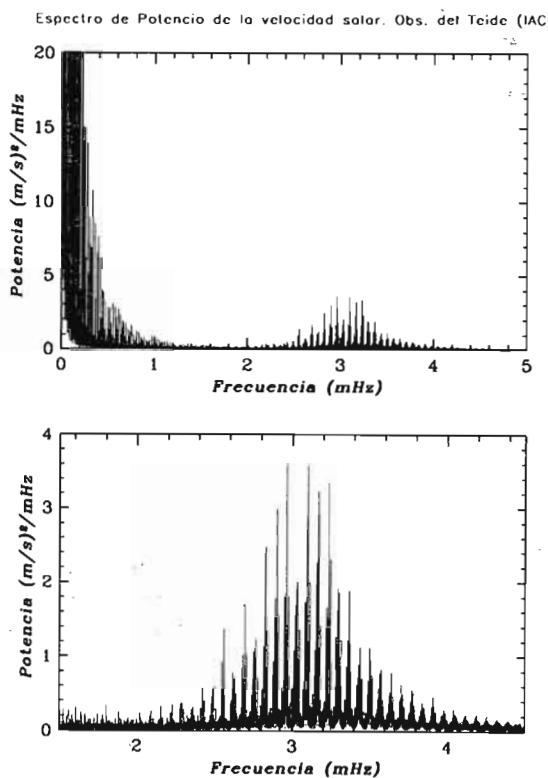


Figura 10.- Espectro de Potencias de la velocidad fotosférica solar, obtenido en el observatorio del Teide (IAC). En la parte inferior se muestra una ampliación del espectro correspondiente a la zona de los modos acústicos solares.

Con los anteriores condicionantes, el grupo Birmingham-IAC anunció en 1979 la detección y medida del

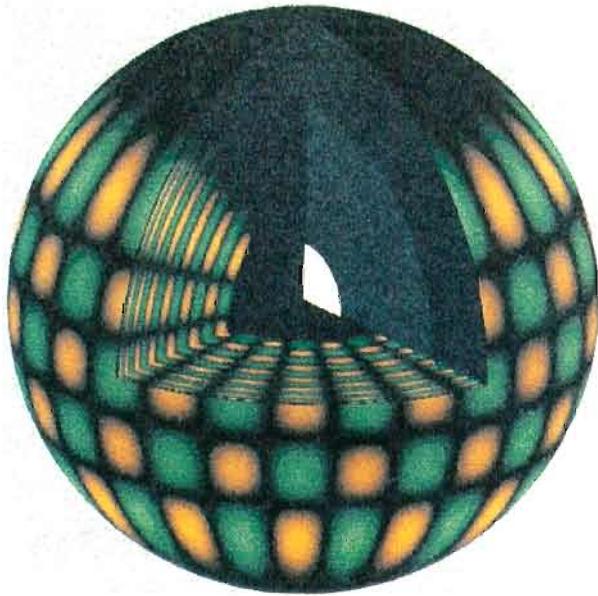


Figura 11. - Patrón de velocidades Doppler de un modo propio en la superficie solar y en la dirección radial. Las zonas de distinto color corresponden a velocidades de distinto signo y las lneas oscuras a las lneas nodales.

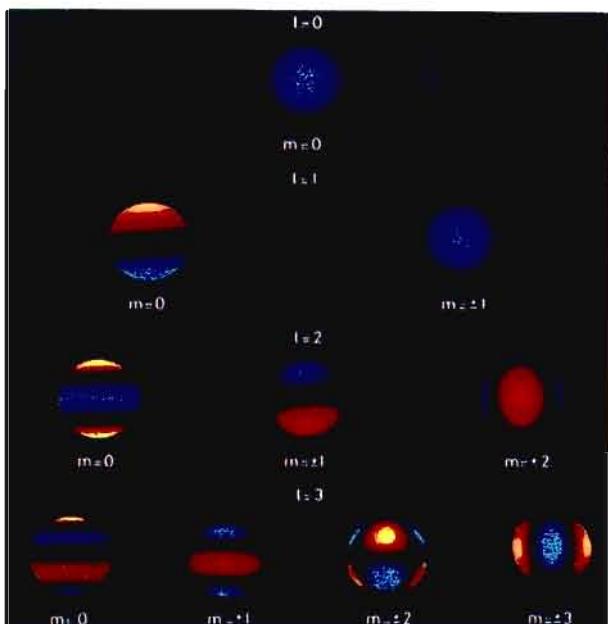


Figura 12 - Patrón de velocidades Doppler en la superficie del sol para los modos de grado  $l=0, 1, 2$  y  $3$ , los sensibles a observaciones en luz integral.

grados angulares depende de la técnica utilizada; así, observando el Sol como una estrella (luz integral) solo se es sensible a los modos más globales,  $\ell \leq 3$  representados en la Figura 12, puesto que los de estructura espacial más compleja se cancelan al integrarse sobre todo el disco y dan, por tanto, una contribución nula a la velocidad observada. Por contra, observando el Sol con resolución espacial se accede a aquellos de estructura espacial compleja y el rango de  $\ell$  abarcado depende de la resolución. Combinando experimentos de ambos tipos, es posible cubrir todo el rango de grados angulares, desde 0 a  $\approx 1000$ .

espectro acústico de oscilaciones globales del Sol. El análisis de las observaciones llevadas a cabo desde el Observatorio del Teide con la nueva instrumentación diseñada a propósito, permitió el cálculo del Espectro de Potencias de la velocidad fotosférica. Tal espectro (Figura 10) mostraba la presencia de energía concentrada en una banda muy concreta entorno a 3 mHz (periodos de 5 minutos) en la que existían componentes discretas (picos) bien diferenciadas. Tales componentes discretas se identificaron como los "modos propios acústicos" del Sol. La similitud con el espectro del sonido emitido por un instrumento musical cualquiera (ver Figuras 2 y 3) es notable si bien el Sol, al ser un cuerpo más complejo que un instrumento, presenta un espectro con muchas más componentes y con distintas relaciones entre ellas que en el caso de los "armónicos" para el sonido. Este descubrimiento marcó realmente un hito dentro de la Astrofísica por cuanto que por vez primera se comprobó la posibilidad de detectar desde Tierra, los modos propios de oscilación de una estrella, lo que permitía sondear de modo directo su interior opaco: la puerta que se había cerrado con la no viabilidad de los experimentos con neutrinos, se abría de nuevo.

Sabemos hoy en día que la superficie del Sol está constantemente afectada por la presencia de unos 10 millones de ondas, todas ellas de períodos en torno a 5 minutos. El Sol pulsa, como un corazón, a este ritmo. Los modos propios son el resultado de ondas estacionarias confinadas en cavidades de distinta profundidad; sus características (frecuencias, energías, tiempos de vida, etc) son el resultado de las condiciones físicas reinantes en tales cavidades. Los modos propios al alcanzar la superficie visible, presentan un patrón espacial que cubre todas las escalas: desde el tamaño del todo el disco hasta unos pocos segundos de arco (el Sol tiene un tamaño angular de unos 1800 segundos de arco). Las frecuencias de estos modos dependen de tres índices:  $\nu = v_{n,\ell,m}$ . El índice  $n$  (orden radial) indica el número de ceros de la onda en la dirección radial,  $\ell$  (grado angular) en número de líneas nodales (de desplazamiento nulo) sobre la superficie y  $m$  (orden acimutal) indica la distribución de estas líneas.

Las propiedades de estos modos son tales que los más globales (grado angular  $\ell$  bajo) son los que más penetran en el interior, llegando (el modo  $\ell=0$ ) hasta el mismo centro del Sol. Por contra los de tamaño espacial más reducido ( $\ell$  grande) están más confinados a zonas cercanas a la superficie. Desde un punto de vista observational, la sensibilidad a uno u otro tipo de

## ESTRUCTURA DINÁMICA DEL INTERIOR SOLAR

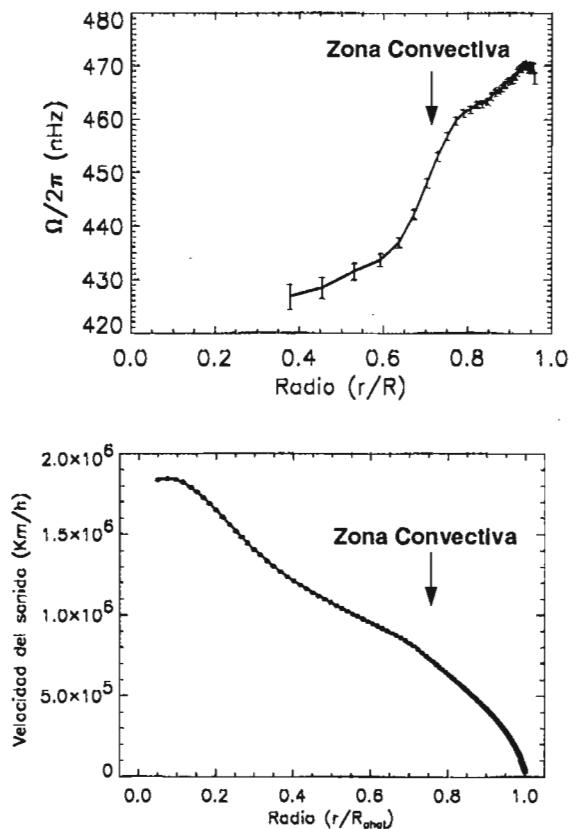


Figura 13.- Resultados de las Técnicas de Inversión aplicadas a datos heliosismológicos. Arriba la velocidad de rotación y abajo la velocidad del sonido.

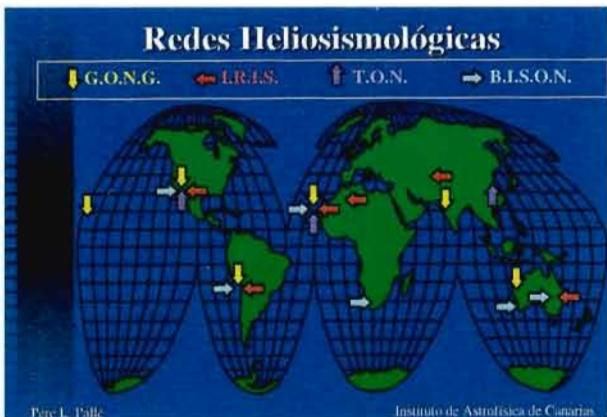


Figura 14.- Localización de los nudos de las Redes Internacionales de Sismología Solar

De todo esto resulta claro que estudiando las propiedades de modos acústicos de distintos grados angulares ( $\ell$ ) estaremos infiriendo propiedades de distintas zonas internas del Sol.

Tras el anuncio del descubrimiento de los modos acústicos globales de oscilación del Sol, la década de los 80 representa el auge de la heliosismología. Numerosos grupos observacionales diseñan nuevos experimentos para llevar a cabo observaciones de las oscilaciones solares. Asimismo, tras los primeros resultados en cuanto a la medida precisa del espectro, los trabajos teóricos se multiplican y se realizan todo tipo de esfuerzos para intentar ajustar los modos de oscilación predichos por los modelos de estructura del Sol con los observados. El hecho que las observaciones proporcionen resultados con precisiones de una diezmilésima parte en cuanto a las frecuencias individuales hizo que los modelos tuvieran que perfeccionar la física utilizada: ecuación de estado, parámetros atómicos, modelización de los procesos convectivos, posibilidad de mezcla en el interior solar, etc. De este modo, la comunidad heliosismológica empieza a atraer físicos provenientes de las más diversas ramas de esta ciencia. Paralelamente, se desarrollaron las llamadas "Técnicas de Inversión", ya empleadas desde los años 70 en Geofísica. Estas técnicas se han revelado como fundamentales para el conocimiento directo de la estructura del interior solar y se basan en la posibilidad de relacionar diferencias entre frecuencias de modos propios (por ejemplo entre las observadas y las provenientes de un modelo) con las diferencias entre los parámetros dinámicos (velocidad de propagación del sonido, densidad, velocidad de rotación) correspondientes al Sol del modelo teórico y del Sol real. Así podemos relacionar directamente las frecuencias de oscilación con los valores de tales magnitudes físicas a lo largo de todo el interior del Sol; de cuantas más frecuencias observacionales se disponga, de su precisión y de su grado angular, dependerá el que los parámetros inferidos a distintas profundidades sean más o menos precisos.

Actualmente se han medido las características de los modos acústicos en el rango de 2 a 4 mHz y grado angular 0 a 500 con gran precisión. En la vertiente teórica, y utilizando las anteriores medidas, se ha podido deducir la estratificación de la velocidad de sonido, la densidad y la velocidad de rotación desde la superficie hasta 0.2 radios solares (Figura 13). Más hacia el interior las incertidumbres son muy grandes y se necesitan medidas de modos a más baja frecuencia para disminuirlas. Asimismo se ha determinado la profundidad de la zona de convección solar; se ha deducido uno de los parámetros más importantes desde el punto de vista de la teoría general de estructura y evolución estelar: la abundancia de helio; se están empezando a medir los campos de velocidad subfotósfericos (por debajo de la superficie visible del Sol), etc. Y todo ello utilizando las técnicas heliosismológicas basadas en unas

observaciones de modos propios de oscilación de gran precisión.

Pese a los logros alcanzados hasta el final de la década de los 80, pronto se vio que estaban llegando a un límite, y ello era debido a la limitada calidad de las observaciones. Pese a estar trabajando con unas precisiones observacionales sin parangón en ningún otro campo de la Astrofísica (partes en  $10^4$ ), el detalle con que se podría potencialmente estudiar nuevos procesos

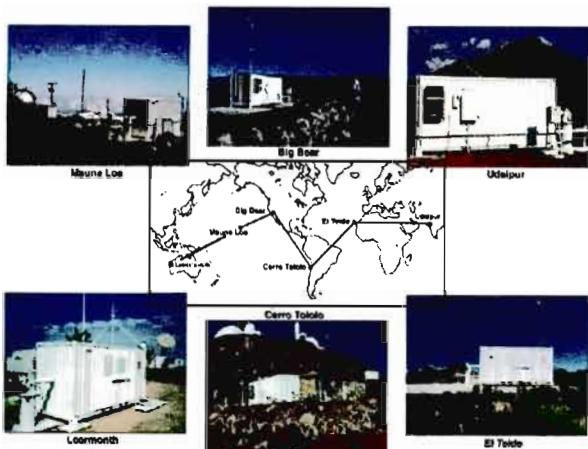


Figura 15.- Los emplazamientos de la red GONG (Global Oscillations Network Group)

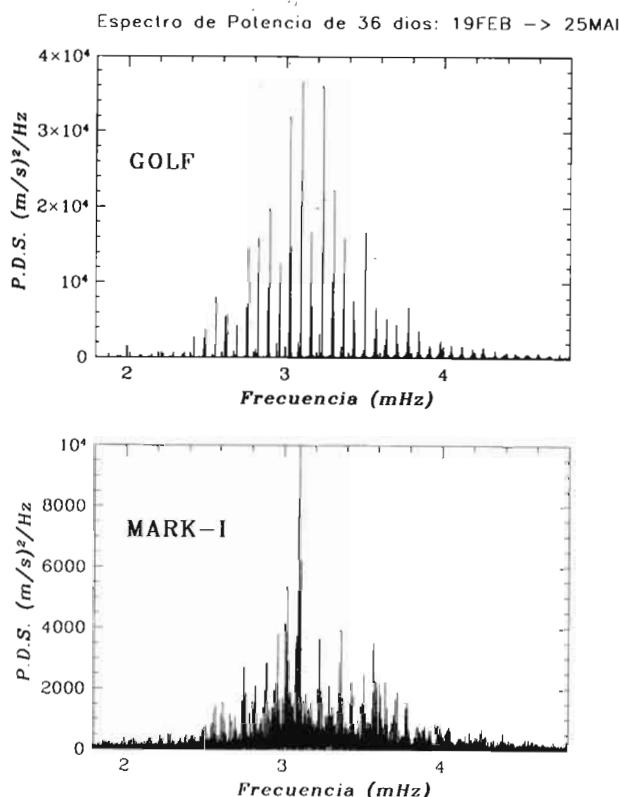


Figura 16 - Comparación entre la zona espectral de modos acústicos solares utilizando observaciones simultáneas desde el espacio (instrumento GOLF) y desde el observatorio del Teide (Mark-I)

espúrea que creaba la interrupción día noche en el espectro de potencias, se redujo en un factor 280.

La otra solución posible consiste en realizar las observaciones solares desde un observatorio espacial ubicado en una órbita adecuada para que el satélite no tenga períodos de sombra. Con esta estrategia no solo es posible conseguir observaciones ininterrumpidas, sino que a la vez se elimina el efecto distorsionador de la atmósfera terrestre en los datos. Con esta idea, se aprobó la inclusión en la sonda SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) de tres

físicos era tal que la precisión lograda no era suficiente. Observacionalmente, esta limitada precisión viene dada no por las técnicas utilizadas, sino por el hecho de no disponer de observaciones ininterrumpidas durante períodos de tiempo suficientemente largos (meses o incluso años). En efecto, desde un observatorio cualquiera, el Sol sólo es visible de 8 a 13 horas de las 24 que componen un día. Así, y aún en condiciones meteorológicas óptimas, las observaciones se ven sistemáticamente interrumpidas por el ciclo día-noche y esto crea unos efectos espúreos muy importantes en el espectro de potencias correspondiente de la señal solar y que limitan definitivamente la precisión con que se pueden medir. Ante este hecho, la comunidad heliosismológico reaccionó en dos sentidos distintos, pretendiendo en ambos casos superar la limitación impuesta por el ciclo día-noche. Una primera solución es la de establecer no uno sino varios instrumentos idénticos en los puntos más adecuados del globo terrestre de modo que siempre en al menos uno de ellos el Sol esté visible y pueda llevarse a cabo la observación. De este modo, una posterior combinación de los datos recogidos en los nudos de estas redes, permite crear una única serie temporal de datos totalmente ininterrumpidos. En la actualidad se encuentran parcial o totalmente operativas cuatro redes internacionales de Sismología Solar (Figura 14): cada una de ellas utiliza técnicas distintas tanto observacionales como de operación: observaciones del sol en luz integral (IRIS y BiSON), con resolución espacial moderada (GONG) o alta (TON); midiendo las oscilaciones como cambios en la velocidad Doppler de la superficie (IRIS y BiSON) o de la irradiancia (TON) o ambas a la vez (GONG); estableciendo instrumentos completamente automáticos (BiSON), parcialmente (IRIS, GONG) o totalmente dependientes del observador para las operaciones de inicio y fin de las observaciones (TON).

En cualquier caso, como ya hemos visto, la información proveniente de ellos se complementa en lugar de competir, lo cual ayuda y ayudará definitivamente en el desarrollo de la Heliosismología. En este punto hay que decir que nuestro Observatorio del Teide es el único emplazamiento que acoge un instrumento de cada una de las redes, y eso es debido no sólo a la ubicación geográfica de Canarias o a sus excelentes condiciones meteorológicas para la observación solar, sino también a las colaboraciones establecidas por el grupo de Heliosismología que participa de modo activo en cada uno de los Proyectos científicos que dan sentido a las diversas redes de Heliosismología.

Con el reciente inicio de la operación de estas redes se ha probado la validez de la estrategia concebida y la nitidez de los espectros conseguidos augura la llegada de resultados más precisos sobre la estructura interna del Sol. Recientemente, y tras la puesta en marcha de la red GONG (Figura 15) en Octubre de 1995, se ha logrado una cobertura del 89% durante el primer mes de observaciones; en este caso la potencia

experimentos dedicados a estudios heliosimológicos con instrumentos análogos a los que componen las redes terrestres. Estos experimentos se denominan GOLF, VIRGO y SOI-MDI. En todos ellos la participación del grupo del IAC es importante y, en concreto, en los dos primeros, diversos sub-sistemas de la instrumentación científica han sido de su responsabilidad. La sonda se lanzó satisfactoriamente en Diciembre de 1995 y los primeros datos con valor científico ya han sido analizados. En la Figura 16 se muestra, a modo de comparación, el espectro de modos acústicos solares obtenido con el instrumento GOLF y el obtenido, para el mismo periodo de tiempo, con un instrumento similar (Mark-I) ubicado en el Observatorio del Teide. Como se aprecia, el primero de ellos presenta una mejor relación señal-ruido así como la ausencia de las componentes (picos) espúreas debida a la modulación dia-noche que afecta al espectro del Mark-I. Obviamente la medida de las características del espectro obtenido con GOLF va a ser mucho mas precisa que la medida que pueda realizarse con el segundo. Esta mayor precisión redundará sin lugar a dudas en un mayor detalle y precisión al aplicar las técnicas de inversión y por tanto un mejor conocimiento y a mas altas profundidades dentro del interior solar.

### LA ASTROISMOLÓGIA O SISMOLOGÍA ESTELAR.

A mitades de la década de los 80 y tras el éxito de la Heliosismología, se vislumbró la posibilidad de aplicar las mismas técnicas a otro tipo de estrellas, que por su lejanía a nosotros y su naturaleza puntual, están peor estudiadas y son menos conocidas que nuestro Sol. Estrellas distintas al Sol, en edad, composición química, masa, etc. debieran presentar su propio espectro de modos propios, del cual sería posible extraer las condiciones dinámicas en su interior. A igual que ocurre con el sonido, un mismo instrumento musical al que variamos su tamaño, el material de que esté hecho, la temperatura o la humedad a que esté sometido, sonará en cada caso de modo distinto; las frecuencia propias que formarían su espectro serían distintas. Idealmente podríamos clasificar las estrellas estudiando solamente su espectro de pulsaciones de modos propios. A partir de esta consideración, numerosos esfuerzos se dedicaron a medir pulsaciones en estrellas, especialmente en el ámbito observational donde reside la mayor dificultad. En efecto, la cantidad de luz que recibimos de cualquier estrella es millones de veces inferior a la que recibimos del Sol, lo cual aumenta dramáticamente el ruido presente en las observaciones. Por añadidura, en la mayoría de tipos de estrella el soporte teórico es muy pobre y no resulta de gran ayuda a la hora de interpretar las observaciones y los espectros obtenidos. La confluencia entre una teoría firme y una observaciones precisas solo se da en el caso del Sol y en el caso de un tipo peculiar de estrellas, las enanas blancas. En otras estrellas pulsantes ( $\delta$  Scuti y roAp), los problemas en la identificación de los modos y su interpretación física limitan el avance.

La estrategias a seguir para mejorar esta situación incluyen: nuevas técnicas observacionales, desarrollo de misiones espaciales con fines astroismológicos y un auge importante en el desarrollo teórico de Estructura y Evolución Estelar.

### CONCLUSIONES.

A lo largo del presente ensayo hemos pretendido mostrar como, hoy en día, la Astrofísica dispone de una serie de técnicas nuevas y poderosas para sondear y probar la estructura interna del Sol y, en general, de las estrellas. Esta nueva herramienta es la Helio-Astroismología que es capaz de proporcionarnos las propiedades dinámicas internas por medio de la detección y análisis de los modos propios de oscilación de la estrella. Basada en las técnicas convencionales utilizadas en Geofísica, la heliosismología ha proporcionado nuevos y novedosos resultados que han aumentado en conocimiento global de nuestro Sol de forma importante. La extrema calidad de los nuevos datos proporcionados tanto por las redes terrestres de observación como por los instrumentos ubicados en sondas espaciales, permiten augurar que en un futuro próximo puedan resolverse nuevos enigmas acerca de nuestro Sol. Con todo, no tenemos que perder de vista que la respuesta a ciertas preguntas suele plantear nuevas preguntas. Este mecanismo, sin embargo, lejos de crear un círculo cerrado, ha sido precisamente el que ha permitido la evolución continuada y progresiva del conocimiento humano, y en particular del relativo a nuestro Cosmos.



## LA ASTRONOMÍA Y EL CINE

Héctor O. Castañeda

Astrónomo de Soporte del Satélite I.S.O., VILSPA, Madrid

## 1. ES SOLO UNA PELÍCULA

*ESCENA: Interiores. Oficina de Rekall Inc.. Día*

*MCLANE*

*No quiero robarle la diversión, Doug.  
Sólo quiero asegurarte que, para el tiempo el  
viaje haya acabado, usted se quedará con la chica,  
matará a los chicos malos, y salvará al planeta entero  
Ahora digame, ¿no vale todo eso trescientos miserables créditos?*

Es posible aprender astronomía del cine? Planteada así, la pregunta parece una ironía. ¿Qué relación podríamos encontrar entre un arte de masas y la ciencia más antigua? Y sin embargo... El cine se nutre de historias que la gente puede reconocer e identificarse. Incluso la fantasía más absurda tiene un fondo de referencia que nos resulta comprensible. Y, a veces, en una historia aparecen elementos que son la interpretación del director y su equipo de conocimientos astronómicos, que luego se transmiten a millones de espectadores. Como consecuencia, el cine juega un doble papel como medio informativo y educativo.

Las historias cinematográficas transcurren en un mundo con su propia lógica y leyes. Las reglas se definen tanto de manera implícita como explícita, guardando en la medida de lo posible, una sensación de plausibilidad. Tanto el guionista como el realizador presuponen un conocimiento por parte de la audiencia de ciertas reglas que ellos presentan, y que no necesitan por lo tanto explicación. Algunas de los tópicos propuestos se ajustan a la realidad física, mientras que otros reflejan desconocimiento de las leyes de la naturaleza o, muchas veces, el uso de lugares comunes que empleados una y otra vez en las historias. Pero es importante puntualizar que la misión primordial de una película es la de entretenér. Es lícito, por lo tanto, esperar alguna que otra licencia dramática para hacer más atractiva la trama.

Mirar una película no sólo puede resultar en pasar un rato agradable. También podemos aprender mucho sobre la idea que el público en general tiene de la ciencia y los científicos, de lo que sabe del mundo que nos rodea y de lo que desconoce, de que es lo que todavía se encuentra en el reino de lo misterioso y de lo que ya creemos comprender.

La conferencia en el Museo de la Ciencia hizo un rápido recorrido sobre el mundo del cine y su relación con la astronomía. En el texto he adoptado una diferente aproximación, y he preferido elegir sólo una película como ejemplo para estudiar. No he seleccionado una película que llamariamos convencionalmente "seria", donde las connotaciones científicas son claras y rigurosas, como puede ser 2001: Odisea en el Espacio (2001: A Space Odyssey 1968). Por el contrario, el ejemplo utilizado es una película reciente de puro escapismo, Desafío Total (Total Recall 1990). La trama de la misma transcurre en el año 2084. Un trabajador de la construcción en la Tierra (Arnold Schwarzenegger) tiene sueños de una vida en Marte. Obsesionado por visitar el planeta, visita la compañía Rekall para poder gozar del recuerdo articial de unas vacaciones marcianas. Pero durante el procedimiento de implantación de memorias algo va terriblemente mal, y descubre su verdadera identidad. Acción, violencia, sexo, y astronomía. ¿Qué más se puede pedir?

## 2. MARTE

*ESCENA: Exteriores. Desierto rojo de Marte. Día.*

*Una gran extensión de deslumbrante rojo.  
Dos lunas se elevan en el cuadro, flotando sobre los  
picos de distantes montañas. Estamos mirando sobre las  
ilimitadas planicies rojizas de Marte. Dos figuras en  
trajes espaciales caminan sobre la superficie.*



Figura 1: Una imagen de Marte con el Telescopio Espacial Hubble, cuando el planeta se encontraba en oposición, a una distancia de aproximadamente 103 millones de kilómetros de la Tierra. Las áreas oscuras, antiguamente interpretadas como zonas de vegetación, corresponden a regiones donde las propiedades del suelo hacen reflejar menos la luz solar. Los cambios de la apariencia del planeta con las estaciones se deben al movimiento del polvo y la arena por acción del viento (NASA).

de la apariencia del planeta, lo que indicaba la existencia de estaciones, eran fuertes argumentos para apoyar la existencia de vida en Marte. Los canales resultaron ser finalmente el resultado de ilusiones ópticas, y la idea de un Marte habitado fue poco a poco perdiendo fuerza.

Sin embargo, los descubrimientos astronómicos tuvieron entonces como consecuencia el transformar a Marte en un escenario favorito para las actividades de civilizaciones semejantes a la nuestra. Después de todo, su similaridad con la Tierra y su posición relativa con respecto al Sol sugerían muy razonablemente que podía ser el centro de otra civilización. Muy pronto, la especulación sobre la existencia de vida dejó los ambientes académicos para trasladarse al de la cultura popular. Edgar Rice Burroughs, el creador de Tarzan, escribió una saga de libros que tenían como escenario el imaginario mundo de Barsoon, el nombre dado al planeta por los habitantes de Marte. Y H. G. Wells, uno de los padres de la ciencia-ficción moderna, eligió a los marcianos como los invasores de la Tierra en su libro clásico *La Guerra de los Mundos*.

La idea de Marte y la Tierra como planetas muy semejantes, y la consecuencia lógica de la posibilidad de existencia de vida marciana, llevó a todo un género de películas de fantasía estadounidenses basadas en hipotéticas invasiones marcianas, en un ciclo que tuvo su apogeo en los años cincuenta. La guerra de los Mundos (War of the Worlds 1953) fue la versión cinematográfica de la novela homónima de Wells, pero con la acción transladada desde Inglaterra a los Estados Unidos. En la película, meteoros comienzan a caer sobre todo el planeta, y de su interior empiezan a surgir máquinas de guerra controladas por los marcianos. Aunque la humanidad es impotente ante la tecnología extraterrestre, estos resultan finalmente vencidos por el más humilde de los organismos de la Tierra, las bacterias. Invasores de Marte (Invaders from Mars 1953) es un ejercicio en terror psicológico, con la historia contada a través de los ojos de un niño que ve como sus padres se comportan de una forma extraña luego que un objeto volador no identificado aparece

La escena inicial de Desafío Total refleja todo el conocimiento alcanzado a través de los estudios astronómicos sobre Marte (vease en la Figura 1 una imagen muy reciente del planeta) y especialmente por las últimas tres décadas de exploración con sondas interplanetarias: vemos un inmenso paisaje rojizo, con un cielo de un color rosado. Dos seres humanos caminan frente a una imponente montaña que se alza en el horizonte. Ambos llevan trajes espaciales, lo que nos indica que la atmósfera forma un entorno hostil para el hombre. En este tipo de comienzos en las películas leemos carteles explicativos o bien escuchamos una narración de fondo que nos ayuda a situarnos en el escenario elegido. Sin embargo, en este caso nada en la introducción de la película nos explica porque el mundo que vemos tiene esa apariencia. Se asume que el espectador conoce esa información. Y así es. Analicemos como se ha llegado a esta situación.

El planeta Marte (el nombre para el dios romano de la guerra) ha ejercido siempre una poderosa fascinación sobre la humanidad. En 1877 el astrónomo italiano Giovanni Schiaparelli observó estructuras rectilíneas que formaban dibujos geométricos. Su descubrimiento llevó a especular sobre el origen artificial de estas estructuras. Esta hipótesis fue defendida fervientemente por el astrónomo estadounidense Percival Lowell, quien postuló que esas observaciones probaban la existencia de "canales", construidos por antiguas civilizaciones para irrigar las planicies de Marte. Los "canales", junto con la variabilidad

una noche en el pueblo donde vive. En *Zombies de la Estratosfera* (Zombies of the Stratosphere 1952) los marcianos planean utilizar una bomba de hidrógeno para destruir la Tierra y luego mover a Marte a su órbita para aprovechar su mejor clima (!). Muchas de estas películas trataban menos sobre Marte que sobre la paranoia que era el denominador común de la cultura en las décadas de la Guerra Fría. Algunos de los títulos hablan por si mismos de la calidad de esas películas: Abbott y Costello van a Marte (Abbott and Costello Go to Mars 1953), Marte Necesita Mujeres (Mars Needs Women 1968), La Mujer Diabólica de Marte (Devil Girl From Mars 1954), El Día que Marte Invadió la Tierra (The Day Mars Invaded the Earth 1962). Tenemos incluso en la lista una producción mejicana, Santo contra la Invasion de los Marcianos (1966), y una candidata a la lista de las peores películas de todos los tiempo, con el título autoexplicativo de Santa Claus Conquista a los Marcianos (Santa Claus Conquers the Martians 1965). El mejor exponente de este género es posiblemente la británica Quatermass y el pozo, (Quatermass and the Pit 1967) donde se plantea la idea de una civilización marciana que tiene una participación crucial en el origen de la terrestre.

La puesta en órbita del Sputnik en 1957 significó el comienzo de la era del espacio, representando entonces para los astrónomos la posibilidad de poder estudiar los planetas desde su proximidad con naves no tripuladas, sin tener que estar restringidos a las limitaciones de la atmósfera terrestre. La verdadera apariencia de Marte empezó a conocerse a través de la sonda Mariner 4, que en 1965 tomó las primeras fotografías cercanas del planeta (22 en total). Causó sorpresa descubrir un mundo con cráteres similares a los lunares y con una atmósfera más tenue de lo esperada, lo que llevó a los astrónomos planetarios a concluir que Marte era un mundo muerto tanto del punto de vista geológico como del biológico. Posteriormente misiones orbitales fueron adquiriendo mayor información sobre la geografía marciana, hasta llegar a poder explorar realmente su superficie.

El siguiente paso en este programa de estudios era poder tener información sobre las condiciones en la superficie del planeta, lo que se logró a mediados de la década de los setenta. Las primeras imágenes tomadas en la superficie de Marte fueron las transmitidas por las sondas Viking. Las sondas estaban compuestas por dos partes, una sección (orbiter) capaz de orbitar sobre el planeta realizando un reconocimiento de su superficie, mientras que la otra (lander) estaba preparada para alcanzar la superficie marciana. La primera sonda, Viking 1, se posó sobre la superficie marciana el 20 de Julio de 1976, en la posición 22.3 grados de latitud Norte, 48 grados de longitud.



Figura 2: *Modelo digital de la superficie de Marte*. Nótese la diferencia entre las diferentes regiones. El hemisferio sur contiene zonas altas con viejos cráteres similares a los de la Luna, mientras que el hemisferio norte consiste en llanuras más bajas en elevación que son más jóvenes (NASA/INSSDC).

La información obtenida en estos viajes de exploración fue creando el retrato de un planeta formado por inmensas planicies, zonas de cráteres semejantes a la Luna, y grandes elevaciones (Figura 2). Se encontró evidencia de que existió agua en el pasado, pero esto ocurrió en las primeras etapas de la evolución del planeta. Aunque semejantes en tamaño y gravedad, el camino de evolución que siguieron la Tierra y Marte fue absolutamente diferente. De la misma manera que el agua marciana se perdió en un momento muy temprano de su historia lo mismo ocurrió con el dióxido de carbono necesario para mantener una temperatura estable, que fue mayormente absorbido por la superficie.

Los nuevos datos científicos permitieron entonces producir películas con una imagen más realista del planeta. La conquista de Marte fue un entonces un tópico muchas veces empleado en las películas. A veces, Marte era simplemente un escenario elegido para representar historias que hablan de pasiones que guían al hombre en su afán de conquista, un mundo idealizado al que la humanidad llegaba a destruir, como en la miniserie para la televisión Crónicas Marcianas. (The Martian Chronicles 1980), basada en el libro de Ray Bradbury. Otras veces, para contar un vieja historia nuevamente, como en Robinson Crusoe en Marte (Robinson Crusoe on Mars 1964). Ya en estas películas se presenta la superficie marciana como similar a un desierto terrestre, tal como se tenía como modelo aceptable en esos años (por ejemplo, Robinson Crusoe fue filmada en el Valle de la Muerte en Estados Unidos). El mismo tipo de paisaje desértico se utiliza en una producción norteamericana más reciente, Capricornio Uno, (Capricorn One 1978). Esta película explotaba un tema recurrente en las llamadas leyendas urbanas sobre la posibilidad de que los alunizajes no hubieran ocurrido en realidad, sino que fueran el resultado de una sofisticada falsificación por parte de la NASA (un tema adecuado para Expediente X). La elaboración de este concepto hasta sus últimas consecuencias llevó a plantear una historia que incluye la simulación al primer viaje tripulado a Marte. Para ello, los astronautas son transportados contra su voluntad a una base militar secreta en el desierto para emitir desde allí las primeras imágenes desde Marte. A diferencia de Robinson Crusoe, donde se planteaba que era posible respirar sin un equipo en la atmósfera marciana luego de extraer el hipotético oxígeno de las rocas, en esta película ya se ve a los astronautas utilizando trajes presurizados. Claramente, los realizadores contaban con los años de educación del público en las condiciones esperables en el espacio, y debían de plantear una situación más realista.

Desafío Total es la última película (hasta el momento) en la saga que usan a Marte como parte integral de su trama. Como ya hemos dicho, emplea entonces el conocimiento acumulado por la ciencia y los espectadores hasta ese momento, para contar su historia. Podemos destacar tres puntos astronómicamente importantes en las primeras escenas de la película:



Figura 3: Una imagen del Lander 1 de la sonda Viking. La roca que se ve a la derecha tiene un tamaño aproximado de dos metros. El color de la superficie es rojizo, debido a la presencia de óxido de hierro en la superficie, mientras que el cielo marciano es de color rosado, debido a las diminutas partículas de polvo en suspensión en la tenue atmósfera de Marte (NASA/NSSDC).

1. La representación del paisaje marciano al comienzo de la película es muy similar a la que esperaríamos encontrar. Si observamos la foto del lugar donde se posó el Lander del Viking 1, vemos rocas similares en color a las rocas basálticas de la tierra. El color rojo en las piedras se debe a hierro oxidizado en la superficie. En las fotos del Viking se ve el cielo de color rosado, (los astrónomos pensaban que el cielo sería de color azul oscuro) lo cual se debe al polvo extremadamente fino que se encuentra en suspensión en la tenue atmósfera (Figura 3).

2. Un punto importante de la trama es la existencia de una

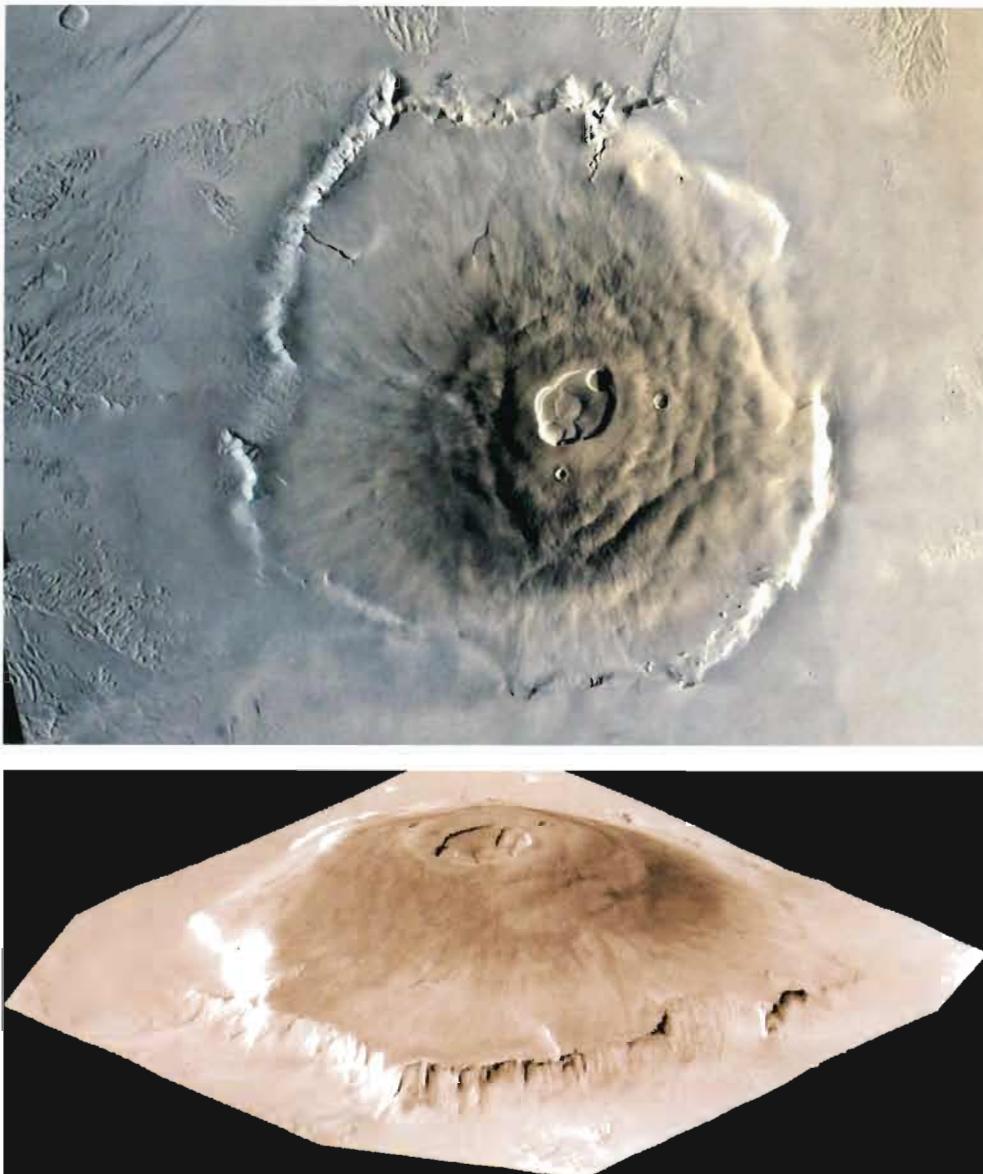


Figura 4: (arriba) El Monte Olimpo, la montaña más alta del Sistema Solar (NASA/NSSDC), (abajo) Modelo tridimensional del Monte Olimpo. La imagen fue creada a través de la combinación de imágenes a diferentes posiciones y combinadas con un modelo topográfico para generar el efecto de perspectiva (NASA/JPL).

montaña en la que se hallan los restos de tecnología extraterrestre, llamada Montaña Pirámide. Marte, como ya hemos visto, tiene grandes cadenas motañosas. En la figura 4, vemos una figura de Monte Olimpo, el volcán más grande de Marte posiblemente la inspiración para la Montaña Pirámide en la película). Sus dimensiones son espectaculares: tiene 624 km en diámetro y una altura de 25.000 metros (como comparación, el Teide tiene 3700 metros de altura). La caldera (la depresión en la cumbre de un volcán, causada por una explosión o un colapso) que se ve en el centro tiene un ancho de 80 km y contiene múltiples cráteres producidos por sucesivos fenómenos volcánicos (Figura 4).

3. El hecho de que los personajes se muevan con trajes espaciales se debe también a los hallazgos de la misión Viking. Las sondas midieron la presión atmosférica en la superficie marciana, que resultó ser muy baja, del orden de una centésima de la presión atmosférica en la Tierra al nivel del mar. No sólo el aire tiene baja presión, sino que también es

irrespirable, puesto que está compuesto mayormente por dióxido de carbono, junto con nitrógeno y argón con una ligera traza de oxígeno. Estas condiciones requieren que los seres humanos utilicen trajes presurizados para poder moverse sobre la superficie marciana.

### 3. EL EFECTO DE UNA VIOLENTA DESCOMPRESIÓN SOBRE EL CUERPO HUMANO (Y OTROS ERRORES CIENTÍFICOS)

*ESCENA: Exteriores. Desierto rojo de Marte. Día.*

*Quaid camina en el borde del precipicio. El piso se desliza a sus pies y el cae. El visor de su casco golpea una roca y se quiebra*

*Quaid comienza a descomprimirse. Su respiración empieza a acelerarse. Las venas sobresalen en su cara. Los ojos comienzan a salir de su órbita. Todo su cuerpo se agita incontroladamente. Su rostro se dilata y de pronto expl...*

En el mundo de las aventuras cinematográficas un lugar común es el final espectacular y desagradable de un cuerpo humano (normalmente el villano de la historia) sometido a los efectos del vacío en el espacio. Así ocurre con los mineros de la luna de Júpiter lo en Atmosfera Cero (Outland 1981), cuando los hombres explotan dentro de sus trajes espaciales al perder éstos su integridad. En Desafío Total este escenario ocurre dos veces, en la secuencia del sueño al comienzo de la película y al final de la misma, en la confrontación con el gobernador de Marte. Como hemos discutido en la sección anterior, la presión en la superficie marciana es muy baja. Así pues el espectador queda con la impresión de que la exposición al vacío es mortal (y también que la tecnología de cristales para cascos espaciales no ha progresado mucho en un siglo). Pero es lógico plantearse si esta noción es verdadera.

Lógicamente no es probable encontrar voluntarios humanos para realizar un estudio sobre los efectos de someterse a un entorno de presión nula. Los animales no tienen, desafortunadamente para ellos, la posibilidad de elegir. Estudios realizados al comienzo de la era del espacio, con títulos tales como "El efecto en los chimpancés de una rápida descompresión a un vacío casi total" nos dan la pauta sobre lo esperable en las condiciones de vacío del espacio, y nos sugieren que es posible sobrevivir a una corta exposición al mismo. La conclusión de estos trabajos es la imposibilidad de descomprimir un organismo en la manera ilustrada comúnmente en las películas.

Para clarificar este tema, examinenos un momento la importancia de un ambiente presurizado. La presión atmosférica está determinada por la densidad del aire y su temperatura. Literalmente puede entenderse como el peso de la masa de aire que forma la atmósfera sobre cada centímetro cuadrado de superficie. En el caso de la Tierra, ese peso equivale aproximadamente a 1.02 kilogramos por centímetro cuadrado. La presión atmosférica permite regular nuestra respiración, creando un gradiente que mantiene el oxígeno en el cuerpo donde se consume por las células, mientras que el dióxido de carbono que estas producen se elimina; al mismo tiempo mantiene algunos gases disueltos en el sistema circulatorio.

