

Manuel Catalán Pérez de Urquiola

**LA TIERRA COMO PLANETA**

22 de Junio de 1995

**EL EXCMO. SR. D. MANUEL CATALÁN PÉREZ DE URQUIOLA**, ES CONTRALMIRANTE-DIRECTOR DEL REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO ASTRONÓMICO DE LA ARMADA, INGENIERO SUPERIOR POR LA UNIVERSIDAD DE BERKELY, ESPECIALISTA EN FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS POR LA J.E.N., MÁSTER EN ESTUDIOS SUPERIORES EN ASTRONOMÍA, GEODESIA Y GEOFÍSICA.

## **RESUMEN**

Se describen las teorías de formación del Sistema Solar discutiendo las posibilidades de un origen evolutivo o catastrófico, comentando las teorías de origen frío del planeta y la formación de los océanos y atmósfera en base a consideraciones sobre la historia térmica del planeta.

Se describe la definición de las aplicaciones y tendencias actuales de la astronomía clásica desde nuestro planeta, su evolución, métodos, instrumentación y aplicación actual hacia la definición del Sistema de Referencia «cuasi inercial» y, a través de él, de la geometría del Universo como objetivo fundamental de la moderna astrometría.

## **EL SISTEMA SOLAR**

La Tierra es un planeta, y como tal, un miembro del Sistema Planetario Solar, debiendo curiosamente recurrir para el estudio de su formación y evolución al análisis de otros planetas, y considerar la Tierra en relación con ellos, mejor que abordar su estudio como un objeto aislado e innaccesible en la mayor parte de su volumen. En líneas de accesibilidad se conoce mejor la historia térmica primitiva de los meteoritos que las etapas iniciales de la formación de la Tierra.

La mayor parte de las teorías sobre el origen de los planetas postulan que el material planetario procedía bien del Sol, o bien, de una nube primitiva de polvo y gas que se condensó en una parte de nuestra galaxia para formar el Sistema Solar. Sin embargo la composición del Sol difiere marcadamente de la composición de los planetas interiores estando formado, fundamentalmente, por los elementos más sencillos, como hidrógeno y

helio, siendo solamente el 1 por ciento de sus átomos los que tienen un peso atómico mayor que el helio. En los planetas interiores, sin embargo, el hidrógeno y el helio están virtualmente ausentes siendo el 99,9 por ciento de los átomos presentes elementos más pesados.

En general las teorías del origen del Sistema Solar pueden dividirse en dos clases:

- a) Teorías naturales o evolucionistas, que sugieren que el Sistema Planetario forma parte de la historia evolutiva de algunas estrellas. Si estas teorías son correctas el Sistema Planetario alrededor de las estrellas debería ser un hecho relativamente frecuente en nuestra galaxia.
- b) Teorías catastrofistas, que suponen que los Sistemas Planetarios se forman sólo de una manera accidental o catastrófica, tales como la aproximación o colisión de dos estrellas. Sin embargo, dado que el espacio intergaláctico está prácticamente vacío; la posibilidad de tales sucesos es extremadamente remota y en los 4.600 millones de años de existencia del Sistema Solar solamente alrededor de una de cada diez mil millones de estrellas orbitaría un Sistema Planetario.

Sin embargo y aunque los Planetas que orbitan alrededor de las estrellas no puedan observarse directamente con los telescopios, debido a que su luminosidad es muy baja, se admite en general como resultado de observaciones indirectas que una de cada mil estrellas tienen un Sistema Planetario, existiendo en una mayor proporción estrellas binarias o sistemas múltiples en los cuales dos o más estrellas, oscilan alrededor de un centro de gravedad común. Estos sistemas binarios son tan corrientes que forman parte del orden natural de las cosas eliminándose, por esta razón, una explicación catastrofista de la existencia del Sistema Solar.

En general, cualquier teoría del origen de nuestro Sistema Planetario debería, para ser admitida, considerar varios hechos observados, en particular el movimiento uniforme del Sol y de los Planetas. Simplificando, el Sistema Solar, puede considerarse tiene forma de disco con los planetas orbitando alrededor de un Sol central y rotando en la misma dirección en órbitas «cuasi» circulares y co-planarias, en posición próxima al plano ecuatorial de la rotación solar.

En otras palabras, el conjunto del Sistema o Disco Solar es giratorio, aunque las diferentes partes que lo componen se muevan a diferentes velocidades, girando alrededor de sus ejes. La mayor parte de los planetas, por ejemplo la Tierra, tiene un período de rotación de 23 horas y 56 minutos, pero los grandes planetas exteriores rotan con un período de aproximadamente diez horas.

Este hecho se puede extender a los planetas que tienen satélites propios, y donde sus sistemas secundarios presentan las mismas características generales de movimiento que el Sistema Solar orbitando la mayor parte de sus lunas alrededor del planeta central en la misma dirección.

En general se puede considerar que los planetas del Sistema Solar son de dos tipos. Los cuatro más internos son pequeños con densidades superiores a 4 kg/l, los exteriores son mucho mayores, Júpiter tiene aproximadamente 10 veces el radio de la Tierra y 1.000 veces su volumen y mucha menor densidad. Saturno tiene una densidad inferior a la del agua siendo una excepción el más externo de todos los planetas Plutón, pequeño y denso.

Entre las diferentes teorías postuladas sobre el origen del Sistema Solar quizá la mejor conocida sea la propuesta por el Marqués de Laplace en 1792. La nebulosa de Laplace sugería que el material que luego formaría el sol y los planetas tenía originalmente una forma de nebulosa o nube de gas caliente en forma de disco. Cuando el gas perdió la energía por radiación, se enfrió, la nube se contrajo aumentando su rotación para conservar el momento angular, hasta que en una determinada fase de contracción, la velocidad del disco exterior fue suficiente para que la fuerza centrífuga superara la acción gravitatoria, separándose parte de la materia de la nebulosa para formar sucesivamente los planetas. La gran masa restante de la nebulosa seguiría contrayéndose para formar el Sol. Esta teoría explica la regularidad de movimiento de los cuerpos del Sistema Solar.

Después de un período inicial de gran aceptación, la hipótesis fue desechándose debido a que no explicaba la distribución de energía y masas dentro del Sistema Solar. En efecto, aunque los planetas tienen solamente el 0,1 por ciento de la masa del Sistema Solar, poseen el 98% de su energía cinética y momento angular. Este hecho es contrario a la situación que cabría esperar donde el sol tendría un momento angular mayor, y

consiguientemente una velocidad de rotación muy superior. Todo lo anterior exige buscar un mecanismo que justifique la causa de la pérdida observada en la energía rotacional solar.

Dado que hasta muy recientemente, no se ha encontrado una explicación física lógica para justificar esta pérdida de energía las teorías catastrofistas se hicieron populares explicando que la gran energía cinética de los planetas no había sido impartida desde el Sol, sino que se debían a alguna estrella que se había aproximado al sistema. Si la estrella se aproximaba muy cerca del Sol, la atracción de marea produciría resultados explosivos o destructivos y ocasionando que parte de la masa solar fuera arrancada de su superficie.

Este material arrancado, bajo la influencia de la atracción gravitacional de la estrella próxima, en lugar de caer nuevamente sobre el Sol se iría condensando para formar los planetas girando, todos ellos y por esta razón, en la misma dirección alrededor del Sol.

