



Boletín

Sociedad
Española de
Astronomía

ISSN: en trámite
Volumen 1, Número 1, noviembre 1998

Contenidos

Editorial

Nuevo formato, nuevo contenido i

Novedades de la comisión de información..... i

III Reunión Científica de la SEA, algunos apuntes ii

Benjamín Montesinos

Censo de astrónomos españoles (1998) iii

Eduard Salvador Solé

José María Torrelles Arnedo

Benjamín Montesinos

La misión *Hipparcos*: primeros resultados científicos 1

Carme Jordi

Francesca Figueras

Explosiones cósmicas de rayos gamma: los fenómenos más energéticos del Universo 14

Alberto J. Castro-Tirado

Tesis doctorales iv

Parámetros físicos de manchas estelares iv

Pedro Amado González

Galaxias con formación estelar intensa: sistemas binarios y emisión X..... iv

Miguel Cerviño Saavedra

Astrometría y fotometría de cúmulos abiertos: NGC 1750 y NGC 1758..... v

David Galadí-Enríquez

Galaxias Seyfert: Una perspectiva con el Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO) vi

Ana María Pérez García

Reseñas de libros..... vii

Manual práctico de astronomía con CCD vii

Jordi Torra Roca

Astronomía X..... vii

Francisco J. Carrera Troyano

Comité Editorial

Agustín Sánchez-Lavega (Coordinador)

wupsalaa@bicc00.bi.ehu.es

Antxon Alberdi Odriozola

antxon@iaa.es

Fernando Moreno Insertis

fmi@ll.iac.es

Rafael Rebolo López

rrl@ll.iac.es

Jordi Torra Roca

jordi@am.ub.es

Jaime Zamorano Calvo

jaz@astrax.fis.ucm.es

Editores

Benjamín Montesinos,

bmm@laeff.esa.es

Xavier Barcons,

barcons@ifca.unican.es

Xavier Luri,

xluri@am.ub.es

Ignasi Ribas,

iribas@am.ub.es

Sociedad Española de Astronomía

<http://sea.am.ub.es>

Comisión de Información

cinfo@sea.am.ub.es

Editorial

Nuevo formato, nuevo contenido

Este número inaugura una nueva época del boletín, que pasa a llamarse simplemente *Boletín de la Sociedad Española de Astronomía*. El nuevo formato, una edición e impresión más profesionales, no son más que los aspectos externos del cambio que experimenta esta publicación, en paralelo a la consolidación y madurez de la propia Sociedad Española de Astronomía.

Se siguen manteniendo los resúmenes de Tesis Doctorales y las informaciones más relevantes (informes de Comisiones, o de la Junta Directiva) así como algunos anuncios importantes. Este flujo de información, sin embargo, cada día se realiza de forma más eficaz a través de los medios electrónicos y en particular de la página Web.

Pero lo realmente novedoso es la aparición de artículos de revisión de temas científicos de amplio interés y actualidad. Seleccionados por un Comité Editorial (cuya composición aparece en la parte interior de la cubierta del Boletín, y que intenta reflejar un muy amplio abanico de intereses científicos dentro de la astronomía) los dos artículos de revisión que aparecen en este número son los primeros de un primer volumen que se recopilará con todos los artículos que publique el Boletín en los próximos números (posiblemente dos o tres años). Esperamos que el esfuerzo invertido por los autores en presentar los distintos temas que elija el Comité Editorial se refleje en una colección de artículos de revisión interesantes para todos nosotros, lectores del Boletín.

Los editores

Novedades de la comisión de información

El nuevo formato del boletín de la SEA, que tenéis entre manos, es la principal novedad de la comisión de información, pero no la única. Se ha estado trabajando en diversos frentes para mejorar la comunicación con la comunidad astronómica.

En primer lugar, se ha mejorado el servidor de la SEA. Se ha instalado una nueva versión del sistema operativo y más memoria para agilizar su funcionamiento. Estos cambios se han hecho necesarios por la ralentización que empezaba a notarse debido a su uso cada vez más intensivo por las listas de correo, el servidor Web y las tareas administrativas.

Por otra parte, en breve se procederá también a cambiar el sistema de gestión de las listas de correo electrónico. Esto permitirá un mejor funcionamiento de la actual lista de noticias y la implementación de una nueva lista de discusión abierta. También se llevará a cabo en los próximos meses una reestructuración y actualización de las páginas Web de la Sociedad.

