

Libros de **Cátedra**

Astronomía Esférica

Fundamentos de Astrometría

Laura Isabel Fernández, María Silvina De Biasi
y Gonzalo Carlos de Elía

FACULTAD DE
CIENCIAS ASTRONÓMICAS Y GEOFÍSICAS

e
exactas

**Eduulp**
EDITORIAL DE LA UNLP



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

Astronomía Esférica
Fundamentos de Astrometría

Laura Isabel Fernández
María Silvina De Biasi
Gonzalo Carlos de Elía

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas



Índice

Introducción	4
Prólogo	5
Capítulo 1. Sistemas y marcos de referencia	7
Capítulo 2. Paralaje	11
Capítulo 3. Aberración	27
Capítulo 4. Refracción atmosférica	42
Capítulo 5. Movimiento de los planos fundamentales en los sistemas dinámicos	71
Capítulo 6. Movimiento propio	100
Capítulo 7. Catálogos estelares	111
Capítulo 8. Efectos de la rotación terrestre	129
Capítulo 9. Escalas de tiempo	145
Capítulo 10. Sistemas y marcos de referencia, modelos y convenciones vigentes	166
Anexo A	193
Anexo B	194
Glosario	196
Autores	198

CAPÍTULO 7

Catálogos Estelares

María Silvina De Biasi

Posiciones estelares

Hemos estudiado varios efectos que producen variaciones en las coordenadas de las estrellas, siendo los más importantes la paralaje, la aberración, la precesión, la nutación y el movimiento propio.

Luego, resulta ambiguo conocer únicamente las coordenadas (α, δ) del objeto celeste observado o a estudiar, ya que su valor no especifica: a) el origen del sistema de referencia celeste en el que se expresan, b) la orientación de dicho sistema, ni c) el instante cuando el objeto tiene esa dirección.

Hay varias posibilidades que involucran los diversos fenómenos vistos en capítulos anteriores, por ejemplo para a) el de paralaje, para b) los de precesión y nutación y c) se trata de un parámetro del movimiento propio de la estrella.

Siguiendo a Green (Green, 1988, p.284.-285), la estandarización de las posibilidades introduce las siguientes definiciones:

La *posición media* de una estrella son sus coordenadas (α_M, δ_M) en una esfera celeste baricéntrica referidas al Ecuador y Equinoccio Medios de la fecha - instante de observación. La posición media varía por los efectos de precesión y movimiento propio. Un caso particular es a *posición media estándar* de una estrella, definida como sus coordenadas (α_0, δ_0) en un sistema de referencia celeste baricéntrico materializado por Ecuador y Equinoccio Medios de la Época fundamental. Las posiciones medias estándar son las que conforman los catálogos fundamentales.

La *posición verdadera* de una estrella son sus coordenadas (α_V, δ_V) en un sistema de referencia celeste baricéntrico materializado por Ecuador y Equinoccio verdaderos de la fecha (la fecha es el instante de observación).

La *posición aparente* de una estrella son sus coordenadas $(\alpha_{ap}, \delta_{ap})$ en un sistema de referencia celeste geocéntrico materializado por Ecuador y Equinoccio verdaderos de la fecha, contiene los efectos de paralaje y aberración anuales. La posición aparente difiere de la posición observada (eliminados los errores instrumentales) por los efectos locales de aberración diurna y refracción.

Nótese que las posiciones media, media estándar y aparentes indican las direcciones de la estrella en el espacio, y pueden representarse a través de versores.

Cálculo de la posición aparente de una estrella

Analizaremos el algoritmo vectorial que calcula la posición aparente de una estrella en un instante dado t_1 siendo conocida su posición media estándar, basados en Green (Green, 1988, p. 295-298).

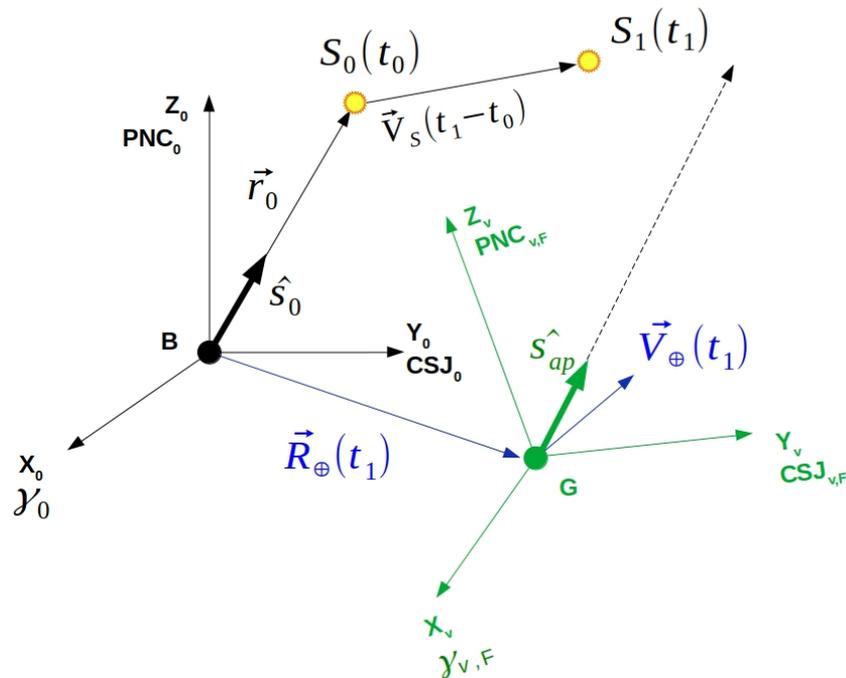
Este algoritmo es riguroso, fácilmente programable, usado ampliamente por la comunidad astronómica desde fines de la década de 1980. Anteriormente se utilizaba una fórmula en coordenadas esféricas que ha quedado obsoleta, la técnica de los números diarios, cuya precisión es limitada.

