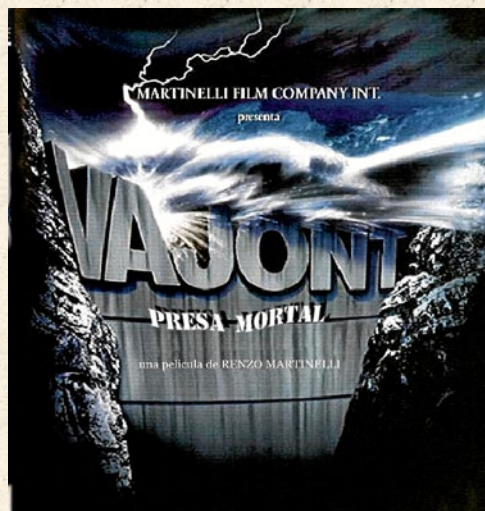


LA GEOLOGÍA ES NOTICIA

50 Años de la tragedia de Vajont (Italia)

Rinaldo Genevois, Salvatore Martino y Alberto Prestininzi _____ (pag. 92)



El peligro de impacto de asteroides contra la Tierra:



EL SUPERBÓLIDO DE CHELIÁBINSK

Josep M. Trigo Rodríguez, Mar Tapia, Joan Dergham, Carles E. Moyano-Cambero y José M. Madiedo

_____ (pag. 95)

A 50 años de la catástrofe de Vajont: RIESGOS DE DESLIZAMIENTO EN EL EMBALSE DE YESA

Antonio M. Casas Sainz _____ (pag. 101)



El Superbólide de Cheliábinsk

JOSEP M. TRIGO RODRÍGUEZ¹, MAR TAPIA², JOAN DERGHAM¹,
C. E. MOYANO-CAMBERO¹ Y JOSÉ M. MADIEDO^{3,4}

¹ Grupo de investigación sobre Meteoritos, Cuerpos Menores y Ciencias Planetarias, Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC), Campus UAB, Torre C5 parells, 08193 Bellaterra, Barcelona. trigo@ice.csic.es

² Laboratorio d'Estudis Geofísics Eduard Fontseré – Institut d'Estudis Catalans (LEGEF-IEC), C/ Carme, 7, 08001 Barcelona. mtapia@iec.cat

³ Facultad de Ciencias Experimentales. Universidad de Huelva. 21071 Huelva.

⁴ Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Facultad de Física, Universidad de Sevilla. 41013 Sevilla.

Una curiosa casualidad ha puesto en el candelero el peligro de impacto de pequeños asteroides contra la Tierra. El pasado 15 de febrero de 2013 todos los medios de comunicación estaban pendientes de la cer-

cana aproximación del 2012DA14: un asteroide próximo a la Tierra: abreviado generalmente y en lo que sigue como NEA por su acrónimo anglosajón (Near Earth Asteroid). El encuentro a tan sólo 27.700 km

de la superficie terrestre de ese asteroide con la Tierra, ya era de por sí relevante por el hecho de ser protagonizado por el asteroide 2012DA14 de unos 45 metros de diámetro que había sido descubierto tan sólo una año antes por un programa de búsqueda del Observatori Astronòmic de Mallorca. Sin embargo, ese encuentro pasaría casi a un segundo plano por simple azar. De manera inesperada, poco después de la salida del Sol tuvo su aparición a las 03h20m33s TUC (Tiempo Universal Coordinado) sobre Asia central una enorme bola de fuego que cobraría el protagonismo de aquella jornada. A eventos meteóricos de tal magnitud, detectables mediante cámaras a bordo de satélites artificiales por poseer magnitudes intermedias entre la Luna y el Sol (más luminosos que -17) se les denomina superbóldidos. ¿Había sido causado aquel brillante fenómeno por un fragmento de aquel asteroide?

