

Determinación de Cuerdas de Asteroides Mediante Ocultaciones Estelares.

Determination of Asteroid Strings by Stellar Occultations.

Claudia V. Barrios, *Estudiante, UCV*, Giuliat Y. Navas, *Investigadora, CIDA*

Resumen— Una ocultación estelar es la alineación o interposición de dos cuerpos celestes tal como una estrella por un asteroide, por un cometa, por otra estrella, etc. Los cuales al ser vistos desde la Tierra, se logra observar cómo el objeto más cercano bloquea la luz del objeto más alejado por un período de tiempo. Gracias a esa luz bloqueada podemos estudiar las propiedades físicas y químicas del objeto ocultante. Las ocultaciones estelares son eventos que pueden ser observables a lo largo de estrechas franjas en la superficie de la Tierra, y esto dependerá de la predicción del patrón de visibilidad del mismo. Podemos tener varios tipos de ocultaciones, y esto dependerá del tamaño de los cuerpos y del lugar donde se observen. Al obtener una ocultación estelar exitosa, se procede al cálculo de la curva de luz del objeto ocultado y posteriormente, se calcula el diámetro del objeto ocultante. Cuando el evento es observado en diferentes zonas geográficas se podrá calcular la forma del objeto ocultante y así contribuir al conocimiento del Sistema Solar. En el presente trabajo se analizaron y estudiaron las ocultaciones estelares por los asteroides (28) Bellona y (568) Cheruskia que fueron observadas desde el Observatorio Astronómico Nacional Llano del Hato, a través del telescopio Reflector de 1 metro de diámetro, ubicado en el estado Mérida. De dichos eventos fueron obtenidas las curvas de luz correspondientes a cada ocultación, y luego se procedió al cálculo de la cuerda del asteroide 28-Bellona, en vista de que fue la única ocultación registrada por el telescopio.

Palabras claves— asteroides, cuerda, estrella, ocultación.

Abstract— A stellar occultation is the alignment or the interposition of two celestial bodies, like a star by an asteroid or a star by a comet, etc. When the occultation have been seen from the Earth, we can observed how the closest object blocks the light of the farther object, by a period of time. Thanks to this blocked light, we can study the physical and chemical properties of the occulted object. The stellar occultations are events which may be observable along of narrow bands in the Earth's surface, and this it will depend of the visibility patterns of the same.

Fecha de envío del paper para revisión 28 de junio de 2017.

C. B., Estudiante de pregrado en física de la Universidad Central de Venezuela. Ciudad Universitaria, Los Chaguaramos. Caracas, Venezuela. Caracas ZP 1040, Apartado Postal 20513. claudia.barrios@ciens.ucv.ve.

G. N., PhD en Ciencias de la Tierra, el Universo y el Ambiente (2011) Universidad Joseph Fourier, Grenoble Francia. Actualmente investigadora en el Centro de Investigaciones de Astronomía Francisco J. Duarte (CIDA), Av Alberto Carnevali, Mérida 5101, Mérida. gnavas@cida.gob.ve

We can have several occultations types, and it will depend of the objects size and the place where it will be observed. When a successful stellar occultation is performed, the light curve of the occult object is calculated and the diameter of the occulting body is calculated. When the event is observed in different geographical areas, it will be possible to calculate the shape of the occulting body and its contribution to the knowledge of the Solar System.

In the present work the stellar occultations by the asteroids (28) Bellona and (568) Cheruskia, were analyzed and studied, which were observed from the National Astronomical Observatory Llano del Hato (OAN), through the 1 meter in diameter Reflector telescope, located in Mérida. From these events were obtained the light curves corresponding to each occultation, and then, were calculated the chord of the asteroid 28-Bellona, since it was the only occultation recorded by the telescope.

Keywords— asteroids, occultation, star, strings.

I. INTRODUCCIÓN

Una ocultación es la alineación o interposición de dos cuerpos celestes vistos desde la Tierra [1], y estas se clasifican por su trayectoria y por su tamaño aparente [2]. La observación de una ocultación consiste en series de tiempo fotométricas de la luz combinada del objeto ocultante y del ocultado, la cual es obtenida desde la curva de luz [2]. Las ocultaciones estelares son eventos que ocurren a lo largo de estrechas franjas en la superficie de la Tierra durante los cuales cuerpos celestes tienden a eclipsar temporalmente a las estrellas [2] [3]. Por otra parte, las ocultaciones estelares tienen su propia clasificación, sin embargo, este trabajo se enmarca en las ocultaciones estelares por asteroides. Los asteroides son objetos pequeños compuestos de materiales no volátiles, rocosos o metálicos que orbitan alrededor del Sol. Estos son muy pequeños para ser considerados planetas, pero son más grandes que los meteoroides. Su tamaño y su forma es muy diversa, varían desde los 25 km de diámetro, hasta los 1000 km de diámetro, que es el tamaño del planeta enano Ceres. Aproximadamente 16 asteroides tienen un diámetro igual o superior a los 240 km, 700 asteroides miden un poco más de 50 km, y el resto mide menos de 50 km de diámetro. El aspecto de un asteroide visto desde un telescopio es puntal y presentan variaciones de luminosidad, muy brillantes, con 7 de magnitud y menos brillantes con 22 de magnitud. Dentro de nuestro Sistema Solar, la mayor cantidad de asteroides se encuentran aglomerados entre las órbitas de Marte y Júpiter, en el llamado Cinturón Principal de Asteroides, a 2,8 Unidades Astronómicas (UA) del Sol. El origen de los

asteroides está conectado con el origen del Sistema Solar. Hoy los planetólogos piensan que los asteroides son cuerpos que no consiguieron aglomerarse para formar un planeta, a causa de la influencia de Júpiter. Un indicio a favor de esta teoría es la presencia de agujeros en la distribución de las órbitas del cinturón de asteroides. De esta manera, se presume que el fenómeno de la resonancia es el responsable de la ausencia del quinto planeta telúrico de Nuestro Sistema Solar, ubicado entre las órbitas de Marte y Júpiter.