En el espacio exterior existen partículas y moléculas, pero en una densidad tan baja que su efecto es despreciable, con lo que la presión sobre el organismo es nula. El resultado final de la exposición de un organismo vivo a las condiciones del espacio (o a un ambiente de presión casi despreciable) es la muerte, pero de una manera menos espectacular que la indicada por las películas. Cuando la presión baja por debajo de 47 milímetros de mercurio, el agua que compone las células pasa al estado de vapor, comenzando por las que se encuentran en la superficie de la piel. El cuerpo se enfriá y

pierde calor por el efecto de transición entre las fases líquida y gaseosa del agua (se necesita entregar calor para evaporar el agua, y éste se extrae del organismo). Luego de unos pocos segundos, el efecto de colapso de las células causa una interrupción en la circulación de la sangre, anorexia aguda y convulsiones. En menos de un minuto se pierde la conciencia, y finalmente, si la presión no se restaura, se produce la muerte.

"2001: Odisea del Espacio" realiza una representación realista de esta situación. Dave Bowman se dispone a entrar en la nave espacial Discovery, pero HAL se lo impide. HAL controla todos los accesos, y presupone que Dave no podrá utilizar la entrada de emergencia dado que su traje espacial no tiene casco. Aunque parece que el computador ha evaluado correctamente la situación, no ha contado con la posibilidad de que un hombre puede arriesgar su vida sabiendo que puede sobrevivir un corto espacio de tiempo al vacío. Para poder entrar a la nave Dave expone su cuerpo por unos segundos al vacío, entrando por una compuerta de emergencia, hasta que le es posible abrir las válvulas de represurización. Para aumentar también la sensación de realismo toda la escena se desarrolla sin sonido, hasta el momento en que el aire penetra en la zona de entrada. Como bien se dice en el anuncio de la película Alien (Alien 1979) "En el espacio nadie escucha tu grito", es decir, en el vacío no puede viajar el sonido, que requiere un medio gaseoso para propagarse.

En este contexto podemos llamar la atención sobre otro error científico que en la Tierra se comete, y que es muy habitual. En un momento dado, la trama gira sobre la persecución de Quaid por parte de un grupo de agentes del gobierno de Marte. Cuando lo han localizado se establece una comunicación entre Cohagen, el gobernador del planeta, y el jefe del grupo. Esa conversación transcurre en tiempo real, sin retrasos aparentes entre las pregunta y respuestas. ¿Cuál es entonces el problema?. Las comunicaciones actuales se realizan a través de ondas electromagnéticas. Independientemente de su tipo, todas las ondas se mueven a la misma velocidad, la de la luz. Aunque apreciable (300.000 kilómetros por segundo) la velocidad de la luz es finita. Por lo tanto, existe un cierto retraso entre la emisión y la recepción de un mensaje, dado por el tiempo que tarda la onda en cubrir esa distancia (esto se puede apreciar incluso en las comunicaciones telefónicas vía satélite, aunque la demora en ese caso es una fracción de segundo). En el caso de comunicaciones entre Marte y la Tierra, y dependiendo de la posición relativa entre los planetas, el tiempo que tardaría una llamada en cruzar la distancia que los separa es entre cuatro y veinte minutos. Imaginemos lo que sería escuchar una representación realista de esta conversación, y podemos entender por qué no es un recurso de narración adoptado por los guionistas en general. Problemas mucho peores son los que afrontan las películas cuyo escenario no es el Sistema Solar, sino una galaxia entera, como en la saga de películas de La Guerra de las Galaxias y Star Trek. En estos casos, el retraso en las comunicaciones podría durar hasta decenas de miles de años, si fuera representado correctamente.

No necesariamente un error, pero un punto más sutil, se presenta más adelante en Desafío Total cuando Quaid viaja a Marte, lo cual aparentemente lo puede hacer sin esperas ni demoras. El problema no es el viaje en sí, sino que se transmite la idea al espectador que trasladarse a los planetas no entraña más dificultades que las de una travesía en avión. La realidad es que el viaje interplanetario es un problema muy complejo. Cuando se desea viajar a un planeta, digamos Marte, tanto éste como la Tierra se están moviendo uno con respecto al otro, orbitando alrededor del Sol. Si queremos llegar a Marte de una manera económica, es necesario elegir la órbita que consuma menos combustible. Al comienzo del viaje estamos en la órbita de la Tierra, el punto más cercano al Sol en nuestro viaje, y al final de la trayectoria se intercepta la órbita de Marte, siendo el punto más lejano al Sol. La trayectoria de mínimo consumo de energía se llama la órbita de transferencia de Hohmann. Se debe calcular cuidadosamente el momento de lanzamiento para que la nave se encuentre con Marte cuando llegue a su órbita. Esto implica la elección de la llamada "ventana de lanzamiento", que corresponde al momento óptimo donde esta trayectoria se puede seguir. En el caso de Marte esta oportunidad ocurre aproximadamente cada dos años. Por todo lo expuesto podemos concluir que es poco probable que los viajeros del futuro puedan elegir arbitrariamente las fechas en las cuales pasarán sus vacaciones en los planetas cercanos.

#### 4. PARA QUE SIRVEN LAS ATMÓSFERAS PLANETARIAS

ESCENA. Calle de Venusville. Día.

Quaid le da a la ninfa una manera, y ella sonríe en agradecimiento. Quaid y Benny continúan caminando.

QUAID  
Dime algo. Todos son psíquicos, no es cierto?  
Que paso con ellos?

BENNY  
Cúpulas baratas. Y no hay aire para protegerlos de los rayos.

La segunda parte de la historia transcurre en Marte. Una nave espacial aterriza verticalmente sobre un espaciopuerto. Los colonos del planeta viven en recintos presurizados, porque, como ya sabemos del comienzo de la película, la atmósfera es de muy baja presión. Eso, por lo que vemos, no disuade a los habitantes de construir edificios con una alarmante cantidad de ventanas altamente vulnerables a las explosiones, interesante desde el punto de vista del drama cinematográfico, pero por supuesto no muy razonable. La atmósfera respirable se tiene que sintetizar, y tiene un precio. Luego de llegar a Marte, Quaid visita Venusville, la "zona roja" de la ciudad capital. Vemos que se encuentra con humanos desfigurados y mutantes (el jefe de la resistencia, Kuato, es uno de ellos). Cuando pregunta a que se debe esto su acompañante le comenta que estos colonos vivían en cúpulas baratas, que no eran suficientes para protegerlos de los rayos. A través de la película entendemos que la falta de atmósfera en Marte no permite, a diferencia de la Tierra, protegerlo de la parte de la radiación solar que podría producir mutaciones a nivel celular.

A finales del Siglo XX está claro para la humanidad la importancia de la atmósfera terrestre como agente de protección para el desarrollo de la vida. Sirve como escudo de la radiación solar, estabilizador de la temperatura de la superficie, y proveedora de la exacta mezcla de gases que nos permite respirar. Nuestros cuerpos están adaptados para funcionar a una determinada presión, fijada por el gas en la atmósfera terrestre, y que depende de la densidad del gas y de la temperatura. Nuestra atmósfera está compuesta principalmente por nitrógeno (78%), oxígeno (21%), dióxido de carbono (1%) y otros gases, junto con vapor de agua, que se relaciona con la temperatura y humedad del aire.

La atmósfera nos protege de los efectos dañinos de la radiación del espacio, que podemos separar en dos clases. En primer lugar, existe la radiación ultravioleta proveniente del Sol, de cuya exposición excesiva debemos prevenírnos dado que produciría quemaduras en la piel y enfermedades tales como cánceres cutáneos. En segundo lugar, pero no menos importante, tenemos en el espacio radiación ionizante, extremadamente peligrosa puesto que puede destruir las uniones químicas de las moléculas que forman las células y causar finalmente la muerte del organismo. Por ejemplo, nuestra atmósfera nos protege de los rayos cósmicos, (partículas cargadas de muy alta energía que se observan en el espacio) cuyo efecto se ve en la creación de los llamados cinturones de Van Allen, formados por el efecto del campo magnético terrestre atrapando las partículas de rayos cósmicos que inciden sobre la Tierra.

El efecto estabilizador de la temperatura se produce a través del llamado efecto invernadero, con este nombre se designa al proceso por el cual parte de la radiación que atraviesa la atmósfera y que luego se transforma en radiación térmica es bloqueada por la misma. De esa manera la temperatura se mantiene en el rango en que puede darse la evolución de la vida tal como la conocemos. El dióxido de carbono juega un papel importante en este proceso, pero en Marte, debido a su poca cantidad, el efecto es mínimo. Por otro lado, en Venus la atmósfera está compuesta principalmente de dióxido de carbono, con lo cual el efecto que la radiación solar quede atrapada en la atmósfera, elevando las temperaturas en la superficie a entre 600 y 1000 grados, haciendo el planeta inhabitable.

## 5. TRANSFORMANDO UN PLANETA: TIERRAFORMACIÓN

ESCEÑA: Interior del Reactor Noche

Quaid y Melina miran hacia el reactor construido por los alienígenas  
La construcción es titánica, y se extiende sobre el interior  
hueco de la Montaña Pirámide

QUAID  
Cohaagen sabe que produce aire. Pero el bastardo no  
quiere encenderlo

MELINA  
Por supuesto que no. Si Marte tuviera atmósfera, el  
perdería el control.

QUAID  
El núcleo de Marte es hielo. El reactor lo funde y  
libera oxígeno

Tierraformación (una traducción libre que he adoptado de la palabra inglesa terraforming) es el método por el cual se adapta una atmósfera planetaria y se la hace semejante a la de la Tierra, a fin de transformarlo en habitable para el hombre. En las películas donde se usa este elemento como parte de la historia no se dan mayores explicaciones, presuponiendo que el espectador conoce del tema. A veces el proceso se presenta como un fenómeno drástico, como por ejemplo en la película de la serie de Star Trek Star Trek II: La Ira de Khan (Star Trek II: The Wrath of Khan 1982). Allí todo un planeta es reformado en unos pocos minutos a través de una especie de dispositivo llamado "efecto Génesis" que impacta sobre la superficie y produce una completa transformación a nivel atómico (los detalles técnicos de como construir semejante mecanismo quedan para los ingenieros).

Una aproximación más realista aparece en Aliens (Aliens 1986). La Tierraformación se presenta como una actividad desarrollada en el futuro, con compañías que tienen como una de sus ramas el negocio de la transformación de planetas. En el caso de la película la compañía se llama Weyland-Yutani, una corporación multiplanetaria con diferentes ramas de operación. Sabemos que se dedica a la minería (Alien) y también a la explotación y modificación de planetas (en Aliens). En el planeta LV-426 (donde se encontraba la nave espacial de Alien) tienen una estación donde máquinas gigantescas se ocupan de hacer el aire respirable. En la película se llaman colonias de "quita y pon" ("shake-'n'-bake" colonies, en inglés). De alguna manera, se interpretan estas máquinas como procesadores de atmósferas. Irónicamente, el lema de esta compañía, como se puede ver en Aliens, es "Construimos mejores mundos". Como queda claro en la trama de Aliens, los ingenieros a cargo de las operaciones de estas plantas hablan de procesos que duran décadas para conseguir poder alterar la atmósfera de un planeta.

Varios son los requerimientos para poder transformar un planeta y hacerlo habitable por humanos. Precisamos en primer lugar una atmósfera para respirar, con suficiente oxígeno para que nuestro metabolismo funcione, pero no excesivo (como se hace notar más abajo) porque en ese caso tendríamos una atmósfera altamente inflamable, y en la cual los incendios serían una pesadilla. Otros gases son necesarios, por ejemplo el dióxido de carbono para generar un efecto invernadero que permita mantener la temperatura del planeta. La presión del gas tiene que ser la suficiente para que el oxígeno pueda asimilarse en la corriente sanguínea. La estabilidad de temperatura significa la posibilidad del desarrollo de vida vegetal y animal. La temperatura debe de ser lo bastante elevada para que exista agua en estado líquido. El suelo debe de poseer los nutrientes necesarios para que las plantas puedan existir. Y, finalmente, dado que estamos hablando de modificaciones a muy largo plazo, la atmósfera planetaria debe de ser lo suficientemente apreciable para poder retener el gas respirable que producimos, y no

perderla en unos pocos miles de años.

Marte ha sido muchas veces usado como el candidato ideal para experimentar las futuras técnicas de ingeniería planetaria en un no muy lejano futuro. Como hemos explicado previamente, en el pasado el planeta tuvo un clima más templado y posiblemente agua, como se puede deducir de los accidentes geográficos que aparecen en las fotografías. Sin embargo, esas condiciones se perdieron cuando el dióxido de carbono que producía el efecto invernadero responsable de la atmósfera se absorbió de nuevo en la superficie. Si fuera posible liberarlo en condiciones controladas se originaría un calentamiento del planeta, que puede concluir creando una atmósfera con una presión del orden de 300 to 600 milibares. En esas condiciones los futuros habitantes de Marte necesitarían equipos para respirar, pero no trajes presurizados. Con el calentamiento de la superficie el agua se descongelaría, y las condiciones básicas para el desarrollo de vida vegetal podrían cumplirse. La clave para transformar el planeta consiste en provocar un calentamiento artificial, e ideas muy interesantes han sido propuestas: utilizar espejos en órbita, colisionar asteroides con abundante amoniaco sobre la superficie (el amoniaco es una agente que produce el efecto invernadero) o producir halocarbonos masivamente. Mecanismos como los descritos requerirían (optimistamente) varios miles de años para comenzar a dar resultados observables. La paciencia del espectador posiblemente no aguantaría tanto, y desde el punto de vista dramático es insatisfactorio que la solución de un problema la alcancen los descendientes del protagonista.

En Desafío Total la solución es expeditiva: en una cueva en el interior de Montaña Pirámide, existe agua congelada (recordemos que es posible que exista agua en esas condiciones en Marte). El reactor que ha sido construido por una raza ya extinguida caliente y evapora el agua y produce aire respirable. Aunque el argumento parece plausible, hay razones de peso que hacen imposible el esquema planteado para transformar el planeta. En primer lugar, aunque fuera posible fundir el agua de Marte no está claro como transformarla en oxígeno, aunque vagamente se sugiere que es un material marciano, el "turbinium" el que reacciona con el agua para producir el oxígeno respirable. Y éste es el menor de los problemas. El oxígeno es absolutamente necesario para la vida; cuando respiramos lo absorbemos del aire, y lo incorporamos a las células para hacer funcionar correctamente nuestro organismo. Pero una atmósfera de oxígeno es tremadamente inflamable (la atmósfera terrestre, por ejemplo, está compuesta mayormente de una combinación de nitrógeno y oxígeno). Finalmente, tenemos el problema de como esa expansión de aire se podría producir en escala planetaria de una manera tan rápida como se muestra, puesto que generaría tremendas ondas de choque. Toda pretensión de realismo se acaba en este punto a fin de alcanzar una conclusión satisfactoria para la película.

## 6. EPILOGO

A través de estas páginas he querido transmitir al lector un poco de todo lo que es posible aprender de astronomía mirando una película (¡no necesariamente buena!). Espero que esto los aliente a futuras exploraciones, aprendiendo y divirtiéndose al mismo tiempo. Y cuando su paciencia ante incoherencias, contrasentidos y errores científicos alcancen su límite recuerden las palabras del director británico Alfred Hitchcock que están al comienzo de este texto: Es sólo una película.

Quiero expresar mi agradecimiento al Director del Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife, Dr. Juan Antonio Belmonte, por su amable invitación a participar en el ciclo de conferencias sobre el que este texto se basa. Gran parte de la información cinematográfica discutida fue obtenida gracias a la Internet Movie Database (<http://uk.imbd.com/>). Las fotografías en el texto son cortesía de la NASA.

EXTERIOR: Exterior de Marte - Montaña Pirámide

*La nube blanca que se ha expandido como un geyser desde la cumbre de Montaña Pirámide se expande en todas direcciones. El cielo de Marte se va transformando de rojo a azul.*

MELINA  
Que sucede?

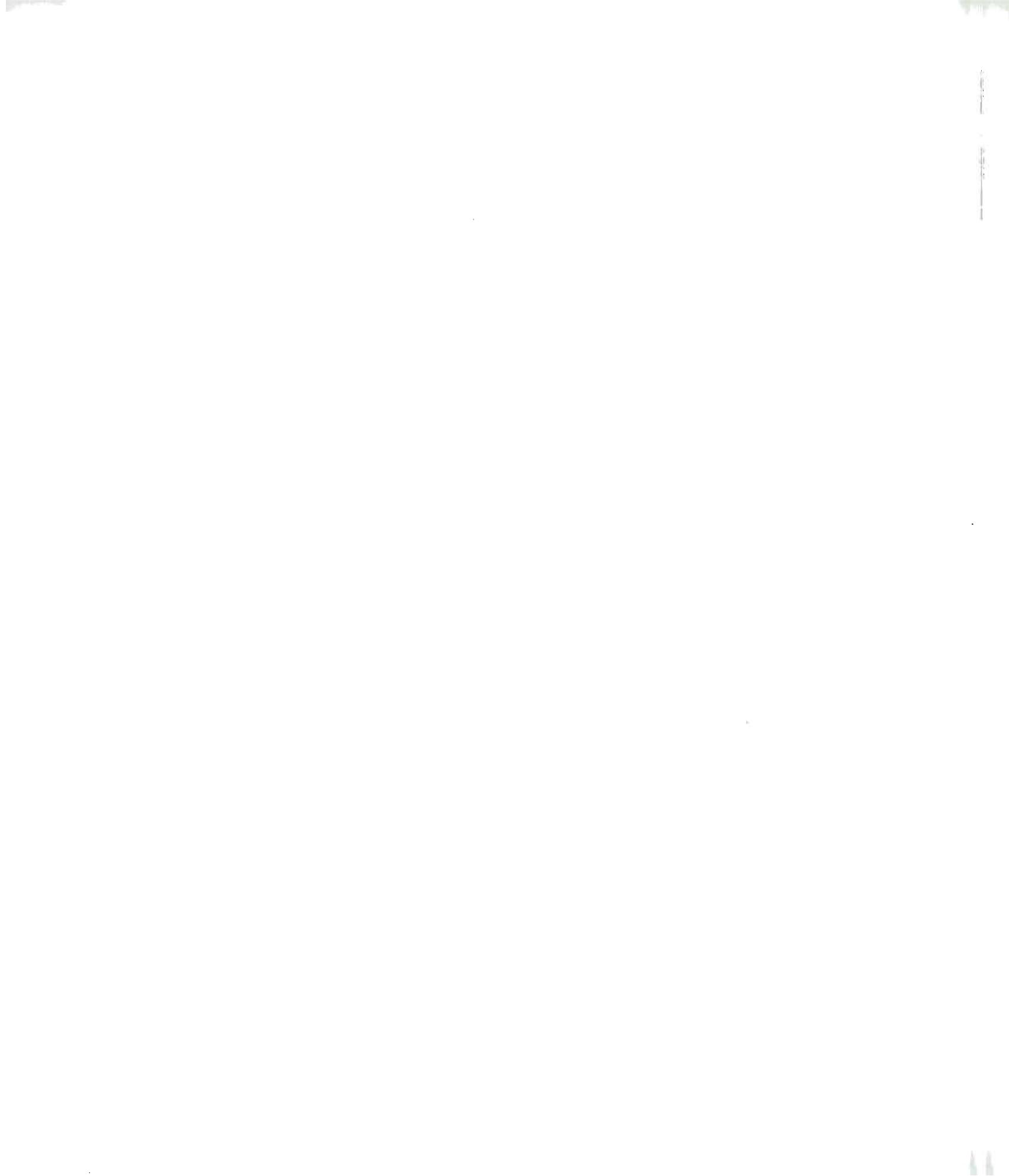
QUAID  
Acabo de tener un terrible pensamiento, ¿ Que pasaria si todo esto fuera un sueño?

MELINA  
Entonces bésame rápido, ....antes de que despiertes.

*Quaid la toma en sus brazos, ....y se besan.*

FIN





## CANARIAS: UN LUGAR PRIVILEGIADO

Antonia María Varela Pérez

Instituto de Astrofísica de Canarias  
Proyecto del Gran Telescopio Canarias

## 1. INTRODUCCIÓN HISTÓRICA

Los Observatorios Canarios son dos de los más estudiados y privilegiados lugares para las observaciones astronómicas. La historia de la Astronomía en Canarias está llena de numerosas expediciones científicas desde países remotos, muchas de ellas realizadas por astrónomos atraídos quizás, en un principio, por el exotismo de estas islas, su paisaje volcánico y su cálido clima. Una amplia recopilación de estas campañas es recogida por el Prof. F. Sánchez en *Vistas en Astronomy* (1985).

En el verano de 1856, y siguiendo la sugerencia de Sir Isaac Newton en *Opticks* (1730), de que los telescopios deben ser instalados donde la atmósfera sea más serena y estable, tal y como se encuentra probablemente en las cimas más altas de las montañas, por encima de la capa de nubes, el profesor C. Piazzi Smyth (Astrónomo Real de Escocia, denominación que hasta recientemente otorgaba la Corona británica a sus astrónomos más eminentes) organizó un experimento en el Monte de Guajara, en la isla de Tenerife, a 2715m de altitud (cumbre más elevada del Teide, al sur de la Caldera de las Cañadas). Smyth se desplazó a esta isla con su mujer, aprovechando para disfrutar aquí su luna de miel. Posteriormente se desplazó a Alta-Vista, cerca del actualmente conocido Pico del Teide.

El principal objeto de esta expedición era determinar cómo podrían mejorar las observaciones astronómicas eliminando el efecto de la baja atmósfera. Además, en esta expedición se tomaron medidas geológicas y metereológicas de la zona, observaciones de la luna (las primeras infrarrojas), de los planetas, de estrellas dobles, de la luz zodiacal, y de la radiación ultravioleta del Sol.

Smyth presentó estos resultados ante el gobierno británico y ante la Royal Society, antes de publicarlos en 1857 en el libro titulado *Teneriffe: An Astronomer's Experiment*. En estos trabajos destaca las claras ventajas de estas zonas de montaña, destacando la medición y detección de estrellas débiles, no detectables en Edimburgo, y la calidad de los anillos de difracción en el foco del telescopio (bajo seeing).

En Junio de 1895, Knut Angström y sus colaboradores se instalan inicialmente en el antiguo emplazamiento de Piazzi Smyth, en Alta Vista, a una altura de 3252m. Es entonces cuando se realizan las primeras mediciones "fiables" de la radiación solar a diferentes altitudes (Alta Vista, Las Cañadas, el Puerto de la Cruz, Santa Cruz y Güímar (Angström, 1901).

Posteriormente, y bajo los auspicios de L'Association International contre la Tuberculose, el Prof. Pannwitz organizó en 1910 otra misión científica con el fin de efectuar observaciones del cometa Halley en la vecindad de su perihelio. En esta expedición intervino J. Mascart, quien relata literalmente en un de sus escritos (Mascart, 1912) que "la situación de Tenerife es quizás única en el mundo: es un faro, relativamente elevado, en medio del océano. ... Esta montaña (refiriéndose al monte del Teide) es, en efecto, particularmente favorable para la investigaciones de física y de astronomía".

Muchos de los trabajos de este astrónomo del Observatorio de París fueron publicados por *Le Figaro*, y finalmente englobados en un libro titulado *Impressions et Observations Dans un voyage à Tenerife*.

A principios de este siglo XX, concretamente en 1910, hubo una expedición de observadores de Postdam a Tenerife, en la que se tomaron fotografías adaptadas a las medidas fotométricas del cometa Halley (Mascart, 1910). De estas imágenes Schwarzschild dedujo el importante resultado del decrecimiento en intensidad de la cola del cometa conforme aumenta la distancia al núcleo como consecuencia de un decrecimiento en densidad.

En este mismo año, Müller y Kron obtienen en Tenerife una serie de medidas que suponen una de las mejores verificaciones a la teoría de la difusión molecular de la luz aplicada a la atmósfera.

El eclipse total de sol visible desde las islas Canarias en 1959 atrajo de nuevo la atención de numerosos investigadores y astrónomos, lo que llevó de nuevo a establecer contactos e intereses de crear un observatorio astronómico en estas islas (idea incluso sugerida antaño por Mascart, pero truncada con la I Guerra Mundial).

Es entonces, en 1960, cuando el Prof. F. Sánchez junto con el Prof. Torroja y A. Romaña deciden iniciar lo que son ya los primeros pilares de los actuales observatorios canarios.

A partir de este año se inician una serie de campañas de prospección en las zonas que son hoy el Observatorio del Teide (O.T., Tenerife) y el Observatorio del Roque de los Muchachos (O.R.M., La Palma) (Torroja y Sánchez, 1967; Sánchez—Martínez, 1968). A partir de una estadística realizada por el Prof. F. Sánchez (1970) con datos del Observatorio Meteorológico de Izaña (desde 1944 a 1966) se ratifica que “las condiciones atmosféricas locales son muy favorables para un emplazamiento astrofísico: gran número de días al año en que se puede observar, transparencia generalmente cercana a la atmósfera teórica pura y seca, y también la calidad de las imágenes astronómicas parece buena”.

Fue primeramente el Observatorio de Burdeos el que instala un telescopio fotoeléctrico en Izaña en 1964. Posteriormente, en 1972, se emplazará un espectrógrafo y un telescopio infrarrojo de 1.5m (actual Telescopio Carlos Sánchez). Desde entonces, y hasta nuestros días, ha ido creciendo progresivamente el interés internacional por estos emplazamientos, contribuyendo a la creación de lo que son ya hoy dos de los más prestigiosos y relevantes observatorios astronómicos a escala mundial.

## 2. ¿ POR QUÉ CANARIAS?

Tras el breve relato histórico anterior, intentemos comprender algo mejor las peculiaridades geográficas y climatológicas que determinan que nuestros Observatorios reúnan cualidades excepcionales dentro del marco de la observación astronómica.

Existen una serie de factores climatológicos y geográficos que determinan la excelente calidad del cielo de Canarias para las observaciones astronómicas.

Canarias se encuentra próxima al Ecuador, a una latitud de unos 28° Norte y entre 16° -18° de longitud Oeste. Esto supone tener visibilidad de todo el Hemisferio Norte celeste, y parte del Sur, así como encontrarse lejos de las tormentas tropicales (Figura 1).

En cuanto a la climatología de estas islas, la corriente marina fría que las baña, así como la presencia de vientos alisios, favorecen la presencia de temperaturas suaves y moderadas (...“entre 18 y 24°, entre la noche y el día, clima que favorece perfectamente a los enfermos y especialmente a los convalecientes”, Mascart (1912)) y en general, su benignidad. Por otra parte, debido a la inversión térmica, existen dos capas de la baja atmósfera o troposfera bien diferenciadas y separadas físicamente por el llamado “mar de nubes” o estratocúmulos. Por encima de esta capa, los vientos dominantes son secos y disminuyen

considerablemente los movimientos turbulentos, la atmósfera es más transparente y además este mar de nubes evita en gran medida la contaminación lumínica debida a poblaciones cercanas (ver sección 4).



Figura 1. Localización de las Islas Canarias. Están indicadas la longitud (Oeste) y latitud geográficas (Norte) (F. Sánchez, 1985).

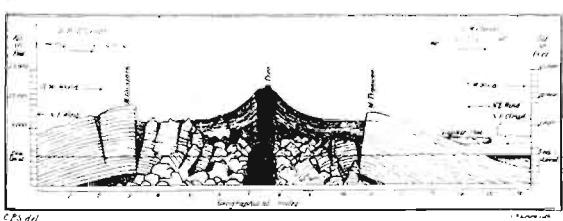


Figura 2. Sección meridional realizada a través del Teide y su atmósfera característica en verano (Smyth, 1858).

La altitud de los Observatorios del Instituto de Astrofísica de Canarias, situados a 2400m sobre el nivel del mar, por encima de la capa de inversión térmica, garantiza que los telescopios estén por encima de las nubes (asimismo, la presencia de cirros a esta altura es igualmente poco frecuente). Como ilustración de esta fenomenología presentamos en la Figura 2 un plano extraído de un escrito de P.Smyth (1858).

Por lo tanto, "la gran altitud de las islas de Tenerife y La Palma, las convierte en verdaderas torres de observación situadas en una atmósfera sin turbulencia, estabilizada por el océano" (Cuidemos nuestro Cielo, publicación del IAC).

### 3. DESCRIPCIÓN DE LOS OBSERVATORIOS CANARIOS

Abarcando una superficie de 52 hectáreas y a una altitud de 2390m, se encuentra ubicado en Izaña, en la Isla de Tenerife, el Observatorio del Teide, a una latitud de 28°18'00" Norte y una longitud geográfica de 16°30'35" Oeste.

El primer grupo de investigación astronómica (Medio Interplanetario) se estableció en la Universidad de La Laguna, en 1964. El segundo grupo fue el de Física Solar, tomando parte fundamental en su creación el Prof. Kiepenheuer (Director de Fraunhofer Institut). Se instala así en 1964 un instrumento propio (un telescopio refractor solar Razdow de 25cm) en la torre de 13m, que comenzará a ser operativo en 1969. Fue ya a partir de 1970 cuando comienzan a montarse, bajo fructíferas colaboraciones internacionales, distintos telescopios e instrumentos diseñados por el propio IAC y por otras instituciones y Universidades extranjeras. Todos ellos aparecen resumidos en la tabla 1.

El Observatorio del Teide fue inaugurado formalmente en 1970, y en 1973 era creado el Instituto de Astrofísica en la Universidad de La Laguna, como precursor del actual IAC.

Fue también en los años setenta cuando comienzan las primeras exploraciones en las áreas cercanas al Roque de los Muchachos y Fuente Nueva, en la Isla de La Palma.

Los contactos oficiales entre las diferentes instituciones europeas se inician en 1973.

En 1975, el Ayuntamiento de Garafía, en la Isla de La Palma, acuerda conceder 189Has en el Roque de los Muchachos, a la Mancomunidad Provincial Interinsular de Cabildos de la Provincia de Santa Cruz de tenerife, con el propósito de instalar allí un observatorio astronómico (si bien, no fue transferido formalmente hasta 1978). En 1976 comienzan las obras de construcción de una carretera de acceso al Roque de los Muchachos, financiada por diferentes instituciones insulares (Mancomunidad de Cabildos, Cabildo de La Palma e ICONA).

En este mismo año, un grupo representativo de países manifiestan su interés en por el futuro Observatorio, y en 1977 se forma el CCI (o Comité Científico Internacional) para iniciar los planes de construcción del mismo.

Este proceso no fue siempre sencillo y hubo que superar algunos inconvenientes, como por ejemplo, las objeciones impuestas en 1979 por el Ministerio de Defensa sobre la imposibilidad de construcción de este observatorio por su incompatibilidad con la instalación de ciertos radares para la defensa del aire.

Mientras tanto, en la Universidad de La Laguna se inician los estudios de una nueva especialidad en la Licenciatura de Ciencias Físicas, la especialidad de Astrofísica, con el propósito de comenzar a formar a nuevos y jóvenes investigadores en esta rama. Se multiplican el número de encuentros y escuelas internacionales bajo el mismo propósito.

En 1979 se firma un Acuerdo de Cooperación en Astrofísica entre distintos países,

entre los que figuran España, Dinamarca, Gran Bretaña y Suecia. Posteriormente, la República Federal Alemana se adhiere a este Acuerdo.

En la actualidad son numerosos los telescopios e instrumentos operativos en el Observatorio del Roque de los Muchachos, los cuales son resumidos en la tabla 2.

A esta lista debemos incluir el telescopio solar abierto holandés DOT de 45cm en Izaña y el telescopio nocturno italiano Galileo TNG 3.5m y la serie de detectores de rayos cósmicos HEGRA en el ORM, inaugurados oficialmente en Junio de 1996.

Como puede apreciarse, el crecimiento de los Observatorios Canarios ha sido, en estos últimos años, vertiginoso, apostando por el establecimiento en los mismos de grande telescopios de última generación (10m).

#### **4. CAMPAÑAS DE PROSPECCIÓN ASTRONÓMICA.**

##### **4.1 DESCRIPCIÓN GENERAL.**

El futuro emplazamiento en los Observatorios de Canarias de grandes telescopios, crea la necesidad de continuar y diseñar nuevas e intensivas campañas de prospección de la calidad astronómica del cielo y caracterización geológica y meteorológica de los mismos.

El objetivo fundamental de estas campañas de site-testing o de prospección astronómica iniciadas ya en los años sesenta e intensificadas en los últimos años, consiste en determinar y caracterizar la calidad astronómica de los observatorios.

Fue a partir de la II Guerra Mundial cuando el desarrollo tecnológico y científico impulsa a muchos astrónomos a buscar las zonas más idóneas para el establecimiento de sus telescopios. Los antecedentes históricos favorables de nuestras islas y sus condiciones de estabilidad y transparencia, las hicieron punto de mira para estas primeras campañas.

El inicio de estas campañas fue arduo (F.Sánchez, 1985) e incluso la determinación de los parámetros idóneos para la definición de la calidad del cielo no estaba unánimemente establecida.

Por otra parte, la coincidencia de una expedición corta durante un período coincidente con la presencia de polvo del Sahara (o siroco), llevó a algunos astrónomos a desaconsejar frente a la comunidad astronómica europea a las Islas Canarias como posibles enclaves de observatorios astrofísicos. Esto quizás contribuyó a la instalación de telescopios alemanes y franceses en el sur de la península y en Hawaii respectivamente, en lugar de Canarias.

Un estudio realizado por el Prof. F.Sánchez en Urania (1970) revela que, de un período de veinte años, sólo en el 2.2% de los días despejados del año se acusa la presencia apreciable de polvo en suspensión en la atmósfera.

Tras diversas discusiones y estudios realizados en los últimos años, parecen haberse definidos los parámetros relevantes a medir periódicamente para la caracterización de un Observatorio astronómico, como son: la extinción, el brillo del fondo del cielo, la contaminación luminosa en líneas, el contenido de vapor de agua, los diferentes factores metereológicos (velocidad y dirección del viento, humedad, temperatura del aire y del suelo, presión atmosférica, distribución de nubes y polvo, ...) y el seeing. Estos podrían clasificarse en los siguientes grupos.

## **A) Calidad Fotométrica y Espectrofotométrica:**

### **- Extinción atmosférica.**

Se trata de determinar las dependencia espectral de la extinción producida por la atmósfera terrestre sobre las imágenes astronómicas y cómo varía con la cantidad, tipo y distribución de polvo. Se trata de determinar si la atmósfera es gris (D.Jones, 1986) o presenta un término de color (con un máximo en torno a 1micra).

### **- Brillo del fondo del cielo.**

Consiste en determinar el límite de profundidad observable en un determinado tiempo de exposición, es decir, determinar cuál es el objeto más débil que podemos detectar.

Existen una serie de parámetros naturales influyentes: procesos físicos de la atmósfera terrestre, la Luna, etc. y otros artificiales: contaminación luminosa por poblaciones cercanas.

Estos factores son variables (por ejemplo, en los naturales tenemos las diferentes fases de la Luna, la capa de inversión térmica, etc.), y dependen de la longitud de onda.

### **- Contaminación por líneas.**

La contaminación luminosa no sólo contribuye con un fondo generalizado continuo en  $\lambda$  sino que además, presenta ciertas líneas de emisión muy intensas a longitudes de onda de interés astronómico. En particular: la línea de mercurio  $Hg\lambda 4358$  cae junto a la de  $[OIII]\lambda 4363$  (fundamental para determinar la temperatura electrónica de las nebulosas), y el doblete de sodio  $Na\lambda\lambda 5892,5899$  caen sobre las mismas líneas en absorción que se forman en el medio interestelar.

Por otra parte, al igual que hablamos de contaminación en líneas, hay que mencionar igual contaminación en el continuo.

## **B) Calidad Infrarroja:**

### **- Espectrofotometría.**

### **- Vapor de agua.**

La determinación de la cantidad de vapor de agua en la columna de la atmósfera por encima del Observatorio es fundamental para su caracterización en el IR, ya que en este rango espectral el agua presenta muchas bandas de absorción. Para ello es preciso disponer de información adicional de satélites (Charine, 1992) sobre el ciclo hidrológico terrestre y la utilización de radiómetros que lo midan sistemáticamente sobre el terreno.

## **C) Óptica Astronómica:**

### **- Medidas de seeing.**

Si bien entraremos en más detalles sobre este concepto a continuación, definámoslo en términos generales como "la anchura a media altura, en segundos de arco, de la imagen telescopica de una fuente puntual"

Este término ha sido y es la pieza clave de estudio durante los últimos años. Es fundamental tenerlo caracterizado. En ello han intervenido diferentes países a través de varios proyectos, como por ejemplo en La Silla (Chile, ESO), y también en el IAC (en colaboración con la Universidad de Niza).

Necesitamos conocer, a su vez, la relación con otros parámetros: polvo en suspensión, humedad, temperatura, nubes, efecto de la cúpula del telescopio, etc.

#### **- Alta Resolución.**

No sólo es preciso saber que el seeing es bueno, sino también precisar la estadística de buen seeing ( $\leq 0,5''$ ). Es fundamental conocer la contribución de la capa de turbulencia. Pensando en nuevas técnicas para grandes telescopios es necesario estudiar los parámetros relevantes del desarrollo de alta resolución espacial y de óptica activa (ángulo isoplanático y tiempo de vida speckle) (Muñoz-Tuñón y Fuentes, 1990)..

### **4.2 CONTAMINACIÓN LUMÍNICA**

Una noche oscura, sin luces artificiales, muestra un cielo lleno de estrellas. Llamamos contaminación lumínica al brillo o resplandor de luz en el cielo nocturno producido por la reflexión y difusión de la luz artificial en los gases y partículas del aire. Este resplandor impide, en ocasiones, la observación de objetos débiles o de bajo brillo.

Esta contaminación se produce por un diseño y utilización inadecuados de luminarias en las poblaciones. Esta luz, mal apantallada, se envía directamente al cielo, malgastándose en gran medida (hasta un 50%, en las esféricas o tipo globos).

Esta contaminación no sólo nos afecta a la comunidad astrofísica, sino que también puede repercutir negativamente en la seguridad vial de los conductores, y en algunas especies animales que se deslumbran y mueren en este tipo de instalaciones.

Canarias dispone ya, por ello, de una Ley de Protección del Cielo. Con ella se pretende regular la iluminación de exteriores, la potencia radioeléctrica, las industrias contaminantes y el tráfico aéreo sobre los Observatorios. Para la aplicación misma de esta Ley se ha creado en el IAC la Oficina Técnica de Protección de la Calidad del Cielo (OTPC), lo que está suponiendo un ahorro de energía y dinero a nuestros ayuntamientos.

Siguiendo esta línea, el IAC ha publicado una serie de folletos informativos en los cuales se recogen las diferentes medidas que los ciudadanos podemos aplicar para conseguir mantener un cielo cada vez más limpio.

### **4.3 MEDIDAS DEL SEEING**

Podemos destacar que el seeing es actualmente fundamental en la definición de la calidad de las imágenes telescopicas, y por lo tanto, de la calidad astronómica del cielo.

Dado el alto coste de los telescopios de gran diámetro y el avance de las técnicas de imagen (alta resolución angular), es de máxima prioridad conocer la potencialidad, en términos del seeing, tanto de futuros emplazamientos astronómicos como de aquellos ya existentes. Necesitamos conocer cuáles son los mejores lugares y además asegurarnos de que los telescopios ya existentes no están afectados por la turbulencia generada por el hombre.

La turbulencia atmosférica daña seriamente la calidad de la imagen obtenida de un objeto celeste. El haz de luz procedente de estos objetos se ve afectado tanto en dirección como en intensidad, de manera constante y variable.

El término constante en el cambio de dirección del rayo de luz al atravesar la atmósfera terrestre es lo que se denomina refracción y las fluctuaciones al azar en la dirección producen el llamado efecto del seeing. El término constante de pérdida de luminosidad al atravesar la atmósfera se conoce como extinción atmosférica, mientras que las fluctuaciones no

sistemáticas de la intensidad de la luminosidad procedente de los objetos observados se denomina centelleo (Gutiérrez y Moreno, 1981).

El seeing y el centelleo se traducen en un aumento de las imágenes astronómicas con respecto al tamaño calculado teóricamente. La teoría de difracción predice que la imagen producida por un telescopio de diámetro  $D$ , a la longitud de onda  $\lambda$ , es una mancha de Airy de tamaño

$$\mathcal{E}_0 = 1.27\lambda/D$$

(si la propagación de la luz no está perturbada por inhomogeneidades del índice de refracción). Sin embargo, en el foco de un telescopio es imposible alcanzar la resolución angular teórica  $\mathcal{E}_0$ , ya que la luz procedente de estos objetos debe atravesar varias capas turbulentas de la atmósfera que perturban su propagación. La descripción clásica del seeing en astronomía viene dada por la anchura a media altura (fwhm) del perfil de una estrella  $\mathcal{E}_{\text{fwhm}}$  en segundos de arco, demostrando la experiencia que el valor del seeing es siempre superior a  $\mathcal{E}_0$ . Al estar el seeing definido en sentido de larga exposición, incluye el blurring (o ensanchamiento instantáneo de la imagen) y el image motion (o movimiento errático de la misma).

Aunque el parámetro relevante para medir la turbulencia es la integral en altura de la "constante de estructura"

$$\int_0^{\infty} C_n^2(h) dh$$

y está ligada a la geofísica, todos los monitores de seeing que se han creado están basados en métodos ópticos. La calidad de una imagen astronómica puede ser determinada por diferentes técnicas (Muñoz-Tuñón y Fuentes, 1990), diferenciadas cada una de ellas no sólo por el diseño, sino también por el tipo de detectores utilizado (el ojo, placas fotográficas, fotomultiplicadores, CCDs, etc.).

El primer conjunto de medidas fue realizado en Izaña, utilizando el método de Danjon, basado en el análisis de los anillos de difracción de las imágenes telescopicas usando grandes aumentos (Sánchez, 1970). Para ello se utilizó un telescopio refractor de 13cm.

En esta campaña se obtienen buenos valores del seeing, mayoritariamente pesado en los meses de verano; no se encuentran irregularidades sistemáticas con el azimut, y se detecta poca influencia de la dirección del viento sobre la calidad de las imágenes (ligera tendencia a empeorar con vientos de SE).

Una segunda campaña fue realizada por Bornino y Brandt (1982), midiendo directamente el parámetro de Fried  $r_0$  (Fried, 1966) que toma diferentes valores para las distintas capas de turbulencia de la atmósfera y directamente relacionado con el valor del seeing a través de la expresión  $\mathcal{E}_{\text{fwhm}} = 0.98\lambda r_0$  válida para  $r_0 \ll D$ . Para ello utilizaron un interferómetro ligado a un telescopio de 60cm.

El siguiente conjunto de medidas sistemáticas del seeing lo realizó el grupo de Edimburgo durante finales de los setenta, utilizando Polaris trail telescopes. Para ello cubrieron un número de meses estadísticamente significativo en ambos Observatorios. Si bien estas medidas han tenido que ser nuevamente recalibradas (Pike, 1984) teniendo en cuenta ciertas correcciones de resolución instrumental, errores en las medidas, distancia zenithal, etc., estos datos fueron utilizados por los británicos para la selección de la Palma como lugar idóneo para la construcción de una serie de grandes telescopios actualmente operativos en el ORM (4.2m, 2.5m y 1m).

En 1989 el CCI, empujado y financiado por el IAC dentro de una acción iniciada por el profesor Francisco Sánchez y otros miembros del CCI para dar un nuevo impulso a los Observatorios de Canarias, motivados por la ubicación en un futuro de grandes telescopios,

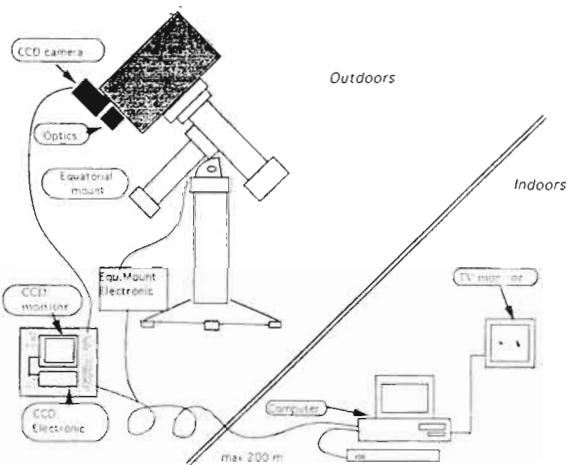


Figura 3 Esquema general del DA/IAC DIMM (Vernin y Muñoz-Tuñón, 1995)

promueven el diseño y construcción de un monitor de seeing basado en la técnica del Differential Image Motion. Este monitor, inventado por J.Vernin (de la Universidad de Niza) y C.Muñoz-Tuñón, del IAC, es actualmente comercializado por la empresa francesa LHESA Electronique.

El hardware de este instrumento (véase el diagrama expuesto en la Figura 3) consiste un telescopio reflector catadióptrico de tipo Smith—Cassegrain con una apertura de 8 pulgadas (203mm) y una longitud focal de 80 pulgadas (2032mm). El buscador utilizado en el telescopio es de 8x50 con un campo de visión de 5.2°. La cámara utilizada es CCD LH—5038 fabricada expresamente por la empresa francesa LHESA para este proyecto. Ésta posee una matriz de 550x550 pixels siendo el tamaño de cada pixel de 23 por 12 micras.

El DA/IAC DIMM fue calibrado en Chile, usando como referencia los monitores de la ESO (tres en total) que funcionan permanentemente en Monte Paranal, sede del VLT.

## 5. RESULTADOS MÁS RELEVANTES DE LAS CAMPAÑAS DE PROSPECCIÓN ASTRONÓMICA EN LOS OBSERVATORIOS CANARIOS.

### 5.1 CAMPAÑAS DE PROSPECCIÓN ASTRONÓMICA EN EL OT

En Noviembre de 1992 iniciamos una campaña intensiva con el DIMM en el Observatorio del Teide, prolongándola hasta Mayo 1994.

Nuestro objetivo es analizar las características de diferentes zonas utilizando medidas del seeing durante un año al menos en cada una, con el propósito de establecer la relación entre la calidad del mismo y las características estacionales; y durante noches completas, para igualmente tratar de encontrar alguna correlación con las variaciones climáticas.

En la selección y puesta a punto del monitor de seeing hemos contado siempre con la excelente colaboración del personal de Instrumentación y de Mantenimiento Instrumental del IAC.