Existen algunas variantes sobre estas teorías que fueron admitidas durante algún tiempo con modificaciones que trataban de explicar la razón por la que nubes calientes individuales, a la temperatura del Sol y con la masa de los planetas deberían condensarse en lugar de dispersarse, con la dificultad añadida de justificar un suceso tan improbable como la aproximación de dos estrellas en el vacío intergaláctico.

A partir de 1943, se volvieron a contemplar nuevamente teorías del tipo de Laplace, postulando que los planetas se formaban a partir de una nebulosa gaseosa de polvo intergaláctico que giraba, bien alrededor de un cuerpo masivo central o quizá derivado de éste, tras un proceso de centrifugación seguido de condensación. Dentro de esta nebulosa, los planetas se irían agregando debido a irregularidades gravitatorias locales que favorecerían la concentración de gas y polvo, en el interior de las nubes.

Las objeciones a la teoría de Laplace basadas en considerar que el movimiento angular del sol era demasiado pequeño respecto al de los planetas se pudieron justificar bajo la acción de frenado que suponía la interacción de la nube giratoria ionizada con el campo magnético creado por el cuerpo masivo central.

Del estudio físico de su evolución se deduce que el Sol primitivo poseía un considerable campo magnético asociado. La nube de gas, a su

alrededor, estaría compuesta fundamentalmente de hidrógeno, alguna parte del cual estaría ionizada. Los iones de hidrógeno actuarían como imanes elementales sometidos al campo creado por el gran imán rotatorio central que rodeado de un medio de partículas tendería a ser frenado y alargar progresivamente su período de rotación. De esta forma el Sol giratorio, quizá con un período inicial de algunas horas, tendería a acelerar a los iones de hidrógeno de la nube de polvo en el cual estaba envuelto. Esta aceleración centrifugaría los iones gaseosos ligeros hacia el exterior, dejando en la proximidad del sol los planetas interiores formados por cuerpos sólidos masivos.

De esta forma esta teoría justifica la pérdida observada en el movimiento angular del sol y explica como la nube de polvo se segregaría en dos regiones. Una región interior libre de gas donde orbitarían los cuerpos sólidos de alta densidad y otra orbitando en el exterior del Sistema Solar formada por los grandes cuerpos de origen gaseoso.

La forma en que los planetas crecerían a partir de la nube inicial de gas y polvo es incierta. Estudios sobre la naturaleza química de los planetas muestran que los planetas interiores se formaron a partir de materiales sólidos a temperatura relativamente baja. Los océanos y la atmósfera serían efectos secundarios generados a partir de los minerales hidratados. La temperatura y presión en el momento de la formación planetaria, también sería incierta aunque extremadamente importante para conocer la evolución del planeta en sus etapas iniciales.

## **LA HISTORIA TÉRMICA DEL PLANETA**

Parece que los cuerpos de los que proceden los meteoritos se formaron sobre un margen de temperaturas en el entorno de los 300° Kelvin, temperatura a la que podría haberse formado la magnetita y los silicatos hidratados.

Para la Tierra la temperatura final de su acreción, fue probablemente más alta, aunque la retención del agua en los silicatos hidratados nos permita estimar que no debió haber sobrepasado temperaturas entre 400 a 500° Kelvin, margen importante para decidir el comportamiento químico del material de acreción en la Tierra primitiva.

Actualmente una aportación importante al estudio de la historia del pasado térmico del planeta se está efectuando con el registro e interpretación de las temperaturas actuales en el interior terrestre. Temperatura y conductividad pueden medirse en perforaciones profundas, en minas y a partir de los sedimentos del fondo oceánico, que proporciona valores satisfactorios para el incremento de la temperatura con la profundidad cerca de la superficie terrestre y para el flujo calorífico que escapa del interior de la superficie terrestre. Una estimación de la temperatura del interior de la Tierra puede obtenerse teniendo en cuenta que el material del manto inferior no está fundido y que la transición de sólido a líquido, que se produce a 5.150 km y una presión de 3 millones de atmósferas debe ser suficiente para fundir, en esas condiciones, al núcleo terrestre. A partir de experimentos en laboratorio sobre el efecto de la presión en el punto de fusión de materiales similares a los que componen el núcleo de la Tierra permite estimar que la temperatura en esa zona debe encontrarse en el orden de 4.000.

Desde el punto de vista de la geofísica actual es particularmente importante conocer si la tierra se formó a partir de un cuerpo frío que posteriormente se calentó o bien si fue inicialmente un cuerpo fundido que se fue enfriando dado que el movimiento de convección del manto, que causa la expansión del fondo oceánico y la deriva de los continentes, requiere calor para proporcionar energía, aumentando la actividad geodinámica si la temperatura aumenta y la viscosidad del interior de la tierra disminuye.

Si la Tierra se hubiera formado a partir de la acumulación de partículas sólidas a temperaturas en el orden de 500° Kelvin cabe preguntarse como se puede explicar la presencia de rocas ígneas en las primeras etapas de formación del planeta. Este problema fue una de las principales razones que indujeron a suponer en el pasado que los planetas derivaban del sol. El Sol posee una alta temperatura y puede fácilmente admitirse un modelo en que las temperaturas actuales sean el residuo subenfriado de material procedente de un sol primigenio.

Sin embargo hoy sabemos que la Tierra tiene sus propias fuentes de calor producido por la desintegración de elementos radioactivos como el uranio, el torio, el potasio, el rubidio y sus productos de desintegración, que originan una importante fuente de calor. Un kilo de uranio y sus pro-

ductos de desintegración producen en un año 3.000 julios de calor, otros elementos, tales como el potasio y el rubidio, que usualmente no se consideran radioactivos tienen una débil desintegración, debido a que contienen una baja concentración de los isótopos potasio 40 y el rubidio 87 lo que origina que un kg de potasio emita 0,1 julio por año. La abundancia de potasio en la tierra es tan grande que uranio y potasio son la fuente fundamental de energía de origen radiogénico, permitiendo suponer que estos elementos pueden proporcionar el calor necesario para justificar las temperaturas actuales del planeta desde un origen de acreción fría.

Otra fuente de calor puede deberse a la contracción gravitacional que puede estimarse podría haber producido para la tierra en su conjunto valores equivalentes a 38 millones de julios por kg, suficiente para aumentar la temperatura de la tierra en más de  $20.000^{\circ}$  C. Sin embargo y si la tierra se formó en una lenta concentración gravitatoria la energía podría haberse ido re-emitiendo a través de energía radiada.

Por otra parte si en una de sus fases la tierra era una mezcla homogénea de metales, silicatos, etc semifundidos los materiales más pesados se irían hundiendo hacia el centro para formar el núcleo, transformando energía potencial en calor suficiente para completar la fusión total del planeta.

Todo lo anterior conduce actualmente a admitir que la historia térmica del planeta, aunque se describa con una gran variedad de modelos, todos ellos suponen un comienzo frío, un largo período de calentamiento a las temperaturas actuales y un período subsecuente de relativa uniformidad de las temperaturas. Sin embargo, si se examina el material planetario disponible, a partir de los meteoritos, se llega a visualizar una imagen completamente diferente.

Si admitimos que los meteoritos se formaron por la ruptura de los asteroides parece deducirse del análisis de la cristalización de sus componentes que éstos se formaron con materiales de baja temperatura, que sufrieron un rápido calentamiento suficiente para su fusión local, y entonces gradualmente se fueron enfriando.

