

LA ASTROMETRIA, PROBLEMAS ACTUALES,  
PERSPECTIVAS FUTURAS

Fernando Noël

Departamento de Astronomía  
Universidad de Chile

RESUMEN. La Astrometría proporciona la información básica para la investigación de aspectos fundamentales de la Astronomía: Estructura y dinámica de la galaxia, escala de distancias, dinámica del sistema planetario, constantes fundamentales, rotación de la Tierra, etc. Pese a su importancia, el progreso de las técnicas instrumentales de la Astrometría ha sido particularmente lento. La realización de un sistema inercial de referencia, el objetivo más importante de la Astrometría, aún no ha sido resuelto con una precisión satisfactoria. Sin embargo, dos técnicas nuevas, de precisión y eficiencia sin precedente, la Radioastrometría en operación desde hace algunos años y la Astrometría espacial que se implementará durante la presente década, prometen revolucionar el campo de la Astrometría y de aquellas áreas de la Astrofísica cuya investigación depende de parámetros astrométricos. Se espera que las nuevas técnicas constituyan soluciones a los problemas actuales de Astrometría. No obstante, se estima que aún quedará un amplio campo de aplicación de las técnicas clásicas, cuyos resultados complementarán los de las nuevas técnicas. Tal complemento sólo se ve factible mediante la automatización total de los instrumentos astrométricos clásicos.

ABSTRACT. Astrometry provides basic data for the research of fundamental aspects of Astronomy: Structure and dynamic of the galaxy, cosmic distance scale, dynamic of the planetary system, fundamental constants, rotation of the Earth, etc. In spite of its importance, the progress of the instrumental techniques of Astrometry has been particularly slow. The realization of an inertial reference frame, the most important problem of Astrometry, has not yet been solved with sufficient accuracy. However, Astrometry is now in the midst of unprecedented progress due to new techniques of remarkable precision and efficiency: Radioastrometry already in operation and Space Astrometry which will be implemented in the next years. Both techniques promise a revolution in the field of Astrometry and those areas of Astrophysics which depend on astrometric parameters. It is expected that the new techniques will provide a solution to the present problems of Astrometry. Nevertheless a wide field of application will remain for the classical techniques, whose results will complement those of the new techniques. This complement will be possible only if full automatic methods are introduced in the classical astrometric instruments.

## I. INTRODUCCION

Hasta la 2<sup>a</sup> mitad del S. XIX el propósito de las observaciones astronómicas, en general, era obtener posiciones de los astros con máxima precisión para predecir sus movimientos con la mayor exactitud. Este tipo de actividad es lo que actualmente constituye en gran medida,

el área de investigación de la Astrometría. Si la Astronomía es considerada la más antigua de todas las ciencias, la Astrometría es su campo de especialización más antiguo.

Comparada con el desarrollo alcanzado por la Astrofísica y por la Radioastronomía, especialmente durante las últimas décadas, la Astrometría es hoy un campo relativamente reducido. Sin embargo, a pesar de esto es un campo de gran importancia, y es bueno que así se reconozca ya que la información obtenida de investigaciones astrométricas constituye el fundamento sobre el cual se ha construido todo el edificio de la Astronomía, fundamento que es necesario revisar, corregir y reforzar periódicamente.

La información que aporta la Astrometría es esencialmente posición y movimiento de los astros. La determinación del movimiento se efectúa en forma indirecta, observando la variación de las coordenadas durante el transcurso del tiempo. Esto implica la realización previa de un sistema de referencia y de una escala de medida del tiempo y además plantea uno de los problemas más delicados de la Astrometría: ¿De las variaciones observadas en las coordenadas de los astros qué parte corresponde realmente al movimiento intrínseco de éstos -movimiento propio- y qué parte refleja el movimiento del sistema de coordenadas?. La solución de este problema sólo puede obtenerse mediante un sistema de referencia de direcciones fijas en el espacio, asimilable a un sistema inercial. Tal sistema, objetivo fundamental de la Astrometría, hace posible además la descripción de los movimientos celestes según los postulados de la Mecánica de Newton y permite por otra parte la verificación empírica de esos postulados, a través de lo que ha sido siempre el aspecto más fructífero en el desarrollo de la Ciencia: la confrontación permanente entre teoría y observación.