Un suceso mediático

El superbólide de Cheliábinsk penetró en la atmósfera con una velocidad próxima a los 68.000 km/h, causando verdadero estupor entre los testigos visuales al atravesar Kazakistán y verdadero pavor sobre los habitantes de la ciudad rusa de Cheliábinsk sobre la cual se desintegró (Fig. 1). Las cámaras de seguridad que muchos conductores rusos colocan en sus coches (*dash-cam*) proporcionaban innumerables pruebas gráficas de la conmoción y sorpresa que un superbólide causa sobre la población. También fotógrafos profesionales tenían la fortuna de

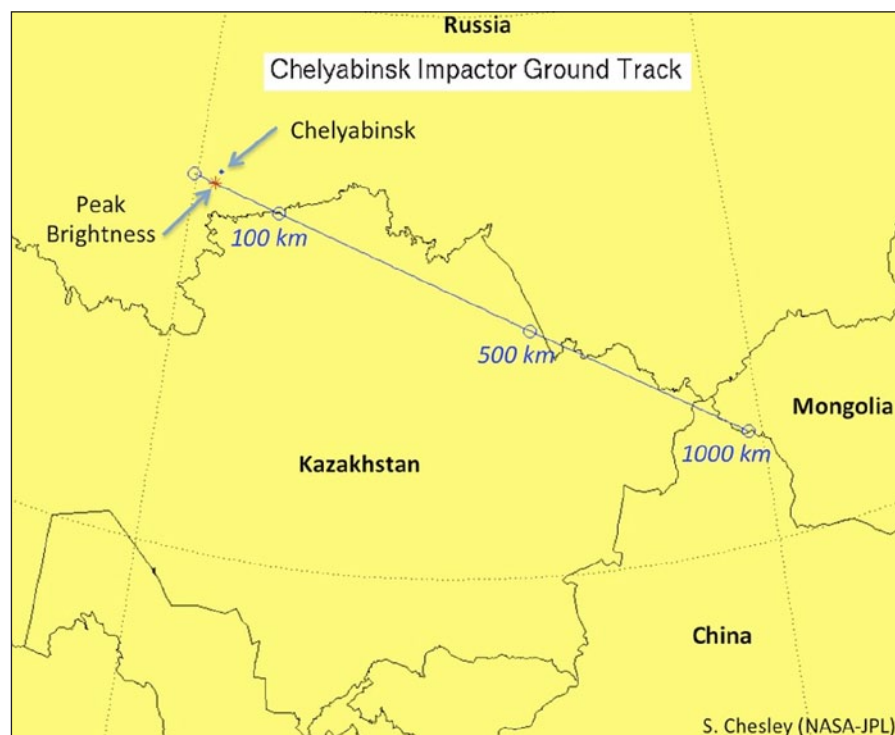


Fig. 1. Trayectoria proyectada sobre el suelo del superbólide de Cheliábinsk. Imagen de S. Chesley (NASA-JPL).



Fig. 2. 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.