Ahora bien, es importante destacar que en una ocultación estelar por un asteroide, el asteroide se interpone por unos segundos entre una estrella brillante y el observador situado en la Tierra. Midiendo la hora exacta en la que desaparece y reaparece la estrella ocultada, conociendo la velocidad orbital del asteroide, además de su dirección y su distancia al observador se podrá determinar la longitud de la ocultación, a través del disco aparente del asteroide [4][5][6]. Hoy en día, el método de las ocultaciones es considerado uno de los más eficaces para reconocer cuerpos celestes y brindar informaciones muy valiosas de los cuerpos involucrados en el evento. Siempre y cuando hayan varios observadores ubicados en la franja de visibilidad del evento es posible determinar el tamaño y la forma de los objetos ocultantes [4][5]. Esto se logra mediante el cálculo de cuerdas, que no son más que la longitud de la cara del asteroide o cuerpo celeste que se interpone entre la estrella y la Tierra durante la ocultación. Las ocultaciones también permiten identificar si el objeto ocultante tiene atmósfera, anillos, un sistema binario a su alrededor, determinar exoplanetas, entre otros [6]. Un exoplaneta es un planeta no perteneciente a nuestro Sistema Solar, el cual orbita alrededor de una estrella central. La primera identificación científica de un exoplaneta fue en 1988, sin embargo, la primera detección confirmada fue en 1992 [7]. Desde entonces y hasta el primero de junio de 2017 hay 3610 exoplanetas en 2704 sistemas planetarios y 610 sistemas planetarios múltiples [8]. Uno de los hallazgos más recientes del método de las ocultaciones es el descubrimiento de los 7 planetas del Sistema planetario Trappist-1, ubicado a 39 años luz de la Tierra. Trappist-1 es un sistema extrasolar con siete planetas del tamaño de la Tierra girando alrededor de una enana roja ultra-fría conocida por 2 MASSJ23062928-05002285 [9]. En los últimos años, las ocultaciones estelares han sido una poderosa herramienta en el estudio de los pequeños cuerpos del Sistema Solar (e.g., anillos, satélites, asteroides, etc.). Observando el comportamiento de la estrella antes de su ocultación, podemos determinar la naturaleza de la atmósfera del objeto que se está aproximando. Si hay atmósfera, entonces la desaparición de la estrella será gradual. Por el contrario, si la estrella desaparece de repente, entonces el objeto que se está aproximando no tiene atmósfera, tal como sucede con los eclipses observados en la Tierra por la Luna. A través de una ocultación a Plutón con varios observadores en el 2015 desde Australia y Nueva Zelanda, Sicardy et al., [10] encontraron que la atmósfera de Plutón se está expandiendo a $5 \pm 2 \%$ desde el 2013 y a un factor casi 3 desde 1988. Por otro lado, a través de ocultaciones estelares observadas en el 2012 y 2013, A. Diaz et al., [11] han mostrado resultados similares sobre la atmósfera de Plutón. Por otro lado, gracias a las ocultaciones estelares, Bragas-ribas et al., [12] descubrieron los recientes anillos del objeto transneptuniano

Chariklo (un objeto transneptuniano es aquel cuya órbita alrededor del Sol está más allá de la órbita de Neptuno). Otros trabajos por medio de ocultaciones estelares han logrado determinar cuerdas, diámetros y formas de diversos asteroides de nuestro Sistema Solar [1][9]. Debemos remarcar que estamos entrando a una nueva era para las ocultaciones estelares. Con el catálogo de Gaia DR1, la predicción de los errores son muchos más pequeños, debido a la precisión de la posición de la estrella, y debido a la reducción de la observación de los objetos con catálogos referenciados, asociados con la determinación de las órbitas.

En este artículo se presenta, se discute y se analizan las ocultaciones estelares por los asteroides (28) Bellona y (568) Cheruskia, ambos asteroides ubicados en el Cinturón Principal de Asteroides. Los datos para este trabajo fueron observados desde el Observatorio Astronómico Nacional Llano del Hato (OAN), Mérida, Venezuela. En la siguiente sección mostraremos el instrumento empleado, las predicciones de los eventos observados, y el método aplicado para la adquisición de los datos. La sección 3 revela el procedimiento empleado para el análisis de las ocultaciones. La sección 4 muestra los resultados y sus respectivos análisis, y para finalizar, en la sección 5 presentamos las conclusiones.

II. INSTRUMENTO Y PREDICCIONES

Las ocultaciones analizadas en este trabajo fueron realizadas a partir de las observaciones obtenidas con el telescopio Reflector, el cual está ubicado en el OAN, sector de Llano del Hato del Estado Mérida, Venezuela ($8^{\circ} 47' 25.80''$ N, $70^{\circ} 52' 21.58''$ O, 3600 msnm, código IAU = 303).

A. Telescopio Reflector

Para la adquisición de los datos, el telescopio empleado es un Reflector de 1 metro de diámetro, fabricado en el año 1955 por la firma alemana Carl Zeiss. Este telescopio emplea cuatro espejos y un par de lentes correctivas, los cuales permiten observar un campo de 4×4 arcmin., además tiene una distancia focal de 20.9 metros y su montura es ecuatorial (Fig. 1). La cúpula que protege dicho telescopio tiene 11 metros de diámetro y puede girar horizontalmente 360 grados de forma continua [13]. Para estas observaciones, se le acopló una cámara CCD (CCD, Charge Coupled Device), modelo FLI PL4240 256 al telescopio en su configuración F/5 el cual permite aumentar el campo de observación del telescopio hasta 20 veces, es decir un campo de 1×1 grado [14]. Las imágenes se tomaron con el filtro 3 Bessell-R, de 65×65 mm y 630nm.