Los datos para desarrollar el algoritmo son los siguientes. Los correspondientes a la estrella S se obtienen de un catálogo: la posición media estándar (α_0, δ_0) en el instante t_0 representada el versor \hat{s}_0 , su paralaje π , $[\pi]=''$, las componentes ecuatoriales del movimiento propio (μ_α, μ_δ) , $[\mu_\alpha]=seg/año; [\mu_\delta]=''$ y la velocidad radial $V_r, [V_r]=km/seg$. Todos los vectores están expresados en un sistema de referencia celeste baricéntrico materializado por Ecuador y Equinoccio Medios de la Época estándar en el instante t_0 , denominado -Época del catálogo-. Las efemérides proveen en el instante t_1 el vector posición baricéntrica de la Tierra $\vec{R}_\oplus(t_1)$ y el vector velocidad baricéntrica de la Tierra $\vec{V}_\oplus(t_1)$, ambos expresados en el sistema celeste de la posición media estándar, siendo sus unidades $[\vec{R}_\oplus]=UA, [\vec{V}_\oplus]=UA/año$.

En el intervalo $(t_1 - t_0)$ la estrella se ha desplazado en el espacio entre los puntos $S_0(t_0)$ a $S_1(t_1)$ con velocidad \vec{V}_S relativa al Sol y asumida constante. El objetivo es calcular su posición aparente \hat{s}_{ap} en el instante t_1 .

Figura 7.1.

Algoritmo vectorial del cálculo de la posición aparente de una estrella



Como \vec{R}_\oplus , \vec{V}_\oplus y los vectores de la estrella están expresados en el mismo sistema celeste, el algoritmo corrige primero por paralaje anual y movimiento propio, luego por aberración anual y por último por precesión y nutación. El planteo general se grafica en la figura 7.1.

Cabe destacar que todas las Figuras 7.1 a 7.4 no se encuentran a escala con fines didácticos. Los puntos B, G, S_0 y S_1 no son necesariamente coplanares.

Corrección por movimiento propio y paralaje anual

En la Figura 7.2 el sistema de referencia celeste geocéntrico G se encuentra en la posición baricéntrica $\vec{R}_\oplus(t_1)$ en el instante de observación t_1 y está materializado por el Ecuador y Equinoccio Medios de la Época estándar. Sean $\vec{r}_0 = r_0 \hat{S}_0$ el vector posición baricéntrica de

la estrella en t_0 y $\vec{r}_1 = r_1 \hat{s}_1$ el vector en la dirección geocéntrica geométrica de la misma en t_1 . Resulta, entonces, la siguiente relación:

$$\vec{r}_0 + \vec{V}_T(t_1 - t_0) = \vec{R}_\oplus + \vec{r}_1 \quad (7.1)$$

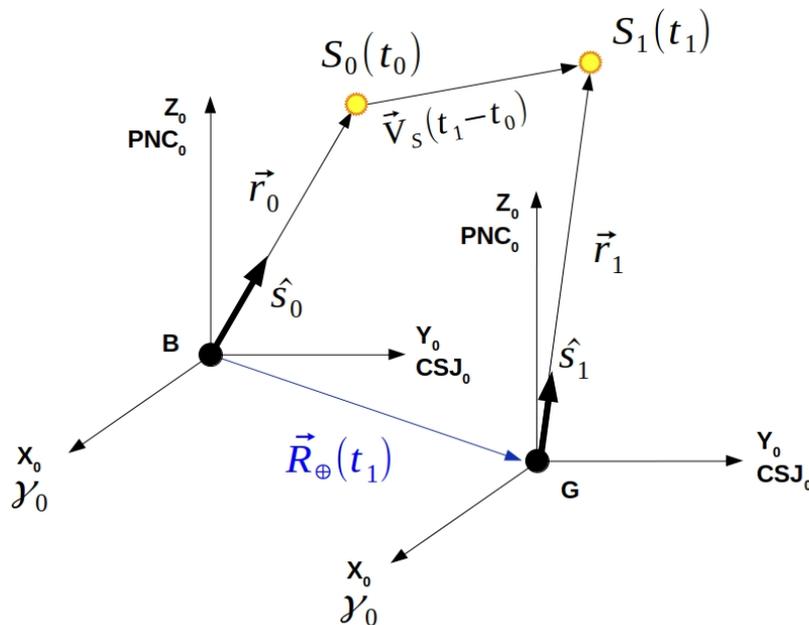
$$r_0 \hat{s}_0 + \vec{V}_S(t_1 - t_0) - \vec{R}_\oplus = r_1 \hat{s}_1 \quad (7.2)$$

En 7.2 nos interesa obtener el versor \hat{s}_1 y expresar el miembro izquierdo en radianes. Se asume que la unidad de \vec{V}_S es rad/año, como $[\vec{R}_\oplus] = UA$, r_0 se escribe a partir de la ecuación 2.23

$$r_0 = \frac{1UA}{\pi \text{sen } 1''}$$

Figura 7.2.

Corrección por paralaje y movimiento propio en el cálculo de la posición aparente de una estrella.



Entonces, se multiplican ambos miembros de la igualdad 7.2 por π_{rad} la paralaje expresada en radianes:

$$\pi_{rad} r_0 + \pi_{rad} \vec{V}_S - \pi_{rad} \vec{R}_\oplus = \pi_{rad} r_1 \hat{s}_1 \quad (7.3)$$

luego,

$$\hat{s}_1 = \frac{\vec{s}_0 + \vec{m}(t_1 - t_0) - \pi_{rad} \vec{R}_\oplus}{|\vec{s}_0 + \vec{m}(t_1 - t_0) - \pi_{rad} \vec{R}_\oplus|} \quad (7.4)$$

siendo $\vec{m} = \pi_{rad} \vec{V}_\oplus$ el vector movimiento espacial expresado en rad/año. Siendo $\vec{\mu}$ el vector movimiento propio (ver capítulo 6) expresado en $[rad/año]$, \vec{m} se escribe:

$$\vec{m} = \vec{\mu} + \frac{\pi_{rad}}{4.74} V_r \hat{s}_0 \quad (7.5)$$

Corrección por aberración anual

Recordando lo visto en el capítulo 3, en el instante t_1 la luz de la estrella llega simultáneamente a los observadores en G -en reposo respecto de B- y en G* -moviéndose con \vec{V}_\oplus respecto de B. El primero observa la estrella en la dirección geométrica \hat{s}_1 , el segundo en la dirección aparente \hat{s}_2 como se muestra en la figura 7.3.

