

EL SEGUIMIENTO E IMPACTO DE PEQUEÑOS

El seguimiento de asteroides desde España se realiza en el marco de un esfuerzo colaborativo en el que están implicados diversos centros de investigación en colaboración directa con el Centro de Coordinación de Objetos Cercanos a la Tierra de la ESA (ESA-NEOCC). Uno de esos observatorios privilegiados está en la Sierra del Montsec donde opera el Telescopio Joan Oró que, desde hace una década, ha sido empleado por nuestros grupos de investigación para el seguimiento de estos objetos [1-2-3]. A veces la realidad supera la ficción y, un nuevo descubrimiento, puede implicar tener que realizar observaciones in extremis, con el asteroide a punto de chocar contra la Tierra. Así ocurrió el pasado 11 de marzo de 2022 con la caída de un asteroide de pocos metros cerca de Islandia o más recientemente el 12 de febrero de 2023 en Normandía.



Toni Santana-Ros

Universidad de Alicante / ICCUB
tsantanaros@icc.uv.es

Josep M. Trigo-Rodríguez

Institut de Ciències de l'Espai (CSIC) / IEEC
trigo@ice.csic.es

Los programas de descubrimiento de asteroides se están haciendo tan eficientes que, estos hallazgos de asteroides en ruta de colisión se harán cada vez más frecuentes. Su valor añadido es que tendremos la oportunidad de recuperar nuevos meteoritos para comprender mejor la naturaleza de los objetos que pueden poner en jaque súbitamente a nuestro planeta.

2022 EB5

A las 19:38 UTC del 11 de marzo de 2022, el observatorio Piskéstető, en Hungría, reporta al Minor Planet Center el descubrimiento de un nuevo asteroide, designado provisionalmente como Sar2593 por el observador Krisztián Sárneczku. Como las observaciones parecen indicar que el objeto puede acercarse mucho a la Tierra, Krisztián decide obtener y reportar nuevos datos a las 20:16 UTC. Con 40 minutos de arco orbital observado, el sistema de alertas *Meerkat* de la ESA se activa para mandar un mensaje inequívoco: Sar2593 tiene un 100% de probabilidad de impactar con la Tierra entre las 21:21 y las 21:25 UTC (del mismo día).

En cuestión de pocos minutos, el ESA-NEOCC activó sus activos para poder observar el asteroide. Los objetivos eran claros: precisar la hora de impacto, acotar el lugar de entrada a la atmósfera y estimar el tamaño del cuerpo.

La red de observadores se pone en marcha rápidamente, junto con astrónomos amateurs situados en Europa y Asia que también han recibido la alerta. En el caso del ESA-NEOCC, la coordinación de sus telescopios se hace a través del proyecto CARMEN, que incluye telescopios en territorio estatal, tales como el OGS (Canarias), CAHA Schmidt (Andalucía) y el TJO (Cataluña). En pocos minutos, se reportan nuevos datos del mismo descubridor y desde un observatorio en Kysuce, Eslovaquia. El objeto se encuentra ya muy próximo, a solo 1/7 de la distancia Tierra-Luna. Uno de los telescopios de la red de la ESA y del proyecto CARMEN, el Klet observatory de la República Checa, consigue la última imagen del cuerpo antes de su entrada en la atmósfera (Fig. 1), a falta de tan solo 13 minutos para el impacto.

Por suerte, los datos confirman que el tamaño del cuerpo y el lugar del impacto no van a representar un problema para la población. Este meteoritoide de unos pocos metros de diámetro, impacta a las 21:22:42 UTC del 11 de marzo de 2022 a unos 140 km al sur de la isla de Jan Mayen, en el mar de Noruega.

