

# Taller de Fotometría Diferencial

---

## Unidad 1: Introducción.

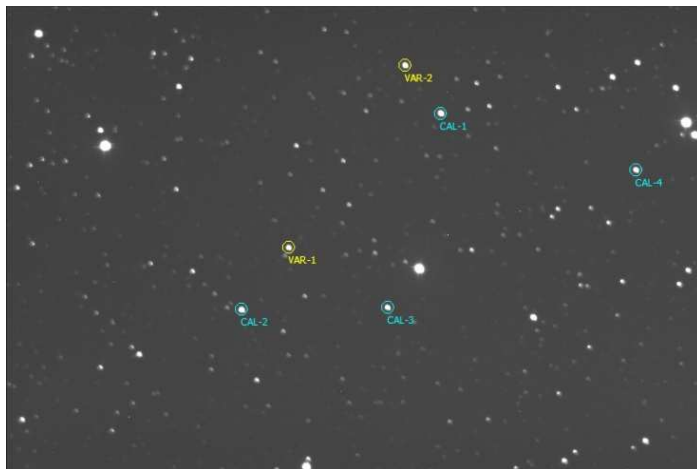
- **Fotometría:** La palabra “fotometría” resulta de la composición de dos vocablos: “foto” refiere “luz”, y “metría” se refiere a la “medición”, de la luz. Lo que vamos a hacer es medir la luz que llega a un detector, proveniente desde algunos astros. Este taller está orientado a conocer la práctica en la realización de fotometrías de: asteroides, estrellas con tránsitos de exoplanetas, estrellas que son ocultadas por asteroides, estrellas variables de diferentes tipos, etc.
- **Fotometría visual:** Todavía hay personas que realizan fotometrías de estrellas variables y cometas utilizando sólo sus ojos o auxiliados con binoculares o telescopios. Una de las técnicas visuales consiste en comparar el brillo del objeto con estrellas de brillos similares del entorno y cuyas magnitudes se conocen previamente. Sólo sirven para objetos brillantes, aún con el auxilio de telescopios. Fueron superadas cuando se empezaron a usar fotómetros y cámaras fotográficas, con las que se obtiene: mayor objetividad, mayor precisión y son aplicables a objetos más débiles.
- **Fotometría con fotómetros fotoeléctricos:** En la primera mitad del siglo pasado, se produjeron los primeros avances en la medición de brillos de astros usando fotómetros fotoeléctricos, que utilizan células fotoeléctricas. Al finalizar el siglo pasado (décadas: 1970 y 1980), este instrumento cayó en desuso rápidamente ante la aparición de los sensores digitales tipo CCD: más rápidos y precisos, obteniéndose variaciones de milésimas de magnitud.
- **Fotometría digital:** En este taller utilizaremos telescopios equipados con cámaras fotográficas con sensores digitales (cuyas características veremos más adelante). Obtendremos imágenes de algunos objetos ubicados en el cielo, quedando registrados en el sensor cuando esos fotones impacten sobre una superficie (sensor digital), que nos permitirán averiguar el dato de que tanta luz ha llegado de ese objeto. Ya con telescopios de 20 cm de diámetro o más, equipados con monturas ecuatoriales, con seguimiento y cámaras digitales económicas, es posible hacer fotometría y lograr información de interés científico.
- **Alteraciones de la información:** Respecto a los instrumentos que vamos a utilizar: la luz que nosotros vamos a ver, por ejemplo: la que sale de una estrella, viaja por el medio interestelar -que no está totalmente vacío-, luego pasa por la atmósfera compuesta por varias capas de diferentes densidades -que absorbe, descompone y difracta la luz-, luego llega al telescopio refractándose y/o reflejándose en sus componentes ópticos -siguen las pérdidas y distorsiones-, luego ingresa a una cámara fotográfica (CCD) -que detectará sólo una parte de la luz que llega a su sensor-. Un procesador construirá una imagen cruda con los datos recibidos, afectados por una acumulación de “defectos”. Para “corregir” esa imagen, se la debe procesar, calibrar, y recién allí se harán las mediciones de brillo de los objetos. Esos datos serán procesados matemáticamente para analizar las variaciones de brillo -con algoritmos que resultan de modelos y aproximaciones-. En cada uno de todos esos pasos, se introducen alteraciones (pérdidas e incorporación de datos e incremento de errores). Lo que llega en cada etapa, no es fielmente reflejado en el paso siguiente. Algunos de esos cambios se pueden corregir, otros: minimizar y otros simplemente: quedarán. Lo

# Taller de Fotometría Diferencial

---

importante es tener en cuenta que siempre tendremos errores y lo importante será conocer esos errores a la hora de evaluar una fotometría.

