

Astrometría relativa de estrellas binarias

Apunte para los talleres de Observación Astronómica

Prof. Luis G. López

Observatorio Héctor Ottonello

Colegio Nacional de Buenos Aires

<http://www.astro.cnba.uba.ar>

16 de abril de 2007

1. Breve introducción y consideraciones generales

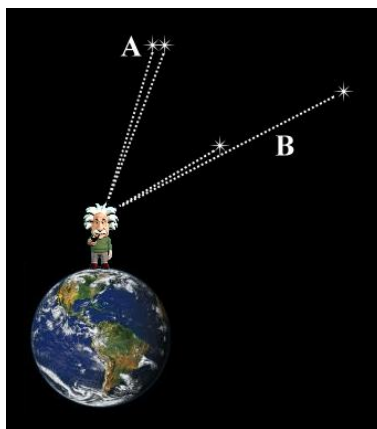
Muchas de las estrellas que observamos en el cielo no se presentan aisladas sino en pares¹. Esta cercanía estelar puede ser aparente o real. Las **dobles ópticas** son aquellas que, aun estando muy alejadas entre sí, por un efecto de perspectiva se ven desde la Tierra en una dirección casi coincidente (ver figura 1). Estas **dobles**, si bien pueden resultar muy vistosas, no son de mucho interés a la hora de estudiarlas ya que no tienen ninguna conexión física entre sí. Por el contrario, el estudio de las estrellas binarias **físicas** ha sido y sigue siendo sumamente provechoso, como comentaremos en la sección “**Finalidad del estudio de las estrellas binarias**”.

Las **binarias físicas** pueden a su vez subdividirse en varias categorías² de las cuales a nosotros, en el marco de este apunte, nos interesan las llamadas

¹También se encuentran, como es lógico, agrupaciones de más de dos estrellas. Cuando estos grupos no exceden los seis miembros se suele hablar de **estrellas múltiples**. Cuando su número es mayor, se los comienza a tratar como **cúmulos**; por supuesto, el límite entre ambos es difuso y en último caso, convencional. Todo lo que se diga en este apunte acerca de las binarias es aplicable a los sistemas múltiples, con las consideraciones del caso, que se tratarán en particular.

²Los distintos tipos de binarias físicas son estudiados en el **Curso General de Astronomía**, que se dicta en este Observatorio.

Figura 1: En este diagrama (fuera de escala) las dos estrellas **A** forman un par **físico**, mientras que las **B** constituyen una doble **óptica**.



visuales por ser aquellas en las que sus componentes pueden diferenciarse (en la jerga astronómica, “*resolve*”) distintamente utilizando un telescopio, o a veces incluso con prismáticos.

Los sistemas físicos, a lo largo del tiempo, ponen de manifiesto su naturaleza al presentar un movimiento orbital común alrededor de un centro de masas debido a la gravedad. Estos movimientos pueden ser sumamente lentos, por lo que para poder apreciarlos son necesarias muchas observaciones, bastante espaciadas en el tiempo, lo que hace que el observador termine formando parte de un trabajo de colaboración científica que puede llegar a involucrar a varias generaciones.

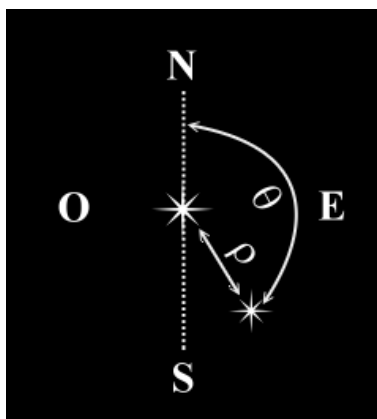
La gran abundancia de estrellas dobles, el hecho de que no sea necesario observarlas a una hora precisa (al no tratarse de fenómenos instantáneos), la poca o nula influencia que ejerce la contaminación lumínica o la luz de la Luna en su observación, hacen del estudio de las estrellas binarias uno de los más convenientes para quien se inicia en el uso serio y sistemático del instrumental astronómico.