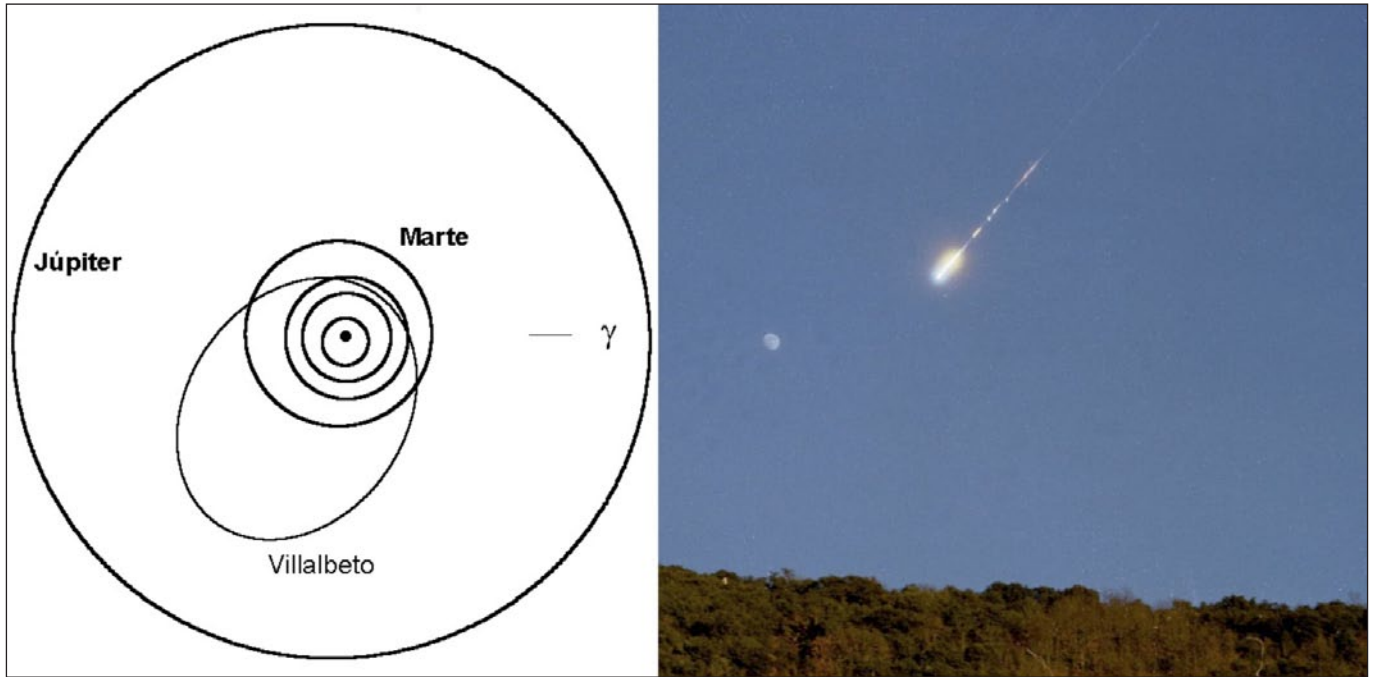
captar la espectacularidad del evento (Fig. 2). Los efectos producidos por la onda de choque durante la penetración del objeto en las capas inferiores de la atmósfera provocaban el caos por unos minutos al llegar al suelo y reventar paredes, puertas y cristales. Todos los expertos coincidimos en que la mayor parte de los heridos podrían 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.

Internet volvía a demostrar la potencialidad de las nuevas tecnologías, esta vez de la comunicación de masas. Tan sólo unos minutos después de producirse esa bola de fuego la información llegaba rápidamente a la red y, poco después, los medios de comunicación se hacían eco. Las imágenes del suceso favorecían la interpretación adecuada del evento como producido por la caída de un meteorito.

Impactos meteoríticos y guerra fría

El grupo de investigación sobre Meteoritos, Cuerpos Menores y Ciencias Planetarias 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 fue esencial para la adecuada interpretación del evento como de naturaleza meteórica y no asociado a un ataque nuclear o a cualquier misil. No es broma, hay que recordar que el estado de 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.

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 otros tiempos no hubiera sido tan alocado pensar que un evento meteórico de esta magnitud pudiese haber causado un conflicto nuclear. En cualquier caso nos queda la duda y la reflexión de las consecuencias de algo similar si hubiese pasado el pasado 15 de febrero en la península de Corea, en la frontera entre India y Pakistán o en cualquier otro punto caliente del mundo actual. La información rigurosa en este sentido es vital y debe fluir por todos los cauces para evitar caer en los peligros de la ignorancia. Ahora describiremos brevemente cuál fue el origen del superbólido de Cheliábinsk y cuáles son las principales causas para que un Asteroide Próximo a la Tierra (NEA) de unos 18 metros de diámetro y una masa de unas 11.000 toneladas pase desapercibido a los sistemas telescópicos de seguimiento de este tipo de objetos.