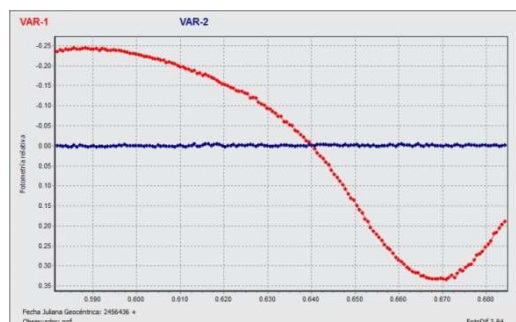
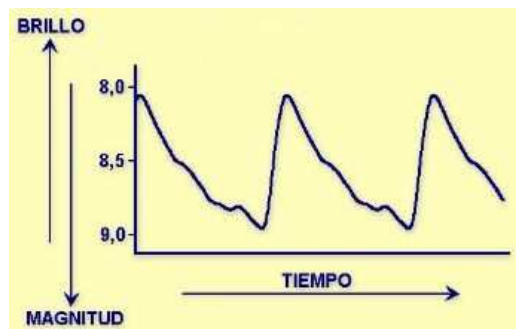
- **Fondo de cielo:** El cielo tiene un brillo dado por la luminosidad intrínseca de la atmósfera, ya que sus moléculas y átomos también emiten luz durante la noche. Sin atmósfera, el fondo de cielo no existiría. Esa es una de las razones por las que se prefiere instalar telescopios en el espacio o en lugares desérticos y elevados. La polución lumínica y la presencia de la Luna aumentan el fondo de cielo. Se agrava cuando la atmósfera tiene mucha humedad ambiente. Es por estas razones que se prefiere hacer fotometrías de objetos con poca distancia cenital y nunca superar los  $50^\circ$  o  $60^\circ$ .
- **Flujo de luz de un objeto:** Una estrella -en la imagen obtenida con un sensor digital- es un disco, más brillante en el centro y más débil en los bordes. El flujo es la suma de intensidades en todo el disco, tras substrarle el valor que tiene el fondo del cielo. Esta tarea se realiza mediante programas adecuados que utilizaremos oportunamente.
- **Objetos puntuales:** En este taller nos dedicaremos a medir brillos de objetos puntuales, es decir: objetos cuyo diámetro aparente es lo suficientemente pequeño como para que la impronta en un sensor digital sea similar a la que deja una estrella. Es el caso de un asteroide o de una estrella. No abordaremos la fotometría de objetos extendidos, como galaxias, nebulosas, cúmulos, etc.
- **Estrellas de referencia:** Para medir el brillo del objeto en cada instante, resulta muy práctico compararlo con el de una estrella del mismo campo, de la que estemos razonablemente seguros que no cambia de brillo durante la observación, a las que llamaremos “estrellas de referencia” o “estrellas de calibración”. El objeto del que sospechamos cambios en su brillo lo llamaremos “variable”. Es conveniente que las estrellas de referencia y la variable tengan brillos parecidos. También es conveniente seleccionar dos o más estrellas de referencia y comparar la variable, simultáneamente con todas las estrellas de referencia.
- **Estrella de control:** Una forma práctica de verificar si las estrellas seleccionadas tienen brillos constantes, es la de considerar a una de ellas como variable (se la llama: estrella de control). Si todas tienen brillos constantes -incluida la estrella de control- los sucesivos brillos de la estrella de control resultarán siempre el mismo valor. Si alguna de las estrellas de referencia resulta variable (por ejemplo: disminuye su brillo), entonces los sucesivos brillos de la estrella de control resultarán en aumento, a pesar de que su brillo intrínseco no cambie, porque será cada vez más brillante con respecto a la fallida estrella de referencia. Peor: también podría ocurrir que la estrella de control sea variable. Conclusión: quedaremos razonablemente tranquilos cuando la estrella de control



# Taller de Fotometría Diferencial

mantenga su brillo -relativo a las estrellas de referencia- constante. En ese caso, todas las mediciones de la variable objeto serán razonablemente confiables.

