

# El Superbólide de CHELIÁBINSK

EL PELIGRO DE IMPACTO DE PEQUEÑOS ASTEROIDES CON LA TIERRA



# La caída en los alrededores de Cheliábinsk, en Siberia, de un meteorito asociado a la entrada de un asteroide de unos 18 metros de diámetro abre un debate sobre el peligro de impacto de asteroides contra la Tierra.

JOSEP M. TRIGO-RODRÍGUEZ, MAR TAPIA, JOAN DERGHAM, CARLES E. MOYANO-CAMBERO Y JOSÉ M. MADIEDO

## EL SUPERBÓLIDO DE CHELIÁBINSK Y EL NEA 2012 DA14

**E**l pasado mes de febrero de 2013 fue un mes intenso para la comunidad astronómica y en concreto para los expertos y amateur dedicados a los cuerpos menores del Sistema Solar. En primer lugar se esperaba para el 15 de febrero la aproximación del 2012 DA14: un asteroide próximo a la Tierra, abreviado generalmente como NEA por su acrónimo anglosajón (Near Earth Asteroid). El encuentro era realmente próximo, al situarse a tan solo 27 700 km de la superficie terrestre, poseyendo alrededor de 45 metros de diámetro. Cabe destacar que había sido descubierto tan solo un año antes por el programa de búsqueda de este tipo de objetos promovido por el Observatori Astronòmic de Mallorca (OAM). Su velocidad angular durante ese acercamiento era evidenciada en las imágenes tomadas por nuestros telescopios, como en el caso de las obtenidas con el telescopio reflector *Joan Oró* de 80 cm del Observatori Astronòmic del Montsec ([www.oadm.cat](http://www.oadm.cat)) (véase Figura 1).

Pero una curiosa casualidad fruto del azar hizo que en ese esperado día la atención se desviara hacia otro fenómeno inesperado. Amanecimos con la aparición de una enorme bola de fuego que surcó los cielos de Asia central, concretamente a las 03h20m33s TUC y mayormente observado por la localidad de Cheliábinsk. Fue un fenómeno meteorítico denominado superbólido por la magnitud que presentó, ya que se pudo detectar mediante cámaras a bordo de satélites artificiales. Su magnitud estaba entre la magnitud que presenta la Luna y el Sol (más luminoso que -17).

El primer interrogante que saltó a la palestra fue: ¿había sido causado aquel brillante



### IZQUIERDA

Imagen del superbólido de Cheliábinsk, saturada por la intensidad de las fulguraciones asociadas a la desintegración del asteroide en las capas inferiores de la atmósfera. (Imagen cortesía de Marat Ahmetvaleev)

### FIGURA 1

Rastro dejado por el asteroide 2012 DA14 sobre el fondo estelar del Telescopio *Joan Oró* de 0,8 m del Observatori Astronòmic del Montsec. (F. Vilar-dell y J. M. Trigo, CSIC-IEEC)

fenómeno por un fragmento de aquel asteroide? En el siguiente apartado veremos cómo al reconstruirse la órbita de este superbólido se demuestra que no tenía relación alguna con el NEA 2012 DA14 que se esperaba para el mismo día. Estamos frente a una curiosa casualidad cósmica, ¿quizás un recordatorio de nuestra vulnerabilidad frente a este tipo de objetos?

El superbólido de Cheliábinsk penetró en la atmósfera con una velocidad próxima a los 68 000 km/h, causando estupor entre los testigos visuales al atravesar Kazajistán y verdadero pavor sobre los habitantes de la ciudad rusa de Cheliábinsk sobre la cual se desintegró (Figura 2). Las cámaras de seguridad que muchos conductores rusos colocan en sus coches (*dash-cam*) proporcionaban innumerables pruebas gráficas. También fotógrafos profesionales tuvieron la fortuna de captar la espectacularidad del evento en fotos digitales a altísima resolución, como la que se muestra en la cabecera de este artículo. Los efectos producidos por la onda de choque durante la penetración del objeto en las capas inferiores de la atmósfera provocaban el caos por unos minutos al llegar al suelo y reventar paredes, puertas y cristales. Todos los expertos coincidimos en que la mayor parte de los heridos podría haberse evitado si los testimonios hubiesen previsto la llegada de esa onda de choque pocos minutos después de visualizar la bola de fuego, resguardándose adecuadamente.