En la Figura 4 mostramos un plano con las diferentes zonas donde fue ubicado el DIMM. La Zona 0 corresponde al telescopio de 1.5m Carlos Sánchez; la Zona 1 corresponde al pavimento de entrada al mismo; la Zona 2 se encuentra a unos 50m de la Zona 1; y la Zona 3 está localizada hacia el noroeste del IAC80.

En la Figura 5 presentamos una estadística de los valores de la fwhm longitudinal y transversal obtenidos durante los períodos de invierno (desde Noviembre de 1992 hasta Febrero de 1993) y verano (desde Marzo de 1993 hasta Julio de 1993) en las diferentes zonas antes indicadas en el Observatorio del Teide. El rango de valores más frecuente obtenido en el transcurso de esta campaña osciló entre 0.6 y 0.8 segundos de arco en los meses de invierno, y de 0.7 a 1.1 durante el período de verano.

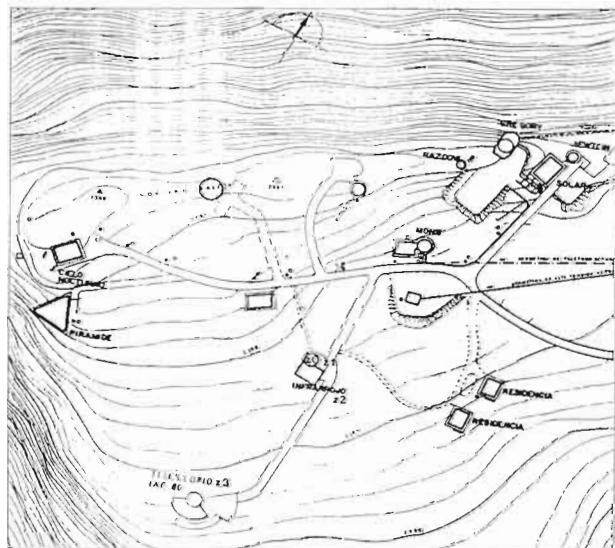


Figura 4 Zonas de prospección del seeing en el OT

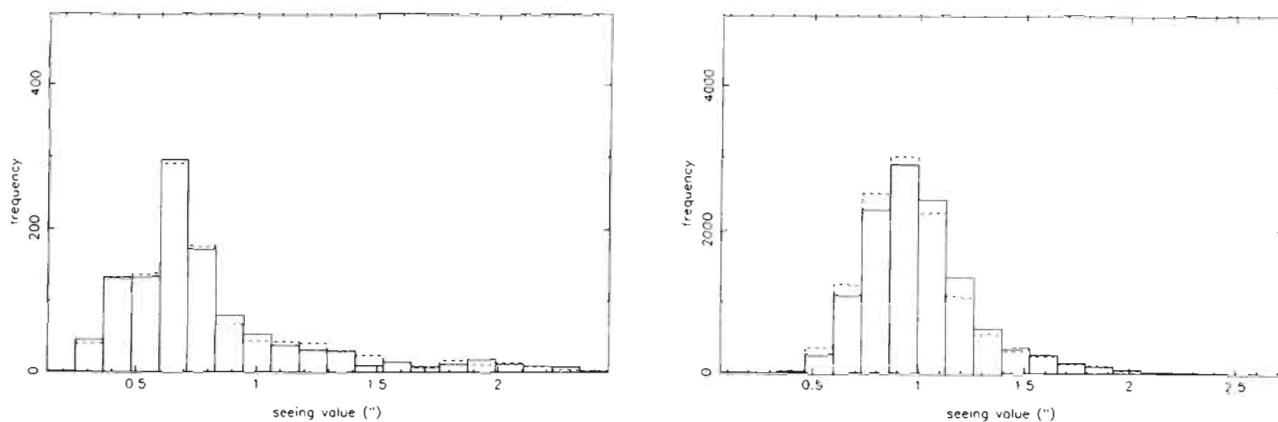


Figura 5. Estadística de los valores del seeing obtenidos durante los meses de campaña de prospección astronómica en el Observatorio del Teide, agrupados en dos períodos: invierno y verano, utilizando un diagrama porcentual que representa, en frecuencias absolutas, el número de medidas que dan un valor específico del seeing (indicado en el eje de abscisas).

El porcentaje de horas observables es del orden del 75% durante los meses de primavera y verano. En los meses de invierno, si bien el número de horas útiles desciende, el valor del seeing puede llegar a ser un promedio de 0.3" inferior al medido durante el resto del año.

Las causas del tiempo perdido fueron fundamentalmente causas naturales: vientos superiores al los 15m/s, en un 9.2% de los casos; humedad relativa superior al 70%, en un 19.4%; nubosidad cubriendo más de un 30% de cielo, en un 55.8% aproximadamente. El segundo de los aspectos más influyentes fue el ocasionado por problemas técnicos e instrumentales (motores, cableado, reajustes en la montura, etc.), en un 8.2% de los casos. El resto incluye el tiempo utilizado en montaje o desmontaje del DIMM, o a noches perdidas por tormentas, o incluso al tiempo invertido a medir el seeing a bajas alturas (entre 4° y 40° de altura sobre el horizonte), datos que fueron requeridos por el proyecto OGS de ARTEMIS (ESA), recientemente instalado en el Observatorio del Teide.

Por otra parte, durante cada noche de observación hemos tomado valores medios de la temperatura, humedad y velocidad del viento, así como de las distribuciones de nubes y polvo en el Observatorio del Teide. Estos parámetros, junto con los valores medios del seeing han sido obtenidos durante la primera y segunda mitad de la noche, con el propósito de encontrar alguna correlación entre estos factores climáticos y el valor del seeing. Un análisis exhaustivo de estos resultados se presentará y discutirá en una próxima publicación (C. Muñoz-Tuñón, J. Vernin y A.M. Varela, en preparación).

De esta campaña podemos concluir (comunicación privada), que no existen variaciones significativas del valor del seeing medido en las diferentes áreas señaladas anteriormente en el OT, si bien, para completar la campaña sería preciso continuarla durante al menos un año en cada una de las diferentes zonas para poder hacer así un estudio comparativo.

Como era de esperar, el número de noches fotométricas es inferior durante los meses de invierno, sin embargo, su calidad fue ligeramente superior a la alcanzada en los meses de verano (resultado no siempre generalizable).

Por otra parte, si bien los valores del seeing pueden presentar fluctuaciones significativas durante la misma noche, no parece encontrarse un comportamiento sistemático del seeing frente al tiempo universal. En general, no se alcanza un valor del seeing más estable que 0.2"-0.3" durante cortos períodos (12 a 18 minutos). Esta es también la dispersión típica del valor medio del seeing.

Del comportamiento estadístico de las medidas obtenidas para el seeing en Izaña, podemos concluir que los valores son considerablemente bajos, alcanzando máximas frecuencias entre  $0.5''$  y  $0.9''$ , lo que lo confirman como un enclave astronómico excelente.

Puesto que estas medidas fueron realizadas a nivel del suelo, incluyendo por tanto el efecto de la turbulencia en la baja atmósfera, consideramos que, de ser corregidas de tal efecto estos valores del seeing se verían aún ligeramente favorecidos.

Durante este período no fue posible obtener medidas ni conclusiones relevantes en cuanto al comportamiento del seeing frente a los cambios y propiedades climatológicas. Actualmente disponemos de dos mástiles de 12m equipados con sensores metereológicos estándar, ubicados en el ORM, los que nos permitirán hacer un estudio más conciso al respecto. La Cadera de Taburiente podría también producir fluctuaciones locales en el grosor de las capas de la superficie. La estadística de valores del seeing obtenidos por los DIMMs con muestreos de medio minuto determinará cualquiera de estos efectos.

## 5.2 CAMPAÑAS DE PROSPECCIÓN ASTRONOMICA EN EL ORM

El 9 de Junio de 1994, el DAIAC DIMM fue trasladado y montado en la isla de La Palma, con el propósito de iniciar una campaña de medidas cerca del futuro enclave del Telescopio de 3.5m Galileo, hasta Septiembre de 1995, en el que comenzó a ser operativo para la caracterización y búsqueda del mejor emplazamiento para el futuro Gran Telescopio Canario (10m).

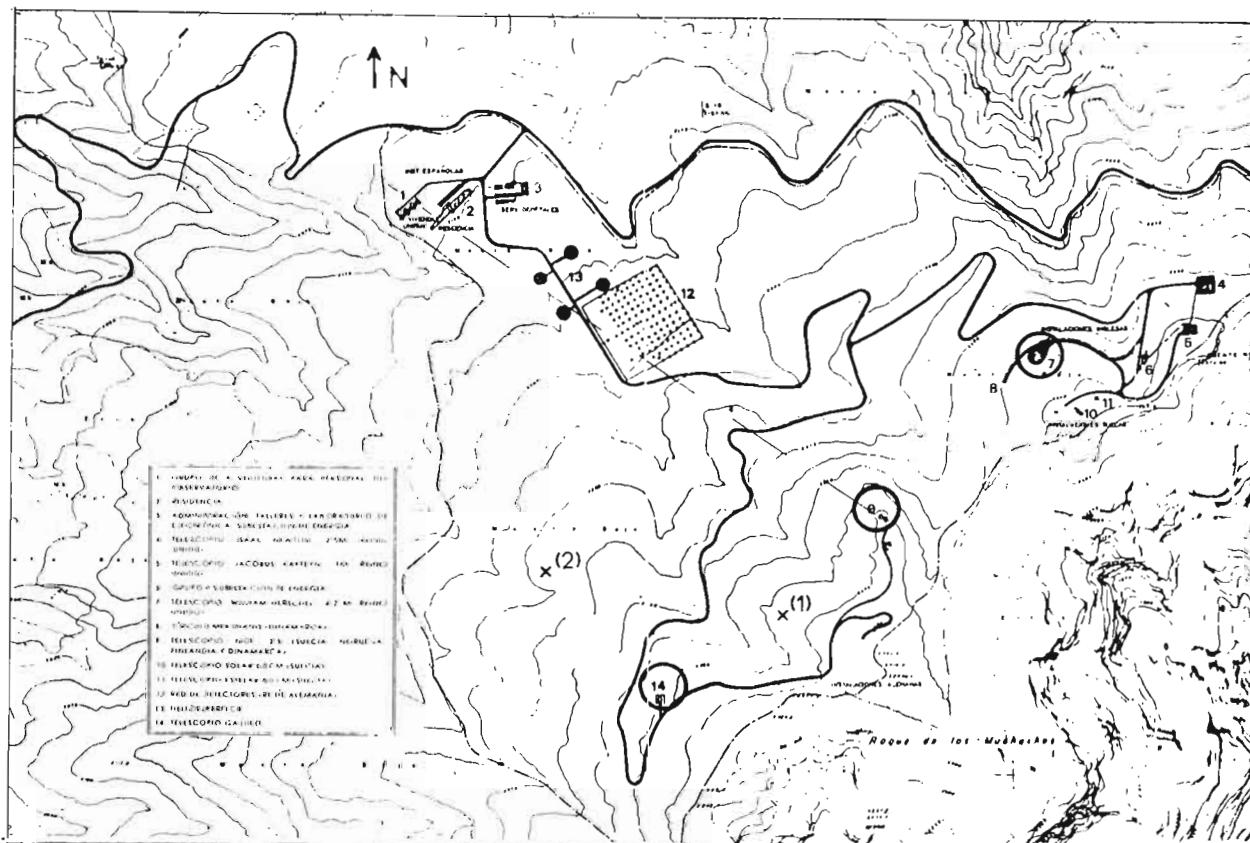


Figura 6. Zonas de prospección astronómica en el ORM. Los lugares indicados en círculo corresponden a las campañas realizadas primeramente en el telescopio nórdico NOT, y posteriormente y de forma simultánea en el telescopio británico William Herschel WHT y en el telescopio italiano TNG. Las zonas indicadas con los números 1 y 2 corresponden a los posibles enclaves del gran telescopio de Canarias.

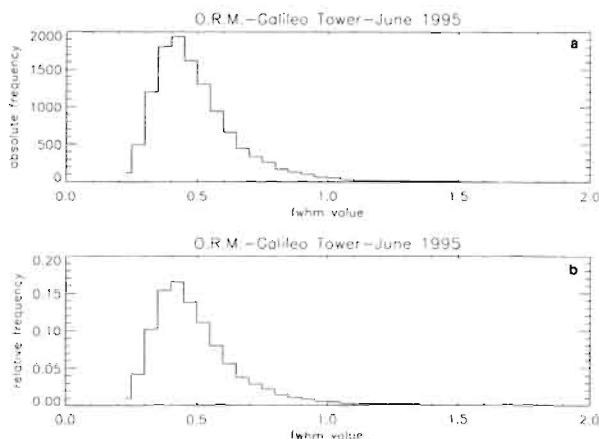


Figura 7. Diagrama porcentual que indica en frecuencias absolutas y relativas respectivamente, el número de veces que una medida alcanza un valor determinado del seeing, indicado en el eje de abscisas. Cada medida corresponde, a su vez, al promedio de 200 valores del seeing.

campaña en Vernin y Muñoz-Tuñón, 1992 y 1994).

De la estadística global de datos obtenidos para el TNG alcanzamos valores medios del orden de  $0.76''$ , siendo la mediana del orden de  $0.64''$  (ambos valores son más próximos cuanto más estables y mejores son las condiciones meteorológicas y los vientos alisios son moderados), alcanzando valores mínimos de hasta  $0.17''$  y alcanzando en algunos meses valores mejores que  $0.5''$  en más de un 60% de los casos.

Como resultado representativo de esta campaña se muestra en la Figura 7 la estadística de los valores del seeing obtenidos durante el mes de Junio de 1995, en un diagrama porcentual que representa, en frecuencias absolutas y relativas respectivamente, el número de medidas que da un valor específico del seeing (indicado en el eje de abscisas). La estadística total fue obtenida utilizando el valor medio del seeing longitudinal y transversal, cuyo cociente no debe ser muy superior a la unidad. El número de medidas obtenidas es de 11724 puntos, cada uno representativo del promedio de 200 valores. Se alcanzó en este mes un seeing mínimo de  $0.20''$  y un máximo de  $1.93''$ . El valor medio fue del orden de  $0.49'' \pm 0.17''$ . La mediana alcanzó  $0.46''$ .

Estos excelentes resultados (análogos a los obtenidos en la campaña de prospección en la colina de los telescopios británicos), nos ha permitido desplazar nuestras miras hacia la colina italiana, menos ocupada de instalaciones telescopicas y con condiciones geológicas apropiadas, para realizar allí nuevas campañas de prospección astronómica completas (medidas meteorológicas, determinación y caracterización del seeing, medidas de vapor de agua y medidas del fondo de cielo) para determinar el lugar idóneo para la instalación del futuro Gran Telescopio de Canarias.

Actualmente y con este objetivo, la empresa GRANTECAN, S.A. adquirió a principios de 1995 un DIMM a la empresa francesa LHESA Electronic, el cual se encuentra operativo, junto con "el pionero", en uno de los posibles enclaves candidatos para la ubicación de dicho telescopio.

Los resultados de este importante y no menos ambicioso proyecto serán recientemente publicados por el grupo de site-testing del IAC.

Simultáneamente, a partir de Septiembre de 1994, fue montado el DIMM perteneciente al grupo británico (ING), primeramente en la azotea del 4.2m W.H.T., y posteriormente, como el de Galileo (TNG), en una torre de 5m (evitar el efecto de la turbulencia de la baja atmósfera). Esto nos permitió hacer un estudio comparativo entre las características de la colina de los italianos y la de los británicos, punto clave para la orientación de la ubicación del gran telescopio.

En la Figura 6 se muestra las diferentes zonas, en el ORM, en las que hemos llevado a cabo campañas intensivas de prospección de la calidad astronómica del cielo. La primera de ellas fue la realizada por la Universidad de Niza en colaboración con el IAC en el NOT, con el propósito de evaluar la contribución de las diferentes capas de atmósfera y del efecto cúpula-espejo en la degradación de las imágenes astronómicas (más detalles de esta

## AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer al Prof. F.Sánchez, Dtor. del Instituto de Astrofísica de Canarias, y a la Dra. C.Muñoz-Tuñón, responsable del proyecto de prospección astronómica del IAC, por su aportación tanto bibliográfica como en el desarrollo y conocimiento de este tema, sin los que este trabajo no hubiera sido posible.

**Tabla 1.** Instalaciones telescopicas y otros experimentos ubicados en el Observatorio del Teide, en la isla de Tenerife.

### OBSERVATORIO DEL TEIDE (OT)

**Superficie:** 50 hectáreas

**Altitud:** 2.390 metros

**Situación:** Isla de Tenerife (Islas Canarias/España)

**Longitud:** 16°30'35" Oeste

**Latitud:** 28°18'00" Norte

DIAMETRO (cm)	INSTRUMENTOS	PROPIETARIO	OPERATIVO AÑO
25	Heliógrafo Razdow	IAC (E)	1969
40	Telescopio solar Newton al vacío (VNT)	Inst. Kieperheuer (A)	1972
45	Telescopio solar Gregory Coudé (GCT)	Univ. Gontinga (A)	1986
50	Telescopio reflector	Univ. Mons (B)	1972
60	Telescopio solar de torre al vacío (VTT)	Inst. Kiepenheuer (A)	1989
80	Telescopio IAC-80	IAC (E)	1993
90	Telescopio solar THEMIS	CNRS-CNR (FR-IT)	1996
100	Telescopio Estación Óptica Terrestre (OGS)	IAC-ESA (E-Internr.)	1995
155	Telescopio infrarrojos Carlos Sánchez (TCS)	IAC (E)	1972
	Radiotelescopio de doble antena: - 10, 15 y 33 Ghz (microondas)	IAC-Univ. Manchester (E-RU)	1984-89-91
	- Teide GEM	CBL (EEUU)	1995
	Antena y Bolómetro milimétrico: - 3.1, 2.1, 1.3 y 1.1m.m.	IAC- Inst. Bartol (E-EEUU)	1994
	<b>Laboratorio Solar:</b> - Espectrofotómetro por scattering resonante: MARK-I	IAC (E)	1987
	MARK-II	Univ. Birmingham (RU)	1976
	CANNON	Univ. Birmingham (RU)	1989
	IRIS-T	Univ. Niza (FR)	1989
	- fotómetros :		
	TON	Univ. de Tsing-Hua (Taiwan)	1993
	LOI	ESA-IAC (Intern.-E)	1994
	- tacómetro de Fourier GONG	NSO (EEUU)	1994

A=Alemania; B=Bélgica; E=España; EEUU=Estados unidos; FR=Francia; IT=Italia; RU=Reino Unido; Intern =Internacional

### SERVICIOS:

- Comunicaciones: Red IBERCOM (7 líneas externas con 75 extensiones, 2 líneas de Fax y 1 Télex). sistema de radio-enlace con 1 estación base, 5 a bordo de vehículos y 5 portátiles.
- Alojamientos. Residencia con 24 plazas.
- 4 vehículos adscritos a las instalaciones telescopicas.
- 4 vehículos todo-terreno
- Energía: 3 centros de transformación con 660 KVA y 3 grupos electrógenos con 295 KVA
- Centro de visitantes: aforo de 24 personas
- Otras instalaciones: Zona de servicios, Almacén, Garajes, Tallergeneral y Cuarto de Máquinas

**Tabla 2.** Instalaciones telescopicas y otros experimentos ubicados en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la isla de La Palma.

**OBSERVATORIO DEL ROQUE DE LOS MUCHACHOS (ORM)**

**Superficie:** 189 hectáreas

**Altitud:** 2.396 metros

**Situación:** Isla de La Palma (Islas Canarias/España)

**Longitud:** 17°52'34" Oeste

**Latitud:** 28°45'34" Norte

DIAMETRO (cm)	INSTRUMENTOS	PROPIETARIO	OPERATIVO AÑO
18	Círculo Meridiano	Univ. Copenhague (D-RU-E)	1984
45	Telescopio solar holandés abierto (DOT)	NFRA (PB)	1996
50	Refractor solar (VRT)	R. Academia de las Ciencias (S)	1982
60	Telescopio óptico	R. Academia de las Ciencias (S)	1982
100	Telescopio Jacobus Kapteyn (JKT)	PPARC (RU-PB-IR)	1984
250	Telescopio Isaac Newton (INT)	PPARC (RU-PB)	1984
256	Telescopio Nôrdico (NOT)	Fundación NOT (D-FI-N-S)	1989
350	Telescopio Nacional Italiano Galileo (TNG)	CRA-Obs. Astr. Padua (IT)	1996
420	Telescopio William Herschel (WHT)	PPARC (RU-PB)	1987
1000	Telescopio en proyecto Red de detectores de rayos cósmicos (HEGRA)	Univ. Kiel (A) Inst. Max-Plank Munich (A) Univ. Wuppertal (A) Univ. Hamburgo (A) Univ. Complutense de Madrid (E)	1988

A=Alemania; D=Dinamarca; E=España; FI=Finlandia; IR=Irlanda; IT=Italia; RU=Reino Unido; N=Noruega; PB=Paises Bajos;  
S=Suecia

**SERVICIOS:**

- Comunicaciones: Red IBERCOM (30 líneas externas con 114 extensiones, 2 líneas de Fax y 1 Télex). sistema de radio-enlace con 6 estación base, 42 a bordo de vehículos, línea de datos a 2Mbits de velocidad.
- Alojamientos: Residencia con 29 Habitaciones (24 individuales y cinco dobles); Anexo con 30 Habitaciones (9 individuales y 21 dobles).
- 2 vehículos todo-terreno
- 1 Minibus
- 1 Camión (quitanieves y contraincendios)
- 1 Vehículo ambulancia
- 4 Helipuertos
- Otras instalaciones: Zona de servicios con despachos, Laboratorio de electrónica, taller de macánica, Almacén, Garajes, Grupos electrógenos, transformadores, cuarto de máquinas, taller de soldadura y gasolinera.

## BIBLIOGRAFÍA

- Angström, K., 1901, Intensité de la radiation solaire à différentes altitudes. Recherches faites à Teneriffe 1895 et 1896, *Nova Acta Rigiae Societatis Scientiarum Upsaliensis*, Serie 3, 20, 1
- Bornino, J., Brandt, P.N., 1982, J.O.S.O., Ann. Rep. 9
- Fried, D.L., 1966, J. Opt. Soc. Am., 56, 1372
- Gutiérrez, A., Moreno, H., 1981, *Astrofísica General*, Eds. de la Universidad de Chile
- Hartley, M., McInnes, B., Smith, F.G., 1981, Quart. J. Roy. Astron. Soc., 22, 272
- Mascart, J., 1910, Photographies de la Comète de Halley, Comptes rendus de l'Académie des Sciences, 6 Juin et 25 Juillet
- Mascart, J., 1912, *Impressions et Observations dans un voyage à Teneriffe*, Ernest Flammarion Paris
- Müller, G., Kron, E., 1913, Die Extinktion des Lichtes in der Erdatmosphäre und die Energieverteilung in Sonnespektrum auf der Insel Teneriffa, *Publik. Astroph. Obser. Postdam*, 64, 22, 1-92
- Muñoz-Tuñón, C., Fuentes, F.J., 1990, *Astrophys. and Space Science*, 171, 257
- Newton, I., 1730, *Opticks*
- Pike, D., 1984, Technical Notes La Palma
- Sánchez, F., 1968, Estudio de las Condiciones del Observatorio del Teide para la Observación Astronómica III Nubosidad y Viento, *Urania* 267-268
- Sánchez, F., 1970, Calidad de Imágenes Telescopicas, Obs. Teide, *Urania* 271
- Sánchez, F., 1970, Presencia Esporádica de polvo Sahariano en la atmósfera de la isla de Tenerife, *Urania* 271-272
- Sánchez, F., 1985, *Vistas in Astronomy*, 28, 417
- Smyth, C.P., 1858, *Teneriffe, an Astronomer's Experiment: or Specialities of a residence above the clouds*, Lovell Reeve
- Torroja, J.M., Sánchez, F., 1967, Estudio de la Transparencia atmosférica, Obs. Teide, *Urania* 266, 73
- Vernin, J., Muñoz-Tuñón, C., 1992, *Astron. Astrophys.*, 257, 811
- Vernin, J., Muñoz-Tuñón, C., 1994, *Astron. Astrophys.*, 284, 311
- Vernin, J., Muñoz-Tuñón, C., 1995, *P.A.S.P.*, 107, 265



## UNIVERSOS ISLA

Evencio Mediavilla Gradoolph

Profesor Titular de Astrofísica de la Universidad de La Laguna

## 1. LA PARADOJA DE OLBERS Y EL CONCEPTO DE UNIVERSO ISLA

Si desde la Tierra observamos el firmamento nos llamarán la atención el Sol, la Luna, las estrellas y una banda blanquecina de débil luminosidad que recorre todo el cielo, de horizonte a horizonte: la Vía Láctea. (Los griegos pensaban que esta banda era como un río de leche y de ahí su nombre). Desde siempre el hombre ha intentado establecer un orden (nomos) en el espacio usando estos objetos (astros) como piezas elementales. Para conocer la naturaleza de los astros es necesario saber a qué distancia se encuentran. Los griegos calcularon la distancia a la Luna pero hasta el siglo XVIII no se determinaron las distancias aproximadas al Sol ni a los planetas (las 'estrellas' errantes). En ese momento las fronteras del universo conocido fueron las de nuestro sistema planetario y las estrellas eran puntos de luz que podían ser relativamente débiles y pequeños si estaban próximos, o gigantescas esferas luminosas si se suponían muy alejados. Cuando en el siglo XIX se midieron las distancias a que se encuentran las estrellas (enormes comparadas con las dimensiones del Sistema Solar), se pensó que estos objetos tenían que ser parecidos a nuestro Sol (el objeto más brillante que se conocía) y quedó constancia de que los planetas se movían en un entorno de dimensiones relativamente insignificantes. De acuerdo con ésto pareció natural pensar que las estrellas eran las 'células elementales del universo', las referencias adecuadas para estudiar sus dimensiones y características.

Si con idea de conocer la extensión del universo miramos al cielo veremos que hay estrellas en todas las direcciones como si estuviéramos inmersos en un 'mar' de estrellas. Sin embargo no es sencillo saber hasta donde se extiende este 'mar', que, a primera vista, parece no tener fronteras. (Nuestra situación es análoga a la de un viajero perdido en la espesura: los árboles no dejan apreciar los límites del bosque) ¿Podríamos estar, entonces, inmersos en un universo infinito de estrellas?

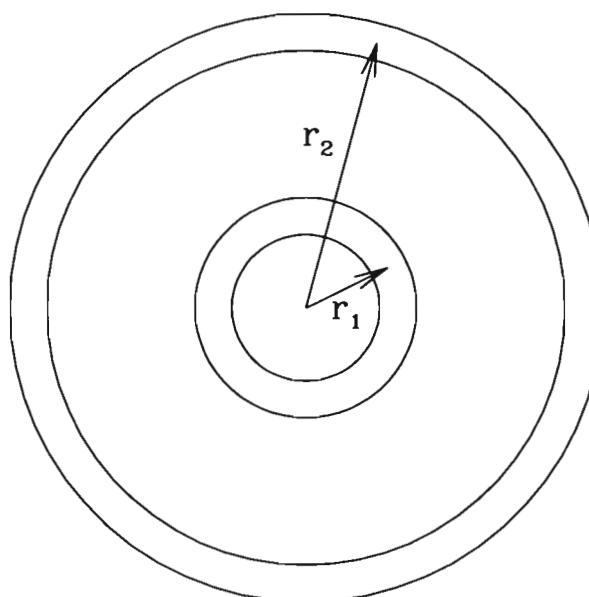


Figura 1

recibiríamos en cada instante de tiempo sería infinita. Puesto que la experiencia nos dice que no solo no nos quemamos por efecto de la energía que recibimos de las estrellas sino que el fondo del universo es bastante oscuro, debemos concluir que la distribución de estrellas que nos rodea ha de tener un límite. Este argumento en contra de la infinitud de un universo de estrellas se conoce como la paradoja de Olbers y puede establecerse en condiciones más generales que las que aquí, por simplicidad, hemos supuesto.

Por otro lado, la distribución de estrellas tampoco es uniforme. Las estrellas más

Un sencillo argumento permite desechar esta posibilidad. Para simplificar la discusión, supongamos que todas las estrellas fueran iguales y que, independientemente del punto del universo en que nos encontremos, el número de estrellas en un volumen dado ( $n$ , densidad de estrellas) fuera el mismo. Calculemos ahora el total de luz procedente de las estrellas que recibíramos en un universo infinito. Si una estrella emite energía en cada instante de tiempo,  $L$ , la energía por unidad de superficie que recibíramos de ella en cada instante (flujo luminoso) viene dada por  $F=L/4\pi r^2$  donde  $r$  es la distancia entre nosotros y la estrella. Para calcular la contribución de todas las estrellas dividiremos el espacio en capas esféricas de anchura centradas en el observador (en la Figura 1 se representan dos de estas capas a distancias  $r_1$  y  $r_2$ , respectivamente). Una capa esférica de anchura  $\Delta r$  y radio  $r$  tiene un volumen  $4\pi r^2 \Delta r$ . Consecuentemente, el número de estrellas en la capa esférica será  $n \cdot 4\pi r^2 \Delta r$  y el flujo luminoso recibido por el observador procedente de la capa será  $(F=L/4\pi r^2) \cdot n \cdot 4\pi r^2 \Delta r = L \cdot n \cdot \Delta r$ . Es decir, todas las capas contribuirían con el mismo flujo luminoso independientemente de la distancia a la que se encuentren. En un universo infinito habría un número infinito de capas y la energía que

brillantes (en general las mas cercanas a nosotros) si parecen estar distribuidas por igual en todas las direcciones. Sin embargo, las estrellas mas débiles (en general las mas distantes) son mas abundantes en la dirección de la Vía Láctea. De hecho, ya en 1610, Galileo había comprobado con su telescopio que la Vía Láctea estaba formada en realidad por estrellas muy lejanas. Consecuentemente las fronteras del universo se extendieron para incluir a la Vía Láctea. La concepción de la Vía Láctea como un sistema estelar aislado en el espacio fue formulada por Thomas Wright en 1750: El Sol está inmerso en un disco finito de estrellas uniformemente distribuidas en las cercanías, pero concentradas en una banda brillante en la dirección de la Vía Láctea. Desde un punto de vista esencialmente filosófico, Thomas Wright pensó que deberían existir en el espacio otros sistemas estelares análogos al nuestro separados unos de otros por el vacío. Esta es la concepción básica de los 'Universos Isla', idea que fue desarrollada, en la forma que ha perdurado hasta hoy, por Immanuel Kant. Buscando alguna prueba experimental que extrajera este concepto del campo de la pura especulación filosófica, Wright propuso que los Universos Isla eran las nebulosas, unos objetos de apariencia difusa y poco definida, que habían llamado la atención de los astrónomos. (El nombre que se usa actualmente para los universos isla es el de galaxias, palabra cuya raíz griega significa leche).

## 2. ¿SON LAS NEBULOSAS LOS UNIVERSOS ISLA?

Aunque algunas de las nebulosas son visibles para un ojo entrenado, la detección de un numero significativo de ellas solo fue posible con el uso y el desarrollo del telescopio. La primera lista importante de nebulosas es la de Messier (1784) que contenía 103 de las mas llamativas. William Herschel y su hijo, John Herschel, ampliaron substancialmente la lista de nebulosas. El 'General Catalogue of Nebulae', compilado por este último, incluía 5079 objetos. A partir de este catálogo J.L.E. Dreyer publicó en 1888 el 'New General Catalogue', que sirve de base para la identificación de las nebulosas.



Figura 2b: Imágenes tomadas del "Carnegie Atlas of Galaxies" de Allan Sandage y Jonh Bedke, editado por la "Carnegie Institution of Washington".

Desde que Galileo había distinguido con su telescopio estrellas en alguna de las nebulosas más brillantes, se sospechaba que muchas de ellas eran agrupaciones de estrellas (cúmulos estelares). Esta posibilidad fué confirmada por Messier y Herschel mediante el uso de grandes telescopios. Estos cúmulos estelares eran entidades de pequeño tamaño comparadas con nuestra galaxia (La Vía Láctea) y se sabía que se encontraban dentro de sus límites, luego no podían ser los universos isla.

Entre las 'nebulosas' que no se podían identificar como cúmulos de estrellas se distinguían algunas que parecían objetos pequeños y simétricos, y que estaban uniformemente distribuidas por todo el cielo. Un descubrimiento muy importante, hecho por Lord Rosse (1845) fué la existencia de una estructura espiral en alguno de estos objetos (Figura 2b). Aunque este descubrimiento acentuaba su peculiaridad y apoyaba la existencia de nebulosas fuera de los límites de nuestra galaxia, la situación en 1900 era similar a la planteada siglos antes sobre la naturaleza de las estrellas: si las distancias a las nebulosas eran pequeñas comparadas con las dimensiones de nuestra galaxia, las nebulosas eran objetos relativamente pequeños contenidos en nuestra galaxia; si, por el contrario, las distancias eran mayores que el tamaño de nuestra galaxia, las nebulosas serían sistemas

estelares aislados (galaxias, universos isla) por derecho propio. El problema quedaba así circunscrito a la determinación de las distancias a las nebulosas, problema que frecuentemente se enunciaba con una pregunta: ¿son las nebulosas los Universos Isla?

Durante un cuarto de siglo se analizaron y discutieron evidencias a favor y en contra de esta opción, al tiempo que se desarrollaba un modelo de nuestra propia galaxia. Estas discusiones se concretaron en un famoso debate entre los astrónomos Shapley y Curtis (1920) sobre la naturaleza galáctica o extragaláctica de las nebulosas espirales. Sin embargo entre las evidencias analizadas no figuraba ningún indicador indiscutible de las distancias a las nebulosas y cada parte siguió manteniendo sus posiciones después del debate hasta que, en 1925, Edwin Hubble fue capaz de medir la distancia a la nebulosa M31 zanjando definitivamente la cuestión. Para ello estudió una serie de fotografías de esta galaxia en las que aparecían estrellas cefeidas. Estas estrellas son variables periódicas, es decir, su brillo cambia con el tiempo siguiendo siempre un mismo ciclo: brillo máximo → decrecimiento del brillo → brillo mínimo → crecimiento del brillo → brillo máximo → etc. Para las cefeidas existe una relación que conociendo el tiempo que dura un ciclo completo nos dice cuál es la luminosidad intrínseca de la estrella,  $L$ . Entonces, si en las placas fotográficas hemos medido el flujo luminoso que recibimos de la estrella,  $F$ , podemos invertir la ecuación del flujo luminoso  $F=L/4\pi r^2$ , obteniendo la distancia  $r=\sqrt{L/4\pi F}$ .

Hubble estudió varias cefeidas estimando (a pesar de ciertos errores de calibración) la distancia a M31 y situando esta nebulosa lejos de los límites de nuestra galaxia lo que permitió reconocerla inequívocamente como un Universo Isla. Con la publicación en 1925 de los datos de Hubble se puso fin al debate confirmando la existencia de las galaxias -verdaderos átomos del universo- y abriendo paso a la nueva cosmología.

### 3. CONTENIDO DE LAS GALAXIAS: POBLACIONES ESTELARES Y MEDIO INTERESTELAR

Las estrellas aportan la mayor parte de la masa conocida de las galaxias. A continuación hablaremos de los diferentes tipos de estrellas y de las agrupaciones que forman. También hablaremos del gas y del polvo, los constituyentes del medio interestelar (espacio entre estrellas) que aunque solo representan una fracción de la masa total de las galaxias, son muy interesantes como trazadores de la cinemática y de la evolución de la galaxia.

#### Poblaciones Estelares

Aunque en algún momento lo hayamos supuesto así por sencillez, las estrellas que hay en una galaxia no son iguales sino que pertenecen a una gran variedad de tipos. Las estrellas nacen a partir de condensaciones de gas y pueden formarse con masas que van, típicamente, desde 0.8 hasta 80 veces la masa del Sol. La masa de una estrella es uno de los parámetros que más influyen en sus propiedades y evolución. Las estrellas de mayor masa son grandes y muy calientes, emitiendo luz relativamente 'azulada'. Estas estrellas son también las que evolucionan más rápidamente. Las más masivas y calientes (las 'gigantes azules') solo 'viven' como tales unos diez o cien millones de años, hasta que su evolución les lleva a un estado en el que su luminosidad es comparativamente insignificante. Por el contrario, las estrellas menos masivas son más frías, emiten luz 'roja' y evolucionan mucho más lentamente (el Sol lleva en su estado actual unos cuatro mil millones de años). En consecuencia, el 'color' (técnicamente, el espectro) de la luz que emite una región de una galaxia depende de la proporción en que estén representados los diferentes tipos estelares en ella.

Así, la luz que recibimos de una región en la que se desarrolla un proceso de formación estelar importante, estará dominada por la emisión de las 'gigantes azules' (en general mucho más luminosas que las demás estrellas). A medida que aumenta la edad de la región (tiempo transcurrido desde que se detuvo el nacimiento de nuevas estrellas), la luz que emite estará dominada por las estrellas más frías, y se irá haciendo más 'roja' progresivamente. Es decir, el tipo de estrellas más abundante en una región y el 'color' de la luz procedente de ella dependen de su edad. Entonces, si en una galaxia la formación estelar no tuvo lugar al mismo tiempo en todas las regiones cabe esperar que la proporción en que aparecen los distintos tipos de estrellas y el 'color' varíe de unas zonas a otras.

Además de la masa, que como hemos visto determina su longevidad, otra característica importante de las estrellas es su composición. Atendiendo a su edad y composición, las estrellas se dividen en poblaciones. Simplificando este concepto podemos decir que básicamente hay dos poblaciones de estrellas. Las estrellas de población II se formaron en primer lugar a partir de la materia gaseosa primordial compuesta de hidrógeno y helio. Como resultado de las reacciones nucleares que tienen lugar en su interior, las estrellas de población II fueron sintetizando elementos químicos más pesados como el carbono, el oxígeno o el hierro. Posteriormente, debido a la explosión de algunas de estas estrellas (supernovas) o a la expulsión de las capas más externas de otras, los metales sintetizados fueron arrojados al medio interestelar. Las estrellas de población I se han formado a partir de este gas enriquecido con metales. Las estrellas de población II son las más viejas y las regiones de las galaxias donde abundan presentan colores más enrojecidos que las regiones donde están presentes estrellas de población I. El concepto de población estelar ha demostrado ser muy fructífero, estimulando el desarrollo de la teoría que describe la evolución de las estrellas. Sin embargo, la separación de las estrellas en solo dos tipos es muy esquemática y se necesita una descomposición más fina si se quiere representar al conjunto de las estrellas de una galaxia.

### Cúmulos de estrellas

Algunas estrellas se encuentran agrupadas formando grandes acumulaciones (cúmulos estelares). Muchos de estos cúmulos son de aspecto redondeado y están formados por estrellas viejas de población II. Son los cúmulos globulares que se encuentran distribuidos esféricamente por toda la galaxia. Shapley los utilizó para determinar el centro y las dimensiones de la Vía Láctea. Otros cúmulos son de aspecto menos regular, se encuentran fundamentalmente en el plano galáctico y están integrados por estrellas de población I. A estos cúmulos se les llama abiertos y son producto de formación estelar reciente.

### Medio interestelar

El espacio entre estrellas no está vacío sino que se encuentra poblado por gas (fundamentalmente hidrógeno) y pequeñas partículas de polvo (partículas de material sólido similares al polvo común que podemos encontrar en nuestras casas). La composición y densidad de este medio interestelar varía de unos lugares a otros. En las regiones más cercanas al disco hay grandes acumulaciones de gas en las que tiene lugar el nacimiento de nuevas estrellas. Algunas de estas estrellas son de gran masa y luminosidad (las gigantes azules) y radian enormes cantidades de energía al medio interestelar, provocando la descomposición (ionización) del átomo de hidrógeno en un protón y un electrón. Las regiones donde el gas está ionizado se llaman regiones HII y están asociadas a los cúmulos abiertos. La densidad del medio interestelar es especialmente alta en la dirección del centro galáctico, oscureciendo el núcleo de nuestra galaxia y dificultando su observación.



Figura 2a: Imágenes tomadas del "Carnegie Atlas of Galaxies" de Allan Sandage y Jonh Bedke, editado por la "Carnegie Institution of Washington".

## 4. CLASIFICACION MORFOLOGICA DE LAS GALAXIAS

Las galaxias de morfología mas sencilla tienen formas suaves y redondeadas sin que pueda apreciarse ninguna estructura en ellas (Figura 2a). Algunas parecen esferas casi perfectas mientras que otras tienen aspecto de esferoide alargado (balón de rugby). El grado de elongamiento del esferoide se conoce como elipticidad (a menor elipticidad



Figura 2d



Figura 2c



Figura 2e



Figura 2f

mayor es el parecido a una esfera). Estas galaxias, determinadas por una única componente esferoidal, forman la clase de las elípticas (E).

Hay otras galaxias (ver Figura 2d, por ejemplo) de morfología más compleja en las que además de una componente esferoidal como la descrita para las elípticas se observa otra componente mucho más aplanada, con forma de disco. A las galaxias que pertenecen a esta clase se las denomina galaxias-disco y se las designa genéricamente con una S. Las dos componentes de una galaxia-disco se pueden describir con mayor precisión como: i) una condensación central de brillo con aspecto de galaxia elíptica (bulbo); y ii) una región extensa, intrínsecamente plana en la que el brillo va decayendo lentamente hacia afuera (disco).

La clase de las galaxias-disco se subdivide en dos ramas (SB, SA) según se observe o no una 'barra'. Una barra es una estructura lineal que cruza el núcleo de la galaxia (Figura 2c). En cada una de las ramas se distinguen dos familias: i) galaxias sin estructura en el disco (lenticulares: SBO, SA0); y ii) galaxias en cuyo disco aparecen estructuras que se desarrollan como espirales (espirales: SA, SB, ver Figuras 2b y 2c).

Finalmente, dentro de las espirales (barradas o nó) se distinguen tres tipos (SBa, SBb, SBc; SAa, SAb, SAC) para reflejar, entre otras cosas, la importancia relativa de bulbo y disco (Figuras 2d,e,f). En una SAa la relación bulbo/disco es mayor que en una SAb, y en una SAb mayor que en una SAC (la misma regla se cumple en el caso de las barradas).

La clasificación de Hubble-Sandage se suele resumir en un diagrama en forma de diapasón (Figura 3). A la izquierda del diagrama se encuentran las galaxias elípticas, desde las más esféricas (E0) hasta las más elongadas (E7). A la derecha, el diagrama se bifurca en las dos ramas (barradas y no barradas) de las galaxias con disco. En cada una de las dos ramas, están dispuestas en primer lugar las galaxias lenticulares (SA0, SBO), y después las espirales según la secuencia de tipos: a→b→c. (Hay que advertir que esta representación no es un diagrama evolutivo, es decir, no cabe esperar, por ejemplo, que una elíptica se transforme primero en una lenticular y posteriormente en una espiral, sino que, según todos los indicios, las galaxias se originaron con el tipo morfológico que presentan en la actualidad).

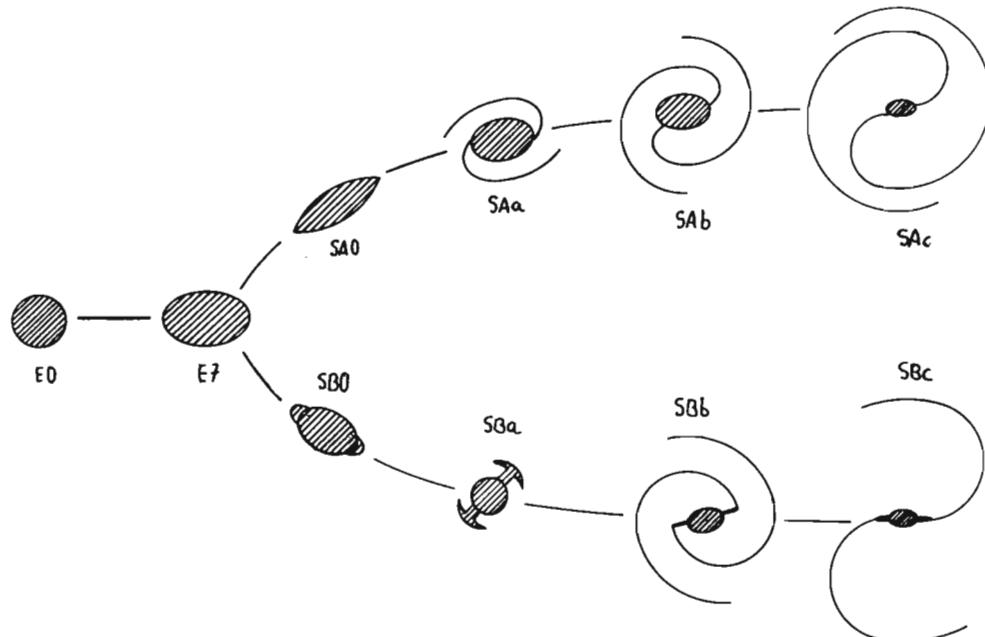


Figura 3

Existen otras galaxias que no encajan ni en la clase de las elípticas ni en la de las galaxias-disco y que se denominan genéricamente irregulares (Irr). Estas galaxias representan solo el 3% del número total de galaxias mientras que las elípticas, las lenticulares y las espirales representan, respectivamente, el 13%, el 21% y el 61%. Este resultado implica que casi todas las galaxias pueden ser clasificadas dentro de las clases regulares (E,S) en el sistema morfológico que hemos descrito.