- **Objetos móviles:** Ahora bien, ¿Qué pasa con un asteroide?. En un momento lo tenemos en el campo de visión, pero durante la observación se lo observa desplazándose dentro de ese campo, y quizás al otro día ya no lo tengamos más entre las estrellas que tomábamos como referencia. Debemos usar otras estrellas de referencia; así vamos obteniendo curvas de luz que son comparables con estrellas de referencia diferentes para cada noche.
- **Fotometría diferencial:** La fotometría digital es “diferencial”, porque compara brillos del objeto a estudiar con brillos de estrellas en el mismo campo cuyos brillos no cambian (estrellas de referencia). Al comparar el brillo imagen a imagen, se detectan “variaciones” o “diferencias” de brillo del objeto. Como la incidencia de factores instrumentales, de transparencia y de masa atmosférica inciden de manera casi idéntica en la luz proveniente del objeto y de las estrellas de referencia, la fotometría diferencial permite trabajar en noches no muy buenas. No requiere de complicadas transformaciones ni cálculos, lo que lo hace muy accesible para astrónomos aficionados. En ocasiones es importante conocer cómo se produce la absorción atmosférica en función de la longitud de onda de la luz predominante de: el objeto, las estrellas de referencia y la estrella de control, pero para nuestro propósito no lo consideraremos en este taller. La fotometría basada sólo en el flujo que detecta el sensor, corregida por factores instrumentales y atmosféricos -que se deben calcular- es la llamada “fotometría absoluta”, que nosotros tampoco abordaremos en este taller y que –además- requiere de buenas condiciones atmosféricas y que éstas se mantengan estables durante la observación.
- **Parámetros fundamentales:** Encontramos muchos objetos en el cielo cuyo brillo se mantiene constante, pero otros mucho no. Nos interesan los casos en los que el brillo va cambiando a medida que transcurre el tiempo. De lo antes dicho, deducimos que los parámetros fundamentales que utilizaremos en este taller son: brillo y tiempo. Nos interesa la relación entre estos parámetros: el cambio de brillo a medida que transcurre el tiempo.
- **Curva de luz:** Llamaremos “curva de luz” a la representación gráfica que lograremos utilizando un sistema de coordenadas cartesianas, con la variable “tiempo” que representaremos en el eje de las abscisas, con la variable “brillo” en el otro eje. Cuando obtengamos una imagen, trataremos de medir el brillo del objeto en ese instante determinado. Luego, a medida que transcurre el tiempo, el brillo de objeto puede cambiar. En ese caso, cada punto va determinando una línea curva que a veces sube y otras: baja.



# Taller de Fotometría Diferencial

---

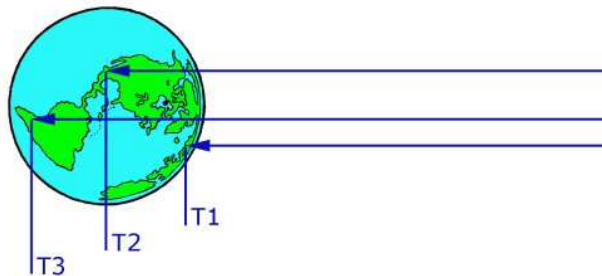
- **Magnitud:** El parámetro que mide el brillo recibe el nombre de “magnitud”. La magnitud esta en números decrecientes para brillos que aumentan, así el número que es cada vez más grande representa brillos menores. La relación entre la magnitud y la intensidad del brillo, no es lineal, es logarítmica (Siglo XIX: Pogson), pero acá no abordaremos esa relación matemática, bastará con conocer que la relación de brillos es decrecientes para cuando las magnitudes son crecientes. La escala actual de magnitud se ha ajustado para que coincida lo más aproximadamente posible con la magnitud propuesta por Hiparco (siglo II a.C.), es decir: basada en el uso del ojo humano para medir la magnitud de las estrellas.
- **Magnitud instrumental:** Es un valor del brillo que se calcula (también mediante una función logarítmica) a partir de la medición del flujo de luz efectivamente detectado por el instrumento, luego de extraerle el aporte de luz del fondo de cielo.
- **Magnitud relativa:** Indica la variación de la magnitud instrumental que afecta a un objeto. La escala de la magnitud relativa parte de un cero arbitrario, que generalmente se lo hace coincidir con el promedio de las magnitudes instrumentales obtenidas para el objeto en las sucesivas imágenes. Por ejemplo:

Observación	Magn. Instrum.	Magn. Relat.
1	12,3	-0,2
2	12,4	-0,1
3	12,4	-0,1
4	12,5	0
5	12,6	0,1
6	12,7	0,2
7	12,7	0,2
8	12,6	0,1
9	12,5	0
10	12,4	-0,1
11	12,3	-0,2
12	12,3	-0,2
13	12,2	-0,3
Promedio	12,5	

- **Magnitud aparente:** Indica la magnitud del objeto como consecuencia de asignarle valores de magnitud a las estrellas de referencias, luego de obtener esas magnitudes de catálogos. Como es posible obtener las magnitudes instrumentales del objeto y de las estrellas de referencia, la asignación de valores de catálogo a cada estrella de referencia permite inferir que magnitud aparente le corresponde al objeto que se estudia.
- **Tiempo:** Respecto al tiempo, podemos medirlo utilizando el calendario civil que usamos habitualmente, que comprende: hora minutos segundos, y que lo podemos representar en el eje del tiempo, de esa manera. Lo que vamos a tener que hacer en muchas ocasiones es ir restando para calcular intervalos de tiempo ocurre entre un instante y otro posterior. Este sistema de medición de tiempos suele resultar muy engorroso para este tipo de operaciones. Un sistema decimal de medición de tiempos es mucho más simple y fácil de interpretar.

# Taller de Fotometría Diferencial

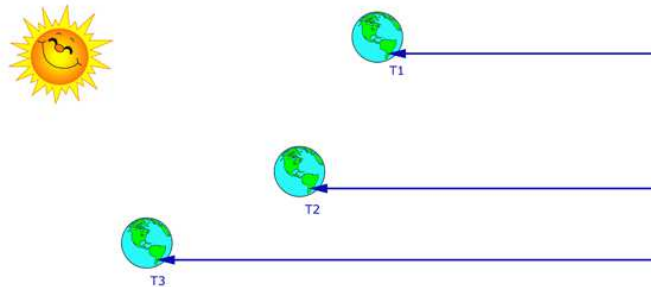
- **Tiempo juliano:** El calendario solar más antiguo es de aproximadamente 3000 a.C. en Egipto. Los romanos y los mesopotámicos usaron calendarios lunares. La unificación y una importante corrección de desfases se produjo en el 46 a.C. con Julio César. La reforma del calendario que concluyó con el calendario que hoy conocemos se produjo en 1582 promovido por el papa Gregorio XIII. Hubo tantas reformas que resultaba difícil fechar acontecimientos astronómicos e históricos, es por eso que -ese mismo año- José Scaliger propuso una escala continua de tiempo fijando su origen en el mediodía del 1° de enero del año 4713 a. C., contando sólo los días solares correlativos. Toda referencia de tiempo se hace en día y en fracción decimal (sin: años, meses, minutos, segundos). Este es el “tiempo Juliano”, y es el que vamos a registrar cuando tomemos imágenes con las cámaras fotográficas. Cuando leemos J2000.0, se refiere a la fecha Juliana 2451545.0, que en el calendario coincide con el 01 de enero de 2000 al mediodía del Tiempo Universal (TU) para Greenwich.
- **Sincronización:** Cuando se toma una imagen, no sólo se almacena la información de la luz, también queda registrado el tiempo en que se hace la captura de luz. Ese dato, se obtiene del reloj interno de la computadora. Es muy importante tener la computadora sincronizada con un reloj patrón. Hay programas que hacen esa sincronización de manera automática, para lo cual se debe controlar la correcta sincronización durante la observación.
- **Corrección geocéntrica:** Si estamos observando un mismo evento desde diferentes puntos de la Tierra, los rayos luminosos llegarán a los diferentes observatorios en momentos diferentes. Ocurre que desde el objeto nos llegan fotones, y éstos son viajeros a velocidad finita; va a pasar que el tiempo en el que yo registro lo que veo, no es el mismo que registraría si estuviese en otro lugar, aunque tengamos bien sincronizados los relojes. Si estoy más lejos, estaré viendo las cosas con más atraso, efecto producido por mi mayor distanciamiento del objeto. Un rayo de luz demora 4 centésimas de segundo en recorrer el diámetro de la Tierra. Si estoy observando la rotación de un asteroide o un tránsito de un exoplaneta (eventos que demoran días o varias horas en completar un período), el error de tiempo de centésimas de segundo, no tiene incidencia en estos cálculos. Pero si observamos una estrella pulsante, que rote muy rápido (centésimas de segundos en la rotación y a veces milésimas), las mediciones de tiempos serán ahora importantes al considerar esas diferencias de posición. Para salvar este problema, lo que se hace es no referir a los tiempos respecto a la posición del observador, sino a la de un observador hipotético ubicado en el centro de la Tierra. El tiempo juliano local (dJ) debe corregirse al tiempo juliano geocéntrico (dJG); entonces así podemos comparar todas las lecturas independizándonos de las diferentes posiciones en la Tierra respecto al objeto. Lo mismo ocurre para un mismo observador que registra un evento de varias horas y que va cambiando de posición relativa debido a la rotación terrestre.