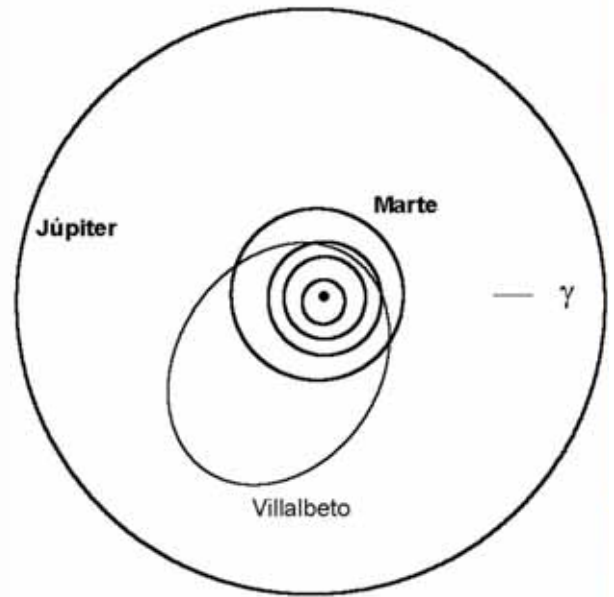


**FIGURA 2**

Trayectoria proyectada sobre el suelo del superbólide de Cheliábinsk. (S. Chesley -NASA/JPL-)

**FIGURA 3**

La órbita de Villalbeta de La Peña en el Sistema Solar. A la derecha, una imagen del bólido obtenida por María M. Robles desde Santa Columba de Curueño (León). [Cortesía de los autores]



Internet volvía a demostrar la potencialidad de las nuevas tecnologías, esta vez de la comunicación de masas. Tan solo unos minutos después de producirse esa bola de fuego la información llegaba rápidamente a Internet y, poco después los medios de comunicación se hacían eco. Las imágenes favorecían la interpretación adecuada del evento como producido por la caída de un meteorito. Nuestro grupo de investigación del Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC) era consultado por medios de varios continentes para conocer nuestra opinión sobre el fenómeno. Sin duda esa información y la buena disposición entre los periodistas y científicos fueron esenciales para la adecuada interpretación del evento como de naturaleza meteórica y no asociado a un ataque nuclear o a cualquier misil. No es broma, Cheliábinsk da cobijo a importantes industrias de construcción de misiles nucleares rusos y que, de hecho, en los años 60 fue el escenario de un triste suceso. Un avión espía U-2 norteamericano fue derribado por un misil soviético en plena guerra fría y dio origen a una peligrosa escalada entre las dos grandes potencias nucleares. Posiblemente en aquel contexto y además sin las imágenes de cámaras que ayudasen a interpretar el fenómeno, la visualización del bólido y los posteriores efectos de la onda expansiva, los cerca de un millar de heridos y otros daños sobre la población civil de Cheliábinsk, podrían haber tenido catastróficas consecuencias.

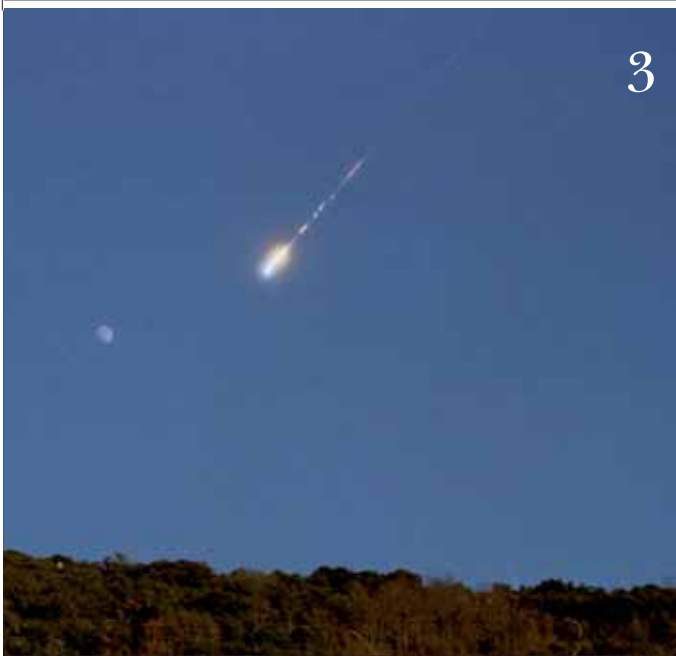
El bólido de Cheliábinsk viene, por tanto, a ejemplificar mejor que cualquier otro caso que la ciencia nos aleja de la superstición e ignorancia y nos proporciona valiosas enseñanzas. En España la Red de Investigación sobre Bólidros y Meteoritos ([www.spmn.uji.es](http://www.spmn.uji.es)) creada

