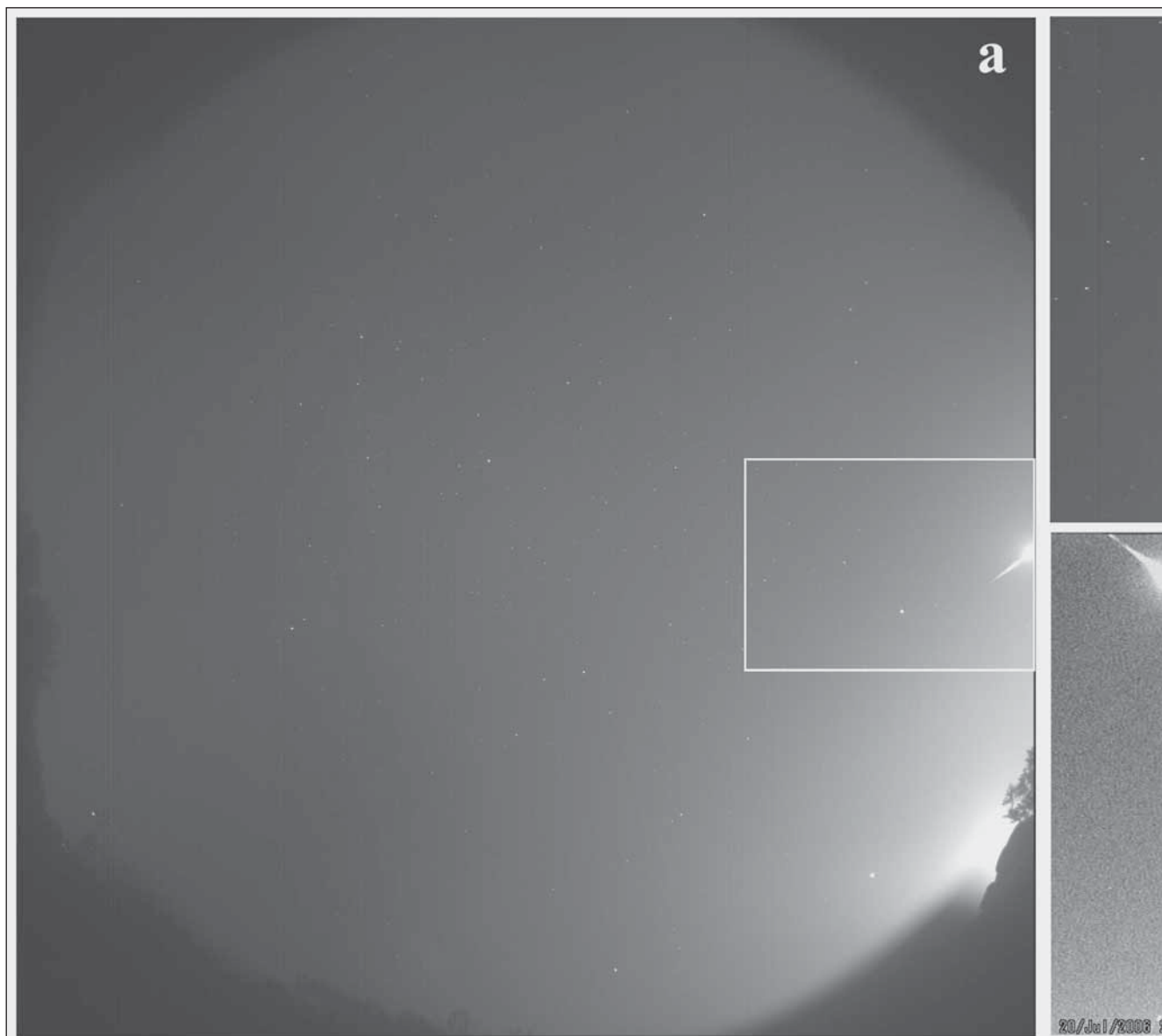


LA RED ESPAÑOLA DE BÓLIDOS Y METEORITOS

OBJETIVOS CIENTÍFICOS, IMPLICACIÓN AMATEUR Y ÚLTIMOS ÉXITOS



Los autores pertenecen a las siguientes instituciones: 1. Universidad de Huelva, 2. Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC-IEEC), 3. Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC), 4. Universitat Politècnica de Catalunya, 5. Universidad Complutense de Madrid, 6. Universidade de Santiago de Compostela, 7. Universidad de La Rioja, 8. Sociedad Malagueña de Astronomía, 9. Agrupación Astronómica de Madrid, 10. Gualba Observatory (MPC 442), 11. Grup d'Estudis Astronòmics (GEA).

La Red Española de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos engloba a investigadores de distintas Universidades y Centros de Investigación que pretenden estudiar el fenómeno meteórico desde una perspectiva amplia y moderna. Progresos recientes en la aplicación por nuestro grupo de técnicas innovadoras de registro hace que la aportación de las agrupaciones de aficionados pueda incrementarse en el futuro próximo. Este artículo pretende invitar a todos los interesados en participar, mostrando esas nuevas tendencias y dando ejemplos de grandes bólidos estudiados recientemente.