ASTEROIDES : RETO Y OPORTUNIDAD CIENTÍFICA

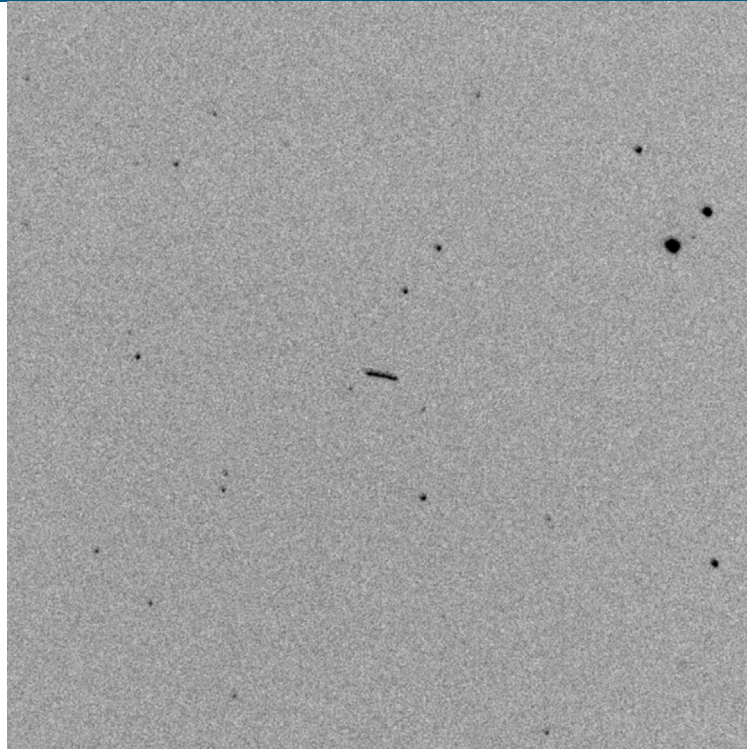


Figura 1. El trazo en la parte central de la imagen es del asteroide 2022 EB5, observado a las 21:10 UTC del 11 de marzo de 2022 desde el observatorio Klet (República Checa), sólo 13 minutos antes de impactar con la atmósfera terrestre. Créditos: Klet Observatory.

Una vez confirmadas las observaciones reportadas, Sar2593 pasó a tener la designación oficial de 2022 EB5. Este fue el quinto cuerpo detectado y observado antes de que impactara con la Tierra. El impacto con la atmósfera generó una onda de choque detectable desde las estaciones de infrasonidos cercanas, que reportaron una energía equivalente a 2-3 kT de TNT.

ASTEROIDE, METEOROIDE, METEORO, METEORITO...

Cuando se descubre algún asteroide que se aproxima a la Tierra, es habitual ver en la prensa noticias que mezclan los términos asteroide, meteoro o meteorito.

Merece la pena recordar que un asteroide es un cuerpo celeste, rocoso, metalorocoso o metálico, más pequeño que un cuerpo planetario (es decir, inferior a 1000 km) pero mayor que un meteoroide, y que está en órbita, es decir, que no ha entrado en contacto con la atmósfera [4]. A su turno, los meteoroides son cuerpos celestes mayores que el polvo cósmico, pero menores a 50 m, tamaño a partir del cual pasarían a llamarse asteroides.

Cuando uno de estos cuerpos entra en contacto con la atmósfera, se calientan y producen una estela luminosa que llamamos meteoro. Cuando esas

estelas son más luminosas que el planeta Venus se denominan bólidos o bolas de fuego. Finalmente, si parte de este cuerpo consigue sobrevivir a las condiciones extremas de calor y presión durante su paso por la atmósfera, precipitándose en la superficie de la Tierra, tendremos la oportunidad de poder encontrar sus restos en forma de meteorito.

2023 CX1

Recientemente, el 12 de febrero de 2023, se descubrió otro cuerpo que estaba a punto de impactar con la Tierra. De nuevo su descubridor fue el astrónomo húngaro Krisztián Sárneczku, pero en esta ocasión el margen para hacer un seguimiento de la trayectoria del meteoroide resultó un poco mayor: el objeto se descubrió 6 horas antes de producir la bola de fuego. De nuevo, los telescopios del proyecto CARMEN de la ESA apuntaron rápidamente al objetivo, consiguiendo imágenes desde lugares alejados entre sí, como son el observatorio de Sutherland en Sudáfrica, o el observatorio McDonald en EEUU. Obtener astrometría desde puntos tan distantes permitió una gran mejora del cálculo de la órbita de 2023 CX1, gracias al gran paralaje y, de este modo, determinar con gran precisión que el objeto haría impacto cerca de la costa de Normandía, Francia.