## 5. IMAGENES Y MAPAS DE INTENSIDAD DE LAS GALAXIAS

Gran parte de lo que sabemos sobre las galaxias lo hemos aprendido a partir de imágenes recogidas en placas fotográficas u otros modernos detectores (similares a los de las cámaras de video). Una imagen es una distribución de brillo o intensidad (así se denomina al flujo luminoso por unidad de superficie angular aparente de un objeto extenso) en dos dimensiones que técnicamente se conoce como distribución superficial del brillo,  $I(x,y)$ . Esta función puede darnos un indicio de como está distribuida la masa en la galaxia si suponemos que existe una proporcionalidad entre masa y luz emitida (una relación Masa/Luminosidad constante) que nos permite 'traducir' el flujo observado en masa. Sin embargo, como ya hemos comentado antes, hay diferentes tipos de estrellas que tienen diferentes relaciones M/L. Entonces como la proporción en que intervienen los diferentes tipos de estrellas no es la misma en todas las galaxias ni en todas las regiones de las galaxias, la relación M/L depende de la región observada. Con la salvedad de este importante problema, el estudio de las imágenes calibradas de las galaxias (mapas de intensidad) es el camino más usual para conocer su estructura. Los mapas de intensidad suelen representarse mediante contornos (isofotas). Las isofotas son curvas de nivel análogas a las usadas en los mapas topográficos. En estos mapas las curvas de nivel conectan puntos de la superficie terrestre que están a la misma altura. Una imagen (Figura 4 izquierda)

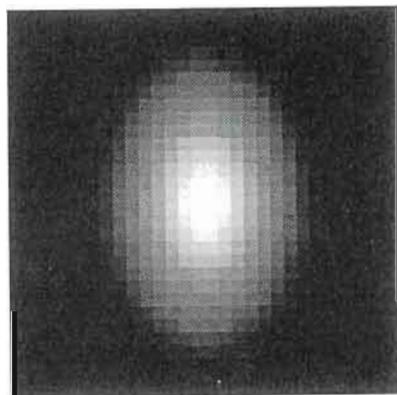
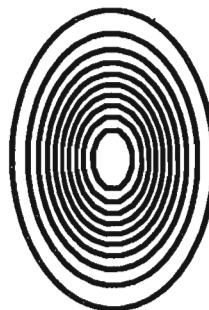
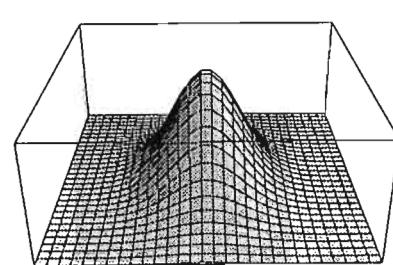


Figura 4



puede entenderse también como una superficie en la que los puntos más altos corresponderían a las zonas más brillantes (Figura 4 centro). En los mapas de intensidad las isofotas conectan puntos de los que recibimos el mismo flujo luminoso (Figura 4 derecha).

## 6. PERFILES RADIALES DE INTENSIDAD DE LAS GALAXIAS. DESCOMPOSICION FOTOMETRICA EN BULBO Y DISCO

En las imágenes de las galaxias hay mucha información y es difícil extraer características genéricas (más allá de las consideraciones púramente morfológicas) de un grupo de galaxias comparando directamente sus mapas de intensidad. Para simplificar el estudio es habitual analizar, como punto de partida, la variación de la intensidad desde el centro hasta las partes externas de la galaxia. Esta función (análoga al corte topográfico de un terreno) se llama perfil radial de intensidad y sirve, entre otras cosas, para ver la importancia relativa de las componentes bulbo y disco.

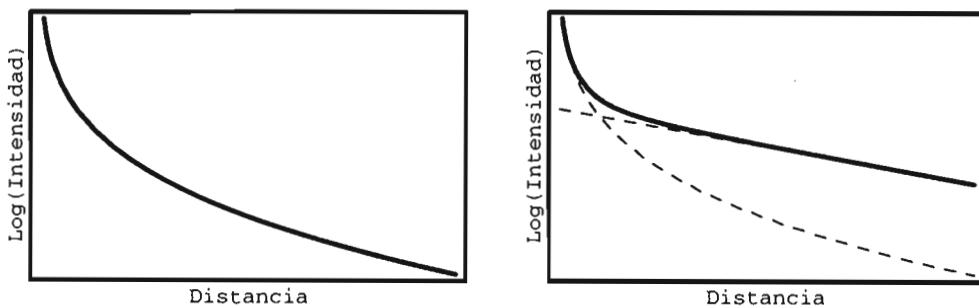


Figura 5

En la Figura 5 (izquierda) podemos ver un perfil radial de intensidad típico de un cúmulo globular o de una galaxia elíptica de pequeño tamaño. Los perfiles de luminosidad de los cúmulos globulares y de las elípticas son reproducidos muy bien por perfiles de luminosidad teóricos de King. Estos modelos representan enjambres de estrellas en movimiento desordenado, algo que está muy de acuerdo con la naturaleza de los cúmulos globulares. El hecho de que también se ajusten a las elípticas implica que estas galaxias podrían considerarse acumulaciones de estrellas en movimiento desordenado y que la diferencia entre cúmulos globulares y galaxias elípticas de pequeño y mediano tamaño es básicamente de escala. (Hay que advertir que los últimos resultados de las observaciones de las regiones más internas de las elípticas con el telescopio espacial, no parecen estar de acuerdo con esta analogía).

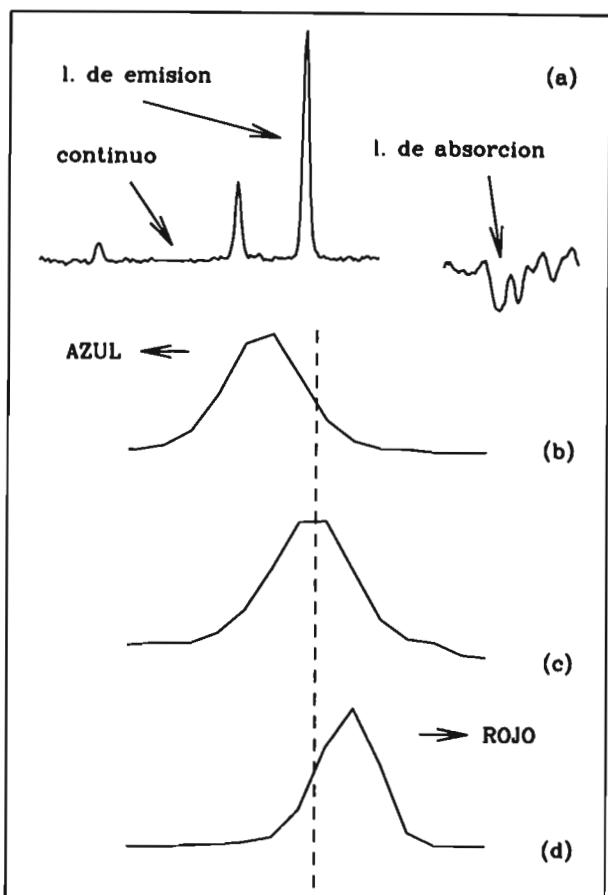


Figura 6

Sin embargo, no todos los perfiles radiales de intensidad de las elípticas pueden reproducirse satisfactoriamente con modelos de King. En muchos casos, especialmente los de las elípticas más grandes, es necesario utilizar otro modelo, la ley  $r^{1/4}$  de de Vaucouleurs. Esta ley es de carácter empírico y no tiene una interpretación teórica similar a la de los modelos de King.

Los perfiles de intensidad de las galaxias-disco (Figura 5 derecha) muestran claramente la presencia de dos componentes de acuerdo a lo discutido al estudiar la morfología de estas galaxias. A la parte interna (el bulbo) se suele ajustar una ley de de Vaucouleurs por analogía con las galaxias elípticas. La parte externa tiene un claro comportamiento exponencial (aparece como una línea recta en el diagrama logarítmico de la Figura 5 derecha) y se le ajusta una función que se conoce como disco exponencial de Freeman ( $e^{ar}$ ).

## 7. LINEAS ESPECTRALES, EFECTO DOPPLER Y MAPAS DE VELOCIDAD

Si hacemos pasar luz blanca a través de un prisma obtendremos una imagen en la que aparecen varios colores con diferente brillo. Esta imagen se denomina espectro. A cada color le corresponde una frecuencia lo que permite representar un espectro como una función que nos dice el flujo recibido en cada frecuencia. En los espectros se suelen distinguir dos tipos de características (ver Figura 6a): a) zonas más o menos suaves sin variaciones rápidas que constituyen lo que se conoce como continuo, y b) emisiones o absorciones relativamente estrechas (es decir de un color muy bien determinado) que resaltan sobre

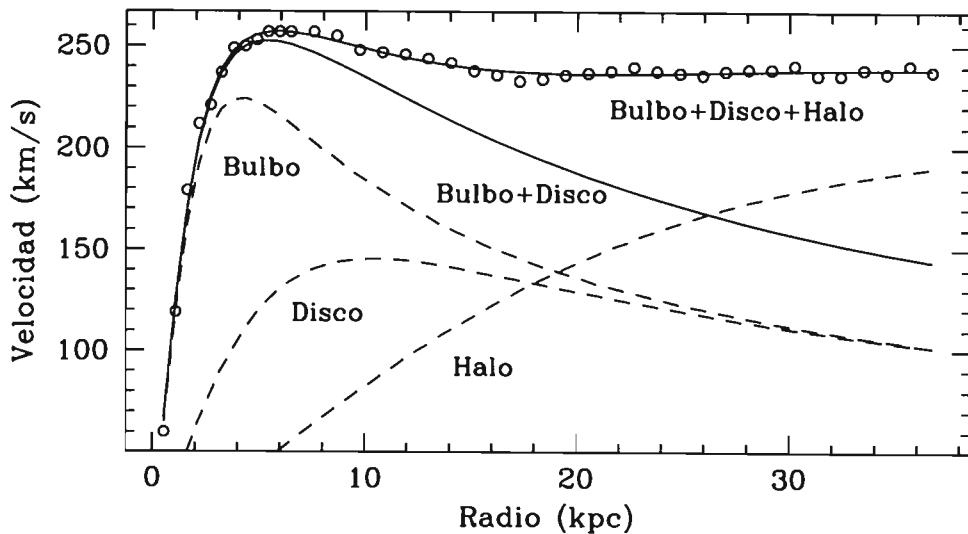


Figura 8

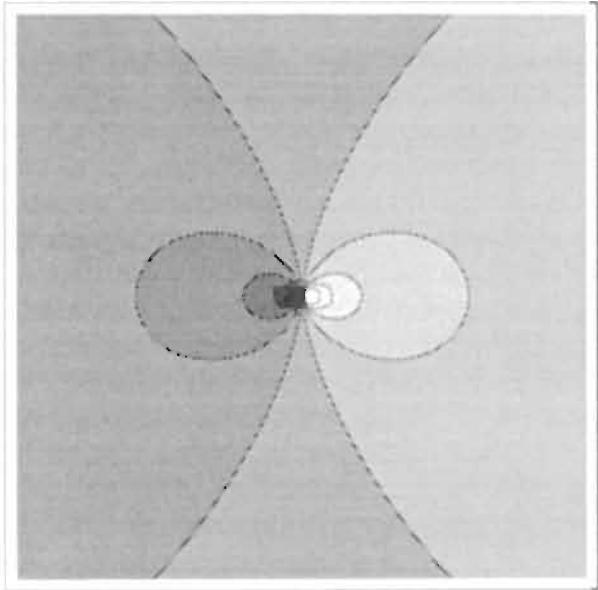


Figura 7

respecto a nosotros. La línea espectral aparecerá a una frecuencia (color) determinada (Figura 6c). Si el emisor se mueve en dirección a nosotros la línea espectral aparecerá a una frecuencia diferente, mayor (se desplazará hacia el azul, Figura 6b). Si por el contrario, el emisor se aleja de nosotros, la línea aparecerá en una frecuencia menor (se desplazará hacia el rojo, Figura 6d). Gracias a este fenómeno (el efecto Doppler) es posible conocer la velocidad con que se mueven los emisores si conocemos el desplazamiento de las líneas. (ver Figura 9) (El efecto Doppler afecta de manera análoga al sonido. Debido a él, cuando una ambulancia con la sirena conectada se acerca hacia nosotros el sonido es más agudo que cuando se aleja).

Si obtenemos espectros en diferentes regiones de una galaxia podremos saber, gracias al efecto Doppler, como se mueve cada una de ellas. Si repetimos esta operación en un número suficiente de regiones podremos representar gráficamente la velocidad con que se mueve la materia en cada punto de la galaxia. Este gráfico se denomina mapa de velocidades de la galaxia y se representa, en analogía con los mapas de intensidad, con líneas que unen los puntos que están a igual velocidad.

el continuo. Estas últimas características son las líneas espectrales. Muchas de ellas son conocidas y sirven para identificar un elemento químico determinado. A partir de ellas es incluso posible conocer las condiciones (temperatura, densidad, etc.) en que se encuentran los emisores. Algunas líneas espectrales que se estudian comúnmente en las galaxias son: a) líneas de absorción producidas por diferentes elementos (como el magnesio, el sodio, el calcio o el hierro) en las atmósferas de las estrellas, b) líneas de emisión del hidrógeno y de otros elementos (como oxígeno, nitrógeno, o azufre) generadas por efecto de los enormes intercambios de energía que se producen en las regiones de formación estelar, y c) línea del hidrógeno neutro que proviene del hidrógeno no interactuante.

Además de servir para estudiar la composición y las condiciones físicas en que se encuentra la materia en una región de una galaxia, las líneas espectrales sirven también para determinar la velocidad con que se mueve la materia. Supongamos que un emisor (que identificamos a partir de una determinada línea espectral producida por él) está quieto

La materia que se encuentra en los discos de las galaxias gira alrededor del núcleo (las galaxias elípticas y los bulbos de las galaxias con disco parecen que tienen movimientos de rotación bastante más pequeños). En la Figura 7 está representado un mapa de velocidades típico de rotación en un disco. Como puede verse en la Figura, en un campo de rotación hay dos regiones, una que corresponde a la materia que se mueve hacia nosotros (zonas más oscuras en la Figura 7) y otra (zona más clara) que representa a la materia que se aleja.

## 8. CURVAS DE ROTACION DE LAS GALAXIAS

La velocidad de rotación en una galaxia varía con la distancia al centro (rotación diferencial). La función que nos describe esta variación se llama curva de rotación. La velocidad de rotación en el plano del disco a una cierta distancia del núcleo depende de la cantidad de masa que hay en la región interna y de cómo esté distribuida. El caso más sencillo de curva de rotación es el de una partícula puntual de masa  $M$ . En este caso la velocidad de rotación disminuye con la distancia a la partícula según la ley de Kepler ( $v = \sqrt{GM/r}$ ) que es, por ejemplo, la que siguen los planetas en el sistema solar. Otro caso, relativamente sencillo, es el de una esfera de densidad constante. En este caso la velocidad de rotación en la región interior de la esfera sería proporcional a la distancia ( $v \propto r$ ). Este comportamiento es análogo a la rotación de un sólido rígido (por ejemplo el plato de un tocadiscos). Hay modelos más complejos que son capaces de representar ambos comportamientos, el de sólido rígido y el Kepleriano, a distintas distancias del núcleo. Usando uno de estos modelos podemos construir una curva de rotación relativamente realista considerando la suma de una esfera (bulbo) y un elipsoide aplanado con forma de lente (disco). En la Figura 8 se ha representado una curva de rotación típica en la que podemos ver, en línea discontinua, la contribución a la rotación del disco y del bulbo, así como, en línea continua, la de la suma de ambas componentes (bulbo+disco). Esta última función nos da el comportamiento esperado de acuerdo a la descomposición fotométrica. Sin embargo, la curva de rotación experimental (círculos en la Figura 8) no se ajusta a este modelo. Casi todas las galaxias presentan grandes velocidades de rotación en regiones muy separadas del núcleo sin que se aprecie la disminución Kepleriana que cabría esperar según la descomposición bulbo más disco. Este resultado implica que debe existir más materia que la que hemos contabilizado a partir de la fotometría. (Una caída Kepleriana se produce cuando a partir de una cierta distancia la masa no aumenta sino que se mantiene constante. Una línea recta, típica de rotación de sólido rígido, cuando la masa crece proporcionalmente a la distancia al cubo. El comportamiento casi plano de las curvas de rotación en la parte externa de las galaxias implica que la masa crece proporcionalmente a la distancia).

## 9. MATERIA OBSCURA

Como acabamos de ver las galaxias parecen extenderse más allá de lo que su apariencia luminosa indica. En las curvas de rotación experimentales (círculos en la Figura 8) no se aprecia una región de caída Kepleriana lo que, en la práctica, es equivalente a decir que no podemos determinar la masa total de ninguna galaxia. Para explicar las curvas de rotación

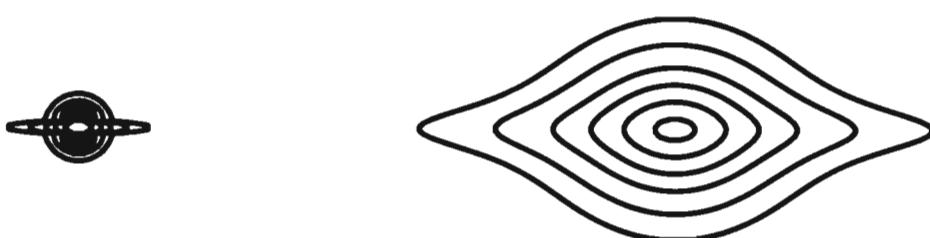


Figura 9

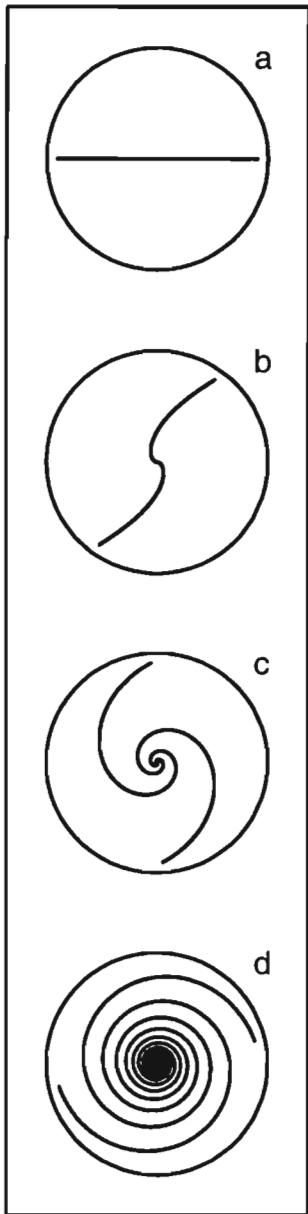


Figura 1

experimentales de las galaxias se supone que hay una tercera componente (el halo, ver Figura 8) de geometría esférica y compuesta de materia que no vemos. No se conocen las dimensiones de los halos. Podrían extenderse hasta el final de los discos visibles o prolongarse más allá, incluso varios cientos de kiloparsecs. En la Figura 9 hemos representado a la misma escala un corte, perpendicular al plano galáctico, de la galaxia visible (bulbo + disco, parte izquierda de la Figura) y del halo (parte derecha). La materia que no vemos (el halo) ocupa una extensión mucho mayor que la materia visible (bulbo+disco). De acuerdo con esta Figura, la masa que debe atribuirse al halo para explicar las elevadas velocidades de rotación en las regiones externas de las galaxias es mucho mayor que la de la materia visible. Esta es una situación incómoda para los astrónomos ya que la mayor parte de la masa de las galaxias parece estar constituida por materia que no vemos, materia oscura que solo conocemos por su interacción gravitatoria. La existencia de enormes cantidades de materia oscura es uno de los problemas de mayor envergadura a los que se enfrenta la astronomía actual y plantea varios interrogantes inmediatos: ¿Hay otras pruebas que confirmen la existencia de materia oscura aparte de las curvas de rotación de las galaxias?, ¿de qué está compuesta la materia oscura?, ¿hay otras alternativas para explicar las curvas de rotación que no impliquen la existencia de materia oscura?

En respuesta a la primera pregunta, tenemos que decir que hay evidencias de materia oscura a muy diferentes escalas de distancias. Estas evidencias se obtienen, en general, comparando la relación masa/luminosidad ( $\gamma=M/L$ ) que se deriva a partir de la fotometría (esto es, contando los objetos que "vemos")  $\gamma_{\text{tot}}$ , con la que se infiere a partir de medidas dinámicas,  $\gamma_{\text{din}}$ . Parece que se detecta materia oscura a todas las escalas (ver Figura 10). Incluso en las cercanías del sistema solar la masa oscura representa una fracción considerable (el 40% aproximadamente) de la masa total. La proporción relativa de masa oscura se hace mayor a escalas mayores y llega a alcanzar más del 90% cuando se aplican los métodos dinámicos de medida a los cúmulos de galaxias. Teniendo en cuenta la contribución de la masa oscura hasta la escala de los cúmulos de galaxias se alcanza un cuarto del valor crítico de la densidad que, según los modelos cosmológicos, es necesaria para que el Universo no se expanda indefinidamente. Hay motivos teóricos que inducen a pensar que la densidad del Universo debe ser precisamente la crítica lo que multiplicaría por cuatro la cantidad total de masa oscura. (Las medidas más recientes hechas utilizando galaxias detectadas por el satélite infrarrojo IRAS parecen implicar que a distancias aún mayores que la de los cúmulos, se alcanza la densidad crítica).

La composición de la materia oscura es, hasta el momento, desconocida. Se han propuesto distintos tipos de objetos de alta relación masa/luminosidad como planetas, enanas marrones, enanas blancas, estrellas de neutrones o agujeros negros de origen estelar. Sin embargo, una hipótesis plausible acerca de la composición de la materia oscura debería ser coherente a todas las escalas (desde las cercanías del sistema solar hasta los cúmulos de galaxias) en que se detectan efectos dinámicos asociados a ella. Por el momento no hay ninguna familia de objetos conocidos por los astrónomos que pueda cumplir razonablemente con esta condición. Además de intentar explicar la composición de la materia oscura con objetos de existencia comprobada también se han propuesto todo tipo de partículas con propiedades más o menos exóticas (por ejemplo neutrinos con masa), algunas de las cuales existen solo en el campo de la especulación teórica. A este respecto, a los astrónomos les sucede con la materia oscura un poco lo que a los físicos de principio de siglo con el éter: puede explicar muchas medidas dinámicas pero no se conoce prácticamente nada acerca de su naturaleza (aunque aparentemente parece estar sujeta a la fuerza de la gravedad).

Por este motivo, y con esto contestamos al tercer interrogante que nos planteábamos, hay investigadores que han suscitado la necesidad de introducir modificaciones adecuadas a la ley de Newton para reproducir la dinámica de las galaxias (en particular, las curvas de rotación) sin necesidad de postular la existencia de materia oscura. Aunque, en principio, la ley de Newton está muy bien comprobada a escala de nuestro sistema solar, no hay pruebas claras que demuestren su validez a grandes distancias y una ley

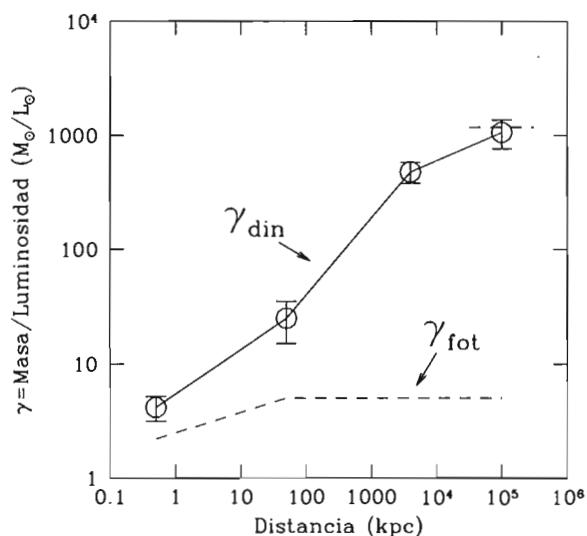


Figura 10

modificada que pudiera dar cuenta de la dinámica de las galaxias y fuera compatible con la Teoría General de la Relatividad de Einstein podría dar una solución satisfactoria al problema de la masa oscura. Esta ley debería explicar todas las medidas dinámicas de masa anómalas a diferentes escalas de distancia y reducirse a la ley de Newton a la escala del sistema solar.

## 10. ORBITAS Y EPICICLOS

Las estrellas pueden seguir, en principio, órbitas muy complicadas en el espacio dependiendo de la forma en que esté distribuida la masa en la galaxia a la que pertenecen. Afortunadamente, la estructura de las galaxias parece ser lo suficientemente regular como para que las trayectorias de las estrellas en el disco se puedan aproximar por órbitas circulares con correcciones relativamente pequeñas.

Imaginemos, pués, que un punto, al que llamaremos punto guía o epicentro, describe una trayectoria circular alrededor del centro de una galaxia. La trayectoria real que buscamos se obtiene suponiendo que la estrella describe una órbita elíptica alrededor del epicentro a la vez que este punto guía se desplaza siguiendo la trayectoria circular (Figura 11a). Esta es la aproximación de los epiciclos. De acuerdo con esta aproximación, a una estrella en su órbita le corresponden dos períodos o tiempos característicos: a) el tiempo que tarda el punto guía en dar la vuelta alrededor del centro de la galaxia (período de rotación), y b) el tiempo que tarda en dar la vuelta alrededor del punto guía, acercándose y separándose radialmente del centro galáctico (período del epiciclo). En las galaxias el período del epiciclo varía entre una vez y el doble del período orbital. Las órbitas de las estrellas no son cerradas (solo lo podrían ser en el improbable caso en que la relación entre los períodos del epiciclo y de rotación fuera el cociente de dos números enteros). En la Figura 11b hemos representado una trayectoria orbital típica (podría ser la del sol alrededor del centro galáctico) en la que se ha exagerado la amplitud del movimiento radial para que se observe claramente su influencia.

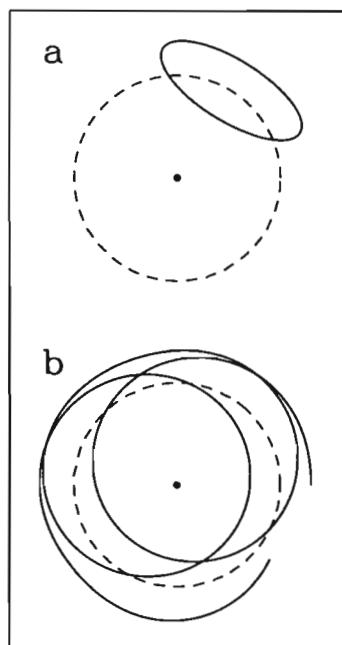


Figura 11

## 11. ESTRUCTURA ESPIRAL Y ONDAS DE DENSIDAD

Como hemos visto al estudiar su morfología, una de las características más sobresalientes de las galaxias es la estructura espiral. A primera vista parece que el origen de los brazos espirales podría explicarse de una manera natural a partir de la rotación diferencial. Supongamos que en un momento determinado en el disco de una galaxia existe una estructura alargada cruzando el núcleo (Figura 12a). Debido a la rotación diferencial las regiones más externas del disco giran más lentamente que las internas de tal manera que las partes más externas de la estructura alargada se irían quedando progresivamente retrasadas con respecto a las internas (Figura 12b), y con el tiempo la estructura inicialmente rectilínea adoptaría una forma espiral (Figura 12c). Sin embargo, si tenemos en cuenta la edad del Universo y las velocidades típicas de rotación de las galaxias los brazos deberían haber dado unas 100 vueltas alrededor del núcleo (Figura 12d). Como habitualmente se observa que los brazos espirales solo dan una o a lo sumo dos vueltas esta explicación no es aceptable. La rotación diferencial no solo no sirve para explicar la existencia de brazos espirales, sino que, al contrario, parece ser un mecanismo bastante efectivo para destruir cualquier otra estructura material (esto es formada por estrellas y gas) presente en el disco de una galaxia. En particular, muchas barras (observadas fuera de la región en que se produce la

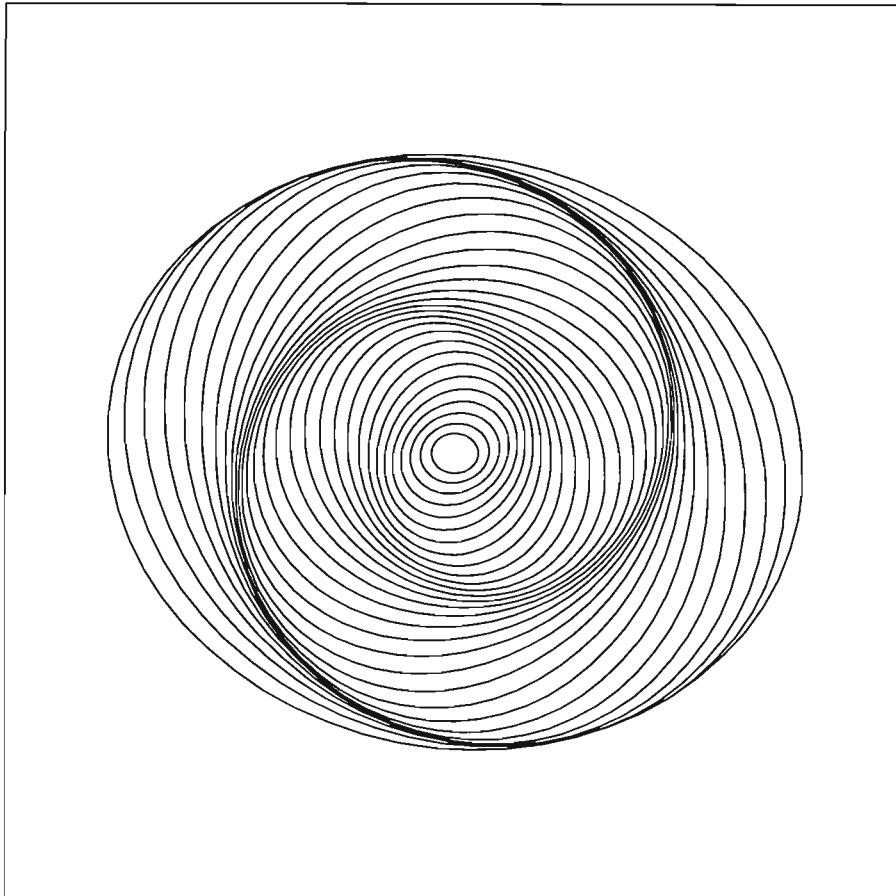


Figura 13

rotación de sólido rígido) deberían haber sido inexorablemente barridas por la rotación diferencial.

Entonces, si ninguna estructura material formada por estrellas parece ser capaz de resistir el efecto de la rotación diferencial en el disco de las galaxias ¿cómo se explica la existencia de barras y brazos espirales?

La solución más comúnmente aceptada a este problema es la propuesta por la teoría de las ondas de densidad. Según esta teoría un brazo espiral no es una estructura material constituida siempre por las mismas estrellas sino más bien una forma originada por una superposición de órbitas afectadas por la presencia de irregularidades en el campo gravitatorio de la galaxia.

Para explicar el concepto de onda de densidad podemos acudir a un ejemplo cercano a nuestra experiencia. Imaginemos una autopista de dos carriles con un límite de velocidad de 120 km/h. Un camión avanzando lentamente a 60 km/h provocará un embotellamiento a su alrededor ya que los vehículos rápidos deberán disminuir su velocidad y adelantarlo por el único carril disponible. Utilizando un lenguaje técnico podríamos decir que hay un aumento en la densidad de coches cerca del camión, y que este incremento local de densidad se mueve a una velocidad de 60 km/h. Los coches que se encuentran en el embotellamiento no son siempre los mismos, luego el embotellamiento no es una estructura material, sino una 'onda de densidad' que se mueve a menor velocidad que los coches. Análogamente, los incrementos locales en la densidad de estrellas producidos por alteraciones de la fuerza gravitatoria, son los que dan origen a barras y brazos espirales que no están formados siempre por las mismas estrellas (por eso

se dice que no son estructuras materiales) y que rotan con velocidades diferentes de las de las estrellas en el disco. En la Figura 13 se muestra como pueden formarse estructuras espirales combinando órbitas. Las ondas de densidad afectan especialmente al gas, fomentando la concentración de gas en los brazos espirales, causando, consecuentemente la formación de nuevas estrellas. Es decir, a su paso por el disco, los brazos espirales 'disparan' la formación estelar. Esto está de acuerdo con la predominancia de los fenómenos asociados al nacimiento de nuevas estrellas en los brazos espirales y es uno de los éxitos de la teoría de las ondas de densidad.



# M I S T E R I O S   D E L   C O S M O S

Rafael Rebolo

Investigador del C.S.I.C.

Investigador del Instituto de Astrofísica de Canarias

## GALAXIAS: PIEZAS CLAVE DEL COSMOS

No las podemos observar a simple vista, pero pueblan la inmensidad del cosmos y constituyen la pieza fundamental sobre la que se edifica éste. Las galaxias, conjunto de miles de millones de estrellas, sólo se identificaron como tales después de muchos siglos de observación astronómica. En las primeras décadas de este siglo el debate sobre la naturaleza de las "nebulosas" fue zanjado definitivamente gracias a la identificación de fiables indicadores astronómicos de distancia. Fue Leavitt quien advirtió por primera vez una interesante relación entre la luminosidad de las estrellas variables Cefeidas y el regular período de variación de esa luminosidad. En pocas palabras, observó que las estrellas Cefeidas intrínsecamente más brillantes cambiaban más lentamente su brillo que las menos luminosas. Esto habría de constituir la pista fundamental para establecer las distancias de las "nebulosas espirales" y por tanto, concluir si se encontraban dentro o fuera de nuestra galaxia. En varias nebulosas espirales fueron identificadas estrellas Cefeidas y sus períodos de variabilidad determinados permitiendo establecer así sus luminosidades y a partir de los flujos recibidos en la Tierra inferir la distancia a que se encuentran. Se comprendió entonces que las galaxias más cercanas estaban a distancias considerablemente mayores que el tamaño de nuestra Vía Láctea. Eran sistemas estelares situados a millones de años luz del nuestro, y sus luminosidades sólo se podían explicar si contenían miles de millones de estrellas.

Este "*misterio de las nebulosas*" fue resuelto con gran elegancia proporcionando el punto de partida que habría de conducir a una nueva visión del cosmos. El avance en las técnicas de sensibilización fotográfica y la construcción de telescopios cada vez de mayor diámetro pronto permitió identificar decenas de miles de galaxias en todo el cielo. Los primeros mapas del Universo mostraban una gran homogeneidad en la distribución de las galaxias a gran escala, dicho de otra forma, los conteos de galaxias en diferentes regiones de cielo de gran tamaño (100 grados cuadrados o más) resultaban muy similares. Los astrónomos de principios de los años veinte comenzaron así a visualizar una de las propiedades más significativas del Universo: la homogeneidad a gran escala.

Unos cincuenta años más tarde las nuevas generaciones de astrofísicos han mostrado que a escalas mucho más pequeñas el Universo dista mucho de ser homogéneo. Las galaxias suelen presentarse agrupadas en cúmulos de cientos o miles que están separados entre sí por decenas de millones de años luz, a veces conectados por filamentos de galaxias de similares dimensiones que rodean grandes espacios intergalácticos poco densamente poblados. La vecindad de nuestra Galaxia (los primeros mil millones de años luz) presenta estas inhomogeneidades locales que pensamos son la norma en el resto del Universo. Este misterioso universo "*esponjoso*" de vacíos, cúmulos, supercúmulos y filamentos demanda una explicación que todavía persigue la astrofísica. La formación de galaxias y de estas grandes estructuras está lejos de ser esclarecida. Sin duda la gravedad es el último responsable de las estructuras observadas al provocar el colapso de la materia alrededor de las pequeñas inhomogeneidades que pudieran haber existido en el universo primitivo, pero en ese proceso que ha llevado miles de millones de años hay al menos otros dos ingredientes fundamentales: la expansión del universo y la naturaleza de la materia, los que trataremos a continuación.

## LA EXPANSIÓN DEL UNIVERSO

Pocos años después de que los astrónomos apreciaran la auténtica naturaleza de las galaxias y su distribución homogénea a gran escala, se realizaron observaciones cruciales para nuestra comprensión del origen y evolución del cosmos. A mediados de los años veinte el astrónomo americano Edwin Hubble observó una relación muy simple entre el desplazamiento al rojo de la luz emitida por las galaxias y la distancia que nos separa de ellas. Este desplazamiento al rojo, interpretado como resultado de la velocidad de alejamiento de las galaxias (efecto Doppler) permitió a Hubble proponer su famosa ley

$$V = H_0 \cdot X$$

según la cual la velocidad de alejamiento de las galaxias  $V$ , es directamente proporcional a la distancia  $X$  que las separa, y  $H_0$  es la constante de Hubble para el tiempo presente. El valor de esta constante no está perfectamente establecido, probablemente se encuentra entre 50-80  $\text{Km s}^{-1} \text{M pc}^{-1}$ , su medida es uno de los principales objetivos del Telescopio Espacial Hubble. Esta ley tan sencilla no implica ni mucho menos que nuestra Galaxia sea el centro del Universo, al contrario es fácil comprobar que su validez implica que cualquier pareja de galaxias se alejan entre si con una velocidad tanto mayor cuanto mayor sea la distancia que las separa.

Es fácil imaginar que esta situación presente trasladada al pasado conduce a distancias tanto más pequeñas entre las galaxias conforme más atrás nos remontamos en el tiempo, y por tanto permite suponer un universo mucho más denso en el pasado.

Esta observación de Hubble ha sido confirmada en decenas de trabajos posteriores y constituye evidencia primaria de que el Universo está en expansión. No se trata pues de un universo estático como muchas cosmologías habían considerado anteriormente. La expansión aunque no fue aceptada inmediatamente, alcanzó relativamente pronto un alto grado de aceptación en la comunidad científica, porque encontraba explicación en el marco de las ecuaciones de campo de la Teoría de la Relatividad General.

La nueva concepción de la geometría del espacio-tiempo y su conexión con la distribución de materia que propuso Einstein en 1915 y que se resumen en sus ecuaciones de campo, había proporcionado a finales de los años veinte varias visiones del cosmos. En concreto la solución de las ecuaciones que había encontrado Friedmann empleando la métrica de Robertson - Walker sugería que el Universo podría encontrarse en expansión. De hecho, dependiendo de la densidad media del universo podría ser una expansión indefinida o incluso llegar a colapsar en un futuro. La densidad crítica que separa estas dos posibilidades es

$$\rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G}$$

donde  $H_0$  es el valor actual de la constante de Hubble y  $G$  la constante de gravitación universal.

Unos de los misterios que nos queda por desvelar del cosmos es si efectivamente la expansión será indefinida o no. El valor de la densidad crítica  $\rho_c = 2 \times 10^{-29} h_0^2 \text{ g cm}^{-3}$  (donde  $h_0 = H_0/100$  varía entre 0.5 y 1) es, aparentemente, mucho mayor que el de la densidad de materia luminosa que observamos (en estrellas y medio interestelar de galaxias) y eso apoya la idea de expansión indefinida, pero no sabemos cuanta materia no luminosa puede haber en el universo ni qué naturaleza puede tener, no podemos ser concluyentes sobre este punto al que volveremos más adelante.

En el marco de las ecuaciones de Einstein las galaxias se manifiestan sólo aparentemente con "velocidades de alejamiento". Es realmente el espacio quien se expande según la teoría, la separación entre dos galaxias cualquiera aumenta con el tiempo aunque ellas no cambian sus coordenadas, son las propiedades geométricas del espacio las que cambian en función del tiempo y una consecuencia directa de ello es el desplazamiento al rojo de los espectros de las galaxias. Aunque nuestra vida cotidiana no nos proporciona experiencias sencillas sobre estas propiedades cambiantes de la geometría del espacio-tiempo que a gran escala son dominantes del cosmos, debemos enfatizar que la solución de las ecuaciones de Einstein para objetos colapsados con simetría esférica (por ejemplo estrellas pequeñas de gran masa) ha sido verificada por la experiencia en un buen número de observaciones que van desde la precesión del perihelio de Mercurio, a la curvatura de la luz emitida por estrellas distantes a su paso cerca del Sol o el retraso del eco de señales de radar.

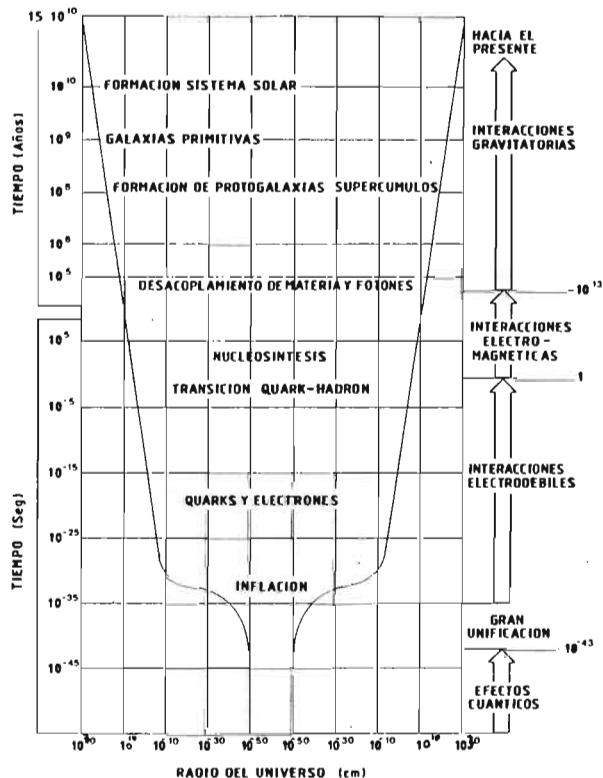
Aceptar que el modelo de Friedmann describe correctamente la evolución del universo nos lleva directamente a una singularidad matemática para el instante inicial, que no puede ser descrita en el contexto del modelo al tomar valores infinitos algunos de sus parámetros fundamentales. Así pues, el origen del cosmos queda fuera de la descripción cuantitativa en este contexto pero podemos realizar consideraciones de mucho interés sobre las condiciones físicas de instantes muy cercanos al origen.

Es fácil imaginar que si la distancia entre las galaxias fue tanto menor cuanto más atrás vamos en el pasado, alcanzaremos, cerca del origen, condiciones de muy alta densidad y muy alta temperatura en las que la materia y la radiación del universo adoptarían formas cada vez más elementales y sufrirían procesos de interacción que hoy sólo podemos explorar en los laboratorios de física nuclear y aceleradores de partículas. En ellos podemos reproducir situaciones tan energéticas como las de aquel cosmos primitivo cuando habían transcurrido sólo millonésimas de segundo desde el primer instante. En lo que sigue

describiré brevemente los principales rasgos de la teoría que describe la evolución del cosmos desde esa fracción de millonésima de segundo posterior, la teoría popularmente conocida como Teoría del "Big Bang" (La Gran Explosión) tiene ramificaciones especulativas que se adentran mucho más en el tiempo en su aproximación al origen del universo. Una de ellas que acapara considerable atención es la denominada "Inflación", pero queda fuera del alcance del presente texto.

El modelo de Big Bang clásico o estándar aunque ampliamente aceptado no deja de tener eminentes detractores y es conveniente recordar que siempre un modelo es una herramienta para tratar de describir un fenómeno físico - en este caso ¡el origen y evolución del universo! - y que su validez radica en la capacidad de dar explicación a las observaciones y experimentos y de predecir nuevos acontecimientos y fenómenos observables. La capacidad explicativa e incluso predictiva del modelo del Big Bang será tratada en la siguiente sección Fósiles del Universo, demos por el momento una descripción cualitativa del modelo comenzando unas pocas cienmillonésimas de segundo después del origen.

Los componentes de la materia en esa época eran quarks (las partículas elementales que constituyen a los protones y neutrones), fotones, electrones y neutrinos, en perfecto equilibrio termodinámico. El plasma primordial debía estar a una temperatura de varios miles de MeV (1MeV es un



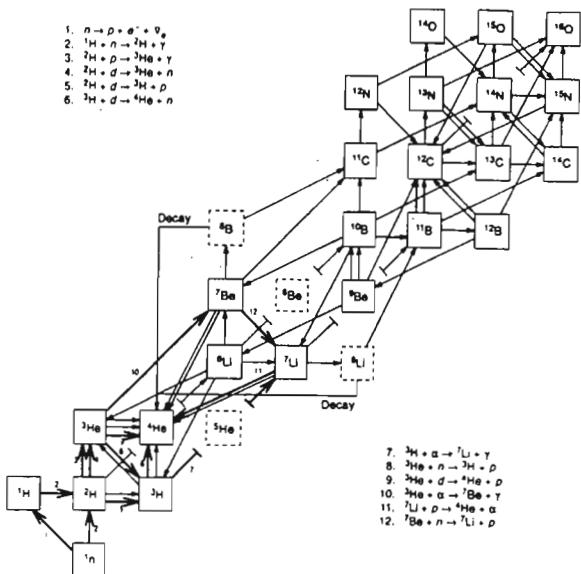
millón de electro-voltios) que corresponde a billones de grados centígrados. Con la expansión del universo el plasma evoluciona a temperaturas cada vez más bajas pasando por varias transiciones de fase, la primera es la que confina a los quarks en protones y neutrones. Termina aproximadamente en una diezmilésima de segundo, y es tan efectiva esta transición que aparentemente no hay quarks libres en el universo, todos están confinados. Conforme la temperatura decrece -en el modelo estándar  $T_{\text{kelvin}} = 1.52 \times 10^{10} t^{-1/2}$  segundos es la expresión que describe su cambio temporal- ciertos procesos que mantienen en equilibrio a los electrones, neutrinos, protones y neutrones dejan de ser eficientes y otros nuevos entran en acción. Cada vez que esto ocurre el modelo predice la existencia de un fósil de la época precedente que ha podido pervivir hasta nuestros días. Son tres los principales: el baño primordial de neutrinos, los elementos ligeros deuterio, helio-4 y litio-7 y el fondo cósmico de microondas. Cada uno se origina en etapas sucesivas cronológicamente y responden a los cambios que sufren los componentes de la materia y radiación en el universo entre las primeras cienmilésimas de segundo y los primeros cientos de miles de años.

## FÓSILES CÓSMICOS

### Neutrinos del Big Bang

Electrones ( $e^-$ ), positrones ( $e^+$ ), neutrinos  $\nu_e$  y antineutrinos  $\bar{\nu}_e$  interactúan entre sí de acuerdo a las reglas de la interacción débil. Cuando la temperatura del universo decreció a menos de mil millones de grados el ritmo de las reacciones que involucraban neutrinos se hizo mucho más lento que el ritmo de expansión del universo, dejaron pues de interactuar con la materia y la temperatura de este componente particular del universo evolucionó independientemente. Su distribución en el universo no ha cambiado desde aquella época sustancialmente, pero su temperatura ha decrecido con la expansión del universo estimándose ahora en unos 2º Kelvin.