Los movimientos estelares medidos respecto de un sistema inercial son movimientos propios absolutos y constituyen el material básico en la investigación de la estructura y dinámica de la galaxia. En efecto, la constante A de Oort que describe la rotación galáctica diferencial, es posible determinarla a través de un análisis de movimientos propios, además de otras técnicas. Sin embargo, la constante B que describe la rotación rígida, sólo es determinable directamente a través de los movimientos propios.

Además, movimientos propios y velocidades radiales constituyen el fundamento para la determinación de paralajes estelares, base de la escala de distancias cósmicas, sin la cual no tendríamos sentido emprender investigación alguna sobre la estructura del Universo, uno de los objetivos capitales de la Astronomía.

Las observaciones astrométricas que conducen a las determinaciones de posición y movimiento de los cuerpos celestes se efectúan necesariamente desde un sistema de referencia en movimiento de traslación y rotación ligado a nuestro planeta. Por lo tanto, la reducción de esas observaciones a un sistema de referencia fijo (el sistema inercial), exigirá conocer con precisión los movimientos de la Tierra. Esto implica la determinación de un conjunto de parámetros: precesión, nutación y aberración, los cuales constituyen parte del sistema de constantes fundamentales de la Astronomía, cuya determinación es otro de los objetivos de la Astrometría ligado íntimamente al estudio de la rotación de la Tierra.

La investigación de la rotación de la Tierra -movimiento del polo y variación de su velocidad angular- es un campo de enorme interés científico al margen del interés astrométrico, ya que constituye un medio poderoso para llegar a comprender mejor ciertos procesos geodinámicos. Las características observadas en la rotación de nuestro planeta traducen en gran medida las propiedades y los procesos físicos que ocurren en su interior.

## II. ESTADO ACTUAL DE LA ASTROMETRIA

El progreso de las técnicas de adquisición de datos y de los métodos observacionales de la Astrometría Óptica ha sido hasta hace algunos años particularmente lento (Requiere 1980, Van Altena 1983). Hace unas pocas décadas, tales técnicas y métodos eran prácticamente "artesanales" y aún hoy continúan siéndolo en muchos instrumentos astrométricos en operación, especialmente en nuestra América Latina, lo cual contrasta con la gran cantidad de información que en general es necesario manejar. Esto ha contribuido al escaso interés que despierta la Astrometría, especialmente entre investigadores jóvenes. La actividad en este campo es considerada lenta, aburrida y laboriosa. Además, la participación del observador juega un papel preponderante, con todo lo que ello significa en cuanto a fuente de errores accidentales y sistemáticos.

El error medio en la determinación de coordenadas estelares a comienzos del presente siglo era del orden de  $\pm 0''.3$  para una medida (Débarbat et Levy 1974). Sin embargo, actualmente se estima que para un círculo meridiano automático provisto de micrómetro fotoeléctrico, dicho error medio disminuirá sólo a  $\pm 0''.15$  aproximadamente (Hog 1975). El factor principal que limita la precisión de la Astrometría Óptica es la turbulencia producida por la refracción atmosférica. Por tal razón, aún con la implementación de métodos automáticos impersonales tanto en Astrome-

tría global (observaciones meridianas y con astrolabios) como en Astrometría de campo reducido (Astrometría fotográfica) no se espera un aumento significativo en la precisión de los resultados como consecuencia de la automatización. Se espera sí un aumento considerable en la capacidad de los instrumentos astrométricos para realizar un gran número de observaciones en corto tiempo. De acuerdo con Hog (1975), un antejo meridiano automático podría llegar a realizar hasta 100 observaciones por hora. Sin embargo, el ruido introducido por la atmósfera seguirá siendo la limitante principal de la precisión en Astrometría óptica.