LA SOBRE PORITOS

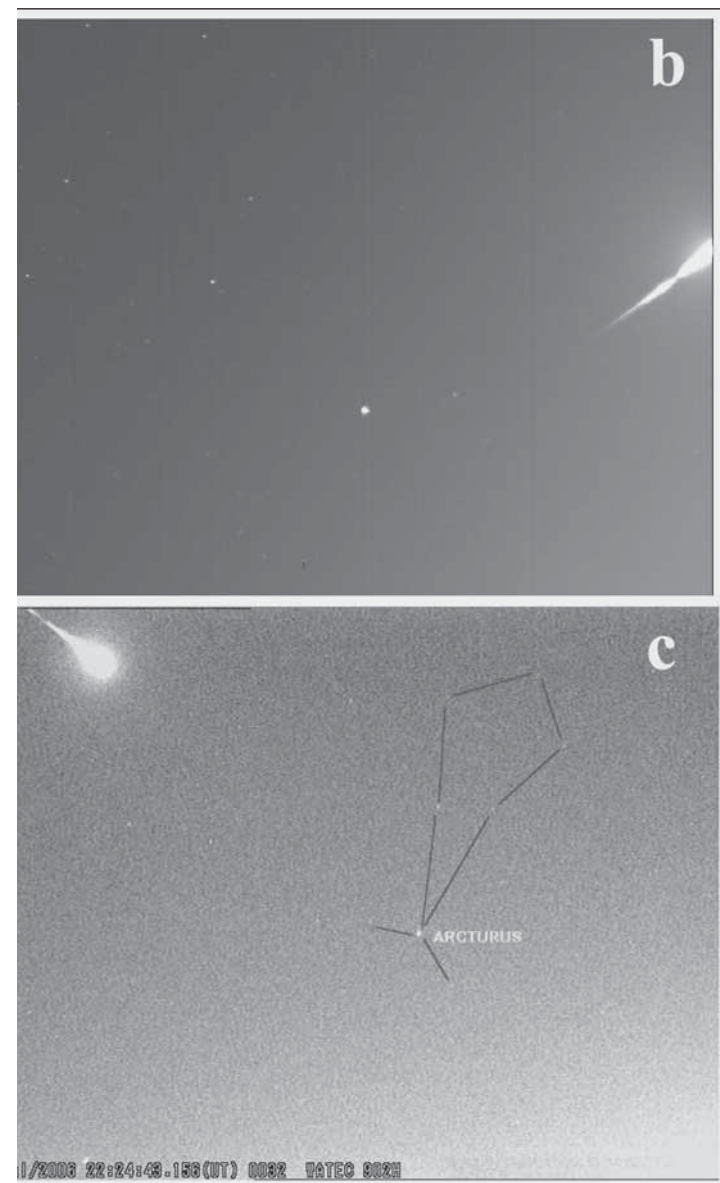
OS ÉXITOS

JOSÉ M. MADIEDO¹,
JOSEP M. TRIGO RODRÍGUEZ²,
ALBERTO J. CASTRO-TIRADO³,
JORDI LLORCA⁴,
JOSÉ L. ORTIZ³,
JAIME ZAMORANO⁵,
JOSÉ Á. DOCOBO⁶,
VÍCTOR LANCHARES⁷,
STANDA VÍTEK³,
MARTIN JELÍNEK³,
RONAN CUNNIFFE³,
BLANCA TROUGHTON⁸,
JAIME IZQUIERDO⁹,
FRANCISCO OCAÑA⁹,
ALBERT SÀNCHEZ¹⁰,
PEP PUJOLS¹¹ Y
SEBASTIÀ TORRELL

metros mayoritariamente desprendidos de asteroides y cometas. Estos fragmentos inciden sobre la atmósfera terrestre a velocidades comprendidas entre 11 y 73 km/s y, conforme profundizan en ella, sufren choques con las moléculas de la estratosfera que calientan progresivamente su superficie. Alcanzadas temperaturas de unos 1.500° C comienza el proceso denominado ablación, en el que los diferentes minerales cambian de fase y comienzan a desprenderse y evaporarse para formar una columna de gas alrededor del meteoróide. Esas columnas suelen alcanzar temperaturas comprendidas entre 4.000 y 5.000° C, mientras que en la parte frontal del meteoróide puede llegar a unos 10.000° C (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2003). Buena parte de las moléculas desprendidas del meteoróide y de las moléculas de aire que impactan con él quedan en estado excitado o ionizado, emitiendo posteriormente luz al decaer al estado fundamental o al intercambiar electrones con el medio circundante. Una ínfima fracción (generalmente menor a un 1 %) de la energía cinética inicial del meteoróide se transforma en luz y calor, produciendo el fenómeno luminoso conocido como **meteoro** o, vulgarmente, estrella fugaz. Cuando los meteoros poseen un brillo similar o superior al planeta Venus se denominan **bólidos**. Éstos son generados por partículas cuya masa oscila desde pocos gramos hasta miles de toneladas y, de hecho, en algunos casos notables pueden ser vistos incluso en pleno día, siendo entonces conocidos como **superbólidos**. Además, los meteoroides con una masa superior a varias decenas de kilogramos pueden sobrevivir parcialmente a su brusco paso por la atmósfera, alcanzando entonces la superficie terrestre en forma de **meteoritos** (Llorca, 2004). En ocasiones estos fenómenos pueden ir acompañados de fenómenos audibles detectables por redes sísmicas o infrasónicas, como fue el caso de Villalbeto de la Peña, caído en Palencia en 2004 (Llorca *et al.*, 2005; Trigo-Rodríguez *et al.*, 2006).