2. Técnicas de observación y medición

Son varios los parámetros que pueden medirse en un par: su mutua posición relativa, el brillo de sus componentes, e incluso sus tipos espectrales³. Sin embargo en nuestro taller nos concentraremos, como primer paso, en el estudio puramente astrométrico de los mismos.

Para determinar unívocamente la posición relativa en la esfera celeste⁴ de las componentes de una doble son necesarias dos magnitudes. Por un lado, el **ángulo de posición** (θ), que es el ángulo con centro en la estrella más brillante del par (a la que llamaremos “primaria” o “principal”) entre la dirección Sur–Norte celeste y la dirección que une las dos estrellas, medido desde la dirección Norte hacia el Este de 0° a 360° . En el caso de que ambas tengan el mismo brillo, consideraremos como primaria a la ubicada más al norte. Además del ángulo de posición, es necesario determinar la **distancia angular** (ρ), que es el ángulo con centro en el observador entre ambas estrellas. En otras palabras, es la distancia angular que las separa en la esfera celeste.

Figura 2: Ángulo de posición (θ) y separación angular (ρ).



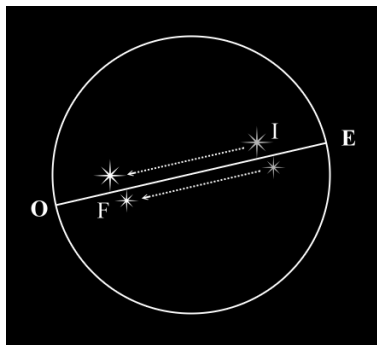
³El **tipo espectral** de una estrella está relacionado con su temperatura superficial; este tema y otros que se tocan en el presente texto se desarrollan con profundidad en el **Curso General de Astronomía** que se dicta en este Observatorio.

⁴La **esfera celeste** es una esfera imaginaria con centro en la Tierra sobre la que proyectamos la posición de todos los astros; su tratamiento en profundidad se realiza en el **Curso General de Astronomía**.

Existen varios métodos para determinar ambas magnitudes, como el empleo de un **micrómetro bifilar**, la **fotografía**, el uso de **cámaras CCD**, etc. Nosotros usaremos el método conocido como **micrómetro cronométrico**.

El micrómetro cronométrico, en sí, requiere de un ocular con al menos un hilo de retículo (aunque suelen emplearse oculares reticulados de dos hilos perpendiculares entre sí), un transportador que nos permita medir la dirección en la que apunta el o los hilos del retículo, y un cronómetro a fin de poder medir intervalos de tiempo con la mayor precisión posible. En nuestro sitio en Internet puede verse una descripción del micrómetro cronométrico que utilizamos, aunque aquí se dará una explicación genérica válida para el uso de cualquier clase de ellos. Debemos aclarar que este método exige contar con un telescopio con montura ecuatorial y en estación.

Figura 3: En esta figura apreciamos como el par ubicado en la posición **I** se desplaza a la **F** en el campo del ocular del telescopio, cuando éste se encuentra detenido. Este desplazamiento nos permite ubicar el hilo del retículo paralelo al dicho movimiento, determinando de esta forma la dirección Este–Oeste.

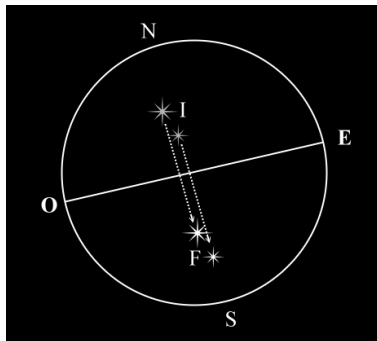


En primer lugar, y tras ubicar con el telescopio al par en cuestión, es necesario determinar la dirección Este–Oeste en el campo del ocular. Para lograrlo, debemos detener la relojería del telescopio. Como sabemos, la esfera celeste tiene un movimiento aparente de Este a Oeste (debido al movimiento de rotación de la Tierra, de Oeste a Este); por lo tanto, al detener el telescopio veremos a las estrellas derivar en la dirección Este–Oeste. Lo que debemos hacer, pues, es girar el ocular reticulado para que uno de sus hilos (o su único hilo) quede paralelo al movimiento aparente de las estrellas.