Finalmente, y tal como se acordó en la asamblea de Canarias, la comisión se ha puesto en contacto con el personal de RedIris para interesarse sobre una posible participación en el proyecto de Comunidades Virtuales de Usuarios de esta institución. La primera reunión puso de manifiesto el interés de ambas partes por esta participación y se continuarán en el futuro estos contactos, de los que os tendremos puntualmente informados.

La comisión seguirá trabajando en estos y otros aspectos y cualquier sugerencia o colaboración será siempre bienvenida.

La comisión

III Reunión Científica de la SEA, algunos apuntes

Entre los días 21 y 24 de septiembre celebramos en el Museo de la Ciencia y el Cosmos de La Laguna (Tenerife) la III Reunión Científica de la Sociedad. Según se decidió en una de las primeras asambleas ordinarias, la SEA organiza cada dos años, en concreto, los años pares, una reunión científica que coincide con la celebración de la asamblea ordinaria. Como recordaréis, la primera reunión científica tuvo lugar en Alicante, y contó con el patrocinio y apoyo del Círculo Astronómico del Mediterráneo, y la segunda se celebró en San Sebastián en colaboración con la Sociedad de Ciencias Aranzadi y coincidiendo con sus jornadas astronómicas anuales.

Este año ha sido el Instituto de Astrofísica de Canarias quien ha desempeñado el papel de anfitrión, en colaboración con otras entidades, y ya desde la asamblea ordinaria de Sevilla en noviembre de 1997, el Comité Científico Organizador, coordinado por Rosa Domínguez Tenreiro (UAM) comenzó a poner en marcha los engranajes, cada vez más complejos, que dieron como fruto la reunión de Tenerife.

Si organizar un congreso sobre un tema monográfico es complicado, no lo es menos montar una reunión científica, de interés para todos los miembros de la SEA, que acoja casi sin excepción todas las áreas de la astrofísica. El comité científico logró componer un programa, dividido en 14 sesiones, donde tuvieron cabida todas aquellas personas que habían solicitado exponer sus resultados en forma de charla. Hubo también una amplia exposición de posters.

Creo que expreso el sentir general diciendo que el nivel científico de las presentaciones fue alto, que pudimos comprobar una vez más el crecimiento de la astronomía en España, y que sin duda la calidad de los trabajos de los investigadores más jóvenes es competitiva con la de investigadores del mismo nivel de otros países. Es por tanto, difícil de destacar una u otra contribución y sería injusto mencionar algunas dejando otras en el tintero. Sin embargo quizás sí sea bueno citar la tarea de los seis investigadores invitados que hicieron un gran esfuerzo por resumir los avances más recientes en sus respectivos campos: Michel Mayor, sobre las búsquedas de planetas mediante medidas de velocidades radiales; Alberto Castro-Tirado, sobre las explosiones cósmicas de rayos gamma; Micheal Feast, sobre las escalas de distancia después de la misión *Hipparcos*; José Cernicharo, sobre la astrofísica en el infrarrojo después de ISO; Jesús Gallego, sobre la evolución de galaxias con formación estelar y la tasa de formación estelar del Universo y David Koo, sobre el papel de los telescopios Keck en la exploración de galaxias lejanas.

Como he mencionado en el primer párrafo, celebramos también, concretamente la tarde del miércoles día 23, la asamblea anual ordinaria de la SEA. En ella se trataron temas obligados por los estatutos de la Sociedad, como son el estado de cuentas, y el presupuesto para el año 1999, así como la admisión de nuevos socios,

pagos de cuotas etc., puntos todos que teneis detallados en el orden del día que recibisteis del Secretario hace unos meses. En este momento la SEA cuenta con 332 miembros, repartidos en 227 numerarios, 101 junior y 4 asociados. Es también de destacar que el nivel de morosidad de la Sociedad ha descendido gracias a la colaboración de muchos de vosotros, y que en la actualidad está por debajo del 20% para socios numerarios y alrededor del 30% para socios junior, lo que deja la morosidad global en algo menos del 25%. Si continuamos mejorando, la Sociedad será capaz de afrontar nuevas tareas y ayudar a los más jóvenes para asistir a las reuniones. Os animamos una vez más a los que no lo hayáis hecho, a que domiciliéis el pago de vuestras cuotas para mayor comodidad de todos.