Objetos próximos a la Tierra y fuentes de meteoritos

Además del Sol, los ocho planetas y sus satélites, el Sistema Solar está formado por innumerables cuerpos de menor tamaño. Entre ellos los asteroides son objetos rocosos cuyo diámetro oscila entre 10 metros y 1.000 km. En la actualidad se conocen unos 400.000 aunque el número total es de varios millones. En general, se trata de objetos relativamente pequeños, tan sólo siete de ellos son mayores de 300 km (Tabla I). 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, aproximándose a veces a la Tierra que se denominan *Objetos Próximos a la Tierra*, también conocidos como NEOs por el acrónimo anglosajón (Near Earth Objects). Se conocen cerca de 6.000 NEOs, de los cuales 750 poseen un diámetro superior a un kilómetro. Dependiendo de sus órbitas los NEOs se agrupan en tres grupos principales: Apolo, Atenas y Amor nombrados de los tres primeros asteroides identificados en cada grupo. Entre los dos primeros se encuentran objetos que cruzan la órbita terrestre. De hecho, cerca de 1.000 objetos de estos grupos se denominan *Potencialmente Peligrosos*. Para nuestra relativa tran-

Fig. 3. La órbita de Villalbero de la Peña en el Sistema Solar comparada a las de los planetas terrestres y Júpiter. A la derecha una imagen única obtenida por María M. Robles desde Santa Columba de Curueño (León). Adaptada de Trigo-Rodríguez et al. (2006).

quilidad, entre estos objetos, tan sólo unos 150 poseen un diámetro superior al kilómetro. Nótese que hablamos genéricamente de *objetos* dado que entre ellos puede haber no sólo asteroides sino también núcleos de cometas extintos.

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 (Trigo-Rodríguez et al., 2006, 2012a,b). Hasta hace poco

conocíamos las órbitas de apenas una decena 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.

Tabla I. Asteroides con diámetro superior a 300 km, indicando su diámetro, masa y densidad media (cuando es conocida).

ASTEROIDE	DIÁMETRO (KM)	MASA (KG)	DENSIDAD MEDIA (G/CM ³)
1 Ceres	913	9.5'10 ²⁰	2.1
2 Pallas	523	2.4'10 ²⁰	2.9
4 Vesta	520	2.7'10 ²⁰	3.5
10 Hygiea	429	1.1'10 ²⁰	-
511 Davida	337	1.1'10 ²⁰	-
704 Interamnia	333	7.0'10 ¹⁹	-
52 Europa	312	5.2'10 ¹⁹	-