Fig. 1. Telescopio Reflector del Observatorio Astronómico Nacional de Llano del Hato (OAN). Con su configuración F5 en la cámara FLI. Créditos de la imagen: Dabare González (asistente Científico del CIDA).

B. Ocultación de la Estrella TYC 0278-00503-1 por el Asteroide (28) Bellona

El asteroide (28) Bellona, nombrado así por una diosa de la mitología romana, está ubicado en el Cinturón Principal de Asteroides y fue descubierto el 1 de marzo de 1854 por Karl Theodor Luther, desde el observatorio de Dusseldorf-Bilk, Alemania. Su distancia media al Sol es de 2.775 UA, pudiendo acercarse hasta 2.355 UA. Bellona tiene una excentricidad de 0.1515, una inclinación orbital de 9.433° , y el tiempo que tarda en orbitar al Sol es de 1689 días (es decir 4.6 años).

La ocultación de la estrella TYC 0278-00503-1 por el asteroide (28) Bellona fue predicha por Steve Preston [15] para la madrugada del 8 de febrero de 2016, entre las 5h26 y 5h58 en tiempo universal (UT). Para este evento, las predicciones ubicaron a la estrella TYC 0278-00503-1 con una ascensión recta de 11:40:32.2819 (J2000) y una declinación de 6:24:35.850, las magnitudes del asteroide y de la estrella eran de 10.7 y 12.2 respectivamente, la duración del evento era previsto de 18.9 segundos y la caída del brillo de la estrella prevista era de 0.24 magnitudes. La distancia Tierra-asteroide para esa noche era prevista a 1.522 UA. Estas informaciones pueden ser observadas en el encabezado del mapa de predicciones (Fig.2), donde tenemos el nombre de la estrella a ocultar, las efemérides en Ra (ascensión recta) y Dec (declinación), la magnitud de la estrella y del asteroide, la hora en la que ocurrirá el evento (en tiempo universal, UT), el tiempo de duración de la ocultación, y otros parámetros físicos del evento. Podemos notar que para esta predicción, la trayectoria de visibilidad de la ocultación pasa por Venezuela.

Tomando en cuenta las predicciones del evento y el buen tiempo en el cielo venezolano, se logró observar el evento desde el OAN. Los datos fueron tomados con un tiempo de integración (i.e., cadencia) de 12 segundos en el filtro R, donde 2 segundos fue el tiempo de exposición empleado por el CCD, y 10 segundos de tiempo muerto.

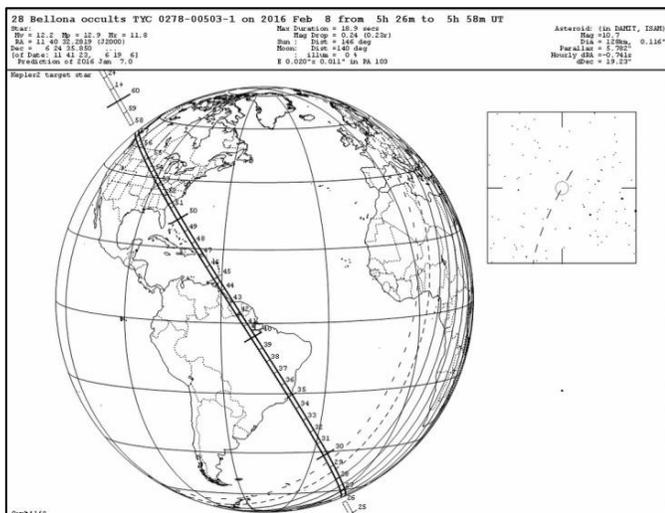


Fig. 2. Mapa de la trayectoria del asteroide (28) Bellona, donde es predicha la visibilidad del evento de ocultación a la estrella TYC 0278-00503-1. En el mapa, el trazo negro graduado que corta la Tierra diagonalmente, indica la posición de la trayectoria del asteroide (28) Bellona.

El tiempo muerto es el tiempo que tarda el dispositivo CCD en leer y guardar la información de la luz reflejada. En la Fig.3

podemos visualizar la pre-ocultación, ocultación y post-ocultación de la estrella TYC 0278-00503-1 por el asteroide (28) Bellona. Vemos efectivamente, cómo el asteroide (el punto de luz más grande visualmente en el campo) eclipsa la estrella (el punto de luz más pequeño en el campo). De esta manera afirmamos que la ocultación coincidió con la predicción, y que en efecto, Venezuela estaba dentro del patrón de visibilidad del evento, ya que pudimos registrar el evento.

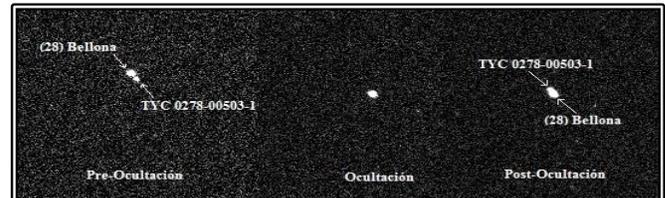


Fig. 3. Pre-ocultación, ocultación y post-ocultación del Asteroide (28) Bellona a la estrella TYC 0278-00503-1 observada desde el OAN.