en 1999 lleva años divulgando este tipo de fenómenos desde que comenzó a cubrir el fenómeno meteórico desde todo el cielo peninsular. Frente a estas situaciones límite en las que la naturaleza nos puede poner, cabe actuar con la cabeza fría y recopilar la máxima información posible. En otros tiempos no hubiera sido tan alocado pensar que un evento meteórico de esta magnitud pudiese haber causado un conflicto nuclear.

En el presente artículo describiremos brevemente cuál fue el origen del superbólide de Cheliábinsk y cuáles son las principales causas para que un NEA de unos 18 metros de diámetro y una masa de unas 11 000 toneladas, derivada de registros de infrasonidos, pasase desapercibido a los sistemas telescópicos destinados al seguimiento de este tipo de objetos. También describiremos la causa y característica que más impacto tuvo en la población, su onda de choque y cómo su detección también añade información para estudiar el fenómeno.

### OBJETOS PRÓXIMOS A LA TIERRA Y FUENTES DE METEORITOS. ORIGEN DEL SUPERBÓLIDO DE CHELIÁBINSK

El Sistema Solar aparte del Sol, sus planetas y satélites, está formado por innumerables cuerpos de menor tamaño, entre ellos los asteroides. Estos son objetos rocosos cuyo diámetro oscila entre 10 metros y 1000 km. Se conocen unos 400 000 aunque el número total es de varios millones. En general, se trata de objetos relativamente pequeños, tan solo siete de ellos son mayores de 300 km. En nuestro Sistema Solar la principal reserva de asteroides es el Cinturón Principal situado entre Marte y Júpiter.



Existe también otra población de objetos cuyas órbitas cruzan el Sistema Solar interior, incluso aproximándose a veces a la Tierra, que se denominan *Objetos Próximos a la Tierra*, también conocidos como NEO por el acrónimo anglosajón (Near Earth Objects). Se conocen cerca de 6 000 NEO, de los cuales 750 poseen un diámetro superior a un kilómetro. Dependiendo de sus órbitas los NEO se agrupan en tres tipos princi-

de meteoritos producidas por la inesperada entrada de rocas de pocos metros de diámetro (llamadas meteoroides según la nomenclatura de la Unión Astronómica Internacional). Sin embargo, en la última década la tecnología audiovisual comenzó a estar al alcance del público y, como consecuencia, muchos de estos eventos casuales fueron filmados por videoaficionados. Un ejemplo nos tocó bien de cerca y pasó a la historia de la Meteorítica. El 4

**FIGURA 4**

La órbita heliocéntrica estimada del NEA progenitor del superbólido de Cheliábinsk. El afelio de su órbita se adentra en el cinturón principal de asteroides. [Paul Chodas – NASA/JPL–]

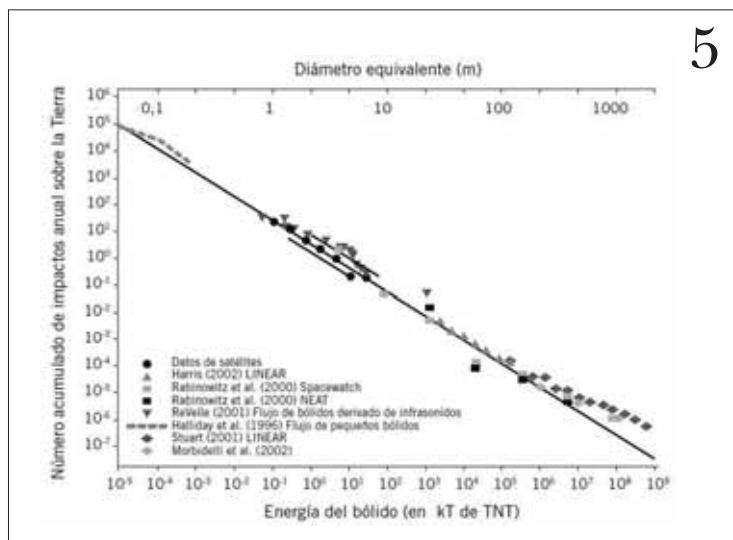
## La velocidad inicial del bólido ruso era ligeramente inferior a 19 km/s. Esa velocidad y la geometría de entrada nos permiten reconstruir la órbita y precisar que el meteoroides de Cheliábinsk era de la clase Apolo de asteroides próximos a la Tierra