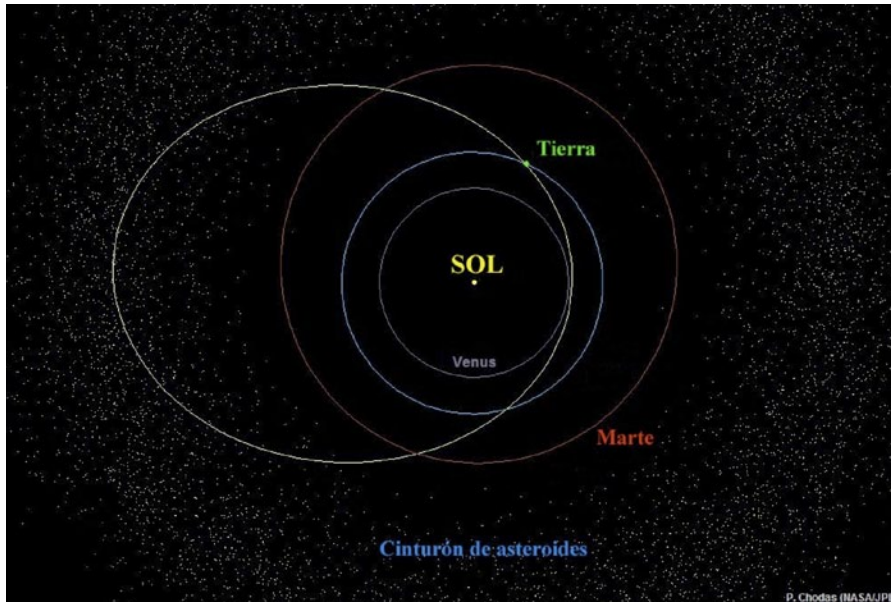


Fig. 4. La órbita heliocéntrica estimada del NEA progenitor del superbólide de Cheliábinsk. El afelio de su órbita se adentra en el cinturón principal de asteroides. Paul Chodas (JPL-NASA).

Un ejemplo nos tocó bien de cerca y pasó a la historia de la Meteorítica. El 4 de enero de 2004 el superbólide de Villalbeto 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 en base a un vídeo y varias fotografías casuales de la bola de fuego (Trigo-Rodríguez, 2006). Esa órbita revelaba que esa roca que a la entrada a la atmósfera poseía unos 70 centímetros de diámetro provenía de un asteroide. Una colisión lo 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.

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 que 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 como era su forma, si esférica o irregular. Con este método hemos obtenido que la

velocidad inicial del bólido al penetrar en la atmósfera era ligeramente inferior a 19 km/s. Esa velocidad y la geometría de entrada ha permitido reconstruir la órbita y precisar que el meteorito de Cheliábinsk era de la clase Apolo de asteroides próximos a la Tierra (Fig. 4).

Estudios recientes demuestran que los NEOs pueden ser también fuente de meteoritos (Trigo-Rodríguez et al., 2007, Madiedo et al., 2013). 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 NEOs. 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 2002NY40 (Trigo-Rodríguez et al., 2007). Estos mecanismos de ruptura o desprendimiento de rocas de la superficie de NEAs 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 Bóvidos y Meteoritos (www.spmn.uji.es) nuestro equipo de in-

