



Materia electiva: *Astronomía Básica y Ciencia Espacial*.

Prof.: Daniel José Mendicini (CEV-CODE-LIADA).

Facultad de Ingeniería Química.

Universidad Nacional del Litoral.

Santa Fe, Argentina.



Astrofísica de Cuerpos Menores.

1 Introducción

Los asteroides son cuerpos pequeños que orbitan alrededor de Sol al igual que los planetas. Se encuentran principalmente en el Cinturón principal, en los puntos lagrangeanos de Júpiter (asteroides troyanos) y en la región transneptuniana. Entender sus propiedades físicas y orbitales nos ayudará a mejorar los modelos actuales sobre la formación del sistema solar y abordar así un conocimiento más preciso sobre el tema ya que, en general, las características físicas de los asteroides están relacionadas a diferentes procesos a los que han sido sometidos.

Para poder obtener una estimación de la forma de los asteroides se puede utilizar el método de inversión de curvas de luz. Este método, requiere de una gran cantidad de observaciones (para lograr curvas densamente muestreadas) y que además cubran un amplio rango de ángulos de aspecto y ángulos de fase. Dado este hecho, es fundamental la colaboración entre grupos de investigación en distintos países ubicados en diferentes partes del globo.

En el presente trabajo, abordamos esta temática desde el punto de vista observacional. Entre los meses de Junio y Diciembre del año 2019 organizamos una campaña de observación desde la Estación Astrofísica de Bosque Alegre. Los objetos se seleccionaron en base a dos colaboraciones internacionales en las que hemos participado. Por un lado, el satélite Gaia aportará información sobre las masas de un conjunto de asteroides gracias a su alta precisión astrométrica. Se espera entonces, combinar estos datos con la determinación de forma y por lo tanto, de volumen obtenidas a través del método de inversión de curvas de luz para calcular la densidad aproximada de estos objetos. Por otro lado, en 2021 la NASA lanzará a la misión espacial Lucy a un viaje de 12 años en los que recolectará información sobre los asteroides troyanos. Utilizando los datos de curvas de luz, se espera complementar los estudios que se adquieran a través de este proyecto como así también abarcar un conocimiento previo más detallado de sus *targets* de forma tal de lograr una mejor planificación de la misión.

En el Capítulo 2, introduciremos algunas características generales de los asteroides como son: sus formas, tamaños y ubicación dentro del Sistema Solar. También presentamos las diferentes técnicas de observación que pueden aplicarse al estudio de estos objetos. En el Capítulo 3, describimos los objetivos principales de los dos proyectos internacionales en los cuales estamos colaborando. Además, resumimos los datos ya conocidos presentes en la literatura de la selección de objetos a los cuales hemos observado. Ya abordando los temas que conciernen a la observación, en el Capítulo 4 contaremos los pormenores del armado del plan de observación, con todo lo que conlleva y finalmente algunos detalles sobre la noche de observación en sí. En el Capítulo 5 comentaremos cómo han sido calibrados los datos y cómo hemos extraído la información para el armado de las curvas de luz. Para un mejor entendimiento de éste último tema, es necesario repasar algunos conceptos

sobre fotometría. Finalmente, en el Capítulo 6 mostramos los resultados obtenidos y sus correspondientes análisis. En el Capítulo 7 discutiremos cuáles son los temas pendientes y las expectativas para el trabajo futuro.

2 Generalidades sobre Asteroides

Nuestro Sistema Solar se formó hace alrededor de 4.6 miles de millones de años. Luego del complejo proceso de formación de los planetas, algunos pedazos de aquella materia primigenia quedaron flotando en el espacio sin llegar a constituir estructuras mayores.

Hoy conocemos a estos “restos” de la formación planetaria como asteroides. Según la IAU (*International Astronomical Union*)¹ los asteroides son cuerpos celestes pequeños y a menudo de forma irregular que contienen información sobre las condiciones iniciales del Sistema Solar. Sin embargo, los asteroides que han sobrevivido desde esa época, han experimentado numerosos eventos de colisión, dinámicos y térmicos que han dado forma a sus propiedades físicas y orbitales actuales (Bottke et al., 2002). Nuestro desafío será interpretar estas características, apoyándonos en evidencias observacionales, numéricas y teóricas. A lo largo de este Trabajo Final, nos concentramos en la vasta cantidad de información que podemos obtener observacionalmente, haciendo hincapié en el análisis de curvas de luz.

2.1 Diversidad de formas y tamaños

Actualmente se conocen alrededor de 950.000 asteroides según el MPC (*Minor Planet Center*)². Entre todos ellos, se pueden encontrar una gran variedad de formas y tamaños. La mayoría tienen forma irregular, pueden presentar superficies cubiertas de cráteres, estar acompañados de uno o más satélites naturales e incluso ya existen registros de asteroides que poseen su propio sistema de anillos. Estos objetos también pueden encontrarse en sistemas binarios y sistemas triples. Los asteroides varían en tamaño desde 530 kilómetros de diámetro (Vesta, el asteroide más grande conocido actualmente), hasta cuerpos que miden menos de 10 metros de diámetro.

En la Figura 1 se muestran cuatro ejemplos que nos permiten apreciar la diversidad encontrada en este grupo.

- El panel a) muestra un mosaico de 4 imágenes tomadas por la misión NEAR-NASA/JPL del asteroide Eros. Este objeto fue el primer asteroide en ser orbitado por una nave espacial.
- El panel b) muestra una representación artística de Psyche. Se cree que este asteroide podría ser el núcleo expuesto de un planeta primitivo que ha perdido sus capas externas debido a algún evento de colisión. Esta hipótesis está basada en el hecho de que estaría compuesto principalmente de hierro y níquel, metales que solemos encontrar en núcleos de planetas terrestres.

