

Sistemas de referencia en Astronomía

Carlos Amengual

Barcelona, 2007

Revisado febrero 2010

Este documento se encuentra en la dirección
<http://astronomia.org/doc/sisref.pdf>

© 2007-2010 Carlos Amengual

Se prohíbe la reproducción, total o parcial, de este documento (salvo la impresión para uso personal) sin el consentimiento expreso del autor.

Índice

Introducción.....	1
Relatividad y sistemas de referencia.....	2
Precesión y nutación.....	4
Posiciones intermedias.....	4
El movimiento diurno.....	6
Escalas de tiempo.....	8
Fechas y épocas.....	9
Sistemas de referencia.....	10
El ICRS.....	10
Sistema de referencia celeste intermedio.....	11
El ITRS.....	12
Relacionando el sistema celeste y el terrestre.....	12
Posición observada.....	14
El futuro de los sistemas de referencia.....	14
Bibliografía.....	15

En los últimos años se han producido cambios muy importantes en los sistemas de referencia astronómicos, transformando prácticas y conceptos que habían sido característicos de la Astronomía durante los últimos siglos. Presentaremos estos nuevos paradigmas, comparándolos con los procedimientos clásicos.

Introducción

Un **sistema de referencia** es un conjunto de especificaciones que definen un sistema de coordenadas, así como todo lo necesario para establecer la posición y el movimiento de objetos en el espacio y el tiempo. Los sistemas de referencia astronómicos, que se basan en especificaciones aprobadas por la Unión Astronómica Internacional (UAI), nos permiten establecer las posiciones y velocidades de los astros. Las técnicas de observación usadas para determinar esas posiciones y velocidades han mejorado sustancialmente desde que la UAI estableció, en 1976, las bases para el sistema que estuvo vigente durante la última parte del siglo XX, y cuya esencia no difería de los sistemas de referencia anteriores.

La madurez de técnicas como la interferometría de muy larga base (VLBI) ha permitido establecer nuevos fundamentos sobre los que construir sistemas de coordenadas mucho más precisos, y modelar con más detalle la influencia del Sol, la Luna y los planetas sobre la rotación terrestre. La exactitud de las observaciones celestes se vincula estrechamente con la de los sistemas de localización terrestres, que igualmente han avanzado hasta unos niveles de precisión muy altos gracias a la VLBI y otras técnicas, como la red de seguimiento de satélites DORIS. Además, los datos obtenidos por el satélite Hipparcos han hecho posible la creación de catálogos estelares de una exactitud muy superior a la de sus predecesores.

La precisión de las actuales técnicas de observación ha permitido cambiar las realizaciones prácticas de los sistemas de referencia, y ha exigido la clarificación de conceptos cuya definición precisa no era importante en otros tiempos, así como la introducción de conceptos nuevos. A finales del siglo pasado, la UAI aprobó unas resoluciones con las que se actualizaban los sistemas de referencia: en 1997 se aprobó un nuevo sistema de referencia fundamental, sobre un planteamiento totalmente distinto a los anteriores, y en 2000 éste fue complementado con nuevas definiciones, quedando establecido un nuevo marco en la Astronomía de posición.

Las nuevas especificaciones suponen una ruptura con respecto a prácticas que habían sido habituales durante los últimos cien años (y en algunos aspectos, bastante más) en la Astronomía. La relatividad general es, ahora, el marco básico de los sistemas de referencia, que cuentan con nuevas orientaciones de los ejes de coordenadas y un nuevo origen para la ascensión recta, el *origen celeste intermedio* (CIO), en sustitución del equinoccio o punto Aries. Se trata de cambios que no afectan únicamente a los especialistas, sino a cualquier usuario de catálogos y efemérides astronómicas.

El objeto de este documento es presentar al lector no especialista los conceptos y términos que intervienen en los actuales sistemas de referencia, así como su uso en catálogos y efemérides. En primer lugar, se introducen las consecuencias que tienen, para las posiciones de los astros, la precesión y los efectos relativistas, para después explicar su lugar dentro de los conceptos establecidos por la UAI. Se tratan también la rotación de la Tierra, las principales escalas de tiempo, y la relación entre los sistemas de referencia celeste y terrestre.

Relatividad y sistemas de referencia

La relatividad general es el contexto en que se construyen los sistemas de referencia astronómicos. Las modernas efemérides del Sol, la Luna y los planetas se elaboran en el marco de la relatividad general, y las teorías de precesión y nutación, que trataremos en la próxima sección, incluyen el efecto relativista de la **precesión geodésica**, que se manifiesta en la rotación de los ejes de coordenadas centrados en la Tierra con respecto a un observador lejano.

