

ASTROMETRÍA EXTRAMERIDIANA EN CERRO CALAN

F. Noël

Departamento de Astronomía
Universidad de Chile

RESUMEN. Considerando que uno de los objetivos esenciales de la Astrometría es la determinación de posiciones y movimientos celestes, la construcción de un sistema de referencia inercial debe ser parte fundamental de esos objetivos. Se analizan brevemente los problemas que implica la construcción de un sistema de referencia inercial y sus soluciones actualmente en desarrollo mediante técnicas modernas. Dentro de este contexto, se describen las contribuciones a la Astronomía Fundamental realizadas en el Observatorio de Cerro Calán, Santiago, utilizando métodos de astrometría extrameridiana.

ABSTRACT. If one of the main purposes of Astrometry is the determination of celestial positions and motions, the construction of an inertial reference frame must be a fundamental aspect of these purposes. The problems for the construction of an inertial reference frame and their solutions, now in progress using modern techniques, are briefly reviewed. The contributions made in this context to Fundamental Astronomy at Cerro Calán Observatory, Santiago, using extrameridian astrometrical methods, are described.

Key words: ASTROMETRY

I. INTRODUCCION

El objetivo fundamental de la Astrometría es la medida de posición y movimiento de los cuerpos celestes. El movimiento se mide en forma indirecta, observando las variaciones de las coordenadas a lo largo del tiempo. Esto exige la realización previa de una referencia de espacio y tiempo. Si la descripción de los movimientos celestes sólo tendrá un carácter cinemático, no será muy importante el sistema de referencia respecto del cual se miden dichos movimientos. Sin embargo, una descripción dinámica de tales movimientos, deberá hacerse necesariamente respecto de un sistema de referencia inercial. La construcción de tal sistema es una de las grandes tareas de la Astrometría. Dentro de la precisión actual de las medidas astrométricas se considera que un sistema de referencia ligado al baricentro del sistema solar, es una aproximación satisfactoria a un sistema inercial. Tal sistema se materializa por un sistema de coordenadas ecuatoriales baricéntricas definido por tres elementos fundamentales:

- Posiciones de un conjunto de estrellas para una época fundamental T_0 .
- Movimientos propios de esas estrellas para T_0 .
- Constante de precesión.

Las posiciones y movimientos propios de este conjunto de estrellas se dan en lo que se denomina un Catálogo Fundamental o Sistema Fundamental de Referencia.

Ahora bien, la construcción de un sistema de referencia inercial se ha efectuado hasta ahora mediante observaciones astrométricas realizadas desde la superficie de la Tierra. Dichas observaciones proporcionan posiciones topocéntricas de los astros para una

época T. Su reducción al sistema baricéntrico para la época fundamental T_0 , podemos ilustrarla en forma simplificada mediante la relación entre dos sistemas de coordenadas, uno ligado a la Tierra en un instante T, el sistema de referencia terrestre (SRT), y el otro ligado al baricentro del sistema solar para el instante T_0 , el sistema de referencia inercial o sistema fundamental de referencia (SFR):

$$1) \quad \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}_{T_0}^{\text{SFR}} = |N| |P| \begin{bmatrix} |S| \\ x \\ y \\ z \end{bmatrix}_T^{\text{SRT}} + dt \begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \pi_x \\ \pi_y \\ \pi_z \end{bmatrix}$$

en que $|N|$, $|P|$ y $|S|$ son matrices de rotación por nutación, por precesión y por movimiento del polo y rotación de la Tierra respectivamente; μ_x , μ_y , μ_z es el vector movimiento propio, k_x , k_y , k_z es el vector aberración anual y π_x , π_y , π_z es el vector paralaje. Además, $dt = T_0 - T$.

La construcción de las matrices $|P|$ y $|N|$ y del vector $|k_x \ k_y \ k_z|$ implica la determinación de algunas de las constantes fundamentales de la Astronomía: Precesión, nutación y aberración. Por otra parte, en la ecuación 1) intervienen además el paralaje anual y los parámetros de orientación de la Tierra en el espacio: TU_1 y coordenadas del polo instantáneo de rotación. La obtención de toda esta información también forma parte de los objetivos de la Astrometría.