La información astrométrica más precisa con que se cuenta actualmente está resumida en la tabla 1 (Hog, 1980):

TABLA 1

	Sistema	Precisión	N° de estrellas	magnitud límite	Catálogo fuente
Posición	absoluto	$\pm 0''.04$	1500	7.5	FK4
Mov. Prop.	absoluto	$\pm 0''.002/\text{año}^*$	1500	7.5	FK4
Paralajes	relativo	$\pm 0''.013$	7000	12	Jenkins
Paralajes	relativo	$\pm 0''.007$	500	17	USNO

(\*) Base de tiempo 50 años

Estas cifras representan el desarrollo alcanzado por la Astrometría hasta poco después de la primera mitad de este siglo. La poca eficiencia de los métodos astrométricos tradicionales se refleja en el escasísimo número de estrellas para las cuales se ha logrado determinar posición y movimiento propio con precisión máxima. Esas estrellas son las que pertenecen al catálogo fundamental FK4 (Fricke and Kopff 1963) el cual materializa el sistema fundamental de referencia considerado como la mejor aproximación a un sistema inercial realizada hasta ahora.

El FK4 sintetiza la capacidad de la Astrometría fundamental hacia la década de los años cincuenta. Sin embargo, adolece de serias deficiencias, las cuales constituyen los problemas de la Astrometría actual. Algunos de estos problemas se han solucionado por lo menos parcialmente en la nueva versión, el FK5, cuyo sistema será introducido en 1984. La solución de otros en cambio, está dentro de las perspectivas futuras de la Astrometría. Reseñemos brevemente algunas de estas deficiencias:

- Su escaso número de estrellas (1535), limitadas además a estrellas más brillantes que magnitud 7,5, da una densidad de sólo 0,04 estrellas por grado cuadrado. Este número y la magnitud límite, hacen difícil su aplicación como sistema de referencia en Astrometría fotográfica. La densidad ideal sería por lo menos una estrella por grado cuadrado y magnitudes más débiles.
- Para su época media de observación (1930 aproximadamente) el error medio promedio en posición se estimaba en  $\pm 0''.04$ . De acuerdo con la precisión de sus movimientos propios ( $\pm 0''.002/\text{año}$ ), el error acumulado hacia 1980 alcanzaba en promedio, a  $\pm 0''.1$  aproximadamente. Sin embargo, es necesario puntualizar que la magnitud de los errores sistemáticos y accidentales del FK4 en el hemisferio sur es considerablemente mayor que esta cifra (Anguita and Noël 1969).
- Debido a un error sistemático de los movimientos propios en ascensión recta, el sistema del FK4 posee una rotación (movimiento del equinoccio) de aproximadamente  $0''.013$  por año (Fricke 1980).

En el FK5 se espera superar en gran medida los problemas de rotación del sistema de movimientos propios y de errores sistemáticos que hemos reseñado para el FK4.

Junto con la introducción del FK5 se introducirán algunos cambios con los cuales el sistema fundamental de referencia debería ser una aproximación a un sistema inercial significativamente mejor que el sistema del FK4. Los cambios principales que se introducirán son (Kaplan 1981):

- adopción de la nueva constante de precesión y de la nueva teoría de la nutación IAU 1976/80
- eliminación de los términos elípticos de la aberración en las posiciones medias.

- la corrección por aberración anual se calculará respecto de la velocidad orbital total de la Tierra.
- se introducirán correcciones relativísticas para tener en cuenta la desviación de la luz producida por el campo gravitacional del Sol en el cálculo de posiciones aparentes.

En cuanto a número de estrellas, se espera que la cantidad que incluirá el FK5 (hasta magnitud 9,2) de una densidad de 0,1 estrellas por grado cuadrado, lo cual, si bien será mejor que el FK4, seguirá siendo aún insuficiente.