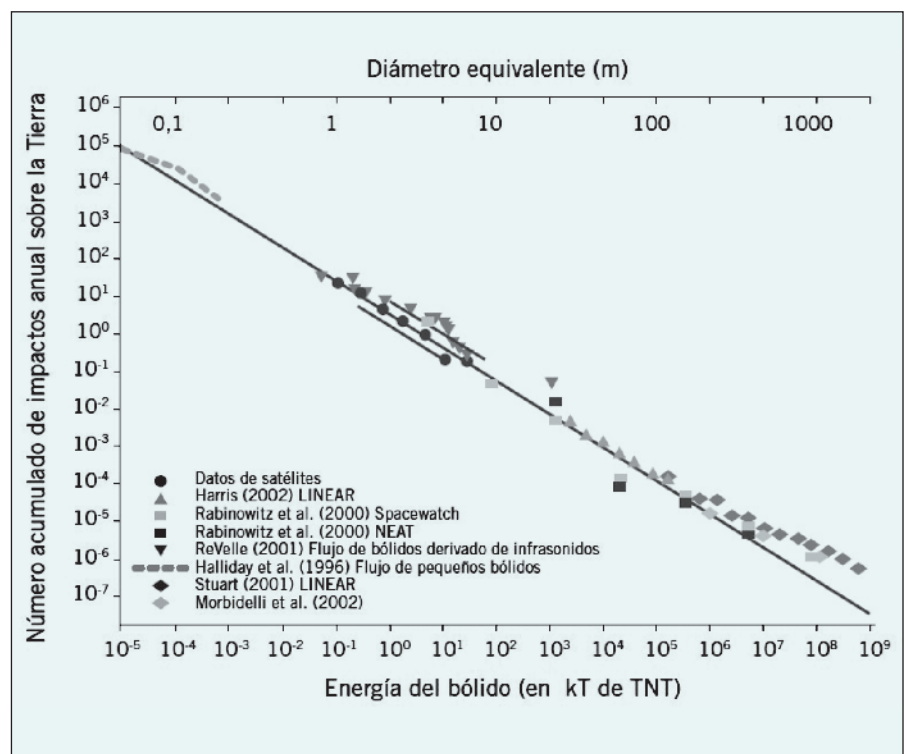


Fig. 5. Gráfica del flujo de cuerpos que chocan contra la Tierra en la actualidad. Se basa en las estadísticas obtenidas por programas de seguimiento de NEOs, detección de superbóvidos mediante satélites artificiales o infrasonidos y para objetos por debajo de 1 metro las redes de seguimiento de bólidos. Adaptada de Trigo-Rodríguez (2012) en base a un diagrama de Peter Brown (Univ. Western Ontario).

investigación ha podido recopilar información orbital de varios bólidos que parecen directamente asociados a NEAs (Madiedo et al., 2013).

La frecuencia de impacto de NEO'S con nuestro planeta

Obviamente no hay motivo para la alarma pues la Tierra posee en su atmósfera un escudo protector. La inmensa mayoría de NEOs con diámetros superiores a 100 metros ya han sido descubiertos. Tan sólo aquellos de pocas decenas de metros y que encuentran nuestro planeta desde geometrías imposibles de seguir con los programas de seguimiento de NEOs situados en la superficie terrestre pueden pasar desapercibidos. Este fue el caso del NEA que produjo el superbólido de Cheliábinsk (véase Fig. 4). 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 serían mucho más energéticos y devastadores, y habrían evaporado total o parcialmente las atmósferas de los planetas terrestres en el pasado (Trigo-Rodríguez, 2012a). 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

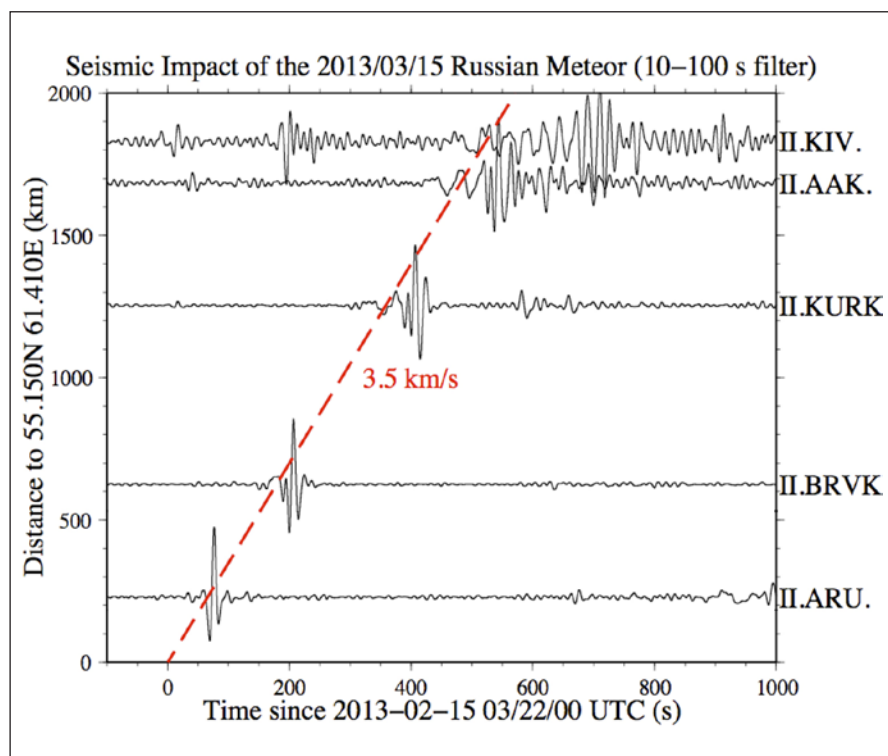


Fig. 6. Registros sísmicos de estaciones situadas desde 200km a 2000km correspondientes a la onda de choque del meteorito ruso. Las ondas sísmicas están inducidas por la onda de choque que viajaba a unos 3.5km/s, velocidad similar a la de las ondas superficiales sísmicas. (Z.Peng, 2013)

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 (Grady, 2000).