pales: Apolo, Atenas y Amor. Entre los dos primeros se encuentran objetos que cruzan la órbita terrestre. De hecho, cerca de mil objetos de estos grupos se denominan *Potencialmente Peligrosos*. Para nuestra relativa tranquilidad, entre estos objetos, tan solo unos 150 poseen un diámetro superior al kilómetro. Nótese que hablamos genéricamente de *objetos* dado que entre ellos puede haber no solo asteroides sino también núcleos de cometas extintos.

Hoy en día sabemos que la mayoría de meteoritos que alcanzan la Tierra lo hacen en órbitas cuyos afelios sitúan su origen dinámico en resonancias orbitales con Júpiter, Saturno o Marte, los planetas que mayor influencia gravitatoria ejercen sobre los objetos almacenados en el llamado Cinturón Principal de Asteroides. Hasta hace poco conocíamos las órbitas de apenas una decena

de enero de 2004 el superbólido de Villabeto de La Peña produjo la primera caída de un meteorito recuperada en España en 59 años y por primera vez en nuestro país y novena en todo el mundo pudo obtenerse su órbita en el Sistema Solar (Figura 3, Trigo-Rodríguez *et al.*, 2006). Dicha órbita revelaba que esa roca que a la entrada a la atmósfera poseía unos 70 centímetros de diámetro provenía de un asteroide. Una colisión la había desprendido haciendo que siguiese una órbita surcando el cinturón principal hasta ser impulsado a través de una resonancia hacia una órbita cruzando la de nuestro planeta.

Actualmente en nuestro grupo de investigación estamos desarrollando diferentes aplicaciones para poder estudiar a fondo el comportamiento dinámico de estos bólidos al atravesar la atmósfera terrestre. Sumando ya a la actual red de cámaras que filman de forma continua el cielo en busca de meteoros y después de publicar numerosos casos de interesantes bólidos (Dergham, J. *et al.*, 2011) estamos trabajando en métodos Run-



**FIGURA 5**

Gráfica del flujo de cuerpos que chocan contra la Tierra en la actualidad. Se basa en las estadísticas obtenidas por programas de seguimiento de NEO, detección de superbólidos mediante satélites artificiales o infrasonidos y para objetos por debajo de 1 metro las redes de seguimiento de bólidos. [Adaptada de Trigo-Rodríguez, 2012, en base a un diagrama de Peter Brown -Univ. Western Ontario-].

ge-Kutta de tratamiento de la deceleración de los bólidos para determinar diferentes parámetros físicos. Cuando un cuerpo entra a la atmósfera es frenado y también pierde masa de forma progresiva en un proceso llamado ablación. Este proceso puede ser descrito mediante unas ecuaciones dinámicas, variables como por ejemplo en qué momento el cuerpo sufre la máxima deceleración o cuando éste pierde más masa a lo largo de su trayectoria nos puede dar información muy valiosa como la masa inicial y final, velocidad preatmosférica o cómo era su forma, si esférica o irregular. Esperamos poder publicar en breve un estudio minucioso sobre el último caso ruso utilizando ésta técnica. Con este método hemos obtenido que la velocidad inicial del bólido ruso al penetrar en la at-

## El infrasonido del meteorito de Cheliábinsk fue tan energético que se pudo registrar en estaciones de infrasonido de todo el planeta, como por ejemplo en la Antártida a unos 15 000 km de distancia