La Red Española de Investigación sobre Bólidos y Meteoritos (en inglés *SPanish Meteor and fireball*

(A la izquierda).
La Red Española de Bólidos y Meteoritos detectó el bólido Doñana (SPMN010706) de magnitud -13 aparecido el 20 de julio de 2006 a las 22h 24m 41,5±0,1s TU. Registrado desde: a,b) Cámara de todo el cielo de La Mayora (Imagen A. J. Castro-Tirado/Standa Vítek, IAA-CSIC-UV) y c) Cámara Watec 902H operando en Sevilla (J. M. Madiedo, Universidad de Huelva). (Todas las imágenes de este artículo son cortesía de los autores)



INTRODUCCIÓN

Estimaciones llevadas a cabo por métodos independientes indican que cada año llegan a nuestro planeta unas 78.000 toneladas de materia interplanetaria (McSween, 1999). Buena parte lo hace en forma de meteoroides, fragmentos con diámetro inferior a 10



Figura 1. Principales estaciones de observación operadas por la SPMN. Los círculos indican las zonas abarcadas desde algunas de ellas.

Network o, abreviadamente, SPMN) se creó en el año 1997. Engloba a investigadores de distintas universidades y centros de investigación que se centran en el estudio del fenómeno meteórico desde una perspectiva interdisciplinar, amplia y moderna. Llevamos varios años desarrollando un sistema de observación continuo de la actividad meteórica sobre la Península Ibérica y países limítrofes en base al uso de diferentes técnicas de detección. Los datos recabados permiten, por ejemplo, obtener las órbitas que seguían los meteoroides en el Sistema Solar antes de impactar con la Tierra, estimar parámetros tales como su masa y consistencia e incluso, en el caso de partículas de gran tamaño que puedan alcanzar el suelo en forma de meteoritos, calcular sus trayectorias y el correspondiente punto de impacto para poder proceder a la recuperación y posterior análisis de los fragmentos. Asimismo, los parámetros orbitales obtenidos pueden usarse para buscar posibles asociaciones entre los meteoroides y otros objetos de nuestro Sistema Solar, pudiéndose así determinar cuáles son sus cuerpos progenitores. Además, mediante técnicas de espectroscopia pueden reunirse datos que permiten obtener información sobre la composición química de estas partículas interplanetarias y, por extensión, de los cuerpos del Sistema Solar de los que proceden. Pero sin duda el colofón de estas investigaciones es recuperar meteoritos, lo que hace a esta disciplina única dado que cuando esto se consigue ¡puedes tocar un astro del Sistema Solar!. En este sentido nuestra red ha

sido la primera en todo el mundo que ha recuperado dos meteoritos en sólo tres años. Cuando recuperamos el meteorito de Villalbeto de la Peña en 2004 (Llorca *et al.*, 2005) habían pasado 57 años desde que se recogió casualmente (al caer en medio de una calle) el meteorito de Reliegos (León). En ese intervalo de tiempo posiblemente cayeron decenas de meteoritos, pero con la despoblación de las zonas rurales y la falta de interés por tales eventos pasaron desapercibidos. Hasta finales de los ochenta, no existía en nuestro país un interés en estudiar los bólidos para reconstruir las trayectorias de estos objetos, si exceptuamos el demostrado por el célebre astrónomo Josep Comas-Solà a principios del siglo XX. Ese espacio tan importante ha sido cubierto por nuestra red que mantiene un listado en línea de grandes bólidos en www.spmn.uji.es/ESP/SPMNlist.html

Progresos recientes en la aplicación por nuestro grupo de técnicas innovadoras de registro (cámaras CCD, vídeo, etc.) hace que la aportación de las agrupaciones de aficionados pueda incrementarse exponencialmente en el futuro próximo. Este artículo pretende invitar a todos los interesados en participar, mostrando esas nuevas tendencias y dando ejemplos de bólidos estudiados recientemente.

TÉCNICAS Y SISTEMAS DE OBSERVACIÓN

La emisión de energía en forma de luz y la formación de iones que se producen como consecuencia del proceso de ablación hacen posible usar la atmósfera terrestre como si de un enorme detector se tratase, ya que nos indican cuándo y dónde tiene lugar la entrada de estos cuerpos. Nuestra red dispone de diferentes equipos en varios puntos de España (Figura 1) con el fin de sacar partido de esta situación, de manera que desde estas estaciones de observación se pueda monitorizar continuamente un volumen atmosférico lo más grande posible. A continuación se describen los principales sistemas utilizados con este propósito y se muestran algunos ejemplos recientes.