Los sistemas de referencia de ambos observadores están materializados por el Ecuador y Equinoccio Medios de la Época estándar.

Luego, aplicando la expresión con doble producto vectorial en la ecuación 3.5 al primer orden en $V_\oplus(t_1)/c$

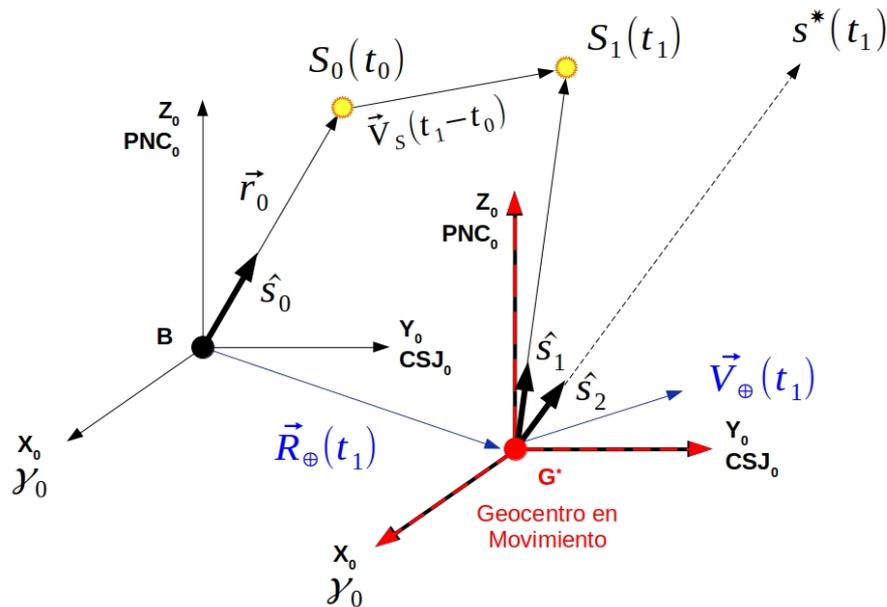
$$\hat{s}_2 = \hat{s}_1 - \frac{1}{c} \hat{s}_1 \times (\hat{s}_1 \times \vec{V}_\oplus(t_1))$$

luego, el versor dirección aparente \hat{s}^* resulta

$$\hat{s}^* = \frac{\vec{s}_1 - \frac{1}{c} \vec{s}_1 \times (\vec{s}_1 \times \vec{V}_\oplus(t_1))}{|\vec{s}_1 - \frac{1}{c} \vec{s}_1 \times (\vec{s}_1 \times \vec{V}_\oplus(t_1))|} \quad (7.6)$$

Figura 7.3.

Corrección por aberración anual en el cálculo de la posición aparente de una estrella.



Corrección por Precesión y Nutación

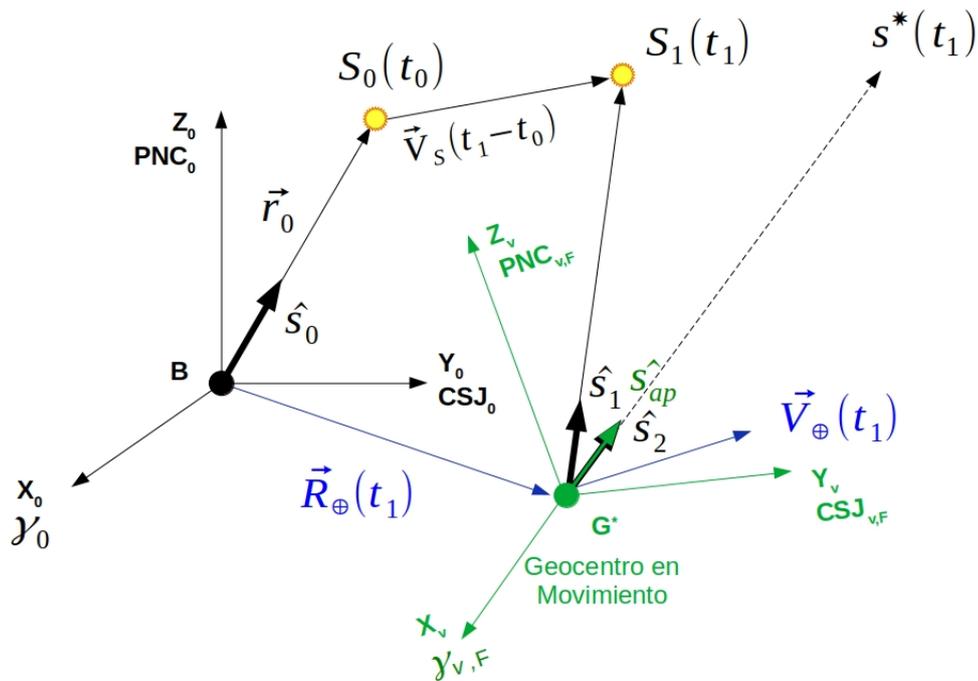
En la figura 7.4, el versor \hat{s}^* está expresado en el sistema de referencia celeste geocéntrico G^* , ubicado en la posición baricéntrica $\vec{R}_\oplus(t_1)$ y moviéndose con velocidad baricéntrica $\vec{V}_\oplus(t_1)$ en el instante de observación t_1 y la orientación de dicho sistema está materializada por el Ecuador y Equinoccio Medios de la Época estándar. Para obtener la posición aparente \hat{s}_{ap} , basta cambiar este sistema de referencia celeste al sistema de referencia celeste materializado por el Ecuador y Equinoccio verdaderos de la fecha. Siendo P la matriz de precesión que transforma el sistema celeste referido a Ecuador y Equinoccio

Medios estándar a Ecuador y Equinoccio Medios de la fecha y N la matriz de nutación que transforma el sistema celeste referido a Ecuador y Equinoccio Medios de la fecha al sistema celeste referido a Ecuador y Equinoccio Verdaderos de la Fecha (ecuaciones 5.32 a 5.35 y 5.44), la posición aparente de la estrella \hat{s}_{ap} resulta:

$$\hat{s}_{ap} = NP \hat{s}^* \tag{7.7}$$

Figura 7.4.