Una vez logrado, se lee en el transportador el ángulo que corresponde a

esa dirección. Este ángulo será el **ángulo cero**, contra el cual se medirán las demás direcciones.

Figura 4: En esta figura vemos como el par ubicado en la posición **I** se desplaza en dirección Norte–Sur a la posición **F** en el campo del ocular del telescopio, cuando éste se mueve en dirección Sur–Norte.

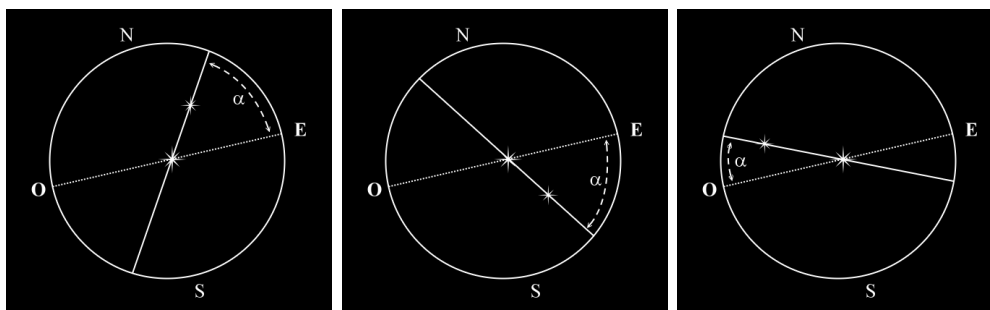


Acto seguido, y tras encender la relojería del telescopio, debemos determinar la dirección Norte, necesaria para saber desde donde medir el ángulo de posición. Para esto moveremos el telescopio, empleando sus movimientos finos, en dirección al Norte celeste, por lo que veremos a las estrellas moverse, dentro del campo del ocular, en dirección al Sur celeste (ver figura 4). Conviene no deducir la dirección Norte de las direcciones Este y Oeste, como haríamos en la Tierra, debido a la presencia de espejos diagonales en la óptica del telescopio que pueden modificarlas; por esto lo más seguro es siempre confirmar dichas direcciones de manera directa, como acabamos de indicar.

Para determinar el **ángulo de posición**, giraremos el retículo hasta que el hilo que antes señalaba la dirección Este–Oeste coincida con la línea imaginaria que une las dos estrellas. Leyendo el ángulo que indica el transportador, y teniendo en cuenta en que cuadrante quedó el hilo, el valor del **ángulo cero** y dónde se encuentra el Norte y el Este celestes, se puede calcular directamente el ángulo de posición (ver figura 5).

La determinación de la **separación angular** con el método que nos ocupa es indirecta. En primer lugar, debemos girar el ocular hasta colocar un hilo del retículo en la dirección Sur–Norte, y apagar entonces la relojería del telescopio. Como dijimos, las estrellas derivarán de Este a Oeste. Entonces,

Figura 5: Distintos ejemplos para el cálculo del ángulo de posición. En la primera figura, debemos restar el ángulo α a 90° . En la segunda, tenemos que sumar 90° al ángulo α . En la tercera, habrá que sumar 270° a α .



cronometraremos el intervalo de tiempo transcurrido entre el pasaje de ambas estrellas por ese hilo.

Es fácil ver que dicho intervalo es proporcional a la separación angular, pero no depende sólo de ella. Como podemos apreciar en los diagramas siguientes, también depende del ángulo de posición: cuanto más se acerque éste a 90° o a 270° , más largo será el intervalo medido para una separación angular dada, mientras que a medida que nos acercamos a ángulos de posición iguales a 0° o a 180° , el intervalo disminuirá.

