

ASTEROIDES

cercanos a la

TIERRA

► *Determinación de parámetros físicos de asteroides cercanos a la Tierra (NEAs)

Por:  José Ramón Valdés Parra · José Guichard Romero · Sergio Camacho Lara

◆ RESUMEN

Presentamos los primeros resultados de observaciones fotométricas de asteroides del cinturón principal y espectroscópicas de NEAs (asteroides cercanos a la Tierra, por sus siglas en inglés) de una campaña emprendida con la Cámara Schmidt de Tonantzintla (CST) y el telescopio de 2.1 m del Observatorio Astrofísico «Guillermo Haro» (OAGH). Obtuvimos las curvas de luz para cinco asteroides y determinamos las clases taxonómicas de 21 NEAs. Hemos demostrado la utilidad de un telescopio histórico, como la CST, para la observación fotométrica de cuerpos menores del sistema solar y la factibilidad de un telescopio de la categoría de 2 m de diámetro para la obtención de espectros ópticos de baja resolución de NEAs que nos ha permitido determinar las clases taxonómicas a las cuales estos objetos pertenecen.

◆ PALABRAS CLAVES:

NEA fotometría · Curvas de luz · Espectroscopía · Clases taxonómicas

◆ ABSTRACT

We present the first results of a campaign of photometric observations of Main-belt asteroids and spectroscopic observations of Near Earth Asteroids (NEAs) carried out with the Tonantzintla's Schmidt Camera telescope (CST) and the 2.1m telescope of the «Guillermo Haro» Astrophysical Observatory (OAGH). We obtained light curves of five asteroids and determined the taxonomy class of 21 NEAs. We have demonstrated the usefulness of a historical telescope, such as the CST, for the photometric observation of small bodies of the solar system and the feasibility of a 2m

class telescope to obtain low resolution optical spectra of NEAs that has allowed us to determine the taxonomic classes to which these objects belong.

KEY WORDS:
NEA • Photometry • Light curves • Spectroscopy • Taxonomy class

INTRODUCCIÓN

El ambiente interplanetario que rodea a la Tierra es, sin duda, hostil, con millones de cuerpos pequeños de muy diversos tamaños y formas que pueden modificar sus órbitas y moverse de sus reservorios naturales a la parte interior del sistema solar, en particular, cruzando la órbita terrestre alrededor del Sol (Bottke, Rubincam y Burns, 2000; Farnocchia *et al.*, 2013). Se calcula que, diariamente, en la atmósfera de la Tierra entran entre 50 y 150 toneladas de residuos cósmicos (Love y Brownlee, 1993). Afortunadamente, la gran mayoría son lo suficientemente pequeños como para desintegrarse a medida que se mueven en las capas de la atmósfera terrestre. Sin embargo, los cometas de periodo corto y los asteroides son los cuerpos menores del sistema solar que más peligro pueden representar si se produce un impacto con la superficie de la Tierra.

Objetos mayores a los 30 m, que sin ser tan grandes pueden provocar graves daños, tienen una frecuencia de impacto de uno cada varios siglos, mientras que para un objeto de unos 300 m, la frecuencia disminuye a uno cada varios cientos de miles de años (Morbidelli *et al.*, 2002). Dichas estimaciones podrían ser más precisas pero se necesita un mayor número de observaciones para poder determinar sus elementos orbitales de una manera más confiable.

Los objetos, con distancias perihélicas (q) menores a 1.3 unidades astronómicas (U.A.) y distancias en el afelio (Q) mayores a 0.98 U.A. se denominan objetos cercanos a la Tierra o Near-Earth Objects (NEOs), los cuales pueden ser asteroides (Near-Earth Asteroids [NEAs]), fundamentalmente provenientes del cinturón principal de asteroides o cometas de periodo corto (Near-Earth Comets [NECs]). Si los parámetros orbitales de un NEO determinan que la distancia de la órbita mínima de intersección con la órbita de la Tierra es menor a 0.05 U.A. (7,480.000 km), éstos se convierten en asteroides potencialmente peligrosos (Potentially Hazardous Asteroids [PHAs]). En la actualidad se conocen más de 16,000 NEAs (www.minorplanetcenter.net) y 1782 PHAs.

La peligrosidad de estos objetos, en caso de colisionar con la Tierra, y en consecuencia

la elaboración de los planes de prevención y/o mitigación de daños, dependen, primero, de que se encuentren a tiempo y, después, de tres factores fundamentales:

1. Propiedades físicas del posible impactador: diámetro, masa o densidad, porosidad, composición mineralógica, etcétera.
2. Parámetros de entrada del asteroide en la atmósfera de la Tierra: ángulo de la trayectoria y velocidad de entrada.
3. Distancia al lugar del impacto de zonas vulnerables y características del área a impactar: agua, roca sedimentaria y roca ígnea.

De aquí la importancia de determinar las propiedades físicas de estos objetos con el objetivo de contribuir al mejor entendimiento de los mismos y colaborar en las decisiones que se tomen en el caso específico de que un NEA o PHA entre en una órbita de probable colisión con la Tierra en el futuro. Estas decisiones están relacionadas con las características que debe tener una misión espacial para lograr la deflexión del asteroide o con la elaboración de efectivos planes de prevención y mitigación de daños en el caso de que la colisión sea inevitable.

POBLACIÓN DE ASTEROIDES CERCANOS A LA TIERRA

Para determinar qué fracción de la población total de NEAs ha sido descubierta, es necesario calcular el número total esperado de objetos a partir del conocimiento de las propiedades de los objetos descubiertos y establecer cómo éstos cambiarán de brillo a medida que, al igual que la Tierra, se muevan en sus órbitas alrededor del Sol. Usando simulaciones numéricas, se puede determinar la fracción de NEAs de diferentes tamaños que serán detectados por una estrategia particular de búsqueda. A medida que los programas de búsqueda van avanzando en sus propósitos, las estimaciones del número de asteroides que debe existir en cada intervalo de tamaños son más precisas. Harris (2009), estimó en 940 el número de NEAs mayores a 1 km de diámetro, lo cual está en excelente concordancia con el número de NEAs detectado en este rango de tamaños.

Stokes *et al.* (2003) ha concluido que el número acumulativo, N, de NEAs, con diámetros mayores a D se puede describir por la fórmula:

$$N = 942 D^{-2.354}$$

donde D está expresado en kilómetros. El número de PHAs se ha calculado en un 21% de la función anterior (Bottke *et al.*, 2002).

1

Propiedades físicas del posible impactador: diámetro, masa o densidad, porosidad, composición mineralógica, etcétera.

2

Parámetros de entrada del asteroide en la atmósfera de la Tierra: ángulo de la trayectoria y velocidad de entrada.