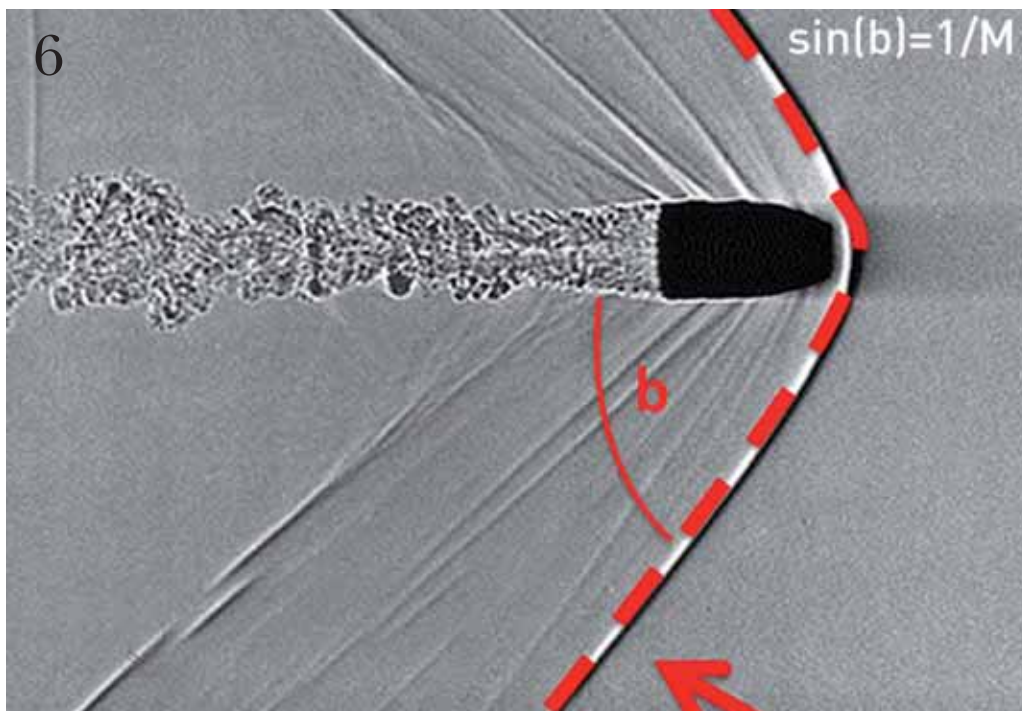
mósfera era ligeramente inferior a 19 km/s. Esa velocidad y la geometría de entrada nos permiten reconstruir la órbita y precisar que el meteorito de Cheliábinsk era de la clase Apolo de asteroides próximos a la Tierra (Figura 4).

Sin embargo, estudios recientes demuestran que los NEO pueden ser también fuente de

meteoritos. Entre los mecanismos físicos que harían posible que rocas de varios centenares de kg desprendidas de estos asteroides produjesen meteoritos encontraríamos los encuentros cercanos con los planetas terrestres. Bien los asteroides podrían fragmentarse por el efecto de marea gravitatoria ejercido sobre las estructuras de pilas de escombros débilmente cohesionadas de algunos NEO. Ese tipo de proceso explica también la formación de complejos de asteroides con órbitas similares en esa población de objetos, como la que descubrimos posee el asteroide 2002 NY40. Estos mecanismos de ruptura o desprendimiento de rocas de la superficie de NEA deben ser frecuentes en las escalas temporales de decenas de miles de años necesarias para mantener una coherencia dinámica con las órbitas de sus asteroides progenitores. En el marco de la Red de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos nuestro equipo de investigación ha podido recopilar información orbital de varios bólidos que parecen directamente asociados a NEA.

### LA FRECUENCIA DE IMPACTO DE NEO CON NUESTRO PLANETA

Obviamente, y pese a que muchos medios se esfuercen en sugerirnos lo contrario, no hay motivo para la alarma dado que la Tierra posee en su atmósfera un escudo protector. La inmensa mayoría de NEO con diámetros superiores a 100 metros ya han sido descubiertos y suponen un peligro insignificante a medio plazo. Tan solo aquellos de pocas decenas de metros y que encuentran nuestro planeta desde geometrías imposibles de seguir con los programas de seguimiento de NEO situados en la superficie terrestre pueden pasar desapercibidos pero quedan dentro de los márgenes de cuerpos que nuestra atmósfera eficientemente nos protege. Este fue el caso del NEA que produjo el superbólido de Cheliábinsk, que pese a sus cerca de 11 000 Tm solo produjo una caída de meteoritos bastante espectacular. La presión alcanzada en su frente de choque lo hizo fragmentarse en miles de piezas poco antes de llegar a la estratopausa y esas fragmentaciones quedaron recogidas en las filmaciones casuales. Esto nos debe hacer pensar en la necesidad de establecer programas de seguimiento en órbita terrestre y en la importancia de seguir financiando iniciativas para descubrir estos objetos y para paliar adecuadamente el peligro potencial que pueden representar. Los impactos con asteroides o cometas, alcanzando la Tierra desde órbitas excéntricas