¹<https://www.iau.org/>

²<https://minorplanetcenter.net/>

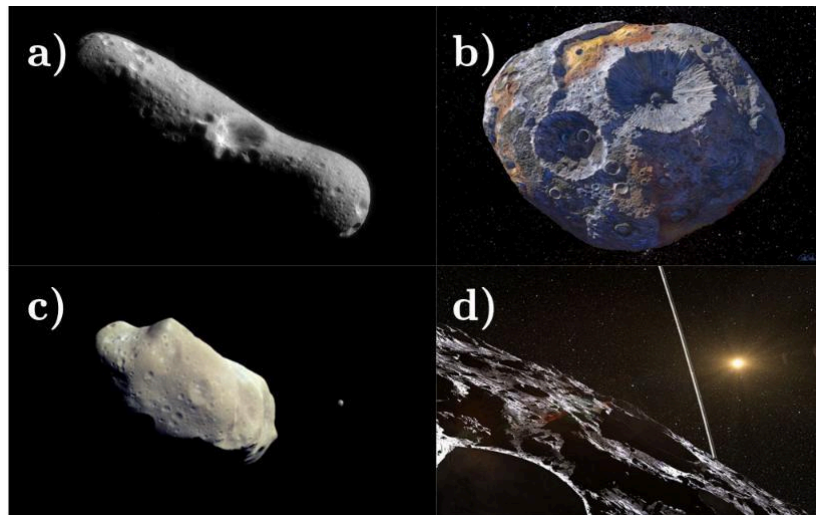


Figura 1: Imágenes de a) Eros; b) Psyche; c) Ida; d) Chariklo

Fuente: <https://solarsystem.nasa.gov>

- El panel c) muestra una imagen real tomada por la sonda espacial Galileo-NASA/JPL del asteroide Ida, el primer asteroide al cual se le descubrió una luna.
- El panel d) muestra una representación artística de Chariklo. Chariklo fue el primer asteroide al que se le detectó un sistema de anillos. Fue el quinto sistema de anillos encontrado en nuestro sistema solar, después de Saturno, Júpiter, Urano y Neptuno. Un grupo de astrónomos del Observatorio de Córdoba participaron de este descubrimiento aportando sus observaciones obtenidas desde la Estación Astrofísica de Bosque Alegre (Braga-Ribas et al., 2014).

2.2 Ubicación en el Sistema Solar

El mayor reservorio de asteroides en el sistema solar es el cinturón principal, ubicado entre las órbitas de Marte y Júpiter. Se cree que los procesos por los cuales el cinturón principal adquirió sus atributos actuales están vinculados a la formación de los planetas, particularmente de la formación de los planetas terrestres y Júpiter.

Los asteroides troyanos, el segundo grupo más grande de asteroides en el sistema solar interior, se encuentran alrededor de los puntos L_4 y L_5 de Lagrange³ de Júpiter. El origen y la evolución de los troyanos probablemente estén relacionados con el crecimiento y la evolución de Júpiter (Bottke et al., 2002). A pesar de que comparten su órbita con Júpiter, no chocan con él por estar en estos puntos “especiales”. También podemos encontrar asteroides en la región Transneptuniana, es decir, más allá de 30 UA.

³Los puntos de Lagrange son las soluciones estacionarias del problema de los tres cuerpos restringido a órbitas circulares. El punto L_4 y el punto L_5 están en los vértices de triángulos equiláteros cuya base común es la recta que une las dos masas, de forma que el punto L_4 precede al cuerpo menos masivo un ángulo de 60° visto desde la masa grande, mientras que L_5 gira detrás del cuerpo menos masivo, con un retraso de 60° visto a su vez desde el cuerpo principal. Estos dos puntos son los únicos dos puntos lagrangeanos estables.

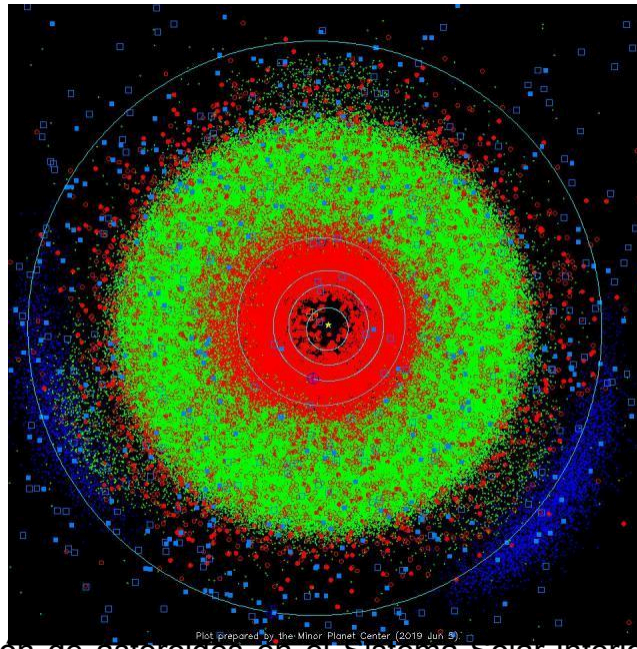


Figura 2: Distribución de asteroides en el Sistema Solar interior: Las órbitas de los planetas están marcadas en azul claro, siendo la de mayor diámetro la órbita de Júpiter. En verde se muestran todos los objetos del Cinturón Principal de Asteroides y en rojo se denotan los NEAs. Los puntos azules corresponden a los asteroides troyanos. Fuente: Minor Planet Center (MPC).

En la Figura 2, vemos la distribución actual de asteroides en el Sistema Solar interior. Los NEAs (*Near Earth Objects*, por sus siglas en inglés) poseen perihelios menores a 1.3 UA y la gran mayoría de ellos cruzan la órbita de la Tierra en su recorrido alrededor del Sol, volviéndolos potencialmente peligrosos para la vida. De hecho, observando la Figura 2 podemos notar la gran concentración de NEAs por dentro de la órbita de Marte. En el mismo gráfico, son notorias dos “nubes” de puntos azules que comparten órbita con el planeta Júpiter. Estas nubes corresponden a la población de asteroides troyanos, que se encuentran ubicados en los puntos lagrangeanos L4 y L5 del planeta. Estudiar en detalle este grupo de asteroides es de vital importancia para entender la formación de los planetas gigantes ya que formarían parte del material primordial que le dio origen al planeta gigante de mayor tamaño de nuestro Sistema Solar.

En la Figura 3 vemos el gráfico análogo al anterior para la región Transneptuniana. Si miramos a la imagen como si fuera un reloj analógico, entre la 1 y las 2 y las 7 y las 8, se puede notar una mayor concentración de puntos. Esto se debe a un *bias* observacional: las campañas de observación suelen orientarse hacia esta dirección ya que en la diagonal opuesta se encuentra el plano de la galaxia, por lo tanto hay demasiadas estrellas y no se pueden observar los TNOs (objetos de magnitudes muy altas).