El mecanismo de calentamiento, probablemente, se debió a la presencia de materiales radioactivos de vida corta, en el orden de 1 a 10 millones de años, que se desintegrarían rápidamente a partir de unos elementos radioactivos ya desaparecidos pero que se pueden detectar a partir del aná-

lisis de sus productos de desintegración. La presencia de elementos radioactivos de vida corta en los asteroides requiere que sus átomos se formaran por síntesis nuclear en alguna explosión supernova, que debió ocurrir, como ya se ha indicado, entre 1 y 10 millones de años antes de la condensación de la nebulosa primigenia en el sol y su sistema planetario.

Bajo esta hipótesis la Tierra se habría calentado rápidamente debido a los isótopos de vida corta y tras su desintegración habría quedado en un estado estacionario en el que la generación del calor de la desintegración del uranio, del torio y del potasio, fue compensando las pérdidas de calor radiada desde su superficie.

## EL OCÉANO Y ATMÓSFERA PRIMITIVOS

Para conocer los aspectos de evolución biológica en el planeta resulta necesario conocer la naturaleza del océano y de la atmósfera, si la atmósfera contenía inicialmente oxígeno, permitiendo de esta forma el inicio de una vida biológica, o si el oxígeno es un resultado de esta actividad biológica.

Para explicar el origen del océano se plantean dos modelos extremos. Si la Tierra se formó a temperaturas altas, el agua formaría una envoltura gaseosa a su alrededor, formándose los océanos como última fase de su condensación, lo que conduciría, bajo esta hipótesis a admitir que en sus primeras etapas el planeta, tendría un océano de aproximadamente el mismo volumen que el actual. En el punto opuesto si la Tierra se formó a partir de un cuerpo frío el agua se encontraría retenida, en los minerales hidratados, emitiéndose hacia la superficie en los líquidos volcánicos y en las emisiones gaseosas. Bajo esta hipótesis los océanos habrían ido aumentando continuamente por acumulación de agua emitida desde el interior de la tierra. Los cationes, sodio, magnesio, calcio, etc, en el agua oceánica, derivarían de las rocas y de su emisión hacia la superficie del planeta. Los aniones de cloro, sin embargo, parece derivan de un origen similar al agua, habiéndose condensado inicialmente, o bien producido a partir de las actividades volcánicas. Se debe tener en cuenta, además, que el dióxido de carbono, contenido en el mar, debe contener todo el carbono

extraído de los mares y de la atmósfera por las plantas y los animales en el pasado, y encontrarse concentrado actualmente en gran parte de sus sedimentos.

En general debe considerarse que la mayor parte del material que compone el fondo de los océanos se encuentra reciclado en un proceso de expansión en el que se producen nuevos fondos hidratados que son a su vez consumidos e incorporados al manto superior en las zonas de subducción entregados a un nuevo ciclo de actividad volcánica. Algunos gases volcánicos contendrían, de esta manera, agua del mar reciclada y otros contendrían agua que está saliendo por primera vez de los materiales hidratados del interior terrestre.

La composición de la atmósfera primitiva es todavía más especulativa. Algunas consideraciones suponen una atmósfera primitiva reductora de hidrógeno, metano, amoníaco y gases similares, mientras otros sugieren que el anhídrido carbónico, el nitrógeno y el agua eran dominantes. Actualmente se conoce que el oxígeno contenido en la atmósfera se renueva por fotosíntesis a través de la actividad de las plantas. Sin embargo, la fotosíntesis podría haber empezado inicialmente en un ambiente desprovisto de oxígeno o en una atmósfera primitiva, donde existía una cantidad de oxígeno muy pequeña que se iría formando por fotodisociación del vapor de agua, bajo la interacción con la radiación ultravioleta del sol. La realidad permanece en el campo de las hipótesis.

## LA DINÁMICA TERRESTRE

La primera estimación de la edad de la Tierra se debe a Lord Kelvin quién en 1864, y a partir de admitir la hipótesis inicial de una Tierra en estado fundido, estimó que se necesitaba un tiempo de veinte a ochenta millones de años para llegar a la situación térmica actual. Este valor es claramente contradictorio con las estimaciones actuales de los períodos geológicos que coinciden en asignar al planeta una edad de 4.600 millones de años. Para deshacer esta aparente contradicción se recurrió a la determinación de la edad de los meteoritos, bajo la hipótesis de suponer contenían idéntica proporción de materiales radiactivos que los que debieron estar

presentes en el origen de la Tierra y que al ser sistemas aislados deberían haber conservado su proporción inalterada.

La evolución térmica que propuso Lord Kelvin, que desconocía la radioactividad no permitía, como hemos visto, estimar ni con mucho, una edad aproximada de la Tierra. El descubrimiento de la radiactividad ha permitido establecer una fuente calorífica en la Tierra, adecuada para explicar el flujo geotérmico observado en la superficie sin recurrir necesariamente a un modelo de Tierra en enfriamiento progresivo. La idea actual es que la Tierra se encuentra en estos momentos en un proceso de ligero enfriamiento como resultado de los procesos de convección en el manto considerándose que la mayor parte del calor que se emite en la superficie, proviene de la desintegración de radioisótopos de vida media elevada, en la corteza y manto superior, siendo sólo una parte muy pequeña de este calor la que procedente del enfriamiento del planeta.

De todo lo anterior se deduce que el modelo de evolución térmica de la Tierra puede establecerse en una serie de etapas, comenzando con un proceso inicial de calentamiento producido durante su formación, como consecuencia de la energía gravitacional liberada por las partículas preexistentes, juntamente con una fuerte compresión adiabática. En esta primera etapa también pudo funcionar, como fuente de calor, la desintegración de isótopos de muy corto período, en el orden del millón de años.

Se considera que al empezar la etapa de diferenciación del núcleo terrestre, se produjo una fuerte liberación de calor. Esta etapa, cuya duración se estima en unos mil millones de años, produjo una elevación acusada de la temperatura, llegándose a una extensa fusión parcial del manto superior. Posteriormente, durante un tiempo de varios cientos de millones de años, se debió establecer un equilibrio térmico entre el calor producido por los radioisótopos de gran período, el enfriamiento progresivo y el flujo geotérmico en la superficie terrestre. En el estado actual, del conocimiento científico la distribución de temperatura en el interior terrestre no puede estimarse sólo a partir de los datos de flujo geotérmico, sino que es necesario conocer la concentración de radioisótopos en la corteza y manto superior y el mecanismo de convección del manto, lo que conduce a que el perfil de temperaturas sea mucho más impreciso que el correspondiente a otros parámetros físicos.

En general la conclusión que puede obtenerse de la simple observación es que la Tierra, a diferencia de la Luna, es un planeta vivo, y que aquellas manifestaciones que observa el hombre, como son las de su medio fluido (mares, atmósfera) lo demuestran. Sin embargo, para las manifestaciones de la dinámica de su parte sólida, se necesitan, por lo general, mayores períodos de tiempo para observar su movimiento aunque a veces, como en el caso de grandes terremotos, se vea cambiar instantánea y profundamente la imagen estática de la tierra sólida.

Estos movimientos, ya fueron propuestos por A. Wegener en 1910, fueron definitivamente corroborados y explicados a partir de los años 60, por la acumulación de una serie de descubrimientos como la existencia en las cordilleras de fósiles marinos, del paleomagnetismo de las variaciones del flujo térmico terrestre de las zonas sísmicas activas y sus mecanismos de producción de terremotos, que, junto con otros datos geofísicos como la gravimetría y la geodesia, permitieron establecer las bases de la Tectónica de Placas, como hipótesis global de la dinámica terrestre y explicación unificada de todos los datos obtenidos en relación a la dinámica terrestre.