Antes del impacto, pudimos obtener más de una hora de observaciones de este cuerpo usando el telescopio Joan Oró, en el Observatori del Montsec, en Catalunya (Fig. 2). Estos datos están siendo actualmente analizados, y nos permitirán conocer más detalles de las características físicas del meteoróide antes de que atravésará nuestra atmósfera.

Gracias a la gran exactitud del cálculo de la posición de impacto del asteroide, fue fácil poder prever la dirección de caída del cuerpo. Usando cámaras de seguridad dirigidas en la dirección correcta, pudimos observar en directo el gran destello que produjo el cuerpo al atravesar la atmósfera desde el Observatorio del Montsec (OdM). De hecho, se dio la circunstancia de que esa bola de fuego se pudo observar desde las cámaras de seguridad situadas cerca del mismo telescopio Joan Oró (Fig. 3), un buen ejemplo del baluarte natural que supone la Sierra del Montsec para la observación astronómica. Desde un mismo sitio pudimos observar el meteoróide todavía en el espacio y... ¡ahora lo veíamos caer y generar un enorme bólido a más de 900 km de distancia!

Desde ubicaciones más cercanas al punto de impacto, observadores aficionados y profesionales tuvieron la oportunidad de obtener imágenes espectaculares del momento en que 2023 CX1 cruzaba la atmósfera terrestre (Fig. 4). Desgraciadamente la distancia al lugar de caída hizo que esa bola de fuego no fuese captada por otros dispositivos de registro automatizado de bólidos operados por la Red Española de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos coordinada desde el ICE-CSIC y el IEEC [5]. De hecho, no olvidemos que todavía muchos de los meteoroides que poseen pocos metros de diámetro impactan sin ser detectados por los programas de seguimiento telescópicos [6].

Posteriormente, el equipo de la Fireball Recovery and InterPlanetary Observation Network (FRIPON) organizó campañas para poder encontrar restos en forma de meteorito procedentes de 2023 CX1. Sólo un par de días después del impacto, el equipo de FRIPON consiguió encontrar un fragmento de meteorito en las costas de Normandía (Fig. 5). 2023 CX1 había sido observado como meteoróide por los telescopios, en forma de meteoro por las cámaras de seguridad y ahora... ¡teníamos sus meteoritos!

SURVEYS, SIEMPRE VIGILANDO

El descubrimiento de nuevos asteroides ha aumentado de forma drástica durante la última década. Si nos fijamos solo en los objetos cercanos a la Tierra (NEOs, del Inglés Near Earth Objects), conocemos actualmente más de 30.000 [7]. A principios de la década del 2010, el *ratio* de detección de nuevos NEOs no llegaba a los 1.000 cuerpos anuales. Actualmente estamos descubriendo casi 4.000 asteroides cada año.

¿Cómo podemos explicar este aumento, si cada vez es más difícil detectar nuevos cuerpos?, ¡puesto que los de fácil detección ya los hemos encontrado! La explicación la encontramos en los telescopios de rastreo o *survey*. Estos telescopios rastrean más de 3 veces por noche cada parcela del cielo visible, generando grandes cantidades de datos. Datos que ahora podemos procesar más eficientemente con técnicas como el *synthetic tracking*. Con la ayuda de este software, podemos apilar las imágenes de un mismo campo en múltiples (miles) de direcciones distintas, de modo que podemos detectar un cuerpo que se mueve dentro de esas imágenes sin necesidad de saber de antemano su órbita.

Los principales surveys dedicados a la búsqueda de nuevos NEOs se encuentran en América. Para mejorar nuestra capacidad de detección desde Europa, la ESA está construyendo dos telescopios con un gran campo de visión, especialmente diseñados para la búsqueda de estos pequeños cuerpos celestes. Nos referimos a los telescopios llamados *Flyeye*, llamados así por su parecido a los ojos de este insecto (fly eye significa ojo de mosca en inglés), los cuales sirvieron de inspiración para su diseño. La primera unidad de estos telescopios se instalará en el Monte Mufara de Sicilia, Italia.