II. SISTEMAS FUNDAMENTALES DE REFERENCIA

Dijimos que un catálogo fundamental y un valor adoptado de la constante de precesión materializan la mejor aproximación a un sistema de referencia inercial lograda hasta ahora. Un catálogo fundamental se construye a partir de observaciones absolutas y diferenciales realizadas en ciertas épocas. Las observaciones absolutas determinan el sistema de posiciones y de movimientos propios para una cierta época media. Observaciones absolutas y diferenciales determinan valores individuales de posiciones y movimientos propios dentro del sistema establecido (Fricke and Kopff 1963). El sistema de coordenadas obtenido deberá servir como sistema de referencia para la medida de otras posiciones y otros movimientos y en problemas tales como estudios de movimientos estelares, medida de paralajes trigonométricos, dinámica del sistema solar, medida de los parámetros de orientación de la Tierra, geodesia, investigaciones espaciales, etc.

Un sistema de referencia debe ser homogéneo, lo cual significa que las posiciones y movimientos propios de las estrellas en zonas diferentes y limitadas del cielo permitan determinar el Equinoccio y el Ecuador con la misma precisión. Además debe tener una densidad apropiada de estrellas, de modo que aún en áreas relativamente pequeñas del cielo sea posible encontrar un número suficiente de estrellas de referencia.

Puesto que Ecuador, Equinoccio y estrellas están en continuo movimiento, el sistema de referencia orientado para una cierta época debe ser reducible a otra época cualquiera. Esto exige conocer con precisión, además de los movimientos propios de las estrellas fundamentales, la constante de precesión. La determinación de la constante de precesión es una de las tareas más importantes y más difíciles de la Astrometría. Es equivalente a medir la rotación absoluta del sistema de referencia, lo cual significa determinar una dirección fija en el espacio. La causa de las dificultades para determinar la precesión se ilustra examinando las bien conocidas ecuaciones que relacionan las variaciones seculares de las coordenadas estelares con el movimiento propio y con la precesión:

$$2) \quad \frac{da}{dT} = \mu\alpha + (m + n \operatorname{sen} \alpha \tan \delta), \quad \frac{d\delta}{dT} = \mu\delta + n \cos \alpha .$$

Las variaciones seculares da/dT y $d\delta/dT$ son las cantidades directamente medidas y corresponden a la variación total de las coordenadas ecuatoriales con respecto al sistema

móvil de coordenadas celestes. La rotación del sistema de coordenadas está expresado por la precesión general en ascensión recta m y en declinación n . No obstante, la información que interesa en dinámica estelar es el movimiento propio $\mu\alpha$, $\mu\delta$ con respecto a un sistema de referencia fijo, lo cual exigirá conocer con exactitud los parámetros m y n , derivados de la constante de precesión general en longitud celeste. Obviamente un error en el valor adoptado de la precesión introducirá errores sistemáticos en los movimientos propios. Si se supone una distribución gaussiana de los movimientos propios podremos aplicar las ecuaciones 2) a un número suficientemente grande de estrellas distribuidas uniformemente en la esfera celeste y obtener precesión y movimientos propios mediante una solución de cuadrados mínimos. Este ha sido el método más usado en el pasado para obtener la constante de precesión y ha sido además una de las causas de los errores de la constante de precesión adoptada y en consecuencia de errores sistemáticos en los movimientos propios obtenidos. En efecto, la existencia de la rotación galáctica introduce efectos sistemáticos en los movimientos propios y por lo tanto no es lícito asumir una distribución gaussiana de los movimientos propios (Clemence 1958, 1963). Esto hace bastante compleja la tarea de separar en las variaciones seculares, el efecto de precesión y movimiento propio. Una parte muy significativa de las deficiencias de los sistemas fundamentales de referencia adoptados por la Astronomía, han sido originadas por errores sistemáticos en el sistema de movimientos propios y en un error en el valor adoptado de la constante de precesión.