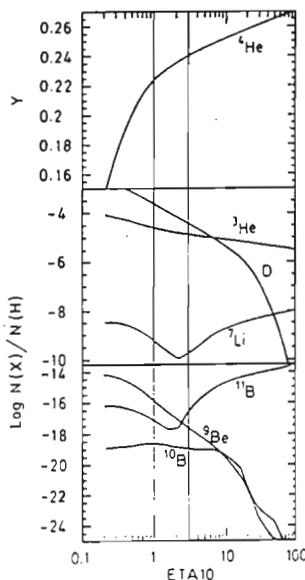
Los neutrinos primordiales habrían viajado desde entonces por el espacio y el tiempo sin ninguna interacción significativa con la materia. Su número se estima considerablemente alto (cientos por cada centímetro cúbico en el universo) pero la tecnología de detección de neutrinos que tan satisfactoriamente ha permitido investigar los generados en el interior del Sol, no está sin embargo desarrollada para lograr la detección de los neutrinos muchísimo menos energéticos que surgieron del Big Bang. Si existen o no, es uno de los misterios ocultos del universo que tal vez algún día no muy lejano podamos desvelar.



### LA SÍNTESIS DE LOS ELEMENTOS LIGEROS EN EL BIG BANG Y LA COMPOSICIÓN DE LA MATERIA EN EL UNIVERSO

Ya en la cuarta década del siglo era más que evidente para los astrónomos que la mayor parte de la materia que se observa en el universo está formada por hidrógeno (74-72%) y helio (25-28%) correspondiendo a los restantes elementos químicos no más de un 1%. Era claro que esta composición debía tener explicación en base a las reacciones nucleares que suceden en los distintos contextos astrofísicos. Por ejemplo, en los interiores de las estrellas se sabía que el hidrógeno se transmuta en helio y que en definitiva en esa transmutación reside la tremenda liberación de energía que permite a las estrellas brillar. Sin embargo, pronto se comprendió que era inviable la transformación de ~28% de la materia de hidrógeno a helio con sólo la actividad nuclear de las estrellas. Como mucho se puede explicar en base a ésta un 4-5% de producción a lo largo de la vida del universo. Gamow fue quien primero concibió la idea de que en los

primeros minutos del universo se pudieron dar las condiciones adecuadas para la síntesis de núcleos de helio en cantidad cercana al 23-25% de toda la materia existente. Los cálculos de Gamow y colaboradores fueron refinados en los años 60 y desde entonces se han incorporado todas las mejoras que la determinación de secciones eficaces en laboratorios nucleares han permitido. Los modelos de síntesis de elementos en el Big Bang son muy precisos desde el punto de vista teórico y predicen la producción de deuterio (hidrógeno pesado), helio-3 y helio-4 (este último es el usual) y litio-7 a partir de reacciones nucleares que tuvieron lugar entre 1s y 1000s después del instante inicial. Las cantidades de cada uno de estos isótopos dependen de un único parámetro en el modelo, la densidad de nucleones en el universo, en concreto un universo que fuera muy denso en la época de la nucleosíntesis habría producido más helio-4 y mucho menos deuterio, simplemente porque los neutrones que se necesitan para sintetizar estos núcleos habrían tenido más posibilidades de colisionar con los protones y la configuración del helio-4 que es la más estable los habría acaparado frente al deuterio. Es interesante notar que resultado de aquella época de síntesis cósmica de elementos no quedaron neutrones libres en el universo, todos fueron acaparados por otros



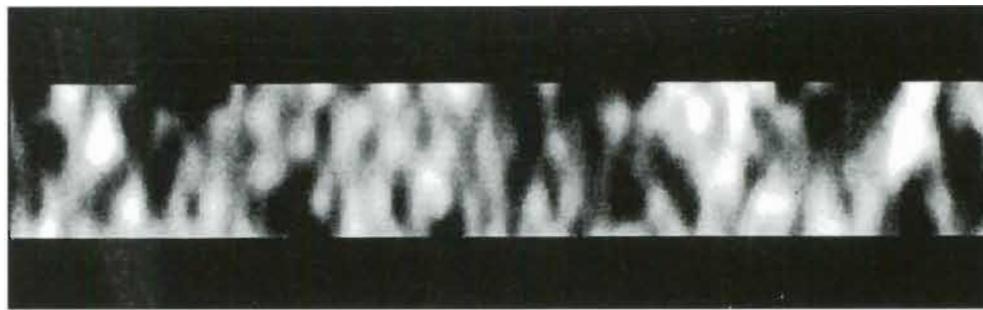
núcleos mientras que el 76% de la materia quedó en forma de protones primordiales. Sólo se produjo entre uno y diez núcleos de deuterio por cada cien mil protones y aproximadamente un núcleo de litio-7 por cada diez mil millones de protones. Pueden resultar cantidades despreciables pero la astronomía moderna ha mostrado que, efectivamente, en el espacio interestelar de nuestra Galaxia hay uno o dos núcleos de deuterio por cada cien mil de hidrógeno y en el espacio intergaláctico remoto los primeros resultados del telescopio Keck (10m) apuntan a que el número puede ser superior. En cuanto al litio-7 también se ha comprobado en los años ochenta que las estrellas más viejas de nuestra Galaxia, cuya composición material mejor se aproxima a la que emergiera del Big Bang, presentan en sus atmósferas un núcleo de litio-7 por cada diez mil millones de núcleos de hidrógeno. Estos núcleos de deuterio y litio-7 muy probablemente tienen su origen en los primeros minutos del universo, son fósiles de aquella etapa que nos pueden ayudar a descifrar las condiciones físicas de entonces.

¿Es bueno el acuerdo entre las predicciones y las observaciones de elementos ligeros? ¿Cómo se restringe la densidad nucleónica en el Universo?

Las observaciones de helio-4 en las galaxias más primitivas que conocemos y las anteriores mencionadas de deuterio y litio-7 encajan perfectamente con la predicción del modelo de Big Bang, pero las incertidumbres en las medidas astronómicas no son despreciables y todavía se puede avanzar mucho en su mejora y así poder acotar mejor el parámetro de densidad. Actualmente sabemos que este parámetro debe estar entre 0.6% y 10% de la densidad crítica que ya definimos anteriormente. Todo apunta a que en el universo no existe suficiente materia nucleónica para que ésta sea capaz de frenar la expansión, pero podría haber otras formas de materia que contribuyeran a ello. Esto lo discutiremos en la última sección del texto. Aquí insistiremos en que los elementos ligeros "fósiles" del Big Bang han sido ya descubiertos y aunque su contribución a la materia primordial no ha podido ser establecida con toda la precisión deseable, todo apunta a una confirmación satisfactoria del modelo. La nucleosíntesis de helio y el deuterio en el Big Bang y la síntesis de elementos más pesados en los interiores de estrellas durante su vida de equilibrio hidrostático o en las fases violentas de explosión como supernovas o novas, explican razonablemente la "misteriosa" composición química global de la materia del cosmos. La composición química detallada de cada objeto o clases de objetos astronómicos puede encerrar en si otros enigmas que son demasiado largos de enumerar aquí y que son objeto de estudio de la astrofísica nuclear.

### EL FONDO CÓSMICO DE MICROONDAS

Después de la época en que se sintetiza el helio y otros elementos ligeros, el universo prosigue su evolución, enfriándose progresivamente al expandirse. Los nuevos núcleos formados, los electrones y fotones siguen en equilibrio a través de procesos de interacción electromagnética. Especialmente fotones y electrones interactúan muy frecuentemente, hasta que la temperatura media del plasma es de sólo unos 3000 grados y los electrones no reciben de los fotones suficiente energía para liberarse de la fuerte atracción culombiana de los protones del plasma y comienzan a combinarse generando, por primera vez en la historia del universo, átomos neutros de hidrógeno. La formación de hidrógeno neutro reduce considerablemente la posibilidad de interacción entre materia y radiación. Los fotones pueden propagarse desde entonces libremente por el espacio sin encontrar partículas que los absorban o dispersen. Desde entonces el camino libre medio de un fotón del plasma cósmico es mucho mayor que la dimensión del universo observable y los fotones se han propagado por el universo probablemente sin ningún cambio significativo en su distribución energética o espacial. De nuevo Gamow entendió, por primera vez, que si el modelo del Big Bang era correcto debía existir un fondo de radiación en el tiempo presente que sería el fósil de aquella radiación liberada de la materia cuando la temperatura se enfrió a menos de 3000 grados. Estimó que la temperatura actual sería muy fría, de unos 6 Kelvin. Hoy sabemos que ese fondo de radiación existe y tiene una temperatura de  $2.726 \pm 0.001$  K (es decir, unos -270° C). Fue descubierto por los radioastrónomos americanos Penzias y Wilson en 1964 e

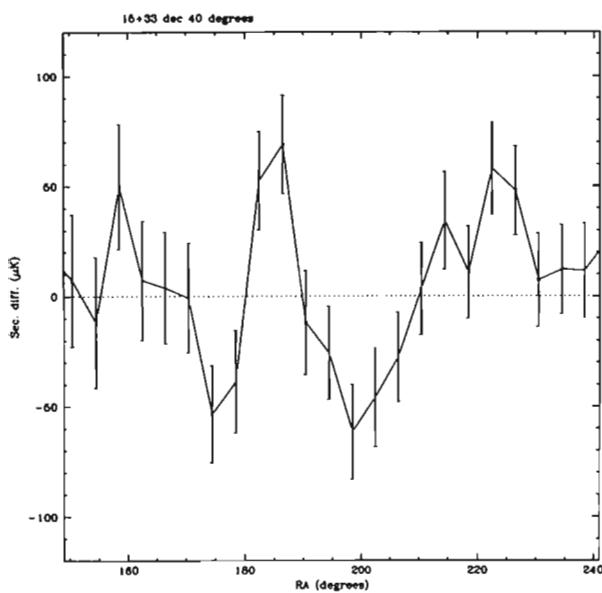


inmediatamente reconocido como las "cenizas" del Big Bang que Gamow había predicho.

La radiación tiene un máximo en longitudes de onda milimétricas (es la parte del espectro que denominamos microondas) y posee una distribución energética de un perfecto cuerpo negro hasta donde las medidas han podido comprobar. En nuestra Galaxia se ha encontrado evidencia de su existencia en otras regiones por su interacción con moléculas de CH y CN. Por su interacción con materia caliente en cúmulos de galaxias sabemos que está presente en los rincones más lejanos del cosmos y que no es un fenómeno local. Se trata de un baño de fotones fríos que inunda todo el espacio y además, es sorprendentemente uniforme a cualquier escala. Durante casi tres décadas los estudios sobre la uniformidad de la radiación de microondas no consiguieron encontrar signo de inhomogeneidades en ella, las medidas en distintas direcciones del espacio siempre conducían a la misma intensidad, o de otra manera, la temperatura de la radiación era la misma. Esto encerraba uno de los problemas más preocupantes para el modelo del Big Bang porque en nuestra comprensión de la formación de galaxias, cúmulos y demás estructuras, resultaba necesario que sus progenitores hubiesen dejado una huella en la radiación del Universo. Esta huella se debería haber preservado y manifestarse ahora como variaciones espaciales de la temperatura pero durante muchos años eludieron ser detectadas. La amplitud de esas variaciones depende de la densidad media del universo, de su ritmo de expansión y de la naturaleza de la materia en él, que existiesen o no dependía de que la idea general de que todas las estructuras han crecido a partir de pequeños granos de materia del universo primitivo fuese correcta. El satélite COBE (Cosmic Background Explorer) encontró las primeras evidencias de las deseadas "huellas" a nivel de unas 30 millonésimas de grado K, es decir, inhomogeneidades de una parte en cien mil. El Experimento de Tenerife sobre el Fondo Cósmico de Microondas (una colaboración

entre el Instituto de Astrofísica de Canarias y la Universidad de Manchester) que llevaba unos diez años buscando ese resultado pronto pudo comprobar el nivel de inhomogeneidad medido por el satélite americano e incluso llegar a detectar las que serían primeras huellas en el Fondo de Microondas (COSMOSOMAS fue el nombre que pensamos para ellas), después confirmadas por los datos obtenidos por el COBE. La sensibilidad de los experimentos fue finalmente suficiente para descubrir una nueva propiedad del cosmos.

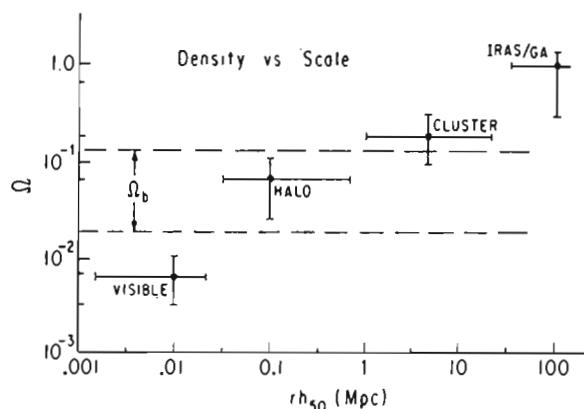
Aunque se había desvelado un importante "misterio", que nos hacía sentir en el buen camino, comenzaba un nuevo campo de investigación que esperamos traiga respuestas a muchas de las cuestiones que en las últimas décadas han impulsado cientos de trabajos. El valor de la densidad media, la naturaleza de la materia, etc. pueden ser inferidos del Fondo de Microondas si se consigue obtener mapas de él con diez veces más sensibilidad que los del COBE, desde luego desde tierra es una tarea ingente por las dificultades que la atmósfera presenta, pero desde el espacio es perfectamente factible en pocos años. A tal fin la Agencia Espacial Europea (ESA) ha aprobado el lanzamiento de la



misión científica COBRAS/SAMBA para el año 2004. Este nuevo satélite aunará los esfuerzos de varios centros de investigación europeos - entre ellos el IAC - para establecer con precisión sin precedentes las propiedades del Fondo Cómico de Microondas.

## MATERIA OSCURA

### ¿Formas exóticas?



partículas elementales detectadas y podrían contribuir a la materia oscura si tuvieran masa, sin embargo, la formación de galaxias no se puede entender hoy por hoy si los neutrinos son la componente dominante. Estamos frente a uno de los misterios más interesantes con que se enfrenta la Astrofísica. Dar explicación al origen de las galaxias en el contexto del modelo del Big Bang, que tan satisfactoriamente se ha mostrado para desvelar otros enigmas, nos conduce al que quizás sea el mayor de todos; el de la materia oscura. ¿Nos queda por descubrir todavía lo que es la componente mayoritaria de la materia del Universo?

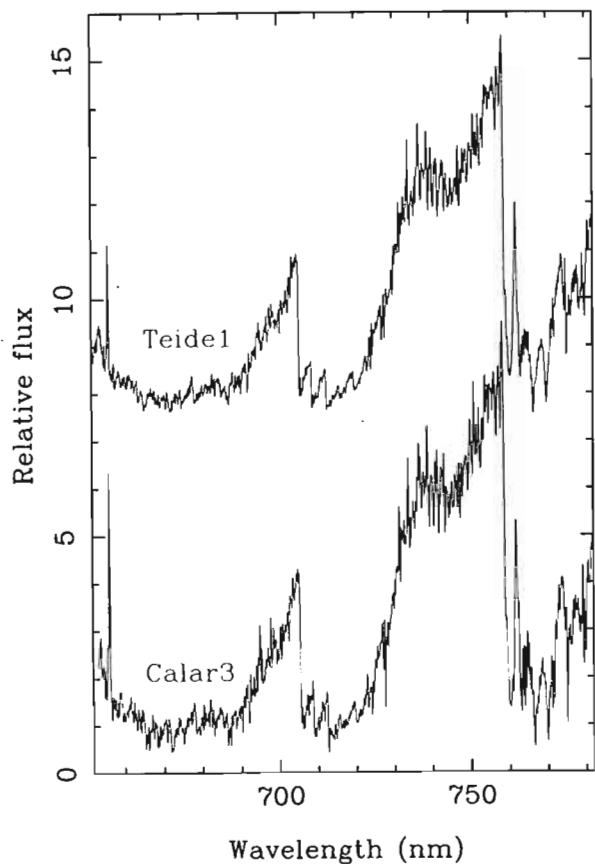
## GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

No sólo el origen de las galaxias apunta hacia esa componente oscura, la pura observación astronómica, desde hace más de sesenta años, ha ido acumulando datos sobre la posible existencia de materia que apreciamos sólo por sus efectos dinámicos en galaxias y cúmulos de galaxias.

Por ejemplo, sabemos que la cantidad de materia que medimos a partir de estrellas y gas en nuestra Galaxia es unas diez veces inferior a la que se necesita para explicar su curva de rotación. La cantidad de materia que debe existir en cúmulos de galaxias también debe ser unas diez veces superior a la que se deriva de la luminosidad, pues de otra forma no se puede explicar que sus galaxias tengan tan altas velocidades como se observan y no hayan escapado de ellos.

Es interesante notar que la densidad de materia nucleónica proporcionada por la nucleosíntesis en el Big Bang acuerda bien con las necesitadas para explicar las curvas de rotación de las galaxias y, por tanto, es coherente pensar que en los halos de galaxias la materia oscura es de naturaleza bariónica. Incluso buena parte de la sobre-densidad que se necesita en cúmulos de galaxias puede estar proporcionada por materia ordinaria. Los candidatos que pueden albergar esos nucleones son astros muy poco luminosos como las enanas marrones y los agujeros negros, enigmáticos objetos cuya existencia era un misterio a desvelar por los astrónomos hasta hace poco tiempo.

Lo averiguado hasta ahora con experimentos como el COBE o el de Tenerife, tan sólo permite especular con la necesidad de que exista alguna forma de materia no nucleónica (es decir, materia no ordinaria diferente a la que nos forma a nosotros y los objetos que nos rodean). A falta de medidas más precisas no es posible concluir de forma definitiva sobre su existencia, tan sólo podemos decir que la formación de galaxias y estructuras del Universo y el tamaño de las huellas que dejaron sus progenitores en el Fondo de Microondas se entiende mucho mejor si existe materia no nucleónica débilmente interactiva y ésta fuese la componente dominante del universo. Las formas de esta materia pueden ser muy variadas. Las teorías de partículas elementales han propuesto varias: axiones, fotinos, gravitinos ... todas ellas son, por el momento, especulativas pues ninguna ha sido identificada en laboratorio. Los neutrinos son las únicas



## AGUJEROS NEGROS

Los agujeros negros son un resultado “normal” de la teoría de la evolución estelar y de la relatividad de Einstein. Se pueden manifestar a través del efecto que su presencia produce en una estrella compañera. Así los mejores candidatos han sido descubiertos por la emisión de rayos X que se produce en el disco de acreción de materia que se origina alrededor del agujero negro cuando capta materia de una estrella compañera. El material acretado se calienta hasta temperaturas muy elevadas que explican la emisión poderosa en rayos X. Sistemas binarios, como V404 Cyg, albergan objetos compactos en su interior con masa superior a 5-6 veces la masa del Sol, como han mostrado investigaciones realizadas en el IAC. Tales objetos no pueden ser otra cosa que agujeros negros aunque sus propiedades todavía tienen que ser establecidas. Hay pocas dudas de que existan astros muy masivos de dimensiones muy reducidas (pocos kilómetros de radio) en el cosmos, pero parece que su número no puede ser muy elevado y es difícil que puedan explicar la diferencia entre materia luminosa y dinámica en galaxias.

## ENANAS MARRONES

El otro candidato para albergar la materia nucleónica no luminosa son las enanas marrones, astros del tamaño del planeta Júpiter pero hasta 70 veces más masivos que él, que no pueden brillar como estrellas al carecer de la masa necesaria para “quemar” hidrógeno en sus interiores. Las enanas marrones pueden formarse, al igual que las estrellas, a

partir de condensaciones del gas interestelar. Recientemente, observaciones realizadas desde el Observatorio del Teide han puesto de manifiesto que este es el caso, al descubrir el primer objeto que puede ser clasificado fiablemente como enana marrón. Se trata de Teide 1, un pequeño astro en las Pléyades que posee una masa entre 45 y 70 veces la de Júpiter y es mil veces menos luminoso que el Sol. Su juventud - con 100 millones de años es joven para las escalas astronómicas - permitió su detección en la búsqueda realizada porque no ha tenido tiempo de enfriarse y oscurecer dramáticamente. Esta primera enana marrón ha mostrado que efectivamente existen y se pueden formar libremente, pero su número en la Galaxia está por establecer. Nuestro grupo acaba de descubrir la segunda en las Pléyades, Calar 3, tras explorar aproximadamente el 1% del área de este cúmulo, y todo apunta a que el número de ellas en las Pléyades puede ser superior al de estrellas.

Si estos objetos se forman en la Galaxia de acuerdo a las mismas leyes que en el cúmulo de las Pléyades, cabe esperar que verdaderamente sean abundantes y que realicen una contribución apreciable al problema de la materia oscura, al menos a nivel galáctico. Hay varios programas observacionales en marcha que pretenden resolver esta cuestión, pero llevará algunos años alcanzar una conclusión definitiva.

La evidencia de existencia de materia oscura en el Universo en cantidades considerables, es cada vez mayor. Parece ser que una fracción apreciable reside en materia nucleónica, puede que incluso una fracción mayor resida en una forma que nos es desconocida. Esto último no deja de ser especulativo, pero la especulación fundada ha promovido numerosas investigaciones que han contribuido a engrandecer los horizontes del conocimiento, será interesante ver qué nuevos misterios logramos resolver persiguiendo aclarar éste de la materia oscura.



# ¿ H A Y   A L G U I E N   A H Í ?

Manuel Vázquez Abeledo

Coordinador de Proyectos del Instituto de Astrofísica de Canarias

## **BUSQUEDA DE VIDA EXTRATERRESTRE**

### **¿Hay alguien ahí?**

La existencia de vida extraterrestre ha constituido uno de los temas básicos en el pensamiento humano. Actualmente el desarrollo de la tecnología permite por primera vez afrontar el problema de la búsqueda y contacto con otras civilizaciones inteligentes.

En este trabajo se presentan primero los factores a favor y en contra de la pluralidad de mundos habitados tanto desde le punto de vista filosófico como científico. A continuación se realiza una estimación del número posible de civilizaciones inteligentes utilizando la conocida fórmula de Drake.

Los diferentes intentos de búsqueda de vida extraterrestre se resumen en los siguientes puntos:

- Búsqueda en el Sistema Solar
- Métodos pasivos de comunicación interestelar
- Métodos activos de comunicación interestelar, incluyendo la posibilidad de navegación interestelar

## **SEARCHING FOR EXTRATERRESTRIAL LIFE**

### **Is there anyone there?**

The existence of extraterrestrial life has been one of the basic topics in human thought. Current development of technology allows us, to make an unprecedented approach in order to confront the problem of finding and coming into contact with other intelligent civilizations.

In this work, we first present the pros and contras of the plurality of inhabited worlds, both from the philosophical and the scientific point of view. Secondly we give an estimate of the possible number of intelligent civilizations, using Drake's well known formula.,

The different attempts to encounter extraterrestrial life can be summarized in the following points:

- Search in the solar system
- Passive methods of interstellar communication
- Active methods of interstellar communication, including the possibility of interstellar navigation.

### **1.- INTRODUCCIÓN**

Durante miles de años la Humanidad ha observado el cielo, a veces con asombro y frecuentemente con miedo aunque poco a poco con creciente comprensión. El origen de la Vida y hasta que punto este ha sido un proceso único a escala del Universo es una de las cuestiones fundamentales que une los pensamientos de los filósofos de la antigua Grecia y de los modernos científicos.

#### **1.1 Escuelas filosóficas**

En un trabajo previo (Vázquez, 1994) hemos expuesto las líneas básicas de la evolución de esta idea a lo largo de la Historia. Dos visiones antagonicas han tratado de dar una explicación a la pregunta ¿Estamos solos en el Universo?.

##### **1.1.1 Visión pluralista**

Se apoya fundamentalmente en dos principios:

Principio de plenitud: los procesos físico-químicos que dieron lugar a la vida en la Tierra son representativos de la evolución de un planeta situado alrededor de una estrella que

cumpla una serie de condiciones mínimas. Por pequeña que sea la probabilidad de que ocurra el proceso, dada la cantidad de objetos en que puede desarrollarse y las escalas temporales del Universo, acabará por suceder tarde o temprano.

Principio de mediocridad: la Tierra no tiene nada de especial con respecto a otros objetos del Universo.

Probablemente fue la escuela de Demócrito, la primera en expresar estos principios: Los elementos que constituían el Cosmos eran los mismos que formaban la Tierra. La idea atomista resurgió durante el Renacimiento con apoyos tan importantes como el heliocentrismo de Copérnico. El Ser Humano no era ya el Centro y la Razón de la existencia de un Universo, que desde principios de nuestro siglo se sabe ya constituido por billones de galaxias separadas por grandes distancias.

Después del paréntesis de la Edad Media, la Iglesia Católica defendió la pluralidad de los mundos como una consecuencia de la Omnipotencia Divina, aún en contra de las ideas que habían llegado de Aristóteles.

### **1.1.2 Visión unitaria**

A la idea atomista se contrapusieron las de Platón y Aristóteles que establecían una separación entre los elementos terrestres y cósmicos. Durante la Edad Media, la unicidad de la Redención y del pecado original fueron argumentos religiosos expuestos contra la idea pluralista.

En nuestros tiempos se ha criticado al pluralismo como una especie de nueva religión basada en seres que nos vienen a salvar, compartiendo en este sentido algunas de las críticas a los platillos volantes (ver Jung, 1969).

El Principio antrópico viene a ser un cierto retorno al Antropocentrismo. La vida en la Tierra es suficiente para explicar todo el Universo, yendo en contra del principio de mediocridad.

## **1.2 Hechos básicos de partida**

### **1.2.1 Favorables al pluralismo**

- La composición química de los seres vivos se basa en los elementos más abundantes del Universo (H, C, N, O).

- La química que observamos en las nubes densas interestelares es la del Carbono. Se han detectado moléculas orgánicas muy complejas. Intentos de detectar glicina, el aminoácido más sencillo, no han dado todavía resultados concluyentes (Snyder et al., 1983; Combes et al. 1996).

- Tan pronto se dieron las circunstancias mínimas (enfriamiento de la corteza terrestre), la vida se originó en un tiempo relativamente breve (100 millones de años). Si bien las probabilidades estadísticas de tal proceso eran muy bajas, este se produjo.

- La formación de planetas parece estar unida en la mayor parte de los casos a la formación de las estrellas tanto si se trata de una estrella simple o de un sistema estelar múltiple. A pesar de la dificultad intrínseca en la detección de otros planetas, ya existen evidencias de su existencia. Sin embargo, algunos de los escenarios en que se encuentran, ya sea alrededor de pulsares (Wolszczan & Frail, 1992; Wolszczan, 1994) o con planetas gigantes muy cerca de una estrella de tipo solar (Mayor & Queloz, 1995; Marcy & Butler, 1996), parecen originar más preguntas nuevas que respuestas.

- Los cometas y una clase meteoritos llamados condritas carbonaceas, muestran una abundante cantidad de materia orgánica. Sin embargo los cometas son los únicos objetos que no han pasado por una fase caliente durante la formación del sistema solar, convirtiéndose en una especie de almacenes de materia orgánica, procedente de las nubes interestelares. Más tarde proporcionaron el material necesario para el origen de la vida hace 4000 millones de años, tiempos en que el bombardeo de estos objetos sobre la Tierra era especialmente intenso (Bogard, 1995). La nave Rosetta intentará, en el 2003, analizar "in situ" el material cometario, con lo que se ampliarán de forma considerable nuestros conocimientos, quizás a una escala superior a la derivada de las observaciones del Halley.

## 1.2.2 Contrarios al pluralismo

### Evolución biológica

- La evolución hacia la vida inteligente no es un desarrollo determinista como es típico de los procesos físicos y químicos sino que es mucha más compleja y llena de incertidumbres (Mayr, 1995).

- De hecho de miles de millones de especies que han existido sobre la Tierra, tan solo una ha evolucionado hacia la vida inteligente. Sin embargo al igual que solo ha habido un origen de la vida en la Tierra, ya que cualquier nueva forma de vida que se hubiese originado con posterioridad hubiera sido devorada por las ya existentes, así el hecho de que una especie haya evolucionado hacia la inteligencia ha impedido que otras, con una capacidad cerebral similar, hayan alcanzado tal nivel de evolución.

### Peculiaridades del planeta Tierra.

- La aparición de la vida en la Tierra tuvo su origen en el aporte de material orgánico procedente de cometas que impactaban la corteza terrestre hace unos 4000 millones de años. Para que se produjeran estos impactos se necesitaba una particular disposición de planetas gigantes (que capturan los cometas de las capas externas, tipo nubes de Oort y Kuiper) y de planetas interiores, de tipo terrestre, en cuyas superficies se desarrollaría la vida.

- La Tierra posee un satélite demasiado grande para su masa y su origen parece estar ligado a una acontecimiento catastrófico de inciertas posibilidades de repetición en otros sistemas planetarios. Las mareas producidas por la Luna contribuyeron a la concentración de material orgánico en las primeras fases de la evolución. Más tarde jugó un gran papel en la estabilidad del eje de rotación terrestre que permitió mantener las temperaturas en la Tierra dentro de unos límites tolerables para el desarrollo de la vida (Laskar et al. 1993).

- La Tierra ha sufrido diversos impactos de cometas y meteoritos a lo largo de la Historia que han puesto en peligro la existencia de la vida y condicionado su posterior evolución (recordar p.ej. la extinción de los dinosaurios).

- Existencia de un delicado ciclo de intercambio entre los componentes de la atmósfera terrestre, la litosfera y la actividad tectónica, que ha permitido una continua estabilidad de temperaturas esencial para el desarrollo de la vida (ver hipótesis de Gaia en p.ej. Lovelock 1983).

Para plantearnos el problema de la existencia de vida extraterrestre hagamos primero unos pequeños cálculos

## 2.- ECUACIÓN DE DRAKE

Una primera aproximación al problema es de tipo estadístico, tratando de estimar el número de civilizaciones inteligentes N que existen en la actualidad en el Universo. En 1961 F. Drake propuso la siguiente expresión

$$N = R f_p n_c f_v f_i f_c L = R P L$$

siendo R la tasa de formación estelar en nuestra Galaxia (10 estrellas/año)

$f_p$  la probabilidad de que una estrella tenga planetas

$n_c$  el número de planetas/estrella con entornos favorables para la vida

$f_v$  la probabilidad de que se desarrolle la vida

$f_i$  la probabilidad de que se desarrolle vida inteligente

$f_c$  la probabilidad que se intente una comunicación

L el tiempo de vida de una civilización tecnológica .

Dado que la edad de la galaxia debe ser mucho mayor que cualquier estima de L, entonces el número de civilizaciones tecnológicas que han existido a lo largo de la historia de la Galaxia será:

$$N T = R P T$$

siendo T el tiempo en que comenzó a aparecer la primera civilización tecnológica (como mínimo  $4.5 \times 10^9$  años )

Si  $N \gg 1$ , el número de civilizaciones podría aumentar en el caso de que se haya producido la colonización galáctica pues se habrían poblado planetas, e incluso el propio espacio, no incluidos en la ecuación de Drake.

Según las ideas que se apoyen, expuestas con anterioridad, las estimas van desde  $N = 10^{12}$  hasta  $N=1$ .

*Sin embargo, a pesar de todos estos factores favorables no existe la menor evidencia de la existencia de vida extraterrestre, ni siquiera al nivel más elemental, lo cual se conoce con el nombre de paradoja de Fermi-Hart (Hart,1975) ¿Porqué?.*

Tippler (1980) señaló que una colonización utilizando sistemas robóticos (von Neuman, 1966) habría concluido la colonización de la Galaxia en tan solo unos  $10^4$  años. Dado que no existen evidencias de su llegada a nosotros, Tippler concluye que  $N = 1$  y por consiguiente los seres extraterrestres inteligentes no existen. Sin embargo el proceso de colonización puede ser mucho más complejo (ver Stephenson, 1982; Sagan 1983), no haber tenido aún lugar dado que nosotros seríamos la civilización más avanzada (Papagiannis, 1982) o incluso ser imposible ya sea por razones técnicas o simplemente por falta de interés o curiosidad. Otras explicaciones de la paradoja están basadas en la estructura del Universo (Wesson, 1990) o en la utilización de otras técnicas distintas que la navegación para la comunicación interestelar (Scheffer, 1994).

Este tipo de argumentos es también aplicable al problema de la comunicación a distancia. Se necesita que las civilizaciones extraterrestres sean curiosas y persistentes tanto en lo que concierne a la búsqueda de otras señales como en el envío de sus propios mensajes.

El último factor L quizás sea el más decisivo y al mismo tiempo más desconocido. Se ha sugerido la inevitabilidad de una guerra total auto destructiva como final de una civilización tecnológica (ver Gott, 1993 para un resumen de posibles futuros). La extrapolación de nuestra Historia (ver Richardson, 1960) nos llevaría a tal momento en un plazo relativamente corto. En este sentido solo las civilizaciones pacíficas (E.T. versus Alien) serían las únicas con las que podríamos contactar.

En cualquier caso, aplicando un viejo aforismo, *la ausencia de evidencia no es la evidencia de la ausencia*. Así pues, quizás merezca la pena la búsqueda.....

### 3.- BÚSQUEDA EN EL SISTEMA SOLAR

El encontrar alguna forma de vida, por primitiva que esta sea, dentro de nuestro propio sistema planetario sería un paso crucial muy favorable en apoyo a las ideas pluralistas.

#### 3.1 Marte

El planeta rojo ha constituido el primer blanco de interés en la búsqueda de vida extraterrestre. Las observaciones en el pasado siglo de los "canales" por Schiaparelli (ver Vázquez, 1994) levantaron la imaginación de la gente, convirtiendo a este planeta en el protagonista de destacadas novelas de ciencia ficción (p.ej. Bradbury (1950) , Allaby & Lovelock (1984) etc.)

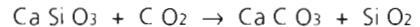
La era espacial permitió una búsqueda "in situ" de la vida marciana. Los experimentos llevados a cabo sobre la superficie de Marte por la naves Viking I y II en 1976, constituyeron la primera experiencia real de búsqueda de vida extraterrestre. Tres instrumentos diferentes buscaron productos metabólicos en el suelo marciano. Los resultados fueron negativos (ver p.ej. Klein, 1979 y el Vol. 82 del Journal of Geophysical Research) lo cual supuso una congelación del programa previsto de exploración de Marte. Con posterioridad han ido surgiendo dudas (ver p.ej. Hansson, 1991) sobre la interpretación de los resultados y lo adecuado del lugar de toma de las muestras.

De hecho ciertas estructuras geológicas (Carr, 1995) parecen evidenciar la existencia de agua líquida sobre su superficie en un remoto pasado lo cual implicaría asimismo la

existencia de una atmósfera mucho más densa con altos contenidos de CO<sub>2</sub> (Mc Kay & Stoker, 1989). Las temperaturas relativamente altas necesarias para la existencia de tal atmósfera, parecen estar en conflicto con un Sol un 30 % menos brillante que en la actualidad (Kasting & Grinspoon, 1991), a pesar del efecto invernadero producido por el bióxido de carbono. Otras fuentes de calentamiento deben ser exploradas (Squyres & Kasting, 1994) junto con otros modelos de la evolución de la luminosidad solar (Graedel et al. 1991).

El mismo ciclo del CO<sub>2</sub> parece haber funcionado en Marte y la Tierra en los primeros tiempos y comprendería las siguientes fases.

- Aporte del CO<sub>2</sub> a la atmósfera mediante la actividad volcánica.
- Extracción del CO<sub>2</sub> de la atmósfera mediante la reacción con los silicatos de la litosfera según la reacción



Este proceso depende de la presión parcial del bióxido de carbono y de la temperatura requiriendo el agua como catalizador.

- Los carbonatos formados son conducidos a los fondos submarinos.

La actividad tectónica provoca la subducción de este material a capas profundas en donde el aumento de temperaturas y presiones ocasiona la inversión de la reacción anterior. El CO<sub>2</sub> formado se inyecta de nuevo a la atmósfera según el primer proceso.

Pues bien en Marte esta tercera parte o no funcionó o se interrumpió muy pronto, debido a la menor masa de Marte, lo que condujo a la casi completa desaparición del CO<sub>2</sub> de su atmósfera.

Todo esto ha reavivado el tema de la existencia de vida marciana, ya sea esta fósil (Walter & des Marais, 1993) o conservada a un nivel elemental debajo de la superficie. Por desgracia las últimas naves enviadas: Phobos I y II (lanzados en Julio de 1988) y Mars Observer en 1993 (ver Abbee et al. 1992) concluyeron en fracaso. En estos momentos se está desarrollando un ambicioso plan de exploración utilizando la moderna tecnología de bajo coste que comprende los siguientes proyectos.

- *Mars Global Surveyor* previsto su lanzamiento en Noviembre de 1996, entrará en órbita marciana en Septiembre de 1997 comenzando a obtener imágenes de alta resolución de cara a ubicar futuras misiones y servir de enlace para las transmisiones del Mars Pathfinder y Mars96.

- *Mars Pathfinder* será lanzado en Diciembre de 1996 y se posará el 4 de Julio de 1997 sobre la superficie de Ares Vallis llevando un vehículo, llamado Sojourner, para la exploración de las inmediaciones.

- *Mars96*, proyecto ruso, se lanzará también en Noviembre de 1996 y tendrá una sección que permanecerá en órbita y cuatro sondas que irán a la superficie, dos de las cuales realizarán perforaciones de unos pocos metros, midiendo la abundancia de diversos elementos, en especial del agua..

- *Planet B*, proyecto japonés, que será lanzado en 1998 y que entre otros instrumentos llevará un espectrómetro de masas para medir la composición de la alta atmósfera marciana.

- *Mars Surveyor 98* y *Mars Surveyor 98 Lander*, que serán lanzados en Nov. 1998 y Dic. 1999 respectivamente, completarán el trabajo de exploración anterior explorando el Polo Sur marciano.

El siguiente paso vendrá de la mano de un proyecto todavía más ambicioso de colaboración internacional, denominado *Mars Together*, que podría conducir a un viaje tripulado hacia 2010. Etapas previas serán la construcción de la estación espacial *ALPHA* y nuevas misiones planeadas para 2001 y 2003.

### 3.2 Titán

Satélite de Saturno, su atmósfera fue descubierta por el español Comas Sola hacia 1920 desde el Observatorio Fabra de Barcelona. En su composición destaca el nitrógeno, etano y metano (Kuiper, 1944) con una presión superior a la atmósfera terrestre. La acción de radiación solar ionizante sobre dichos componentes permite la formación de complejas moléculas orgánicas, en especial hidrocarburos. Esto lo convierte en un escenario atractivo de

algún tipo de actividad biótica. De hecho el famoso experimento de síntesis orgánica de Miller (1953) fue desarrollado en condiciones similares. La Tierra pudo haber tenido una atmósfera parecida si hubiera estado situada más alejada del Sol.

Los compuestos orgánicos citados son el principal componente de los aerosoles de la atmósfera, llamados tolinas, que impiden la observación de su superficie en radiación visible (Sagan et al. 1992). La superficie se piensa que estaría cubierta por océanos oscuros de metano y etano.

Ánalisis de observaciones del Voyager parecen indicar variaciones en las concentraciones de hidrocarburos con la latitud, probablemente en relación con cambios en la distribución espacial del flujo radiativo solar (Coustenis et al. 1995a).

Utilizando un espectrógrafo FTS en el infrarrojo, Coustenis et al., 1995b, han confirmado la existencia de agua helada en su superficie, probablemente mezclada con hidrocarburos. Imágenes del Hubble (Smith et al. 1996) señalan la presencia de manchas brillantes que podrían corresponder a altiplanos emergiendo de los océanos o bien ser cráteres de impacto formados sobre una superficie helada.

En 2004 la sonda *Huygens*, lanzada en 1997 junto con la nave Cassini, penetrará en la atmósfera de Titán y proporcionará información de primera mano sobre la química de su atmósfera y superficie.

En cualquier caso, a pesar de lo sugestivo que resulta Titán para la exobiología, las bajas temperaturas reinantes hacen altamente improbable un ritmo de reacciones químicas compatible con el origen de vida.

### 3.3 Europa

Otros cuerpos en el Sistema Solar parecen cumplir también algunos de los requisitos mínimos para la existencia de vida. Entre ellos destaca uno de los satélites de Júpiter: Europa, el mundo de la vida en la novela de A. Clarke 2010. El Voyager nos mostró una superficie cubierta de hielo, debajo de la cual se ha especulado que puedan existir océanos de agua líquida con las fuerzas de marea de Júpiter actuando como un mecanismo básico de calentamiento (Reynolds et al. 1983). Por otro lado se han detectado en Europa pequeñas cantidades de oxígeno (Hall et al., 1995) aunque probablemente no sean de origen biológico sino como consecuencia de la acción de la radiación ultravioleta solar sobre las moléculas de vapor de agua. Otros satélites como Enceladus y Tritón pueden compartir algunas de estas características.

A esta lista de candidatos se ha añadido últimamente Mercurio (Harmon et al., 1992) en cuyos polos pueden darse condiciones favorables de temperatura.

### 3.4 Detección de signos de vida en otros sistemas planetarios

Un buen método de cara a la búsqueda de vida en otros sistemas planetarios es estudiar como la vida terrestre se manifiesta cuando nuestro planeta es observado desde el espacio.

Kilstón et al. (1966) utilizando imágenes del Nimbus 1 y del Tiros 2 (con una resolución de 1 km) solo encontraron evidencias de vida inteligente en una red de autopistas en USA. Con una ganancia de 10 en resolución (imágenes del Geminis y Apolo), Sagan & Wallace (1971) señalaron que las probabilidades de detectar vida eran tan solo de un 1% (grandes redes agrícolas).

En cuanto a la evidencia de una tecnología terrestre Sullivan et al. (1983) y Billingham & Tarter (1992) indicaron que las ondas de los sistemas de radar terrestres podrían ser detectadas a una distancia de 60 años luz por un radiotelescopio similar al de Arecibo (305 ms de diámetro).

Utilizando la instrumentación de la nave Galileo en su viaje Tierra - Venus - Tierra - Júpiter y durante su aproximación a 960 kms, Sagan et al. (1993) buscaron que rasgos del espectro electromagnético indicaban la presencia de vida terrestre. Bandas espectrales de vapor de agua, dióxido de carbono, metano y oxígeno fueron los signos claros de una actividad biológica junto con la existencia de un pigmento visible en la región 0.67 - 0.76 micras sobre grandes zonas de la superficie terrestres: la clorofila. En cuanto a señales de vida inteligente,

señales de ondas de radio de banda muy estrecha y moduladas en amplitud parecían evidenciarla.

Leger et al. (1993) han propuesto buscar la banda de absorción debida al ozono, O<sub>3</sub>, situada en 9.7 micras, como indicador de la existencia de oxígeno en planetas extrasolares. En este intervalo espectral el contraste planeta/estrella sería mucho más favorable que cualquier indicador en el visible.

Proyectos espaciales como el europeo Darwin y el americano Oases han sido propuestos con este objetivo (ver también Angel et al. 1986).

#### 4.- ESTRATEGIAS DE CONTACTO (SETI)

Dos son los principales métodos para la comunicación con posibles civilizaciones extraterrestres. Por un lado tenemos los pasivos que se basan en detectar señales de origen no natural procedentes del Universo y por otro los de tipo activo que tratan de detectar rasgos de vida extraterrestres, enviar mensajes que señalen nuestra presencia o incluso realizar observaciones in situ ya sea con presencia humana o mediante robots.

Cualquier método ha de establecer a priori tres parámetros básicos: Primero, el ángulo sólido (dirección) a la que se envía el mensaje o hacia donde se orienta nuestro detector. En segundo lugar el canal de comunicación que para el caso de utilizar el espectro electromagnético significará la elección de una frecuencia de contacto. Por último se ha de tener en cuenta la sensibilidad de sistema de escucha, para los métodos pasivos, o el alcance del mensaje para los activos.

La posible vida extraterrestre puede estar en diferentes grados de evolución que condicionarán nuestros métodos de búsqueda. En una primera aproximación podemos considerar seis tipos diferentes de vida extraterrestre:

- **Tipo A:** Vida que no ha evolucionado todavía hacia la inteligencia. Necesitará de métodos activos poderosos para su detección.
- **Tipo B:** Vida inteligente que no ha llegado todavía a disponer de tecnología para la comunicación interestelar.
- **Tipo C:** Civilización similar a la nuestra. Pocas posibilidades de detección con métodos pasivos, al menos a corto plazo.
- **Tipo D:** Capaces de utilizar toda la energía incidente de su Sol para la comunicación interestelar, entre  $10^{16}$  y  $10^{17}$  w. En la Tierra disponemos actualmente tan solo un 10% de este valor mínimo.
- **Tipo E:** Utilizan toda la energía de su estrella. ( $\sim 4 \times 10^{26}$  w.) para la comunicación interestelar
- **Tipo F:** Utilizan toda la energía de su galaxia. ( $\sim 4 \times 10^{37}$  w. ).

Estas tres últimas se corresponden con las I, II, III propuestas por Kardashev (1964) y constituyen el objetivo de los métodos pasivos de búsqueda. Podremos detectar los mensajes enviados expresamente hacia nosotros, o bien captar las emisiones de su sistema interestelar o local de comunicaciones (von Hoerner, 1961). Una tercera posibilidad existe y es que se nos quiera mantener aislados de una red de comunicaciones galáctica o bien que, por alguna razón, no se tenga ningún interés por nosotros (ver Ball, 1973 para la idea del zoo cósmico).