# Taller de Fotometría Diferencial

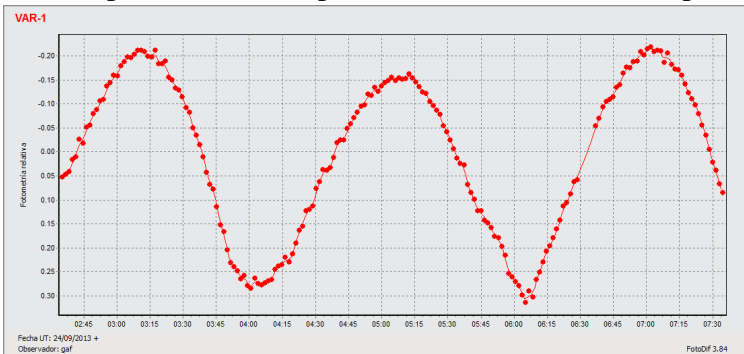
- **Corrección heliocéntrica:** Aún corregido el tiempo de nuestro reloj por la rotación terrestre, el centro de la Tierra tiene el movimiento de desplazamiento alrededor del Sol, barriendo un arco de ocho diámetros terrestres cada hora. Si pretendemos estudiar un evento a lo largo del tiempo, aun considerando el tiempo juliano geocéntrico, el cambio de posición por la traslación de la Tierra alrededor del Sol, puede producir errores muy superiores a los anteriores si se pretenden comparar lecturas ignorando este factor. Ahora la diferencia puede ser de varios minutos. Para