CÁMARAS CCD DE CIELO COMPLETO (ALL-SKY)

Nuestro sistema estrella de detección de meteoros y bólidos es una cámara CCD de todo el cielo con un chip 4.096 x 4.096 píxeles que fue desarrollada por un equipo científico dirigido por el Dr. Alberto J. Castro-Tirado en el marco de un proyecto del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) y del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC). Esta cámara, bajo patente INTA-CSIC, es también revolucionaria en la detección de meteoros y bóli-

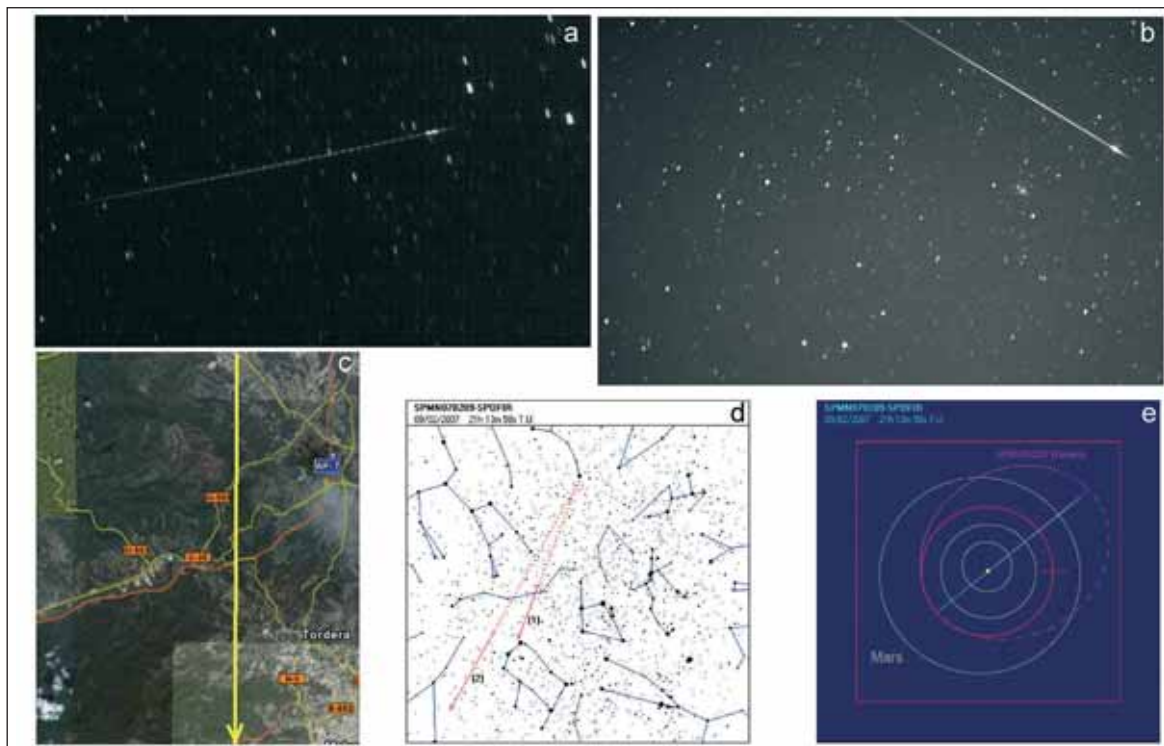


Figura 2. El bólido Tordera (SPMN010207) de magnitud -6 se desintegró el 9 de febrero de 2007 a las 21h 13m 58s TU a una altura de 65,4 km sobre la localidad barcelonesa del mismo nombre, bajo una presión hidrodinámica de 2 kPa. Sus propiedades físicas y órbita heliocéntrica indican que podría estar asociado a un asteroide o cometa todavía sin identificar. a) Imagen desde la estación de todo el cielo del Montseny (Josep M. Trigo, CSIC-IEEC-UV), b) Desde Folgueroles (Pep Pujols, GEA-AAO), c) Trayectoria real proyectada sobre el suelo, d) Trayectoria aparente desde ambas estaciones y e) órbita heliocéntrica donde aparece indicada la órbita de Marte por comparación.

dos dado que registra meteoros hasta magnitud $+3$ con una precisión astrométrica de 1 minuto de arco, suponiendo un gran avance con respecto a cámaras fotográficas de todo el cielo que sólo registran bólidos (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2004). De manera pionera también se ha desarrollado en el Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC) y el Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC) un sistema de determinación de velocidades meteóricas de gran precisión que está siendo patentado. Algunos de los resultados obtenidos con estas cámaras se muestran en las Figuras 2, 3 y la que abre este artículo.

Asimismo, cabe destacar que la Sociedad Malagueña de Astronomía colabora con nuestra red operando desde Torremolinos una cámara CCD de campo amplio (90 x 140 grados). Se trata de un equipo de la marca SBIG que lleva a cabo el registro de los meteoros mediante técnicas de detección de trazas. Con el mismo dispositivo la Universidad de La Rioja y la Universidad Pública de Navarra planean incorporarse al seguimiento de la actividad meteórica del Norte peninsular. La Figura 4 muestra una imagen de un bólido registrado por esta cámara. También otros sistemas

que se pueden desarrollar proporcionan datos interesantes (Figura 5).