##### 4.1 Envío de mensajes (Pionner, Voyager , Lageos)

Durante el siglo XIX, y en paralelo con discusiones sobre la existencia de vida en La Luna y sobre todo en Marte, se realizaron las primeras propuestas de mandar mensajes a una civilización extraterrestre mediante construcción de dibujos con ciertas estructuras expresando conocidos teoremas geométricos. Charles Cross (1846 - 1889) propuso enviar pulsos codificados de luz por medio de gigantescos espejos. C. Gauss sugirió dibujar un triángulo rectángulo en Siberia que simbolizase el teorema de Pitágoras. De forma similar von Littrow proponía el Sahara para la elaboración de dibujos. N. Tesla (1856-1943) diseñó un experimento para enviar señales radioeléctricas y en 1920 G. Marconi (1874 - 1937) anunció la detección de

señales de origen extraterrestre (ver Smith, 1990 para una descripción de estos intentos).

Las placas que llevan a bordo el *Pionner X* y *XI* han constituido el primer intento de comunicación activa. El X, lanzado el 3 de Marzo de 1972, cruzó en 1989 la órbita de Plutón convirtiéndose en el primer objeto construido por el Hombre que se adentra en el medio interestelar. Dentro de 32600 años pasará cerca de la estrella Ross 2487. Objetivo similar lleva el *Pionner XI* que lanzado el 5 de Abril de 1973 pasará dentro de 42400 años por las proximidades de AC+793888. Llevando en su interior una especia de Encyclopedia de la Humanidad, los *Voyager 1* y *2* fueron lanzados el 20 de Agosto y el 5 de Septiembre de 1977, respectivamente. Este último se acercará a la estrella Sirio dentro de 497000 años.

Dentro de esta categoría se puede incluir la placa del satélite *Lageos*, que con el objetivo de medir el desplazamiento de los continentes permanecerá en órbita terrestre varios millones de años.

#### 4.2 Ondas de radio

K. Jansky detectó en 1932, por primera vez, ondas de radio procedentes del espacio exterior. G. Reber (1940) realizó el primer mapa del cielo, mostrando una concentración de emisión en la dirección de Sagitario (centro de la Galaxia). En 1950, y de forma independiente, Kiepenheuer y Ginzburg, propusieron que las ondas de radio cósmicas eran producidas por una radiación de origen no térmico: la radiación sincrotón. Ese mismo año se habían catalogado más de un millar de radiofuentes, abriendose así una nueva ventana para el conocimiento del Universo.

La máxima distancia,  $R$ , a la que puede operar un enlace de ondas electromagnéticas está dado por la expresión

$$R^2 = (P_t G_t A_c) / (4 \pi P_{det})$$

donde  $P_t$  = Potencia transmitida ;  $G_t$  = Ganancia de la antena transmisora

$A_c$  = Área de la superficie colectora

$P_{det}$  es la potencia mínima detectable por el sistema receptor dada por

$$P_{det} = k T_r (B / \tau)^{0.5}$$

siendo  $k$  la constante de Boltzmann,  $B$  el ancho de banda,  $\tau$  el tiempo de integración de la señal y  $T_r$  la llamada temperatura de ruido del sistema. Este último factor disminuye con la longitud de onda, lo que convierte a las ondas de radio en el canal más adecuado para las comunicaciones interestelares. Cocconi & Morrison (1959) propusieron como frecuencia de comunicación la zona espectral alrededor de 1420 Mhz donde tanto la influencia de la atmósfera terrestre como la radiación galáctica presentan un mínimo. Es el llamado "aguero del agua", debido a la presencia de numerosas líneas de OH y H que se extiende de 1400 a 1700 Mhz. Acuerdos internacionales prohíben la transmisión de señales en estas frecuencias.

#### 4.3 Láseres

Poco después de su descubrimiento, Schwartz & Townes (1961) propusieron el utilizar láseres casi monocromáticos ( $\Delta\lambda / \lambda \approx 10^9$ ) para la comunicación interestelar. Junto con la pequeña anchura del haz presentarían la posibilidad de utilizar pequeños telescopios ópticos como receptores. Actualmente existe un proyecto en la Univ. de Ohio, llamado Columbus, el cual partiendo de la experiencia pionera del ruso MANIA (*Multichannel Analyzer of Nanosecond Intensity Alterations*), busca fluctuaciones de brillo a la escala de nanosegundos.

Este tipo de comunicación tendría la ventaja de no sufrir la disminución de la potencia con el cuadrado de la distancia, siempre y cuando la apertura del transmisor  $D$  se pudiera elegir de tal forma que la región iluminada por el haz láser (p.ej el tamaño angular de la órbita del planeta) coincida con el límite de resolución  $R = 2.44 \lambda / D$  del telescopio emisor de la señal, siendo  $\lambda$  la longitud de onda de la radiación. Es decir se mediría la intensidad específica en lugar del flujo.

A la escala temporal de nanosegundos el brillo de la señal sobrepasaría en varios ordenes de magnitud a la radiación de la estrella. Las enormes energías necesarias ( $\approx 10^{18} \text{ W.}$ ) para la generación de estos impulsos pueden estar disponibles en la Tierra a mediados del próximo siglo.

#### 4.4 Neutrinos

Estas partículas elementales se originan en el interior de las estrellas como consecuencia de las reacciones termonucleares y se propagan hacia el exterior interactuando muy débilmente con la materia. Para la detección de los neutrinos solares se han utilizado substancias como el Cl o el Ge. Otros objetos cósmicos, como supernovas, pulsares y galaxias activas, emiten neutrinos mucho más energéticos que los solares que podrían ser utilizados por seres extraterrestres como canales de comunicación mediante la codificación de sus pulsos. Este método tendría la ventaja de que la anchura espacial del haz sería más estrecha que la de las ondas de radio.

Learned et al. (1994) han descrito un método para generar pulsos de neutrinos describiendo las ventajas que posee con respecto a la comunicación por ondas de radio. Grandes cantidades de agua oceánica podrían ser un adecuado detector cubriendo de una sola vez todas las direcciones del cielo. En esta dirección están en la actualidad en fase de desarrollo proyectos como el DUMAND, *Deep Underwater Muon and Neutrino Detector* (ver Roberts, 1992) que permitiría detectar señales transmitidas a 1 kpc de distancia.

#### 4.5 Exceso de radiación Infrarroja

Civilizaciones de al menos tipo D podrían disponer de gigantescas plantas colectoras de la energía procedentes de su estrella, llamadas esferas de Dyson (ver Dyson, 1960). Situadas alrededor de su planeta reemitirían la energía en la zona del infrarrojo y microondas. Sagan & Walker (1966) estudiaron las posibilidades para su detección. Se tendrían que buscar objetos con exceso en IR, mostrando un espectro de cuerpo negro en esta regiónpectral y asociados a una débil fuente en el visible. Actualmente el archivo de datos del IRAS nos muestra una serie de estrellas con exceso de emisión infrarroja, que pudieran servir como punto de partida a esta investigación. Sin embargo existe el peligro de confusión con estructuras naturales tales como envolturas circumestelares de polvo alrededor de gigantes rojas.

### 5.- BLANCOS DE OBSERVACIÓN

Dos tipos diferentes de programas existen según la estrategia elegida:

- Barridos de todo el cielo visible buscando una señal de origen artificial.
- Objetos seleccionados previamente. Una elección adecuada haría la búsqueda más eficiente. Esta estaría basada en los factores que hacen un planeta habitable. Siguiendo a Kasting et al. 1993 estos podrían ser los más importantes.

- La estrella debe de encontrarse en la fase de secuencia principal.

La superficie planetaria debe tener entre 0º y 100º C para permitir la existencia de agua líquida durante toda la fase de estabilidad de la estrella.

- El planeta debe tener una superficie sólida

- El planeta debe tener suficiente gravedad (masa) para retener una atmósfera

Kasting et al. (1993) han estudiado en detalle las zonas de habitabilidad alrededor de diferentes tipos de estrellas y Wetherill (1996) ha modelado la formación de planetas terrestres para diversos tipos de sistemas estelares. La posición de estos planetas es bastante independiente de la masa estelar pero esta es decisiva para la anchura de la zona habitable alrededor de la estrella.

Todo ello nos lleva a:

- Estrellas enanas de tipo solar (F,G,K), preferentemente aisladas, aunque podrían considerarse también las que formen parte de sistemas binarios e incluso múltiples. Tenemos aproximadamente 1000 de estas estrellas en un radio de 100 años luz. Fogg (1992) lista unas 28 estrellas, situadas en un radio de 12 años luz, que podrían poseer planetas compatibles con el desarrollo de la vida.

- Edades mayores que el Sol ( $4.5 \times 10^9$  años) para que la vida haya tenido tiempo para haber evolucionado al menos hasta un grado de civilización tipo C.
- Factores tales como la metalicidad de la estrella pueden influir en la formación del

sistema planetario y la aparición de vida en su seno.

## 6.- LENGUAJE DEL MENSAJE

Aspecto importante tanto para los métodos activos como para los pasivos. En estos últimos se buscan actualmente señales de banda muy estrecha y que pulsen con períodos menores de 10 segundos. Sin embargo, el descubrimiento de los pulsares nos enseñó como una señal periódica ultracorta puede ser debida a un proceso completamente natural (ver Bell Burnell, 1977).

### 6.1 Contenido del mensaje

Tanto nuestros mensajes como los extraterrestres podrían realizarse con algún tipo de codificación, la cual por ejemplo podría estar en las frecuencias elegidas para la comunicación que estarían relacionadas con alguna constante de la Naturaleza (ver Blair & Zadnik, 1993). En cuanto al texto Heidmann (1993) propone simplemente mandar el contenido de una Encyclopædia siguiendo la idea de los Voyager. Un lenguaje especialmente diseñado para la comunicación interestelar ha sido propuesto por Freudenthal (1960).

### 6.2 Actitud en caso de contacto

Se ha planteado asimismo como se debe de responder en caso de verificarse la existencia de un mensaje extraterrestre.

En 1989 se aprobó por el Consejo de la International Telecommunications Union una *Declaration of Principles following the Detection of Extraterrestrial Intelligence* con los siguientes puntos:

- Verificar el origen extraterrestre del mensaje
- Informar a otros grupos de investigación sobre el mismo tema
- Informar a determinados organismos internacionales
- Realizar el anuncio público del descubrimiento
- Poner a disposición de la comunidad científica los datos recogidos
- Continuar las observaciones
- No llevar a cabo ninguna respuesta antes de llegar a un acuerdo a nivel internacional.

## 7.- HISTORIA DE LOS PROYECTOS DE BUSQUEDA

En el Apéndice I se señalan las principales características de diversos intentos de comunicación que se han llevado a cabo desde 1960 con el pionero proyecto OZMA que tuvo las estrellas Epsilon Eridani y Tau Ceti como blancos. A principios de los setenta se propuso el llamado Proyecto Cyclops (Oliver & Billingham, 1972), que si bien nunca llegó a realizarse, permitió plantear por primera vez los problemas básicos de la búsqueda de civilizaciones extraterrestres. En el año 1982 la Unión Astronómica Internacional creó la comisión No. 51 para el estudio de los métodos de búsqueda de vida extraterrestre.

En la actualidad los principales proyectos en Estados Unidos están financiados por la iniciativa privada (p.ej The Planetary Society) después de la cancelación del programa de la NASA. Para otros proyectos ver Heidmann (1995). La tecnología actual permite muestrear millones de canales y los procedimientos de análisis de señales derivados del desarrollo de la teoría de la información, permiten asimismo detectar rápidamente señales sospechosas de un origen no natural. Por otro lado numerosos boletines, a los cuales se ha unido la conocida WWW de Internet, divulan noticias relacionadas con este tema.

Al igual que otros descubrimientos astronómicos, la clave puede estar en la paciente labor de los astrónomos aficionados cuyos esfuerzos, utilizando pequeños equipos, están coordinados por la SETI League.

## 8.- PROYECTOS EN MARCHA Y RESULTADOS

### 8.1 OHIO

Es el más antiguo de los actualmente en funcionamiento. Bajo la dirección de R.S. Dixon funciona desde 1973 utilizando un radiotelescopio equivalente en sensibilidad a una antena circular de 52.5 ms. El haz del radiotelescopio es elíptico con una anchura de 40 minutos en declinación y 8 en ascensión recta. El muestreo del cielo se realiza dejando el telescopio fijo con lo que debido a la rotación terrestre se barre una pequeña zona cada día. Al principio se disponían de 8 canales que fueron aumentando a 50 en 1975 y en la actualidad acaban de recibir un detector similar al Serendip III (ver sección 8.3) con 4 millones de canales.

En 1977 se recibió la conocida como señal "Wob!" que duró un breve instante y que a pesar de numerosos intentos no se pudo verificar (ver Gray, 1994). En la actualidad se está diseñando el proyecto Argus, llamado así en honor al sistema utilizado en la novela de C. Sagan Contacto, que permitirá obtener una imagen en radio de todo el cielo visible simultáneamente

### 8.2 PHOENIX

Comenzó el 12 de Octubre de 1992 como un proyecto ambicioso de la NASA (High Resolution Microwave Survey, HRMS) con dos programas paralelos (muestreo global y blancos seleccionados). Después de una interrupción por problemas en el presupuesto resurgió con el apropiado nombre de Phoenix en el observatorio de Parkes (Australia) bajo la dirección del SETI Institute y financiado con fondos privados. Las observaciones concluyeron en Junio de 1995 y en estos momentos se está buscando una nueva ubicación.

### 8.3 SERENDIP

Con estas siglas se denomina el proyecto: "Search for Extraterrestrial Radio Emissions from Nearby Developed Intelligent Populations", el cual se ha desarrollado en la Universidad de Berkeley y utiliza el radiotelescopio de Arecibo simultáneamente con otros programas astronómicos convencionales, lo cual le da mayores posibilidades de perdurar. Habiendo experimentado diversas mejoras desde su inicio en 1979, en su versión actual (III) examina 4.2 millones de canales cada 1.7 segundos en una banda de 12 Mhz centrada en 429 Mhz.

Se han detectado unas 400 señales sospechosas (de un total de 70 trillones) que posiblemente sean tan solo debidas al ruido.

Después de los recortes en el programa de la NASA funciona enteramente con fondos privados.

### 8.4 META (Megachannel ExtraTerrestrial Assay)

Financiado por una organización privada (The Planetary Society). Los primeros resultados parecen indicar la existencia de 37 fuentes sospechosas de periodicidad pero que sin embargo no se han podido verificar (Horowitz & Sagan, 1993). El programa gemelo del Hemisferio Sur, META II, ha detectado 10 fuentes similares con un ancho de banda muy corta. El 30.10.95 comenzaron las observaciones con el nuevodetector BETA que barrerá cada 2 segundos una zona espectral de 40 Mhz cubriendo el "agujero del agua" en 16 segundos..

## 9.- NAVEGACIÓN INTERESTELAR

Si hubiéramos enviado el Voyager hacia nuestra estrella más cercana (Proxima Centauri a 4 años luz) el viaje habría durado decenas de miles de años. Esto nos señala las fuertes limitaciones de los actuales cohetes de combustible químico para el método activo de búsqueda de vida extraterrestre más directo: el viaje interestelar. Sin embargo se están planteando los fundamentos para que tal empresa sea posible. Probablemente ahora nos

encontremos a la misma distancia de su realización que los dibujos sobre maquinas voladoras de Leonardo de Vinci estaban de los modernos reactores comerciales.

La siguiente ecuación (ver Andrews, 1996) nos expresa la relación entre la velocidad V de la nave y la masa  $M_p$  del propulsor utilizado

$$V = V_{esc} \ln \left( \left( M_p + M_n \right) / M_n \right)$$

siendo  $V_{esc}$  la velocidad de escape efectiva del propulsor y  $M_n$  la masa de la nave. Se necesitan valores como mínimo de  $V = 0.2 c$  para el viaje interestelar en un tiempo comparable con la vida humana. Hemos de tener también en cuenta que necesitaremos una fase de aceleración y otra de frenado con lo que habría de multiplicar por dos si pensamos en un viaje de ida y vuelta.

### 9.1 Viajes subluminas

La teoría de la Relatividad Especial nos habla de la contracción del tiempo cuando se viaja a velocidades próximas a la de la luz. Esto reduciría el tiempo para el tripulante de una nave mientras que en la Tierra el tiempo transcurriría a otro ritmo, con lo que la eficacia de tales viajes para una posible comunicación sería un tanto dudosa a no ser para nuestras más inmediatas cercanías. A continuación comentamos las diversas ideas que se han expuesto al respecto

#### 9.1.1 Fisión nuclear

En 1960 General Dynamics desarrolló el proyecto Orion. La base de su propulsión consistía en la explosión de miles de bombas nucleares a una cierta distancia de la nave. El impacto de la fuerza explosiva sobre una placa impulsaría los 400.000 toneladas del Orion a 1.6% de la velocidad de la luz. Afortunadamente un Tratado Internacional prohibió en 1963 las pruebas nucleares en el espacio exterior.

#### 9.1.2 Fusión nuclear

- Proyecto Dédalo: Diseñado en 1972 como una nave no tripulada, utilizaría como combustible Deuterio y  $He^3$  contenidos en una cámara donde serían bombardeados por haces de electrones rápidos dando lugar a un proceso de fusión. Se estima su eficiencia en un 15 % de la velocidad de la luz .

- Proyecto Longshot: Desarrollado por NASA en 1988 para un viaje de 100 años a Centauri utilizando un sistema parecido al del Dédalo. Dispondría de un sistema de fisión para el impulso inicial.

- Ramjets: Utilizarán el hidrógeno del medio interestelar como combustible. Un embudo de varios cientos de kms lo recogería y lo enviaría a una cámara de fusión. En principio podría alcanzar velocidades próximas a la de la luz pero necesitando otro sistema de impulso para la fase inicial de aceleración.

Valdez & Freitas (1986) han sugerido que la detección de Tritio , elemento radioactivo con un tiempo de vida de 12.5 años, a 1516.7 Mhz indicaría la existencia de naves propulsadas por la fusión nuclear del hidrógeno.

#### 9.1.3 Aniquilación materia/antimateria

Propuesto por Forward & Davis (1988) se basa en la combinación de materia y una pequeña cantidad de antimateria dando lugar a la producción de rayos . Sin embargo, durante un breve intervalo de tiempo se producen piones de alta energía que pueden proporcionar energía para la propulsión de un navío interestelar a velocidades cercanas a la de la luz. Naves utilizando este sistema se podrían evidenciar por la emisión de radiación (130 - 350 Mev). Aparte de otros problemas a resolver, tenemos el de como almacenar los kilogramos de antimateria necesarios. En la actualidad solo se obtienen picogramos en laboratorios como el CERN (Ginebra).

#### 9.1.4 Velas de luz

La idea básica es utilizar una gran superficie reflectora, una vela, para proporcionar propulsión a una nave utilizando la presión de radiación solar como fuerza motriz (propuesta ya por Tsiolkovsky & Tasander, 1924).

Un fotón que se refleja al colisionar con la vela intercambia momento con ella provocándole una fuerza impulsora. Sea  $p$  el momento del fotón y el choque elástico con incidencia normal. En virtud del principio de conservación, el momento que se transfiere a la vela será:

$$2 p = 2 \text{ (energía del fotón)}/c$$

siendo  $c$  la velocidad de la luz. Considerando todos los fotones que inciden normalmente sobre la vela por unidad de área en un tiempo  $t$  (con una energía total  $E$ ) y llamando  $r$  a la fracción de los mismos que se reflejan, el momento transferido por unidad de área en el tiempo  $t$  será:

$$\Delta p = 2 (E/c) r$$

Llamando  $A$  al área total de la vela, la fuerza impulsora vendrá dada por el momento total que gana la vela por unidad de tiempo, es decir:

$$F_{\text{imp}} = A (\Delta p / \Delta t) = A 2 (E/c) r (1 / \Delta t) = A (2r/c) F_{\text{inc}}$$

en donde  $F_{\text{inc}}$  representa el flujo fotónico incidente. Si  $L$  denota la luminosidad solar y  $d$  es la distancia de la vela al Sol,  $F_{\text{inc}} = L / 4\pi d^2$

$$F_{\text{imp}} = ma = (A r/c) (L / 4\pi d^2)$$

Con valores de  $a = 10-3 \text{ m s}^{-2}$  el viaje a Marte tardaría unos 400 días o sea no muy práctico para viajes interestelares. Una variedad ha sido propuesta por Marx (1966) y Forward (1984) utilizando la luz de un láser de alta potencia (10 GW). Con una vela de 40 km de diámetro se podrían llevar 1000 kg de carga a Alpha Centauri en 40 años. Por último señalar la existencia de un proyecto, Starwisp, una nave ultraligera que utilizaría microondas generadas por un satélite en órbita terrestre para la propulsión de la vela pudiendo alcanzar Centauri en 21 años.

#### 9.1.5 Velas magnéticas

Consisten en un cable superconductor de varios centenares de kilómetros de diámetro que se despliega en el espacio desde la nave, haciendo pasar una corriente por él, con lo que se crea un campo magnético.

Las partículas cargadas del viento solar se desviaran por dicho campo magnético lo cual ocasionará un cambio en el momento de la corriente, induciendo un arrastre que acelerará la nave en la dirección del viento solar. Este sistema podría utilizarse en combinación con otros sistemas de propulsión (Andrews & Zubrin, 1993).

Nordley (1994) ha propuesto utilizar haces de partículas relativistas producidas por generadores situados a lo largo de todo el Sistema Solar. Se estima que una nave de 1000 toneladas tardaría 5.3 años (3 en la nave) en alcanzar Centauri.

### 9.2 Viajes superluminales

Quizás la cuestión no sea tanto discutir sobre la potencia aplicada sino la aplicación de un nuevo concepto. La teoría especial de la relatividad nos dice que ninguna partícula material puede cruzar el límite de la velocidad de la luz. Sin embargo la Teoría General de la Relatividad permite este tipo de viajes supraluminales incluyendo la no linealidad en las ecuaciones y una geometría de la estructura espacio-tiempo no euclídea. Objetos masivos tales como las cuerdas cósmicas o los agujeros negros pueden perturbar la estructura espacio-temporal. Crawford (1995) revisa algunas de las ideas sobre estos viajes.

Fuller & Wheeler (1962) fueron los primeros en señalar que la teoría de la gravitación general de Einstein predice la existencia de túneles topológicos llamados "agujeros de gusano" que conectan partes distantes del Universo.

Morris & Thorne (1988) resolvieron el primer problema práctico de cara al viaje interestelar: como mantener abierto el agujero durante el paso de una nave. Sin embargo ello necesitaba la existencia de materia exótica con densidad de energía negativa. Dicha materia tendría la propiedad de la "antigravedad", es decir así como la materia ordinaria empuja hacia afuera con la presión y hacia dentro con la gravedad, la exótica lo hace justo al revés. Procesos observados en el laboratorio tales como el efecto Casimir podrían dar lugar a tal presión negativa. Thorne (1994) da una excelente visión sobre la Teoría General de la Gravitación y en concreto sobre estos túneles en el espacio y el tiempo.

## 10.- CONCLUSIONES

Es difícil concluir sobre algo que no ha hecho más que empezar y que quizás no conduzca nunca a ningún resultado positivo. Sin embargo si podemos resumir las posibles consecuencias

**SI** realmente estamos solos en el Universo, nuestra gran tarea será el asegurar la supervivencia de la Inteligencia del Universo, resaltando la importancia del milagro cósmico de la vida humana

**SI** nos encontramos otra civilización este será el momento más importante en la historia de la Humanidad, quizás el Final de la Infancia rememorando la novela de A. Clarke. Entre otras consecuencia quizás nos pueda conducir a la creación de una auténtica conciencia planetaria para el Homo Sapiens, olvidando todos los localismos, nacionalismos y racismos que han ensombrecido el paso de la especie humana sobre nuestro hermoso planeta azul.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a J.A. Bonet sus comentarios y sugerencias y a G. Pérez su ayuda en la preparación de las diapositivas para la conferencia.

## APÉNDICE I

Período de observación: 1960 (150 horas) PROYECTO OZMA

Investigador: F. Drake

Instalación: NRAO

Tamaño antena (ms): 26

Frecuencia (Mhz): 1420 - 1420.4

Resolución (Hz): 100

Objetos: 2 estrellas

Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $4 \times 10^{-22}$

Referencia: Drake, F., 1960, Sky and Telescope 39, 140

Período de observación: 1964-1965 (80 horas)

Investigador: N. Kardashev

Instalación: Crimea

Tamaño antena (ms): 16 (8 antenas)

Frecuencia (Mhz): 923

Resolución (Mhz): 10

Objetos: 2 Quasares

Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $2 \times 10^{-20}$

Referencia: Kardashev, N.S., 1964, Soviet AJ 217

Comentarios: Detección de CTA 102 como una civilización de tipo III

Período de observación: 1966  
Investigador: Kellerman  
Instalación: CSIRO (Australia)  
Tamaño antena (ms): 64  
Frecuencia (Mhz): 350 - 5000  
Resolución (Hz):  
Objetos: 1 Galaxia  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>): 10<sup>-18</sup>  
Referencia: Kellerman, K.I., 1966, Australian Journal of Physics 19, 195

Período de observación: 1968; 1969 (12 horas)  
Investigador: Troitskii  
Instalación: Zimenkie (U. Sovietica)  
Tamaño antena (ms): 5  
Frecuencia (Mhz): 926 - 928; 1421  
Resolución (Hz): 13  
Objetos: 13 estrellas + M31  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>): 2x 10<sup>-21</sup>  
Referencia:

Período de observación: 1971 ; 1972 (13 horas)  
Investigador: Verschuur  
Instalación: NRAO  
Tamaño antena (ms): 91 ; 43  
Frecuencia (Mhz): 1419.8-1421; 1410 - 1430  
Resolución (Hz): 490; 6900  
Objetos: 9 Estrellas  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>): 5x 10<sup>-24</sup>; 2x 10<sup>-23</sup>  
Referencia: Verschuur, G.L., 1973, Icarus 19, 329

Período de observación: 1972 - 1976 (500 horas)  
Investigador: Palmer & Zuckerman  
Instalación: NRAO  
Tamaño antena (ms): 91  
Frecuencia (Mhz): 1413 - 1425; 1420.1 - 1420.7  
Objetos: 674 estrellas  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>): 10<sup>-23</sup>

Período de observación: 1973 -  
Investigador: Dixon & Kraus Instalación: OSURO, Ohio  
Tamaño antena (ms): 53  
Frecuencia (Mhz): 1420.4  
Resolución (Hz): 100 - 1 kHz  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>): 1.5x 10<sup>-21</sup>  
Referencia: Dixon & Cole, 1977, Icarus 30, 267  
Comentarios: El programa continua

Período de observación: 1975 - 1976 (100 horas)  
Investigador: Drake & Sagan  
Instalación: NAIC (Arecibo, Puerto Rico)  
Tamaño antena (ms): 305  
Frecuencia (Mhz): 1415  
Resolución (Hz): 1000  
Objetos: 4 Galaxias  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>): 3x10<sup>-25</sup>  
Referencia: Drake & Sagan, 1974, Scientific American 232, 80

Período de observación: 1976 - 1985 SERENDIP I  
Investigador: Bowyer  
Instalación: Hat Creek (Berkeley)  
Tamaño antena (ms): 26  
Frecuencia (Mhz): 917 - 937; 1410 - 1430; 1602 - 1605; 1853 - 1873; 5 Ghz  
Resolución (Hz): 2x500  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $15 \times 10^{-22}$   
Referencia: Bowyer et al., 1983, Icarus 53, 147

Período de observación: 1978 (80 horas)  
Investigador: Horowitz  
Instalación: NAIC (Arecibo)  
Tamaño antena (ms): 305  
Frecuencia (hz): 1420 +/- 500  
Resolución (Hz): 0.015  
Objetos: 185 estrellas  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  
Referencia: Horowitz, P., 1978, Science 201, 733

Período de observación: 1978  
Investigador: Cohen, Malkan & Dickey  
Instalación: CSIRO  
Tamaño antena (ms): 305, 36, 64  
Frecuencia (Mhz): Resolución (Hz):  
Objetos: 25 Cumulos globulares  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  
Referencia: Cohen, Malkan & Dickey, 1980, Icarus 41, 198

Período de observación: 1979  
Investigador: Cole & Ekers  
Instalación: CSIRO, Australia  
Tamaño antena (ms): 64  
Frecuencia (Mhz): 5000 +/- 5  
Resolución (Hz): 107  
Objetos: Estrellas F, G, K próximas  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $4 \times 10^{-18}$

Período de observación: 1980 - 1981  
Investigador: Suchkin & Tokarev  
Instalación: NIRFI, GORKII  
Tamaño antena (ms):  
Frecuencia (Mhz): 9.3 (Pulsos de radar)  
Resolución (Hz): 1500  
Objeto: Puntos de Lagrange L4 y L5 del sistema Tierra - Luna  
Comentarios: Intento de reflejar ondas de radar en supuestas naves extraterrestres en órbitas de aparcamiento

Período de observación: 1981 - 1988 (600 horas)  
Investigador: Biraud & Tarter  
Instalación: Nancay  
Tamaño antena (ms): 40x 240  
Frecuencia (Mhz): 1420.4  
Resolución (Hz): 48.8  
Objetos: 343 estrellas  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $10^{-24}$   
Referencia: Biraud, F., 1983, Acta Astronautica 10, 759

Período de observación: 1981  
Investigador: Talent  
Instalación: KPNO, Tucson  
Tamaño telescopio (ms): 2.1  
Frecuencia (nm): 357.5-535.0  
Resolución (nm): 1  
Objetos: 3 estrellas  
Comentarios: Búsqueda de líneas de Praseodymium, Neodymium y Zirconio como evidencia de depósito de residuos nucleares en las atmósferas estelares.

Período de observación: 1983-1985 SENTINEL  
Investigador: Horowitz  
Instalación: OAK Ridge (Harvard)  
Tamaño antena (ms): 26  
Frecuencia (Mhz): 1420 ; 1667  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $5 \times 10^{-25}$

Período de observación: 1983 (100 horas)  
Investigador: Valdes, Freitas Instalación: HCRO  
Tamaño antena (ms): 26  
Frecuencia (Mhz): 1516  
Resolución (kHz): 4.9; 76  
Objetos: 80 estrellas  
Comentarios: Búsqueda de una línea de tritio radioactivo procedente de la fusión nuclear utilizada por naves extraterrestres.

Período de observación: 1985 - 1995 META  
Investigador: Horowitz  
Instalación: Oak Ridge , Harvard  
Tamaño antena (ms): 26  
Frecuencia (Mhz): 1420; 1665; 1667  
Resolución (Hz): 0.05  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $1.3 \times 10^{-24}$   
Referencia: Horowitz et al., 1986, Icarus 67, 525  
Comentarios: Financiado por The Planetary Society

Período de observación: 1985 - 1988 SERENDIP II  
Investigador: Bowyer & Lampton  
Instalación: NRAO  
Tamaño antena (ms): 92  
Frecuencia (Mhz): 400-3500  
Resolución (Hz): 1  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $4.0 \times 10^{-24}$   
Comentarios: Concluido por el derrumbamiento del radiotelescopio.

Período de observación: 1986 -  
Investigador: Colomb & Lemarchand  
Instalación: IAR, Argentina  
Tamaño antena (ms): 30  
Frecuencia (Mhz): 1415, 1425; 1667  
Resolución (kHz): 2.5  
Objetos: 78 estrellas tipo solar  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $5 \times 10^{-23}$   
Referencia: En Bioastronomy: The next steps

Período de observación: 1988 (50 horas)  
Investigador: Bania & Rood  
Instalación: NRAO  
Tamaño antena (ms): 43  
Frecuencia (Mhz): 8665  
Resolución (Hz): 305  
Objetos: Estrellas con exceso IR  
Limites de flujo ( $W/m^2$ ): 1 Jy  
Referencia: En Third Decennial US- USSR Conference on SETI  
Comentarios: Búsqueda de señales artificiales en banda estrecha

Período de observación: 1990 -  
Investigador: Betz  
Tamaño instrumento (ms): 1.65 (Interferometro de Townes)  
Frecuencia (micras): 10  
Resolución (MHz): 3.5  
Objetos: 100 estrellas proximas  
Alcance : 1 Mw hasta 20 parsecs  
Referencia: Steffes & de Boer, 1994, Icarus 107, 215  
Comentarios: Comunicación a la frecuencia del láser de CO<sub>2</sub>

Periodo de observación: 1990 - META II  
Investigador: Colomb  
Instalación: IAR, Argentina  
Tamaño antena (ms): 30  
Frecuencia (Mhz): 1420.4  
Resolución (Hz): 0.05  
Objetos: Hemisferio Sur  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  
Comentarios: Duplicado de Meta I. Financiado por The Planetary Society

Período de observación: 1992-1993 NASA HRMS blancos fijos, 200 horas  
Investigador: Tarter  
Instalación: Arecibo  
Tamaño antena (ms): 305  
Frecuencia (Mhz): 1300 - 2400  
Resolución (Hz): 1, 7, 28  
Objetos: 25 estrellas  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $5 \times 10^{-24}$   
Comentarios: Inicio 12/10/1992: NASA Ames Research Center

Período de observación: 1992-1993 NASA HRMS Muestreo, 386 horas  
Instalación: Goldstone  
Tamaño antena (ms): 34  
Frecuencia (Mhz): 1700; 8300-8700  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>): 10<sup>-22</sup>  
Comentarios: Coordinado por Jet Propulsion Laboratory

Periodo de observación: 1992 - SERENDIP III  
Investigador: Bowyer&Donnelly  
Instalación: NAIC, Arecibo  
Tamaño antena (ms): 305  
Frecuencia (Mhz): 424-436  
Resolución (Hz): 0.6  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $5 \times 10^{-25}$   
Comentarios: 4.2 millones de canales (1.7 seg de integración)

Período de observación: 1995  
Investigador: Tarter  
Instalación: Parkes (Australia)  
Tamaño antena (ms): 64  
Frecuencia (Ghz): 1.0 - 10.0  
Resolución (Hz): 643  
Objetos: 1000 estrellas cercanas  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):

Período de observación: 1995- BETA  
Investigador: Horowitz  
Instalación: Harvard  
Tamaño antena (ms): 26  
Frecuencia (Ghz): 1.4 - 1.7  
Resolución (Hz): 0.5  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $5 \times 10^{-25}$   
Comentarios: Utiliza el sistema del SERENDIP II

Período de observación: 1996 - SERENDIP IV  
Investigador: Bowyer & Donnelly  
Instalación: NAIC, Arecibo  
Tamaño antena (ms): 305  
Frecuencia (Mhz): Resolución (Hz): 0.6  
Objetos: Todo el cielo  
Límites de flujo (W/m<sup>2</sup>):  $5 \times 10^{-25}$   
Comentarios: 160 millones de canales (1.7 seq. de integración)

**NOTA:** Cuando este trabajo se encontraba en imprenta, se han presentado (Mc Kay et al., 1996, *Science* 273, 924-930) las primeras evidencias de vida elemental en Marte en un remoto pasado (~3500 millones de años)

## BIBLIOGRAFÍA

- BILLINGHAM, J. , PRESEK, R. (Eds.), 1979, *Communication with Extraterrestrial Intelligence*, Pergamon Press, Oxford
- BILLINGHAM, J. (Ed.), 1981, *Life in the Universe*, MIT Press, Cambridge
- BRACEWELL, R.N , 1975, *The Galactic Club: Intelligent Life in Outer Space*, W.H. Freeman, San Francisco
- CAMERON, A.G.W (Ed), 1963, *Interstellar Communications*, W A. Benjamin Inc., New York
- CROWE, M J., 1986, *The Extraterrestrial Life Debate 1750 - 1900*, Cambridge University Press
- DICK, S.J , 1982, *Plurality of Worlds*, Cambridge University Press
- DRAKE, F., SOBEL, D., 1994, *Is Anyone out there?*, Dell Pub New York
- ERBEN, H.K., 1984, *Intelligenzen im Kosmos?*, Piper, Munich de FREES, D., BROWNLEE, D., TARTER, J., USHER, D., IRVINE, W., KLEIN, H (Eds), 1989, *Exobiology in Earth Orbit*, NASA SP-500
- GOLDSMITH D , OWEN T., 1980, *The Search for Life in the Universe* Benjamin Cummings Publ. , New York
- HART, M H , ZUCKERMAN, B. (Eds.), 1982, *Extraterrestrials: Where are they?*, Pergamon Press, New York
- HEIDMANN, J , KLEIN, M.J. (Eds.), 1991, *Bioastroonomy. The Search for Extraterrestrial Life*, Springer, Berlin
- HORNECK, G., 1995, "Exobiology, the study of the origin, evolution and distribution of life within the context of cosmic evolution: a review" *Planetary and Space Sciences* 43, 1189 - 217
- HOROWITZ, N H., 1986, *To Utopia and Back: The Search for Life in the Solar System*, Freeman, New York
- IMPEY, C.D , 1996, "The Search for Life in the Universe. A Humanistic Perspective", *Vistas in Astronomy* 39, 553-571
- MALLOWE C.F , CONNORS M.M., FORWARD R L., PAPROTNY Z.1978, *A Bibliography on the Search for Extraterrestrial Intelligence* NASA Reference Pub 1021
- MARX, G , (Ed.), 1988, *Bioastronomy. The Next Steps*, D Reidel
- MENZEL, D H., TAVES, E.H., 1977, *The UFO Enigma*, Doubleday, New York
- MORRISON P., BILLINGHAM J., WOLFE J., 1977, *The Search for Extraterrestrial Intelligence*, NASA SP- 419
- PAPAGIANNIS M.D (Ed.), 1984, *The Search for extraterrestrial Life: Recent developments*, D. Reidel, Dordrecht
- POONAMPERUMA, C., CAMERON, A.G.W., 1974, *Interstellar Communication Scientific perspectives*, Houghton-Mifflin Co., Boston
- REGIS E , 1985, *Extraterrestrials Science and alien intelligence* Cambridge University Press, Cambridge
- SAGAN,C., 1980, *Comunicación con inteligencias extraterrestres*, Editorial Planeta, Barcelona
- SAGAN, C., 1981, *Murmullos de la Tierra*, Editorial Planeta, Barcelona.
- SHOSTAK, G.S. (Ed.), 1993, *Third decennial US-USSR Conference on SETI*, ASP Conference Series Vol. 47
- SHOSTAK, G.S. (Ed ), 1995, *Progress in the Search for Extraterrestrial Life*, ASP Conference Series Vol. 74
- SULLIVAN, W., 1967, *No estamos solos*, Editorial Noguer, Barcelona
- BIBLIOGRAFIA ESPECIFICA**
- ALBEE, A L., ARVIDSON, R.E., PELLUCONI, F.D., 1992, "Mars observer campaign", *Journal Geophys. Research* Vol 97, E5, 7665-7680
- ALLABY, M., LOVELOCK, J., 1984, *The Greening of Mars*, St. Martin Press, New York
- ANDREWS, D , 1996, "Cost considerations for interstellar missions", *Journal British Interplanetary Society* 49, 123-128
- ANDREWS, D , ZUBRIN, R., 1993, "Magnetic sails and interstellar travel", *Journal British Interplanetary Society* 43, 265 - 272
- < Ninguno > ANGEL, J.P., CHENG, A.Y., WOOLF, N.J., 1986, "A space telescope for IR spectroscopy of Earth-like planets", *Nature* 322, 341-343
- BALL, J A , 1973, "The Zoo hypothesis", *Icarus* 19, 347 - 349
- BELL BURNELL J., 1977, "Little green men, white dwarfs or pulsars?", *Annals New York Acad. Sciences* 302, 685-689
- BILLINGHAM, J., TARTER, J.C., 1992, "Detection of the Earth with the SETI microwave observing system assumed to be operating out of the Galaxy", *Acta Astronautica* 26, 185 - 188
- BLAIR D G , ZADNIK M G , 1993, " A lot of possible interstellar communication channel frequencies on SETI", *Astronomy and Astrophysics* 278, 669 - 672
- BOGARD, D.D , 1995, *Meteoritics* 30, 244 - 268
- BRADBURY, R., 1950, "The Martian Chronicles", Doubleday, New York.
- CARR, M.H., 1995, "The Martian drainage system and the origins of valley networks and fretted channels", *Journal of Geophysical Research* 100, 7479 - 7480

- COCCONI G., MORRISON P. 1959, "Searching for interstellar communications", *Nature* 184, 844-846
- COMBES, F., RIEU N.Q., WODARCZAK, G., 1996, "Search for interstellar glycine", *Astronomy & Astrophysics* 308, 618 - 622
- COUSTENIS, A., A., BEZARD, B., 1995a, " Titan's atmosphere from Voyager infrared observations IV: Latitudinal variations of temperature and composition", *Icarus* 115, 126- 140
- COUSTENIS, A., LELLOUCH, E., MAILLARD, T.P., Mc KAY, C.P., 1995b, "Titan's Surface. Composition and Variability from the Near-Infrared Albedo", *Icarus* 118, 87-104
- CRAWFORD I.A., 1995, "Some thoughts on the Implications of Faster-than-Light Interstellar Space Travel", *Quarterly Journal Royal Astronomical Society* 36, 205-218
- DRAKE, F.D., 1961, Discussion of Space Sciences Board, Nat. Acad. Sci. Conference on Extraterrestrial Intelligent Life, Green Bank
- DYSON, F.J., 1960, "Search for artificial stellar sources of infrared radiation" *Science* 131, 1667-1668
- FOGG, M.J., 1992, "An estimate of the prevalence of biocompatible and habitable planets", *Journal British Interp. Soc.* 45, 3-12
- FORWARD, R.L., 1984, "Roundtrip Interstellar Travel using Laser-pushed Light-sails", *Journal of Spacecraft Vol.* 21, No 2
- FORWARD, R.L., DAVIS, J., 1988, *Mirror Matter*, Wiley
- FREUDENTHAL, H., 1960, "LINCOS · Design of a language for cosmic intercourse", North-Holland, Amsterdam
- FULLER, R.W., WHEELER, J.A., 1962, "Causality and multiple connected spacetime", *Phys. Review* 128, 919
- GOTT, J.R., 1993, "Implications of the Copernican principle for our future prospects", *Nature* 363, 315-319
- GRAEDEL, T.E., SACKMAN, J.J., BOOTHROYD, A.I., 1991, "Early mass loss- A potential solution to the weak Sun paradox" *Geophysical Research Letters* 18, 1881-1884
- GRAY, R.H., 1994, "A Search of the Web locale for intermittent radio signals", *Icarus* 112, 485-489
- HANSSON, A., 1991, *Mars and the development of life*, Ellis Horwood Ltd, Chichester
- HALL, D.T., STROBEL, D.F., FELDMAN, P.D., Mc GRATH, M.A., WEABER, H.A., 1995, "Detection of an oxygen atmosphere on Jupiter's moon Europa", *Nature* 373, 677 - 679
- HALYARD, R.J., 1991, "Optimum interstellar travel times for pulsed/fusion propulsion systems", *Journal British Interplanetary Society* 44, 377-384
- HARMON, J.K., SLADE, M.A., VELEZ, R.A., CRESPO, A., DRYER, M.J., JOHNSON, J.M., 1992, "Radar mapping of Mercury's polar anomalies", *Nature* 369, 213 - 215
- HART, M.H., 1975, "An explanation for the absence of extraterrestrials on Earth", *Quarterly Journal Royal Astronomical Society* 16, 128-135
- HEIDMANN, J., 1993, "A Reply from Earth Just send them the Encyclopaedia", *Acta Astronautica* 29, 233-235
- HEIDMANN, J., 1995, "SETI programmes all over the world", *Journal British Interp. Soc.* 48, 447 - 452
- von HOERNER, S., 1961, "The search for signals from other civilizations", *Science* 134, 1839-1843
- HOROWITZ P., SAGAN, C., 1993, " Five years of Project Meta: An All-sky narrow-band radio search for extraterrestrial signals" *Astrophysical Journal* 45, 218-235
- JANSKY, K.G., 1932, "Directional Studies of Atmospherics at high Frequencies", *Proc. Institute of Radio Engineers* 20, 1921-1924
- JUNG, C.G., 1969, *Flying Saucers*, New York
- KARDASHEV, N.S., 1964, "Transmission of information by extraterrestrial civilizations", *Soviet Astronomy Vol.* 8, No 4, 217-221
- KASTING, J.F., GRINSPON, D.H., 1991, "The faint Sun problem" in *The Sun in Time*, University of Arizona Press, Tucson
- KASTING, J.F., WITHMIRE, D.P., REYNOLDS, R.T., 1993, "Habitable zones around main sequence stars", *Icarus* 101, 108 - 128
- KIEPENHEUER, K.O., 1950, "Cosmic rays as the source of general galactic radio emission", *Physical Review* 79, 738-741
- KILSTON, S.D., DRUMMOND, R.R., SAGAN, C., 1966, "A Search for Life on Earth at Kilometer Resolution", *Icarus* 5, 79 - 98
- KLEIN, H.P., 1979, "The Viking mission and the search for life on Mars", *Rev. Geophys. Space Sciences* 17, 1655 - 1662
- KUIPER, G.P., 1944, "Titan. A satellite with an atmosphere", *Astrophysical Journal* 100, 378-383
- LASKAR, J., JOUTEL, F., ROBOUTEL, P., 1993, "The Moon: A climate regulator for the Earth", *Nature* 361, 608 - 615
- LEARMED J.G., PAKVASA S., SIMMONS W.A., TATA X., 1994, "Timing Data Communication with Neutrinos: a New Approach to SETI", *Quarterly Journal Royal Astron. Society* 35, 32-329
- LOEVELOCK, J., 1983, *Gaia: Una nueva visión de la vida sobre la Tierra*, Herman Blume Ediciones
- MACKAY, C.P., STOKER, C.R., 1989, "The early environment and its evolution on Mars: Implications for Life", *Rev. Geophys.* 27, 189-214
- MARCONI, G., 1921, "Marconi Sure Mars Flash Messages", *New York Times* (Sept. 2)
- MARCY, G.W., BUTTLER, P., 1996, *Astrophysical Journal Letters* (enviado)

- MARX, G , 1966, "Interstellar vehicle propelled by interstellar laser beam", *Nature* 211, 22- 23
- MATTLOFF G.L., 1991, "Early interstellar precursor solar sail probes", *Journal British Interplanetary Society* 44, 367-370
- MAYOR, M , QUELOZ, D., 1995, "A Jupiter-mass companion to a solar-type star", *Nature* 378, 355 - 359
- MAYR E , 1995, "A critique of the Search for Extraterrestrial Intelligence", *Bioastronomy News* Vol. 7, No. 5
- MILLER, S., 1953, "A production of aminoacids under possible primitive earth conditions", *Science* 117, 528-529
- MORRIS, M.S., THORNE, K.S., 1988, "Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel", *American Journal of Physics* 56, 395-
- von NEUMANN, J., 1966, *Theory of self-reproducing automata*, University of Illinois Press
- NORDLEY, G.D , 1994, "Relativistic particle beams for interstellar propulsion", *Journal British Interplanetary Society* 47, 145 - 150
- OLIVER, B.M., BILLINGHAM, J., 1972, "Project Cyclops: A design study of a system for detecting extraterrestrial intelligent life", *NASA CR-114445*
- PAPAGIANNIS, M.D., 1982, "The Colonization of the Galaxy: A key concept in the search for extraterrestrial intelligence" en *Compendium in Astronomy*, E G Mariolopoulos (Ed), D Reidel, 381-390
- RATHER, J.D.G , 1991, "Lasers revisited: Their superior utility for interstellar beacons, communications, and travel", *Journal British Interplanetary Society* 44, 385-392
- REYNOLDS, R T , Mc KAY, C.P., KASTING, J.F., 1987, "Europa, tidally heated oceans and habitable zones around giant planets", *Advances in Space Research* Vol. 7, No 5, 25-32
- RICHARDSON, L.F , 1960, *The statistics of deadly quarrels*, Boxwood Press, Pittsburgh
- ROBER, G., 1940, "Cosmic static", *Astrophysical Journal* 91, 621-624
- ROBERTS, A , 1992, "The birth of high-energy neutrino astronomy: A personal history of the DUMAND project", *Reviews Modern Physics* 64, 259-312
- SAGAN, C., WALKER, R., 1966, "The infrared detectability of Dyson civilizations", *The Astrophysical Journal* 144, 1216-1218
- SAGAN C., 1983, "The Solipsist Approach to Extraterrestrial Intelligence", *Quarterly Journal R.A.S* 24, 113-121
- SAGAN, C., THOMPSON, W.R., CARLSON, R., GURNETT, D , HORD, C , 1993, "A search for life on Earth from the Galileo spacecraft", *Nature* 365, 715-719
- SAGAN C., THOMPSON W.R., KHARE B.N , 1992, "Titan: A Laboratory for prebiological organic chemistry", *Accounts of Chemical Research* 25, 286-292
- SAGAN, C., WALLACE, D , 1971, "A Search for Life on Earth at 100 meter Resolution", *Icarus* 15, 515, 554
- SCHEFFER, L.K., 1994, "Machine intelligence, the Cost of Interstellar travel and Fermi's Paradox", *Quarterly Journal R.A.S* 35, 157-175
- SCHWARTZ, R.N., TOWNES, C.H., 1961, "Interstellar and interplanetary communication by optical masers", *Nature* 190, 205-208
- SMITH, D , 1990, *SETI Pionners*, University of Arizona Press
- SMITH, P.H , LEMMON, M.T , LORENZ, R.D., SROMOVSKY, L.A , CALDWELL, J.J., ALLISON, M.D., 1996, "Titan's Surface, revealed by HST Imaging", *Icarus* 119, 336-349
- SNYDER L E. et al., 1983, "An extensive galactic search for conformer II glycine", *Astrophysical Journal* 268, 123 - 128
- SQUYRES, S.W., KASTING, J.F., 1994, "Early Mars. How warm and how wet", *Science* 265, 744 - 749
- STEPHENSON, D G., 1982, "Models of Interstellar Exploration", *Quarterly Journal R.A.S* 23, 236-251
- SULLIVAN, W.T., BROWN,S., WETHERILL, C., 1978, "Eavesdropping: The radio signature of the Earth", *Science* 199, 377-388
- TESLA, N , 1901, "Talking with the planets", *Collier's Weekly* 24, 4-55
- THORNE, K.S., 1995, "Agujeros negros y tiempo curvo", *Editorial Crítica*
- TIPPLER, F.J., 1980, "Extraterrestrial Intelligent Beings do no Exist", *Quarterly Journal R.A.S* 21, 267-281
- VALDEZ, F., FREITAS, R.A., 1986, "A search for the Tritium hyperfine line from nearby stars", *Icarus* 65, 152 - 156
- VAZQUEZ, M , 1994, "La idea de la vida extraterrestre a lo largo de la Historia", *Rev Academia Canaria Ciencias* Vol. VI, 101-131
- WALTER, M R., des MARAIS, D.J., 1993, "Preservation of biological information in thermal spring deposits: Developing a strategy for the search for fossil life on Mars", *Icarus* 101, 129 - 143
- WESSON, P S., 1990, "Cosmology, Extraterrestrial Intelligence, and a Resolution of the Fermi-Hart Paradox", *Quarterly Journal Royal Astronomical Society*, 31, 161-70
- WETHERILL, G W., 1996, "The Formation and Habitability of Extra-Solar Planets", *Icarus* 119, 219 - 238
- WOLSZCZAN, A., FRAIL, D., 1992, "A planetary system around the millisecond pulsar PSR 125712", *Nature* 255, 145-149
- WOLSZCZAN, A., 1994, "Confirmation of earth-mass planets around the millisecond pulsar PSR 125712", *Science* 264, 538- 541



## CANARIAS Y LA DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA

Carmen del Puerto Varela

Jefa de Información y Ediciones, Gabinete de Dirección del  
Instituto de Astrofísica de Canarias

Ajustar el contenido de esta conferencia al título con que se anunciaba no ha sido de ningún modo trivial. De haberse titulado "La divulgación de la ciencia en Canarias", para pasar a analizar el caso concreto de la Astronomía, habría abordado con mayor profundidad algunos de los aspectos tratados. Por el contrario, la sospecha de que el título que figuraba en el programa podría haber creado ciertas expectativas, y el temor a defraudarlas, probablemente confieran a esta conferencia una superficialidad no deseada.