C. Ocultación de la Estrella 2UCAC 40791605 por el Asteroide (568) Cheruskia

El asteroide (568) Cheruskia es nombrado así por una fraternidad de estudiantes de Heidelberg, Alemania. Está ubicado en el Cinturón Principal de Asteroides y fue descubierto el 26 de julio de 1906 por Paul Gotz, desde el observatorio de Heidelberg-Königstuhl, Alemania. Su distancia al Sol es de 2.88 UA, pudiéndose acercarse hasta 2.402 UA. Su excentricidad es de 0.167, su inclinación orbital es de 18.39° , y su tiempo en orbitar al Sol es de 1789 días (4.9 años).

La ocultación de la estrella 2UCAC 40791605 por el asteroide (568) Cheruskia fue predicha por Steve Preston [15] para la madrugada del 7 de octubre de 2013. Entre las 1h38 y 1h55 UT. Para este evento, las predicciones ubicaron a la estrella 2UCAC 40791605 con una ascensión recta de 23:26:19.22 (J2000) y una declinación de 25:04:56.667, las magnitudes tanto del asteroide como la estrella eran de 13.2 y 12.6 respectivamente, la duración del evento era previsto de 7.6 segundos y la caída del brillo de la estrella era de 1.1 magnitudes. La distancia Tierra-asteroide para esa noche era prevista a 1.65 UA. Estas informaciones pueden ser observadas en el encabezado del mapa de predicciones (Fig.4), donde tenemos el nombre de la estrella a ocultar, las efemérides en RA y DEC, la magnitud de la estrella y del asteroide, la hora en la que ocurrirá el evento, el tiempo de duración de la ocultación, y otros parámetros físicos del evento. Podemos notar que para esta predicción, la trayectoria de visibilidad de la ocultación pasa muy al Noroeste de Venezuela, este hecho implica que las condiciones no eran óptimas para observar el evento desde nuestro observatorio tanto por los instrumentos, como por la ubicación geográfica; sin embargo, pese a las complicaciones, de igual forma se decidió observar. Los datos fueron tomados con un tiempo de integración (i.e., cadencia) de 15 segundos en el filtro R, donde 5 segundos fue el tiempo de exposición empleado por el CCD, y 10 segundos de tiempo muerto.

En la Fig. 5 podemos visualizar la pre-ocultación, ocultación y post-ocultación de la estrella 2UCAC 40791605 por el asteroide (568) Cheruskia.

Vemos cómo el asteroide posiblemente eclipsa la estrella a

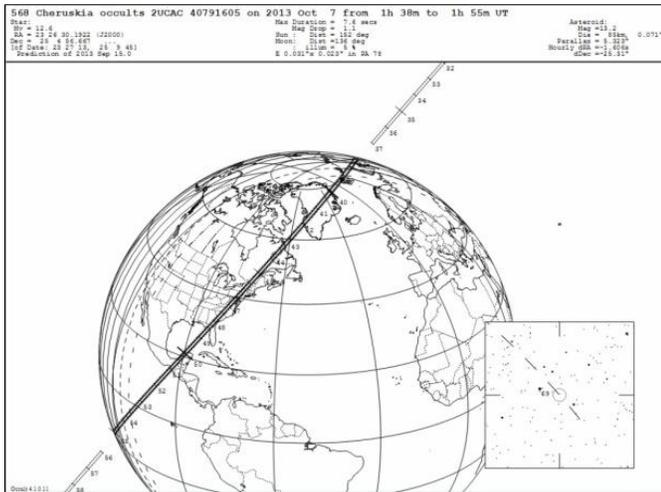


Fig. 4. Mapa de la trayectoria del asteroide (568) Cheruskia, donde es predicha la visibilidad del evento de ocultación a la estrella 2UCAC 40791605. El trazo negro en el mapa indica la posición de la trayectoria del asteroide (568) Cheruskia.

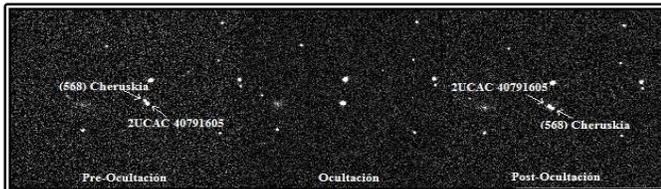


Fig. 5. Pre-ocultación, ocultación y post-ocultación del Asteroide (568) Cheruskia a la Estrella 2UCAC 40791605 observada desde el OAN.

pesar que nuestro tiempo de integración sea mayor que el tiempo de duración del evento. Sin embargo, afirmamos que en la hora del evento, la AR y DEC coincidieron con la predicción. Desde Venezuela se logró observar el evento, pero afirmar que la ocultación es positiva o no, dependerá del análisis de la curva de luz, puesto que el tiempo de integración es mayor al tiempo de duración predicho en el evento, y además porque no se estuvo en la franja de visibilidad, sin embargo luego del análisis de la curva de luz juzgaremos si a final de cuentas Venezuela entraba en el patrón de visibilidad o no. Las predicciones de las ocultaciones estelares observadas en este trabajo fueron obtenidas del sitio web actualizado y mantenido por Steve Preston [15]. <http://asteroidoccultation.com>.

III. PROCEDIMIENTO PARA EL ANÁLISIS DE LAS OCULTACIONES

Los datos observados de cada evento son corregidos primeramente por sus respectivos *bias*, *dark* y *flat*. Luego, para cada evento, las imágenes corregidas son alineadas tomando una estrella brillante de referencia en el campo, a través del programa *Maxim-DL* y posteriormente, utilizando programas que hemos creado en Fortran y Shell, calculamos el flujo de la estrella ocultada, realizamos su curva de luz y finalmente calculamos el tiempo de duración de la ocultación y determinamos una cuerda para el asteroide.