Hacia la década de los años 60, las investigaciones oceanográficas de Ewing y Hess permitieron descubrir los sistemas de cordilleras existentes en los océanos y que unidas forman una longitud superior a los 40.000 km. con altitudes superiores a los 3.000 m sobre los fondos, dividiendo a éstos de Norte a Sur en el océano Atlántico o de Este a Oeste en el Indico. Estas cordilleras señalan la presencia de fuerzas a gran escala en la corteza terrestre, algunas tienen un valle central y desde su descubrimiento se las ha asociado con zonas de grandes tensiones que señalan el lugar en que se genera la nueva corteza oceánica.

Esta apertura de los océanos se ve confirmada por los descubrimientos del magnetismo fósil de las rocas ya iniciados por Konisberger y Thellier en los años 40. Estos estudios dieron como resultado, al aplicarse a las rocas de diversos continentes por Runcorn e Irving, que los continentes no podrían haber tenido en el pasado la misma situación relativa que tienen en el presente. El estudio del paleomagnetismo se basa en la propiedad de las rocas, que contienen materiales ferromagnéticos, y que adquieren bajo ciertas condiciones, una imanación en la dirección del campo magnético en que se encontraban al enfriarse bajo el punto de Curie y que permanece

inalterable en el tiempo. De esta forma, ciertas lavas mantienen la imanación del campo magnético terrestre de la época en que se enfriaron. El estudio de la dirección de estas lavas-imanas respecto a las referencias actuales, indica si la posición de los polos magnéticos primitivos ha cambiado con respecto al norte geográfico, comportándose, de esta forma los fondos oceánicos como verdaderos registros magnéticos de la posición de los continentes en el pasado.

Del estudio paleomagnético de rocas en América, Europa y África del período jurásico, el paleomagnetismo indica que el Atlántico se ha ido abriendo desde esa fecha hasta nuestros días con una velocidad aproximada de 3 cm por año. El mismo estudio ha permitido establecer que todos los continentes estuvieron agregados en un solo bloque (Pangea) hace más de 200 millones de años, llegándose a la situación actual por fraccionamiento y deriva.

El paleomagnetismo no sólo ha permitido, de esta forma, seguir la trayectoria de la deriva de los continentes, sino que ha indicado el mecanismo por el que se ha llevado a cabo. Medidas magnéticas en las regiones oceánicas, cerca de las cordilleras, dieron como resultado la existencia de franjas de rocas, a ambas bandas con una imantación de sentido contrario al de los polos magnéticos actuales. Esto llevó al descubrimiento de que la polaridad magnética ha sufrido inversiones periódicas, aproximadamente cada millón de años, interpretándose que las franjas de rocas con polaridad magnética invertida y normal se han producido al extenderse la corteza oceánica a ambos lados de la fisura central, relacionado todo ello con la apertura del océano que ocasionó la separación de los continentes.

El desarrollo espectacular en las últimas décadas, tanto de la instrumentación como de la tecnología de observación desde satélites y cohetes, ha permitido una observación más profunda del entorno externo de la Tierra, así como la utilización de explosiones nucleares y técnicas de procesamiento de señales ha permitido un conocimiento más refinado de su interior. Algunas de las ciencias que abarca hoy la Geofísica tienen vida y desarrollo propios: Sismología, Geomagnetismo, Volcanología, Hidrología, Meteorología, Oceanografía. Otras en cambio, aún siendo partes de la Geofísica, sus límites y desarrollo están más en relación con otras ciencias, como son la Planetología, Estado Térmico de la Tierra, Aeronomía, etc. que desarro-

llan una Geofísica no sólo ligada a la Tierra sólida, sino también a sus capas líquida y gaseosa, y aún más modernamente, al estudio de otros medios de diferentes planetas del Sistema Solar.

## · LA ESTRUCTURA DEL PLANETA

Así como el desarrollo del conocimiento del espacio exterior ha sido y sigue siendo espectacular en los últimos años gracias a la información suministrada por los satélites artificiales y naves tripuladas, no lo es en igual medida el conocimiento del interior de la Tierra, que necesariamente ha de estudiarse indirectamente. En efecto, las perforaciones más profundas no llegan a sobrepasar los 8-10 km, lo que supone poco más del 0,1% del radio terrestre. Por esta razón la Geofísica recurre a métodos indirectos como la observación de la velocidad aparente de propagación de las ondas elásticas a través de la Tierra o de la modelización de una Tierra cuyo potencial gravitatorio coincida con el medido.

Como resultado de estos estudios hoy se conoce que la parte más exterior de la Tierra está constituida por una envoltura sólida de un espesor que varía entre una decena de kilómetros bajo los océanos a unos 30-40 km en los continentes. El límite que marca su borde inferior recibe el nombre de discontinuidad de Mohorovicic (o Moho) y viene definida por un contraste en la velocidad con que las ondas P, generadas por terremotos o explosiones, se propagan por la Tierra. Esta discontinuidad supone un cambio en la densidad del material que lo compone y se se interpreta como un cambio en su composición.

Por debajo de la corteza se encuentra el denominado Manto que a su vez se subdivide en Manto Superior, que se prolonga desde la discontinuidad de Moho hasta 700 km de profundidad, y el Manto Inferior, que alcanza al núcleo a los 2.900 km de profundidad. El manto se caracteriza por una gran homogeneidad en el material que la forma, fundamentalmente compuestos de silicio y magnesio, formando silicatos polimorfos y ácidos de una alta densidad. A unos 100 km de profundidad, en el comienzo del manto superior aparece una zona en la que el material se encuentra en fusión parcial, lo que se traduce en un aumento de la plasticidad del mate-

rial, en contraposición al resto del manto, en que tiene características sólidas. Esta capa, es de gran interés para explicar los procesos dinámicos que parecen ocurrir en la corteza.

A continuación del manto inferior existe otra zona bien diferenciada que recibe el nombre de Núcleo, con un radio aproximado de 3.478 km y cuya composición es de una aleación de hierro metálico y una pequeña proporción de otros materiales como níquel y silicio. La densidad es muy alta y oscila entre 10-14 g/cm<sup>3</sup> (más del doble de la densidad media de la Tierra). El Núcleo se divide en una parte interna de 1.200 km de radio, de carácter sólido, y una parte externa en la que el material tiene características de medio fluido, es decir, de no transmisión de las ondas cizalla. Esta diferenciación del núcleo permite la producción de corrientes convectivas del material que generan las corrientes eléctricas responsables del campo magnético principal observado en la Tierra.

Esta división de la Tierra ha sido posible gracias al conocimiento deducido propagación de ondas generadas por terremotos y su interpretación en términos de composición química por extrapolación de procesos realizados en el laboratorio.

## LA MODERNA ASTROMETRÍA

Por otra parte, la Tierra es nuestro habitat natural y desde ella debemos realizar la observación del Universo y desarrollar las hipótesis y teorías que supusieron el desarrollo de la Astrometría como una parte de la Astronomía Clásica, quizás básica, en que el Observatorio de la Armada viene trabajando desde hace 240 años y cuya implicación y futuro pienso resulta necesario esbozar en un curso para astrónomos normalmente más interesados en la Astrofísica.

Como es conocido en nuestro siglo los fundamentos de la Mecánica Celeste afianzaron las predicciones de la Moderna Astrometría, pudiendo preverse en posición, y posteriormente observar, nuevos planetas que completaron nuestro Sistema Solar.