III. LOS CATALOGOS FUNDAMENTALES FK4 y FK5.

El Catálogo Fundamental FK4, compilado por el Astronomischen Rechen-Institut de Heidelberg, Alemania Federal, fué adoptado en 1963 por la Unión Astronómica Internacional como Sistema Fundamental de Referencia de la Astronomía. El FK4 contiene 1535 estrellas, las llamadas estrellas fundamentales. La precisión estimada del FK4 es de 0.04" en posición y de 0.002"/año en movimiento propio (Hog 1980). Estas cifras representan lo mejor logrado por la astrometría hacia los años cincuenta. Sin embargo el FK4 adolece de serias deficiencias. Algunas de ellas son:

- Escaso número de estrellas, limitadas además a estrellas más brillantes que magnitud 7.5. Las 1535 estrellas del FK4 dan una densidad de 0.04 estrellas por grado cuadrado. La densidad ideal sería de a lo menos una estrella por grado cuadrado y la inclusión de estrellas fundamentales más débiles.

- La constante de precesión utilizada hasta 1983 fué la constante de precesión de Newcomb. Determinaciones de la precesión posteriores a 1900, han coincidido en demostrar que la precesión de Newcomb requiere de una corrección apreciable. Puesto que todos los sistemas fundamentales de posiciones compilados después de 1900 están basados en esa constante de precesión (Fricke 1972), ninguno de ellos, incluido el FK4, están exentos de los efectos de una rotación espuria que produce una precesión incorrecta. Además del efecto del error de la precesión, los movimientos propios en ascensión recta del FK4 requieren de una corrección constante del orden de un segundo de arco por siglo. Este último efecto se traduce en una corrección, $E(T)$, al equinoccio del FK4 dada por:

$$3) \quad E(T) = 0.035s \pm 0.003s + (T-19.50)(0.085s \pm 0.10s) ,$$

en la cual T está expresado en siglos. De aquí se deduce que hacia 1950.0 las ascensiones rectas del FK4 requerían de una corrección de +0.035s y sus movimientos propios en ascensión recta requieren de una corrección de 0.085s por siglo (Fricke 1980).

- Errores sistemáticos de apreciable magnitud en el hemisferio sur, especialmente al sur de -35° de declinación, impiden considerar al FK4 como un sistema de referencia homogéneo (Anguita and Noël 1969; Fricke 1972). Sobre el descubrimiento de tales errores hablaremos más adelante.

Al margen de las deficiencias anteriormente consideradas del FK4, debe entenderse que un sistema de referencia materializado mediante el sistema de posiciones y movimientos propios de un catálogo fundamental, tiene una vida útil limitada. El error de sus movimientos propios va deteriorando la precisión del catálogo con el transcurso del tiempo. La precisión en posiciones ($\pm 0.04''$) y movimientos propios ($\pm 0.002''/\text{año}$) del FK4, dadas más arriba, debe considerarse válida para 1930, que es aproximadamente el promedio de las épocas

medias de observación de los catálogos que participaron en la compilación del FK4. De acuerdo con esta precisión, el error acumulado hacia 1980, alcanzaba en promedio a $\pm 0.14''$. Hacia 1963, año en que se comenzó a utilizar el FK4 como Sistema Fundamental de Referencia, el error acumulado ya alcanzaba $\pm 0.11''$.

De acuerdo con resoluciones previas de la Unión Astronómica Internacional, en 1988 se introdujo un nuevo Catálogo Fundamental, el FK5, como sistema de referencia de la Astronomía. Con el FK5 se espera superar en gran medida las deficiencias del FK4 reseñadas más arriba. Junto con el FK5, se introdujo además un nuevo sistema de constantes astrométricas, incluyendo un valor mejorado de la precesión y una nueva teoría de la nutación (Kaplan 1981). Se espera que con los cambios introducidos el nuevo sistema fundamental de referencia sea una mejor aproximación a un sistema inercial. El FK5 incluirá estrellas hasta de magnitud 9.2 (Fricke 1980) y la densidad será de aproximadamente 0.1 estrellas por grado cuadrado, lo cual si bien constituye una mejora considerable con respecto al FK4, sigue siendo insuficiente.