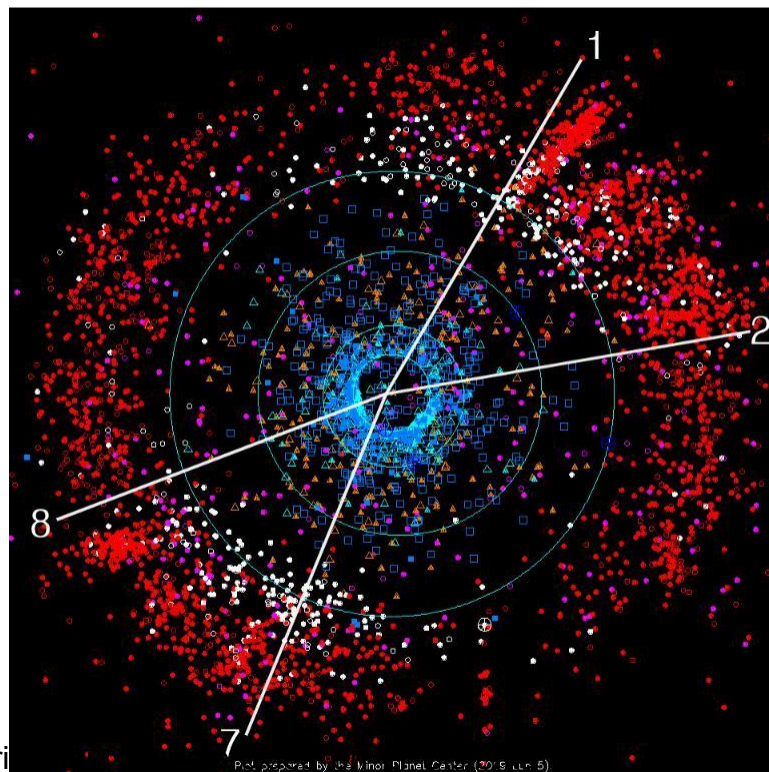


Figura 3: Distribución de los objetos del sistema solar exterior. Los objetos del cinturón de Kuiper (KBOs) están representados por puntos rojos, en blanco los Plutinos, en magenta los objetos del Disco Disperso (SDOs) y en triángulos naranjas los Centauros. Nuevamente, las órbitas son círculos azul claro y la más externa corresponde a Neptuno. Fuente: Minor Planet Center (MPC).

2.3 ¿Cómo se nombran los asteroides?

A continuación comentaremos brevemente el proceso mediante el cual se le asigna un nombre a los asteroides a medida que van siendo descubiertos⁴.

1. Todo comienza con el descubrimiento de un planeta menor, que no puede identificarse con ningún objeto ya conocido. En este momento se procede a asignarle al objeto una designación provisional. Ejemplo, 2010 UK4: Se coloca en primer lugar el año del descubrimiento y luego una combinación de caracteres alfabéticos que indican el mes y el número ordinal de descubrimiento.
2. Cuando se consiguen observaciones en cuatro o más oposiciones, el objeto puede recibir una designación permanente, un número. Ejemplo: (10199) Chariklo. El número asignado corresponde al número ordinal de nombramiento.
3. Quien haya descubierto el objeto, tiene el privilegio de sugerir un nombre, basado en una serie de requisitos impuestos por la IAU. Por ejemplo, existen grupos de asteroides a los que se les deben asignar ciertos nombres pertenecientes a dada categoría. Ejemplo: los asteroides que se encuentran en el punto Lagrangeano L_4 de Júpiter deben nombrarse en honor a los héroes del campamento Troyano.
4. Finalmente, el nombre propuesto por el descubridor es evaluado y aceptado/rechazado por el Comité de Nomenclatura de Cuerpos Pequeños de la IAU conformado por 15 astrónomos de diferentes partes del mundo.

El hecho de que ciertos grupos/familias de asteroides posean una designación especial, hace de la nomenclatura de asteroides un asunto relevante. Esto se debe a que dichos grupos poseen, en general, características físicas y/u orbitales distintivas. Por ejemplo, si escuchamos o leemos sobre un asteroide que lleva el nombre de un Centauro sabremos inmediatamente que se trata de un objeto que posee perihelio (q) más allá de la órbita de Júpiter ($q > 5.2$ AU) y un semieje mayor (a) menor que el de Neptuno ($a < 30.1$ AU).

2.4 Técnicas de Observación

En la actualidad contamos con una gran diversidad de instrumentos y técnicas observacionales que podemos aplicar al estudio de asteroides, permitiéndonos así recabar información en diferentes longitudes que nos brindará conocimientos en detalle de las distintas poblaciones. Cabe aclarar que cada una de estas técnicas posee un rango de aplicabilidad en función de la distancia a la que se encuentre el objeto (como se muestra en la Figura 4), por lo que en ocasiones, elegiremos cuál usar dependiendo de los parámetros orbitales de nuestro objetivo.

⁴<https://minorplanetcenter.net/iau/info/HowNamed.html>

Los métodos más utilizados actualmente son: inversión de curvas de luz, ocultaciones estelares, modelado termofísico, métodos radiométricos, observaciones de radar, imágenes de óptica adaptativa e incluso la exploración *'in situ'*. En las siguientes subsecciones explicaremos cada uno de estos métodos.