3

Distancia al lugar del impacto de zonas vulnerables y características del área a impactar: agua, roca sedimentaria y roca ígnea.

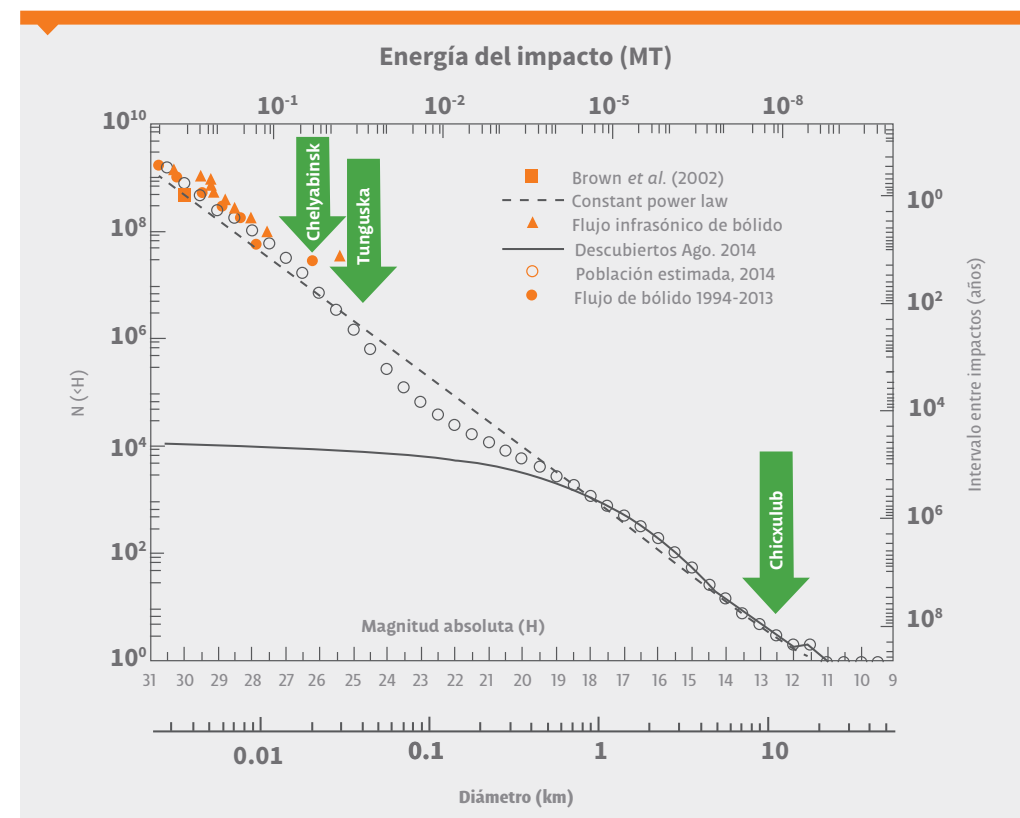


Figura 1. Número estimado de asteroides en función de sus tamaños. La curva continua representa el número de asteroides descubiertos hasta octubre de 2014, mientras que las otras curvas implican estimaciones teóricas del número de asteroides. La dramática desviación se debe a la incapacidad de los sistemas actuales de búsqueda para identificar objetos débiles. La conversión entre la magnitud absoluta H y el diámetro asume un albedo de 0.14. Las flechas indican la energía del impacto de los eventos de Chicxulub, Tunguska y Chelyabinsk. Cortesía de Harris, *et al.* (2015).

Si comparamos, en la figura 1, la curva de asteroides descubiertos con diferentes estimaciones teóricas de las poblaciones de NEAs en diferentes intervalos de tamaños, podemos llegar a las siguientes conclusiones:

1. El 90% de los NEAs con diámetros mayores a 1 km ya ha sido descubiertos por los diferentes sistemas de búsqueda e identificación de asteroides.
2. El 80% de los NEAs con diámetros entre 500 y 1000 m ha sido descubiertos.
3. La mayoría de los NEAs con diámetros menores a los 500 m aún no se han descubiertos. En el intervalo de tamaños entre 300 y 500 m sólo han sido identificado el 45% de los mismos.
4. Los NEAs más pequeños representan –actualmente– el mayor problema, ya que su número es mayor y porque se ha descubiertos un porcentaje mucho menor, sólo el 13% de los NEA entre 100 y 300 m.

Estos números son completamente inciertos para NEAs con diámetros menores a los 100 m, lo cual se puede corroborar en la figura 2 (Johnson, 2015, comunicación privada) donde se muestra una actualización del estado del conocimiento del número de NEAs descubiertos hasta la fecha en función de sus tamaños. Es eviden-

te que para los asteroides menores a 100 m el completamiento de la muestra es menor al 3%.

La meta impuesta a la NASA, por el Congreso de los Estados Unidos, ante la comunidad científica internacional es descubrir, monitorear, catalogar y tener caracterizado, a finales del 2020, el 90% de los asteroides mayores a 140 m, con el objetivo de evaluar la peligrosidad que estos objetos puedan representar para el planeta (NASA Authorization Act, 2015).

DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS

Con el objetivo de contribuir a la determinación de algunas propiedades físicas de NEAs, hemos comenzado un programa que incluye observaciones fotométricas con la Cámara Schmidt de Tonantzintla y espectroscópicas con el telescopio de 2.1 m del Observatorio Astrofísico «Guillermo Haro» (OAGH), de Cananea, Sonora.

Las observaciones fotométricas son de gran utilidad debido a las rápidas variaciones de la geometría irregular observada en rotación, incluso durante una aparición. Por otro lado, un buen promedio de estas geometrías (curvas de luz obtenidas a diferentes ángulos de fase) puede producir un modelo físico robusto del asteroide que describa su estado de rotación y su forma global (Kaasalainen *et al.*, 2002). Propiedades como el periodo de rotación (poten-

cial cinemático del asteroide) la amplitud de la curva de luz (razón entre los dos ejes del asteroide, uno *side-on* y otro *point-on*), la magnitud absoluta H y el parámetro de la pendiente de fase G, se obtienen a partir de la fotometría; los primeros dos de construir y resolver la curva de luz en una aparición. Aplicar el método de inversión a las curvas de luz, observadas en diferentes ángulos de fase (Kaasalainen y Torppa, 2001; Kaasalainen *et al.*, 2001; Kaasalainen *et al.*, 2004) permite obtener, de manera robusta, parámetros físicos como la inclinación del eje de rotación, el tamaño y la forma de los asteroides.