Como también está estipulado en los estatutos, se procedió a la renovación de la mitad de la Junta Directiva de la Sociedad. Dado que no hubo ninguna candidatura alternativa, quedó automáticamente aprobada la que presentó la Junta Directiva, por la que Carlos Eiroa, José Luis Ballester y quien firma este artículo dejan sus puestos en la Junta, siendo reemplazados por Jordi Torra (Universidad de Barcelona), que será el Secretario, Fernando Moreno Insertis (Instituto de Astrofísica de Canarias y Universidad de la Laguna) y Eduardo Battaner (Universidad de Granada), los dos nuevos vocales. La renovación es efectiva con fecha 1 de enero de 1999.

Tanteando un poco el ambiente durante los cuatro días que duró nuestro encuentro en Canarias, me quedó patente la desazón de los investigadores jóvenes que han terminado sus Tesis en los últimos años, muchos de ellos en el extranjero, a la hora de plantearse el volver a España, dada la carencia de contratos y plazas y el desequilibrio entre la oferta y la demanda. En este Boletín publicamos una nota escrita por Eduard Salvador y José María Torrelles, donde se muestran unas cifras y porcentajes significativos acerca de la situación laboral de los astrónomos españoles.

Me gustaría acabar esta reseña agradeciendo, en nombre de todos los miembros de la SEA, tanto al comité científico organizador, como al comité local, coordinado por José Miguel Rodríguez Espinosa, sus esfuerzos, recompensados por el éxito de la reunión. Convocatorias tan excelentes como la de Canarias afianzan aun más a la SEA como la sociedad que puede aglutinar a la mayoría de los astrónomos españoles y defender, en la medida de lo posible, sus intereses.

Benjamín Montesinos

bmm@laeff.esa.es

Censo de astrónomos españoles (1998)

La comisión de personal de la SEA ha realizado un censo de los astrónomos españoles. Un listado del mismo, con los nombres de los astrónomos por centros de investigación, grado profesional (doctor, licenciado, otros...) y situación laboral en el centro de trabajo (plantilla, contratado, becario, otros...) será distribuido en breve por la SEA entre todos los centros de astronomía en España. Para realizar este trabajo se ha contado con la colaboración de los diferentes institutos y departamentos universitarios de astronomía de nuestro país, así como de numerosos investigadores españoles que se encuentran actualmente trabajando en centros extranjeros. Sin su ayuda, este censo no hubiera sido posible. A todos ellos nuestro agradecimiento. Quisieramos también agradecer muy profundamente a Georgina Mateu, Secretaria de la SEA, su excelente trabajo y dedicación en la confección de este censo. Los resultados del mismo se resumen en los siguientes párrafos.

El número total de astrónomos españoles es de 449, de los cuáles 301 tienen el grado de doctor (Tabla 1). Un dato muy preocupante es el hecho de que el 42% de los astrónomos españoles con el grado de doctor se encuentra en estos momentos en una situación de precariedad laboral, con contratos no estables (de uno a tres años). Esta situación puede empeorar todavía más en el futuro dado que el incremento de astrónomos con grado de doctor al año en España (alrededor de 20) no está suficientemente bien compensado con nuevas plazas estables que se abren en nuestro país es este campo (alrededor de cinco por año).

La investigación en astronomía se encuentra en estos momentos a la cabeza de la producción científica en España. También, en la mente de todos están los grandes retos científico-técnicos con gran repercusión internacional que la comunidad astronómica española tiene por delante (p.ej., Darwin, First, GTC, Integral, LSA/MMA, Planck, Sixe, XMM...), como ha quedado de manifiesto en la III Reunión Científica de la SEA (Tenerife, 21-24 Septiembre, 1998). Sin embargo, sólo dando una estabilidad profesional a nuestros investigadores, bien con puestos en plantilla, bien con contratos de más larga duración, se podrá garantizar el éxito de esos importantísimos retos, contando en todo momento con suficientes astrónomos para explotar al máximo los beneficios científico-técnicos que esos retos traerán consigo. Hay que tener también muy presente que la escasa oferta de estabilidad profesional no ya sólo puede obligar a abandonar su profesión a los astrónomos actuales, sino que puede llegar a desalentar a jóvenes estudiantes a iniciarse en la investigación en astronomía.

Creemos que debe ser una labor de todos el lograr sensibilizar a la administración española sobre esta grave situación profesional, invirtiendo la tendencia a la baja de falta de estabilidad profesional. La SEA, a la que pertenecen alrededor del 75% de los astrónomos españoles (Tabla 2), tomará cuantas iniciativas sean necesarias y estén en su mano para lograr dicha sensibilización (Asamblea ordinaria de la SEA del 23 de Septiembre de 1998 celebrada en Tenerife).