IV. PRINCIPIOS DE ASTROMETRIA EXTRAMERIDIANA

La astrometría de campo extendido ha estado basada tradicionalmente en observaciones meridianas efectuadas mediante instrumentos de tránsito y círculos meridianos. El círculo meridiano permite establecer el sistema de coordenadas ecuatoriales con gran precisión en base a principios geométricos que desde un punto de vista conceptual son muy simples (Clemence 1963). Sin embargo, la implementación práctica de estos principios exige una investigación compleja del sistema instrumental y el control de una serie de parámetros instrumentales. La gran ventaja del círculo meridiano es la posibilidad de determinar en forma absoluta las coordenadas ecuatoriales.

En la década de los años cincuenta se comenzó a aplicar en Francia el método de observación de alturas iguales en astrometría de campo extendido. Dicho método se implementó con el Astrolabio de Danjon desarrollado por el Profesor André Danjon en el Observatorio de Paris. El astrolabio consiste esencialmente en un telescopio horizontal asociado con un prisma equilátero colocado delante del objetivo y un espejo de mercurio ubicado bajo el prisma. Esta configuración permite establecer automáticamente una distancia cenital fijada por el ángulo del prisma y observar el tránsito de los astros por la almicantrada correspondiente (Danjon 1960). La observación del astro podrá efectuarse cuando éste transita por la almicantrada tanto al este como al oeste del meridiano. Se obtiene un registro automático del tiempo de dicho tránsito mediante un reloj de precisión asociado al astrolabio. La ventaja del astrolabio de Danjon es que la única constante instrumental es el ángulo del prisma. Su desventaja es que sólo es posible observar estrellas más brillantes que magnitud 6 y únicamente, por lo menos hasta ahora, de modo diferencial.

De acuerdo con los principios geométricos del método de alturas iguales, la observación de un estrella i en el astrolabio permite establecer la siguiente ecuación de condición:

$$4) \quad 15 dT \cos \phi_0 \sin A_1 + d\phi \cos A_1 - dz + \delta h_1 = 0 ,$$

en la cual "dT" es la corrección del reloj (R) utilizado, en el sentido TUO - R; "d ϕ " es la diferencia entre la latitud observada (ϕ) y la latitud adoptada (ϕ_0) del instrumento y "dz" es la diferencia entre el ángulo observado y el ángulo adoptado del prisma. A_1 es el azimut de la estrella i y δh_1 es la diferencia entre la distancia cenital observada y la distancia cenital calculada para la estrella i , incluyendo la refracción atmosférica. La distancia cenital calculada será función de la posición aparente de la estrella deducida del catálogo y de la posición geográfica adoptada del punto de observación. La distancia cenital observada será función de la posición geográfica efectiva del instrumento en el instante de la observación. La observación de n estrellas, dará un sistema de n ecuaciones semejantes a 4). Una solución de cuadrados mínimos permite obtener los valores más probables de las incógnitas dT, d ϕ y dz (Débarbat et Guinot 1970).

La ecuación 4) sólo se cumplirá rigurosamente en condiciones ideales. En la práctica los inevitables errores de observación y lo más importante, eventuales errores en la posición aparente calculada de la estrella, dejarán aparecer un residuo r_1 , de modo que:

$$5) \quad 15 \, dT \cos \varphi_0 \operatorname{sen} A_1 + d\varphi \cos A_1 - dz + \delta h_1 = r_1.$$

Al cabo de n observaciones de la estrella i se podrá calcular un promedio R_i de los r_i individuales dados por cada observación. Si R_i tiene un valor significativo, será lícito suponer que la posición aparente de la estrella tiene un error que será necesario investigar. Eventualmente puede ser originado por un error en la posición media dada por el catálogo. Si $d\alpha$ y $d\delta$ son los eventuales errores en la posición de la estrella i dada por el catálogo, y $R(e)$ y $R(w)$ son los residuos medios de la estrella obtenidos de las observaciones en tránsito al este y al oeste del meridiano respectivamente, se puede demostrar que:

$$6) \quad d\alpha = \frac{R(e) - R(w)}{30 \cos \varphi_0 |\operatorname{sen} A|}, \quad d\delta = -\frac{R(e) + R(w)}{2 \cos S},$$

en que S es el ángulo paraláctico en el instante del tránsito.