En particular, puede demostrarse que el tiempo medido es proporcional al seno⁵ del ángulo de posición. Además influye la declinación⁶ de la binaria, ya que cuanto más cerca del ecuador celeste se encuentre, más rápido será su movimiento aparente debido a la rotación de la esfera celeste.

Teniendo en cuenta todos estos factores, se puede demostrar que la separación angular queda expresada en la siguiente ecuación:

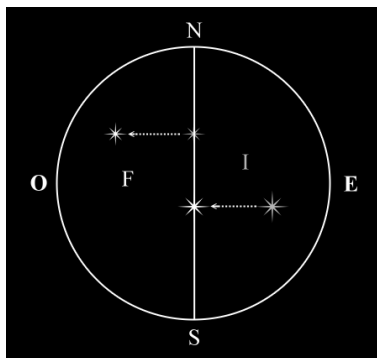
$$\rho = \frac{15,04''/s \cdot t \cdot \cos(\delta)}{\text{sen}(\theta)}$$

Donde t es el tiempo medido entre el pasaje de ambas estrellas por el

⁵**Seno** y **coseno** son funciones trigonométricas que se estudian en los cursos correspondientes de Matemática.

⁶La **declinación** es una de las dos coordenadas ecuatoriales absolutas de los astros. Es el ángulo con centro en la Tierra entre un punto de la esfera celeste y el ecuador celeste; vale 0° para el ecuador y alcanza un valor máximo de 90° en el polo norte celeste y de 90° en el polo opuesto.

Figura 6: En esta figura, las estrellas se desplazan de la posición **I** a la **F** cuando la relojería del telescopio se encuentra detenida. A fin de determinar la separación angular, es preciso medir el intervalo de tiempo que transcurre entre ambas posiciones



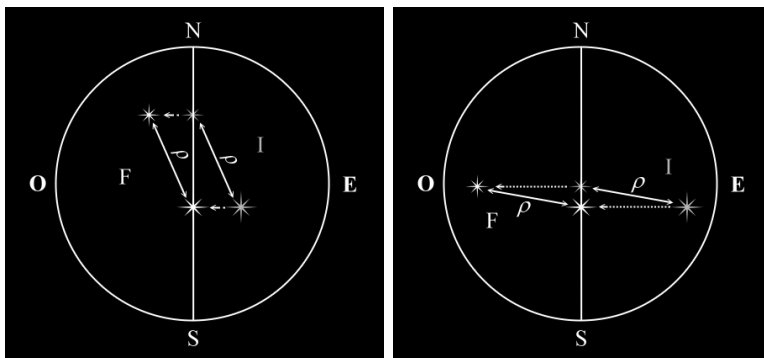
hilo del retículo en segundos y δ es la declinación del par. El valor **15,04''** se deduce considerando que un punto de la esfera celeste da una vuelta completa en el término de un día sidéreo, que dura aproximadamente **23h 56m 4,091s**.

Un caso especial a tener en cuenta es el de estrellas binarias cuyo ángulo de posición sea de 0° o de 180° o un valor excesivamente próximo a éstos; en otras palabras, que la línea imaginaria que las une sea casi coincidente con la dirección Norte-Sur. En estos casos es fácil comprobar que ambas estrellas cruzarán simultáneamente o casi al mismo tiempo un hilo ubicado en esa dirección, por lo que el tiempo no podrá medirse o estará muy influido por el error cometido en su determinación con el cronómetro. Es por esto que en esos casos especiales es imperativo ubicar el hilo en una dirección oblicua con respecto a la Norte-Sur (y nunca coincidente, claro está, con la Este-Oeste, ya que en ese caso las estrellas se moverían paralelamente al hilo y jamás lo cruzarían). Si llamamos **A** al ángulo que giramos al hilo con respecto a la dirección Norte-Sur (medido hacia el Este, como el ángulo de posición), la ecuación anterior debe ser corregida de la siguiente manera:

$$\rho = \frac{15,04''/s \cdot t \cdot \cos(\delta) \cdot \cos(A)}{\text{sen}(\theta - A)}$$

Como caso particular, podemos comprobar que para un valor de **A** igual a **0°**, esta ecuación resulta igual a la primera.