En las Tablas I y II, mostramos las informaciones más importantes a tener en cuenta de las ocultaciones. Las distancias al Sol y a la Tierra de los objetos para el día de la

ocultación se obtuvieron a partir de la siguiente página web (<http://neo.jpl.nasa.gov/orbits/>).

TABLA I

PREDICCIÓN DE LA OCULTACIÓN DE TYC 0278-00503 POR (28) BELLONA

Fecha de la ocultación	8 febrero 2016
Telescopio utilizado	Reflector – OAN, Mérida-Venezuela
Tiempo de exposición	2 segundos
Filtro usado	Rojo
Calibración	Dark y Flat
RA de la estrella	11:40:32.2819 (J2000)
DEC de la estrella	6:24:35.850
Distancia a la Tierra	1.522AU
Magnitud Asteroide	10.7
Magnitud Estrella	12
Predicción de la magnitud caída de la estrella	0.24

TABLA II

PREDICCIÓN DE LA OCULTACIÓN DE 2UCAC 40791605 POR EL ASTEROIDE (568) CHERUSKIA

Fecha de la ocultación	7 octubre 2013
Telescopio utilizado	Reflector – OAN, Mérida-Venezuela
Tiempo de exposición	5segundos
Filtro	Rojo
Calibración	<i>Bias, Dark y Flat</i>
RA de la estrella	23:26:30.1922 (J2000)
DEC de la estrella	25:04:56.667
Distancia a la Tierra	1.65AU
Magnitud Asteroide	13.2
Magnitud Estrella	12.6
Predicción de la magnitud caída de la estrella	1.1

A. Calibración de las Imágenes

Para minimizar el error al momento de tomar los datos y hacer una mejor aproximación del resultado, las imágenes de la ocultación por el asteroide (28) Bellona fueron calibradas solamente con imágenes *Dark* y *Flat*; mientras que para la ocultación por el asteroide (568) Cheruskia, se empleó además de *Dark* y *Flat*, imágenes *Bias*. Estas calibraciones se deben realizar para corregir las fallas que puedan existir por parte del telescopio, bien sean por la temperatura (correcciones producidas por el *Dark*), polvo o manchas (correcciones producidas por el *Flat*) o por circuitos internos del CCD o del telescopio (correcciones producidas por el *Bias*). Esto se realizó usando un programa en Shell y Fortran que desarrollamos para calibrar más de 300 imágenes tomadas en cada evento.

B. Alineación de las Imágenes Calibradas

Se necesita alinear todas las imágenes ya calibradas a través de 2 o 3 estrellas brillantes en cada campo de observación, haciendo que los pixeles donde está la estrella ocultada coincidan en todas las imágenes de un mismo campo, de esta manera se reduce el error en el cálculo de la curva de luz de la estrella ocultada. Sin embargo, antes de alinear es necesario ubicar el cielo para poder reconocer el campo observado, e identificar cual de los puntos de luz es la estrella y el asteroide. Para ello utilizamos el atlas del cielo online de *Aladin*, el cual podemos emplear para identificar la mayor parte de las estrellas en nuestro campo de observación. De esta manera identificamos primeramente nuestro campo del cielo, hacemos la corrección de la orientación de nuestro campo

gracias a *Aladin* y al visualizador de imágenes *Ds9*. Posteriormente con *MaxIm-DL* alineamos todas las imágenes. Este procedimiento es empleado para las imágenes de ambas ocultaciones, pero se hacen por separado ya que son campos diferentes.

C. Obtención de los Datos para la Curva de Luz

En nuestros cálculos se emplea el flujo de la estrella porque mide la energía que emite el cuerpo celeste en el tiempo de exposición empleado por el CCD, y la cantidad de píxeles que abarca la estrella. Ahora bien, en las imágenes astronómicas, cada pixel registra justamente el flujo recibido por el CCD del telescopio, y puesto que una estrella y/o un asteroide están conformados por varios píxeles, la suma de este flujo dividido entre el número de píxeles dará una buena aproximación del flujo de la estrella.

El programa que elaboramos para el cálculo del flujo permite identificar el pixel central de la estrella, que a través de una grilla de píxeles o *binning* (por ejemplo 3x3, 5x5 o 10x10, etc) conllevará al conocimiento de los flujos relacionados a cada pixel, los cuales darán lugar al cálculo del flujo total de la estrella, que a su vez dependerá de la cantidad de energía emitida en el tiempo de exposición y por los píxeles abarcados.

Una vez que se tienen las imágenes calibradas y alineadas, se procede a generar los datos del flujo de luz de la estrella ocultada para las 300 imágenes tomadas aproximadamente. Para calcular la curva de luz de la estrella ocultada en cada evento, tres estrellas de referencia fueron seleccionadas dentro del campo, con el fin de evitar un sesgo direccional. A las estrellas de referencia y a la estrella ocultada se les sustrajo el fondo del cielo, que fue calculado a partir del promedio de tres valores del flujo del mismo con el fin de evitar algún sesgo o algún ruido en el CCD. Los valores del cielo fueron tomados en puntos cercanos a la estrella ocultada. Luego, en cada evento, el flujo de la estrella ocultada fue dividido por el promedio de las estrellas de referencia. Y finalmente, dicho resultado fue normalizado para graficar la curva de luz de las estrellas ocultadas.

D. Cálculo de las Curvas de Luz

Una vez obtenidos los datos de los flujos normalizados de las estrellas ocultadas, se procedió a trazar la curva con el programa de graficación científica *XmGrace*. Una vez obtenidas las curvas fue necesario filtrar las imágenes para que no afectaran el intervalo donde se registró la ocultación.