Eduard Salvador Solé eduard@faess0.am.ub.es
 José María Torrelles Arnedo torrelles@iaa.es
 Benjamín Montesinos bmm@laeff.esa.es

CENSO DE ASTRÓNOMOS EN ESPAÑA (1998)	
Número total Astrónomos	449 (35 en el extranjero)
Número total Astrónomos con Doctorado	301 (27 en el extranjero)
Porcentaje Dres. en Plantilla	58%
Porcentaje Dres. no en Plantilla	42%

CENSO RELACIONADO CON LA SEA (1998)	
Número total miembros (excl. Asociados)	328 (9 Honorarios)
Porcentaje sobre total Astrónomos	73%
Porcentaje no miembros	27%
Número total de miembros Numerarios	227
Porcentaje sobre Astrónomos con doctorado	75%
Número total de miembros Junior	101
Porcentaje sobre Astrónomos no doctores	68%

La misión *Hipparcos*: primeros resultados científicos

Carme Jordi carme@am.ub.es

Francesca Figueras cesca@am.ub.es

*Departament d'Astronomia i Meteorologia,
Universitat de Barcelona,
Diagonal 647, E-08028 Barcelona*

Abstract

The ESA Hipparcos space astrometry mission (1989 – 1993) was dedicated to the precise measurement of positions, parallaxes, proper motions and photometry of a large number of stars in the solar neighbourhood. The Hipparcos (118218 stars) and Tycho (1058332 stars) catalogues, published in June 1997, constitute the basic stellar reference system for the next years. The obtained high accuracy parallaxes offer, for the first time, the opportunity to establish consistent fundamental calibrations.

We present a brief description of the observational principles and the contents of the catalogues, making special emphasis on the proper use of the astrometric data and on the first derived scientific results. The large amount of published papers in this last year clearly reflects the great impact of Hipparcos on stellar and galactic astronomy, and also on other crucial subjects such as the cosmic distance scale or the age of the Universe.

Resumen

La misión astrométrica *Hipparcos* de ESA ha estado dedicada a la obtención de posiciones baricéntricas, movimientos propios, paralajes y fotometría de un gran número de estrellas del entorno solar. Los resultados de las observaciones que se realizaron entre 1989 y 1993, han dado lugar a los catálogos *Hipparcos* (118218 estrellas) y *Tycho* (1058332 estrellas), publicados en junio de 1997, que constituyen, por su homogeneidad y precisión, el sistema de referencia estelar básico para todos los trabajos astrométricos y fotométricos a realizar en la próxima década. La obtención de paralajes absolutas precisas abre la posibilidad de establecer sobre una base sólida parámetros y calibraciones fundamentales.

Presentamos una breve descripción de los principios observacionales, el contenido de los catálogos resultantes, algunas consideraciones sobre la correcta utilización de los datos y una descripción de las primeras aportaciones científicas de la misión. Estas aportaciones muestran claramente como *Hipparcos* ha sido mucho más que una misión astrométrica, por su impacto en la astronomía estelar y galáctica, y por su incidencia en áreas que abarcan desde el sistema solar a la determinación de la escala cósmica de distancias o la edad del Universo.

Introducción

La misión *Hipparcos* (High Precision Parallax Collecting Satellite) de la Agencia Europea del Espacio (ESA) constituyó la primera misión espacial dedicada a la astrometría global. El objetivo científico fue determinar posiciones, movimientos propios anuales y paralajes trigonométricos con precisiones del orden del mas (milisegundos de arco) para unas 120000 estrellas en el entorno solar, con el fin de sentar los fundamentos observacionales para el desarrollo de los estudios de física y evolución estelar, y estructura, cinemática y dinámica galácticas. El principio observacional básico es el barrido continuo y sistemático del cielo mediante un telescopio capaz de medir la distancia angular entre estrellas separadas un gran ángulo.

La precisión alcanzable en las observaciones astrométricas desde tierra está limitada principalmente por los efectos de una atmósfera inhomogénea y cambiante, la flexión instrumental, los cambios térmicos y la imposibilidad de observar la esfera celeste completa desde una única posición. Ya en los años 60, se evidenció la necesidad de ir al espacio para obtener un progreso significativo en el campo. En 1966, el Profesor P. Lacroute presentó al CNRS una propuesta preliminar para una misión astrométrica espacial: construir un sistema de referencia mediante las posiciones precisas (0.01") de unas 700 estrellas más brillantes que magnitud 7.