Por otra parte, la espectroscopía de asteroides, en especial en las regiones del visible e infrarrojo cercano del espectro electromagnético (DeMeo *et al.*, 2009; Bus y Binzel, 2002) es una herramienta muy poderosa e imprescindible para la determinación de las clases taxonómicas y la composición mineralógica, que determina el valor del albedo de los asteroides,

que a su vez, es un parámetro fundamental para calcular los tamaños de estos objetos. Teniendo una clasificación taxonómica de los asteroides, podemos derivar las características de diferentes familias de éstos e identificar qué cuerpo del sistema solar les dio origen.

Como resultado de la fase II del Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASII), Bus y Binzel (2002) propusieron una clasificación taxonómica de asteroides, basada en la definición de tres grupos mayores, los complejos S (S, Sa, Sk, Sl, Sq y Sr), C (C, Cb, Cg, Cgh, Ch) y X (X, Xc, Xe y Xk) y 11 clases adicionales (A, B, C, D, K, O, Q, R, S, T y V), para un total de 26 clases taxonómicas que tienen en cuenta la presencia o ausencia de determinadas características espectrales y la pendiente del continuo del espectro. Posteriormente, DeMeo *et al.* (2009) extendieron esta clasificación taxonómica al infrarrojo cercano, cubriendo el intervalo entre 0.8 y 2.45 μm . Al complejo C pertenecen los asteroides carbonáceos oscuros (de muy bajo albedo), al complejo

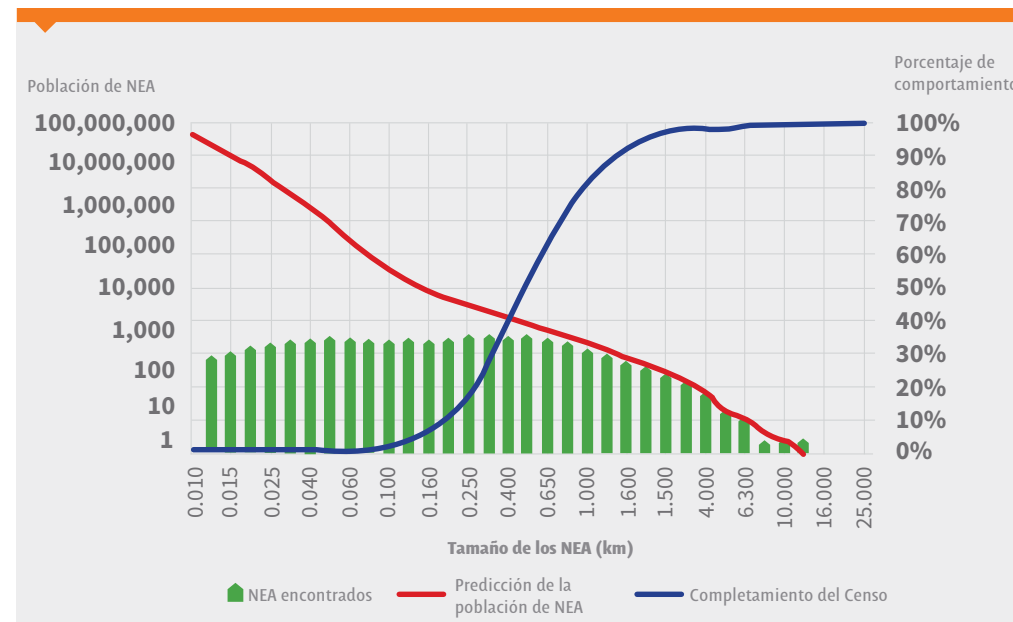


Figura 2. Estado actual del conocimiento del completamiento de las muestras de NEAs en función de la distribución de tamaños (Johnson, 2015).

S, los objetos silíceos o pétreos, y finalmente el complejo X está integrado, fundamentalmente, por objetos metálicos con un rango muy variado de albedos.

En nuestro caso, la fotometría de asteroides tiene como finalidad la construcción de sus curvas de luz para encontrar el periodo de rotación y la amplitud con que varía su brillo aparente, mientras que las observaciones espectroscópicas, a través de las propiedades de los espectros de reflexión de los NEAs, brindan la posibilidad de determinar la clase taxonómica a la cual éstos pertenecen.

● OBSERVACIONES Y REDUCCIÓN DE DATOS OBSERVACIONES FOTOMÉTRICAS

La fotometría de asteroides del cinturón principal se realizó con la cámara Schmidt de Tonantzintla (figura 3), con un espejo esférico y una lente correctora de 77.4 cm y 66.04 cm, respectivamente. Para reducir el campo de visión (FOV) del telescopio, originalmente de 25 grados cuadrados en el cielo, se instaló una lente aplanadora de campo (D = 190 mm), con lo cual, la distancia focal del sistema óptico actual es de 2135.2 mm, que proporciona una escala de placa de 96.6 arcsec/mm. Para obtener las imágenes se utilizó un CCD Santa Bárbara ST-8 de 1530 × 1020 píxeles de 9.0 × 9.0 micras. El tamaño físico del detector es de 13.8 × 9.2 mm, que proporciona un FOV de 22.2 × 14.8 arcmin, suficientemente grande para la observación de la mayoría de los asteroides del cinturón principal en el mismo campo estelar durante toda la noche. Los asteroides que se encuentran en oposición en diferentes épocas del año fueron seleccionados en la página del Minor Planet Center (http://www.minorplanet.info/PHP/call_OppLCDBQuery.php) y sus efemérides generadas utilizando el Minor Planet & Comet Ephemeris Service (<http://www.minorplanetcenter.net/iau/MPEph/MPEph.html>).

Para la construcción de la curva de luz de un asteroide es necesario el seguimiento del objeto

durante el mayor tiempo posible durante una o varias noches para tratar de cubrir el periodo completo de rotación. La fotometría diferencial se realiza con 4 o 5 estrellas de referencia del campo en caso de que una de éstas sea una estrella variable. Teniendo en cuenta que los asteroides reflejan la luz del sol, las estrellas de referencia, seleccionadas en cada campo estelar, fueron estrellas análogos solares. Recordemos que la curva de luz es una representación bidimensional de las variaciones del brillo de un objeto en función del tiempo.

Para la reducción de las imágenes y la obtención de las magnitudes instrumentales de los asteroides se utilizó el programa MPO Canopus (<http://www.minorplanetobserver.com/MPO-Software/MPOCanopus.htm>), el cual, además, permite realizar un análisis de Fourier de la serie temporal y determinar el periodo de rotación del asteroide. Las imágenes fueron tomadas sin filtro y corregidas por Darks y campos planos preliminarmente.

En la tabla 1 se muestran las características orbitales de los asteroides seleccionados que corresponden a la primera noche de observación, Delta y r son las distancias del asteroide a la Tierra y al Sol respectivamente, en unidades astronómicas (U.A.), Elong es la elongación solar, es decir, la separación angular entre el asteroide y el Sol, vista desde la Tierra; Fase es el ángulo de fase del objeto, es decir, la separación angular entre la Tierra y el Sol, vista desde el asteroide. La última columna es la magnitud estelar del asteroide en la banda V del sistema fotométrico de Johnson (Johnson y Morgan, 1953).