SISTEMAS DE VIDEODETECCIÓN

Hoy en día algunas cámaras con sensor CCD de pequeño formato (entre 1/2 y 2/3 de pulgada), permiten obtener secuencias de video en tiempo real a

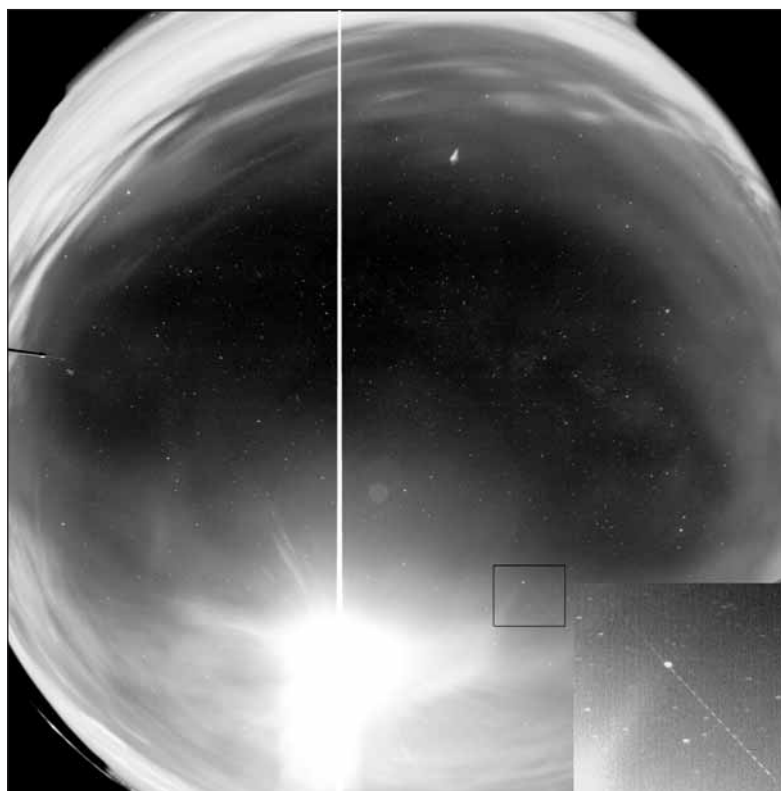


Figura 3. Perseida de magnitud -2 registrada el 12 de agosto de 2006 por la cámara de todo el cielo del Observatorio Astronómico del Montsec (OadM-IEEC), en Lérida. Se muestra ampliada la zona con el meteoro que se registró pese a la Luna Llena y las nubes. Al entrecortarse la imagen 50 veces se pueden estimar velocidades y deceleraciones de manera precisa. (Imagen Josep M. Trigo, IEEC-CSIC)



Figura 4. Impresionante Gemínida de magnitud -7 registrada desde Málaga el pasado 13 de diciembre de 2006 por Blanca Troughton (Sociedad Malagueña de Astronomía).

la vez que consiguen alcanzar una magnitud límite y una resolución espacial idóneas para realizar estudios sobre la actividad meteórica. Entre éstas se encuentran varios modelos fabricados por Mintron y Watec. Durante el último año la Universidad de Huelva ha instalado varias estaciones basadas en estos equipos en distintos puntos de Andalucía (Figuras 1 y 6). Cada una de ellas está integrada por varias cámaras de alta sensibilidad que operan de forma permanente, pudiendo alcanzar una magnitud límite promedio de $+3$. Aunque la mayoría de estas estaciones son fijas, el diseño de algunos de los sistemas se ha realizado de manera que puedan ser fácilmente transportables, lo cual permite establecer puntos móviles de registro. Un ejemplo de esto último lo constituye la estación de Cerro Negro, situada en la provincia de Sevilla.



Bólide 15 Agosto 2007-00_37 TU. Jaime Izquierdo UCM-AAM

ESPECTROSCOPIA DE METEOROS

El uso de elementos dispersores para descomponer la luz que emiten los meteoros y obtener su espectro es de gran utilidad a la hora de obtener información sobre la composición química de los meteoroides. Con este propósito hemos optado por acoplar redes de difracción a algunas de nuestras cámaras. Esto nos permite registrar el espectro de emisión de bólidos cuyo brillo es superior a una magnitud de -4 ó -5 . Con las cámaras de vídeo puede, además, observarse cómo dicho espectro va evolucionando durante la descomposición del meteoroides, permitiendo así estudiar un fenómeno conocido como ablación diferencial.