**FIGURA 6**

Representación esquemática de un cono de Mach y su relación entre el número de Mach,  $M$  y el ángulo del cono. En el caso del meteorito de Cheliábinsk,  $b$  es del orden de  $1^\circ$ . [Cortesía de los autores]

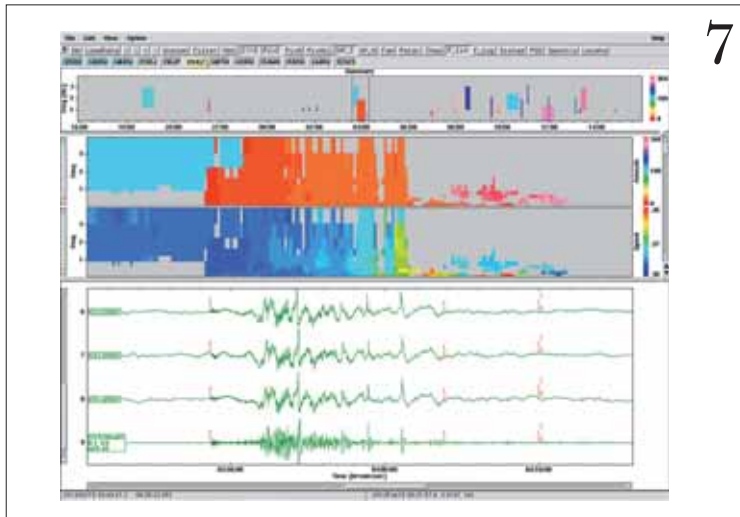
serían mucho más energéticos y devastadores, y habrían erosionado significativamente las atmósferas de los planetas terrestres en el pasado (Trigo-Rodríguez, 2012). Sin embargo tales sucesos no son, afortunadamente, frecuentes por diversas razones. Júpiter actúa como escudo natural dispersando grandes objetos con órbitas que decaigan hacia la región próxima a la Tierra. También los cuerpos grandes escasean y, de hecho, la frecuencia de impacto con cuerpos de diámetros superiores al kilómetro es muy pequeña en la actualidad (Figura 5). De ese diagrama se extrae que un superbólido producido por un pequeño asteroide de unos 20 metros de diámetro se produce algo más de una vez por siglo. Por ello, podemos sentirnos afortunados de haber vivido esta histórica caída, y esperanzados por la ciencia puntera que se derive del estudio de este evento tan poco frecuente. Ahora queda por ver los misterios que nos desvela el análisis de sus meteoritos que parecen ser condritas ordinarias, grupo que representa cerca del 74 % de las caídas estudiadas hasta la fecha.

#### **LA ONDA DE CHOQUE DEL SUPERBÓLIDO DE CHELIÁBINSK. REGISTROS DE INFRASONIDO Y SÍSMICOS**

Los meteoroides en su entrada a la atmósfera y por fricción no solo generan luz y son observables sus trayectorias, sino que también crean ondas de choque (ondas de sonido). De hecho, en el caso de este meteorito caí-