Corrección por Precesión y Nutación en el cálculo de la posición aparente de una estrella.



Luego, las coordenadas ecuatoriales celestes de la posición aparente de la estrella S en el instante t_1 son:

$$\alpha_{ap} = \arctg\left(\frac{s_{ap_y}}{s_{ap_x}}\right) \tag{7.8a}$$

$$\delta_{ap} = \arcsen(s_{ap_z}) \quad (7.8b)$$

En el caso del cálculo de la posición aparente de un planeta, debe considerarse la corrección por tiempo luz para determinar la posición geocéntrica del planeta.

Una de las aplicaciones de este algoritmo es la confección de un programa de observación de cualquier objeto celeste. En particular, antes de la aparición del posicionamiento satelitario, las posiciones aparentes de las estrellas brillantes y planetas se publicaban anualmente para ser utilizadas en la determinación de latitud y longitud mediante la observación de estos objetos.

Catálogos astrométricos

Un catálogo estelar astrométrico es una lista de coordenadas precisas de un determinado conjunto de estrellas expresadas en un cierto sistema de referencia celeste; estas coordenadas se obtienen de las observaciones realizadas con uno o varios instrumentos, las que se reducen mediante procedimientos específicos que superan los contenidos de este libro.

Para cada estrella enumerada, el catálogo provee su número de identificación, las coordenadas ecuatoriales (α, δ) y sus errores, las componentes de movimiento propio (μ_α, μ_δ) y sus errores expresados en el sistema celeste adoptado y en un dado instante t_0 denominado *Época del catálogo*, la que a veces coincide con la época del sistema de referencia celeste adoptado. El listado de las estrellas se ordena por ascensión recta creciente. Son pocos los catálogos que, además, aportan la paralaje π y la velocidad radial V_r con sus respectivos errores, información valiosa con aplicaciones astrométricas y astrofísicas.

Los parámetros astrométricos se completan con la magnitud en la banda en la que opera el instrumento utilizado para producir el catálogo, por ejemplo V, B, J, H, K, G, la que facilita el reconocimiento de la estrella en el cielo, ocasionalmente están disponibles la identificación de la estrella en otros catálogos y el tipo espectral que contribuye al conocimiento de los parámetros astrofísicos del astro.

Clases de catálogos astrométricos

Las coordenadas de las estrellas que constituyen un catálogo astrométrico se determinan a partir de observaciones. Siguiendo a Mueller (Mueller, 1969, p.180.-185), las coordenadas obtenidas se clasifican en absolutas o relativas según sea el método de observación empleado. Las **coordenadas absolutas** se obtienen refiriéndolas directamente al sistema de referencia celeste cuya determinación es parte del proceso de observación, mientras que las **coordenadas relativas** de una estrella se obtienen midiendo su ubicación con respecto a la localización de las estrellas cercanas cuyas coordenadas son conocidas en el sistema de referencia celeste adoptado. Aquellos catálogos que contienen el primer tipo de coordenadas se denominan catálogos absolutos, y catálogos relativos los que contienen el segundo.

Determinación de coordenadas absolutas. Catálogo fundamental

Recordemos que en el instante de tránsito¹ cualquier objeto celeste cruza el meridiano celeste local, su declinación δ es una función de la latitud φ y de la distancia cenital z , además su ascensión recta α es igual al tiempo sidéreo local TSL . La observación de una estrella en este instante nos conducirá a determinar sus coordenadas absolutas, eliminados los efectos de refracción, aberración estelar y errores instrumentales, sin recurrir a posiciones de otras estrellas.

El instrumento indicado para este tipo de observación es el círculo meridiano, telescopio que posee su eje óptico fijo al plano del meridiano celeste local; en la actualidad se encuentran operativos al ser fotoeléctricos y automatizados.

Comenzaremos por la determinación de la declinación absoluta, que es la más sencilla en la práctica. Fácilmente se deducen las siguientes relaciones que ocurren en el plano del meridiano celeste local de un observador en el Hemisferio Sur entre δ , φ y z en los casos de una estrella: a) que sale y se pone, b) circumpolar que no cruza el Primer Vertical (culminación superior al norte del Cenit) y c) circumpolar que cruza el Primer Vertical (culminación superior al sur del Cenit) en el caso de latitudes mayores a 45° .

$$|\delta|=|\varphi|-z, \delta < 0 (\text{caso a}) \quad (7.9i)$$

$$|\delta|=z-|\varphi|, \delta > 0 (\text{caso a}) \quad (7.9ii)$$

$$|\delta|=|\varphi|-z (\text{caso b}) \quad (7.9iii)$$

$$|\delta|=|\varphi|+z (\text{caso c}) \quad (7.9iv)$$

¹ El término "tránsito" se emplea para las estrellas que tiene salida/orto y puesta/ocaso, mientras que "culminación superior e inferior" se reserva para las estrellas circumpolares, donde la culminación inferior es visible.

Nótese que b) y c) tienen la misma expresión para la distancia cenital de culminación inferior

$$|\delta| = 180^\circ - |\varphi| - z \quad (7.10)$$

La determinación precisa de la *ascensión recta absoluta* es muy difícil, ya que requiere determinar con precisión la dirección del Equinoccio Vernal.