Finalmente, la Física Atómica y Nuclear, siguiendo el desarrollo de la Astrofotografía y la Espectroscopia, posibilitó el nacimiento de una nueva

Ciencia, la Astrofísica, abriendo nuevas puertas a la comprensión del Universo con la posibilidad de estudiar, en la distancia, la composición química y el estado físico de los cuerpos celestes.

En estas últimas décadas el desarrollo de los telescopios y fotomultiplicadores permitió al hombre profundizar más allá de nuestra galaxia. A mediados de siglo surgió la Radioastronomía y la época espacial, que ha permitido el «aterizaje» en diversos planetas de nuestro Sistema Solar y el estudio de la práctica totalidad del espectro por sondas espaciales, desde el espacio exterior y sin interponerse la atmósfera.

El conocimiento actual del hombre le permite, de esta forma, conocer razonablemente los fenómenos que gobiernan la realidad física en un entorno casi ilimitado del espacio y del tiempo forzando, el progreso científico, a revisar las teorías físicas y actualizar los métodos matemáticos.

A la vista de todo lo anterior pienso que en unos momentos como los actuales de tan rápida evolución deberíamos, en primer lugar, preguntarnos cuál es interés de la Astronomía clásica desde Tierra y pienso podríamos acotarlo como la parte de la Moderna Astronomía que tiene por objetivo determinar las posiciones de los astros y, por extensión natural, su forma y dimensiones, considerando a estos parámetros, en general, variables con el tiempo.

Admitido lo anterior la Astronomía Clásica o Astrometría tendría como objetivo determinar la posición y el movimiento de los astros en función del tiempo sin olvidar, en todos los casos, que lo que caracteriza directamente a la Astrometría es, como en el pasado, su componente observacional. En un cierto sentido, la Astrometría sería el conjunto de las técnicas específicas para encontrar las propiedades geométricas, cinemáticas y dinámicas de los diversos astros, es decir, la Metrología del Universo.

Bajo este punto de vista, y de una forma un tanto general, todo objeto visible de nuestro universo continuaría siendo potencialmente un objetivo de la Astrometría; dado que todos tienen una forma o dimensión accesible a la medida y sus medidas tienen interés para su descripción.

Las anteriores misiones son inalterables y consubstanciales con la Astronomía clásica de todos los tiempos, pero no lo son los métodos a seguir para llevarlas a cabo. Estos evolucionan con las necesidades prácticas y con las incógnitas teóricas que se van sucediendo en la Astronomía como Ciencia, así como con las precisiones que cada época exige.

La astrofísica, aunque por sus procedimientos físicos pertenezca quizás a distinto tronco científico, mantiene con las técnicas astrométricas clásicas importantes intereses comunes. Estos intereses se encuentran, como veremos, en los campos de los movimientos propios, de la investigación galáctica y, muy recientemente, en el estudio de la hora y la determinación desde el planeta Tierra o desde su inmediato entorno por medio de satélites de un sistema de referencia «casi inercial».

La Astronomía de Posición tiene su extensión natural en el campo de las radiofuentes. Las técnicas posicionales de la Radioastronomía prometen ya superar en muchos aspectos a las de la astronomía óptica y ambas se complementan y contrastan en el caso de determinadas radioestrellas que son observables por ambos métodos.

La observación de objetos extragalácticos, con movimientos propios anuales de  $10^{-5}$  segundos de arco, imposibles de observar en el estado actual de la ciencia, permitirá disponer, en el futuro y en la medida en que se desarrollen nuevas técnicas o procedimientos, de un conjunto materializado de puntos permanentes sobre el cielo; próximo a la definición ideal de un sistema de coordenadas inercial, entendiéndose como tal aquellas ecuaciones de la dinámica que pueden escribirse sin tener en cuenta los términos de coriolis.

Parece, en estas condiciones, útil observar la posición de un cierto número de objetos bien escogidos que puedan servir de referencia fija y determinar ésta con la mayor precisión posible, con la finalidad de que todo error sobre el sistema de referencia, o sobre las referencias que la materialicen, no repercuta sobre las observaciones que se efectúen con respecto a este sistema casi inercial.

En el caso de las estrellas, la medida de la paralaje es probablemente la acción más importante que la Astrometría puede ofrecer al estudio del Universo. Las paralajes trigonométricas están en el origen de todos los otros métodos: siguiendo el sencillo principio de que si dos astros tienen las mismas características físicas, espectro y temperatura deben tener la misma luminosidad.

Notamos, además, que el conocimiento de la distancia es necesario para la transformación de los brillos aparentes en brillos absolutos y de los movimientos propios angulares en velocidades tangenciales expresados en Km/s.

Por otro lado, el navegante, el geodesta y el astrónomo, necesitan conocer la posición de su meridiano con relación a los astros, que son los puntos de referencia utilizables cuando se trata de hacer Astronomía Práctica. Es preciso, por tanto, estudiar la Rotación de la Tierra determinando, permanentemente, cuál es el Polo y cuál el valor angular de esta rotación con relación a una determinada referencia de tiempo. A este estudio, que se originó en los observatorios navales, se unen modernamente otros observatorios astronómicos y geodésicos.

La información sobre la Rotación de la Tierra, necesaria en la mayor parte de los problemas astronómicos, resulta tan interesante como las efemérides mismas, y los observatorios astrométricos se ven obligados a proporcionarla por medio de las señales horarias y los avisos, boletines y circulares que amplían y puntualizan el contenido de la información radiotelegráfica.

Por otro lado, esta moderna herramienta del astrónomo, que es su refinado equipo cronométrico puede, de hecho, prestar un señalado servicio a la Metrología, en cuanto a la determinación, mantenimiento y difusión de la escala y patrón de Tiempo y Frecuencia (T/F).

La tradición horaria y relojera de los observatorios navales que iniciara Huygens en el siglo XVII ha estado, desde entonces, intimamente ligada al problema de la determinación de las longitudes en el mar. Resuelto este problema con el cronómetro de Harrison, la cronometría habría de afectar continua y con mayores exigencias al navegante. Así vemos actualmente que los sistemas de navegación sistemas son básicamente dispositivos de sincronización y de manejo de frecuencias de precisión, conceptos éstos, en los que se resume la cronometría moderna.

Y siempre que se trata del problema de las longitudes hay que recordar que este tuvo su contrapartida en los cielos. El cronómetro necesita del sextante y del Almanaque o dicho en palabras del astrónomo, Guardatiempo, instrumento de observación y catálogos astrométricos, hacen posible, conjuntamente y no por separado, la obtención de la longitud... o la práctica de una navegación astronómica que, incluyendo a las técnicas geodésicas, se extiende hoy hacia las profundidades de nuestro Sistema Solar.

La Mecánica Celeste no es objetivo observacional para los Observatorios Astrométricos, pero es tema de su interés en cuanto permite el estu-

dio y predicción de las Efemérides, particularmente de los objetos que constituyen el Sistema Solar y determinan las órbitas de los satélites; y fundamenta y radica en ella gran parte del progreso científico de la Astronomía especializada que se ejerce en dichos observatorios.

En la práctica, las efemérides planetarias (JPL. DE-108) se basan en la observación del Sol, planetas y sondas espaciales y están calculadas por integración numérica de sus ecuaciones de movimiento. Su precisión depende del modelo, las constantes astronómicas, las posiciones iniciales y de la precisión y distribución de las observaciones estando correlacionadas, las referencias planetarias y estelar, determinando el ecuador y equinoccio por ambos procedimientos.