Como ilustración que considero relativa al caso, mencionaré mis anteriores conferencias relacionadas con la divulgación científica. El título de la primera de ellas, dirigida a científicos (astrónomos, concretamente) fue "Periodismo Científico: la hoguera de las vanidades"<sup>1</sup>, título que robé del libro (luego llevado al cine) de Tom Wolfe, uno de los pioneros del llamado "Nuevo Periodismo", para ilustrar las complejas relaciones entre periodistas y científicos, dispuestos a quererse y a odiarse con la misma intensidad. La reflexión final que se hacia preguntaba acerca de quiénes eran los verdaderos "Amos del Universo".

El título de la segunda conferencia, dirigida a periodistas (la mayoría responsables de gabinetes de prensa) fue "Los murciélagos de Herschel"<sup>2</sup> (reforzado con el subtítulo "Cómo hacer periodismo científico en el Instituto de Astrofísica de Canarias"). Este título lo extraje del libro *La ciencia en el escaparate*, de la socióloga norteamericana Dorothy Nelkin, en donde se dice que ya existía Periodismo Científico en el siglo XIX y que "en 1835, la prensa informaba de que el astrónomo Sir John Herschel había observado seres humanos con aspecto de murciélagos en la Luna"<sup>3</sup>, antecedente histórico de Periodismo Científico y Astronomía.

## LA IRRACIONALIDAD PITAGÓRICA

El problema de la divulgación tiene raíces históricas. Ya en la Antigüedad, los pitagóricos formaban una sociedad secreta que se negaba a compartir con el vulgo sus descubrimientos, hasta el punto de ocultar el conocimiento de la raíz cuadrada y la existencia del dodecaedro. Carl Sagan, paradigma de divulgador científico, cuenta así la historia: "Los pitagóricos, enamorados de los números enteros, creyeron que todas las cosas podían derivarse de ellos, empezando por todos los demás números. Se produjo una crisis en esta doctrina cuando descubrieron que la raíz cuadrada de dos (la razón entre la diagonal y el lado de un cuadrado) era irracional, es decir que  $\sqrt{2}$  no puede expresarse de modo preciso como la razón de dos números enteros determinados, por grandes que fueran estos números. Este descubrimiento (...) se llevó a cabo utilizando irónicamente como herramienta el teorema de Pitágoras. "Irracional" significaba en principio que un número no podía expresarse como una razón. Pero para los pitagóricos llegó a suponer algo amenazador, un indicio de que su concepción del mundo podía carecer de sentido, lo cual es el otro sentido que tiene hoy la palabra "irracional"."<sup>4</sup>

En vez de compartir estos importantes descubrimientos matemáticos, los pitagóricos callaron el conocimiento de la raíz cuadrada de 2 y lo mismo hicieron con el dodecaedro, uno de los cinco sólidos perfectos (junto con el tetraedro, el cubo, el octaedro y el icosaedro). "Resulta que por algún motivo -explica Sagan- el conocimiento de un sólido llamado dodecaedro, que tiene por lados a doce pentágonos, pareció peligroso a los pitagóricos. El sólido está relacionado místicamente con el Cosmos. Los cuatro sólidos regulares restantes fueron identificados de algún modo con los cuatro "elementos" que en aquel entonces se suponían que constituían el mundo: tierra, fuego, aire y agua. Pensaron pues que el quinto sólido regular sólo podía corresponder a la sustancia de los cuerpos celestiales (este concepto de una quinta esencia ha dado origen a la palabra quintaesencia). Había que ocultar a las

1 "PERIODISMO CIENTÍFICO. La hoguera de las vanidades" fue el título de una conferencia pronunciada el 19 de junio de 1991 en el Aula del Instituto de Astrofísica de Canarias, con motivo de un curso de doctorado.

2 "LOS MURCIÉLAGOS DE HERSCHEL (Cómo hacer periodismo científico en el Instituto de Astrofísica de Canarias)" fue el título de una conferencia pronunciada el 11 de noviembre de 1994, en la sede "Antonio Machado" de la Universidad Internacional de Andalucía, en el marco de las Jornadas "Universidad, Centros de Investigación y Medios de Comunicación", organizada en Baeza (Jaén), por la Asociación Universitaria de Gabinetes de Comunicación (AUGAC). "Los murciélagos de Herschel" fue uno de los apartados de la conferencia anterior "PERIODISMO CIENTÍFICO: La hoguera de las vanidades".

3 NELKIN, Dorothy. *La ciencia en el escaparate*. (Los libros de Fundesco, Madrid, 1990, pág 90).

4 SAGAN, Carl. *Cosmos* (Editorial Planeta, Barcelona, 1987 (11<sup>th</sup> edición)). Págs. 184-185.

personas vulgares la existencia del dodecaedro”.<sup>5</sup> Un pitagórico llamado Hipaso escribió sobre ello y murió misteriosamente en un naufragio.

Pero los reparos a la divulgación no acabaron ahí. Los alquimistas de la Edad Media utilizaban deliberadamente un lenguaje oscuro para evitar que sus hallazgos trascendieran su propio círculo. Todavía hoy hay científicos opuestos a la popularización de la ciencia; “creen que hay que reservar el conocimiento sagrado para los cultos, sin dejar que lo mancille la comprensión del público”.<sup>6</sup> Según Sagan, es esencial para nuestra simple supervivencia que comprendamos la ciencia y afirma que ésta “nos da placer, porque quien comprende tiene posibilidades mayores de sobrevivir”.<sup>7</sup>

La Astronomía no escapa a esta situación, pese a proporcionar respuestas cuantitativas a las cuestiones sobre las que la filosofía antigua sólo podía hacer especulación.

### TEMOR POR LA CIENCIA

En otros tiempos, un científico no comunicaba los resultados de sus investigaciones hasta pasados unos años o decenios. A veces, incluso, no se hicieron públicos hasta después de su muerte. Sin embargo, hoy no se considera como tal ningún descubrimiento científico si se mantiene en secreto. Se trata de “publicar o morir”, siendo las comunicaciones de los científicos muy numerosas en la actualidad.

La ciencia despierta sentimientos contradictorios, como apunta el físico Antonio Fernández-Rañada en su ensayo “Los muchos rostros de la ciencia”.<sup>8</sup> Por un lado provoca sentimientos negativos como temor: si bien las comunicaciones científicas son ahora muy numerosas, también es verdad que están dirigidas a especialistas y resultan incomprensibles para un público no especializado; y siempre se teme lo que no se comprende. La ciencia también produce rechazo, dadas sus aplicaciones negativas que ha tenido; la carrera de armamentos y el deterioro del medio ambiente se suelen citar al respecto.

Pero la ciencia despierta igualmente sentimientos positivos: de admiración, por los espectaculares resultados que todo el mundo reconoce, y de poder, pues al fin y al cabo la riqueza de los países está basada en la tecnología a su vez generada por la ciencia.

Aún así se mantiene la dicotomía de las dos culturas de las que hablara C.P. Snow y muchos se siguen preguntando si la ciencia es cultura o no.

### RESUMEN DE PREJUICIOS

Ignacio García de la Rosa, primer director que tuvo el Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife, analizaba en cierta ocasión los prejuicios en torno a la divulgación que yo ahora sintetizo. Y así, como frenos a este proceso, nos encontramos con una serie de prejuicios procedentes tanto del ámbito de la ciencia hacia la sociedad como del ámbito de la sociedad hacia la ciencia.

La sociedad, según los científicos, “carece de la cultura científica básica”, “culpa a la ciencia del mal uso de los descubrimientos”, “no debe participar en decisiones científicas” y “piensa que divultan los científicos fracasados”. La ciencia, según la sociedad, “la hacen personajes excéntricos y desconectados”, “es demasiado compleja”, “siempre tiene razón” y “nos engaña”. Como consecuencia de esta serie de prejuicios se produce el increíble éxito de lo paracientífico.

5 SAGAN, Carl. *Cosmos*. Editorial Planeta. Barcelona, 1987 (11<sup>th</sup> edición). Pág 184.

6 SAGAN, Carl. *Cosmos*. Editorial Planeta. Barcelona, 1987 (11<sup>th</sup> edición). Pág XIII de la Introducción.

7 SAGAN, Carl. *Cosmos*. Editorial Planeta. Barcelona, 1987 (11<sup>th</sup> edición). Pág XIII de la Introducción.

8 FERNÁNDEZ-RAÑADA, Antonio. *Los muchos rostros de la ciencia*. Ediciones Nebel. Oviedo, 1995. Pág 13.

## ESTRATEGIAS PARA LA DIVULGACIÓN

Una definición de Divulgación nos la proporciona Pierre Fayard, un conocido divulgador científico francés: "Proceso de adaptación de unos contenidos especializados con el propósito de hacerlos comprensibles a un público no especialista". Los agentes que pueden intervenir en este proceso son: el científico, el periodista, el escritor, el profesor y los organismos preocupados por la cultura, la educación popular y el entretenimiento.

En ese intento de acercar la ciencia a la sociedad, habría que utilizar las herramientas que tenemos a nuestro alcance: la enseñanza, la información y la actividad cultural. Las estrategias para una buena comunicación ciencia-sociedad, que acaben con los prejuicios anteriores, deben, según Fayard, "generar dudas sin perturbar al ciudadano sencillo, acostumbrado a certezas y artículos de fe, y formado en unos sistemas de enseñanza basados en el aprendizaje de los resultados, pero no en los diversos modos de razonamiento para llegar a dichos resultados y, en definitiva, para aprender a pensar."

## LAS ISLAS EN JUEGO

Con respecto a esa relación ciencia-sociedad, en Canarias se dan una serie de circunstancias favorables a tener en cuenta. Por un lado, las Islas generan ciencia y tecnología; universidades y centros de investigación no faltan (el Instituto de Astrofísica de Canarias es un claro ejemplo). Se proyectan nacional e internacionalmente (Experimento de Tenerife, Teide 1,...). Son el foro ideal para congresos científicos (labor informativa y divulgativa de los medios de comunicación). Y amplían su oferta turística (visitas a los Observatorios del IAC, al Museo de la Ciencia y el Cosmos, ...).

Llama la atención que el Premio Canarias de Investigación 1996 haya sido concedido a Francisco Sánchez también por su labor en "la divulgación científica".

Si nos formulamos la pregunta: ¿quién hace divulgación científica en Canarias?, la respuesta pasa por Museos, Universidades, Institutos de investigación y desarrollo tecnológico, Organismos culturales, Medios de comunicación, Organizaciones sanitarias, Entidades bancarias, Fundaciones, Agrupaciones de aficionados e Instituciones políticas. Pero si la pregunta es: ¿quién hace la mejor divulgación científica en Canarias?, la respuesta sería, pese a parecer subjetivos, dos centros estrechamente vinculados que se esfuerzan permanentemente en la difusión cultural: el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y el Museo de la Ciencia y el Cosmos del Cabildo de Tenerife.

## EL MUSEO DE LA CIENCIA Y EL COSMOS

El Museo de la Ciencia y el Cosmos pertenece al Organismo Autónomo de Museos y Centros del Cabildo de Tenerife y es el único museo en España promovido por un centro de investigación. De ahí que siempre se hable de doble paternidad, por un lado el Cabildo y por otro el IAC (los dos directores que hasta el momento ha tenido el Museo son investigadores del IAC; los primeros módulos fueron desarrollados en este Instituto).

El Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife, que acaba de cumplir tres años de edad, fue inaugurado con la presencia del astronauta ruso Sergei Krikaliev el 11 de mayo de 1993. Unos meses después, el 6 de julio de ese año, el Museo fue honrado con la visita del Príncipe de Asturias.

El edificio del Museo fue diseñado especialmente, concediendo gran importancia a la terraza, donde se encuentra una antena de radio de 18 metros de diámetro, que sirve para enviar mensajes al Cosmos, y un telescopio de 28cm (con filtro solar H<sub>α</sub>, cámara CCD y cámara de TV). Los diferentes módulos, unos 70 experimentos interactivos (ampliados anualmente y

exportables en algunos casos), han sido realizados con un bajo coste económico. Cuenta con un Planetario, en el que se ofrecen diferentes programas, y con un Salón de Actos, lugar frecuente de proyecciones y conferencias. El Museo mantiene colaboraciones permanentes con algunas entidades, como el IAC, la Agrupación Astronómica de Tenerife o el Hospital Nuestra Señora de la Candelaria, entre otros.

Hasta la fecha han visitado el Museo unas 250.000 personas, que necesariamente han tenido que pasar por el contador digital de la entrada. En días especiales, como aniversarios y otros, el Museo ha llegado a reunir entre 1.000 y 2.000 personas. Si bien aún no pueda hablarse de rentabilidad en el sentido puramente económico del término, el Museo está resultando sumamente rentable en el ámbito de la enseñanza gracias a las campañas dirigidas a colegios y profesores.

## ACTIVIDADES LÚDICAS

El Museo ha tenido desde sus orígenes una planteamiento lúdico y ha seguido la fórmula mágica que combina ciencia y entretenimiento.

Entre el conjunto de actividades paralelas del Museo destacan las charlas y conferencias de divulgación. De las más de 60 impartidas, 22 corresponden a temas relacionados con Astronomía y afines (sin duda, porque la ciencia es un viaje por el Universo), sin contabilizar las correspondientes a los cursos organizados como éste, titulado "La Astronomía en Canarias" (que en total comprende 16 conferencias más 1 fuera de programa).

Los títulos de estas conferencias cósmicas nos muestran la gran variedad ofrecida dentro de este mismo campo: "La máquina del tiempo", "Las Perseidas: un castillo de fuegos naturales", "Tras el resplandor del Big Bang", "El contenido del Voyager", "¿El choque del siglo?", "Jupitermanía", "Lo mejor del impacto", "Teorías del todo", "Variabilidad solar y clima terrestre", "¿Qué fue de la estrella de Belén?", "Nuestro Universo y otros", "El lugar del hombre en el Universo", "Marte y sus secretos", "Estamos solos en el Universo", "Cosmología" (Blas Cabrera), "Cosmonautas en el Museo", "El libro de imágenes cósmicas", "De Malta a los Millares", "Las Pléyades: siete novias para ...", "La estrella de Belén ¿caso cerrado?", "Vivimos con él pero sabemos poco de él: la Física del Tiempo", "Observación del cometa: Hyakutake desde Canarias".

Pero lógicamente también se han tratado otros temas, como el amor, la muerte, la televisión, el CD-Rom, la Internet, la homeopatía, los volcanes, los delfines, las ballenas, los viajes y el medio ambiente.

La labor del Museo se completa con otras actividades como las que apuntamos a continuación:

Cursos: "Introducción a la Astronomía (X Aniversario IAC)", "La Astronomía en Canarias".

Presentación de vídeos y películas: "Paisajes galácticos en el cielo de Canarias", "La ciudad interior", "Universo tridimensional", "Blue planet".

Proyecciones de diapositivas: Viajes a Camboya y a Suramérica.

Observaciones en directo: Sol, Luna y planetas.

Semanas culturales: "Los Pulmones", "Los Ojos", "Semana Matemática", "El Corazón".

Exposiciones: "Fotonoviembre'93", "Innervisions", "Caprichos de lava", "Medio Ambiente", "A tu alrededor", "Blas Cabrera", "Canarias investiga", "El vuelo de una ensoñación", "Atardece naranja infierno".

Eventos especiales: Eclipses, Apagón del X Aniversario del IAC, El Hyakutake (en colaboración con la Agrupación Astronómica de Tenerife).

Sesiones especiales del planetario.

Foro para congresos: I Simposium de Medicina Integral de la Comunidad Canaria, I Seminario de reflexiones en torno al Patrimonio, Jornadas Estatales de las DEAC, Encuentros Relativistas Españoles 95.

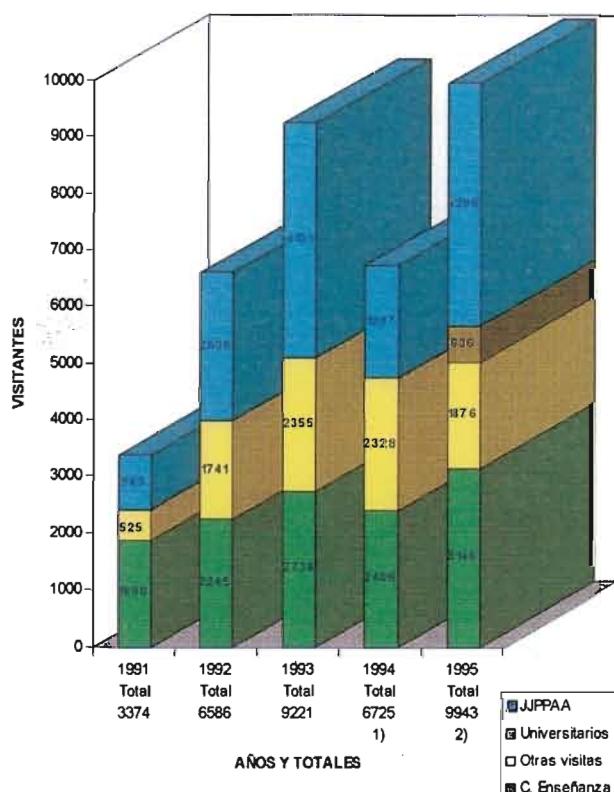
Presentación de libros: La enorme pequeñez de la abuela Tierra, Arqueoastronomía hispana.

## PROPAGANDA INSTITUCIONAL

Destacábamos al principio la labor en Canarias de dos centros: el Museo de la Ciencia y el Cosmos, al que nos acabamos de referir, y el Instituto de Astrofísica de Canarias, del que hablaremos seguidamente.

El IAC es un centro de investigación español e internacional a la vez, integrado por el Instituto de Astrofísica, que constituye la Sede Central, en La Laguna (Tenerife); el Observatorio del Teide, en Izaña (Tenerife), y el Observatorio del Roque de los Muchachos, en Garafía (La Palma).

Los principales fines del IAC son: la investigación astrofísica, el desarrollo de tecnología afín, la enseñanza universitaria especializada, la formación de investigadores y tecnólogos, la administración de los Observatorios, el fomento de la cooperación científica y técnica y la difusión cultural, responsabilidad esta última canalizada a través del Gabinete de Dirección.



1. Visitas a las distintas instalaciones del IAC

## ACTIVIDADES DEL GABINETE

En cumplimiento de este último fin, en el Gabinete de Dirección nos preocupamos por promover y organizar actividades de difusión cultural, como la propia creación del Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife, las campañas de difusión en colegios e institutos (charlas, visitas,...), las jornadas de Puertas Abiertas en los Observatorios, las Fiestas de las Estrellas, los concursos tipo "El Cometake" y otras movidas (en colaboración con las agrupaciones de astrónomos aficionados), los cursos de formación para profesores de Enseñanza Básica y Media, cursos de divulgación a diferentes niveles (en colaboración con universidades, entidades bancarias o museos, como es el caso), la presencia en la EXPO y en otras exposiciones (como AULA, Salón del Estudiante y de la Oferta Educativa), la atención a los medios de comunicación, astrónomos aficionados y particulares (al año atendemos más de 700 consultas, principalmente periodísticas), la edición de recuerdos, carteles, postales, folletos, memorias y otras publicaciones, ... y el Boletín IAC Noticias. Recientemente se ha creado en el IAC un Comité de Divulgación, del que forma parte, no casualmente, el Director del Museo de la Ciencia y el Cosmos.

Por el cuadro que se adjunta, puede verse cuál ha sido la evolución con los años en cuanto al número de visitas a las distintas instalaciones del IAC (la drástica reducción de 1994 fue debida a los incendios en la isla de La Palma).

Según un informe de la empresa "Seguimiento de Medios-ICC" publicado en La Provincia el 7 de abril de 1996, Canarias protagoniza más de mil noticias al mes en medios nacionales, de las cuales el 57% son informaciones relacionadas con Coalición Canaria, mientras que entre el 43% restante destacan "el Astrofísico" y el turismo.

Sobre los cursos, si bien todos los años ha habido algún curso como éste de la "Astronomía en Canarias", es a partir de 1993 cuando el Gabinete de Dirección del IAC se plantea organizar cursos de Astronomía (series de dos) en todas las islas (de nuevo es Juan Antonio Belmonte, Director de este curso y del Museo de la Ciencia y el Cosmos, el organizador de estas series) Así ya se han impartido en Gran Canaria, Fuerteventura y, con el curso de septiembre, en Lanzarote, siendo el objetivo impartirse en todas las islas.

## HISTORIA DE UNA REVISTA

El Gabinete de Dirección del IAC comenzó a editar el boletín IAC Noticias en noviembre de 1986, inicialmente con una periodicidad bimestral (nunca alcanzada) que se convirtió en trimestral en una segunda etapa de la revista.

En el número 0 del boletín, de noviembre de 1986, y de nuevo en el N. 1-1992 con motivo de la presentación de su segunda etapa, Francisco Sánchez, director del IAC, explicaba cuál era el objetivo de esta publicación: "Nuestra actividad científica, tecnológica, educativa y cultural- es abierta y el IAC debe tener paredes de cristal. Más aún, tiene la obligación de informar a la sociedad que le da soporte. NOTICIAS nace bajo el impulso -también la necesidad- de dar a conocer la realidad que vivimos día a día, (...) informando a los unos de lo que hacen los otros y a todos de lo que está haciendo el IAC".



3 Portada de IAC Noticias en su primera etapa



### 3. Portada de IAC Noticias en su segunda etapa

Actualmente es una publicación trimestral (4 números al año más especiales), editada y financiada con los presupuestos de Gabinete de Dirección del IAC y con publicidad esporádica en algunos números. Es una revista gratuita, pero de distribución limitada ( tirada de 2.300 ejemplares, que se distribuyen casi en su totalidad). Cada vez más particulares

demandan el boletín, problema que no hemos resuelto todavía.

Esta revista se enfrenta al problema de dirigirse a públicos muy distintos con un solo producto, intentando satisfacer y representar los intereses de todos. Los grupos de destinatarios en nuestro caso van de un extremo a otro del espectro electromagnético: por un lado, el llamado Grupo A (colegas nacionales e internacionales, ámbito universitario afín, astrónomos aficionados y personal científico y técnico del IAC), más o menos un 35% del total; y por otro, el Grupo B (medios de comunicación, responsables de política científica, personal del IAC administrativo y otros varios), que constituyen el 65% restante.

## ANÁLISIS DE CONTENIDOS

Según el Real Decreto Ley 7/1982 (30 de abril), el IAC se estructura en cuatro áreas: Investigación, Instrumentación, Enseñanza y Administración. De todas ellas se informa en el boletín. De modo que junto a temas de Astrofísica (radiogalaxias y cuásares, agujeros negros, granulación solar, Júpiter, cosmosomas y origen del Universo, enanas marrones, planetas, ...) encontramos artículos sobre Tecnología (fibras ópticas, satélites espaciales, elementos finitos, criogenia, informática, homologación industrial, grandes telescopios, asistencia técnica a empresas y departamentos universitarios, especialmente en Canarias, ...). Incluso información relacionada con otros campos (procedimientos para la detección precoz del glaucoma o la diabetes, para medir el calor de una reacción química o para estudiar, a nivel neuronal, la relación estímulo/conducta en el cerebro humano).

Se incluyen los cursos de doctorado y las tesis doctorales del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna (íntimamente unido al IAC), así como los proyectos ERASMUS. Se informa de los que nos visitan, más o menos importantes, entre ellos el Príncipe de Asturias y algunos Premios Nobel, de los acuerdos internacionales entre los distintos países, de las reuniones políticas, de los incendios, de restos arqueológicos, del alumbrado público que debe adaptarse a la ley del cielo, del Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife y del Coro del IAC, por ejemplo. Y cómo no, también se puede encontrar en esta revista la relación de todas las actividades de divulgación que el IAC lleva a cabo trimestralmente.

## INFORMATIVO O DIVULGATIVO

IAC Noticias recoge toda la actividad del IAC. La variedad de la información que contiene hace que los diferentes públicos puedan encontrar información de interés. Es un boletín eminentemente informativo, como mucho texto y pocas imágenes (algunas en color).

Sin duda, IAC Noticias goza de prestigio y credibilidad. Cumple el requisito del rigor. Publicar en IAC Noticias es, hasta cierto punto, curriculum para el investigador. (Continuamente se va engordando nuestro directorio con las nuevas direcciones de científicos y centros propuestos por los investigadores del IAC).

El boletín es incluso foro de discusión sobre temas de Astronomía y hasta hay serios intentos de editarlo en inglés convirtiéndolo así en una revista sólo para científicos (de momento, sólo los especiales se editan en español e inglés). De ahí que la crítica más fuerte que puede hacerse a esta revista tenga que ver en gran parte con el nivel de divulgación alcanzado. Los artículos sobre las investigaciones, generalmente firmados por sus propios autores, suelen tener un nivel excesivamente alto. Algunos lo intentan más que otros, pero... se les escapan los parsecs, los gigahertzios y las ecuaciones de transporte radiativo. De ahí nuestro empeño y esfuerzo en secciones de divulgación (A través del prisma y la transcripción de conferencias dadas en el Museo), que son las que mayor repercusión tienen luego en los medios de comunicación.

Otra crítica a esta revista se refiere a la pérdida de actualidad o falta de novedad en los contenidos, ya sea por el carácter trimestral, por retrasos en su aparición o por los embargos de las revistas científicas. En muchas ocasiones informamos de investigaciones que algunas revistas, como *Nature*, adelantan previo acuerdo económico a algunos medios nacionales españoles y que, por consiguiente, circula en estos medios con anterioridad o simultáneamente a su publicación en el boletín. En nuestra defensa hay que recordar que muchas de las informaciones que contiene el boletín son previamente comunicadas en su día a los medios de comunicación a través de notas de prensa.

IAC Noticias, cuya aparición es a veces noticia en sí para algunos medios, contiene por último pistas para los periodistas. Algunas agencias de noticias exprimen el boletín buscando noticias que puedan resultar periodísticas, siendo las noticias que entresacan las que más repercusión suelen tener a nivel nacional.

## PERIODISMO CIENTÍFICO

El Periodismo Científico es "una especialización informativa que consiste en divulgar la ciencia y la tecnología a través de los medios de comunicación de masas".<sup>9</sup> Sus funciones son múltiples y variadas según los diferentes autores. Manuel Calvo Hernando las resume de la siguiente manera:

- a) Función informativa del divulgador que transmite y hace comprensible el contenido difícil de la ciencia, al mismo tiempo que estimula la curiosidad del público, su sensibilidad y su responsabilidad moral.
- b) Función de intérprete que precisa el significado y el sentido de los descubrimientos básicos y de sus aplicaciones, especialmente aquéllas que están incidiendo más radical y profundamente en nuestra vida cotidiana.
- c) Función de control en nombre del público, para tratar de conseguir que las decisiones políticas se tomen teniendo en cuenta los avances científicos y tecnológicos y con la vista puesta en el ser humano y especialmente al servicio de su calidad de vida y de su enriquecimiento cultural.<sup>10</sup>

## LAS TRIBULACIONES DEL PC

Dámaso Alonso acuñó la frase "estamos en el siglo de las siglas" y Manuel Calvo Hernando, pionero indiscutible del Periodismo Científico en España, lo recuerda en uno de sus libros cuando dice que esta especialidad, Periodismo Científico, por sus iniciales, puede escribirse PC: "Ayer eran las siglas del Partido Comunista y hoy las compartimos con los ordenadores personales. Mañana, quizás sean las iniciales de la propulsión cuántica"<sup>11</sup>. Añadiremos a esta observación que, escrito en minúscula, pc denota la unidad de distancia astronómica más utilizada por los astrofísicos: el pársec, que resulta de acortar paraje-segundo y que equivale a 3,26 años luz o, también, a  $3,08 \times 10^{13}$  kilómetros. La estrella más cercana a nosotros, Proxima Centauri, está a sólo 1.295 pc, mientras que la galaxia más lejana observada se encuentra a 429 millones de pc. Asimismo, en plural, los "peces" es una conocida constelación del Zodiaco.

Según Calvo Hernando, nos encontramos con tres tipos de problemas en el Periodismo Científico, según su condición científica, informativa o divulgadora.

Sobre los que se refieren a la ciencia y a los científicos a la hora de su difusión popular estarían los siguientes:

- la extensión y la complejidad de las disciplinas científicas.

<sup>9</sup> CALVO HERNANDO, Manuel. *Periodismo Científico*. Editorial Paraninfo. Madrid, 1992. 2<sup>da</sup> edición revisada y ampliada. Pág. 22.

<sup>10</sup> CALVO HERNANDO, Manuel. *Periodismo Científico*. Editorial Paraninfo. Madrid, 1992. 2<sup>da</sup> edición revisada y ampliada. Pgs. 31 y 32

<sup>11</sup> CALVO HERNANDO, Manuel. *Periodismo Científico*. Editorial Paraninfo. Madrid, 1992. 2<sup>da</sup> edición revisada y ampliada. Pág. 22

- la explosión informativa.<sup>12</sup>
- la aceleración histórica.<sup>13</sup>
- la resistencia a los cambios.
- la adaptación.

Los periodistas y los medios de información, frente a la difusión masiva y popular del conocimiento, plantearían los siguientes problemas:

- la responsabilidad de los medios.
- los géneros periodísticos.
- la distorsión de las informaciones.

Por último, los problemas de la divulgación son los que surgen entre los siguientes binomios:

- ciencia y divulgación.
- periodista y científico.
- rapidez y exactitud.
- información científica y sensacionalismo.

## MODELOS DE COMUNICACIÓN CIENTÍFICA

Los periodistas también tenemos fórmulas para medir, por ejemplo, el grado de especialización o el índice de legibilidad de un artículo. Según Javier Fernández del Moral, actual decano de la Facultad de Ciencias de la Información de la Universidad Complutense de Madrid, se definen tres niveles o grados de especialización del lenguaje.<sup>14</sup> En lo relativo a la forma del mensaje se establecen los niveles en función de la periodicidad del medio o canal y en función del reparto entre los elementos lingüísticos (el texto propiamente dicho), paralingüísticos (textos con connotaciones adicionales: titulares, pies de fotos, ladillos, entradilla, sumarios, etc.) e icónicos (elementos de imagen: fotos, gráficas, dibujos, cuadros, etc.) del mensaje. En lo que se refiere al contenido, sólo mide dos parámetros: el grado de especialización de los textos y el índice de legibilidad de Flesh.

## LAS FÓRMULAS PERIODÍSTICAS

El grado de especialización (G.E.) se obtendría por la siguiente fórmula, que no es más que una relación porcentual del número de palabras especializadas, monosémicas y polisémicas respecto al total de palabras del texto.

$$G.E. = \frac{(N.P. + p + m) \times 100}{T}$$

donde N.P. son los nombres propios especializados, p son los polisémicos (términos especializados con otras significaciones adicionales); m son los monosémicos (términos especializados con ninguna otra significación) y T es el número total de palabras.

El índice o grado de legibilidad de Flesh (L) se define con la siguiente fórmula, que es la traducción cuantitativa de la llamada ley de Zip (el uso y la facilidad de utilización tiende a

---

12. "El exceso de información constituye un problema tan serio como en otros tiempos lo fuera su ausencia. Se dice que los conocimientos se doblan cada diez años y hay quien ha afirmado que cada cinco". CALVO HERNANDO, Manuel. Periodismo Científico. Editorial Paraninfo. Madrid, 1992. 2<sup>a</sup> edición revisada y ampliada. Pág 58.

13. "Creció la distancia entre la formación que se recibe en el colegio o en la universidad y los avances de la ciencia a lo largo de la vida de cada persona". Oppenheimer dijo que "hubo una época en que los adelantos de la ciencia durante la vida de una persona representaban un 10 o un 20 por ciento suplementario sobre la masa de conocimientos adquiridos en su período escolar; hoy, la relación puede elevarse a varios cientos por ciento". CALVO HERNANDO, Manuel. Periodismo Científico. Editorial Paraninfo. Madrid, 1992. 2<sup>a</sup> edición revisada y ampliada. Pág 59.

14. FERNANDEZ DEL MORAL, Javier. Modelos de comunicación científica para una información periodística especializada. Editorial Dossat. Madrid, 1983. Pgs 126-129.

acortar las palabras empleadas en el lenguaje).

$$L = K - (k_1 l_f + k_2 l_p)$$

donde  $K$ ,  $k_1$  y  $k_2$  son constantes idiomáticas cuyos valores son 209, 1.15 y 0.68, respectivamente,  $l_f$  es la longitud media de las frases y  $l_p$  es la longitud media de las palabras.

## LOS NIVELES DE ESPECIALIZACIÓN

El primer nivel, según Javier Fernández del Moral, corresponde a la divulgación más amplia y está dirigido a una audiencia más masiva y de menor nivel cultural. Pertenecen a este nivel los medios cuya periodicidad sea diaria (periódicos diarios, programas de esa periodicidad en otros medios). En este nivel se da una mayor proporción de los elementos paralingüísticos e icónicos respecto a los lingüísticos. El grado de especialización es menor o igual que 1 (G.E.<1) y el grado de legibilidad mayor o igual que 70 (L>70).

Pertenecen al segundo nivel los medios de periodicidad semanal (revistas semanales o suplementos de los diarios) o programas con secciones especializadas en otros medios. Aquí se equilibra la suma de icónicos y paralingüísticos por un lado con los lingüísticos por otro. El grado de especialización se encuentra entre 1 (exclusive) y 5 (inclusive) (1<G.E.<5) y el grado de legibilidad se sitúa entre 30 (inclusive) y 70 (exclusive) (70>L>30).

El tercer nivel es el de mayor especialización. Se permite ya una periodicidad más amplia, la correspondiente a la revista monográfica especializada. Se admite un mayor porcentaje de lingüísticos respecto a los icónicos y paralingüísticos. El grado de especialización es mayor que 5 (G.E.>5) y el grado de legibilidad menor que 30 (L<30).

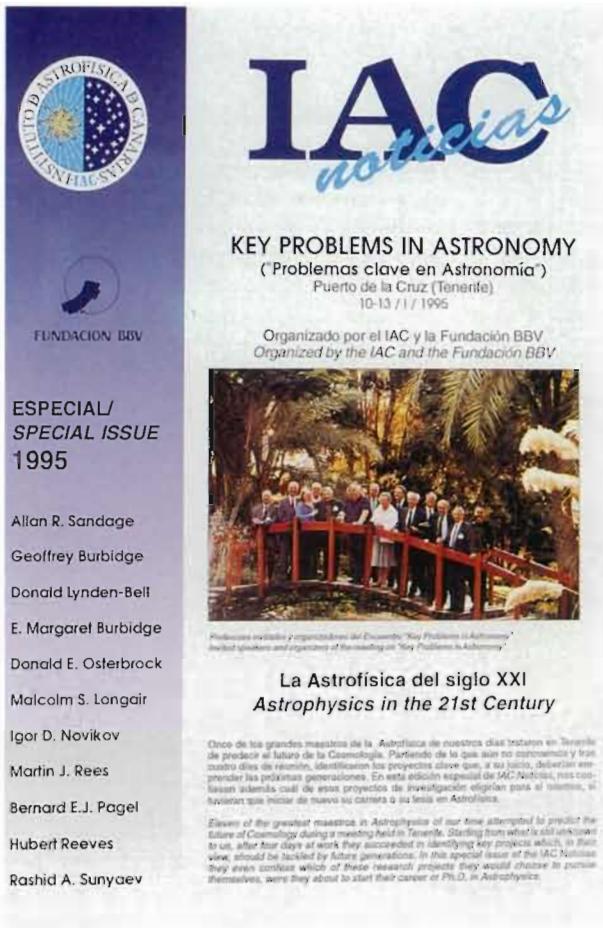
## LOS ERRORES PERIODÍSTICOS

Siempre es divertido señalar los errores en el tratamiento dado a las noticias científicas. Es muy habitual, tratándose de distancias o edades astronómicas, añadir a los números unos cuantos ceros de más o de menos. En nuestro Instituto, muchos recuerdan el error de *El País* con relación al futuro telescopio solar LEST. El periódico llegó a decir del telescopio que podría observar el Sol hasta de noche, una deducción aparentemente muy lógica que hicieron de la posibilidad realmente contemplada de que también fuera usado como telescopio nocturno (este telescopio ya no se va a construir, quien sabe si por no poder cumplir este objetivo). Uno de los últimos errores de este diario, resultado probablemente de una traducción y titulación apresurada (posteriormente rectificada), fue el titular "Dos grandes planetas semejantes al Sol, descubiertos alrededor de estrellas", en lugar de "Descubiertos dos grandes planetas alrededor de estrellas semejantes al Sol".

En fin, los errores se cometen hasta en los grandes periódicos que mejor periodismo científico hacen. Por eso no es de extrañar casos como el de un reportaje sobre el IAC publicado en un periódico de Canarias, cuyo recorte estuvo pinchado en el tablón de anuncios de este Instituto durante meses, con pintadas agresivas a modo de escarnio, por contener errores lamentables (por ejemplo, como salidas profesionales de un astrofísico apuntaba: periodista científico, operador de máquinas automáticas, técnico de curtidos, técnico en industria papelera o técnicos en grasas, entre otras más o menos disparatadas).

Todos estamos de acuerdo en que hay periodistas que desprestigian a la profesión, que hay poca formación y nada de especialización. Pero también hay que tener en cuenta la naturaleza de la profesión periodística (las limitaciones de espacio y de tiempo) y la poca colaboración de los científicos. Las soluciones pasan por conseguir una mayor colaboración periodista-científico y una mayor formación y especialización del periodista.

Un famoso físico de partículas español dijo una vez en un seminario sobre Periodismo Científico al cual yo asistí, en 1985, que al periodista le bastaba con llenar una plantilla estándar válida para cualquier noticia científica. Lo expuso humorísticamente, pero no dejaba de ser una burda simplificación que subestimaba, si no menospreciaba, la tarea del periodista científico. Pero aún aceptando que algo de cierto pudiera haber en esta visión, no es tan infrecuente encontrar un trabajo periodístico bien hecho.



4. Portada de IAC Noticias con motivo de la reunión Key Problems in Astronomy

plan de estudios del Departamento de Ciencias de la Información de la Universidad de La Laguna. La existencia del IAC, con el consiguiente volumen de información científica que genera, ha forzado de algún modo a especializar a determinados periodistas que han sabido perder el miedo a estos temas e, incluso, algunos han iniciado secciones de divulgación científica en los periódicos.

El dossier de prensa especial que elaboramos con motivo de esta reunión fue abultado, aunque no comparable con los 600 artículos que generó el impacto del cometa Shoemaker-Levy en Júpiter. Key Problems dio lugar a más de 70 informaciones en diferentes medios de comunicación, siendo esta cifra la de recortes a los que hemos tenido acceso (presuponemos que fueron muchos más). Las intervenciones en radio, dado que los interlocutores eran de habla inglesa, se limitó a las que ofrecieron responsables de la organización y otros astrofísicos del IAC. Las televisiones locales también se hicieron eco y elaboraron incluso debates en programas especiales, como "Campus", de TVEC. Pero quisiera centrarme en el análisis que he hecho sobre lo publicado en la prensa local con motivo de esta reunión.

De los 70 artículos, unos 30 corresponden a informaciones publicadas en la prensa canaria, siendo la mitad de ellas previas a la reunión y, por consiguiente, reproducciones casi

## KEY PROBLEMS

En enero de 1995, 11 astrónomos de los que ya se citan en las enciclopedias se reunieron en el Puerto de la Cruz, en Tenerife, para tratar de predecir el futuro de la Cosmología. Partiendo de lo que aún no conocemos y tras cuatro días de reunión, identificaron los proyectos "clave" que, a su juicio, deberían emprender las próximas generaciones de astrónomos. En el especial de IAC Noticias que editamos se recogían los siguientes titulares, los cuales se correspondían con los temas que cada uno de los invitados proponían como importantes:

- El Universo en expansión. ALLAN SANDAGE
- La física de las galaxias. GEOFFREY BURBIDGE
- La naturaleza de la materia oscura. DONALD LYNDEN-BELL
- La asociación de cuásares con galaxias. MARGARET BURBIDGE
- Núcleos activos de galaxias. DONALD OSTERBROCK
- La evolución de las galaxias. MALCOLM LONGAIR
- El origen del Universo. IGOR NOVIKOV
- El Universo muy temprano. MARTIN REES
- La composición química. BERNARD PAGEL
- La geografía del Universo. HUBERT REEVES
- La física en condiciones extremas. RASHID SUNYAEV

He escogido esta reunión porque considero que es uno de los temas mejor tratados por los medios de comunicación, especialmente por los de Santa Cruz de Tenerife. Si bien en Canarias, no existe especialización científica en los periodistas, sí es una asignatura que se contempla en el

literales de nuestra nota de prensa, que ya incluía unas declaraciones de Guido Münch, presidente del Comité Organizador y Premio Príncipe de Asturias de Investigación 1989.