Un primer procedimiento es asumir la latitud ecliptical aparente del Sol como nula $\beta_s = 0$ para encontrar una relación entre α_s y δ_s en el triángulo esférico rectángulo γSU de la Figura 7.5, donde PNE el Polo Norte Ecliptical y PNC el Polo Norte Celeste. Entonces, aplicando las fórmulas de los teoremas del coseno, del seno y de los 5 elementos:

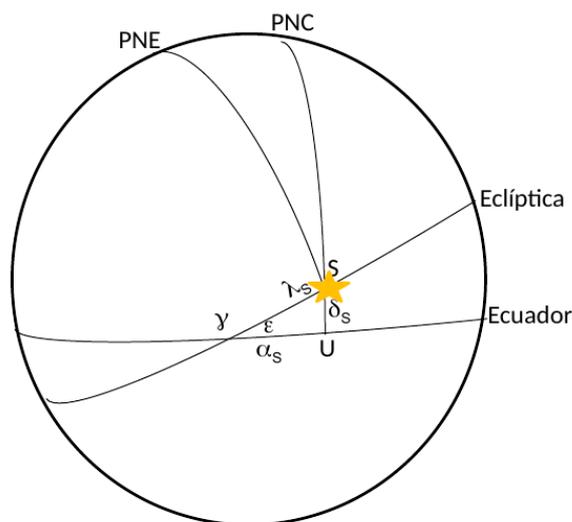
$$\cos \lambda_s = \cos \alpha_s \cos \delta_s \quad (7.11a)$$

$$\text{sen } \delta_s = \text{sen } \lambda_s \text{sen } \varepsilon \quad (7.11b)$$

$$\text{sen } \lambda_s \cos \varepsilon = \text{sen } \alpha_s \cos \delta_s \quad (7.11c)$$

Figura 7.5.

Determinación de la ascensión recta absoluta del Sol .



se obtiene

$$\operatorname{sen} \alpha_s = \operatorname{tg} \delta_s \operatorname{cotg} \varepsilon \quad (7.12)$$

donde la oblicuidad de la eclíptica ε se supone conocida; luego la determinación de la ascensión recta absoluta del Sol se reduce a determinar la declinación absoluta del Sol, detallada más arriba. También puede determinarse de la observación de la declinación del Sol en los solsticios, cuando $\operatorname{sen} \delta_s = \pm \operatorname{sen} \varepsilon$.

Como este tipo de observación es dificultosa al tratarse de un objeto extendido, mucho más brillante que cualquier estrella y que irradia una importante cantidad de calor, estos inconvenientes se resuelven utilizando las observaciones de asteroides, cuyas órbitas precisas permiten determinar la orientación de la eclíptica. Es decir, una determinación práctica del Equinoccio y Ecuador puede llevarse a cabo a partir de observaciones del Sol y de los miembros del Sistema Solar.

En la práctica, existe un procedimiento que simplifica considerablemente la determinación de las ascensiones rectas absolutas. Se trata del empleo de un conjunto selecto de estrellas bien distribuidas en la zona ecuatorial, $-30^\circ < \delta < 30^\circ$, llamadas *estrellas reloj*, las que se distinguen por sus coordenadas conocidas con precisión. Entonces, la ascensión recta absoluta de las estrellas a determinar se calcula observando estas estrellas relativas a las estrellas reloj (Walter y Sovers, 2000, p. 33). Asimismo, la utilización de las estrellas reloj tiene la ventaja de reducir las correcciones del reloj sidéreo que registra los instantes de tránsito (Woolard, Clemence, 1966, p. 391).

Catálogo fundamental

Supongamos que en un observatorio se dispone de un gran número de coordenadas absolutas de las estrellas visibles referidas a un cierto sistema de referencia celeste y observadas en distintos instantes, habiendo minimizado los errores sistemáticos de observación y reducción.

Luego, se realiza un ajuste por mínimos cuadrados a este conjunto de coordenadas absolutas a fin de obtener los mejores valores de las coordenadas y del movimiento propio, junto con sus residuos, de tales estrellas en un cierto instante (la Época del catálogo) en el sistema de referencia celeste mencionado. Queda así formado, entonces, un catálogo fundamental individual, el que cubre la zona del cielo accesible desde ese observatorio (Mueller, 1969, p. 190).

La cobertura de todo el cielo se logra con la construcción de un catálogo fundamental general, en adelante catálogo fundamental. Su construcción comienza con una selección minuciosa de varios catálogos fundamentales individuales y sus residuos. Luego, se calculan los valores medios de las posiciones y movimientos propios de las estrellas teniendo en cuenta los valores de los residuos de cada catálogo individual. Finalmente, las posiciones y movimientos propios obtenidos y sus errores pueden completarse con los mejores valores de coordenadas relativas de estrellas - con un peso menor al de las coordenadas absolutas- para asegurar una densidad aproximadamente homogénea de estrellas en el plano del cielo (Mueller, 1969, p190).

La propiedad de un catálogo fundamental es *proveer un sistema de referencia celeste para describir los movimientos de los cuerpos del Sistema Solar y para determinar los movimientos propios estelares*. Luego, un catálogo fundamental materializa en el espacio las direcciones de los ejes coordinados –marco de referencia (ver capítulo 1)- del sistema de referencia celeste a través de las coordenadas baricéntricas de las estrellas que lo componen.

Breve cronología de los catálogos fundamentales

Desde fines del siglo XIX y a lo largo del siglo XX se construyeron varios catálogos fundamentales ópticos con el propósito de que representaran (materializaran) de la mejor manera posible un sistema de referencia celeste inercial para estudiar los movimientos absolutos requeridos por la Mecánica Celeste y , posteriormente, para el estudio de la Galaxia. Asimismo, el proyecto de un relevamiento astrométrico de todo el cielo, subdividido en las zonas de visibilidad estelar de los observatorios involucrados, se beneficiaría con la disponibilidad de un catálogo fundamental conteniendo estrellas de referencia a las cuales se podrían referir las posiciones de las estrellas de los catálogos individuales (Walter y Sovers, 2000, p. 37-38).