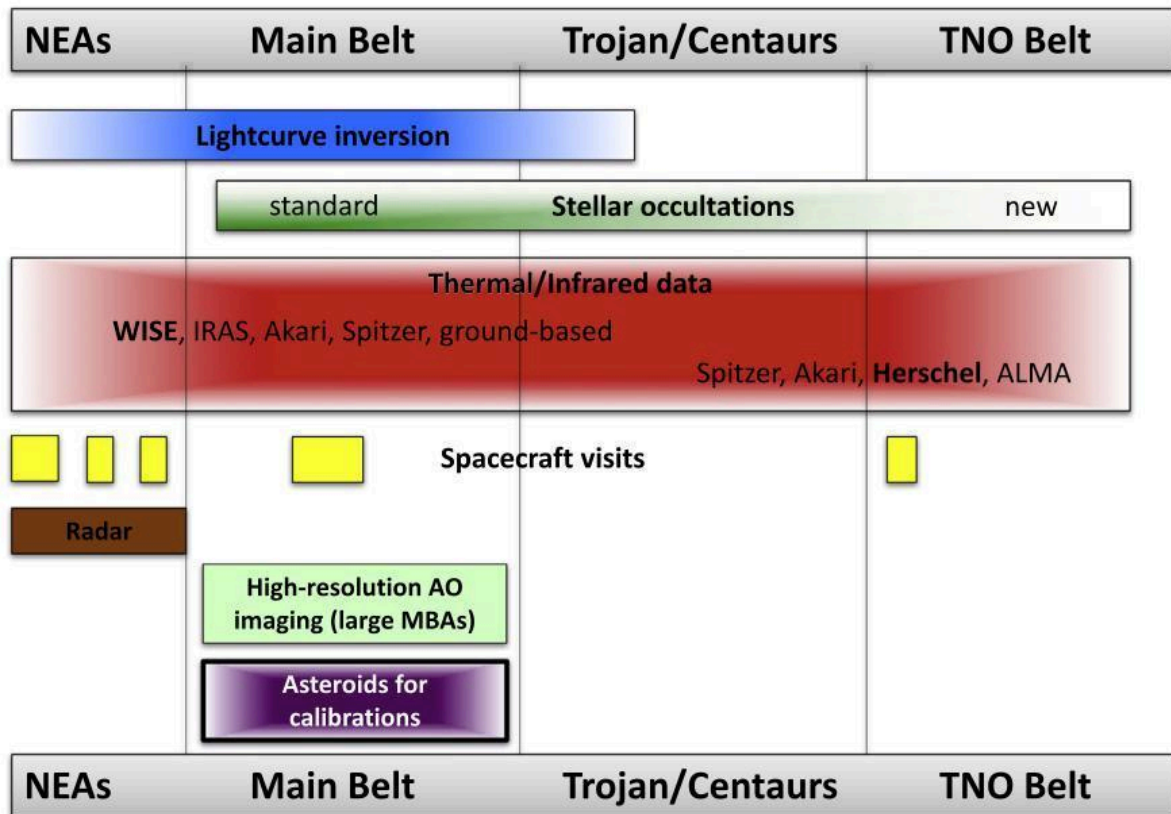


Figura 4: Técnicas aplicadas a asteroides a diferentes distancias del Sol.

(Müller et al., 2018).

2.4.1 Inversión de curvas de Luz

Como hemos mencionado en el Capítulo 2.1, los asteroides en su mayoría poseen formas irregulares. Esto, sumado a las variaciones del albedo (capacidad de reflejar la luz incidente) que pueden existir sobre la superficie del objeto, provoca que se observe una variabilidad periódica del brillo del objeto a medida que este va rotando sobre su propio eje, que a su vez, puede estar orientado en diferentes direcciones. En concreto, una curva de luz es la variación del brillo del asteroide en función del tiempo, tal variación de brillo puede dar como resultado una gran cantidad de datos físicos sobre el objeto (por ejemplo, su período de rotación, forma e incluso su densidad y porosidad).

En la Figura 5 mostramos este comportamiento. Nótese que el brillo aumenta cuando estamos viendo la cara más extensa del asteroide y disminuye cuando observamos una superficie menor de este.

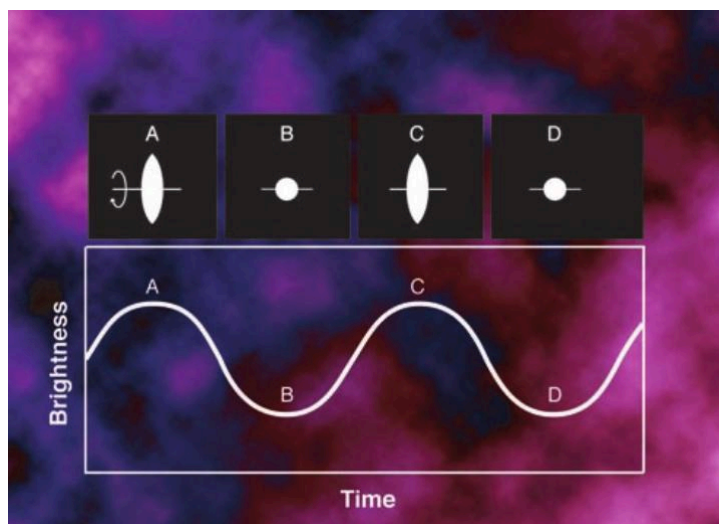


Figura 5: Esquemización de la curva de luz de un asteroide uniformemente iluminado. (McFadden et al., ????).

Notar que, si el objeto fuera perfectamente esférico, no podríamos detectar variabilidad alguna y la curva de luz sería en cambio una constante. Lo mismo ocurre si el eje de rotación está orientado en la dirección de la visual.

Russell “demostró” en su paper de 1906 que era imposible determinar la forma de un asteroide a partir de la información dada únicamente por su curva de luz. Esta conclusión estaba basada en el hecho de que, dada las variaciones de color y albedo en la superficie de estos objetos, a pesar de que estuviésemos observando su sección más extensa veríamos al asteroide menos brillante. Por ejemplo, si esta cara extensa fuera además la de albedo más bajo (esto es, con menor capacidad de reflejar luz) veríamos una disminución del brillo del asteroide (a pesar de estar viendo la cara más extensa). Gracias al gran avance que se ha producido en este campo en los últimos años, de la mano de las diferentes misiones espaciales que han orbitado varios de estos objetos, se ha descubierto que los asteroides tienen superficies con albedos y colores aproximadamente uniformes (Warner, 2016). Esto implica que, en buena aproximación, podemos considerar que los asteroides poseen superficies uniformes en brillo y color. De esta manera, las variaciones que observamos (curvas de luz) se deben casi exclusivamente a la forma que poseen estos objetos.