Muchas veces, la falta de tiempo no nos permite leer los periódicos más que por encima, guiados naturalmente por nuestros propios intereses temáticos y, especialmente, por los titulares. Así que analicemos algunos de los titulares de prensa aparecidos con motivo de los Key Problems.

### LA PRENSA CLAVE

El 6 de enero, compartiendo página con el anuncio de la cabalgata de los Reyes Magos, Jornada Deportiva, que suele contener amplios reportajes, muchos de ellos de divulgación científica, tituló la noticia de la proximidad de la reunión como ésta se merecía. Con el título “*<Cumbre> de cosmólogos*”, los científicos eran elevados a la categoría de jefes de Estado, reunidos en Conferencia como para salvar el futuro de la Humanidad. Las comillas en “cumbre”, a modo de guiño al lector, invitaban a leer el artículo. No invitaba tanto otra información posterior también de Jornada, cuyo titular -“Cita de astrónomos”-, descafeinaba de alguna manera la mencionada cumbre. Y es que un titular puede, a veces, ser lo más importante.

Otros titulares que llamaron mi atención fueron los de ABC, por ejemplo que tituló “Canarias se convertirá durante varios días en el epicentro mundial de la Cosmología”, y subrayo “epicentro” como buena metáfora. Quisiera también destacar el de Diario 16, “Los 11 astrofísicos más importantes del mundo, en España”. La Provincia titulaba “El IAC reúne en Tenerife a la élite de la astrofísica mundial”. La revista Tribuna de Actualidad decía “COSMOS/reunión histórica en Canarias. La teoría del Big Bang enfrenta a los grandes sabios del Universo.” El Ideal Gallego, titulaba “Astrónomos plantean en Tenerife las metas para conocer el Cosmos”

El titular de Canarias 7 para una información de la agencia EFE - “Los astrónomos cifran en 30 años el tiempo preciso para conocer el Cosmos”- cominaba a cumplir ese plazo inexorable y fue a mi juicio una interpretación sui generis de una frase del texto, que decía: “...Allan Sandage, de los Observatorios de la Institución Carnegie de Washington en Pasadena (EEUU), enumeró los veintitrés problemas que en su opinión deben resolver los científicos en los próximos 30 años”. Entiendo que lo que se precisaban eran los 23 problemas y no los 30 años, que también podrían ser 20 o 40. Pero está claro que el titular cumplió su función de reclamo. El Correo Español fue más correcto titulando: “Astrónomos cuantifican los problemas que impiden conocer el origen del Universo”. Y correcto también, pero más vago, fue el titular de La Gaceta de Canarias: “Dos prestigiosos astrónomos plantean los problemas a resolver para conocer el cosmos”.

Coinciendo con el segundo día de reunión, la prensa canaria también reproducía casi íntegramente la nota de prensa que enviamos anunciando la conferencia de divulgación que Martin Rees, uno de los 11 invitados de honor, pronunciaría en este Museo y que, dado su título -“Nuestro universo y otros”, también tuvo repercusión posterior en los medios.

El diario El País desplazó a una de sus periodistas especializadas, gracias a lo cual se generaron informaciones en este diario durante cinco días (4 de ellas prácticamente de página entera). He aquí sus titulares: “Allan Sandage, el patriarca de la cosmología, plantea 23 enigmas para conocer el Universo” y “La edad del cosmos, un tema candente”. Al día siguiente: “No descarto que haya otros universos”, frase de la entrevista con Martin Rees. Con motivo de la clausura: “Los astrónomos dictan en Tenerife deberes para el siglo XXI”. El domingo siguiente, El País publicó otro artículo a toda página titulado “Cien mil millones de galaxias ocultas”, subtitulando “La edad de oro de la moderna astronomía entra en el universo profundo de la mano de la tecnología” y con un suelto titulado “Viajar por los agujeros negros”. Por último, El País publicaría otra página dedicada al “discípulo de Hubble”,

"protagonista y testigo de la astronomía del siglo XX": Allan Sandage, y titularía con una frase suya "Por qué existe 'el Universo no es pregunta para la ciencia'". También se recoge una pequeña entrevista con Margaret Burbidge que titula "La lucha de una pionera".

Cubriendo igualmente día a día esta reunión estaba un periodista de Diario de Avisos, cuyo trabajó demostró que es posible en Canarias hacer buen periodismo científico. Al igual que El País, tras el primer día de la reunión titulaba "Sandage plantea sus 23 preguntas clave sobre la astrofísica del futuro", un artículo con un buen párrafo inicial con Big Bang de contexto y donde se inserta el anuncio de la conferencia en el Museo, una entrevista con el Director del IAC sobre los objetivos de la reunión y resúmenes de las dos primeras intervenciones de Allan Sandage y Geoffrey Burbidge, dos de los 11 magníficos. Publicaba además una entrevista con otro de los invitados, Malcolm Longair, y titulaba "Más allá de los límites de la física". En ella, Longair decía que "para ser cosmólogo hay que ser optimista" y abogaba por un cambio interactivo entre la física de partículas y la física de alta energía para que pudiéramos entender mejor las ideas acerca del origen del Universo.

Tras el segundo día de conferencias, Diario de Avisos titulaba "Burbidge se enfrenta a sus colegas con la idea de un universo inmutable", con el subtítulo "Mucha gente le gusta que exista el principio por motivos religiosos". Una columna complementaria llevaba por título. "Muchas veces se investiga para justificar la inversión". Estas frases correspondían a Geoffrey Burbidge entrevistado junto a su esposa, Margaret Burbidge. La pareja es uno de los matrimonios de astrónomos más conocidos porque a mediados de los cincuenta, con William Fowler, posteriormente Premio Nobel, y Fred Hoyle, publicaron juntos un trabajo explicando los orígenes de los elementos químicos en el interior de las estrellas. El artículo fue firmado por orden alfabético "Burbidge, Burbidge, Fowler y Hoyle, razón por lo que ahora se conoce por las iniciales B<sup>2</sup>FH, como si de una fórmula química se tratara.

El tercer día de reunión, según Diario de Avisos, "El IAC intenta que los mejores cosmólogos trabajen en Tenerife". "Aportarán la solera que necesitamos", afirma Francisco Sánchez. Y "hay un centenar de temas por resolver en Astrofísica" dice una columna complementaria.

Martin Rees le dijo al periodista de Diario de Avisos que "sólo hay especulaciones sobre la existencia de otros universos" y así tituló. En esa misma página aparecieron los que aún no había hecho su aparición: "Los agujeros negros dejan de ser objetos teóricos para convertirse en evidencias"; eran declaraciones de Igor Novikov.

El corresponsal de El Día también hizo un seguimiento diario. Tras el primer día de reunión, titularía "Los cosmólogos más prestigiosos del mundo revisan sus teorías sobre el Universo", con un pequeño recuadro titulado "Ventanas del conocimiento". Fue este periodista quien publicó la entrevista más entrañable con Margaret Burbidge. El periodista tituló con la genial frase "Las mujeres sostienen la mitad del cielo", que Burbidge finalizaba "y sobre ellas recae la mitad del peso". "Women Hold up Half the Sky" (Las mujeres sostienen la mitad del cielo) un antiguo proverbio chino con el que comienza la Carta de Baltimore sobre las Mujeres en Astronomía y es también una máxima que Margaret Burbidge recuerda haber oído por primera vez en una visita a los observatorios astronómicos de la República Popular China. En aquella ocasión, como en la reunión de Tenerife, también fue la única mujer astrónomo del grupo. Uno de los recuadros que acompañaban esta entrevista llevaba por título "Vida extraterrestre", mientras que el otro decía "Modelos de Universo", planteando la posibilidad de que surgiera una tercera teoría cosmológica.

Para la clausura, también emitimos una nota de prensa con las conclusiones. ABC tituló en su primera edición, antes de recibir nuestro comunicado, "Los astrofísicos necesitan telescopios de ocho metros para resolver los enigmas del Universo", con el subtítulo "Los "agujeros negros" y las galaxias activas son aún un misterio para los científicos". En la segunda edición tituló "Los astrofísicos identifican casi cien enigmas sin aclarar sobre el Universo". La Nueva España de Oviedo tituló "Identificadas casi un centenar de claves astrofísicas",

sustantivando así lo que hasta ahora adjetivaba a "problemas" y cambiando, por tanto, su significado inicial. El Día también utilizó nuestra nota de base y tituló "Identificados más de cien problemas en Astronomía". En La Provincia, "Igor Novikov se muestra seguro de la existencia de agujeros negros masivos".

Con motivo de los Key Problems y formando parte de los titulares apareció el Puerto de la Cruz 1 vez, Tenerife 12 veces, la Isla 1 vez, Canarias 3 veces, el IAC 5 veces, el Observatorio del Roque de los Muchachos 1 vez, el Museo de la Ciencia y el Cosmos 1 vez. En los subtítulos: el Hotel 1 vez (no suele hacerse publicidad de los hoteles), el Puerto de la Cruz 4 veces, Tenerife 5 veces, Canarias 1 vez y el IAC 1 vez.

## ANÁLISIS DE PROBLEMAS

La producción de artículos periodísticos con motivo de la reunión "Key Problems in Astronomy" fue importante si tenemos en cuenta la contradicción que suele acompañar a este tipo de reuniones. Por un lado, su trascendencia obliga a que sean objeto de publicidad en el mejor sentido. Por otro, su naturaleza científica y el celo profesional hace que no sean todo lo abiertas que nos gustaría. Se celebran a puerta cerrada en la mayoría de los casos. El inglés, idioma de estas reuniones, es una dificultad para el periodista medio (que el IAC siempre intenta paliar proporcionando intérpretes y traductores propios). Se celebran en jornadas intensivas, con sólo pausas para el café, y las entrevistas han de hacerse con prisas (algunos científicos recomiendan incluso no ser molestados con entrevistas). Lógicamente, siempre hay representantes de los medios que se molestan por esta actitud.

## LAS ENANAS MARRONES INVALEN LAS ISLAS

Las enanas marrones ya no son hipótesis científicas. Son el eslabón perdido en la cadena de la evolución estelar: ni estrellas ni planetas, y quién sabe si materia oscura. El término "brown dwarf" (enana marrón) fue acuñado en 1995 por Jill Tarter por ubicarse entre las enanas rojas y las negras en el diagrama H-R. Otros términos propuestos fueron: enanas negras, enanas rojas, estrellas liliputienses, estrellas infrarrojas, superjúpiter (enanas café, enanas mulatinhas, enanas pardas y morenas).

Creo no equivocarme si digo que las enanas marrones llegaron a las Islas de la mano del Instituto de Astrofísica de Canarias y, en concreto, a través de su revista IAC Noticias. En el número 18, correspondiente al mes de enero de 1991, se enunciaba en la primera página la detección de una posible enana marrón en la constelación del Toro, información que continuaba en la página 3. También era la primera vez que nuestro boletín abordaba un tema relacionado con "enanas marrones". (La primera aparición de las enanas marrones en El País fue en 1984). Pero el año en que las enanas marrones ocuparon páginas y páginas de periódicos fue 1992, coincidiendo y compitiendo con la información relacionada con la Expo sevillana (en la que el IAC estuvo presente con varios experimentos).

Fue un redactor de la Agencia EFE en Tenerife quien, con buen olfato periodístico, elaboró una información a partir de un artículo del astrofísico Eduardo L. Martín titulado "Una posible enana marrón en el cúmulo joven alfa Persei" y publicado en el Número 1-1992 de nuestra revista. Se trataba de una candidata en la constelación de Perseo que investigadores del IAC estaban estudiando. Esta vez, tras el comunicado de la agencia, la repercusión fue inmediata en los medios de Canarias y en el resto. Las primera enanas marrones aparecen el 7 de julio de 1992 en todos los periódicos de Canarias y en muchos de la Península. He aquí los recortes de ese día y sucesivos:

Pero las enanas marrones, cual bacterias en un caldo de cultivo, se multiplicaron por cinco, y el 4 de agosto encontrábamos los siguientes titulares:

Tal proliferación de enanas marrones nos obligó a tratarlas en la sección A través del prisma de nuestra revista, en su número 2-1994. En esta sección aparecieron tres artículos firmados: "Enanas marrones: el eslabón perdido", firmado por mí; "Enanas marrones/La búsqueda continua", firmado Eduardo Martín; y "Enanas marrones/ El cúmulo de las Pléyades", firmado por María Rosa Zapatero Osorio.

### **TEIDE-1: SER O NO SER**

Ya no es un dilema ni una hipótesis. Sobre todo desde que sus descubridores - investigadores del Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), que la localizaron en Las Pléyades con el telescopio IAC-80, del Observatorio del Teide, en 1995- la sometieran a la prueba del litio con el Telescopio "Keck" de Hawái. Su masa es 50 veces la de Júpiter. Su edad, entre 70 y 120 millones de años. Su temperatura (2.600K) y su débil luminosidad (1.500 veces inferior a la del Sol) hacen que el litio no se haya destruido. Es, además, un astro de difícil detección en el rango óptico del espectro. Sin duda Teide 1 ha sido uno de los eventos astronómicos con más repercusión a nivel internacional tanto en la comunidad científica como en los medios de comunicación.

### **CONCLUSIONES MARRONES**

Hasta aquí, ¿qué aportaron estas informaciones a la divulgación de la ciencia? ¿Sabe la gente qué es una enana marrón? Con respecto a lo publicado está claro que se trata de informaciones explicativas, sin riqueza metafórica. En la medida en que estas informaciones reproducían contenidos de nuestra revista como fuente, podría decirse que las informaciones eran rigurosas. A pesar de lo anterior, se destilan fallos como los siguientes: se habla de "estrella enana marrón", cuando estrella y enana marrón son excluyentes; se habla de "la" enana marrón o de una "estrella enana", ... Quizá lo más destacable es la tendencia a convertir en descubrimiento lo que aún eran hipótesis, candidatas, hasta "Teide 1" (las comillas de "posibles" enanas marrones pasaron a "enanas marrones", suprimiendo la duda). La mayor crítica es la falta de ampliación o documentación de la información, al menos en la prensa local.

### **LAS RESPUESTAS "CLAVE"**

La Astronomía y temas afines "se venden" bien en Canarias. Ocupan posiblemente la segunda posición, tras temas de Medicina. Lo mismo sucede a nivel nacional. La relación Astronomía-IAC-Medios es muy alta (y, hasta cierto punto, lógica): yo estimo que entre el 70-80% de lo publicado sobre estos temas. La labor informativa de la prensa en Canarias se disocia un poco de la divulgativa. Falta contextualización. Los valores para el Grado de Especialización son más altos de lo establecido idealmente por los modelos para prensa diaria.

### **LOS TEMAS MÁS "TOP"**

Teniendo en cuenta el ranking que ocupan los temas relacionados con la Astronomía, a continuación se ofrece lo que podríamos llamar los temas más "top" tratados en los medios de comunicación (el orden no es arbitrario):

- Planetas fuera del Sistema Solar. Vida extraterrestre.
- Materia oscura, enanas marrones y MACHOS.
- Pruebas a favor o en contra del Big Bang. COBE y Cosmosomas
- La constante cosmológica y la edad del Universo.
- Seguimiento de cometas y lluvias de estrellas.
- El Sistema Solar. El Sol. Los eclipses. El clima.

- Los agujeros negros y las supernovas. Las Máquinas del Tiempo.
- Los telescopios espaciales (Hubble, ISO, GRO, ROSAT...).
- Los grandes telescopios terrestres (KECK, GTC...).
- Detectores de neutrinos y ondas gravitatorias.

Obsérvese cómo los planetas ocupan la primera posición, por delante incluso de las enanas marrones y del Big Bang, el que fuera el número 1 indiscutible durante mucho tiempo.

### LA ASTRONOMÍA: UN LENGUAJE PERIODÍSTICO

¿Usan los científicos una terminología compleja para ocultar el desconocimiento que se tiene en ciertos temas? Los astrónomos no ocultan su ignorancia con un lenguaje oscuro: algunos términos trascienden fácilmente a la Opinión Pública.

Key Problems sacó a relucir temas como "Big Bang", "agujeros negros", "cuásares" y hasta "la máquina del tiempo", términos todos ellos que, en palabras de la periodista Alicia Rivera, son "el sueño de cualquier especialista en marketing". Esta periodista dio una conferencia en Sevilla titulada "Big Bang, Primer premio de publicidad científica". En ella dijo que los astrofísicos y los cosmólogos tienen una gran capacidad de divulgación en comparación con otros científicos. Y que hay una gran densidad de actividad en cuanto a temas relacionados con el Universo.

### EL COLOR DE LA ASTRONOMÍA

Y para terminar, una simple toma de conciencia convertida en un sencillo poema adornado con pinceladas de colores:

*Vivimos bajo un cielo azul  
 y un sol amarillo,  
 cerca del planeta rojo,  
 rodeados de enanas blancas y marrones,  
 de gigantes rojas y agujeros negros.  
 Vivimos en un planeta azul,  
 con una luna blanca  
 iluminando el negro de la noche  
 y alterando con su presencia el azul del mar.*



# EL IAC, UNA VENTANA DE CANARIAS AL UNIVERSO

Francisco Sánchez

Director del Instituto de Astrofísica de Canarias

Una ventana es una "herramienta" para asomarse a observar y para dejar que la luz (la información) entre. Es una forma bastante gráfica de entender el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) como ventana al Universo situada en Canarias.

Voy a intentar mostrarles:

- Qué es actualmente el IAC
- Cómo ha llegado a ser lo que es
- Cuál podría ser su futuro

## 1.- QUÉ ES EL IAC

Administrativamente, el IAC es, simultáneamente,

UN ORGANISMO ESPAÑOL DE INVESTIGACIÓN Y  
UNA ORGANIZACIÓN EUROPEA PARA LA ASTRONOMÍA: el EUROPEAN NORTHERN  
OBSERVATORY

Desde la parte española, legalmente es un "CONSORCIO PÚBLICO de gestión, constituido por:

- la ADMINISTRACIÓN DEL ESTADO
- la COMUNIDAD AUTÓNOMA DE CANARIAS
- el CONSEJO SUPERIOR DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS
- la UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El IAC lo integran:

- el INSTITUTO DE ASTROFÍSICA (Tenerife)
- el OBSERVATORIO DEL TEIDE (Tenerife)
- el OBSERVATORIO DEL ROQUE DE LOS MUCHACHOS (La Palma)

No es posible entender la astronomía en Canarias sin conocer el Instituto de Astrofísica, situado en el campus de la Universidad de La Laguna, es la base de los observatorios internacionales de Canarias. Pero además es:

- un instituto de investigación astrofísica
- un centro tecnológico
- un lugar de formación de investigadores y tecnólogos
- un núcleo impulsor de divulgación científica y técnica
- un lugar de encuentro de la comunidad astronómica internacional

## 2.- OBSERVATORIOS INTERNACIONALES DEL IAC

A continuación se resume en forma de cuadros, lo más relevante de los Observatorios del IAC.

---

Cuadro I

OBSERVATORIO DEL ROQUE  
DE LOS MUCHACHOS (ORM)  
Superficie: 189 hectáreas  
Altitud: 2.396 m.

Situación: Isla de La Palma (Islas Canarias/España)  
Longitud: 17°52'34" Oeste  
Latitud: 28°45'34" Norte

DIAMETRO (CM)	INSTRUMENTO	PROPIETARIO	OPERATIVO (AÑO)
18	Círculo Meridiano	Univ. Copenhague (D-RU-E)	1984
45	Telescopio Solar Holandés (DOT)	NFRA (PB)	1996
50	Refractor Solar (VRT)	R. Academia de Ciencias (S)	1982
60	Telescopio óptico	R. Academia de Ciencias (S)	1982
100	Telescopio Jacobus Kapteyn (JKT)	PPARC (RU-PB-IR)	1984
250	Telescopio Isaac Newton (INT)	PPARC (RU-PB)	1984
256	Telescopio Nórdico (NOT)	Fundación NOT (D-FI-N-S)	1989
350	Telescopio Nacional Italiano Galileo (NTG)	CRA-Obs. Astr. Padua (IT)	1996
420	Telescopio William Herschel (WHT)	PPARC (RU-PB)	1987
1000	Telescopio en proyecto		
	Red de detectores de rayos cósmicos (HEGRA)	Univ. Kiev (A) Inst. Max-Plank Munich (A) Univ. Wuppertal (A) Univ. Hamburgo (A) Univ. Complutense de Madrid (E)	1988

A=Alemania; D=Dinamarca; E=España; FI=Finlandia, IR=Irlanda; IT=Italia; N=Noruega; PB=Paises Bajos; RU=Reino Unido; S=Suecia

## Cuadro II

### OBSERVATORIO DEL TEIDE (OT)

- Superficie: 50 hectáreas
- Altitud: 2.390 metros
- Situación: Isla de Tenerife (Islas Canarias/España)
  - Longitud: 16°30"35" Oeste
  - Latitud: 28°18"00" Norte

DIAMETRO (CM)	INSTRUMENTO	PROPIETARIO	OPERATIVO (AÑO)
25	Heliógrafo Razdow	IAC (E)	1969
40	Telescopio solar Newton al vacío (VNT)	Inst. Kiepenheuer (A)	1972
45	Telescopio solar Gregory Coudé (GCT)	Univ. Gotinga (A)	1986
50	Telescopio refletor	Univ. Mons (B)	1972
60	Telescopio solar de torre al vacío (VTT)	Inst. Kiepenheuer (A)	1989
80	Telescopio IAC-80	IAC (E)	1993
90	Telescopio solar THEMIS	CNRS-CNR (FR-IT)	1996
100	Telescopio Estación Óptica Terrestre (OGS)	IAC-ESA (E-Inten.)	1995
155	Telescopio Infrarrojo Carlos Sánchez (TCS)	IAC (E)	1972
	Radiotelescopios de doble antena: -10,15 y 33 GHz (microondas) -Teide GEM	IAC-Univ. Manchester (E-RU) CBL (EEUU)	1984-89-91 1995
	Antena y bolómetro milimétrico: -3,1, 2,1, 1,3, y 1,1 mm	IAC-Inst. Bartol (E-EEUU)	1994
	<b>Laboratorio Solar:</b>	IAC (E)	1987
	-Espectofotómetro por scattering resonante:		
	MARK-I	Univ. Birmingham (RU)	1976
	MARK-II	Univ. Birmingham (RU)	1989
	CANNON	Univ. Birmingham (RU)	1989
	IRIS-T	Univ. Niza (FR)	1989
	-Fotómetros:		
	TON	Univ. de Tsing-Hua (Taiwan)	1993
	LOI	ESA-IAC (Intern.-E)	1994
	-Tacómetro de Fourier GONG	NSO (EEUU)	1994

A=Alemania, B=Bélgica, E=España, EEUU=Estados Unidos, FR=Francia, IT=Italia, RU=Reino Unido, Taiwán, Intern.=Internacional

Las inversiones en los OBSERVATORIOS DE CANARIAS se resumen en el Cuadro III.

---

Cuadro III

INVERSIONES EN LOS OBSERVATORIOS DE CANARIAS

	(millones de pesetas)
<b>Países Extranjeros</b>	<b>23500</b>
<b>España (Admon. del Estado y Comunidad Autónoma de Canarias)</b>	<b>3500</b>

COSTO DEL FUNCIONAMIENTO ANUAL

<b>Países Extranjeros</b>	<b>2500</b>
<b>España (Admon. del Estado y Comunidad Autónoma de Canarias)</b>	<b>150</b>

---

El éxito creciente de la astrofísica española se debe, en gran medida, a que se ha sabido explotar bien el "cielo de Canarias".

Los Observatorios Internacionales de Canarias son de hecho el OBSERVATORIO NORTE EUROPEO. Basta repasar la lista de instituciones científicas que tienen telescopio o instrumentos instalados en él.

Aquí la participación española es del todo diferente a la del resto de los casos en los que España forma parte de organizaciones científico-técnicas internacionales (ESA, CERN, etc.).

En este caso:

- España no paga cuota anual por su participación
- las instalaciones están en territorio español, con todos los beneficios complementarios que ello supone
- ha sido mínima nuestra contribución a los gastos de funcionamiento
- es máxima nuestra influencia en los órganos de gobierno
- son realmente importantes los retornos científicos, tecnológicos, culturales, turísticos, de imagen, sociales y económicos.

**Retornos Científicos**

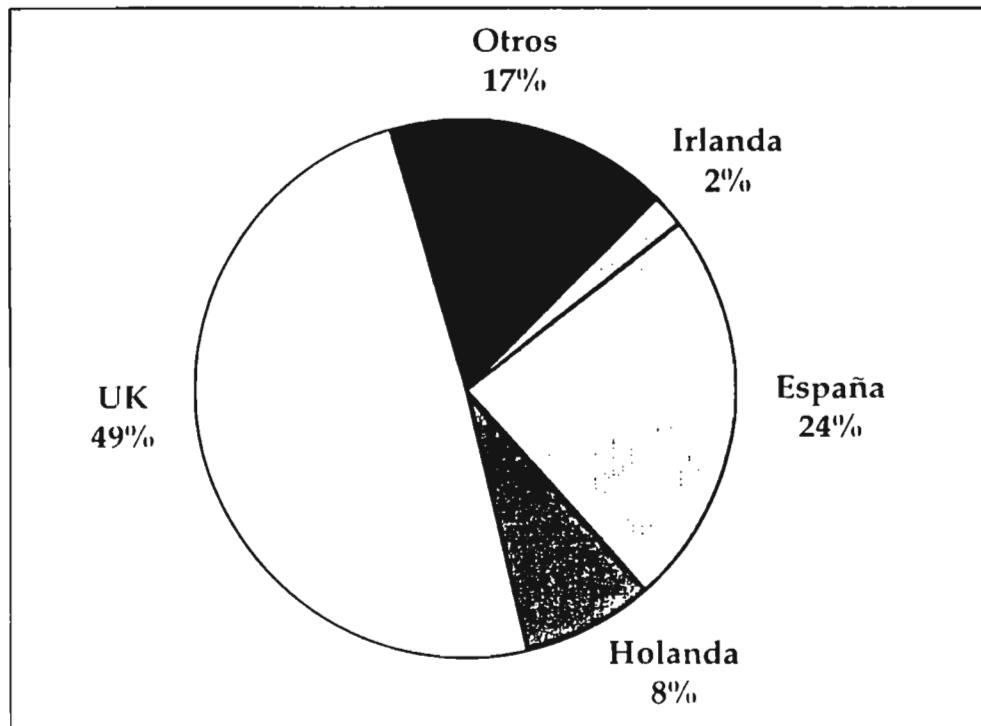
España recibe el 20% del tiempo de observación, libre de gastos, más la participación en el 5% de tiempo para programas cooperativos. Muestra de cómo se está usando este tiempo por la comunidad astrofísica española es el Cuadro IV.

Dicho tiempo está sirviendo eficazmente como palanca para el desarrollo espectacular que se está produciendo en España de la ciencia y la tecnología relacionados con la astrofísica.

---

Cuadro IV

ORIGEN DE LAS PUBLICACIONES REALIZADAS, ENTRE 1982 Y 1992, CON DATOS DE LOS TELESCOPIOS BRITÁNICO-HOLANDESES EN EL ORM.



Esto se ha logrado:

- negociando como recurso natural exportable de naturaleza pública el "cielo de Canarias".
- creando un sistema de gestión adecuado: el CONSORCIO PÚBLICO DE GESTIÓN INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS.

### 3.- INVESTIGACIÓN Y TECNOLOGÍA

En el Cuadro V, se resume el programa de investigación del IAC en curso y sirve para hacerse una idea general de en qué temas científicos y técnicos está implicado el Instituto.

Cuadro V

#### PROGRAMA DE INVESTIGACION DEL IAC 1996

##### ESTRUCTURA DEL UNIVERSO Y COSMOLOGIA

- Abundancias de los Elementos Ligeros (P2/86)
- Anisotropía del Fondo Cósmico de Radiación Electromagnética (P5/86)
  - Expansión del Universo (P10/96)
  - Astrofísica Relativista y Teórica (P6/88)

##### ESTRUCTURA DE LAS GALAXIAS Y SU EVOLUCION

- Galaxias Activas y Cuásares: Morfología y Cinemática del Gas Extranuclear (P10/86)
  - Grupo de Estudios de Formación Estelar (GEFE) (P1/92)
  - Origen de la Actividad en Galaxias (P2/93)
  - Antares (P1/94)
  - Poblaciones Estelares (P3/94)
- Espectroscopía Bidimensional con Fibras Ópticas de Galaxias Activas (P4/94)
- Distribución y Dinámica de Poblaciones Estelares, Gas y Polvo y Formación Estelar en Galaxias (P5/94)

##### ESTRUCTURA DE LAS ESTRELLAS Y SU EVOLUCION

- Cúmulos Estelares (P11/86)
- Sismología Estelar (P20/86)

- Supernovas Extragalácticas (P7/87)
  - Estrellas Binarias: Sistemas RS CVn y Cataclísmicas (P7/88)
  - Física de Estrellas de muy baja Masa, Identificación de Enanas Marrones y Búsqueda de Planetas Extrasolares (P6/95)
  - Modelización de Atmósferas Estelares (P4/96)
  
  - EL SOL**
  - Sismología Solar (P2/87)
  - Estructura y Dinámica de la Atmósfera Solar (P3/87)
  - Magnetismo, Radiación y Fluidos en Astrofísica (P5/96)
  
  - MATERIA INTERESTELAR**
  - Estudios Cinemáticos, Estructurales y de Composición de los Medios Interestelares e Intergalácticos (ISM e IGM) (P3/86)
  - Nebulosas Bipoares (P13/86)
  - Regiones HII Extragalácticas (P14/86)
  - Nebulosas Planetarias (P15/86)
  
  - SISTEMAS PLANETARIOS**
  - Fenómenos Esporádicos del Sistema Solar (P2/90)
  - Arqueoastronomía (P7/93)
  
  - OPTICA ATMOSFERICA**
  - Calidad Astronómica de los Observatorios de Canarias (P1/89)
  
  - ALTA RESOLUCION ESPACIAL**
  - Sistemas para Imágenes de Alta Resolución (P35/86)
  
  - DISEÑO Y CONSTRUCCION DE TELESCOPIOS**
  - Telescopios Nocturnos OT (P9/96)
  - Gran Telescopio Canarias (P2/94)
  
  - INSTRUMENTACION OPTICA**
  - Espectrógrafo de Alta Resolución IACUB (P2/91)
  - Filtros Ópticos (P8/93)
  - INTEGRAL (P12/94)
  
  - INSTRUMENTACION INFRARROJA**
  - Cámara IR Bidimensional (P1/91)
  - Proyecto DENIS (P6/92)
  - Polarímetro IR y Visible (P7/94)
  - Espectrómetro y Cámara para el Infrarrojo Cercano (NIRIS) (P6/96)
  
  - ASTROFISICA DESDE EL ESPACIO**
  - Participación en ISO (P1/88)
- 

#### **4.- FORMACIÓN DE INVESTIGADORES Y TECNÓLOGOS**

Una faceta importante del IAC es la formación de investigadores y tecnólogos. A continuación se resumen la principales acciones al respecto:

- Los investigadores del IAC participan activamente, a través del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna, en la enseñanza de la Astronomía y la Astrofísica en todos los ciclos universitarios.
- El IAC mantiene desde siempre un empeño permanente en la formación de personal investigador y técnico, por considerarlo tarea fundamental para el desarrollo el país.
- Una Escuela de Postgraduados acoge a jóvenes licenciados e ingenieros quienes, mediante un contrato laboral de "astrofísico residente", se incorporan a los grupos de investigación del IAC y realizan su tesis doctoral. Seminarios y cursos de doctorado completan su formación.
- Hay puestos de "técnicos residentes" para capacitar a jóvenes procedentes de la formación profesional.
- Se dan becas, dotadas a través de los Acuerdos Internacionales de Astrofísica, que permiten a jóvenes astrofísicos españoles continuar su formación en centros extranjeros de reconocida tradición y prestigio.

- El IAC ha institucionalizado una Escuela Internacional de Astrofísica de Invierno: the CANARY ISLANDS WINTER SCHOOL OF ASTROPHYSICS.

Este sistema se completa con el "IAC POSDOCTORAL PROGRAMME", a través del cual jóvenes doctores de todo el mundo vienen, durante períodos largos de tiempo, a trabajar al IAC.

## 5.- DIFUSIÓN CULTURAL

La ciencia es una parte importante de la cultura. Su divulgación, para hacerla accesible a todos, ha sido una preocupación permanente del IAC.

A continuación se resumen las principales acciones al respecto:

- campañas de difusión cultural en colegios e institutos
- conferencias de divulgación días de "Puertas Abiertas", en los Observatorios y el Instituto
- noches astronómicas populares
- boletín "Noticias"
- cursos de divulgación
- cursos de formación para profesores de enseñanza Básica y Media
- presencia en la Exposición Universal de Sevilla y otras muchas exposiciones
- participar en la creación del "Museo de la Ciencia y el Cosmos" del Cabildo Insular de Tenerife. Idear y construir sus contenidos originales.
- concursos con base astronómica

## 6.- BREVE HISTORIA DEL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

### Década de los sesenta

Es la década de la Prospección astronómica española

**1964** El primer telescopio profesional se instala en el Observatorio del Teide: el telescopio fotopolarimétrico de la Universidad de Burdeos, con el que se harían las primeras tesis doctorales.

**1969** Se instala en el Observatorio del Teide el primer telescopio solar.

### Principales Logros

- Hacer la primera prospección astronómica de las Islas Canarias.
- Los primeros artículos y comunicaciones sobre temas astrofísicos producidos por españoles.
- Empezar en España la formación de astrofísicos y crear (en la Universidad de La Laguna) el primer grupo de investigación astrofísica.
- Vencer los prejuicios de los astrónomos europeos sobre las condiciones de Canarias para la Astronomía.
- Conseguir que las autoridades españolas (locales y nacionales) empiecen a entender que este "recurso natural" que es el cielo de Canarias podría ponerse en explotación y emplearse, además, para iniciar y desarrollar la Astrofísica España.

### Década de los setenta

Es la década de la prospección astronómica internacional.

**1970** Primera inauguración del Observatorio del Teide. A través de un proyecto de investigación del Fondo IBM, para construir un telescopio multicanal automático entra en Canarias el primer ordenador.

**1972** Entra en servicio, en el Observatorio del Teide, el telescopio infrarrojo de 1,55m. (en aquel momento el mayor del mundo) propiedad del Imperial College de Londres.

**1973** En la Universidad de La Laguna se crea el Instituto Universitario de Astrofísica, del que pasa a depender el Observatorio del Teide.

**1975** Nace el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) por acuerdo entre la Universidad de La Laguna, el CSIC y la Mancomunidad de los Cabildos de la provincia de Tenerife. En él se integra el Instituto Universitario de Astrofísica y el CSIC le da estatus de centro propio.

Donde hoy está la Facultad de Física, se instala la biblioteca, laboratorios, talleres y servicios del IAC, en unos barracones prefabricados de uralita pagados por el Cabildo de Tenerife.

Se celebra en Tenerife la 1<sup>a</sup> Asamblea Nacional de Astronomía y Astrofísica.

Se inicia en el IAC el primer Programa Nacional para la Formación de Investigadores en Astrofísica.

**1978** Se inicia en la Universidad de La Laguna la licenciatura en Física por la Especialidad de Astrofísica

**1979** Se firman (Suecia, Dinamarca, Inglaterra y España) en Santa Cruz de La Palma el Acuerdo y Protocolo de Cooperación en Astrofísica, a través de los cuales se internacionalizan los Observatorios del Teide (Tenerife) y del Roque de los Muchachos (La Palma).

El IAC hace el primer contrato de transferencia de tecnología a una empresa en proceso de constitución (hoy Energía Solar Española).

#### Principales Logros

- Conseguir que los astrónomos europeos hiciesen prospección astronómica de las cumbres de Tenerife y La Palma y así, al final, se reconociese internacionalmente la excepcional calidad astronómica de su cielo.
- Negociar y lograr que se firmen los Acuerdos de Cooperación en Astrofísica, por los que se regula la explotación del cielo de Canarias y se abren los Observatorios del IAC a los telescopios más avanzados.
- Crear un organismo único aglutinante de la Astrofísica en Canarias: el IAC.
- Consolidar los tres primeros grupos de investigación del IAC.
- Establecer, por primera vez en España, un programa estable para formar astrofísicos.
- Lograr que se cree en la Universidad de La Laguna la Facultad de Física, a través de la Astrofísica.

#### Década de los ochenta

Es la década de la consolidación administrativa del IAC y de sus observatorios internacionales.

**1982** El Parlamento aprueba por unanimidad la "ley fundacional" del IAC (R.D. Ley 7/1982 de 30 de abril) por el que se dota el IAC de "capacidad jurídica y plena capacidad de obrar", configurándolo administrativamente como "consorcio público" integrado por la Administración del Estado, la Comunidad Autónoma de Canarias, la Universidad de La Laguna y el CSIC. En él se integran el Instituto Universitario de Astrofísica de la Universidad de La Laguna y el Instituto de Astrofísica del CSIC.

**1983** Auditoría científica del IAC, tras la que el "grupo de sabios" nos hace "Recomendaciones sobre el futuro de la investigación en el IAC".

Alemania se adhiere a los Acuerdos Internacionales de Astrofísica. Empieza a funcionar en el IAC su Escuela de Posgrado con la dotación de puestos de "astrofísicos residentes".

**1985** Inauguración solemne del Instituto de Astrofísica y los Observatorios del Teide y del Roque de los Muchachos por monarcas y miembros de familias reales de cinco países (España, Dinamarca, Gran Bretaña, Holanda y Suecia) y dos jefes de Estado (Alemania e Irlanda). También asistieron doce ministros de países europeos y una representación notable de la comunidad científica, encabezada por cinco Premios Nobel.

**1986** Noruega se adhiere a los Acuerdos Internacionales de Astrofísica. "Fiesta de las Estrellas" en la Playa de las Teresitas y Apagón en La Palma con motivo del paso del Cometa Halley.

**1987** Entra en servicio, en el Observatorio del Roque de los Muchachos, el telescopio anglo-holandés de 4,2m. ("William Herschel").

**1988** La "Ley del Cielo" (Ley 31/1988 de 31 de octubre) convierte a los Observatorios del IAC en una "reserva astronómica" internacional. Francia se adhiere a los Acuerdos Internacionales de Astrofísica. El IAC retoma la responsabilidad del instrumento ISOPHOT-S que volará en el satélite ISO e inicia su participación en los instrumentos VIRGO y GOLF que volarán en el satélite SOHO.

**1989** El IAC organiza en Tenerife la Reunión Europea de la IAU. Se celebra la primera "escuela de invierno" del IAC de la "Canary Islands Winter School of Astrophysics". Entra en servicio, en el Observatorio del Roque de los Muchachos, el telescopio NOT de 2,56m. El Observatorio del Roque de los Muchachos recibe la Medalla de Oro del Premio "Importantes del Turismo 1989".

#### Principales Logros

- Dotar al IAC de autonomía y personalidad jurídica propia.
- Que la comunidad científica y los estados europeos reconozcan la excepcional calidad astronómica del cielo de Canarias e instalen aquí sus telescopios más avanzados.
- Construir el Instituto de Astrofísica y dotarlo de laboratorios y talleres, además de los servicios normales de un instituto de investigación.
- Construir el Observatorio del Roque de los Muchachos y modernizar el Observatorio del Teide.
- Avanzar en la consolidación del IAC (seis grupos de investigación, una escuela de posgrado y la Canary Islands Winter School of Astrophysics, grupos de instrumentación, compromisos en instrumentación espacial, lugar de encuentro de la comunidad científica, etc.).

#### Década de los noventa

Será la década de la consolidación científica y técnica del IAC.

**1990** Después de años de estudios comparativos entre Hawái y Canarias, se decide instalar en el Observatorio del Roque de los Muchachos el telescopio LEST (Large Earth-based Solar Telescope) de 2.4m., el telescopio solar mayor del mundo.

**1991** El telescopio nacional italiano "Galileo" de nueva tecnología y 3.5m. se decide instalar en el Observatorio del Roque de los Muchachos, cuando estaba previsto instalarse en Hawái.

**1992** El IAC, permanente impulsor de la faceta científico-técnica en nuestra cultura, participa en tres pabellones de la Exposición Universal de Sevilla: Pabellón del Universo, Pabellón de los Descubrimientos y Pabellón de Canarias.

Se reúne en el IAC el Foro de Megaciencia de la OCDE.

**1993** En mayo se inaugura el Museo de la Ciencia y el Cosmos del Cabildo de Tenerife, en cuyo diseño e instalación tiene una destacada participación el IAC.

**1994** El IAC firma un acuerdo con ESA (European Space Agency) para instalar en el Observatorio del Teide un telescopio para telecomunicaciones ópticos con satélites.

Se crea GRANTECAN S.A., empresa pública específica para diseñar y construir un gran telescopio, a ser instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos.

**1995** Con el patrocinio de la Fundación BBV se celebra el encuentro internacional entre grandes maestros de la Astrofísica y jóvenes investigadores, titulado: "Key Problems in Astronomy".

En noviembre es lanzado desde Guayana, por la ESA, el satélite ISO. En él vuela la primera instrumentación científica espacial hecha en España. El IAC lidera la parte española del instrumento ISOPHOT-S.

En diciembre es lanzado desde Cabo Cañaveral por la NASA el Satélite SOHO. El IAC lidera la parte española de los instrumentos VIRGO y GOLF.

**1996** En febrero el Consejo Rector del IAC, con todos los informes favorables y con el acuerdo de participación, al 50%, del Estado y de la Comunidad Autónoma de Canarias, da "luz verde" a la construcción del Gran Telescopio de espejo segmentado de 10m.

#### Principales Logros

- Los descubrimientos notorios hechos por astrofísicos del IAC se hacen cada vez más frecuentes y el prestigio científico del Instituto crece:

1992 primer candidato cierto de agujero negro galáctico

1994 COSMOSOMAS, mapeado de anisotropías en la Radiación Cosmogónica.

1995 primera enana marrón cierta: "Teide 1".

- Los logros tecnológicos del IAC son reconocidos internacionalmente:

Correlador Solar

ISOPHOT-S

VIRGO

GOLF

telescopio IAC-80

### 7.- FUTURO DEL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

Nunca es posible conocer el futuro. Sin embargo, siempre cabe hacer extrapolaciones de la realidad actual, para tener indicios de por dónde pueden ir las cosas en el porvenir.

La realidad actual es que cuantos trabajamos en el IAC formamos un grupo consciente de hasta dónde hemos sido capaces de llegar en tan poco tiempo y decididos a:

- aprender, hacer y enseñar Astrofísica
- generar y ceder tecnología
- impulsar el desarrollo cultural
- hacer del IAC el OBSERVATORIO NORTE EUROPEO

La verdad es que el IAC sigue siendo un instituto de investigación joven, con todo el futuro por delante.

El futuro inmediato está muy ligado a la construcción del Gran Telescopio.

## GRAN TELESCOPIO CANARIAS

En todos los estudios prospectivos sobre el futuro de la Astrofísica, se subraya la necesidad de construir telescopios gigantes y situarlos en los mejores sitios del planeta. Canarias necesita unos de estos gigantes y el futuro del IAC está ligado a tal proyecto.

El pasado 7 de febrero, el Consejo Rector del IAC en reunión monográfica, dio luz verde al proyecto del Gran Telescopio. En esta reunión se adquirió el compromiso de financiación por parte del Estado y de la Comunidad Autónoma Canaria del 51% del costo del proyecto, y se estableció el calendario de aportaciones económicas que ambas partes deben realizar entre 1996 y 1999. Se encomendó a la empresa pública Gran Telescopio Canarias, S.A. (GRANTECAN) la gestión del diseño, construcción e instalación en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma) del Gran Telescopio. Se aprobó también la ampliación de capital de esta empresa para dar entrada en ella al Estado, al 50% con la Comunidad Autónoma, ampliación que ya se ha producido.

El espejo primario (la clave de todo telescopio) será segmentado y de, al menos, 10 metros de diámetro.

Hay conversaciones con diversos países y en especial con ESO (European Southern Observatory) para la participación internacional en el proyecto.

A continuación se resumen las principales razones por las cuales hay que acometer el proyecto.

- nuestra comunidad astrofísica necesita el Gran Telescopio para ser competitiva
- Canarias, uno de los dos lugares excepcionales para la observación astronómica en este hemisferio, precisa este Gran Telescopio para seguir estando el próximo siglo entre los 3 observatorios de primera
- Europa necesita un telescopio así en el Hemisferio Norte y el proyecto debería tener participación europea
- la ciencia española necesita este tipo de proyectos. Entre otras cosas, así sus grupos de investigación tendrán que implicarse en el desarrollo de instrumentación científica
- la industria española puede, desea y le conviene la construcción y operación del Gran Telescopio
- es un proyecto que empuja a que la transferencia de tecnología sea un hecho normal
- es un proyecto abordable por España, aunque convenga que haya participación europea
- el impacto será grande sobre áreas estratégicas directamente ligadas al desarrollo económico y social
- su efecto sería muy positivo para:
  - el impulso científico y técnico que precisa nuestra cultura
  - la capacitación de investigadores y tecnólogos
  - el turismo en Canarias
  - la imagen del país
  - el aumento del optimismo social
  - ciertas áreas de la economía

ES EL PRIMER PROYECTO DE "GRAN CIENCIA" LIDERADO POR ESPAÑA, UBICADO EN SU TERRITORIO Y PENSADO CON CLAROS OBJETIVOS ESTRATEGICOS NACIONALES.