Figura 7: En ambas figuras podemos ver dos pares con la misma separación angular (ρ), pero el de la primera figura presenta un ángulo de posición muy cercano a 0° , por lo que el intervalo de tiempo a medir es muy breve. En el caso de la otra figura el intervalo es mucho mayor, debido a que el ángulo de posición es muy cercano a 270° .



A fin de realizar los cálculos necesarios para obtener el ángulo de posición y la separación angular a partir de las mediciones tomadas puede utilizarse el programa *Binarias*, que no sólo los realiza de manera automática sino que utiliza todos los valores medidos y obtiene de ellos los promedios, desviaciones y errores porcentuales. El mismo fue desarrollado en el Observatorio y se encuentra en nuestra página *web* (<http://www.astro.cnba.uba.ar>).

3. Elección de las estrellas binarias a medir

Aunque hay muchos catálogos de estrellas binarias, el más importante y completo de ellos es el **WDSC** (*Washington Double Star Catalogue*), mantenido por el **USNO** (*United States Naval Observatory*). En este catálogo figuran muchas binarias que por una u otra razón no han sido medidas desde hace mucho tiempo, e incluso muchas cuya naturaleza física está pendiente de confirmación. A estas binarias se las conoce con el nombre genérico de “olvidadas” (*neglected*), y en el sitio del **USNO** hay un extenso listado de ellas. De las mismas, nosotros estamos especialmente interesados en las ubicadas en el hemisferio sur celeste, ya que históricamente son las menos estudiadas al encontrarse muchos menos observadores en este hemisferio

del planeta. Una copia de ese listado en formato de hoja de cálculo puede encontrarse junto a este apunte en nuestra página *web*. Los campos que contienen son de fácil comprensión, pero hay dos que merecen una pequeña explicación. Entre los campos **código de descubridor** y **magnitudes** hay una columna en la cual se detalla información útil cuando se trata de estrellas múltiples. En éstas, las componentes se designan con letras en mayúscula, empezando por la más brillante y siguiendo con las demás en orden creciente de distancia a ella. El otro campo que requiere explicación es el último, que indica la razón por la cual la binaria ha sido incluida en el listado, y debe interpretarse según el cuadro 1.

- N** No fue observada en los últimos 20 años.
- C** Aún no fue confirmada como binaria.
- *** Estas pocas estrellas del listado tienen órbitas conocidas y bien determinadas, por lo que sus posiciones pueden calcularse para cualquier momento. Se incluyen en el listado para poder contrastar las posiciones medidas con las calculadas, a fin de poder estimar los errores y limitaciones del método que emplea cada observador.

Cuadro 1: Códigos del listado de estrellas “olvidadas” del USNO.

Las efemérides de las estrellas con órbita conocida, así como sus elementos orbitales, pueden obtenerse en la página del “*Sixth Catalog of Orbits of Visual Binary Stars*”: <http://ad.usno.navy.mil/wds/orb6.html>.

4. Formato para el envío de los datos obtenidos

Los responsables del **WDSC** son sumamente flexibles a la hora de recibir las mediciones obtenidas por los observadores de estrellas binarias; sin embargo, por recomendación del Dr. William I. Hartkopf del Departamento de Astrometría del **USNO** usaremos para el envío de las nuestras el formato que describimos a continuación.

WDS.....	DD.....	COMP.	DATE.....	THETA.	RHO....	V1...	V2...	N	NOTES
00019+6319BU	482	AC	1916.88	124.	10.3	.	1.5	1	U
00019+6319		AC	2001.8712	124.81	10.441	.	.	2	
01234-1122			1994.22	335.8	2.08	9.12	10.70	3	
08335+0026A	9999		1972.123	1	single
08335+0026A	9999		1972.244	110.	.	.	.	1	elong

La tabla anterior contiene unas líneas a modo de ejemplo; cada una corresponde a una doble. Las columnas deben llenarse de la siguiente manera:

WDS: La identificación primaria del sistema dentro del catálogo. Está formada por las horas, minutos y décimas de minuto de ascensión recta seguidos de los grados y minutos de declinación del par, para el equinoccio del 2000, separados por un signo “+” o “-” para las declinaciones boreales o australes, respectivamente.