La onda de choque del meteorito. Registros sísmicos y de infrasónico.

Los meteoroides en su entrada a la atmósfera no sólo 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 caído sobre Rusia las ondas de choque fueron las causantes de la mayoría de 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 meteorito y la atmósfera. Como ya se ha comentado anteriormente, se calcula que el meteorito 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°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 meteorito, van más lentas que éste en su movimiento y se apilan formando un área, llamada cono de Mach, 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 (cociente entre la velocidad del objeto y 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 re-entradas en la atmósfera de los transbordadores STS de la NASA, los transbordadores rusos Soyuz y los chinos 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 de los bólidos tales como la energía y el lugar donde ha tenido lugar el fenómeno (Tapia y Trigo-Rodríguez, 2012).

Otra característica del infrasonido es que se comporta como un tipo de onda que recorre largas distancias con muy poca pérdida de energía, en cambio la onda sísmica se atenúan 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, reciban 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. En la Fig. 6 se puede observar un diagrama de estos registros de estaciones situadas desde 200 km hasta 2000 km de Chelyabinsk. 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. Del diagrama de la Fig. 6 se deduce que la onda de choque

viajó a 3.5km/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 otros sistemas. Podemos decir que el superbólido de Chelyabinsk es el fenómeno que más habrá popularizado este campo. Toda esta fama le llega cuando todavía estamos comenzando a estudiar los cientos de kilogramos del meteorito recuperados hasta el momento. A bien seguro que esta histórica caída proporcionará muchas más enseñanzas.

Agradecimientos

Agradecemos la valiosa información de estaciones de infrasonidos sobre este superbólido 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

- CTBTO, 2008. Nota de prensa: <http://www.ctbto.org/press-centre/press-releases/2013/russian-fireball-largest-ever-detected-by-ctbtos-infrasound-sensors/> (consultado abril 2013)
- Dergham, J.; Trigo-Rodríguez J.M.; Madiedo, J.M., Pujols, P; Llorca, J.; Montanya, J.; van de Velde, O. (2011) "A 2010 Taurid Bolide Imaged in the Framework of the Spanish Fireball Network." 42nd Lunar and Planetary Science Conference Contribution No. 1608, p.1859
- Edwards, David W. Eaton and Peter G. Brown (2008). *Seismic observations of meteors: coupling theory and observations*. *Rev. of Geophysics*, 46, RG4007.
- Grady M. (2000) *Catalogue of Meteorites*, Cambridge University Press, London, UK.
- Madiedo J.M., Trigo-Rodríguez J.M., Williams I.P., Ortiz J.L., and Cabrera J. (2013) *The Northern Chi Orionid meteoroid stream and possible association with the potentially hazardous asteroid 2008XM1*. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, doi: 10.1093/mnras/stt342.
- Peng, Zhigang (2013) http://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 bolide.*, *European Planetary Science Congress 2012, held 23-28 September, 2012 in Madrid*, id. EPSC2012-443.
- Trigo-Rodríguez J.M., J. Borovička, P. Spurný, J.L. Ortiz, J.A. Docobo, A.J. Castro-Tirado, and 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., E. Lyytinen, D.C. Jones, J. M. Madiedo, A. Castro-Tirado, I. Williams, J. Llorca, S. Vitek, M. Jelínek, B. Troughton and F. Gálvez (2007) "Asteroid 2002NY40 as source of meteorite-dropping bolides", *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 382, 1933-1939.
- Trigo Rodríguez J.M. (2012a) "Las raíces cósmicas de la vida", colección *el espejo y la lámpara*, Edicions UAB, Barcelona.
- Trigo Rodríguez J.M. (2012b) "Meteoritos", Editorial Catarata-CSIC, Madrid.