El apoyo por parte de grupos de astrónomos y el interés de ESA fueron definiendo poco a poco la misión desde el punto de vista tanto técnico como científico, alcanzando la configuración final, aprobada en marzo de 1980, con objetivos mucho más ambiciosos: posiciones, movimientos propios anuales y paralajes con precisiones del orden de 2 mas para unas 120000 estrellas con magnitud límite 12 en un sistema de referencia inercial. A estos objetivos se añadió la obtención de información fotométrica a partir de las señales en el instrumento principal y en los dos *star mappers*. Éstos, diseñados para el control de orientación del satélite, no sólo podían proporcionar un índice de color para las estrellas de la misión principal, sino que permitían obtener datos astrométricos y fotométricos para todas las estrellas detectadas y así construir un catálogo más completo, aunque con menor precisión (un *survey* hasta magnitud ~ 11). Esta idea dió origen al experimento *Tycho*.

El lanzamiento del satélite se realizó en agosto de 1989. Una vez situado en órbita de transferencia geostacionaria, el motor de apogeo no entró en funcionamiento. Los ingenieros de ESOC (*European Space Operation Centre*) fueron capaces de redefinir las operaciones del satélite y éste trabajó durante cuatro años (3.5 años útiles debido a los eclipses) en una órbita altamente excéntrica, cruzando los cinturones de van Allen, que deterioraron definitivamente los paneles solares y la electrónica en agosto de 1993. Aún en esa órbita, la misión fue todo un éxito y la precisión alcanzada en las medidas es superior a la nominal.

El satélite observó una lista cerrada de objetos (el *Hipparcos Input Catalogue*, HIC) elaborada a partir de las estrellas contenidas en más de 200 propuestas de la comunidad astronómica y un *survey* estelar completo (unas 52000 estrellas) hasta una magnitud límite bien definida y función de la latitud galáctica.

Paralelamente a la misión, se desarrollaron programas observacionales complementarios desde tierra. Además de los destinados a facilitar los datos necesarios para la construcción del HIC y el enlace con el sistema de referencia extragaláctico, se iniciaron programas en los dos hemisferios para la obtención de las velocidades radiales indispensables para el cálculo de las velocidades espaciales.

Los catálogos *Hipparcos* y *Tycho*, resultado de la misión, fueron completados en agosto de 1996 y publicados por ESA en junio de 1997 (ESA 1997). Están disponibles en la forma de 17 volúmenes, que incluyen: el catálogo *Hipparcos* principal, un anexo dedicado a sistemas dobles y múltiples, un anexo que incluye variabilidad fotométrica, cartas de identificación para objetos débiles u objetos en regiones pobladas, curvas de luz para variables periódicas o no resueltas y un atlas estelar, el *Millenium Star Atlas*, donde se indican todas las estrellas *Tycho* y más de 10000 objetos extragalácticos mostrando específicamente las estrellas cercanas, variables, con movimiento propio elevado o pertenecientes a sistemas múltiples. Todos los productos de la misión, incluyendo los datos astrométricos intermedios, la fotometría de cada observación y el catálogo *Tycho*, están disponibles en 6 CD-ROMs ASCII. Los catálogos son también accesibles via el CDS (*Centre des Données astronomiques de Strasbourg*). En enero de este año se ha publicado el CD-ROM *Celestia 2000* que incluye los catálogos *Hipparcos* y *Tycho*, e información astrofísica a partir de SIMBAD y de una versión mejorada del HIC. Toda esta información se maneja con un *software* específico de interrogación que incluye, entre otros, programas de transformación de coordenadas, de selección de muestras y posibilidad de visualización de mapas estelares.

En los siguientes apartados describimos los principios observacionales, los catálogos resultantes, algunas consideraciones sobre la correcta utilización de los datos y comentamos algunas de las primeras aportaciones científicas de la misión. Al haber transcurrido sólo un año de la publicación de los datos definitivos, son muchos los temas que están aún siendo tratados, pero a la vista de la gran calidad de los datos y de los primeros resultados obtenidos, es obvio pronosticar que la misión aportará un avance sustancial a nuestro conocimiento actual de la astronomía estelar y galáctica. Se puede obtener una visión general de las primeras contribuciones en la publicación *Hipparcos Venice'97* (ESA-SP 402), especialmente dedicada a la explotación científica por parte de los equipos participantes en el proyecto, que dispusieron de los datos definitivos con un año de antelación a su publicación. Para finalizar, exponemos las perspectivas de futuras misiones espaciales astrométricas.