SISTEMAS DE OBSERVACIÓN DIURNA

Durante los últimos meses nuestra red ha instalado sistemas que permitan llevar a cabo registros fotográficos y de vídeo durante el día. En este caso, lógicamente, sólo se pueden detectar bólidos muy brillantes. No obstante, puesto que son precisamente éstos los que pueden dar lugar a meteoritos, la implantación de estaciones de observación diurna es clave de cara a la posible recuperación de estos fragmentos. En la actualidad la red opera cuatro de estos sistemas desde Andalucía, concretamente desde las provincias de Huelva, Sevilla, Málaga y Granada. Los equipos situados en Sevilla funcionan siguiendo el mismo principio que las estaciones de videodetección descritas anteriormente. Sin embargo, las cámaras situadas en Granada, Málaga y Huelva se basan en sistemas CCD que registran automáticamente una imagen por segundo. Éstas son posteriormente analizadas para encontrar en ellas posibles trazas de bólidos.

SISTEMA DE RADIODETECCIÓN

Si bien los equipos descritos anteriormente utilizan la luz desprendida por el meteoro para llevar a cabo su identificación, la radiodetección se basa, por el contrario, en aprovechar el hecho de que la cola iónica dejada por estas partículas al desintegrarse en la atmósfera puede reflejar ondas electromagnéticas de determinadas frecuencias. Entre éstas se encuentran las utilizadas para transmitir señales de radio y de televisión. Esta técnica presenta la ventaja de poder llevar a cabo un registro de la actividad meteórica tanto durante el día como durante la noche y con independencia de que se produzcan condiciones meteorológicas adversas.

Aunque los radiodetectores pueden operar según diferentes principios, uno de los más comunes (denominado *forward-scatter* en inglés) consiste en monitorizar la señal procedente de una estación de radio o de televisión lejana. La distancia que separa

al emisor del receptor es lo suficientemente grande como para que la curvatura terrestre impida que esta señal pueda llegar directamente al detector. Sólo cuando un meteoro aparece en la atmósfera superior, sobre la vertical de algún punto intermedio entre ambos, la señal procedente del emisor rebota sobre la correspondiente cola iónica y llega al receptor, recogiendo entonces un eco audible. La cola de iones va desvaneciéndose como consecuencia de varios procesos (difusión de los iones en la atmósfera, deformación de dicha cola por el movimiento de masas de aire, recombinación de electrones con iones positivos, etc.), por lo que la intensidad de la señal reflejada disminuye con el tiempo. Así, nos podemos encontrar con ecos que pueden durar desde una fracción de segundo hasta incluso más de un minuto en el caso de superbóvidos.

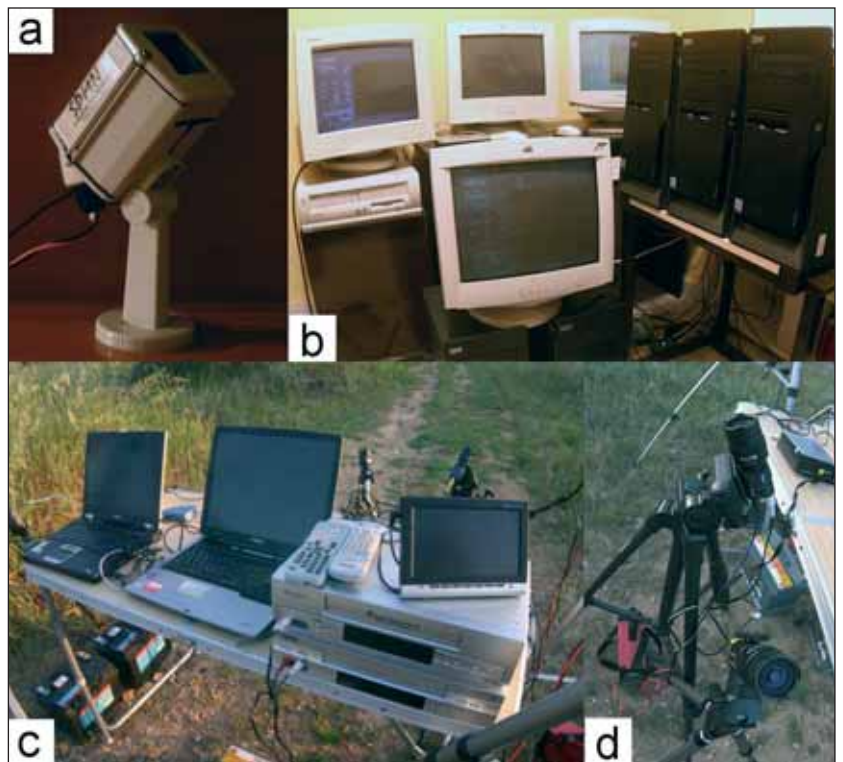
La Figura 7 muestra un esquema de nuestro sistema de radiodetección, que opera desde Sevilla mediante la técnica de *forward-scatter*. Emplea un receptor computerizado que puede utilizar dos antenas de distinta ganancia. El conjunto está controlado por varios ordenadores que, mediante software de desarrollo propio, permiten registrar y analizar en tiempo real los ecos detectados.