En el caso de la Luna, los planos de referencia son su órbita y el ecuador de la Tierra. En la práctica, la correlación entre las referencias Luna y CIS se define por efemérides lunares determinadas con alta precisión por medidas telemétricas láser desde observatorios terrestres a reflectores situados en la superficie lunar. Como las efemérides lunares se calculan por integración numérica, su precisión dependerá del modelo dinámico utilizado, correlacionando las referencias lunar y estelar mediante la observación de ocultaciones de estrellas por la Luna.

El Sistema Tierra-Luna, desde el punto de vista de la Astrometría, es un conjunto dinámico único, debido a las fuertes interacciones que existen y que ocasionan las mareas, las resonancias en la rotación por la revolución de la Luna, el frenado del movimiento orbital de la Luna, los intercambios cinéticos con la Tierra, etc. Las observaciones de posición de la Luna constituyen, por tanto, un elemento de importancia primordial y son el único método de acceder a este aspecto de la dinámica de los sistemas que hoy puede abordarse con precisión superior utilizando las posibilidades del Láser Luna, que ha dejado obsoletos los otros métodos de observación de nuestro satélite.

## **LA GEODESIA ESPACIAL**

Los satélites pueden, por otra parte, ser utilizados como blanco, para estudiar a través de la variación temporal de las coordenadas de las estaciones, la rotación de la Tierra y la Tectónica de Placas.

Además, una orbitografía precisa puede ser un elemento necesario para la explotación científica de satélites especializados en el estudio de las Ciencias de la Tierra, como es el caso particular de los satélites altimétricos y su aplicación a la medida del geoide o las variaciones del nivel de la mar como las experiencias (ERS-1, TOPEX-POSEIDON).

Los satélites artificiales ofrecen la posibilidad de su observación sistemática con cobertura global constituyendo su trayectoria una alta fuente de información del campo de la gravedad terrestre, y de todas las fuerzas que se encuentran presentes.

Por otra parte, cada satélite de los planetas presenta un problema peculiar de la mecánica celeste, por lo que su observación es generalmente útil desde un punto de vista teórico. La preparación de las misiones espaciales hacia los planetas exige, igualmente, incrementar la frecuencia y precisión de las observaciones.

Otro campo de actividad astrométrica dentro del Sistema Solar lo constituyen los asteroides y los cometas. Se trata, como es conocido, de un gran número de objetos que pueden ser observados con una precisión superior dado su pequeño tamaño.

Existe un cierto número de asteroides, sistemáticamente estudiados, a partir de los cuales se pueden obtener las medidas necesarias para el estudio de otros asteroides perturbadores.

Por otra parte, el conocimiento de los movimientos propios es necesario para el estudio de la estructura, de la cinemática y la dinámica de los grupos de estrellas, permitiendo estudiar el movimiento de los sistemas, detectar la asociación de las estrellas, analizar los movimientos en el interior de la galaxia y encontrar las relaciones que pueden existir entre las propiedades cinemáticas y las propiedades astrofísicas de las estrellas (edad, composición física, composición química, espectro, etc.).

La cinemática estelar conduce a la dinámica de las referencias y de la galaxia, las investigaciones en el campo de las fuerzas, que producen estos movimientos, y el estudio de la evolución de todas estas agrupaciones con el tiempo, la evolución de los campos de fuerza galácticos, la formación y estabilidad de los brazos espirales de la galaxia, etc. Si además de los movimientos propios se conocieran las paralajes y la velocidad radial se obtendría la velocidad en el espacio, información que permitiría

progresar con una mayor precisión en el análisis de las propiedades cinemáticas de las estrellas.

El Sol, aunque por sus características de tamaño y luminosidad es el astro más difícil de observar desde el punto de vista de su posición, tiene el interés especial de definir directamente el equinoccio, siendo necesario esforzarse en su observación directa utilizando instrumentos específicos. Notaremos, por tanto, que estas observaciones permiten obtener el diámetro del Sol y sus variaciones con el tiempo; cantidad astrométrica importante para el estudio de la física de este astro.

Los productos de la Astronomía de Posición son utilizables por la Geodesia Astronómica hacia la que los astrónomos de posición se sienten natural y tradicionalmente inclinados, al igual que hacía la Astronomía Náutica que el marino utiliza para situar su buque, con el complemento en un pasado, no muy lejano, de situar las tierras que iba descubriendo.

El geodesta se halla a medio camino entre el astrónomo (fijo) y el navegante (móvil). Muchos de los métodos astronómicos usados tienen su equivalencia en los otros. También sus instrumentos se corresponden entre sí: así los espejos móviles de Newton y Halley evolucionaron hacia el sextante del navegante, y éste evolucionó hacia el astrolabio Claude Driencourt del geodesta, del que nació el actual astrolabio Danjon del astrónomo. Y al revés, un instrumento astronómico, la cámara cenital fotográfica (PZT) acaba recientemente de convertirse en un instrumento portátil gracias al ingenio de los geodestas y se estudian ya sus posibilidades como instrumento de a bordo.

En este sentido la observación de los satélites artificiales puede hoy considerarse por misión y procedimientos, como parte de la Astrometría al considerarse como materia de la actividad científica de la Geodesia Espacial:

— La determinación de puntos en la superficie terrestre y el registro de sus variaciones temporales, tradicionalmente identificados con la determinación de la forma de la Tierra, el establecimiento del Sistema de Referencia Terrestre, la cinemática de las cortezas terrestres u oceánicas y su aplicación directa a la comprobación experimental de la Tectónica de Placas.

El satélite desempeña, en estos casos, el papel de una marca espacial, situada en la geometría adecuada respecto a los puntos de observación, y cuya posición orbital hay que conocer con la más alta precisión. Para hacer esto posible disminuyendo las perturbaciones, mal conocidas, de los armónicos del campo gravimétrico terrestre, hay que situar al satélite en alturas elevadas:

— Estudiar la orientación del planeta Tierra respecto al sistema inercial espacial, determinando los términos fundamentales de sus parámetros de orientación, mejorando los modelos de Precesión, Nutación, Movimiento del Polo, Rotación de la Tierra y sus causas (respuesta de una Tierra no rígida, incluyendo hidrosfera, atmósfera y la atracción del Sol, Luna y planetas). Estos estudios, al igual que para posicionamiento, exigen que el satélite esté en órbita alta, poco perturbada por las anomalías gravitatorias, por lo que suelen cubrirse en programas comunes con los de determinaciones geodésicas de precisión.

— Determinar la estructura del campo de la gravedad terrestre. Esta misión exige que el satélite esté en órbita baja, fuertemente influida por los efectos de los armónicos de orden elevado del campo. Los requerimientos científicos actuales exigen determinar modelos del campo con armónicos de orden superior a 200, resolución de un grado, precisión mejor que 5 mgal en las anomalías gravitatorias y que 10 centímetros en las ondulaciones de geoide.

Los límites de precisión en el progreso de todas estas misiones están apoyados y se encuentran limitados por las posibilidades que actualmente ofrecen las diferentes tecnologías: La Interferometría de Gran Base (VLBI), aunque no directamente relacionada con las técnicas de satélites, ofrece la posibilidad fundamental de conectar los marcos de Referencia Celeste con el Sistema Terrestre a través de la determinación con alta precisión, de la Precesión, Nutación, Movimiento del Polo y Rotación de la Tierra; con el inconveniente fundamental de que su costo operacional limita las posibilidades de disponer de una red suficientemente densa.

Las técnicas Láser sobre Satélites (SLR), al medir las distancias a satélites esféricos, de alta densidad y diseño espacial (LAGEOS, STARLETTE y, un segundo LAGEOS), proporcionan información comparable al VLBI en la determinación de líneas base y Movimiento del Polo.