Principios observacionales y reducción

Las características principales del diseño del satélite han sido la ley de barrido (movimiento del satélite) y la estrategia de observación (cómo los pares de estrellas se combinan en un plano focal común a dos campos de visión). Estas dos piezas han sido la clave para la cobertura homogénea de la bóveda celeste y la obtención de una elevada precisión astrométrica uniforme (Perryman y Vaghi, 1989).

1. Modo de operación y catálogo de entrada

El satélite superpone en el espejo principal de un telescopio Schmidt mediante un *beam combiner* (combinador de haces), dos campos de visión, cada uno de $0.9^\circ \times 0.9^\circ$ y separados 58° (ángulo básico). Fue diseñado para rotar lentamente barriendo el cielo mediante combinación de dos movimientos: rotación alrededor del eje normal a las dos líneas de visión (11.25 revoluciones por día) y precesión de este eje (47°) alrededor de la línea Sol-satélite (6.4 revoluciones por año).

A medida que el satélite va barriendo el cielo, la luz de la estrella es modulada, en el plano focal, por una red de aproximadamente 3000 rendijas perpendiculares a la dirección de barrido y la señal es registrada por un *image dissector tube* (IDT). La diferencia de fase entre las señales moduladas de dos estrellas, una en cada campo de visión, y el valor del ángulo básico permiten determinar de forma muy precisa la distancia angular entre ambas. Por el diseño de la ley de barrido, cuando el satélite reobserve una de estas estrellas lo hará en relación a una tercera, es decir medirá un ángulo en una dirección distinta. Así sucesivamente, al cabo de la vida del satélite, se dispone de un denso conjunto de distancias angulares entre estrellas que, tras un proceso complejo de reducción, permite obtener posiciones, movimientos propios y paralajes absolutas.

La orientación del satélite se determinó mediante dos *star mappers* redundantes compuestos por un pequeño número de rendijas desigualmente espaciadas, algunas paralelas a la red principal y otras orientadas oblicuamente. Cada uno de los *star mappers* tenía asociado un filtro (B_T y V_T) que proporcionaba información fotométrica a la misión principal.

Aunque en el campo de visión puedan existir varias estrellas, sólo una se observa cada vez en el campo de visión del IDT, cuyo diámetro es de $38''$. El tiempo total de cruce por el campo de visión principal (19.2 s) debe repartirse entre las estrellas de acuerdo con la estrategia de observación (prioridades científicas y magnitud). Eso significa que debe seleccionarse *a priori* que estrellas presentes van a ser medidas y durante cuánto tiempo en cada paso por la zona para direccionar el IDT. De estas consideraciones, se deduce fácilmente que las estrellas de programa deben estar distribuidas uniformemente en el cielo y que la distribución de magnitudes debe ser compatible con las posibilidades observacionales del satélite. El *Hipparcos Input Catalogue* (HIC, Turon et al. 1992) contiene la lista de estrellas de pro-

grama y todos los datos necesarios para las operaciones. Fue elaborado por el consorcio INCA (Perryman y Turon, 1989) constituido por 26 institutos europeos (entre los que se cuentan la Universidad de Barcelona y el Real Observatorio de la Armada por parte española) a partir de las propuestas de la comunidad astronómica. El HIC constituye el mejor compromiso entre las operaciones del satélite, los requerimientos del proceso de reducción y los objetivos científicos. No es tan sólo una recolección de datos de la literatura. El posicionamiento del IDT requería conocer las posiciones de los objetos con precisiones del orden del $1.5''$ y la distribución del tiempo total de observación requería conocer las magnitudes de esos objetos con una precisión de 0.5 mag. Así pues, la elaboración del HIC necesitó de observaciones complementarias desde tierra previas al lanzamiento del satélite.

2. Reducción

Los datos proporcionados por el satélite (datos científicos, parámetros orbitales del satélite y datos de *'housekeeping'*) fueron tratados y reducidos en paralelo por dos consorcios europeos independientes FAST y NDAC (Perryman et al. 1989) en lo que se refiere a la misión principal *Hipparcos*, y por el consorcio TDAC, en lo que se refiere al experimento *Tycho*. Los resultados aportados por los consorcios FAST y NDAC fueron comparados a lo largo de la misión para mejorar las calibraciones y los modelos instrumentales, combinándolos adecuadamente para producir el catálogo final.