La amplitud de la curva de luz también puede cambiar con respecto al tiempo, a medida que va cambiando el ángulo de aspecto y el ángulo de fase. El **ángulo de aspecto**

θ se forma por una línea que va desde el centro del asteroide a la Tierra (la línea de la visual) y el eje de rotación (ver Figura 6). En la Figura 7 esquematizamos este fenómeno. Cuando el objeto está en el punto A, el ángulo de aspecto es de 90° , en este momento es cuando tendremos la mayor amplitud de la curva de luz dado que estamos mirando hacia el ecuador del objeto. Cuando el cuerpo se mueve al punto B, el ángulo de aspecto es 0° y no notaremos variación de brillo (la amplitud de la curva será prácticamente cero) ya que estamos mirando hacia el polo del asteroide. El **ángulo de fase** α representa la distancia

angular entre el Sol y la Tierra vista desde un asteroide (ver Figura 6). Al variar el ángulo de fase, cambiarán la magnitud del asteroide y por otro lado, la amplitud de la curva de luz. Notemos que (ver Figura 8) cuando el ángulo de fase $\alpha=0^\circ$ el objeto se encuentra en oposición. En este instante, la luz del sol ilumina completamente toda la cara visible del asteroide por lo tanto observaremos una magnitud menor. A medida que el ángulo de fase aumenta, la sombras provocadas por la iluminación del Sol en la superficie del objeto comienzan a jugar un rol importante, provocando que disminuya la amplitud de la curva de luz. Estas diferencias deben tenerse en cuenta antes de comenzar con el cálculo del período (Warner, 2016).

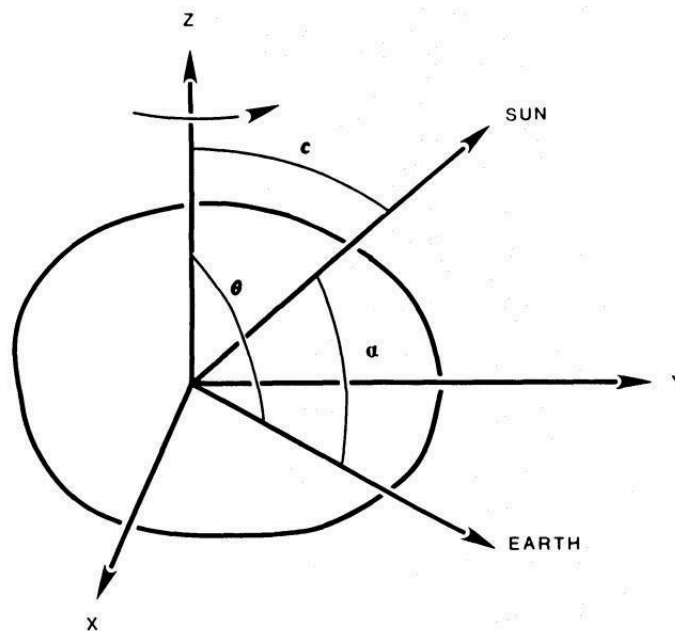


Figura 6: θ es el ángulo de aspecto y α es el ángulo de fase.
(Karttunen & Bowell, 1989).

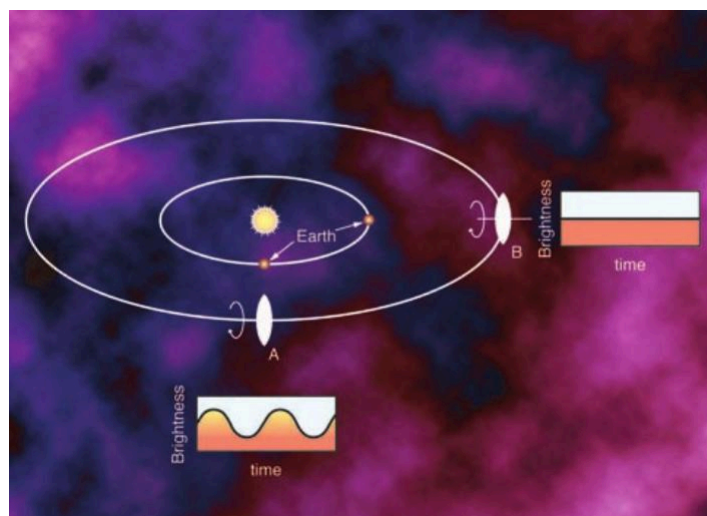


Figura 7: Variación de la amplitud de la curva de luz en función del ángulo de fase.
(McFadden et al., ???).

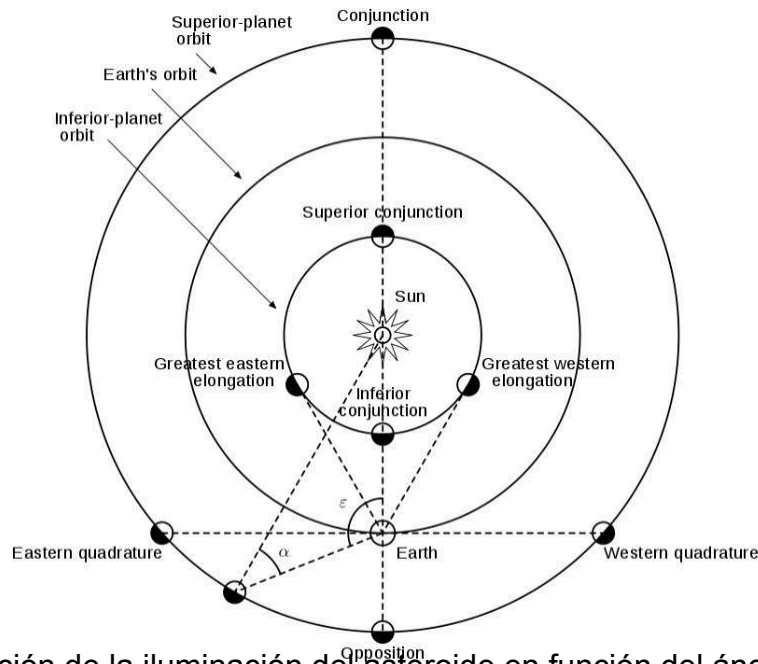


Figura 8: Variación de la iluminación del asteroide en función del ángulo de fase (α).

Autor: Wmheric (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Positional_astronomy.png).

Para una reconstrucción precisa de la forma, existen demandas estrictas para los datos de la curva de luz, que deben ser densos, de poco ruido y provenir de una amplia gama de geometrías de visualización. En consecuencia, para reconstruir formas detalladas de asteroides, se necesitan campañas bien coordinadas. De aquí la importancia de contar con observatorios ubicados en distintos puntos geográficos del planeta a la hora de iniciar un proyecto de alto interés científico. La clave es complementar los datos ya disponibles (almacenados en bases de datos) con observaciones en diferentes geometrías, para sondear los cambios de la curva de luz en varios ángulos de aspecto y fase. Debido a la gran demanda de tiempo de observación, solo se pueden obtener modelos de forma precisos para un pequeño número de asteroides (Müller et al., 2018).