V. INVESTIGACION DEL SISTEMA FUNDAMENTAL DE REFERENCIA EN CERRO CALAN

En 1965 y como consecuencia de un acuerdo firmado entre la Universidad de Chile y el Observatorio Europeo Austral (ESO), para realizar un proyecto de investigación conjunta sobre Astrometría en el hemisferio sur, se instaló en el Observatorio de Cerro Calán un astrolabio Danjon. La labor principal del astrolabio se planeó en un principio para la investigación de errores sistemáticos y accidentales del Sistema Fundamental de Referencia en el hemisferio sur. Sin embargo, el campo de acción se extendió posteriormente a la observación de planetas y radio-estrellas. Actualmente se han introducido modificaciones instrumentales con el objeto de efectuar observaciones a 30° y 60° de distancia cenital y efectuar además, observaciones astrométricas del Sol. El astrolabio de Santiago situado en una latitud de -33.4° , permite observar una zona de la esfera celeste comprendida entre -5° y -62° de declinación aproximadamente. En un futuro cercano la zona de observación se extenderá de $+20^\circ$ al polo sur celeste, utilizando un prisma que fija la distancia cenital de observación en 60° .

La aplicación de los principios del método de alturas iguales a la observación sistemática de estrellas del FK4 ha permitido una investigación del Sistema Fundamental de Referencia, que ha sido pionera en el hemisferio sur. Comparando resultados de observaciones meridianas y de astrolabio efectuadas en Cerro Calán, con resultados de observaciones de astrolabio efectuadas en Madagascar (Lefevbre et Guinot 1966), Anguita y Noël (1969) demostraron la existencia de errores sistemáticos de considerable magnitud en el sistema de ascensiones rectas del FK4 en función de la declinación, al sur de -35° de declinación.

Las deficiencias antes mencionadas del FK4 junto con los errores sistemáticos descubiertos, hizo necesaria su revisión y la compilación del nuevo Sistema Fundamental FK5. Utilizando los resultados de las observaciones del astrolabio de Cerro Calán efectuadas durante 1976 se han evaluado las diferencias sistemáticas en ascensión recta y declinación en función de la declinación en el sentido Astrolabio-Catálogo, para el FK4 y FK5 (Schwan 1988). Si bien las diferencias sistemáticas son bastante menores en el FK5, aún parece existir un residuo de error sistemático al sur de -40° de declinación. Resultados más detallados de la investigación del FK5 con el astrolabio de Santiago serán publicados próximamente en Astronomy and Astrophysics. La diferencia absoluta media encontrada en ascensión recta, Astrolabio-Catálogo, es de 0.010s para el FK4 y 0.006s para el FK5. En cuanto a errores accidentales, el FK5 es considerablemente mejor que el FK4. Una medida de la consistencia interna de ambos catálogos lo dan los errores medios con que se obtuvieron las diferencias Astrolabio-Catálogo. Para el FK4 el promedio del error medio de las diferencias en alfa es de $\pm 0.0034s$ y de solo $\pm 0.0014s$ para el FK5. En lo que respecta a las diferencias sistemáticas en declinación, no hay diferencias significativas entre el FK4 y FK5. La diferencia absoluta media entre el astrolabio y ambos catálogos es de 0.03". Esto es precisamente lo que cabía esperar, ya que el Ecuador del FK4 se conservó en el FK5 (Fricke 1980). Sin embargo, en declinación también existe una mejora considerable en el FK5 con respecto a consistencia interna. El promedio del error medio de las diferencias en declinación es de $\pm 0.049''$ para el FK4 y $\pm 0.024''$ para el FK5.