Con respecto a la adopción de un nuevo valor de la constante de precesión y a la rotación del sistema del FK4 como consecuencia de un error sistemático en sus movimientos propios en ascensión recta, cabe agregar lo siguiente: la existencia de tendencias sistemáticas (distribución no gaussiana) en los movimientos propios produce una interacción compleja entre éstos y la precesión por lo cual es difícil separar sus efectos en la variación secular de las coordenadas estelares. Hasta ahora el método más efectivo para determinar la constante de precesión ha sido mediante un análisis de los movimientos propios de un catálogo fundamental, de acuerdo a un cierto modelo de cinemática estelar (Fricke 1967). Por otra parte, si se tiene en cuenta que la determinación de los movimientos propios mediante los métodos de la Astrometría clásica depende necesariamente de la constante de precesión, se concluye que determinación de movimientos propios y de la constante de precesión son mutuamente dependientes. Aún cuando se espera que el sistema de movimientos propios del FK5 y la nueva constante de precesión materializarán una mejor aproximación a un sistema inercial que el FK4, la interdependencia entre movimientos propios y precesión no ha sido ajena a la realización del FK5. Por lo tanto, es probable que como consecuencia de ello, aún persistan errores significativos en los movimientos propios del FK5 y en la nueva constante de precesión. La solución ideal de este problema es la determinación de movimientos propios absolutos, en forma totalmente independiente de la constante de precesión. Tal solución, como se verá más adelante, es posible dentro de las perspectivas futuras de la Astrometría.

### III. NUEVAS TECNICAS

La turbulencia atmosférica pone un límite a la precisión de las observaciones astrométricas ópticas realizadas desde la superficie de la Tierra. Por lo tanto un aumento significativo en la precisión lograda hasta ahora deberá provenir de técnicas diferentes, en las cuales no influyan o influyan poco los problemas de turbulencia atmosférica. Esto se podrá conseguir de dos formas: realizando las observaciones astrométricas fuera de la atmósfera terrestre, vale decir, desde satélites artificiales (Astrometría espacial) o bien utilizando longitudes de onda diferentes a las observadas ahora (Radioastrometría).

El último método ya ha sido implementado por la radioastronomía mediante la interferometría de base muy larga (VBLI), y la interferometría de elementos conectados (CERI) (Counselman 1976). El primer método, la Astrometría espacial, será una realidad dentro de unos pocos años mediante el satélite espacial HIPPARCOS (High precision parallax collecting satellite) de la Agencia Espacial Europea (ESA).

Tanto la radioastrometría como el proyecto Hipparcos significarán un progreso sin precedentes en el desarrollo experimentado hasta ahora por la Astrometría. La primera, por su capacidad para determinar posiciones de radiofuentes compactas con precisiones que superarán 0"001, y el segundo por su capacidad para determinar posición, movimientos propios y paralajes de una enorme cantidad de estrellas (100 000) en un breve intervalo de tiempo (2,5 años) y con errores que se estiman no superiores a 0"002.

#### III.1. La Radioastrometría

La rotación diurna de la línea basal de un radiointerferómetro permite la determinación de la posición del polo instantáneo de rotación de la Tierra y con ello obtener declinaciones absolutas. Sin embargo, no es posible la determinación absoluta de las ascensiones rectas ya que ello implicaría la observación de cuerpos del sistema solar los cuales presentan imágenes difusas para los radio interferómetros y por lo tanto sus posiciones no son determinables con precisión. El sistema de posición radioastrométrico es pues absoluto en declinación. El equinoccio en cambio, se adopta mediante las ascensiones rectas de contrapartidas ópticas de radiofuentes utilizadas como calibradores.

Como dijimos anteriormente la radioastrometría es capaz de determinar posiciones con precisiones que superan en varios órdenes de magnitud la precisión de la astrometría óptica



terrestre. Tal capacidad aplicada a radiofuentes remotas, galaxias compactas y/o cuasares, permite establecer el sistema de referencia largamente soñado por la Astrometría ya que sería la aproximación ideal a un sistema inercial pues empíricamente se puede suponer que la componente transversal del movimiento de dichas radiofuentes debe ser nula o por lo menos despreciable dentro de los cánones de precisión actuales. Los movimientos propios medidos respecto del sistema definido por la posición de radiofuentes lejanas serían absolutos y con ellos se podría determinar la constante de precesión en forma independiente de los modelos adoptados de cinemática estelar.