E. Cálculo del Tiempo de Duración de la Ocultación y Cuerda del Asteroide

Una vez obtenida la curva o gráfica en donde se observa que la estrella ocultada presenta una caída en la magnitud del brillo, podemos identificar en qué momento el asteroide la eclipsó. De esta manera, se cuentan las imágenes involucradas en la caída del brillo de la estrella, y se suma el tiempo de exposición de cada una, tomando en cuenta que el tiempo que tardan los CCD en guardar las imágenes es de 10 segundos, dicha cantidad corresponderá entonces al tiempo entre una imagen y otra. Una vez calculado el tiempo de duración de la ocultación, se procede a calcular la longitud de la cuerda del

asteroide, empleando la distancia Tierra-Asteroide y su tiempo en orbitar el Sol.

IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LAS OCULTACIONES

A. Ocultación de la Estrella TYC 0278-00503-1 por el Asteroide (28) Bellona

De acuerdo a lo descrito en la sección anterior, para obtener el flujo de la estrella ocultada es necesario procesar todas las imágenes tomadas, de tal manera que al final se pueda graficar la curva de luz de la estrella durante todo el evento (pre-ocultación, ocultación y post-ocultación). Sin embargo, antes de arrojar datos finales es necesario contar los píxeles en donde se encuentra la estrella. Esta acción se conoce como *binning*, y se usa para asegurar que se tiene el mejor ajuste posible de la curva. De lo contrario, habría errores en los valores del flujo que serán representados en la curva final puesto que faltaría parte de la estrella o estaríamos tomando pedazos del cielo. Ahora bien, en el procesamiento de esta ocultación se aplicaron *binnings* 2x2, 3x3 y 5x5, y fue necesario hacer aproximaciones en la curva final. Puesto que la cantidad de imágenes era muy alta, se partió de 383 imágenes, luego se redujo a 73, descartando aquellas que no contribuían a la caída del flujo. Analizando las diferentes curvas, tomamos la correspondiente al *binning* 5x5, debido a que esta permitía visualizar mejor la caída del brillo de la estrella ocultada. Normalizando y haciendo un zoom a la curva del *binning* 5x5 mostramos una curva de luz final de la estrella (Fig. 6), útil para calcular la cuerda del asteroide (28) Bellona. En ésta curva, se observa que la caída del brillo de la estrella se encuentra en la imagen número 28. Debido a que las imágenes tienen una duración de 2 segundos, se podría considerar que el tiempo de la ocultación es de sólo 2 segundos, sin embargo, dado a que los CCD del telescopio toman 10 segundos para guardar las imágenes, entonces se toma una aproximación de 10 segundos más, para evitar perder una parte de la ocultación.

Finalmente, tomando todas estas consideraciones el tiempo de duración de la ocultación de la estrella TYC 0278-00503-1 por el asteroide (28) Bellona es de 12 ± 2 segundos, así la longitud de la cuerda observada desde Venezuela para (28) Bellona es de unos $117,48 \pm 19,6$ km (ver Tabla III, resumen de los resultados). Esta longitud está acorde a valores ya antes registrados por diferentes autores en *Ocult* [16][17]. Es importante destacar que los valores de las cuerdas calculadas a través de las diferentes ocultaciones observadas, en lugares geográficamente diferentes, pueden ser empleados para determinar un posible valor del diámetro del asteroide. Por otro lado, para la misma ocultación se puede hacer una representación de cómo era la sombra o en qué posición estaba ubicado el asteroide para ese evento, y si se suman las caras obtenidas en otras ocultaciones de ese mismo evento, es posible hacer un bosquejo de la morfología del mismo. Incluso cuando no se observa la ocultación, podemos tener información valiosa, porque se delimitan las dimensiones del objeto y se tiene una mejor aproximación de su forma.

B. Ocultación de la Estrella 2UCAC 40791605 por el Asteroide (568) Cheruskia.

Se procedió a graficar la curva de luz de la estrella 2UCAC

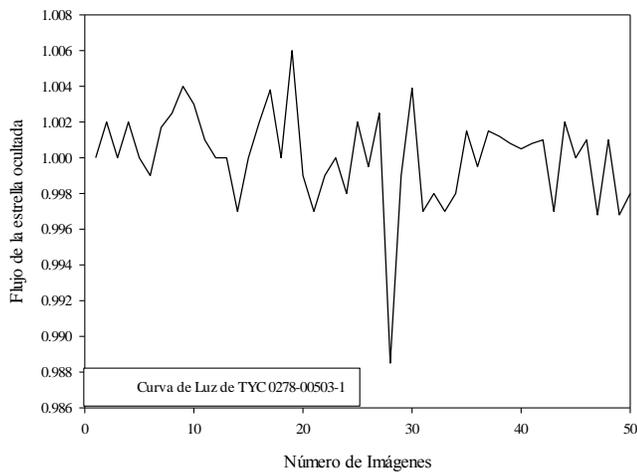


Fig. 6: Curva de Luz de la estrella TYC 0278-00503-1 ocultada por el asteroide (28) Bellona. El eje x, representa la secuencia de las imágenes en las que fueron tomadas por el telescopio, y el eje y, representa la intensidad del flujo normalizado de la estrella ocultada.