DESARROLLO DE SOFTWARE APLICADO AL ESTUDIO DE LOS METEOROS

Una de nuestras líneas de trabajo guarda relación con el desarrollo de programas que faciliten distintas tareas relacionadas con el estudio de los meteoros. Uno de ellos nos permite, conocidas las coordenadas geográficas de los diferentes observadores, calcular desde su estación a qué punto del cielo debe apuntar para registrar meteoros comunes a otras estaciones de la red. Así, cualquier persona puede participar en cualquier lugar de España, recibiendo por correo electrónico los centros de campo a los que deberá apuntar durante la campaña en cuestión. Una cámara fotográfica o de vídeo junto con un trípode es lo único que necesitará.

También el volumen de información que se obtiene (cada vez mayor con la implantación de nuevas estaciones de observación) ha hecho necesario el desarrollo de programas para la reducción de datos. Entre ellos se encuentra *Amalthea*, un software que puede realizar tareas relacionadas con la astrometría, la fotometría y la espectroscopia de meteoros, así como estimar el punto de impacto de un posible meteorito. También se ha desarrollado recientemente un programa que permite asociar los meteoros observados con otros objetos de nuestro Sistema Solar, pudiendo así establecer cuáles son los cuerpos progenitores de estas partículas.

Además, en el caso concreto del sistema de radiodetección, se ha desarrollado un código que permite la automatización y operación autónoma de los equipos. Este software identifica los ecos producidos por los meteoros y los analiza en tiempo real, incluyendo



algoritmos para eliminar los falsos positivos que pueden generarse como consecuencia de la operación del sistema en un entorno con gran contaminación radioeléctrica como es la ciudad de Sevilla.

Entre los programas desarrollados por la red también tenemos a disposición del público software de distribución gratuita. Por ejemplo, un atlas estelar de proyección gnomónica, útil para generar cartas que permiten registrar las trayectorias de los meteoros en el cielo y comprobar la procedencia desde diferentes riantes.

LA APORTACIÓN AMATEUR

Estamos orgullosos de contar con la colaboración de astrónomos aficionados en lo que es una iniciativa pionera por divulgar la ciencia promoviendo la participación activa. De hecho, dada la imprevisibilidad y el gran campo que abarca la aparición de los meteoros en la bóveda celeste, la aportación amateur puede ser de gran importancia. En ocasiones, incluso una simple fotografía realizada con un teléfono móvil de la estela dejada tras de sí por un bólido puede ser de mucha ayuda a la hora de recuperar fragmentos que hayan podido llegar al suelo en forma de meteoritos (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2005). Además para el cálculo preciso de las órbitas heliocéntricas de los meteoroides resulta necesario conocer los tiempos de entrada en la atmósfera con la mayor precisión posible, labor en la que la observación paralela de los aficionados resulta de extraordinario valor.

Las agrupaciones de astrónomos aficionados pueden realizar estudios sistemáticos utilizando algunos de los sistemas descritos anteriormente o bien otros análogos. Resulta fundamental sin

Figura 6. Imágenes de algunas de las estaciones de vídeo implantadas por la Universidad de Huelva en Andalucía. a) Cámara de alta sensibilidad. b) Uno de los sistemas informáticos de control de la estación de Sevilla. c, d) Imágenes de la estación móvil de Cerro Negro (Sevilla).

(En la página anterior, abajo): Figura 5. Incluso cámaras caseras pueden obtener resultados interesantes. Ejemplo de una Kappa Cignida de magnitud -9 registrada el 15 de agosto de 2007 a las 0h 37m 00 \pm 15s TU con una cámara de todo el cielo desarrollada por Jaime Izquierdo y Jaime Zamorano (Universidad Complutense de Madrid).