● OBSERVACIONES ESPECTROSCÓPICAS

La selección de los NEAs que se encontraban en oposición y la forma en que se generaron sus efemérides coincide con el procedimiento empleado para los asteroides del Cinturón Principal.

Los espectros ópticos, de baja resolución, de 21 NEAs se obtuvieron con el telescopio de 2.1 m



➤ 90%

de los NEAs con diámetros mayores a 1 km ya ha sido descubierto por los diferentes sistemas de búsqueda e identificación de asteroides.

➤ 80%

de los NEAs con diámetros entre 500 y 1000 m ha sido descubierto.

En el intervalo de tamaños entre 300 y 500 m sólo han sido identificado el

➤ 45%

de los mismos.

Los NEAs más pequeños representan -actualmente- el mayor problema, ya que su número es mayor y porque se ha descubierto un porcentaje mucho menor, sólo el

➤ 13%

de los NEAs entre 100 y 300 m.

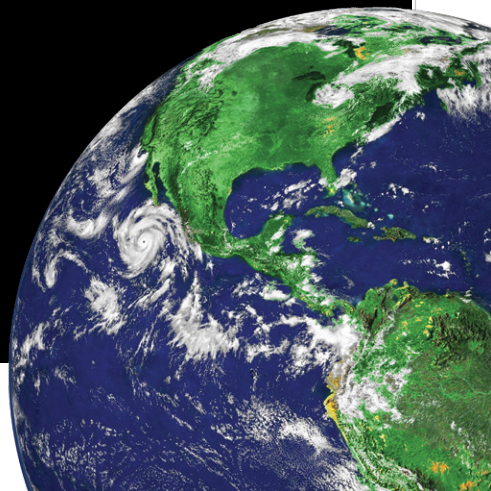


Tabla 1. Características orbitales de los asteroides seleccionados en el momento de la observación.

Asteroide	Fechas observadas (UT)	Delta (U.A.)	r (U.A.)	Elong (grados)	Fase (grados)	V (mag.)
(1117) Reginita	2015/11/04	1.321	2.023	121.3	24.8	15.0
(1363) Herberta	2015/12/15-16-17	2.000	2.945	160.2	6.5	15.6
(2434) Bateson	2015/11/11-12	2.038	3.017	170.0	3.3	15.8
(3775) Ellenbeth	2015/12/01-02	1.514	2.423	150.9	11.4	16.3
(5401) Minamioda	2015/11/13-21	1.395	2.384	178.5	0.6	14.9

Tabla 2. Características orbitales en el momento de la observación y parámetros físicos de los NEAs seleccionados.

Objeto	V (mag)	Delta (U.A.)	r (U.A.)	Fase (grados)	H (mag)	D (km)
(433) Eros	12.5	0.814	1.760	17.8	11.16	20.79
(3103) Eger	14.3	0.194	1.079	65.7	15.38	2.97
(4953) 1990 MU	15.1	0.488	1.090	65.8	14.1	5.37
(5143) Heracles	15.3	0.665	1.481	33.4	13.9	5.88
(5693) 1993 EA	15.6	0.368	1.349	6.7	16.6	1.69
(7341) 1991 VK	16.3	0.382	1.335	23.3	16.7	1.62
(40267) 1999 GJ4	15.9	0.472	1.303	39.3	15.4	2.95
(154244) 2002 KL6	14.3	0.075	1.043	66.7	17.4	1.17
(162269) 1999 VO6	16.4	0.252	1.079	64.2	17.0	1.41
(164121) 2003 YT1	14.2	0.142	1.062	58.6	16.2	2.04
(16834) 1997 WU22	17.9	0.925	1.539	38.3	15.6	2.69
(171819) 2001 FZ6	17.6	0.411	1.402	6.2	18.3	0.77
(185851) 2000 DP107	17.2	0.314	1.289	18.2	18.2	0.81
(248083) 2004 QU24	17.4	0.762	1.733	10.9	16.1	2.14
(252793) 2002 FW5	18.0	0.241	1.187	33.1	19.3	0.49
(370307) 2002 RH52	16.4	0.324	1.186	47.2	16.7	1.62
(378610) 2008 FT6	17.4	0.520	1.509	7.4	17.4	1.17
(413002) 1999 VG22	16.7	0.163	1.104	40.2	18.8	0.61
(452389) 2002 NW16	17.6	0.293	1.129	56.1	18.0	0.89
(462959) 2011 DU	16.9	0.083	1.069	26.7	21.0	0.22
(467963) 2012 JT17	15.8	0.110	1.059	52.1	18.6	0.67

Tabla 3. Parámetros del ajuste de la curva de luz de los asteroides observados.

Asteroide	Tiempo observado (horas)	Periodo (horas)	Amplitud (mag.)	σ
(1117) Reginita	6:30	2.944 ± 0.012	0.16	0.0564
(1363) Herberta	15:44	3.018 ± 0.002	0.16	0.0782
(2434) Bateson	7:55	6.409 ± 0.069	0.31	0.1354
(3775) Ellenbeth	14:09	12.148 ± 0.021	0.55	0.3028
(5401) Minamioda	11:40	3.951 ± 0.002	0.11	0.1168
(5401) Minamioda	11:40	7.294 ± 0.002	0.15	0.1168



Figura 3.

CÁMARA SCHMIDT DE TONANTZINTLA. EL ESPEJO ESFÉRICO DE 77.4 CM DE DIÁMETRO SE ENCUENTRA EN LA PARTE INFERIOR DEL TUBO. EN LA SECCIÓN PINTADA DE NEGRO, EN LA PARTE DELANTERA DEL TUBO, SE UBICA LALENTE CORRECTORA DE 66.04 CM.

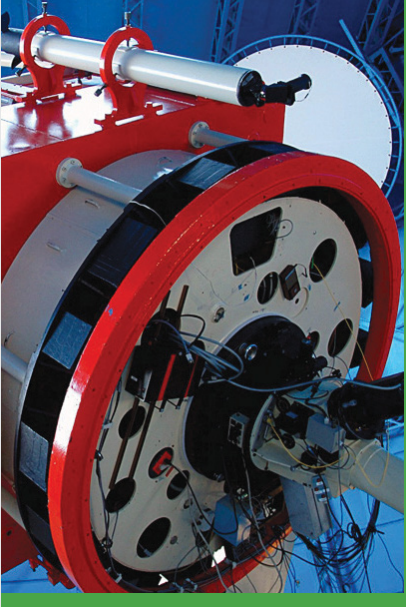


Figura 4.