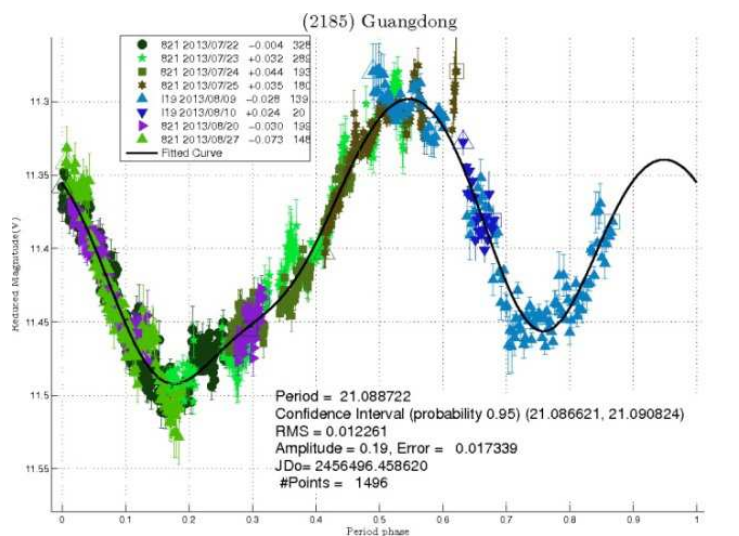
- salvar este error, podemos calcular a qué hora llegaría la luz de dicho objeto a un observador hipotético ubicado en el centro del Sol, y registrar los tiempos, no en los que lo registraría desde la Tierra (dJG), sino los tiempos en los que vería el objeto si estuviese en el centro del Sol. Aparece así el Tiempo Juliano Heliocéntrico (dJH).
- **Corrección por cambios de posición del objeto:** A la hora de calcular el periodo de rotación de un asteroide, podamos ver el brillo del mismo durante la noche, para ello tendremos disponible sólo 5 o 6 horas; no obstante puede ocurrir que para armar toda la curva, nos hagan falta muchas noches de observación, y a veces pueden pasar semanas y a veces meses entre la primera y la última observación del asteroide. Tenemos que tener presente que nosotros nos vamos moviendo y a una velocidad bastante mayor que la del asteroide. Entonces ocurre que las distancias desde el asteroide a nosotros también cambia, y al cambiar y querer construir la curva de luz, tendremos un problema similar al de las correcciones geocéntricas y heliocéntricas, pero esta vez por cambio de posición relativa del objeto, esto “que la luz del asteroide recorre distancias diferentes”, entonces hay adelantos o demoras que pueden llegar a ser de muchos minutos, e inciden particularmente en asteroides con periodos cortos, en donde la incidencia de tales ajustes puede llegar a ser importante. Una corrección que se suele hacer, es calcular el tiempo juliano en el objeto en cada observación, y de ese modo nos independizamos del efecto que se produce por cambio de posición del objeto.
  - **Tabla de valores:** La curva de luz es la representación gráfica de una tabla que tiene el conjunto de todos los pares ordenados de las dos variables: Magnitud y Tiempo. Es importante dejar especificado el tipo de corrección del tiempo que se aplicó y el tipo de magnitud que estamos midiendo.
  - **Formas de las curvas:** Cuando una curva se repite luego de un determinado tiempo, llamado: “período”, la curva es periódica, como en los siguientes casos: estrellas binarias eclipsantes, estrellas cefeidas, rotaciones de asteroides, tránsitos de exoplanetas, etc.. Cuando la curva no se repite, se la denomina “aperiódica”, como en estos casos: supernova, estrellas variables cataclísmicas, etc.

# Taller de Fotometría Diferencial

- **Período corto:** Cuando el período es de pocas horas, la curva se puede completar en una sola noche de observación, como en el caso de algunas estrellas variables eclipsantes y en la rotación de algunos asteroides. En ese caso es conveniente



- hacer curvas en noches siguientes sólo para lograr un mejor ajuste del período.
- **Período largo:** El problema se presenta cuando el período es de muchas horas o días, y peor: meses o años. En este caso, la determinación del período requerirá de varias noches de observación. En cada noche se obtendrá sólo un tramo de la curva correspondiente a un período. Los distintos tramos



- ayudarán a encontrar el período. Cuando se puede solapar esos tramos, el trabajo es más sencillo, tal suele ser el caso de las rotaciones de los asteroides de hasta unas pocas decenas de horas. Cuando no se logran los solapados, el trabajo será más complicado y requerirá de cuidadosas observaciones.
- **Aplicaciones:** La fotometría diferencial resulta una metodología muy eficiente a la hora de determinar las rotaciones de asteroides, la secuencia de los eclipses de los sistemas de estrellas binarias, los cambios de brillo de estrellas variables intrínsecas, los tiempos en los que se producen los tránsitos de exoplanetas por delante de las estrellas en las que orbitan, o el caso en que un asteroide o un objeto transneptuniano oculta a una estrella por un breve instante. Todas las aplicaciones mencionadas aquí, son observaciones que estamos haciendo en varios de los proyectos que está desarrollando el GAF.