En resumen, el proceso de inversión de curvas de luz modela al asteroide basándose en un importante número de curvas de luz obtenidas a lo largo de varios años y desde diferentes lugares de la Tierra. Así, se encuentra la forma del cuerpo y la orientación de su eje de rotación. Para comprobar la precisión del modelo, se generan curvas de luz sintéticas (es decir, generadas por el modelo) y se comparan con las observadas. Para más detalle sobre uno de los métodos de inversión de curvas de luz, invitamos al lector a revisar la publicación de Bartczak & Dudziński (2018).

2.4.2 Ocultaciones

Una ocultación ocurre cuando un asteroide pasa frente a una estrella provocando que ésta “desaparezca” durante unos segundos, se observará entonces una caída de brillo en la magnitud de la estrella. Lo principal es poder determinar en qué momento ocurre

este evento, es decir, cuándo el cuerpo de interés pasa frente a una estrella. Medimos el flujo de la estrella antes, durante y después de la ocultación desde varios lugares en la Tierra por donde pase la sombra del objeto. Esta técnica puede revelar la presencia de atmósferas, descubrir posibles satélites, anillos o material en órbita alrededor de un objeto dado (Müller et al., 2018). En la Figura 9 mostramos un ejemplo de Ocultación, en este caso fue la producida por el asteroide Chariklo. Gracias a las observaciones de este evento aportadas por diferentes observatorios (incluyendo a la Estación Astrofísica de Bosque Alegre) se descubrió por primera vez en la historia un sistema de anillos en un cuerpo menor.

La principal ventaja de esta técnica es que se pueden determinar el tamaño y forma de un objeto con una precisión de menos del 2 % (Müller et al., 2018).

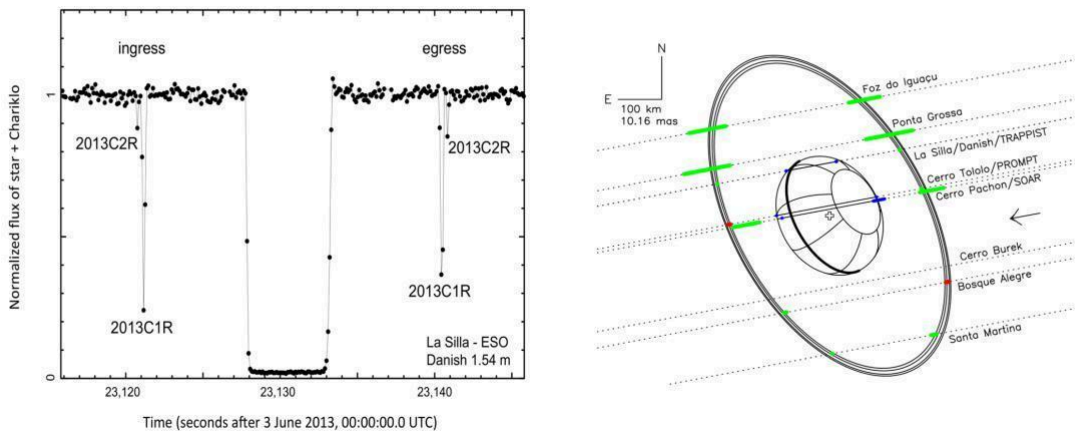


Figura 9: Izquierda: Curva de luz de la ocultación por Chariklo. Derecha: Sistema de anillos de Chariklo.

(Braga-Ribas et al., 2014).

2.4.3 Radar

La técnica de radar consiste en enviar señales desde un radiotelescopio y esperar que reboten en la superficie del objetivo para ser estudiadas desde Tierra. Teniendo en cuenta la variedad de formas que posee la superficie del asteroide, es claro que la señal viajará diferentes distancias dependiendo de a qué parte del asteroide llega. El “eco” de esta señal, llegará por lo tanto en distintos momentos permitiéndonos estimar su forma y diámetro.

Además, se puede aprovechar el efecto Doppler para estudiar la rotación del objeto, dado que la parte que se está acercando hacia el observador será una señal con frecuencias más altas (desplazada hacia el azul) y la que se está alejando tendrá frecuencias más cortas (desplazada hacia el rojo). El resultado es una “imagen” que representa el desplazamiento de frecuencia de la señal y la distancia que recorrió. En la Figura 10 se muestra una interpretación de estos resultados.



Figura 10: Imagen del asteroide 2014 JO25.

Generada con datos de radar recopilados utilizando el radar Goldstone del Sistema Solar de la NASA en el desierto de Mojave de California (<https://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA21597>). La imagen tiene una resolución de 3.75 metros por píxel.

2.4.4 Imagen Directa

Al hablar de “Imagen Directa” nos referimos a que podemos resolver espacialmente las imágenes obtenidas de los asteroides, esto introduce un sesgo que favorece a cuerpos de gran tamaño. Existen diversos métodos para obtener imágenes directas de estos objetos, uno de ellos consiste en tomar imágenes con telescopios terrestres de diámetros considerables que posean además algún sistema de óptica adaptativa (AO) como por ejemplo Gemini. La óptica adaptativa (AO) tiene como objetivo eliminar las distorsiones del frente de onda mediante la inserción de uno o más elementos ópticos ajustables ubicados en el camino que recorre la luz entre la fuente y el detector, logrando aumentar significativamente el poder resolutivo. De hecho, en el caso ideal, la imagen formada en el detector estará limitada por difracción. Si el lector se siente interesado en ahondar en detalles de esta técnica, recomendamos leer a Chromey (2016).

Otra alternativa para obtener imágenes directas es a través de misiones espaciales que son enviadas específicamente a un objetivo. En este último caso, no sólo es posible tomar imágenes de alta resolución (como fue el caso de la misión *Dawn* que visitó al asteroide Vesta, Figura 11) sino que también se pueden recolectar muestras para luego estudiar en laboratorios terrestres (esta tarea fue llevada a cabo por misiones como: Hayabusa I, Hayabusa II y Osiris-REX que recolectaron muestras de asteroides NEAs). El asteroide Vesta es el más grande conocido hasta el momento. Hasta hace algunos años, Ceres poseía este título. Sin embargo, cuando a principios de siglo fue reclasificado como un planeta enano, fue entonces cuando Vesta (en esa época, el segundo asteroide más grande) pasó a ser el líder del grupo en función de su tamaño.