VI. LOS SISTEMAS DE REFERENCIA OPTICO Y DE RADIO

Hemos visto que el FK5 presenta mejoras manifiestas con respecto al FK4 en cuanto a errores sistemáticos y sobre todo en cuanto a consistencia interna. Además, como se dijo anteriormente, el movimiento espurio del Equinoccio del FK4, consecuencia de un error de su sistema de movimientos propios en ascensión recta, ha sido eliminado en el FK5. De acuerdo con esto tendremos que el sistema del FK5 junto con la nueva constante de precesión introducida por la Unión Astronómica Internacional en 1984, materializarán un Sistema Fundamental de Referencia que indudablemente será una mejor aproximación a un sistema inercial que el sistema definido por el FK4 y la antigua constante de precesión de Newcomb. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que la interdependencia entre movimientos propios y constante de precesión que analizamos anteriormente, no ha sido ajena a la realización del FK5. Esto podría traducirse al igual que en el FK4, aún cuando en menor magnitud, en la persistencia de errores sistemáticos en los movimientos propios del FK5 y en un error residual en la nueva constante de precesión. Una forma de superar esta deficiencia en la medida de los movimientos propios es su determinación independiente de la constante de precesión, midiéndolos con respecto a puntos fiduciales que puedan considerarse empíricamente fijos. Tales puntos se pueden materializar mediante las posiciones precisas de objetos remotos como galaxias compactas y especialmente cuasares.

La utilidad de las galaxias como sistema de referencia para medir los movimientos propios de las estrellas fué reconocida por Herschel en 1785 y por Laplace en 1797 (Fricke 1972). No obstante, el escaso brillo de las galaxias y la estructura difusa de las más brillantes, no hicieron posible su uso para tales objetivos.

El descubrimiento durante las últimas décadas de radio-fuentes extragalácticas compactas, los cuasares y el desarrollo de técnicas de radio-interferometría con capacidades para medir coordenadas celestes con precisiones del orden del milisegundo de arco, hacen ahora posible la construcción de una red de puntos fiduciales, cuyo desplazamiento lateral se puede considerar nulo o por lo menos despreciable. Esta red de puntos permitirá definir geoméricamente un sistema de posición que puede considerarse desde un punto de vista empírico, exento de rotación y será por lo tanto la mejor aproximación a un sistema de referencia inercial. La construcción de este sistema de referencia de la radioastronomía o "sistema de radio", será absolutamente independiente de la constante de precesión. Los movimientos medidos respecto de él podrán considerarse movimientos inerciales. Sin embargo, tal sistema tendrá utilidad práctica y podrá servir como Sistema Fundamental de Referencia, sólo en la medida que se haga extensible a todo el cielo. Esto se podrá conseguir enlazando el sistema de radio con el sistema de la astrometría óptica constituido por el FK5 y por el futuro catálogo del satélite astrométrico Hipparcos de la Agencia Espacial Europea (Van Altena 1983). Dicho enlace se implementará mediante objetos celestes cuya posición sea determinable con precisión tanto con las técnicas astrométricas ópticas como con las de radio. Con este fin la Comisión 24 de la Unión Astronómica Internacional creó un grupo de trabajo, el cual ha preparado una lista de de radio-estrellas que servirán para tal objeto.

VII. ASTROMETRIA EXTRAMERIDIANA DE RADIO-ESTRELLAS

Como una contribución al establecimiento de un sistema de referencia basado en la posición de radio-fuentes remotas, se inició en 1984 un programa de observación de radio-estrellas con el astrolabio Danjon en Cerro Calán. Resultados de este programa obtenidos hasta ahora y su comparación con resultados similares obtenidos con otras técnicas de observación han sido publicados en otra parte (Noël 1984, 1987a, 1988). Una de las radio-estrellas del programa es Alpha Scorpii A (FK4 616A). Debido a la latitud del astrolabio y a la declinación de esta estrella, su declinación se obtiene con muy baja precisión desde Santiago, en cambio su ascensión recta se obtiene casi con la precisión máxima del astrolabio (Débarbat et Guinot 1970; Noël et al. 1974). El valor de la ascensión recta deducido de las observaciones de astrolabio efectuadas durante el período 1984-1987 es:

$$16^{\text{h}} 26^{\text{m}} 20.200^{\text{s}} \pm 0.004^{\text{s}}.$$

Este valor es prácticamente coincidente con el deducido de observaciones de radio efectuadas con el VLA (Florkowski et al. 1985):

16h 26m 20.199s ± 0.001s.

La coincidencia de estos valores, ambos referidos a la época B1983.0 y en el sistema del FK4, podrían indicar que las contrapartidas óptica y de radio de Alpha Scorpii A son coincidentes o por lo menos muy cercanas en ascensión recta.