Además, las posiciones que observamos dependen de las circunstancias del observador. Las posiciones de los catálogos astronómicos, así como los modelos dinámicos del Sistema Solar, toman como origen de referencia el baricentro (centro de masas) del Sistema Solar. Pero el observador percibe la luz procedente de los astros en un marco de referencia **propio** (que es el nombre que recibe, en relatividad, el marco de referencia ligado al observador), por lo que al expresar las posiciones de los objetos celestes tal como los ve el observador hemos de hacerlo en dicho marco. Eso implica tener en cuenta una serie de efectos relativos a la trayectoria de la luz desde el astro hasta el observador.

En primer lugar, la velocidad de la luz es finita, por lo que la posición observada de un astro no es la posición geométrica en ese instante, sino que varía en función de los movimientos del objeto y del observador. Este efecto, llamado **aberración de la luz**, se manifiesta en un desplazamiento angular de la posición aparente del objeto sobre la esfera celeste. Otros efectos relativistas, pero asociados a la relatividad general, son consecuencia del paso de la luz por los campos gravitatorios del Sol y los planetas, y son de una magnitud muy inferior.

La **aberración estelar** se debe al movimiento del observador, y se puede dividir en tres componentes: en primer lugar la **aberración anua**, que se debe a que la Tierra recibe la luz del astro con una determinada velocidad con respecto al baricentro del Sistema Solar. La **aberración diurna** es experimentada por un observador situado en la superficie de la Tierra, debido al movimiento de rotación, y obviamente no interviene en el caso geocéntrico. Por último, al observar objetos situados fuera del Sistema Solar tenemos la **aberración secular**, que es causada por el movimiento del Sistema Solar en el espacio, pero que por su lenta variación es ignorada.

El **efecto de luz-tiempo** se debe a que la luz que sale de un astro (en terminología relativista, la *señal*) tarda un tiempo, el **tiempo de luz**, en llegar desde el astro hasta el observador. Por ello, la posición que vemos no es la que tiene el astro en el instante de la observación, sino la que tenía cuando la señal salió de él. Este efecto se tiene en cuenta para los cuerpos del Sistema Solar, pero no para estrellas u otros objetos lejanos; para ellos, este efecto ya está incorporado en sus posiciones de catálogo. Cuando combinamos el efecto de luz-tiempo con la aberración estelar, obtenemos la **aberración planetaria**.

En aplicaciones de gran precisión al tiempo de luz hay que incorporarle un efecto mucho menor, llamado **retraso de la señal**, que se debe al retraso producido por el campo gravitatorio del Sol y los planetas, que curvan el espacio-tiempo por el que pasa la luz. Una señal electromagnética sufre también retrasos no relativistas, debidos a las características de los medios por los que transita, pero el retraso relativista es el único relevante desde el punto de vista del sistema de referencia.

La curvatura del espacio-tiempo es también la causa de la **deflexión relativista** de la luz. Se percibe al pasar la luz por las cercanías de un objeto masivo. En nuestro

Sistema Solar, el cuerpo que produce desviaciones más apreciables es, naturalmente, el Sol. Este efecto es muy pequeño, sobre todo en comparación con la aberración, pero aumenta a medida que la trayectoria de la luz pasa más cerca del Sol, siendo de 1,75" para los objetos observados en el limbo solar. En cambio, la deflexión de la luz causada por la Tierra, para un observador situado en la superficie, no supera las centésimas de segundo de arco.

En función de dónde y cómo se hayan tenido en cuenta estos efectos, podemos encontrar distintos tipos de posiciones:

Una posición geocéntrica corregida por aberración, retraso de la señal -si procede- y deflexión de la luz (y en el caso estelar, también por paralaje anua) se llama **posición propia**. Nótese que el sistema de referencia propio resultante *no* está corregido por precesión geodésica.

Una **posición astrométrica** es una posición geocéntrica corregida únicamente por tiempo de luz; las posiciones astrométricas *no* se corrigen por deflexión relativista de la luz, y si ese efecto es incluido se debe indicar, especificando qué cuerpos deflectores se han tenido en cuenta. Una posición astrométrica es directamente comparable con las posiciones obtenidas de catálogos estelares.

La posición que tiene su origen de coordenadas en un lugar de la superficie de la Tierra se llama **posición topocéntrica**. Al observar el Sol y los planetas este efecto de paralaje es pequeño, de unos segundos de arco, pero para la Luna, debido a su cercanía, puede suponer una diferencia de un grado entre la posición geocéntrica y la topocéntrica. Si, al obtener una posición topocéntrica, tenemos en cuenta únicamente el tiempo de luz, el resultado es una posición *astrométrica topocéntrica*. Para obtener una posición topocéntrica, es necesario relacionar los sistemas de referencia terrestres y celestes, lo que será tratado más adelante.