Su inconveniente fundamental, además de su compleja tecnología y costo, radica en su dependencia meteorológica, que dificulta el mantenimiento de una red terrestre de observación continua. Sin embargo, las veinte estaciones existentes proporcionan, a nivel mundial, datos de alta calidad con el inconveniente adicional de la dificultad y costo necesario para densificar esta red, estableciendo estaciones móviles cuya considerable complejidad tecnológica las hace, normalmente, difíciles de asentar y financiar.

Las técnicas de Láser Luna (LLR), que alcanzan los reflectores láser que se situaron sobre nuestro satélite en los vuelos «Apolo», exigen estaciones de costo y complejidad tecnológica superior. Su ventaja radica en que sus medidas, al efectuarse directamente sobre un cuerpo celeste, permiten mejorar la teoría de la Luna y referir, con sus medidas, la referencia terrestre a la espacial.

El conjunto de satélites TRANSIT, planificados en la década de los 60, proporcionó, mediante técnicas doppler, durante los años 70 y 80 un orden de magnitud superior a los obtenidos por la Astronomía clásica, y su uso permitió profundizar en nuestro conocimiento de los términos de corto período del Movimiento del Polo, a la vez que apoya el establecimiento de un sistema geodésico de carácter global.

La constelación de satélites que componen el Global Positioning System (GPS) ha iniciado ya su período operativo existiendo una amplia experiencia en los resultados con técnicas de medidas diferenciales sobre cortas y medias distancias que han permitido confirmar sus posibilidades para determinar, por medidas relativas, los movimientos corticales locales o regionales, compatibles con las actuales exigencias de precisión y superiores, por razones de sencillez, a los equipos móviles de SLR o de VLBI.

Las técnicas de Altimetría Radar sobre satélites (SAR), permiten topografiar el nivel medio del mar por geometría directa con precisión de 10 cm. Esta superficie, separada del geoide por la topografía semidinámica de la superficie oceánica, de gran longitud de onda y amplitud menor a 3 m., muestra la forma de las corrientes marinas representando, a escala menor local o regional, al geoide, y reflejando, con considerable fiabilidad, la topografía del fondo.

Los cambios reales medidos con altimetría cubren todo el espectro temporal de las variaciones del nivel del mar, desde sus variaciones secula-

res a los términos de corto período introducidos por el viento, y donde sólo son filtrados los fenómenos de alta frecuencia, debido a la velocidad y superficie de la muestra.

## LOS SISTEMAS DE REFERENCIA DEL UNIVERSO

En esta situación de progreso científico consideremos ahora las implicaciones astrométricas básicas en la definición de los sistemas de referencia.

Un sistema de referencia es un conjunto de ejes coordenados contruidos de tal forma, que puede permitir describir cuantitativamente la posición y el movimiento de los puntos relacionados con un mismo conjunto físico.

Desde un punto de vista científico nos encontramos actualmente interesados en dos tipos de sistemas de referencia. Un sistema celeste para las posiciones, los movimientos y la dinámica de los cuerpos celestes y un sistema terrestre para todo lo que concierne a la Tierra y a su entorno.

Dado que en el cielo no existen líneas materiales que correspondan a ningún tipo de ejes, o a grandes círculos de coordenadas. Esta es la razón por la que se establecen sistemas que pueden ser utilizados para permitir determinar la posición de un punto en unas coordenadas, llamándose Sistema Materializado al conjunto de los puntos empleados para asignar coordenadas dentro del sistema de referencias.

Como concepto origen de la construcción de un sistema figura la definición teórica de sistema de referencia ideal. Así, la idea intuitiva de que un sistema no debe poseer ninguna rotación, puede expresarse de dos formas diferentes: una de ellas es una definición dinámica. Toda relación a un sistema de referencia dinámico ideal pasa por que los astros se muevan, de tal forma, que las ecuaciones que describen su movimiento no tengan ningún término de aceleración de arrastre, rotación o traslación no uniforme. Esto es una definición Newtoniana que no puede aplicarse más que a un Universo donde la relatividad general esté vigente.

Otra forma de definir el sistema tendría una base cinemática y se referiría a un sistema ideal o geométrico que supondría la existencia de

objetos celestes sin movimiento, lo que conduce a una realidad física absolutamente dudosa.

Por otra parte, y una vez definido el concepto, es necesario escoger la estructura física donde se materialice, identificando el conjunto físico sobre el cual se va a aplicar la definición ideal.

En estas condiciones, y para cada una de las definiciones, tendríamos:

\* Una definición dinámica, referida por ejemplo al Sistema Solar con sus planetas o al Sistema Tierra-Luna o a cualquier otro sistema dinámico, como la galaxia.

\* En segundo lugar tendríamos una definición cinemática, que se materializaría en galaxias lejanas y cuasares tan alejados, que prácticamente, no puede observarse su movimiento con la tecnología actual.

Se necesita ahora asociar al sistema y definir un conjunto de parámetros que permitan efectuar el modelo matemático de la estructura del sistema. Estos parámetros son perfectamente conocidos y en parte arbitrarios, por lo que constituyen sólo una cierta aproximación al Sistema de Referencia Convencional y serían los siguientes:

**Definición dinámica:** El Sistema Convencional escogido estaría determinado por un cierto número de valores de parámetros fundamentales tales como las masas de los planetas y las condiciones iniciales de sus movimientos.

**Definición cinemática:** No se consideraría el modelo sino el origen y las direcciones de los ejes de coordenadas escogidos. Se debe por tanto escoger los astros que sean definidos con un menor movimiento propio. Se piensa en este caso en cuasares considerados inmóviles en el sentido de no existir posibilidad instrumental para la determinación directa de sus movimientos propios.

Para la definición dinámica de la referencia se establece, a partir del modelo convencional, una teoría numérica de movimiento de los planetas, determinando la posición de las estrellas de referencia con relación a las posiciones observadas de los planetas, y obteniendo, de esta forma, un catálogo fundamental de estrellas.

En la definición cinemática se observa la posición relativa de un cierto número de cuasares que constituyen los puntos del sistema de referencia.

La situación ideal descrita hasta aquí está muy lejos de poder ser realizada. La referencia dinámica es un catálogo de un poco más de 1.500 estrellas, llamada FK5, que tiene una precisión en el orden de 5 centésimas de segundo de arco para las posiciones y donde los movimientos propios anuales están determinados en el orden de una milésima de segundo de arco ajustando, además, un conjunto de aproximadamente 3.000 estrellas con precisión de 8 centésimas de segundo de arco y movimientos con 2 milésimas. Se trata, por tanto, de aproximadamente unas 4.500 estrellas que proporciona una cobertura de una estrella por grado cuadrado, es decir, un campo mayor que el de un astrógrafo, que se materializa sobre la placa fotográfica con menos de una sola estrella de referencia, cantidad obviamente insuficiente.

Hay, por tanto, que hacer extensiones, es decir catálogos secundarios con un mayor número de estrellas donde las coordenadas habrán sido determinadas en el sistema de referencia. Tales catálogos existen, pero la situación no es satisfactoria.

El IRS tiene una estrella por grado cuadrado, es decir, aproximadamente 40.000 estrellas y su precisión está en el orden de 2 décimas de segundo, con movimientos propios en el orden de 5 milésimas de segundo de arco, que conduce al rápido deterioro, con el tiempo, de la calidad del catálogo.