Partiendo del intrincado conjunto de distancias angulares entre estrellas, y asumiendo su movimiento uniforme respecto del baricentro del sistema solar, pueden deducirse la posición baricéntrica (α , δ), la paralaje (π) y los movimientos propios (μ_α , μ_δ) mediante una reducción por mínimos cuadrados, obteniéndose los errores estándar en cada parámetro así como los respectivos coeficientes de correlación. Las transformaciones tuvieron en cuenta una métrica heliocéntrica con simetría esférica, donde se consideró la deflexión de la luz por el Sol (y en el caso de NDAC, también por la Tierra). Se parametrizó la desviación de esta métrica mediante un formalismo de tipo PPN obteniendo $\gamma = 0.997 \pm 0.003$, lo cuál da confianza en el formalismo de la métrica asumida y las reducciones globales (Perryman et al. 1997a).

El número de observaciones geométricas independientes por estrella (típicamente de 30) frente al número de incógnitas a determinar (5), permite estudiar modelos más complejos (duplicidad o multiplicidad) en aquellos casos en que las observaciones presentan residuos elevados. Igualmente, para algunas estrellas cercanas de elevado movimiento propio hubo que considerar la aceleración debido a la perspectiva asumiendo una velocidad radial no nula en el modelo.

Por otra parte, el recuento de fotones en el IDT y en los dos *star mappers* permitieron la obtención de fotometría *Hipparcos* (H_p , de banda ancha) y *Tycho* (B_T , V_T , cercanos a B y V de Johnson). El proceso de

calibración a lo largo de la misión para valorar el envejecimiento del instrumento, permitió la transformación de las medidas a un sistema único y constante cercano a la respuesta del instrumento en la época media de las observaciones. Esta transformación utilizó un elevado conjunto de estrellas estándares cuidadosamente seleccionadas. Las medidas individuales de cada estrella permitieron la detección de posibles variabilidades y mediante análisis discreto de Fourier (Scargle, 1982, 1989) y análisis de la varianza (Schwarzenberg-Czerny 1989) se clasificaron las diferentes curvas de luz.

3. Conexión con el sistema de referencia extragaláctico

Las distancias angulares medidas son invariantes respecto de rotaciones rígidas de los ejes de coordenadas y la orientación de los ejes instantáneos queda indeterminada. Ya en las fases previas a la misión, y siguiendo las recomendaciones de la Unión Astronómica Internacional (UAI), se consideró de suma importancia que el sistema de referencia no rotara respecto de objetos lejanos y que las direcciones de los ejes estuvieran marcadas por objetos extragalácticos. Se decidió, pues, que el sistema de referencia final de *Hipparcos* fuera el *International Celestial Reference System* (ICRS, Arias et al. 1995), construido a partir de observaciones VLBI de fuentes extragalácticas.

Puesto que las fuentes extragalácticas no eran observables directamente por *Hipparcos* (excepto 3C273), fue necesario plantear un conjunto de misiones complementarias (desde tierra y con el Hubble Space Telescope) para resolver la indeterminación intrínseca, que según demostraron Betti y Sansò (1983) tiene seis grados de libertad (3 correspondientes a la orientación y tres correspondientes a la rotación inercial, en una época dada). Los detalles de estos programas, sus resultados y la combinación de los mismos para el enlace de los sistemas de referencia están discutidos en Kovalevsky et al. (1997) y en ESA (1997). Sólo mencionar aquí que los errores estándar para cada uno de los tres parámetros de orientación se estiman en tan sólo 0.6 mas, y en $0.25 \text{ mas}\cdot\text{año}^{-1}$ para los parámetros de la rotación inercial, es decir, el sistema de referencia de los catálogos *Hipparcos* y *Tycho* es inercial dentro de estas pocas décimas de mas por año.

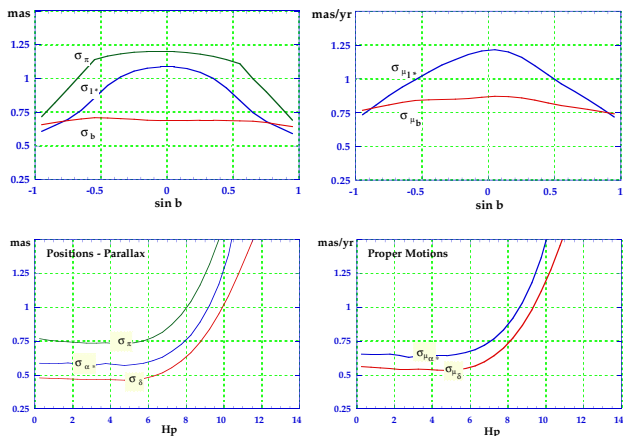
El catálogo *Hipparcos*

El catálogo contiene 118218 objetos, 117955 con información astrométrica y 118204 con información fotométrica. Es completo hasta una magnitud dependiente de la latitud galáctica que oscila entre $V=7.3$ y $V=9.0$ ($V_{\text{lim}} = 7.9 + 1.1\text{sen}|b|$) para estrellas más tempranas que G5 y $V_{\text{lim}} = 7.3 + 1.1\text{sen}|b|$ para estrellas más tardías). Contiene gran número de estrellas en cúmulos y asociaciones así como 45 estrellas en las nubes de Magallanes y un quásar (3C273). La distribución por tipos espectrales y clases de luminosidad puede encontrarse en Gómez et al. (1989). La tabla 1 resume las principales características del catálogo.