Precesión y nutación

El eje de rotación terrestre no conserva su orientación en el espacio, debido tanto a la acción de fuerzas gravitatorias externas como a variaciones en la distribución de masas de la Tierra. Los efectos más importantes son debidos a las fuerzas gravitatorias del Sol, la Luna y los planetas, que provocan el movimiento del eje de giro terrestre. Este movimiento se puede descomponer en una parte de corto periodo, llamada **nutación**, y otra *secular* (de largo periodo) llamada **precesión**. Si medimos la posición, en la esfera celeste, de una estrella en dos ocasiones separadas por un cierto intervalo de tiempo, esta habrá variado no sólo debido a su movimiento propio, sino también -y sobre todo- a la precesión y la nutación.

La precesión se puede ilustrar con el característico movimiento del eje de giro de una peonza. En el caso de la Tierra, el polo describe un círculo menor con un periodo de unos 26.000 años. Durante ese periodo, los polos celestes van pasando por distintas zonas del cielo, y pueden pasar cerca de alguna estrella brillante, que será entonces la *estrella polar*. Como se sabe, actualmente la estrella polar es *alfa Ursae Minoris*. Dentro de 12.000 años será *alfa Lyrae* (Vega), y hace 6.000 fue *gamma Draconis*.

Debido a la nutación, el polo celeste oscila alrededor del eje medio dado por la precesión, con movimientos de un periodo superior -por definición- a los dos días. Los movimientos del polo con periodo inferior a dos días se llaman **movimiento polar**.

La precesión y la nutación incluyen, como se ha mencionado, un efecto relativista llamado *precesión geodésica*, que es una rotación del marco de referencia propio de un objeto en caída libre (en este caso, la Tierra) con respecto a un observador lejano. La precesión geodésica también se puede descomponer en una parte secular y otra de corto periodo: la precesión geodésica (secular) supone una contribución de 1,9" por siglo, mientras que el principal componente de la nutación geodésica tiene un periodo anual y una amplitud de 0,00015".

Al variar el polo celeste, varía el ecuador y con él, el equinoccio. Por ello, cuando se especifica de forma concreta el ecuador o el equinoccio se indica, en primer lugar, si se incluye la nutación, y en segundo lugar la fecha o época. Cuando la nutación no se considera, se usa la palabra "medio", dado que la nutación supone una variación periódica relativamente pequeña con respecto a la precesión. Así, tenemos el **ecuador medio** sin la nutación, y el **instantáneo** o **verdadero** con ella. Para el equinoccio o punto Aries tenemos el **Aries medio** si se tiene en cuenta sólo la precesión, y el **Aries verdadero** con la nutación. Cuando se habla de 'ecuador' o 'equinoccio', sin más, se supone que se trata de los instantáneos.

Posiciones intermedias

Si tomamos una posición propia y la corregimos por precesión y nutación (incluyendo la precesión geodésica), obtenemos una **posición intermedia**, y el sistema de referencia resultante es el **Sistema de referencia celeste intermedio**. Se llama intermedio porque es un sistema intermedio entre los sistemas celestes y terrestres. En este sistema, el origen de las ascensiones rectas es el **origen celeste intermedio** (CIO, por sus siglas en Inglés, y representado por la letra griega σ); una ascensión recta basada en el CIO recibe el nombre de **ascensión recta intermedia**.

En la definición clásica de coordenadas ecuatoriales, la ascensión recta tiene su origen en el punto Aries. El equivalente clásico de la posición intermedia es la **posición aparente**, que está corregida por precesión y nutación, y tiene su origen en el Aries

verdadero. Para relacionar el modelo clásico y el moderno se define la **ecuación de los orígenes**, que es la ascensión recta intermedia del equinoccio, es decir, la distancia entre el equinoccio y el CIO medida sobre el ecuador celeste.

El movimiento diurno

El movimiento aparente de la esfera celeste debido a la rotación de la Tierra recibe el nombre de **movimiento diurno**. El periodo de rotación de la Tierra es de un **día sidereal**, que es el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos de un punto fijo de la esfera celeste por un mismo meridiano.

No debe confundirse el día sidereal con el **día sidéreo**, que es el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del punto Aries por un mismo meridiano. Si tomamos el punto Aries medio obtendremos el **día sidéreo medio**, mientras que si tomamos el punto Aries verdadero resultará el **día sidéreo aparente**.

A partir del concepto de día sidereal, podemos definir un ángulo horario que nos ayude a relacionar la orientación de la Tierra con respecto a un punto de la esfera celeste. Se trata del **ángulo de rotación de la Tierra** (θ), que es el ángulo horario del CIO y sirve para medir la rotación de la Tierra con respecto a los cuerpos celestes. Entre el ángulo de rotación de la Tierra θ , el ángulo horario H y la ascensión recta intermedia α_o , se establece esta ecuación fundamental:

$$\theta = H + \alpha_o \quad (1)$$

Si en lugar de tomar el CIO como origen de la ascensión recta, tomamos el equinoccio, hemos de usar un ángulo basado en el día sidéreo. Se trata del **tiempo sidéreo** (TS), que es el ángulo horario del punto Aries. De nuevo, según el punto Aries que utilicemos tendremos el *tiempo sidéreo medio* o el *tiempo sidéreo aparente*. La diferencia entre ambos se llama **ecuación de equinoccios**, y es la nutación en ascensión recta; como máximo alcanza aproximadamente un segundo. Con el tiempo sidéreo, la ecuación fundamental (1) queda:

$$TS = H + \alpha \quad (2)$$

Naturalmente, si en esta relación introducimos el tiempo sidéreo medio tendremos que utilizar una ascensión recta media, y al tiempo sidéreo aparente le corresponderá una ascensión recta aparente.