Para obtener una cobertura más densa en estrellas hay que recurrir al catálogo SAO que tiene 260.000 estrellas. Se trata, sin embargo, de un catálogo muy heterogéneo con errores de posición que pueden alcanzar hasta dos segundos, en parte porque el catálogo se calculó hacia 1960 y los movimientos propios eran mal conocidos, con el inconveniente adicional de que las posiciones no se refieren al FK5 sino al FK4.

Otro catálogo es la «Carta del Cielo», con un número entre 12 y 15 millones de estrellas que da las posiciones para principios de siglo, con posiciones más recientes para algunas zonas. Su inconveniente principal reside en que sus posiciones, además de no estar referidas a un catálogo fundamental, carecen de movimientos propios; por lo que no pueden considerarse como sistema de referencia representativo al alcanzar errores en el orden de 10 segundos y deteriorarse rápidamente con el paso del tiempo.

Para apoyo al Telescopio Espacial el Instituto Espacial de Baltimore calculó un gran catálogo, de aproximadamente 25 millones de estrellas, con precisión de 1,5 a 2 segundos, y sin movimientos propios. La escasa precisión del catálogo proviene de la imprecisión con que se han medido las posiciones de las estrellas de referencia en las placas fotográficas.

La época de las observaciones está comprendida entre 1975 y 1983, y aunque las posiciones están, por tanto, poco degradadas, los errores crecerán con el tiempo al no disponerse de información sobre los movimientos propios.

Cabe esperar que esta situación sea profundamente modificada con el apoyo de programas de observación con Círculo Meridiano Automático y con las aportaciones que ya ha realizado el satélite astrométrico Hipparcos y que ha permitido después más de 100.000 posiciones de estrellas con una precisión de dos milésimas de segundo de arco y movimientos propios en el orden de dos milésimas de segundo al año. Además, la experiencia asociada al programa secundario TICO ha dado la posición de aproximadamente 400.000 estrellas con una precisión en la centésima de segundo de arco.

En cuanto a la definición de la referencia extragaláctica, su construcción no ha sido todavía finalizada, si bien los catálogos de posiciones publicados contienen un conjunto de coordenadas extraídas de varios catálogos particulares.

Ante esta situación surgen algunas preguntas sobre el futuro de la Astrometría y su aportación al estudio de detalle de la geometría del Universo:

¿Cómo se pueden extender estos catálogos para comprender un mayor número de radiofuentes?

¿Cómo se puede efectuar esta extensión sin perder precisión? Es decir, en el orden de la milésima a tres milésimas de segundos.

¿Cómo transferir estas posiciones a la observación de estrellas en el espectro óptico? Es decir, a todas las estrellas, a fin de que los instrumentos en el espectro visible puedan utilizar este sistema de referencia cinematográfica.

En conclusión, los sistemas de referencia están actualmente materializados de forma insuficiente, no pudiendo ser utilizados por la mayor

parte de los instrumentos, sin error importante. Esta situación negativa es la que avala el interés observacional para la construcción y mejora de nuevos catálogos observando tanto su realización como su extensión, en lo que constituirá probablemente el problema más importante de la astrometría para los próximos 20 años.

Actualmente, y dado que las observaciones se realizan desde la Tierra, no basta con definir una referencia espacial sino que requiere constar con una Referencia Convencional Terrestre (CTS), móvil, giratoria con la Tierra y ligada a algunos observatorios que, con una instrumentación específica, están operativos en la superficie terrestre.

Como hemos visto, en la práctica, el CIS, se puede materializar en las posiciones de determinadas radiofuentes, normalmente objetos cuasistelares (Quasares) o núcleos galácticos observando con radiotelescopios. La observación proporciona, además, las variaciones del vector rotación terrestre respecto a una situación inicial y ciertas correcciones instrumentales del reloj. La precisión de los catálogos limita la definición de la referencia casi inercial, por radiofuentes, por lo que, en el futuro, se debería mejorar en precisión y número las observaciones, utilizando satélites astrométricos.

Cuando la materialización del CIS se efectúa mediante posiciones estelares, las ascensiones rectas y declinaciones adoptadas definen el equinoccio y ecuador del catálogo. Aunque en la práctica el ecuador se determina por observación de las distancias cenitales de las estrellas, la definición de equinoccio exige, además, la observación del Sol y planetas.

Un problema adicional reside en que, aún cuando la referencia así definida se considera casi inercial, la observación de movimientos propios permite detectar pequeñas rotaciones que obligan a modificar las posiciones del ecuador, equinoccio, constantes de precisión y movimientos propios al cambiar de catálogo.

## CONCLUSIONES Y FIN

Con estos planteamientos resulta hoy evidente que la Astronomía clásica no se basa en un observar por observar, en un dar datos al mundo,

sino que sus misiones se encuadran en programas que justifican sus razones dentro de un marco científico general, cual es el estudio de las propiedades físicas y dinámicas del universo, la definición de los sistemas de referencia en toda su amplitud y consideraciones dentro de campos más próximos, la dinámica y la cinemática de la Tierra, el Sistema Tierra-Luna, la forma de la Tierra y de su campo gravitatorio incluyendo no sólo la geodesia sino, como extensión natural, sus métodos y prestaciones, la geodinámica y la orbitografía en todos sus conceptos.

Todo lo anterior impulsa a que los programas deban hoy adoptarse por decisiones de reflexión científica de toda la comunidad, ya que un sólo observatorio no puede asegurar un programa de observación suficiente, lo que transforma, por definición, a la Astrometría actual en un campo natural de la cooperación internacional.

Bajo este prisma es muy importante que todo programa astrométrico efectúe una selección de instrumentos conforme a sus prestaciones, no dudando en abandonar técnicas obsoletas que no justifiquen, en sus resultados, el esfuerzo instrumental o humano. La Astrometría moderna ha renovado prácticamente la totalidad de los instrumentos con los que se contaba quedando de todo el conjunto de técnicas instrumentales y medios que existían hace 25 años sólo tres en el espectro visible desde Tierra, que pueden ser considerados capaces de justificar su potenciación (la Astrometría meridiana, el astrolabio solar y los interferómetros ópticos).

Dentro de estas técnicas las precisiones crecientes actuales hacen que los instrumentos sean más sofisticados y que los medios de reducción de las observaciones se hayan complicado. Se investiga actualmente en el nivel de la milésima de segundo de grado en dirección y en el centímetro en la distancia, midiéndose con errores en órdenes relativos de  $10^{-8}$  a  $10^{-10}$ .

Con estas precisiones los métodos de reducción de datos deben tener en cuenta todas las estructuras de información óptica o de rayo conocida superando, no sólo las aproximaciones de la óptica geométrica y su efecto en la precisión de la medida, sino el tratamiento de los modelos matemáticos aplicados a las muchas veces insuficientemente conocida estructura del medio en que el rayo se propaga.

A lo largo de esta ya larga conferencia hemos tratado de recorrer el largo camino que se inició hace unos 4600 millones de años, cuando una

nebulosa formada en una ignorada explosión de supernova, empezó a condensarse en uno de los brazos extremos de la «Vía Láctea» y formar lo que con el tiempo sería nuestro habitat terrestre.

Desde aquí en contrapartida la única especie inteligente de la que tenemos conocimiento orienta hoy el objetivo de sus telescopios tratando de determinar cada vez con mayor precisión los puntos y líneas que permitan definir un Sistema de referencia aplicable a un universo extendido más allá de la galaxia y descubrir el misterio de su evolución en la deformación de su geometría.