TELESCOPIO REFLECTOR DE 2.1 M DEL OAGH. EN LA PLATINA DEL TELESCOPIO SE PUEDE OBSERVAR INSTALADO EL ESPECTRÓGRAFO BOLLER & CHIVENS.



del OAGH (figura 4) y un espectrógrafo Boller y Chivens de rendija larga. Se utilizó una rejilla de difracción de 50 líneas/mm que proporciona una cobertura espectral entre 4,500 Å y 10,000 Å, una dispersión de 9.9 Å/píxel y una resolución espectral de 50 Å. Debido al rápido movimiento en el cielo de algunos de los NEAs observados, para reducir los efectos de la refracción atmosférica diferencial y para evitar pérdidas de luz en la rendija, se seleccionó un ancho de rendija de 400 μm, que corresponde a 3.2 segundos de arco en el cielo. Para obtener los espectros se utilizó un CCD Site600 de 1024 × 1024 píxeles y para cada objeto se obtuvieron tres espectros de 900 segundos de tiempo de exposición.

Las observaciones fueron realizadas en julio y agosto de 2016 y en enero de 2017. Algunas características orbitales en el momento de la observación y parámetros físicos de los NEAs observados se muestran en la tabla 2, donde H es la magnitud absoluta del asteroide y D es el diámetro en km, que se calcula, a partir de H, por la siguiente fórmula, suponiendo un albedo de 0.14 y que a un asteroide de 1 km de diámetro le corresponde una magnitud H = 17.75

D = (1km) × 10^{(17.75 - H)/5}

Para remover la contribución de la luz solar en los espectros de cada uno de los NEAs observados, se obtuvieron los espectros de estrellas análogos solares (Hardorp, 1978) a una masa de aire (X = 1/cos(z), donde z es la distancia cenital de la observación) lo más cercana posible a aquella del asteroide en cuestión.

La reducción de las imágenes se realizó con el programa Image Reduction Analysis Facility (IRAF). Los espectros corregidos por extinción atmosférica de los NEAs y análogos solares fueron normalizados a una longitud de onda de 5500 Å. Finalmente, los espectros de reflexión de los asteroides fueron obtenidos al dividir el espectro normalizado del NEA por el correspondiente espectro normalizado de la estrella análogo solar.

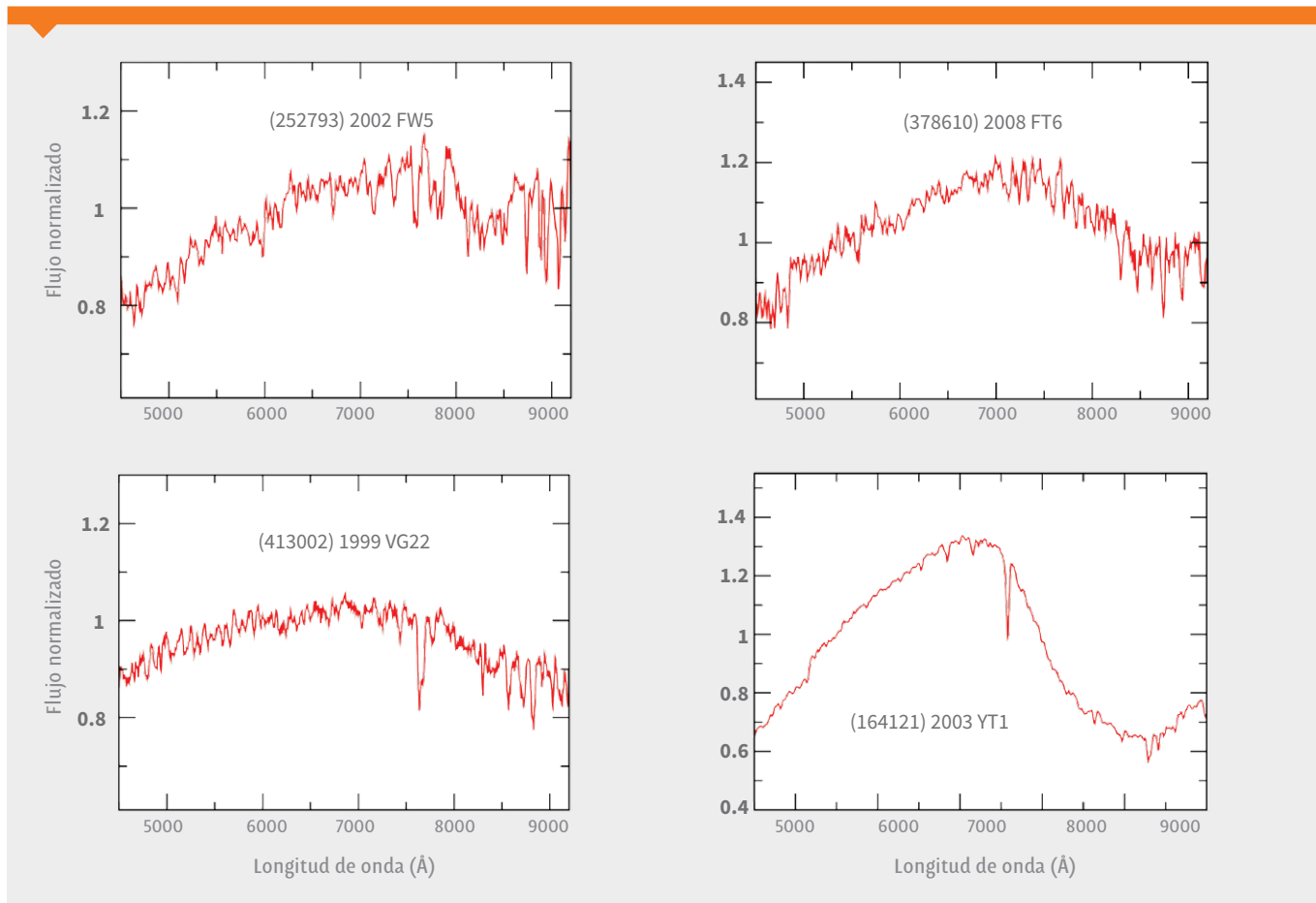
En la figura 5 mostramos los espectros de algunos de los NEAs de la muestra, obtenidos de la manera antes descrita, donde se pueden observar las diferencias entre las distintas clases taxonómicas.