OBSERVANDO LOS ATIRA CON EL TELESCOPI JOAN ORÓ

Hay un subgrupo de NEOs tan particular como interesante desde un punto de vista científico. Se trata de los asteroides con órbitas interiores a la de la Tierra (IEOs del inglés Interior Earth Objects), llamados *Atiras* por ser (163693) Atira el primer asteroide confirmado a pertenecer a esta clase orbital. Conocer más detalles de la dinámica y composición de estos objetos nos va a ayudar a refinar nuestros modelos de la evolución del Sistema Solar, así como estudiar cuerpos

constantemente sometidos a condiciones extremas de temperatura. Además, estos cuerpos pueden variar su órbita después de un encuentro con los planetas interiores, mandándolos a órbitas más externas. Como esto implica cruzar la órbita de la Tierra, tener estos cuerpos catalogados también es interesante desde un punto de vista de defensa planetaria.

Hasta el momento se conocen solo 30 *Atiras*: ¿hay tan pocos cuerpos en órbitas interiores? La respuesta es evidentemente que no. Para entender el porqué de este sesgo observacional tenemos que visualizar la geometría a la que podemos observar estos cuerpos. Al encontrarse en órbitas interiores, estos cuerpos siempre se localizan en posiciones aparentes muy próximas al Sol. Por este motivo, sólo son visibles durante cortas ventanas de observación cercanas al crepúsculo y, por si esto no fuera poco, en elevaciones muy bajas, cerca del horizonte. En esta región del cielo podemos encontrar también otros objetos con órbitas no necesariamente interiores, pero igualmente

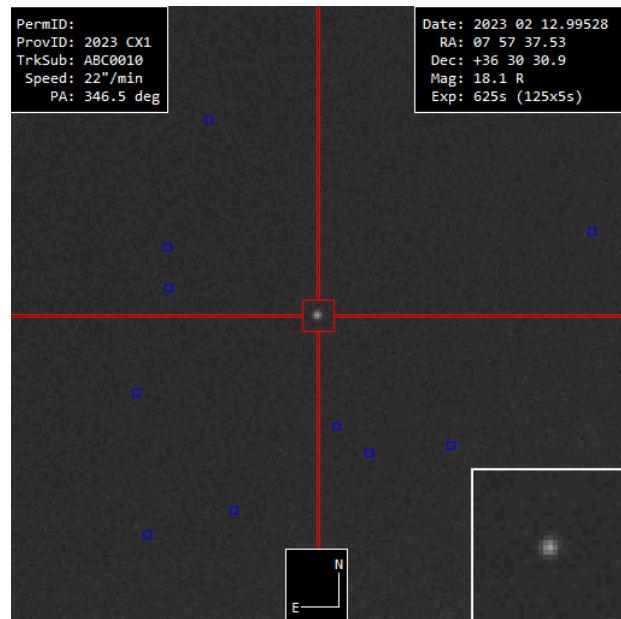


Figura 2. Nuestras observaciones del asteroide 2023 CX1 con el telescopio Joan Oro (TJO). Créditos: T. Santana-Ros, UA/UB-IEEC.