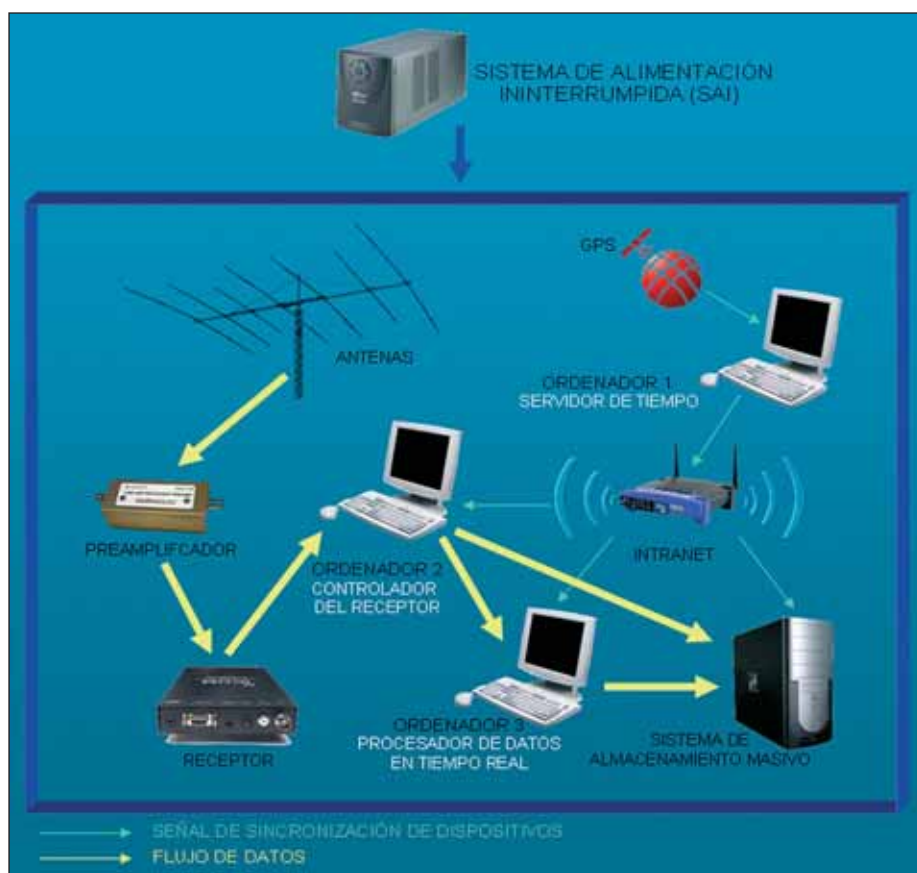


Figura 7. Esquema del sistema de radiodetección que la SPMN opera desde Sevilla.

embargo que nos den a conocer su interés en participar para de ese modo indicarles qué campos pueden ser comunes con nuestros dispositivos de detección. Para ejemplificar cómo se valora la labor del astrónomo aficionado, todos aquellos que contribuyen de

manera significativa han sido incluidos como coautores de los artículos publicados en revistas de investigación de primera línea. Así, por ejemplo, pueden llevarse a cabo campañas de observación con cámaras fotográficas réflex, tanto analógicas como digitales. Además, las cámaras que utilizamos en nuestras estaciones de videodetección están cada vez más extendidas entre los aficionados, quienes suelen utilizarlas para trabajos que van desde el estudio de ocultaciones hasta la obtención de imágenes de objetos de cielo profundo. También cámaras CCD pueden ser convertidas en cámaras de gran campo y sensibilidad mediante un objetivo gran angular compatible. En este sentido, varios amateur coautores de este trabajo han realizado contribuciones muy valiosas que han sido reconocidas en revistas profesionales. El último ejemplo fue la detección del estallido meteórico de las Oriónidas del cometa 1P/Halley registrado en 2006 (Trigo-Rodríguez *et al.*, 2007)

En definitiva, animamos a los interesados en colaborar con nuestra red a que visiten nuestra página web (www.spmn.uji.es), donde podrán encontrar más información referente a estos temas. Asimismo, pueden contactar con nosotros mediante la dirección de correo electrónico spmn@ieec.uab.es. Por otra parte, en breve estará disponible el libro de resúmenes del congreso internacional *Meteoroids 2007*, que incluye los trabajos presentados por más de cien expertos de treinta países. Quienes lo deseen pueden solicitarlo a través de la página web www.spmn.uji.es/meteoroids-2007/abstracts.html. **A**

REFERENCIAS

- Llorca, J. (2004), *Meteoritos y cráteres*, Editorial Milenio.
- Llorca, J., J. M. Trigo-Rodríguez, J. L. Ortiz, J. Á. Docobo, J. García-Guinea, A. J. Castro-Tirado, A. E. Rubin, O. Eugster, W. Edwards, M. Laubenstein e I. Casanova (2005), *The Villabeto de la Peña meteorite fall: I. Fireball energy, meteorite recovery, strewn field and petrography*, *Meteoritics & Planetary Science* 40, 795-804.
- McSween, H. Y. (1999), *Meteorites and Their Parent Planets*, Cambridge University Press, New York.
- Trigo-Rodríguez, J. M., J. Llorca, J. Borovička y J. Fabregat (2003), *Chemical abundances determined from meteor spectra: I. Ratios of the main chemical elements*, *Meteoritics & Planetary Science* 38, n. 8, 1283-1294.
- Trigo-Rodríguez, J. M., A. Castro-Tirado, J. Llorca, J. Fabregat, V. J. Martínez, V. Reglero, M. Jelínek, P. Kubánek, T. Mateo y A. de Ugarte Postigo (2004d), *The development of the Spanish Fireball Network using a new all-sky CCD system*, *Earth, Moon and Planets* 95, 553-567.
- Trigo-Rodríguez, J. M., J. Borovička, P. Spurný, J. L. Ortiz, J. Á. Docobo, A. J. Castro-Tirado, y J. Llorca (2006), *The Villabeto de la Peña meteorite fall: II. Determination of the atmospheric trajectory and orbit*, *Meteoritics & Planetary Science* 41, 505-517.
- Trigo-Rodríguez, J. M. y J. Llorca (2006), *Cometary meteoroids strength: clues to the structure and evolution of comets*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 372, 655-660.
- Trigo-Rodríguez, J. M., J. M. Madiedo, J. Llorca, P. S. Gural, P. Pujols, y T. Tezel (2007), *The 2006 Orionid outburst imaged by all-sky CCD cameras from Spain: meteoroid spatial fluxes and orbital elements*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 380, 126-132.