Así, conociendo la ascensión recta del astro y el ángulo de rotación de la Tierra (o el tiempo sidéreo, en el modelo clásico), podemos saber hacia qué ángulo horario tendremos que apuntar el telescopio.

La diferencia entre el ángulo de rotación de la Tierra θ y el tiempo sidéreo aparente es, en efecto, la *ecuación de los orígenes*. El ángulo de rotación de la Tierra supone una simplificación con respecto al concepto de tiempo sidéreo, ya que éste incluye una corrección por precesión, mientras que θ no. Así, podía darse el caso de que en la ecuación fundamental (2) interviniesen dos cantidades corregidas con diferentes valores de precesión (la ascensión recta y el tiempo sidéreo), mientras que con el CIO (ecuación 1) solamente la ascensión recta incluirá la precesión.

En la Tabla I se muestran los valores de la ecuación de los orígenes para varias fechas. Como puede verse, alcanzará un valor negativo de un grado cerca de 2080.

Tabla I: **ecuación de los orígenes** a las 0h TT del 1 de enero de diferentes años.

Año	EO	Año	EO	Año	EO
2000	+ 0° 00' 12,829"	2020	- 0° 15' 07,307"	2040	- 0° 30' 30,737"
2005	- 0° 03' 43,860"	2025	- 0° 19' 13,353"	2060	- 0° 45' 57,048"
2010	- 0° 07' 56,333"	2030	- 0° 23' 19,795"	2080	- 1° 00' 26,053"
2015	- 0° 11' 36,307"	2035	- 0° 26' 51,558"	2100	- 1° 15' 56,516"

Escalas de tiempo

El ángulo de rotación de la Tierra nos sirve para establecer una escala de tiempo asociada al movimiento diurno promedio del Sol: esa escala es el **Tiempo Universal** (UT). Intuitivamente, se basa en definir el día como el intervalo entre dos pasos consecutivos, por el meridiano, de un Sol con movimiento aparente promedio. Pero esas 24 horas de Tiempo Universal no son el periodo de rotación: definimos el periodo de rotación terrestre como el tiempo que tarda un punto fijo de la esfera celeste en pasar por el mismo meridiano tras una rotación. Ese tiempo no es de 24 horas de UT, sino de casi cuatro minutos menos y, como hemos visto, se llama *día sideral*.

Expresado en fórmulas, tenemos:

$$\begin{aligned} \text{día de UT} &= \text{día sideral} + 3\text{m } 56,55\text{s (en t. sideral)} \\ \text{día sideral} &= \text{día de UT} - 3\text{m } 55,90\text{s (en t. universal)} \end{aligned}$$

Para obtener un intervalo de Tiempo Sideral a partir de un intervalo de Tiempo Universal, hay que multiplicar por 1,002737811911; o para la acción inversa multiplicar por 0,997269663237.

El Tiempo Universal se concreta en diferentes variantes (UT0, UT1, UT2, UTC). El ángulo de rotación de la Tierra θ define el **Tiempo Universal-1** (UT1). En unidades de rotaciones (2π radianes ó 360°), el ángulo viene dado por:

$$\theta = 0,7790572732640 + 1,00273781191135448 d_U \quad (3)$$

donde d_U es el número de días de Tiempo Universal UT1 transcurridos desde el 1 de enero de 2000, a las 12h UT1 del mediodía.

El Tiempo Universal es una escala de tiempo, pues, basada en la rotación de la Tierra. No obstante, la Tierra no es un reloj y no gira de una manera uniforme, y el UT está lejos de ser una escala uniforme con respecto al tiempo que podemos obtener de un reloj atómico, que es la base de tiempo más precisa de la que se dispone. Dado que las irregularidades en la rotación de la Tierra son imprevisibles, se introducen otras escalas basadas en el tiempo atómico. Se trata de:

- **Tiempo Atómico Internacional** (TAI). Proporcionado por unos relojes atómicos de gran precisión. Para preservar esa precisión se realizan continuas comparaciones de frecuencia entre los relojes.
- **Tiempo Terrestre** (TT). Es la escala temporal de las efemérides geocéntricas aparentes. Su realización práctica es también mediante relojes atómicos. Una realización práctica del TT es

$$TT = TAI + 32,184\text{s} \quad (4)$$

- **Tiempo Universal Coordinado** (UTC). Escala basada en el segundo atómico, pero que por definición no puede diferir en más de 0,9 segundos del UT1. Para conseguirlo, periódicamente se introducen saltos de un segundo en esta escala. Se retransmite en las señales horarias, y también se puede obtener de los receptores GPS. Las horas oficiales de los países se obtienen a partir de esta variante del UT.