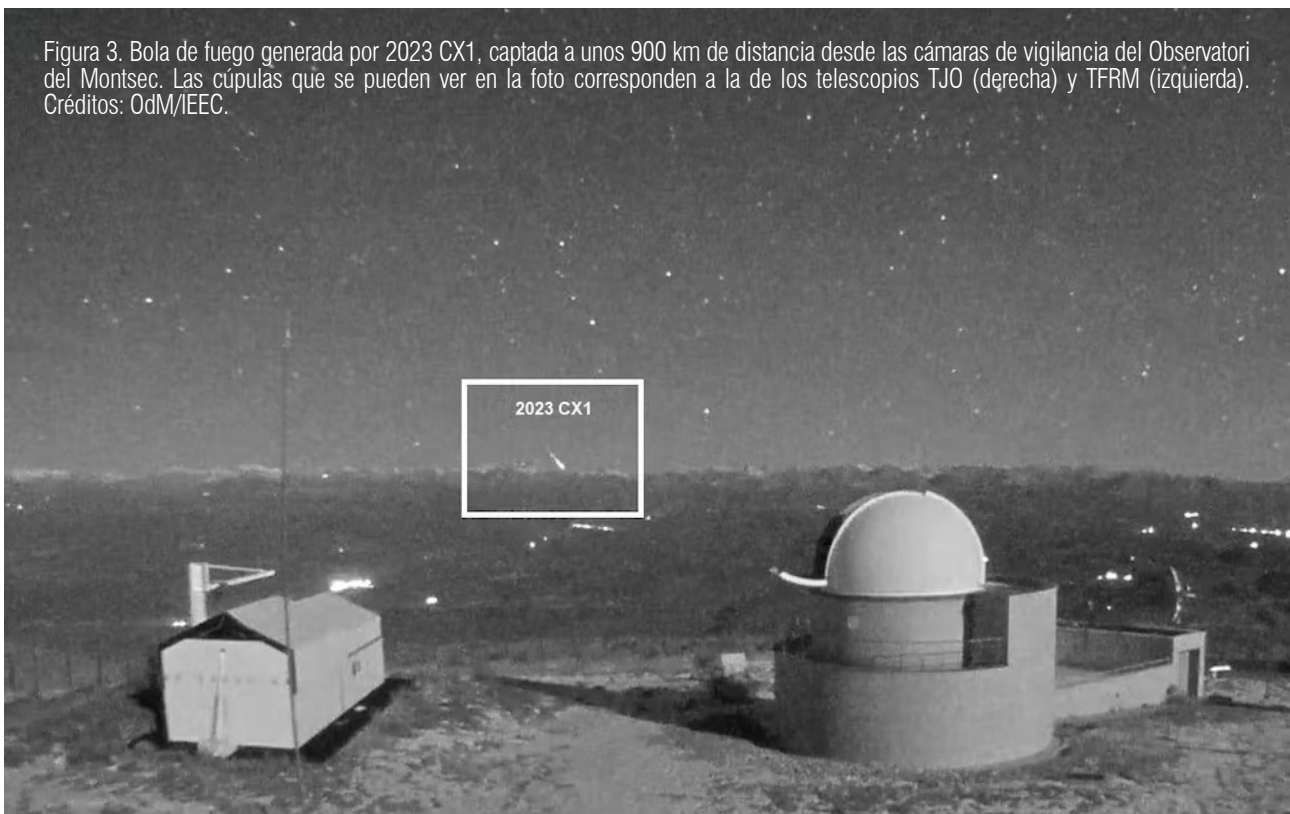


Figura 3. Bola de fuego generada por 2023 CX1, captada a unos 900 km de distancia desde las cámaras de vigilancia del Observatori del Montsec. Las cúpulas que se pueden ver en la foto corresponden a la de los telescopios TJO (derecha) y TFRM (izquierda). Créditos: OdM/IEEC.



Figura 4. Imágen de la entrada de 2023 CX1 en la atmósfera captada desde Holanda (Créditos: Gijs de Reijke).

Figura 5. Meteorito procedente de 2023 CX1 recuperado en el norte de Francia (Créditos: FRIPON/Vigie-Ciel).



interesantes desde un punto de vista científico: los cuerpos coorbitales. Entre estos cabe destacar los asteroides troyanos, cuerpos que orbitan alrededor de los puntos de Lagrange L4 y L5. En el caso de la Tierra, hemos descubierto recientemente el segundo de estos objetos, el asteroide 2020 XL5 [8].

La gran mayoría de programas de seguimiento (*surveys*) nunca (o raramente) observa esas parcelas del cielo, sea por limitaciones técnicas del telescopio o simplemente porque prefieren observar en la dirección opuesta al Sol, donde las condiciones de observación serán evidentemente mucho mejores.