Los dos tipos de catálogos fundamentales ópticos son las series americana y alemana de catálogos fundamentales. La primera comienza con el Newcomb's Catalogue of Fundamental Stars (Newcomb 1898b en Walter y Sovers, 2000, p38) de 1297 estrellas y culmina con el General Catalogue of 33342 Stars for the Epoch 1950 (GC) (Bos, 1937) y el Catalogue of 5268 Standard Stars, 1950.0, Based on the Normal System N 30 (N30) (Morgan, 1952 en Walter y Sovers, 2000, p. 38)

La serie alemana cuenta con el primer catálogo de coordenadas y movimientos propios, el Fundamental-Catalog (Auwers, 1879 y 1883, en Mueller 1969, p. 193), conteniendo alrededor de 600 estrellas entre $-32^{\circ} < \delta < 90^{\circ}$, una parte cubriendo el hemisferio norte conteniendo 539 estrellas, otra cubriendo el hemisferio sur con 83 estrellas. Lo sigue el Neuer Fundamental Katalog (NFK) (Peters, 1907, en Walter y Sovers, 2000, p. 38) con posiciones y movimientos

propios de 925 estrellas. En la década de 1920 se sugirió repetir el relevamiento fotográfico del cielo del hemisferio norte en base a un sistema de referencia único; lo que derivó en una revisión de las posiciones del NFK que se vieron afectadas por la baja precisión de los movimientos propios. Este hecho motivó la construcción del Dritter Fundamental-Katalog des Berliner Astronomischen Jahrbuchs (FK3) (Kopff 1937 y 1938, Kahrstedt 1937, Heinemann 1937 en Mueller 1969, p. 195), proporcionando posiciones y movimientos propios de casi la totalidad de las estrellas del NFK (Kopff, 1937 en Walter y Sovers, 2000, p. 38) y un suplemento de 662 estrellas (Kopff 1938 en Walter y Sovers, 2000, p. 38). Este catálogo proveyó la base para las efemérides de las estrellas publicadas en los almanaques internacionales (Mueller 1969, p. 195).

Años más tarde, el descubrimiento de errores sistemáticos en el sistema del FK3 iniciaron la construcción del Fourth Fundamental Catalogue (FK4) (Fricke & Kopff, 1963 en Walter y Sovers, 2000, p. 38), con posiciones y movimientos propios de 1535 estrellas referidas al sistema celeste materializado por el Ecuador Equinoccio y Época B1950.0 y B1975.0 y una compilación de 1987 estrellas suplementarias (FK4 Sup) (Walter y Sovers, 2000, p. 38).

Al poco tiempo de la publicación del FK4 aparecieron varios catálogos observacionales cubriendo los dos hemisferios que evidenciaron errores sistemáticos y aleatorios en las posiciones y movimientos propios del FK4, además de la necesidad de un ajuste en la compensación de las ascensiones rectas. Simultáneamente, los cambios del sistema de constantes astronómicas (IAU 1977 en Walter y Sovers, 2000, p. 38) y de las convenciones para el marco de referencia celeste a la Época estándar J2000 eran inmediatos. Llegaba, entonces, el momento de revisar el catálogo fundamental teniendo en cuenta los nuevos datos y los acuerdos internacionales, además de realizar cambios en el procedimiento de su construcción, tales como la reducción de observaciones por métodos estadísticos, aumento del número de estrellas fundamentales y un límite de magnitud más débil, utilizando los catálogos observacionales antiguos y modernos disponibles (Walter y Sovers, 2000, p. 38-39)

Los trabajos sobre el nuevo catálogo, el Fifth Fundamental Catalogue (FK5) (Fricke et al, 1988), comenzaron a principios de la década de 1970. Como sus catálogos antecesores, éste se basa en observaciones realizadas con el círculo meridiano, luego el Ecuador Celeste Instantáneo y el Equinoccio vernal son los dos puntos de referencia en la definición del sistema de referencia del catálogo. Por lo analizado más arriba resulta, entonces, que la ascensión recta y la declinación absolutas están ligadas al Sistema Solar; razón por la cual el Sistema Solar juega un papel indiscutible en la definición del sistema del FK5. Dentro de la precisión de las observaciones con círculo meridiano, se asume que el Sistema Solar es un sistema dinámico aislado; su baricentro puede considerarse como el origen de un sistema inercial al no ser detectable la aceleración solar originada por la revolución del Sol alrededor del centro galáctico (del orden $2 \times 10^{-8} \text{ cm s}^{-2}$); por lo tanto un sistema de referencia celeste baricéntrico

con ejes orientados a un Ecuador y Equinoccio fijos puede aceptarse como inercial (Walter y Sovers, 2000, p. 39-40).

El FK5 Part I (Fricke et al, 1988) contiene 1535 estrellas fundamentales utilizadas para definir el sistema FK4; representa una revisión de su antecesor en la que se aplicaron correcciones individuales y sistemáticas a las posiciones medias y los movimientos propios del FK4, se eliminó el error en el equinoccio FK4 y se introdujo el sistema de constantes astronómicas de la IAU (1976); cuenta con el aporte de posiciones estelares de aproximadamente 300 catálogos de todo el mundo. Las posiciones medias y movimientos propios de las 1535 estrellas están referidas al sistema celeste materializado por el Ecuador y Equinoccio Medios J2000.0 y Época J2000.

La segunda parte del FK5, el Fifth Fundamental Catalogue (FK5) Part II (FK5 Extension) (Fricke et al, 1991) contiene 3117 nuevas estrellas fundamentales que extienden la Parte I a magnitud $m_v = 9,5 \text{ mag}$ cuyas posiciones medias y movimientos propios están referidas al sistema celeste materializado por el Ecuador y Equinoccio Medios J2000.0 y Época J2000.0. Al igual que la Parte I, dichas posiciones y movimientos propios se obtuvieron adoptando el sistema de constantes astronómicas de la IAU (1976), se corrigió el error en el equinoccio FK4 y se aplicaron las correcciones sistemáticas FK5 - FK4. En su compilación se utilizaron posiciones estelares de más de 200 catálogos de todo el mundo.

Los catálogos FK4 y FK5 contienen paralajes para muy pocas estrellas, por lo que se requería la información del General Catalogue of Trigonometric Stellar Parallaxes. Su primera edición data de la década de 1950 (Jenkins, 1952), mientras que la última de mediados de 1990 (Van Altena et al 1995) contiene coordenadas ecuatoriales y paralajes de 8112 estrellas en el sistema celeste del FK4 (Ecuador y Equinoccio B1950.0) en la Época 1900. Nótese que la no uniformidad en el sistema celeste y la Época adoptados dificultaba el cálculo de las posiciones aparentes.