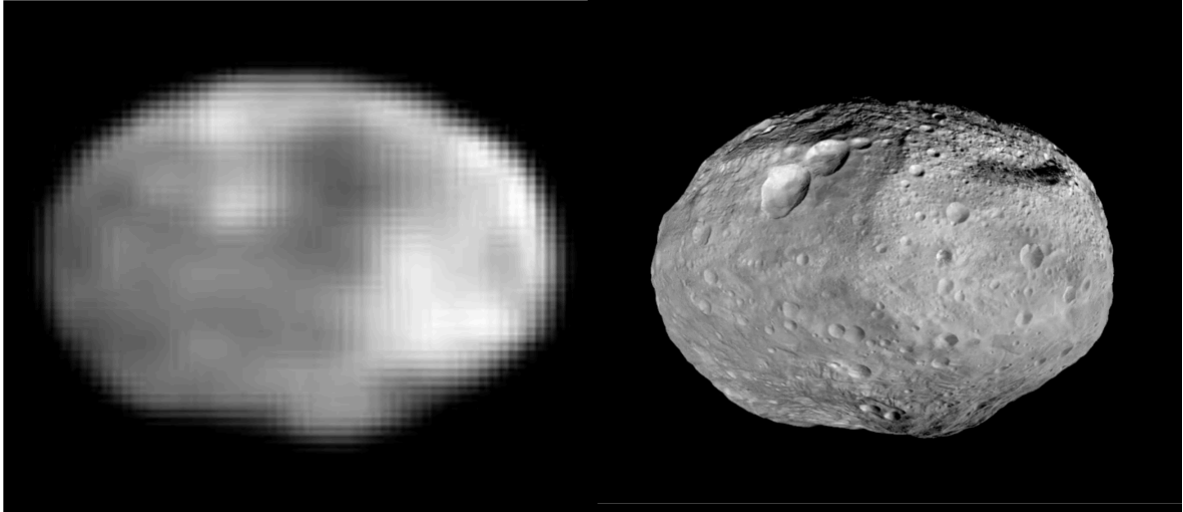


Figura 11: Asteroide Vesta. Izquierda: Ejemplo de una imagen directa obtenida a partir de Óptica Adaptativa. Derecha: Ejemplo de una imagen directa obtenida “in situ” por la misión *Dawn*.

Ben Zellner (Georgia Southern University), Peter Thomas (Cornell University) y NASA.

2.4.5 Polarimetría

La polarimetría es la medición del grado de polarización de la radiación reflejada desde la superficie de un asteroide. Las características de polarización dependen de la forma, el tamaño y las propiedades ópticas de las partículas de la superficie. Generalmente, la radiación está polarizada linealmente y se dice que está polarizada negativamente si se encuentra en el plano de dispersión y está polarizada positivamente si es perpendicular al plano de dispersión. Las mediciones de polarización en función del ángulo de fase solar para cuerpos sin atmósfera son negativas en ángulos de fase pequeños. Las comparaciones con mediciones de laboratorio indican que esto es característico de superficies complejas y porosas (McFadden et al., ???). En la Figura 12 se muestra un resultado de esta técnica, el porcentaje de polarización en función del ángulo de fase.

2.5 Sesgos observacionales

La mayoría de los asteroides mejor estudiados (aquellos que tienen ya un modelo de forma y rotación) son los que poseen períodos intermedios, no muy largos < 24 hs ni tampoco demasiado cortos > 2 hs. Además se encuentran favorecidos los objetos que poseen formas más bien elongadas y con ángulos de aspectos cercanos a 90° (Marciniak et al., 2018). Todas estas condiciones favorecen la observación dado que en pocas noches de observación es posible obtener el período y además poseen grandes amplitudes en sus curvas de luz. En la Figura 13, queda plasmado este problema de selección.

Otro sesgo (*bias*) observacional importante es la magnitud de los asteroides. Este problema es más evidente en aquellos casos en los que se cuenta con telescopios modestos que posean magnitudes límites por debajo de 20. Contrario a lo que tal vez nos dicta

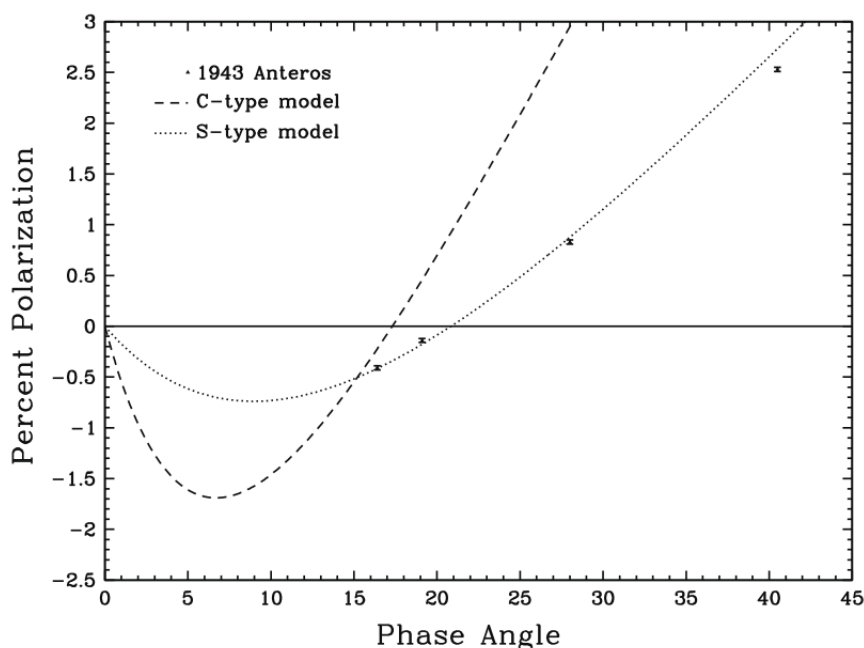


Figura 12: Polarización en función del ángulo de fase.
(Masiero, 2010).

Figura 13: Distribución actual de períodos conocidos y amplitudes máximas de los 1200 asteroides más brillantes (basados en LCDB, Warner et al. (2009), actualizado el 5 de septiembre de 2016). Figura adaptada de Marciniak et al. (2018).

la intuición, un sesgo en magnitud no implica directamente un sesgo en el diámetro de los objetos (Warner, 2016). En realidad, debería pensarse como una combinación de la distancia a la que se encuentra el asteroide, de su albedo y además de su forma.