Otra de las radio-estrellas observada con el astrolabio de Santiago es 9 Sagitario. Su posición B1950.0 en el sistema del FK4, deducida de observaciones del período 1984-1987 es:

$$\alpha = 18h 00m 48.406s \pm 0.007s, \quad \delta = -24^\circ 21' 48.26'' \pm 0.22''.$$

La posición de esta estrella obtenida mediante el círculo meridiano automático de Perth (Hog and Von der Heide 1976) es:

$$\alpha = 18h 00m 48.404s (9), \quad \delta = -24^\circ 21' 48.77'' (9),$$

en que la cifra entre paréntesis indica el número de observaciones útiles de la estrella. Se puede apreciar que los valores en ascensión recta son muy consistentes, en cambio hay discrepancia en los valores obtenidos en declinación. Esta discrepancia puede explicarse por la baja precisión con que se obtiene la declinación de 9 Sagitario por las mismas razones dadas para Alpha Scorpii. Por otra parte, la magnitud visual de esta estrella es 6.0, lo cual representa el límite de observación del astrolabio, por lo tanto es muy probable que su observación esté afectada por errores sistemáticos de origen personal. Si esta ecuación personal afecta en el mismo sentido el residuo este y oeste dado por la estrella, tendremos de acuerdo con las ecuaciones 6), que su efecto se cancelará al calcular la ascensión recta, en cambio afectará fuertemente a la declinación.

VIII. ASTROMETRIA EXTRAMERIDIANA DE PLANETAS

Una de las aplicaciones de un Sistema Fundamental de Referencia es servir como sistema de coordenadas inerciales para el estudio del movimiento de los cuerpos del sistema solar de acuerdo con los principios de la Mecánica Clásica y sus eventuales correcciones relativísticas. La confrontación de las efemérides de los miembros del sistema solar con la observación permitirá verificar y mejorar la teoría de sus movimientos. Como contribución a estos objetivos se mantiene desde hace varios años un programa de observaciones de planetas con el astrolabio de Cerro Calán. Los planetas susceptibles de ser observados con el astrolabio son Marte, Júpiter, Saturno y Urano. Urano en particular ha sido observado sistemáticamente desde 1975 (Noël 1987b). Los resultados de esta campaña de observaciones han sido utilizados por el Jet Propulsion Laboratory con motivo del encuentro de la sonda espacial Voyager 2 con Urano en 1986 (Standish 1985).

De las observaciones de Urano efectuadas durante el período 1984-1987 se deduce una diferencia sistemática en ascensión recta en el sentido Astrolabio-Efemérides que alcanza a -0.025s (Noël 1989). Estos resultados están basados en 34 observaciones de pares de tránsitos este y oeste efectuados durante el período indicado. Una diferencia en el mismo sentido de -0.035s se ha deducido de 74 observaciones efectuadas con el círculo meridiano automático de Burdeos, Francia, durante el período 1984-1986 (Rapaport et al. 1987). Estas discrepancias entre posiciones observadas y calculadas de Urano han sido explicadas por deficiencias en la teoría del movimiento del planeta utilizada en el cálculo de sus efemérides (Rapaport et al. 1987).

IX. ASTROMETRIA EXTRAMERIDIANA DEL SOL

En el Centre d'Etudes et de Recherches Géodynamiques et Astronomiques (CERGA) de Grasse, Francia, se comenzó en 1975 un programa de observaciones astrométricas del Sol con un astrolabio Danjon especialmente modificado. El objetivo de este programa es el mejoramiento de los elementos orbitales de la Tierra. Sin embargo, como las observaciones son sensibles al semi-diámetro solar, al cabo de algunos años se contó con un buen número de determinaciones homogéneas y precisas del semi-diámetro del Sol. Durante el período 1975-1982 se observó un conjunto de 842 tránsitos del Sol, obteniéndose un valor medio del semi-

diámetro de $959.37 \pm 0.02''$ reducido a la unidad astronómica. Este valor es más bajo que el valor utilizado por el "American Ephemeris" y por el "Connaissance des Temps". Sin embargo, lo más significativo de los resultados obtenidos, ha sido la detección de una oscilación del semi-diámetro aparente del Sol con un período del orden de 900 días y una amplitud de aproximadamente $0.5''$ (Laclare 1983). Aún es prematuro para sacar conclusiones. Sin embargo, teniendo en cuenta el período de la oscilación encontrada, parece difícil explicarla como un artefacto de las observaciones. Considerando que la confirmación de estos resultados puede ser de gran interés astrofísico, se han introducido las modificaciones necesarias en el astrolabio de Santiago para comenzar durante 1989 un programa de observaciones astrométricas del Sol.