Sin embargo, la red de punto fiduciales de este sistema estará constituido por un número escaso de radiofuentes lejanas cuyas contrapartidas ópticas son en general más débiles que magnitud 15. Además, la radiointerferometría no permite obtener por sí misma, información sobre distancias y movimientos propios para un número considerable de estrellas, como es necesario en problemas de estructura galáctica y astrofísica estelar. Por lo tanto, el sistema de posición de radio tendrá utilidad práctica sólo si se extiende al mayor número posible de objetos, o lo que es equivalente enlazándolo con el sistema de referencia óptico. Este enlace puede hacerse por intermedio de radiofuentes con contrapartidas ópticas cuya magnitud asegure una buena determinación de su posición en el sistema óptico mediante las técnicas de la Astrometría fundamental. La tarea no es fácil ya que hasta ahora el número de radioestrellas conocidas es bajo, como así mismo lo es en general, la intensidad de su emisión en radio (de Vejt 1982).

### III.2. La Astrometría Espacial

La Astrometría espacial estará centrada principalmente en el proyecto Hipparcos. El telescopio espacial de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los EE.UU. (NASA), cuyo lanzamiento está previsto para 1985, dedicará aproximadamente un 15% de su tiempo de observación a programas de carácter astrométrico (Duncombe et al. 1982, Van Altena 1978). De estos programas cabe destacar los que se espera realizar mediante uno de los tres sensores de guiage fino (SGF) ya que los resultados complementarán ciertos aspectos importantísimos del proyecto Hipparcos. El SGF tiene la capacidad de determinar posiciones relativas de objetos entre magnitud 4 y 17 con precisiones del orden de  $\pm 0''.002$ . Se le utilizará en la obtención de paralajes cuyas precisiones se estiman en  $\pm 0''.0005$ , y en la determinación de posiciones y movimientos propios de estrellas brillantes respecto de cuasares.

El satélite Hipparcos ha sido diseñado para una dedicación exclusiva a Astrometría. Se determinarán los parámetros astrométricos de más o menos 100 000 estrellas (hasta magnitud 11) con las siguientes precisiones:

posición:	$\pm 0''.002$
movimiento propio:	$\pm 0''.002/\text{año}$
paralaje:	$\pm 0''.002$

La precisión de los movimientos propios será la misma que la del FK4 (tabla 1) sin embargo, es necesario considerar que la base de tiempo de los movimientos propios del FK4 es del orden de 50 años, en cambio en Hipparcos será sólo de 2,5 años lapso correspondiente a la duración aproximada del proyecto. Los paralajes podrán considerarse semi-absolutos ya que se obtendrán de observaciones separadas en aproximadamente  $90^\circ$ .

Si bien el sistema que se espera obtener del proyecto Hipparcos será de gran precisión, con errores sistemáticos del orden de  $0''.001$ , no será sin embargo, un sistema inercial, ya que probablemente tendrá una rotación residual. Esta rotación podrá ser medida enlazándolo con el sistema de referencia absoluto de la radioastrometría.

Un aporte importante a la realización de este enlace serán las posiciones y movimientos propios de estrellas brillantes respecto de cuasares determinados por el Telescopio Espacial. La Astrometría realizada por Hipparcos y por el Telescopio Espacial serán más bien complementarias y no competitivas.

### IV. CONCLUSIONES

Después de un pasado durante el cual el progreso técnico ha sido muy lento, y la Astrometría ha entrado definitivamente en una etapa de cambios renovadores, la radioastrometría y la Astrometría espacial, deberán producir necesariamente un impacto no sólo dentro del campo de la Astrometría, sino también de muchas áreas de la Astrofísica cuyo desarrollo depende de información astrométrica.

Nos hemos referido a la precisión sin precedentes de la radiointerferometría y a la

eficiencia de la Astrometría espacial que le permitirá obtener en poco tiempo parámetros astrométricos muy precisos de una enorme cantidad de estrellas. Ante el advenimiento de tales métodos, cabe razonablemente preguntarse: ¿Frente a tales perspectivas tienen los métodos clásicos de la Astrometría un papel importante aún que jugar? ¿Se justifica mantener proyectos astrométricos basados en observaciones meridianas, de astrolabios u otros instrumentos?