En España, al UTC hay que sumarle una hora (en invierno) o dos (en verano) para obtener la **hora oficial** en la Península Ibérica, Baleares, Ceuta y Melilla; en Canarias, el tiempo universal se corresponde con el oficial durante el invierno, pero hay que sumarle una hora en verano. En otros países, las diferencias de la hora oficial con respecto al UTC varían en función de las zonas horarias legalmente definidas en cada caso.

Las diferencias entre el tiempo atómico y las escalas basadas en el UT se obtienen de la observación. Por ejemplo, en 2007 la diferencia TT-UT (habitualmente denominada ΔT) es de unos 65 segundos.

Fechas y épocas

En Astronomía no se suele trabajar con las fechas de calendario que todos utilizamos habitualmente, ya que distintos países pueden emplear diferentes calendarios, y además su uso ha variado a lo largo de la historia.

Lo que se utiliza universalmente es la **fecha juliana**, que simplemente es una cuenta sobre el número de días transcurridos desde un instante de origen (el mediodía del 1 de enero del año 4713 AC, en el calendario juliano). Por ejemplo, la fecha juliana para el día 15 de octubre de 2002 a las cero horas fue 2.452.562,5, y a las 16:50:00 del 3 de marzo de 1997 fue 2.450.511,20139. Dependiendo de a qué escala de tiempo se refiera, la fecha juliana estará expresada en Tiempo Terrestre (TT), Tiempo Universal (UT), etc.

En ocasiones, se necesita especificar que las posiciones de un catálogo estelar, o unas determinadas cantidades astronómicas, se aplican a una fecha concreta en Tiempo Terrestre (TT), lo que se llama una **época**. Cuando se especifican épocas, y especialmente cuando se trata de épocas muy comunes, no se suele dar la fecha juliana correspondiente, sino que se proporciona un identificador de época como *B1950,0* ó *J2000,0*.

Una época puede ser juliana o besseliana, en función de que se base en el *año juliano* o el *año besseliano*; las épocas julianas, utilizadas desde 1984, llevan como prefijo una J para diferenciarlas de las besselianas. Por ejemplo, la época correspondiente a las 12h TT del mediodía del 1 de enero de 2000 se llama *J2000,0* (a veces abreviada como *J2000*). Antes de 1984 se utilizaban épocas besselianas, que no solían llevar ningún prefijo, aunque para evitar ambigüedades es aconsejable prefijarlas con la letra B.

La época juliana, para una fecha juliana *FJ* expresada en Tiempo Terrestre, se calcula mediante:

$$J = 2000,0 + \frac{FJ - 2451545,0}{365,25} \quad (5)$$

mientras que una época besseliana se puede calcular, aproximadamente, a partir de:

$$B = 1900,0 + \frac{FJ - 2415020,313}{365,24219} \quad (6)$$

Por ejemplo, la época B1950,0 se corresponde con la fecha juliana 2.433.282,423.

Sistemas de referencia

Como hemos mencionado, un sistema de referencia define un sistema de coordenadas, así como todo lo necesario para establecer la posición y la velocidad de objetos en el espacio y el tiempo. Para describir la posición y la velocidad de un astro, tal como las ve un observador en la superficie terrestre, necesitamos dos marcos diferentes, uno celeste y otro terrestre, relacionados por una serie de transformaciones. Trataremos primero el celeste, y después el terrestre.

Una parte esencial de un sistema de referencia es un conjunto de direcciones (ejes) fundamentales. Antes de 1998, las realizaciones prácticas de las direcciones de referencia celestes venían dadas por una serie de catálogos de estrellas fundamentales, el último de los cuales fue el FK5 (de forma habitual, se llama FK5 al conjunto del sistema de referencia). Los catálogos fundamentales incluyen posiciones y movimientos propios de estrellas cercanas, observadas con instrumentos ópticos. Al tratarse de estrellas próximas, sus movimientos propios son considerables, y los errores en la determinación de esos movimientos se transmiten, con el tiempo, al sistema de referencia. Y existen errores sistemáticos debidos, sobre todo, a defectos en la plasmación de esas direcciones de referencia en diferentes zonas del cielo.