Contribución de la Astrometría espacial

Hacia fines de la década de 1990 se produce un gran adelanto en la Astrometría con el lanzamiento de las misiones espaciales astrométricas. Un telescopio a bordo de un satélite en órbita tiene como ventajas la eliminación de la refracción, un mejor "seeing" y las imágenes obtenidas poseen un diagrama de difracción bien definido, pero el satélite que alberga el telescopio está sujeto a numerosas perturbaciones que pueden afectar su orientación en el espacio de un modo impredecible. Sin embargo, se ha encontrado que se pueden determinar en el espacio distancias angulares con gran precisión, las que derivarán en posiciones de los

objetos en cuestión con un similar orden de precisión. Las dos primeras misiones han sido el Telescopio espacial Hubble (HST) destinado a investigaciones astrométricas y astrofísicas y el satélite Hipparcos con objetivos únicamente astrométricos (Walter y Sovers, 2000, p. 69).

El satélite astrométrico Hipparcos

La misión Hipparcos de la Agencia Europea Espacial (ESA) inaugura una nueva era de la Astrometría. Fue lanzada en agosto de 1989 y, a pesar de no haber alcanzado la órbita geosincrónica por una falla en un motor, se obtuvieron datos de gran calidad durante 37 meses observando todo el cielo con un solo instrumento. Esta misión produjo dos importantes catálogos: el catálogo Hipparcos y el catálogo Tycho (Walter y Sovers, 2000, p. 70).

El catálogo Hipparcos contiene posiciones, movimientos propios y paralajes de 118218 estrellas en el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS) (descrito en el capítulo 10), con errores en coordenadas y paralaje de 1 milisegundo de arco (1msa) y en los movimientos propios de 1-2 msa/año, siendo la Época del catálogo J1991.25. La magnitud límite es $m_{V\text{ límite}} = 9\text{ mag}$, aunque el límite de completitud es $m_V = 7,3\text{ mag}$, lo que significa que las estrellas del catálogo más brillantes e iguales a esta magnitud cubren todo el cielo (ESA, 1997).

La alineación del catálogo Hipparcos con el marco ICRF (descrito en el capítulo 10) se llevó a cabo con observaciones de Interferometría de Muy Larga Línea de Base (VLBI) de una docena de radio estrellas, con errores en la orientación inferiores al milisegundo de arco en la Época J1991.25. El marco celeste Hipparcos (HCRF) –Hipparcos Celestial Reference Frame– es la realización en longitudes ópticas del ICRS (ver capítulo 10), y en su definición se excluyeron muchas estrellas dobles y/o sistemas múltiples debido a la poca confiabilidad en los valores de los movimientos propios (IERS TN36, 2010).

Posteriormente, se realiza una importante mejora en los datos astrométricos respecto al catálogo original, la nueva reducción de los datos de Hipparcos (van Leeuwen, 2007), del orden de un factor 4 para las estrellas brillantes, sin cambiar el sistema de coordenadas. Estas mejoras surgen de cambios en los modelos de las perturbaciones sufridas por el satélite y en la estrategia de observación (IERS TN36, 2010).

Cabe mencionarse algunos de sus resultados más destacados, como la deformación del plano galáctico, las mejores determinaciones de edad y magnitud de las Pléyades con derivaciones en las teorías de evolución estelar y otras que pueden consultarse en:

<https://www.cosmos.esa.int/web/hipparcos/hipparcos-result-applications>

El catálogo Tycho-2 (Hog et al, 2000) contiene posiciones y movimientos propios de 2,5 millones de estrellas brillantes en el Sistema de Referencia Celeste Internacional (ICRS), como

así también fotometría en dos colores. Las posiciones y magnitudes están determinadas a partir de las observaciones del satélite Hipparcos, mientras que los movimientos propios se obtienen de la comparación con posiciones de los numerosos catálogos astrométricos en tierra reducidos al sistema de coordenadas celeste de Hipparcos. La precisión en las posiciones alcanza a decenas de msa, y en los movimientos propios de 1-3 msa/año. La Época del catálogo es J2000.0, su magnitud límite es $m_{V\text{ límite}} = 12 \text{ mag}$, si bien el límite de completitud es $m_V = 11 \text{ mag}$.

La misión Gaia

Los resultados obtenidos con el telescopio de la misión Hipparcos motivaron a planificar una nueva misión con un telescopio de mayor tamaño que los continúe y mejore. La misión *Gaia* de la ESA, lanzada en diciembre 2013, contiene dos telescopios de triple espejo cuyas visuales están separadas 106° que permiten mediciones precisas de los paralajes estelares, a bordo de un satélite ubicado en un el punto de libración del sistema Tierra-Sol L_2 de estabilidad térmica, poca perturbación gravitatoria y sin eclipses (Walter y Sovers, 2000, p. 208).

Los datos recogidos por *Gaia* desde julio 2014 constituyen la base de las realizaciones preliminares del catálogo, denominados *Gaia* Data Release. Los sucesivos Data Release contienen los cinco parámetros astrométricos (posición, movimiento propio y paralaje) en el ICRS, velocidades radiales y fotometría multicolor en la banda G (330nm a 1050nm) (Evans et al., 2018) para algunos miles de millones de fuentes más brillantes que $G=21$, junto con curvas de luz medio millar de estrellas variables, astrometría y fotometría de algunos asteroides del Sistema Solar, temperatura efectiva, extinción, enrojecimiento, radio y luminosidad para alrededor de 100 millones de fuentes (Gaia Collaboration 2018). Los resultados de *Gaia* impactarán en muchas ramas de la astronomía, tales como la determinación de órbitas de cuerpos pequeños del Sistema Solar, la evolución estelar, la dinámica de los sistemas estelares, la estructura de la Galaxia, la detección de sistemas planetarios, la determinación de órbitas de cuerpos pequeños del Sistema Solar (Walter y Sovers, 2000, p. 209).