El autor agradece la ayuda que el Observatorio Europeo Austral (ESO) aporta al Proyecto del Astrolabio Danjon del Departamento de Astronomía de la Universidad de Chile. Sin esta considerable ayuda habría sido muy difícil alcanzar los objetivos de este proyecto.

Parte de los resultados presentados en este trabajo se han obtenido dentro del proyecto de investigación N° 491/1988 financiado por el Fondo Nacional de Ciencia y Tecnología (FONDECYT) de Santiago, Chile.

Se agradece al Dr. H. Schwan del Astronomischen Rechen-Institut de Heidelberg, haber puesto gentilmente a disposición del autor una versión en cinta magnética del Catálogo Fundamental (inédito) FK5.

BIBLIOGRAFIA

- Anguita, C. and Noël, F. 1969, *A. J.* **74**, 954.
 Clemence, G. M. 1958, in *Handbook of Physics* eds. E.U. Condon (Mc Graw-Hill Book Co., Inc.), p. 2-60.
 Clemence, G. M. 1963, in *Basic Astronomical Data. Stars and Stellar Systems* eds. K.A. Strand (The University of Chicago Press), p. 1.
 Danjon, A. 1960, in *Telescopes. Stars and Stellar Systems* eds. G.P. Kuiper and B.M. Middlehurst (The University of Chicago Press), p. 115.
 Débarbat, S. et Guinot, B. 1970, *La méthode des hauteurs égales en Astronomie* eds. Gordon and Breach (Paris).
 Florkowski, D.R., Johnston, K.J., Wade, C.M. and de Veigt, C., 1985, *A. J.* **90**, 2381.
 Fricke, W. and Kopff, A. 1963, *Astronomischen Rechen-Institut, Heidelberg, Veröffentlichungen Nr. 10*.
 Fricke, W. 1972, *Ann. Rev. of Astron. Astrophys.* **10**, 107.
 Fricke, W. 1980, *Astronomische Gesellschaft, Mitteilungen Nr. 48*, p. 29.
 Hog, E. and Von der Heide, J. 1976, *Perth 70. A Catalogue of Positions of 24900 Stars*, Hamburg-Bergedorf Publ.
 Hog, E. 1980, *Astronomische Gessellschaft, Mitteilungen Nr. 48*, p. 127.
 Kaplan, G. H. 1981, *USNO, Circular Nr. 163*.
 Laclare, F. 1983, *Astr. Ap.* **125**, 200.
 Lefebvre, M. et Guinot, B. 1966, *Journal des Observateurs* **49**, 387.
 Noël, F., Czuia, K and Guerra, P. 1974, *Astr. Ap. Suppl.* **18**, 135.
 Noël, F. 1984, in *IAU Symposium No. 104, Astrometric Techniques* eds. H.K. Eichhorn and R.J. Leacock (Dordrecht: D. Reidel), p. 715.
 Noël, F. 1987a, *Astr. Ap.* **177**, 310.
 Noël, F. 1987b, *Astr. Ap. Suppl.* **68**, 219.
 Noël, F. 1988, *Astr. Ap. Suppl.* **75**, 239.
 Noël, F. 1989, *Astr. Ap. Suppl.* **77**, 73.
 Rapaport, M., Requième, Y., Mazurier, J.M. and Francou, G. 1987, *Astr. Ap.* **179**, 317.
 Schwan, H. 1988, *Private communication*.
 Standish, E.M. 1985, *Private communication*.
 Van Altena, W. 1983, *Ann. Rev. of Astron. Astrophys.* **21**, 150.

F. Noël: Departamento de Astronomía, Universidad de Chile, Casilla 36-D, Santiago de Chile.