Además, las direcciones fundamentales de los sistemas de referencia anteriores a 1998 estaban basadas en el ecuador y equinoccio medios de una época fija (como $J2000,0$ ó $B1950,0$), Por ejemplo, una posición en el FK5 está referida al ecuador y equinoccio medios a las 12h TT del 1 de enero del año 2000 (es decir, época $J2000,0$). Eso hacía que las direcciones de los ejes dependieran de un modelo dinámico del Sistema Solar (para obtener el equinoccio). Por una parte, las direcciones cambiaban en función de la elección de época. Por otra, las mejoras o correcciones en el modelo dinámico suponían a su vez cambios en las direcciones fundamentales. A esto hay que añadir que distintas interpretaciones acerca de la definición exacta de eclíptica o equinoccio suponen orientaciones ligeramente diferentes.

El ICRS

En 1998, la UAI adoptó el **Sistema de referencia celeste internacional** (ICRS) como sistema de referencia fundamental. El ICRS está basado en un conjunto de direcciones a objetos extragalácticos cuyo movimiento propio es indetectable. Los objetos son radiofuentes observadas mediante *interferometría de muy larga base* (VLBI), una técnica de observación que emplea varios radiotelescopios situados en distintos puntos de la Tierra para observar simultáneamente un mismo objeto. La combinación de datos de los distintos radiotelescopios permite obtener una posición muy precisa, como si el objeto hubiera sido observado por un solo radiotelescopio de un diámetro equivalente a la distancia entre los observatorios más alejados. En consecuencia, la VLBI proporciona unas direcciones mucho más exactas que los instrumentos ópticos usados en los catálogos estelares como el FK5.

Las direcciones del ICRS permanecen fijas en el espacio, y no giran con el paso del tiempo (es decir, el ICRS no tiene época estándar asociada). Su origen está en el baricentro del Sistema Solar. A fin de preservar la continuidad con las direcciones del sistema de referencia anterior (FK5), las direcciones fundamentales del ICRS están alineadas con las del FK5, dentro del margen de error de éste.

Para su uso práctico, el conjunto de direcciones a radiofuentes lejanas del ICRS debe poder trasladarse al espectro visible, a las estrellas, y eso pudo hacerse mediante el catálogo Hipparcos. Este catálogo, resultado de las observaciones hechas por el

satélite del mismo nombre, fue alineado con el ICRS y el resultado fueron posiciones precisas, referidas al nuevo sistema, de unas 120.000 estrellas. Se dice, por tanto, que el Hipparcos es la realización práctica primaria del ICRS en el espectro visible. Otros catálogos, como el Tycho 2, el UCAC2/3 o el USNO-B1.0 proporcionan posiciones referidas al ICRS para muchas más estrellas, si bien no son tan precisos.

Aunque el catálogo FK5 fue la última realización práctica tradicional de los ejes de un sistema de referencia celeste, posteriormente a la introducción del ICRS se publicó el FK6, una versión corregida del FK5 obtenida mediante la combinación de datos de Hipparcos con observaciones terrestres. Los movimientos propios del FK6 son de gran calidad, si bien al tratarse de sólo unos pocos miles de estrellas la utilidad de este catálogo, por sí solo, es muy limitada.

Sistema de referencia celeste intermedio

Al expresar posiciones basadas en el ICRS en un sistema de referencia propio geocéntrico, y tras corregir por precesión y nutación, obtenemos el *Sistema de referencia celeste intermedio*. Como se explicó antes, el origen de la ascensión recta en este sistema no es el equinoccio, sino el CIO. Al coexistir dos maneras de expresar una posición propia corregida por precesión y nutación, cuando se proporcionan posiciones se debe especificar si se utiliza el nuevo modelo o bien el clásico. Al consultar efemérides, prestaremos atención al sistema empleado:

- Si se trata de coordenadas *astrométricas*, no hay ambigüedad ya que el sistema de referencia es el ICRS, y la posición es directamente comparable con los nuevos catálogos astronómicos, que están basados en dicho sistema.
- Si nos dan efemérides con posiciones *aparentes*, estamos en el modelo clásico con origen en el equinoccio.
- Si la posición es *intermedia*, está basada en el nuevo origen.

Muchas veces, nos encontraremos coordenadas ecuatoriales etiquetadas como "J2000", lo que vendría a significar que están referidas al ecuador y eclíptica medios para la época J2000,0 (como si estuviéramos hablando del sistema FK5), cuando de hecho se trata de posiciones expresadas en el ICRS. Es un uso equívoco que debe ser evitado, ya que aunque el ICRS está orientado para coincidir de forma aproximada con los ejes del FK5, se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La definición del plano de la eclíptica usada para construir el FK5 es distinta de la actual (resolución B1 de la XXVI Asamblea General de la UAI, 2006). Las dos definiciones dan lugar a sendos equinoccios medios que difieren en casi una décima de segundo de arco.
- Los ejes del ICRS están levemente desviados (varias centésimas de segundo de arco) con respecto a las determinaciones recientes del plano medio de la eclíptica en J2000,0, hechas mediante telemetría lunar láser y VLBI. En realidad, estas desviaciones son algo que tienen en cuenta los procesos estándar utilizados para obtener posiciones intermedias a partir del ICRS.