Hay varias razones que dan respuestas afirmativas a estas preguntas:

Las observaciones astrométricas clásicas deberán seguir jugando un papel importante en la determinación de posiciones de cuerpos del sistema solar. Si el proyecto Hipparcos se desarrolla de acuerdo a lo previsto, esas determinaciones tendrán en Hipparcos un sistema de referencia denso, homogéneo y de gran precisión. Las observaciones de cuerpos del sistema solar permitirán enlazar el sistema de Hipparcos con el sistema de referencia definido dinámicamente por los movimientos del sistema planetario (Requieme 1980, Fricke 1982).

La densidad del sistema de Hipparcos será relativamente baja entre las magnitudes 10 a 13. Mediante observaciones meridianas diferenciales y utilizando las estrellas más brillantes de Hipparcos como estrellas de referencia será posible extender el sistema dentro de esos rangos de magnitud (Requieme 1980).

Observaciones astrométricas desde la superficie de la Tierra y desde el espacio permitirán separar los efectos introducidos por la rotación de la Tierra. Las observaciones astrométricas espaciales obviamente no estarán afectadas por la rotación de la Tierra, variación de latitud y efectos de flexión instrumental producidos por la gravitación terrestre.

Las nuevas técnicas astrométricas en vez de dejar obsoleta a la Astrometría clásica, más bien estimularán su actividad por lo cual ambas técnicas pasarán a ser complementarias. Sin embargo, esta complementación, sólo será posible si la Astrometría clásica se hace más eficiente, lo cual significa la automatización total de sus métodos.

Esto último es especialmente importante para la Astrometría que se realiza en nuestra América Latina. Es bien sabido que por razones históricas y geográficas la actividad astrométrica en el hemisferio sur ha sido considerablemente inferior a la del hemisferio norte. Así por ejemplo, de los 243 catálogos de posición que de una u otra forma se han utilizado en la compilación del Catálogo Fundamental FK4, sólo un 20% aproximadamente, está basado en observaciones realizadas desde el hemisferio sur (Fricke and Kopff 1963). Esto se ve reflejado claramente en la magnitud considerable de los errores sistemáticos e individuales del FK4 al sur de  $-35^\circ$  de declinación (Noël et al. 1974).

Los observatorios astrométricos latinoamericanos, casi todos situados entre el Ecuador y  $-53^\circ$  de latitud tienen una ubicación privilegiada para hacer un aporte significativo a la Astrometría que se seguirá realizando en base a observaciones meridianas y de astrolabios. Sin embargo, la importancia de este aporte será proporcional al nivel de automatización que se introduzca en las técnicas de observación.

#### REFERENCIAS

- Anguita, C. and Noel, F. 1969, *A. J.* 74, 954.  
 Counselman, C.C. 1976, *Ann. Rev. of Astron. Astrophys.* 14, 197.  
 Débarbat, S. et Levy, J. 1975, *L'Astronomie*, Janvier 1975, 7.  
 Fricke, W. and Kopff, A. 1963, *Astronomischen Rechen Instituts*, Heidelberg, Veröffentlichungen Nr. 10.  
 Fricke, W. 1967, *A. J.* 72, 642.  
 Fricke, W. 1980, *Astronomische Gesellschaft*, Mitteilungen Nr. 48, 29.  
 Fricke, W. 1982, *ESA Colloquium: "The Scientific Aspects of the Hipparcos Mission"*, Proceedings pp. 43.  
 Hog, E. 1975, *ESRO Symposium: "Space Astrometry"*, Proceedings pp. 59.  
 Hog, E. 1980, *Astronomische Gesellschaft*, Mitteilungen Nr. 48, 127.  
 Kaplan, G.H. *USNO, Circular* Nr. 163.  
 Noël, F., Czuia, K. and Guerra, P. 1974, *Astr. Ap. Suppl.* 18, 135.  
 Requieme, Y. 1980, *Astronomische Gesellschaft*, Mitteilungen Nr. 48, 109.  
 Van Altena, W. 1983, *Ann. Rev. Astr. Ap.* 21, 131.  
 de Vegt, Chr. 1982, *Hamburger Sternwarte*, Abh. Band 10, 129.

Fernando Noël: Departamento de Astronomía, Observatorio Astronómico Nacional Cerro Calán, Universidad de Chile, Casilla 36-D, Santiago, Chile.