● RESULTADOS OBSERVACIONES FOTOMÉTRICAS

La tabla 3 muestra los resultados del ajuste de la curva de luz de los asteroides observados. En la columna 3 podemos ver el valor del periodo encontrado a partir del análisis de Fourier de la serie temporal (se ajustaron polinomios de orden 4 y 5) y los errores correspondientes. La amplitud de la curva de luz (la diferencia entre el mayor y menor brillo observado del asteroide) se muestra en la columna 4, de donde se puede inferir que los asteroides con mayor diferencia entre sus lados *side-on* y *point-on* son (2434) Batenson y (3775) Ellenbeth. σ representa la desviación estándar de las magnitudes instrumentales de las estrellas de referencia que se utilizaron para construir la curva de luz; estos valores indican que, en ningún caso, se utilizó una estrella variable como estrella de referencia. Las dos entradas en la tabla del asteroide (5401) Minamioda, obedecen al hecho de que se encontraron dos valores del periodo igualmente significativos en el análisis de Fourier. La figura 6 muestra las curvas de luz de los asteroides observados.

Los resultados obtenidos para los asteroides (2434) Batenson y (3775) Ellenbeth son preliminares porque, como se observa en la figura 6, la cobertura del periodo completo de rotación en la curva de luz no es la más idónea. A pesar de que ambos asteroides fueron observados en más de una noche, la parte de la curva de luz observada en cada ocasión es casi la misma, esto puede sugerir un periodo cercano a las 12 o 24 horas, lo cual está en buena concordancia con el resultado obtenido para (3775) Ellenbeth. Se requieren más observaciones de estos asteroides en próximas oposiciones para precisar el valor del periodo de rotación.

Figura 5. Panel superior izquierdo: espectro normalizado de (252793) 2002 FW5, que pertenece al complejo X. Panel superior derecho: espectro normalizado de (378610) 2008 FT6, que pertenece al complejo S. Panel inferior izquierdo: espectro normalizado de (413002) 1999 VG22, que pertenece al complejo C. Panel inferior derecho: espectro normalizado de (164121) 2003 YT1, que pertenece a la clase taxonómica V.



Los resultados del análisis de Fourier para los asteroides (1117) Reginita, (1363) Herberta y (5401) Minamioda, nos permiten asegurar que las soluciones obtenidas son correctas. Por otro lado, en los tres casos se observa el típico patrón de dos mínimos y dos máximos en las curvas de luz.

El periodo de 2.944 ± 0.012 horas, obtenido para (1117) Reginita, está en excelente concordancia con los reportados por Chang *et al.* (2015), Waszczak *et al.* (2015) y Kryszczyńska *et al.* (2012). Black *et al.* (2016) reportan un periodo de 3.015 ± 0.005 horas para (1363) Herberta y Marchini *et al.* (2016) uno de 3.949 ± 0.003 horas para (5401) Minamioda, ambos resultados coinciden con nuestros valores del periodo de rotación para estos asteroides.

● OBSERVACIONES ESPECTROSCÓPICAS

Un método directo para determinar la clase taxonómica a la cual pertenece un asteroide es calcular lo que se ha definido como la «distancia espectral (D_x)» (Yang *et al.*, 2003) entre el es-

pectro del asteroide y un determinado modelo espectral. Se define como:

$$D_x = \left[\sum_{n=1}^k (X_n - Y_n)^2 \right]^{1/2}$$

donde X es el espectro por clasificar y Y es el modelo espectral, k es el número total de puntos utilizados en el ajuste.

Para determinar la clase taxonómica de los NEAs observados, calculamos la distancia espectral de estos objetos, buscando el mejor ajuste entre sus espectros y los modelos espectrales promedios de las 24 clases taxonómicas propuestas por DeMeo *et al.* (2009). Utilizamos 10 u 11 puntos (desde 4500 Å hasta 9500 Å con un paso de 500 Å) en la parte óptica de los espectros, dependiendo de la relación señal a ruido de los espectros de los NEAs observados.

El resultado de este procedimiento, que se muestra en la tabla 4, nos ha permitido restringir considerablemente las clases taxonómicas

a las cuales puede pertenecer un determinado NEA. En un futuro haremos más precisa esta clasificación.

Cuatro de los NEAs que pertenecen a nuestra muestra fueron clasificados por Buz y Binzel (2002). Para tres de ellos, (433) Eros (complejo S), (5143) Heracles (clase taxonómica O) y (7341) 1991 VK (clase taxonómica Sq), nuestra clasificación coincide con la propuesta por Buz y Binzel (2002). Hay discrepancia sólo en el caso de (3103) Eger, clasificado previamente como un asteroide de clase taxonómica Xe. En nuestro caso, la clasificación taxonómica de este NEA es más consistente con el complejo C. Sin embargo, el valor de la distancia espectral D_x para la clase taxonómica Xn es 0.2805, similar a los valores obtenidos para las clases taxonómicas del complejo C. Además, como propiamente señalan Buz y Binzel (2002), mientras no se tenga una estimación del valor del albedo de los asteroides, no existe una frontera natural de división entre los complejos C y X. Se requiere comparar el espectro observado de (3103) Eger, no con los valores promedio de las clases taxonómicas de DeMeo *et al.*, (2009), sino con los espectros individuales de asteroides incluidos en el SMASSII (ver sección «Trabajo a futuro»).

Estas coincidencias, y el hecho de que los espectros de reflexión de un mismo NEAs, obtenidos con diferentes análogos solares observados en una noche, muestran diferencias mínimas entre sí, apuntan a que el proceso de reducción de los datos es eficiente y que la metodología utilizada funciona adecuadamente para obtener la clasificación taxonómica de nuevos asteroides y NEAs.

Para el resto de los NEAs observados, se propone, por primera vez, una clasificación taxonómica utilizando la parte visible del espectro electromagnético. Un análisis estadístico de los resultados obtenidos muestra que sólo un NEA de la muestra (4.7%), pertenece al complejo X, 7 NEAs (33.3%) pertenecen al complejo S, 7 NEAs (33.3%) pertenecen al complejo C y 6 NEAs (28.6%) pertenecen a clases taxonómicas adicionales.

Al establecer la conexión entre los NEAs y los meteoritos terrestres, aunque nuestra muestra es pequeña, el hecho de encontrar que más de 1/3 de los NEAs observados pertenece al complejo S, ratifica la conclusión propuesta por Binzel *et al.* (2001), en el sentido de que, mientras los asteroides con espectros similares a aquellos de las condritas ordinarias son muy raros en el cinturón principal de asteroides, éstos son relativamente comunes entre la población de NEAs. Muy probablemente, cuatro de los NEAs observados por nosotros pertenecen a la clase Q, una clase de objetos que tienen espectros similares a los meteoritos más comunes, las condritas ordinarias. El valor de D_x para la clase Q es muy baja para estos asteroides; 0.0697 para (7341) 1991 VK, 0.0700 para (40267) 1999 GJ4, 0.1099 para (5693) 1993 EA y 0.1480 para (252793) 2002 FW5.

◆ CONCLUSIONES

Reportamos los primeros resultados que hemos obtenido de un programa de observaciones fotométricas y espectroscópicas que nos permitirá contribuir a la determinación de parámetros físicos de asteroides del cinturón principal y de NEAs.