La precisión actual de las observaciones, especialmente en el campo de la astrometría de los cuerpos menores del Sistema Solar, hace que el uso de la expresión "J2000" no tenga mayor importancia, pero algunas veces se puede ver este uso junto a posiciones expresadas con milésimas de segundo de arco de precisión. Además, la

exactitud de las posiciones obtenidas por las misiones espaciales presentes y futuras va a suponer que estas puntualizaciones deban tenerse en cuenta tarde o temprano.

El ITRS

Para dar la posición (y, en las aplicaciones que lo requieran, también la velocidad) de un observador terrestre, necesitamos un sistema de referencia que gire con la Tierra. De manera similar a como el sistema celeste ICRS se basa en direcciones a un cierto número de objetos de referencia, el **Sistema de referencia terrestre internacional** (ITRS) es proporcionado por las posiciones y velocidades de numerosas estaciones terrestres. Los ejes de coordenadas del ITRS se definen de forma que el sistema gira con la Tierra, su origen es el centro de masas terrestre, y su eje Z tiene la dirección del polo; los otros ejes toman una orientación establecida por convención.

El ITRS se lleva a la práctica mediante observaciones VLBI, telemetría láser de la Luna y satélites artificiales, GPS y DORIS (*Doppler Ranging Integrated on Satellite*, una red de seguimiento que permite establecer con precisión las órbitas de satélites artificiales equipados con un receptor especial). Tanto el ITRS como el ICRS son mantenidos por un organismo llamado *International Earth Rotation and Reference Systems Service* (IERS), que coordina las realizaciones prácticas de ambos.

El acceso universal a las coordenadas terrestres lo proporciona el GPS, cuyo sistema de referencia es el *Sistema Geodésico Mundial de 1984* (WGS84). El WGS84 consiste fundamentalmente en un elipsoide de referencia, con un radio ecuatorial de 6.378.137 metros y un achatamiento aproximado de 1/298,257, más unos determinados ejes de coordenadas. Una curiosa consecuencia de la alineación de los ejes del WGS84 es que los receptores GPS no muestran exactamente una longitud cero en el Observatorio de Greenwich: allí, el punto de longitud cero está situado a poco más de cien metros del meridiano. Actualmente los ejes del WGS84 están alineados, dentro de un cierto margen, con la realización práctica del ITRS, por lo que una posición GPS difiere en unos pocos centímetros del ITRS.

Relacionando el sistema celeste y el terrestre

Si corregimos las coordenadas terrestres referidas al ITRS por movimiento polar, obtenemos el **Sistema de referencia terrestre intermedio** (TIRS). Decíamos que las posiciones celestes intermedias se llaman así por vincular el sistema de referencia celeste con el terrestre; el TIRS se llama intermedio por el mismo motivo.

Dado que un eje del ITRS tiene la dirección del polo, nos queda un grado de libertad para orientar los ejes, que cerraremos señalando un origen convencional, tal como se hacía en los sistemas terrestres tradicionales poniendo como origen al meridiano de Greenwich. En el marco del TIRS, el origen desde el que se mide la longitud terrestre no es -como hemos mencionado- el meridiano de Greenwich, sino un nuevo origen definido al estilo moderno, de manera similar al origen celeste intermedio. Su nombre es **origen terrestre intermedio** (TIO) y se le suele designar con la letra griega ϖ .

Ahora, vamos a relacionar las posiciones celestes intermedias con sus análogas terrestres:

El ángulo de rotación de la Tierra se mide desde el origen terrestre intermedio. Podemos definir un ángulo de rotación local θ_L para un lugar de longitud terrestre λ , que vendrá dado por:

$$\theta_L = \theta + \lambda \quad (7)$$

La expresión general de la ecuación fundamental, relacionando el ángulo horario H , la ascensión recta intermedia α_σ y el ángulo de rotación de la Tierra θ , para un lugar de latitud λ , se puede escribir así:

$$H = \theta - \alpha_\sigma + \lambda \quad (8)$$

Por lo tanto, conociendo el ángulo de rotación de la Tierra, la posición intermedia de un astro y la longitud terrestre del observador, podemos conocer el ángulo horario del astro, lo que supone el vínculo de los sistemas celeste y terrestre.

Si el origen lo tomamos en el equinoccio, la ecuación queda, para una ascensión recta aparente α_{ap} :

$$H = \text{GAST} - \alpha_{ap} + \lambda \quad (9)$$

donde GAST es el *Tiempo sidéreo aparente de Greenwich*, porque aunque el meridiano de Greenwich ya no sea la referencia, al tiempo sidéreo del TIO se le sigue llamando "tiempo sidéreo de Greenwich".