TABLA III
CÁLCULO DE LA CUERDA DE (28) BELLONA

Distancia Tierra-Asteroido (AU)	1.522
Tiempo en orbitar el Sol (Asteroido) (días)	1689
Duración de la ocultación (s)	12 ± 2
Longitud de Cuerda (km)	117.48 ± 19.6

40791605 ocultada por el asteroide (568) Cheruskia en sus *binings* correspondientes, para visualizar mejor la caída del brillo de la estrella. En la Fig. 7, notamos que para las primeras 100 imágenes, la curva de luz no arrojó un resultado concluyente y característico de una ocultación positiva, esto pudo ser debido a que el patrón de visibilidad del evento estaba muy alejado de Venezuela o motivado al tiempo que duró la ocultación. En las predicciones, el evento duraba 7.6 segundos, tiempo que para los equipos es imposible determinar ya que el *CCD* empleado por el telescopio tarda 10 segundos para tomar la información y guardarla. Una manera de determinar la caída en el brillo de la estrella para una ocultación de esa duración empleando estos equipos, es que la caída del brillo de la estrella en la predicción sea muy significativa, de esta manera, a pesar de que el tiempo de integración sea mayor, pudiésemos ver una pequeña caída en la curva de luz, que daría información sobre el tiempo de duración de la ocultación. Otra manera, pudiese ser recortando el campo de visibilidad del telescopio, de manera que pudiésemos reducir un poco el tiempo de integración y así lograr con éxito la observación de la ocultación.

Hay dos posibles razones que explican el por qué no se logró observar la ocultación de la estrella 2UCAC 40791605 por el asteroide (568) Cheruskia: la primera es nuestra posición respecto a la franja de visibilidad de la predicción, por no estar ubicados justo debajo o en un rango cercano, es probable que desde nuestro ángulo no ocurriera la superposición. La otra razón aparente, podría ser que nuestro telescopio no logró registrar el evento, dado que los *CCD* tardan 10 segundos en guardar las imágenes y la predicción era de 7 segundos, por lo que es bastante probable que mientras los *CCD* guardaban la información, la ocultación estaba ocurriendo, por lo tanto no se puede calcular la cuerda

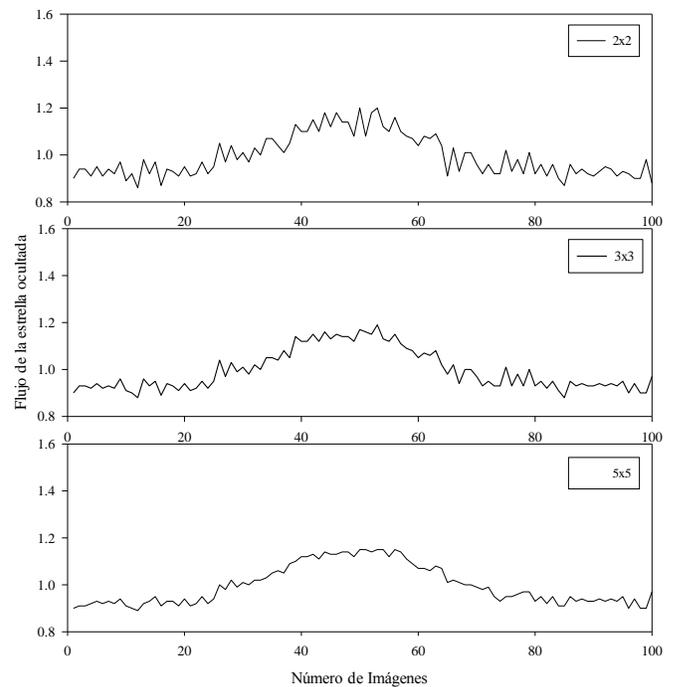


Fig. 7: Curvas de Luz de la estrella 2UCAC 40791605 ocultada por el asteroide (568) Cheruskia en diferentes *binings*, 2x2, 3x3 y 5x5. El eje x, representa la secuencia de las imágenes en las que fueron tomadas por el telescopio, y el eje y, representa la intensidad del flujo normalizado de la estrella ocultada.

al asteroide (568), puesto que desde el OAN a pesar del excelente cielo que se tuvo para esa noche, no se lograron tomar datos que registraran una ocultación positiva.

V. CONCLUSIONES

Los eventos estudiados en este trabajo sólo fueron observados desde el OAN, por ello solo se detectó una sola cuerda. Cuando los eventos son observados desde varios observatorios cabe la posibilidad de determinar varias cuerdas de un mismo asteroide, y de este modo se podría determinar la forma del asteroide. Una sola cuerda no es suficiente para identificar la forma geométrica del objeto ocultante, sin embargo, estas observaciones contribuyen a las posiciones astrométricas de los objetos ocultantes, al cálculo de una cuerda y a la determinación de visibilidad positiva o negativa de la ocultación. El objetivo fundamental de este trabajo fue analizar si se observó o no las ocultaciones estelares por los asteroides (28) Bellona y (568) Cheruskia. Gracias al cálculo de la curva de luz de la estrella TYC 0278-00503-1 por el asteroide (28) Bellona, se logró encontrar el valor de una nueva cuerda para Bellona de $117,48 \pm 19,6$ km. Este nuevo valor calculado está dentro del rango de lo esperado, inclusive en la predicción el cual es de 120 km, y lo observado por otros autores [17]. Es importante resaltar que (28) Bellona es un pequeño asteroide y desde que fue descubierto se sabe muy poco sobre él. Es por ello que se necesitan más observaciones de ocultaciones estelares para conocer mejor su dimensión y su forma. Con respecto a la ocultación de la estrella 2UCAC40791605 por el asteroide (568) Cheruskia, debemos concluir que a pesar de que se intentó observar desde el OAN

y que se lograron obtener las imágenes gracias al buen cielo, los resultados no nos permitieron determinar el valor de una cuerda. Esto pudo ser debido a que nuestro observatorio no estaba dentro de la franja de visualización del evento, es por ello que debemos intentar observar sólo las ocultaciones cuya predicción nos incluyen en la franja de visualización.