LA FOTOMETRÍA DE ASTEROIDES DEL CINTURÓN PRINCIPAL SE REALIZÓ CON LA CÁMARA SCHMIDT DE TONANTZINTLA.

Los espectros ópticos, de baja resolución, de

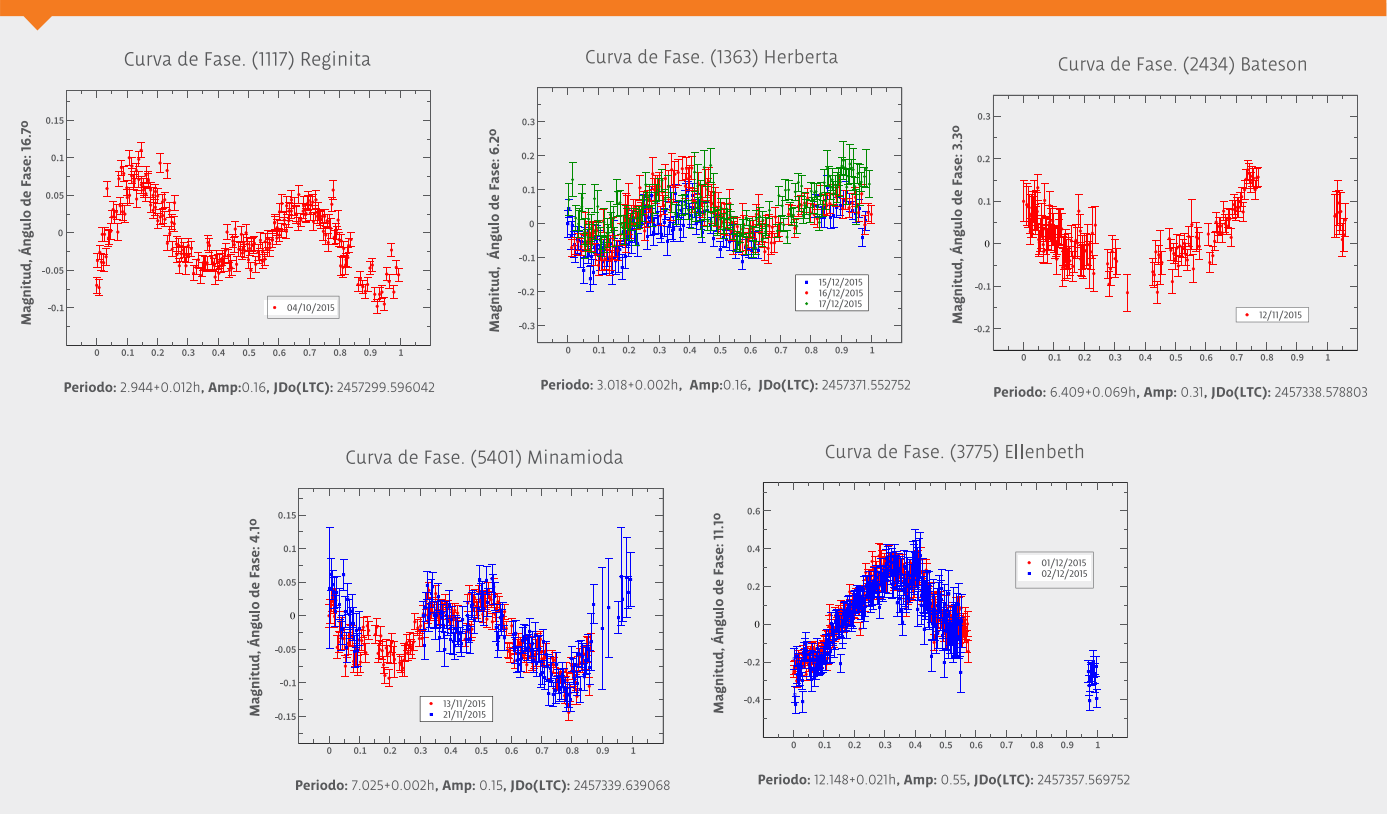
21 NEAs

se obtuvieron con el telescopio de

2.1m

del OAGH y un espectrógrafo Boller & Chivens de rendija larga

Figura 6. Curvas de luz de los asteroides observados. En el recuadro de cada curva de luz se pueden identificar, con diferentes colores, las diferentes noches de observación. También se muestra el periodo de rotación de los asteroides y la amplitud de la curva de luz.



Hemos obtenido las curvas de luz de cinco asteroides del cinturón principal y determinado de una manera confiable el periodo de rotación y la amplitud de la curva de luz para tres de ellos: (1117) Reginita, (1363) Herberta y (5401) Minamioda. En este sentido, otro resultado, colateral, pero muy importante es la recuperación de la histórica Cámara Schmidt de Tonantzintla para hacer, nuevamente, investigación astronómica.

En cuanto a las observaciones espectroscópicas, hemos determinado la clase taxonómica de 21 NEAs, reportando, para 17 de ellos, por primera vez, su clasificación taxonómica. Un dato muy interesante es que hemos confirmado, dentro de la población de NEAs, la alta incidencia de asteroides con espectros similares a aquellos de los meteoritos terrestres más comunes, las condritas ordinarias, lo cual establece una conexión importante entre la población de NEAs y los meteoritos terrestres. De esta manera, hemos demostrando las capacidades de nuestras facilidades observacionales en el OAGH para este tipo de investigación y comenzado un programa a largo plazo para contribuir al entendimiento de las propiedades físicas de diferentes tipos de asteroides y NEAs.

● **TRABAJO A FUTURO**

Utilizar las curvas de luz de la base de datos del Minor Planet Center (Asteroid Lightcurve Databa-

Tabla 4. Clases taxonómicas que proporcionaron un mejor ajuste con los espectros de los NEAs observados.

Objeto	Posible clasificación taxonómica
(433) Eros	Complejo S o clase-R
(3103) Eger	Complejo C o clase-Q
(4953) 1990 MU	Clase-O
(5143) Heracles	Clase-O
(5693) 1993 EA	Complejo C o clase-Q
(7341) 1991 VK	Complejo S o clase-Q
(40267) 1999 GJ4	Clase-Q
(154244) 2002 KL6	Complejo S
(162269) 1999 VO6	Complejo S
(164121) 2003 YT1	Clase-V
(16834) 1997 WU22	Complejo C o clase-O
(171819) 2001 FZ6	Clase-O o clase-V
(185851) 2000 DP107	Complejo C
(248083) 2004 QU24	Complejo C o clase-O
(252793) 2002 FW5	Complejo X o clase-Q
(370307) 2002 RH52	Complejo C
(378610) 2008 FT6	Complejo S o clase-R
(413002) 1999 VG22	Complejo C
(452389) 2002 NW16	Complejo S o clase-A
(462959) 2011 DU	Clase-O
(467963) 2012 JT17	Complejo S

se) obtenidas a diferentes ángulos de fase. Aplicando el método de inversión de las curvas de luz determinar parámetros físicos de los asteroides como la inclinación de eje de rotación, la forma y el tamaño de estos objetos.