2.6 Clasificación espectral de asteroides

Los asteroides se clasifican en diferentes tipos según su albedo, sus características espectrales y sus similitudes con los tipos de meteoritos conocidos. El albedo se refiere a la capacidad de una superficie de reflejar la luz incidente. Una superficie blanca que refleja perfectamente tiene un albedo de 1.0; una superficie negra que absorbe perfectamente tiene un albedo de 0.0.

Desde los primeros trabajos en taxonomía de asteroides, ha existido una tendencia a establecer relaciones entre las clases taxonómicas y la mineralogía. En ese momento, la única herramienta analítica disponible para los investigadores era la comparación directa entre los espectros de reflectancia (visible) y los de las muestras de meteoritos y minerales obtenidas en el laboratorio. De esta manera, el tipo C se asoció a las *condritas carbonáceas*⁵, el tipo S a meteoritos de hierro, el tipo E a *acondritas enstatitas*⁶ y el tipo M a meteoritos metálicos de hierro y níquel. (Carvano et al., 2010)

Existen diferentes clasificaciones taxonómicas de asteroides. La más utilizada es la propuesta por Tholen (1984). Tholen utilizó PCA (Principal Component Analysis) para

cuantificar las similitudes espectrales en un conjunto de datos de ECAS (Eight-Color Asteroid Survey) (Zellner et al., 1985) y definió un sistema de 14 clases espectrales. Cada una de las clases se denota por una sola letra. La taxonomía de Tholen es una extensión de sistemas anteriores Zellner et al. (1985); Bowell et al. (1978). Además de las dos clases espectrales clásicas (los tipos C y S), Tholen identificó otros seis grupos que etiquetó con las letras A,B,D,F,G y T. Además, añadió las clases E,M y P correspondientes a objetos que presentaban espectros sin características para la resolución dada de ECAS. Finalmente, creó tres clases más, denotadas por Q,R y V para tres objetos con características espectroscópicas inusuales: (1862) Apollo (Tipo Q), (349) Dembowska (Tipo R) y (4) Vesta (Tipo V). (Bus & Binzel, 2002)

En el presente trabajo mencionaremos los tipos espectrales correspondientes a los objetos troyanos de nuestra muestra. Los asteroides troyanos tienen espectros predominantemente de tipo D y P, aunque hay una pequeña cantidad de tipo C. A continuación describimos cada uno de estos tipos (Bus & Binzel, 2002):

- Tipo C: tienen espectros que tienden a ser de color neutro y tienen características de absorción que son relativamente poco profundas, si es que están presentes.
- Tipo D: espectro casi sin características (espectro plano) con pendiente roja muy pronunciada.

⁵ Meteoritos no metálicos (rocosos) que no han sufrido procesos de fusión o de diferenciación en los asteroides de los que proceden.

⁶ Meteoritos rocosos de silicatos que se caracterizan por haber sufrido procesos de fusión y diferenciación en el planeta o asteroide del cual proceden.

- Tipo P: espectro generalmente sin características con pendiente leve a moderada-mente rojiza. Puede existir una sutil absorción en el UV (0.55 μm) así también como en 0.85 μm .

Dada la escasez de caracterización mineralógica confiable de los asteroides, el uso de clases taxonómicas sigue siendo la mejor manera disponible para estudiar la composición del cinturón principal de asteroides. Y, aunque la taxonomía por sí sola no es suficiente para hacer inferencias mineralógicas significativas, el análisis de la distribución de clases en el cinturón principal puede, al menos, resaltar regiones y objetos que merecen una mayor investigación. (Carvano et al., 2010)

Modelos 3D

Con nuestras curvas de luz, estaremos aportando datos para el modelo SAGE (Bartczak & Dudziński, 2018). SAGE es un algoritmo de modelado de asteroides basado únicamente en datos fotométricos de curvas de luz.

Los datos de curvas de luz se utilizan para producir formas no convexas de asteroides, asumiendo un albedo y distribución de masa homogéneos y rotación alrededor de un solo eje (no se tienen en cuenta asteroides *tumbling*, es decir, aquellos cuyo eje de rotación precesa). Cada modelo producido por SAGE tiene sentido físico, es decir, el eje de rotación se encuentra siempre a lo largo del eje de mayor inercia del modelo y atraviesa su centro de masa.

Se adopta un algoritmo de evolución genética para buscar un modelo de asteroide que mejor se adapte a las observaciones. El proceso de modelado se ejecuta en bucle y cada iteración genera una nueva población de formas y orientaciones de polos aleatorias basadas en la forma de la semilla. El proceso de modelado no hace suposiciones sobre la forma y la orientación del polo antes del modelado. Siempre se usa como punto de partida una esfera con orientación de polo aleatoria. Para cada combinación de forma y orientación de polo, se calculan las curvas de luz sintéticas y se comparan con las observadas.

En el proceso de generación de curvas de luz, se compone una escena 3D en un marco de referencia eclíptico heliocéntrico. Una cámara, como observador, se coloca en la posición de la Tierra como estaba durante el momento de la observación. Del mismo modo, el modelo de asteroide se coloca en su posición orbital correspondiente y se aplican rotaciones para orientar el eje de rotación del modelo. A continuación se crea una imagen en la que el modelo es visible como si se observara desde la Tierra con un telescopio de resolución infinita (Figura 15).

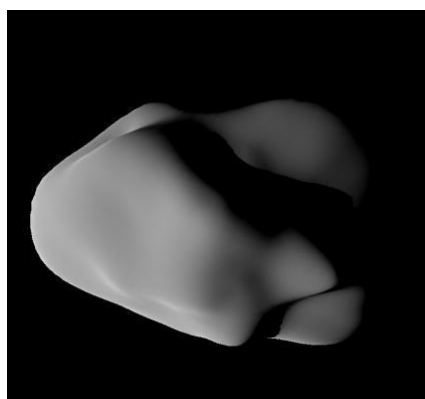


Figura 15: Ejemplo de una imagen generada para el cálculo del datos de curva de luz en un ángulo de fase alto que muestra el efecto de sombreado (Bartczak & Dudziński, 2018).

Referencias:

COLAZO, Milagros. *Estudio de las propiedades Física de una muestra de asteroides*, Universidad Nacional de Córdoba, Marzo 2020.