El Telescopio Joan Oró, de 80 cm de diámetro, es de los pocos telescopios de su categoría que, por su privilegiada localización y por su construcción, permiten observaciones a muy poca elevación. Por este motivo, llevamos a cabo desde hace unos pocos meses un proyecto a largo plazo de rastreo de zonas cercanas al Sol durante los crepúsculos, con el objetivo de descubrir y caracterizar nuevos *Atiras*.

IMPACTOS MÁS ALLÁ DE LA TIERRA

Los meteoroides de pocos centímetros suelen desintegrarse en su totalidad al cruzar la atmósfera terrestre. Por este motivo, es complicado monitorizar la cantidad y características de estos pequeñísimos cuerpos. Estas partículas colisionan constantemente con nuestros satélites, por lo que tener más información sobre esta población representa una prioridad para muchas agencias espaciales. Afortunadamente, esas pequeñas rocas son captadas sistemáticamente en fase de bola de fuego por las redes que monitorizan la actividad meteórica y que permiten cuantificar el flujo y la masa de estos meteoroides [9-10].

Por otro lado, nuestro fiel acompañante espacial, nos da una oportunidad única para poder estudiar estos pequeños cuerpos. Como parte del proyecto CARMEN de la ESA, dos equipos de astrónomos del Instituto de Astronomía de Andalucía (IAA) y de la universidad de Huelva (UHU), observan regularmente la parte no iluminada de la Luna y registran periódicamente destellos producidos por el impacto de pequeños meteoroides. El estudio de la duración y magnitud del destello, así como la frecuencia de impacto, nos permite obtener información sobre estas migas del Sistema Solar que viajan por nuestra vecindad.

REFERENCIAS

1. Trigo-Rodríguez J.M., Santana-Ros T., Moreno-Ibañez M., Rodríguez D., Sanz J. Lloro I. and Sánchez A. (2017) Asteroids, Comets and Meteorite-Dropping Bolidos Studied from The Montsec Astronomical Observatory. In "Assessment and mitigation of asteroid impact hazards", Springer, Astrophysics and Space Science, Vol. 46, pp. 243-256.
2. Micheli M., Koschny D., Conversi L., Budnik F., Gray B., Santana-Ros T., Reszelewski R., et al., 2021, *AcAau*, 184, 251.
3. Farnocchia D., Reddy V., Bauer J.~M., Warner E.~M., Micheli M., Payne M.~J., Farnham T., et al., 2022, *PSJ*, 3, 156.
4. Trigo-Rodríguez J.M. (2022) Asteroid Impact Risk: Impact Hazard from Asteroids and Comets, Springer Nature, Switzerland AG, 172 pp.
5. Peña-Asensio E., J.M. Trigo-Rodríguez y A. Rimola (2022) Análisis automático de bólidos productores de meteoritos y reentradas atmosféricas. Nuevo software de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos", *Revista Española de Física n.36-1*, pp.15-20.
6. Peña-Asensio E., Trigo-Rodríguez J.M., and Rimola A. (2022) "Orbital characterization of superbolidos observed from space: Dynamical association with near-Earth objects and identification of hyperbolic meteoroids", *The Astronomical Journal*, 164, 73.
7. CNEOS Discovery Statistics ([nasa.gov](https://neo.ssa.jpl.nasa.gov/))
8. Santana-Ros T., Micheli M., Faggioli L., Cennamo R., Devogèle M., Alvarez-Candal A., Oszkiewicz D., et al., 2022, *NatCo*, 13, 447.
9. Trigo-Rodríguez J.M., and Blum J. (2022) Learning about comets from the study of mass distributions and fluxes of meteoroid streams, *MNRAS* 512, 2277-2289.
10. Peña-Asensio E., Trigo-Rodríguez J.M., Corretgé-Gilart M., Rimola A., and Koschny D. (2023) Identifying meteorite droppers among the population of bright 'sporadic' bolidos imaged by the Spanish Meteor Network during the spring of 2022, *MNRAS* 520, 5173-5182.