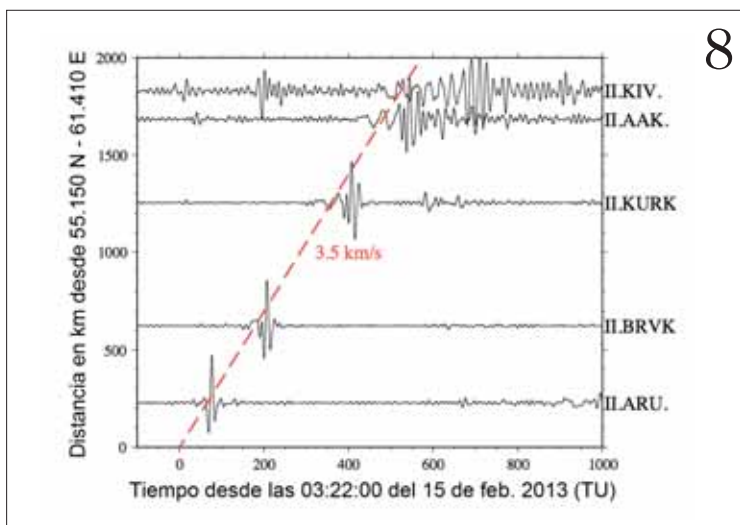
do sobre Rusia han sido estas ondas de choque las causantes de la mayoría de daños que se sufrieron en la zona, como daños en edificios y rotura de cristales. Las ondas de sonido y su boom sónico (parte audible de las mismas) fueron causados por la interacción entre la velocidad del meteoroides y la atmósfera. Como ya se ha comentado anteriormente, se calcula que el meteoroides penetró a una velocidad próxima a los 68 000 km/h, superando con creces la velocidad del sonido que para el aire a una temperatura de  $20^\circ\text{C}$  es de 1234,8 km/h. Estamos en una situación en que se rompe la barrera del sonido y cuando esto ocurre el frente de ondas sonoras que se crean al paso del meteoroides, van más lentas que éste en su movimiento y se apilan formando un área, llamada cono de Mach (Figura 6), de aire comprimido. La onda de choque se ha creado y empieza a viajar como onda plana perpendicular a la trayectoria del objeto.

En el caso del meteorito de Cheliábinsk se superó en más de 55 veces la velocidad del sonido y, por tanto, la rotura de la barrera del sonido se caracteriza por un número de Mach (el cociente de la velocidad del objeto respecto a la del sonido) de más de 55, situación no alcanzada por la acción humana en ningún caso por el momento. Generalmente, se define como situación altamente hipersónica cuando se llega a un número de Mach de aproximadamente 25, que es el rango en el que operan las reentradas en la atmósfera de los transbordadores STS de



**FIGURA 7**

Registro de ondas de infrasonido y algunos de sus atributos calculados en el CTBTO's International Data Centre del meteorito correspondiente a una estación situada en Kazajistán. (Cortesía de los autores)



**FIGURA 8**

Registros sísmicos de estaciones situadas desde 200 a 2000 km correspondientes a la onda de choque del meteorito ruso. Las ondas sísmicas están inducidas por la onda de choque que viajaba a unos 3,5 km/s, velocidad similar a la de las ondas superficiales sísmicas. [Adaptado de Z. Peng, 2013]

la NASA, y las naves rusas *Soyuz* y las chinas *Shenzhou*.

Las ondas de choque generadas en estos fenómenos de entrada de meteoros se degradan rápidamente en ondas de tipo infrasonido y pueden ser detectadas en la superficie de nuestro planeta con la instrumentación adecuada, como las estaciones de infrasonido. Estas ondas, en definitiva ondas de presión que viajan por el aire, pueden llegar a generar vibraciones en el mismo suelo que a su vez producen ondas sísmicas que, al viajar por el subsuelo, son registradas en estaciones sísmicas. Estudiando las características de las ondas de infrasonido y de las sísmicas que se hayan podido registrar se pueden deducir características del meteorito como la energía y dónde ha tenido lugar el fenómeno (Tapia y Trigo-Rodríguez, 2012).

El infrasonido es un tipo de onda que recorre largas distancias con muy poca pérdida de energía, en cambio la onda sísmica se atenúa muy rápido con la distancia, con lo que su detección se reserva a aquellas estaciones

sísmicas cercanas a la región del fenómeno o aquellas estaciones que aún estando lejos reciben un acoplamiento directo en su emplazamiento de la onda de infrasonido después de haber recorrido cierta distancia y conservando suficiente energía. En el caso del meteorito de Cheliábinsk su infrasonido fue tan energético que se pudo registrar en estaciones de infrasonido de todo el planeta, como por ejemplo en la Antártida a unos 15 000 km de distancia. El CTBTO (Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization, [www.ctbto.org](http://www.ctbto.org)) en su red de estaciones infrasonicas repartidas por todo el planeta, registraron el fenómeno en diecisiete de ellas y observaron que se trataba de una fuente en movimiento viajando a una velocidad mayor que la del sonido, lo que les hizo posible distinguirlo de una explosión volcánica u otro fenómeno explosivo estático. En la Figura 7 se puede observar uno de los registros infrasonicos en una estación del CTBTO situada en Kazajistán.