Hasta el presente, la última versión *Gaia* Early Data Release 3 -*Gaia* EDR3- (Gaia Collaboration 2021) es completo entre $12 < G < 17$, las incertezas en el paralaje son menores a 0,01 msa para $G < 15$, alrededor de 0,02 msa para $G = 17$ y 0,1 msa para $G = 20$; para las componentes de los movimientos propios sus incertezas son del orden de 0,03 msa/año para $G < 15$, alrededor de 0,1 msa/año para $G = 17$ y 0,6 msa/año para $G = 20$. Las velocidades radiales se listan para 6 millones de estrellas con $4 < G < 13$. La Época del catálogo es J2016.0

Recientemente, la XXXI Asamblea General de la Unión Astronómica Internacional (IAU) ha resuelto que el marco celeste *Gaia* en longitudes de onda del visible basado únicamente en fuentes extragalácticas, *Gaia*-CRF3, materializa el ICRS en el rango óptico desde el 1 de enero de 2022 (Resolución B3 XXXI Asamblea Gral de la IAU, 2021).

Un producto muy valioso del *Gaia* EDR3 es el catálogo que contiene la estimación de distancias de 1470 millones de estrellas mediante un enfoque probabilístico de las paralajes y sus errores utilizando un modelo tridimensional de la Galaxia que incluye la extinción estelar (Bailer-Jones et al, 2021). No se debe olvidar que el alto valor del error relativo de las paralajes de la mayoría de este conjunto de estrellas –por ser lejanas o débiles- descarta la simple inversión de la paralaje para obtener la distancia. La distancia de una estrella, parámetro fundamental en la Astrofísica, debe estimarse aplicando un modelo de estas características a la paralaje. La información actualizada de la misión se encuentra disponible en <https://www.cosmos.esa.int/web/gaia/home>.

Hasta el presente, la última versión *Gaia* Data Release 3 -*Gaia* EDR3- (Gaia Collaboration 2022) combina la solución astrométrica completa (coordenadas, movimiento propio y paralaje) presentada en *Gaia* Early Data Release 3 -*Gaia* EDR3- (Gaia Collaboration 2020) con nuevos productos astrofísicos, mapa de extinción galáctica, velocidades radiales para 33 millones de estrellas con $4 < G < 13$, como así también la identificación de las estrellas en Hipparcos, Tycho-2 y numerosos catálogos fotométricos. *Gaia* EDR3 contiene aproximadamente 1460 millones de estrellas, con límite de magnitud $3 < G < 21$, las incertezas en la paralaje son menores a 0.01mas para $G < 15$, alrededor de 0.02mas para $G = 17$ y 0.1mas para $G = 20$; para las componentes de los movimientos propios sus incertezas son del orden de 0.03 mas/año para $G < 15$, alrededor de 0.1mas/año para $G = 17$ y 0.6 mas/año para $G = 20$. La época del catálogo es J2016.0

Referencias

- Bailer-Jones, C. A. L., Rybizki, J., Fouesneau, M., Demleitner, M., Andrae, R. (2021) Estimating Distances from Parallaxes. V. Geometric and Photogeometric Distances to 1.47 Billion Stars in Gaia Early Data Release 3. *Astronomical Journal*, 161,147-175
- Fricke, W., Schwan, H., Lederle, T., Bastian, U., Bien, R., Burkhardt, G., Du Mont, B., Hering, R., Jährling, R., Jahreiß, H., Röser, S., Schwedtfeger, H.-M., Walter, H. G. (1988) Fifth Fundamental Catalogue (FK5). Part 1. The Basic Fundamental Stars. *Veroeff. Astron. Rechen-Inst.*, Vol. 32, 1-106.

- Fricke, W. , Schwan, H. , Corbin, T. , Bastian, U. , Bien, R. , Cole, C. , Jackson, E., Jährling, R. , Jahreiß, H. ,Lederle, T. Röser, S. (1991) *Fundamental Catalogue (FK 5), Part II: The FK5 Extension - New Fundamental Stars. Veroeff. Astron. Rechen-Inst.*, Vol. 33, 1-146
- Evans, D.W., Riello, M. De Angeli, F., Carrasco, J.M. et al (2018). Gaia Data Release 2. Photometric content and validation. *Astron. Astrophys*, 616, A4, 1-21.
- ESA (1997) The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission. *ESA Publications Division*, ESA SP1200.
- Gaia Collaboration, Brown, A.G.A. et al (2018) Gaia Data Release 2. Summary of the contents and survey properties. *Astron. Astrophys*, 616, A1, 1-22.
- Gaia Collaboration, Brown, A.G.A. et al (2021). Gaia Early Data Release 3. Summary of the contents and survey properties. *Astron. Astrophys*, 649, A1, 1-20.
- Gaia Collaboration (2022) Gaia Data Release 3. Part 1. *arXiv:2208.00211*. Disponible en. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2208.00211>
- Green, R.M. (1988). *Spherical Astronomy*. 2da edición. Cambridge University Press
- Hog E., Fabricius C., Makarov V.V., Urban S., Corbin T., Wycoff G., Bastian U., Schwekendiek P., Wicenec A. (2000). The Tycho-2 Catalogue of the 2.5 Million Brightest Stars, *Astron. Astrophys*, 355, L27-L30
- IERS, (2010). IERS Technical Note 36, en *IERS Conventions (2010)*, Petit, G. & Luzum, B. (eds). <http://www.iers.org/IERS/EN/Publications/TechnicalNotes/TechnicalNotes.html>
- Jenkins, L. F. (1963). *General catalogue of trigonometric stellar parallaxes*. New Haven, CT. Yale University Observatory.
- Mueller, I. I.(1969). *Spherical and Practical Astronomy as Applied to Geodesy*. New York. Editorial: Frederic Ungar Publishing CO.
- The Hipparcos and Tycho catalogues (1997). *Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA Hipparcos Space Astrometry Mission*. ESA Publications Division, ESA SP Series vol 1200.
- van Altena, W. F., Lee, J. T., Hoffleit, E. D. (1995). *The general catalogue of trigonometric stellar parallaxes*. Editorial: Yale University Observatory, 4ta edición
- van Leeuwen, F. (2007). Validation of the new Hipparcos reduction. *Astron. Astrophys*, 474, 653-664
- Walter, H.G., Sovers, O.J. (2000). *Astrometry of Fundamental Catalogues. The evolution from Optical to Radio reference Frames*. Springer.
- Woolard, E.W, Clemence, G.M. (1966). *Spherical Astronomy*. Academic Press Inc.