En conclusión, la visualización y la no visualización de las ocultaciones por asteroides tienen utilidad científica, ya que incrementan el conocimiento de este tipo de cuerpos celestes. La calibración y la alineación de las imágenes de las ocultaciones observadas son necesarias para obtener una exitosa curva de luz de la estrella ocultada, ya que tomamos en cuenta las peculiaridades del equipo, el clima y la temperatura en el momento en el que ocurre el evento. Las curvas de luz siguen siendo las mejores herramientas para conocer los parámetros fijos de cuerpos celestes, como su periodo orbital y su morfología. Además, el método de las ocultaciones estelares es el más práctico sin mencionar el más cómodo y sencillo para calcular los parámetros específicos de los objetos celestes. Es por ello que, debemos seguir monitoreando los diferentes eventos de ocultaciones estelares por asteroides, satélites, cometas, transneptunianos, etc., ya que estas son una herramienta poderosa para conocer y entender la formación y la evolución de nuestro Sistema Solar.

VI. AGRADECIMIENTOS

Este trabajo empleó recursos del Centro de Investigaciones de Astronomía, Francisco J. Duarte (CIDA). Se les agradece a los asistentes científicos que laboran en el OAN y en especial a Dalbare González, por su excelente desempeño en la adquisición de las imágenes usadas para este trabajo y al departamento de cómputo por su colaboración en la parte informática.

REFERENCIAS

- [1] Reitsemá et al. "High-speed photometry of the 11 December 1979 Juno occultation". *AJ*, 86, 121-126, 1981.
- [2] Souza et al. *POETS: "Portable Occultation, Eclipse, and Transit System"*. The Astronomical Society of the Pacific. 118, 849, 2006.
- [3] Schelte J. Bus. "Stellar Occultation by 2060 Chiron". *Icarus* 123, 478-490, 1996.
- [4] Roques et al. "Stellar occultations by small bodies: Diffraction effects". *The Astronomical Journal.*, 93, 6, 1987.
- [5] Chandrasekhar T. "Chord lengths across main belt asteroids from stellar occultations in the near infrared. *Bull.* Astr. Soc. India 35, 155-161, 2007.
- [6] Navas, G.: "Ocultaciones de Estrellas por Asteroides observados desde Venezuela", Mérida/Mérida-Venezuela, 201.
- [7] Schneider J., *Interactive extra solar Planets Catalog.*, The extrasolar Planet Encyclopedia.
- [8] Schneider et al., "Defining and cataloging exoplanets: The exoplanet.eu database". *Astronomy & Astrophysics* 532:A79. Bibcode: 2011A&A....79S., 2011.
- [9] Michael Gillon et al., "Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star Trappist-1.", *Nature Letter* 542., 456-460., 23 February 2017.
- [10] Sicardy B., et al., "Pluton atmosphere from the 2015 June 29 Ground-based stellar occultation at the time of the new horizons flyby". *The Astrophysics Journal Letters* 819 : L38 (8pp) March 10, 2016.

- [11] A Diaz Oliveira et al., "Defining and cataloging exoplanets: The exoplanet.eu database". *The Astrophysics Journal Letters* . volume 811, Number 1, 2015.
- [12] Bragas-Ribas et al., "A ring system detected around the Centaur (10199) Chariklo.", *Nature Letter* 508, 72-75., 26 March 2014.
- [13] Downes J. "Caracterización de la cámara FLI". Publicación interna. RevMexAA(SC), 2006
- [14] Batista et al. "Diseño y evaluación de un grupo corrector de foco primario para el Telescopio Reflector de 1 m del OAN". *Física, Acta Científica Venezolana*, 66(4):220-225, 2015.
- [15] Steve Preston (<http://asteroidoccultation.com>) Occultation Predictions online.
- [16] Nugent, R.: *The IOTA Occultation Observer's Manual, International Occultation Timing Association*, Houston/Texas-U.S.A, 2007.
- [17] Herald D. *Occult4 software*. <http://www.lunar-occultations.com/iota/occult4.htm>, 2008.
- [18] Aladin Sky Atlas. <http://www.aladin.u-strasbg.fr>



Claudia V. Barrios A. Nació en Zaraza, Guárico-Venezuela el 26 de octubre de 1994, a los 6 años se mudó a Los Teques Miranda-Venezuela, culminó su ciclo diversificado en ciencias en la U. E. Nicolás Copérnico en 2011 y en septiembre de ese año ingresa al pregrado en física en la Universidad Central de Venezuela. Actualmente es estudiante de esta institución, fue preparadora del laboratorio de demostraciones y ha colaborado en varias oportunidades en el Congreso Estudiantil de Investigación y Desarrollo Científico (CEIDEC) organizado en la facultad de ciencias en la Universidad Central de Venezuela, así como en las Jornadas Estudiantiles de Física en la misma localidad.



Giuliat Y. Navas R. Nació en Mérida-Venezuela el 27 de noviembre de 1983, culminó su ciclo diversificado en ciencias en el Liceo experimental Fray Juan Ramos de Lora, luego continuó sus estudios universitarios culminando para el año 2005 la carrera de matemáticas en la Universidad de Los Andes. Se muda a Francia y hace una maestría en modelos matemáticos y métodos informáticos, en la especialidad de tratamiento de imágenes de datos satelitales en el CNES y en la Universidad Paul Sabatier en Toulouse, luego continuó sus estudios de doctorado en el Universidad Joseph Fourier en Grenoble-Francia y regresa a Venezuela en el 2012 para hacer un postdoctorado en el CIDA, luego pasa a ser investigadora del Departamento Científico del CIDA desde el 2015.