Así pues, dado que la onda infrasonica pudo recorrer tanta distancia y con tanta energía, en consecuencia tenemos registros sísmicos alrededor de todo el planeta. En la Figura 8 se puede observar un diagrama de estos registros de estaciones situadas desde 200 hasta 2000 km de Cheliábinsk. Los registros están filtrados para mostrar oscilaciones de largo periodo en los que se observan unas formas de onda correspondientes a ondas sísmicas superficiales, y, por lo tanto, generadas por la interacción de las ondas de infrasonido con los emplazamientos de las diversas estaciones sísmicas. En el diagrama se puede deducir que la onda de choque viajó a 3,5 km/s, velocidad también similar a la de las ondas sísmicas superficiales (Z. Peng, 2013).

Así pues, los registros de infrasonido y sísmicos se nos muestran como una potente herramienta de análisis capaz de ofrecer información complementaria a los análisis astronómicos y químico-físicos.

Estamos convencidos que el superbólido de Cheliábinsk es el fenómeno que más habrá popularizado este campo en un futuro próximo, toda esta fama cuando todavía estamos comenzando a estudiar los cientos de

kilogramos del meteorito recogidos hasta el momento y la cantidad de datos que... ¡aún quedan por analizar! A buen seguro que esta histórica caída nos proporcionará muchas más enseñanzas sobre nuestro Sistema Solar. (A)

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la valiosa información de las estaciones de infrasonidos sobre este superbólico proporcionada por el Prof. Dr. Peter Brown (University of Western Ontario, Canadá). Este trabajo se ha preparado en el contexto de nuestro proyecto de investigación AYA2011-26522.

#### BIBLIOGRAFÍA

\* Dergham, J.; Trigo-Rodríguez, J. M., Madiedo, J. M., Pujols, P., Llorca, J., Montanya, J., van de Velde, O. (2011). 42nd Lunar and Planetary Science Conference Contribution No. 1608, p.1859.

\* Peng, Zhigang (2013). *geophysics.eas.gatech.edu/people/zpeng/EQ\_Music/#part3\_5* (consultado abril 2013).

\* Tapia, M., Trigo-Rodríguez, J. M. (2012). «Using seismic data to detect and study bolides: the case study of May 11th, 2011 bo-

lide», European Planetary Science Congress 2012, 23-28 sept. 2012 en Madrid, id. EPSC2012-443.

\* Trigo-Rodríguez, J. M., J. Borovička, P. Spurný, J. L. Ortiz, J. Á. Docobo, A. J. Castro-Tirado, y J. Llorca (2006). «The Villalbeto de La Peña meteorite fall: II. Determination of the atmospheric trajectory and orbit», *Meteoritics & Planetary Science* 41, 505-517.

\* Trigo-Rodríguez, J. M. (2012). *Las raíces cósmicas de la vida*, colección «El Espejo y la Lámpara», Edicions UAB, Barcelona.

**Josep M. Trigo, Joan Dergham y Carles E. Moyano** pertenecen al Grupo de investigación sobre Meteoritos, Cuerpos Menores y Ciencias Planetarias, Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC), Barcelona.

**Para contactar:** [trigo@ice.csic.es](mailto:trigo@ice.csic.es).

**Mar Tapia** pertenece al Laboratorio d'Estudis Geofísics Eduard Fontseré-Institut d'Estudis Catalans (LEGEF-IEC), Barcelona.

**Para contactar:** [mtapia@iec.cat](mailto:mtapia@iec.cat).

**José M. Madiedo** pertenece a la Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Huelva, y al Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear, Facultad de Física, Universidad de Sevilla.



# NIÑOS EN RIESGO NECESITAN TU AYUDA

## Hazte socio de Aldeas Infantiles SOS

### Llámanos

### 902 33 22 22

[www.aldeasinfantiles.es](http://www.aldeasinfantiles.es)



**ALDEAS  
INFANTILES SOS**

JCDecaux

**ASTRONOMÍA**  
629 110 448  
[www.astronomia-mag.com](http://www.astronomia-mag.com)