En fin, conociendo el ángulo horario podemos obtener una posición topocéntrica, e incluso expresarla en coordenadas horizontales. Pero la posición que vemos desde la superficie de la Tierra está afectada por su atmósfera.

Posición observada

Aunque nos salgamos del tema de los sistemas de referencia, para completar la terminología de posiciones que hemos dado definiremos una **posición observada** como el resultado de corregir una posición topocéntrica por los efectos causados por la atmósfera terrestre. Para las observaciones ópticas habituales, se trata de un efecto que se llama **refracción astronómica**.

El índice de refracción de la atmósfera varía con la distancia cenital, por lo que la luz del astro describe una curva al entrar en la atmósfera terrestre; esta curvatura se manifiesta en una distancia cenital observada inferior a la verdadera.

La refracción varía con las condiciones atmosféricas, aumenta con la distancia cenital y es sensiblemente mayor cuanto más bajo está el astro sobre el horizonte. Para la refracción máxima (astro en el horizonte) en las efemérides se suele tomar el valor estándar de 34' para calcular los tiempos de orto y ocaso de los astros.

El futuro de los sistemas de referencia

A medida que se produzcan mejoras en la realización práctica del ICRS, la precisión de éste aumentará, pero -a diferencia de lo que ocurriría con sistemas anteriores- seguirá siendo el ICRS. Actualmente, está realizado a través de direcciones a radiofuentes, y las observaciones de dichos objetos continúan. No sólo se mejoran las posiciones de las radiofuentes que ya se utilizan, sino que también se trabaja en incluir nuevas.

Aunque en la actualidad el ICRS sea establecido por observaciones radio basadas en la Tierra, futuras misiones de astrometría espacial pueden cambiar eso. Por ejemplo, la misión GAIA de la Agencia Espacial Europea llevará a cabo observaciones astrométricas de unos mil millones de objetos con una gran precisión. Si obtiene los resultados esperados, es probable que sus datos den lugar a una nueva realización práctica primaria del ICRS. Además, GAIA observará una gran cantidad de asteroides, y es posible que las observaciones puedan ser utilizadas para determinar las masas de un cierto número de ellos. Esto permitiría mejorar la precisión de los modelos del Sistema Solar, y con ellos algunos parámetros que intervienen en los sistemas de referencia. Se espera que GAIA sea lanzada en 2012.

Por otra parte, y al margen de las técnicas de observación, el marco teórico construido por las actuales resoluciones de la UAI sobre sistemas de referencia, siendo una gran mejora sobre los anteriores deja algunos aspectos sin resolver. Por ejemplo, las definiciones de algunas constantes y unidades (como la Unidad Astronómica de distancia) son posibles ámbitos para futuras resoluciones.

Bibliografía

1. "Sistemas de coordenadas en la esfera celeste (rev. 3)", C. Amengual, 2010.
2. "Vocabulario astronómico rev. 2009", C. Amengual, 2009.
3. "The IAU Resolutions on Astronomical Reference Systems, Time Scales, and Earth Rotation Models: Explanation and Implementation", G.H. Kaplan, 2005, *US Naval Observatory Circular* 179.
4. "IERS Conventions (2003)", D.D. McCarthy y G. Petit (eds.), 2004, *IERS Technical Note* 32.
5. "The International Celestial Reference System and Frame: ICRS Center Report for 2001-2004", J. Souchay y M. Feissel-Vernier (eds.), 2006, *IERS Technical Note* 34.
6. "The IAU 2000 Resolutions for Astrometry, Celestial Mechanics, and Metrology in the Relativistic Framework: Explanatory Supplement", M. Soffel, S. A. Klioner, G. Petit, P. Wolf, S. M. Kopeikin, P. Bretagnon, V. A. Brumberg, N. Capitaine, T. Damour, T. Fukushima, B. Guinot, T.-Y. Huang, L. Lindegren, C. Ma, K. Nordtvedt, J. C. Ries, P. K. Seidelmann, D. Vokrouhlický, C. M. Will, y C. Xu, 2003, *The Astronomical Journal*, 126, 2687.
7. "Relativity in the Problems of Earth Rotation and Astronomical Reference Systems: Status and Prospects", M. Soffel y S. Klioner, en "Fundamental Astronomy: New concepts and models for high accuracy observations", 2005, *Proceedings of the Journées 2004 Systèmes de Référence Spatio-Temporels*, N. Capitaine (ed.), Observatorio de París, París, p. 191.
8. "Prospects for an Optical Reference Frame using GAIA", J. Kovalevsky en "Earth dynamics and reference systems: five years after the adoption of the IAU 2000 Resolutions", 2006, *Proceedings of the Journées 2005 Systèmes de Référence Spatio-Temporels*, A. Brzezinski, N. Capitaine y B. Kolaczek (eds.), Observatorio de París, París, p. 9.