DD: Código de descubridor, formado por una a tres letras, seguidas por cuatro cifras. Puede dejarse en blanco.

COMP: En caso de tratarse de un sistema múltiple, debe indicarse para cuales componentes son las correspondientes mediciones.

DATE: La fecha de las mediciones. Generalmente se da en fracciones de año de Bessel, pero puede usarse la fecha y hora en Tiempo Universal, en formato **yymmddhhmm**⁷.

THETA: El ángulo de posición.

RHO: La separación angular.

V1 y V2: Magnitud visual⁸ de las componentes. Si no se realiza ninguna estima (como es nuestro caso en el marco del taller), se dejan en blanco. Está abierta la posibilidad de indicar sólo la diferencia de magnitudes entre ambas; en ese caso, se deja en blanco el campo **V1** y se usa el **V2**.

⁷**Tiempo Universal** es el tiempo de Greenwich. Se utiliza en astronomía para unificar el horario de los observadores de los distintos husos. En el caso de Argentina, para obtener la hora local en función del Tiempo Universal, sólo debemos restar a éste 3 horas.

⁸La **magnitud** de una estrella es una medida de su luminosidad. En esta escala, las estrellas más brillantes a simple vista tienen una magnitud aproximada igual a **0**, mientras que las más débiles que se pueden discernir en óptimas condiciones y a ojo desnudo rondan la magnitud **6**.

N: Número de noches en las que el par fue medido, y cuyos resultados fueron promediados para obtener el valor indicado en la tabla.

NOTES: Para agregar todo comentario pertinente. Por ejemplo, “**U**” señala incertidumbre en la medida realizada, “**single**” indica que el par es demasiado cerrado para que pueda resolverse con el instrumental utilizado, “**elong**” se usa para binarias demasiado cerradas como para realizar una medición válida de la separación angular, pero que al presentar al menos una forma “estirada” o “elíptica” permiten que su ángulo de posición sea determinado. También se admiten notas de mayor longitud; cualquier circunstancia notable debe ser descripta con claridad.

Además de todos estos campos, debe adjuntarse información acerca del instrumental y método utilizados, así como el nombre de los observadores involucrados.

Los resultados pueden enviarse al Departamento de Astrometría del **USNO**, así como también a cualquiera de los centros que publican y analizan este tipo de mediciones.

5. Finalidad del estudio de las estrellas binarias

El estudio del movimiento orbital común de los pares celestes permite calcular una de las magnitudes más importantes de las estrellas: su masa. Si conocemos la distancia que nos separa de ellas, su separación angular nos permitirá calcular la longitud de la distancia que las separa, y si medimos su período orbital (dato que se puede deducir a partir del análisis de la variación del ángulo de posición con respecto al tiempo), es posible calcular la suma de las masas de ambas componentes con la siguiente ecuación:

$$\frac{a^3}{T^2} = \frac{G}{4\pi^2}(m_1 + m_2)$$

Donde a es la longitud media que las separa, T el período orbital del sistema y G la constante de gravitación universal, mientras que m_1 y m_2 son las masas de las estrellas en cuestión. Luego, determinando las distancias medias d_1 y d_2 de ambas masas al centro común de gravedad (las cuales se obtienen analizando las variaciones del ángulo de posición y la separación

angular en el tiempo), podemos calcular sus masas respectivas combinando la anterior ecuación con la siguiente:

$$m_1 \cdot d_1 = m_2 \cdot d_2$$

El conocimiento de la masa estelar es imprescindible para la astrofísica, ya que de ella depende el mecanismo de la fusión nuclear, que explica la generación de energía de las estrellas, a la vez que nos permite modelar su interior y su posible evolución.