Afinar la determinación de las clases taxonómicas de los NEAs observados utilizando los espectros individuales de alrededor de más de 1,500 asteroides contenidos en la fase II del Small Main-belt Asteroid Spectroscopic Survey (SMASSII), en lugar de utilizar los espectros promedios de las 26 clases taxonómicas de DeMeo *et al.* (2009).



José Ramón Valdés Parra

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

Investigador titular de la Coordinación de Astrofísica del INAOE y miembro del Sistema Nacional de Investigadores (SNI). Autor de más de 40 artículos de investigación publicados en revistas internacionales de arbitraje anónimo. Presidente del Consejo Editorial de la revista Entorno UDLAP. jvaldes@inaoep.mx



José Guichard Romero

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

Investigador titular de la Coordinación de Astrofísica del INAOE. Su área de investigación es la astronomía óptica e infrarroja, en particular en los campos de las galaxias activas y el ambiente espacial e interplanetario, especialmente en el tema de los objetos cercanos a la Tierra. Es director del Campus México del Centro Regional de Enseñanza de Ciencia y Tecnología del Espacio para América Latina y el Caribe (CRECTEALC). jguich@inaoep.mx



Sergio Camacho Lara

AUTOR DE CORRESPONDENCIA

Doctor en Ciencia Aeroespacial por la Universidad de Michigan, Ann Arbor. Es secretario general del Centro Regional de Enseñanza de Ciencia y Tecnología del Espacio para América Latina y el Caribe. Fue director de la Oficina de Naciones Unidas para Asuntos del Espacio Ultraterrestre. Presidió el grupo de Trabajo sobre objetos cercanos a la Tierra (NEO) de la Comisión de Naciones Unidas sobre la Utilización del Espacio Ultraterrestre con Fines Pacíficos. Esta labor resultó en el establecimiento de la Red Internacional de Alerta de Asteroides (IAWN) y del Grupo Consultivo de Planificación de Misiones Espaciales (SMPAG), las agencias espaciales que responderían en caso de amenaza de impacto a la Tierra por un asteroide. sergio.camacho@inaoep.mx

REFERENCIAS

• Black *et al.* (2016). Lightcurve Analysis of Asteroids Observed at the Oakley Southern Sky Observatory. *The Minor Planet Bulletin* 43,(4) 287-289.

• Binzel *et al.* (2001). Spectral Properties of NEOs: Palomar and IRTF Results for 48 Objects Including Spacecraft Targets (9969) Braille and (10302) 1989 ML. *Icarus*, 151, 139-149.

• Bottke *et al.* (2002). Debaised Orbital and Absolute Magnitude Distribution of the Near-Earth Objects. *Icarus*, 156, 399.

• Bottke, W.F., Rubincam, D.P., y Burns, J.A. (2000). Dynamical Evolution of Main Belt Meteoroids: Numerical Simulations Incorporating Planetary Perturbations and Yarkovsky Thermal Forces. *Icarus*, 154, 301.

• Brown, P., Spalding, R.E., ReVelle, D.O., Tagliaferri, E., y Worden, S.P. (2002). The flux of small near-Earth objects colliding with the Earth. *Nature*, 420, 294-296

• Bus, S.J., y Binzel, R.P. (2002). Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey. A feature-based taxonomy. *Icarus*, 158, 146-177.

• Chang *et al.* (2015). Asteroid spin-rate study using the intermediate Palomar Transient Factory. *ApJSS*, 219, 27.

• DeMeo, F.E., Binzel, R.P., Slivan, S.M., y Bus, J. (2009). An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus*, 202, 160.

• Farnocchia *et al.* (2013). Near Earth Asteroids with measurable Yarkovsky Effect. *Icarus*, 224, 1.

• Hardorp, J. (1978). *A&A*, 63, 383.

• Harris, A.W., Boslough, M., Chapman, C.R., Drube, L., Michel, P., y Harris, A.W. (2015). Asteroid impacts and modern civilization: Can we prevent a catastrophe? *Asteroids IV* (P. Michel *et al.*, eds.) 835-854.

• Harris, A.W. (2009). Space Science Institute. The NEO population, impact risk, progress of current surveys, and prospects for future surveys.

• Johnson, H.L., y Morgan, W.W. (1953). Fundamental stellar photometry for standards of spectral type on the revised system of the Yerkes spectral atlas. *ApJ*, 117, 313-352.

• Kaasalainen *et al.* (2004). Photometry and models of eight nearEarth asteroids. *Icarus*, 167, 178-196.

• Kaasalainen, M., Mottola, S., Fulchignoni, M. (2002). Asteroid models from disk-integrated data. En Bottke, W., Binzel, R., Paolicchi, P., Cellino, A. (Eds.), *Asteroids III*. Univ. of Arizona Press: Tucson.

• Kaasalainen, M., y Torppa, J. (2001). Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. I. Shape Determination. *Icarus*, 153, 24.

• Kaasalainen, M., Torppa, J., y Muinonen, K. (2001). Optimization Methods for Asteroid Lightcurve Inversion. II. The Complete Inverse Problem. *Icarus*, 153, 37.

• Kryszczynska *et al.* (2012). Do Slivan states exist in the Flora Family? I. Photometry survey of the Flora region. *A&A*, 546, A72.

• Love, S.G., y Brownlee, D.E. (1993). A direct measurement of the terrestrial mass accretion rate of cosmic dust. *Science*, 262, 550.

• Marchini *et al.* (2016). Rotation Period Determination for 5401 Minamioda. *The Minor Planet Bulletin*, 43,(2), 188-190.

• Morbidelli *et al.* (2002). Origen and Evolution of Near-Earth Objects. *Asteroids III*. The University of Arizona Press.

• National Aeronautics and Space Administration Authorization Act of 2015. H.R.810. 114th Congress. 1st Session. Sponsor: Rep. Palazzo, Steven M. [R-MS-4].

• Stokes *et al.* (2003). A study to determine de feasibility of extending the search for NEOs to smaller limiting magnitudes. Request of NASA Headquarters Office of Space Sciences Solar System Exploration Division.

• Waszczak *et al.* (2015). Asteroid Light Curves form the Palomar Transient Factory Survey: Rotation Periods and Phase Functions form Sparse Photometry. *AJ*, 150, 75.

• Yang, B. *et al.* (2003). *AJ*, 126, 1086.