Tabla 1. Principales características del catálogo *Hipparcos*

Periodo observacional	1989.85-1993.21
Época del catálogo	J1991.25
Sistema de referencia	ICRS
Número de objetos	118218
Densidad estelar media	~ 3 estrellas grado $^{-2}$
Magnitud límite	$V \sim 12.4$
Magnitud de completitud	$V = 7.3-9.0$
$\langle \sigma_\alpha \rangle (J1991.25)^1$	0.77 mas
$\langle \sigma_\delta \rangle (J1991.25)^1$	0.64 mas
$\langle \sigma_{\mu_{\alpha \cos \delta}} \rangle^1$	0.88 mas año $^{-1}$
$\langle \sigma_{\mu_\delta} \rangle^1$	0.74 mas año $^{-1}$
$\langle \sigma_\pi \rangle^1$	0.97 mas
$\sigma_\pi / \pi < 0.1$	20853 estrellas
$\sigma_\pi / \pi < 0.2$	49399 estrellas
Errores sistemáticos	< 0.1 mas
$\langle \sigma_{H_p} \rangle^1$	1.5 mmag
Número medio observaciones	110 (por estrella)
Variables o posibles variables periódicas	11597 (8237 nuevas) 2712 (970 nuevas)
no periódicas o no resueltas	5542 (4145 nuevas)
no investigadas	3343 (3132 nuevas)
Sistemas dobles o múltiples	23882

¹ para $H_p \leq 9$ mag

**Fig. 1.** Precisiones astrométricas en función de la latitud eclíptica y de la magnitud H_p

1. Astrometría

El sistema de referencia *Hipparcos* resultante es una materialización del ICRS y reemplaza al sistema FK5 como definición de coordenadas celestes en el óptico. Puesto que el ICRS es continuo con el FK5 (Folkner et al. 1994; Arias et al. 1995), desde el punto de vista de la astrometría óptica, el catálogo *Hipparcos* puede verse como una extensión y mejora del sistema FK5, manteniendo la orientación global pero sin los errores zonales (Resolución B2, XXIII Asamblea General de la UAI, Kyoto 1997).

La astrometría absoluta obtenida presenta una mejora de casi dos órdenes de magnitud con respecto a los

catálogos fundamentales disponibles antes de *Hipparcos* y de más de dos órdenes de magnitud con respecto a catálogos de compilación de tamaño similar (SAO o PPM). En cuanto a las paralajes, se estima que los posibles errores sistemáticos están por debajo de 0.1 mas y son de tipo estadístico, incluso para estrellas más allá de 1 kpc. El universo accesible es ocho veces mayor al previsto inicialmente al ser las precisiones alcanzadas dos veces mejores que las nominales.

La precisión en los parámetros astrométricos depende de la magnitud aparente de la estrella y de su latitud eclíptica (fig. 1), esta última como consecuencia directa de la ley de barrido. Las estrellas a altas latitudes eclípticas fueron observadas con más frecuencia, mientras que las estrellas cerca de la eclíptica, fueron barridas en direcciones perpendiculares a ésta por lo que poseen mejor precisión en las componentes de latitud.

2. Fotometría

El catálogo *Hipparcos* incluye una gran cantidad de información fotométrica precisa y homogénea, en particular: la magnitud H_p en la banda ancha instrumental que proporciona la fotometría multiépoca más precisa, la magnitud V Johnson (con precisión típica de 0.01 mag) derivada de una combinación de medidas del satélite y desde tierra, dos colores B_T y V_T derivados de las observaciones de *Tycho*, y los índices de color $B - V$ y $V - I_c$ derivados también de una combinación de medidas del satélite y desde tierra. Las transformaciones entre los sistemas fotométricos *Hipparcos* y *Tycho* y el sistema Johnson-Cousins, pueden encontrarse en ESA (1997, Vol 1).

Los detalles de las características fotométricas y estadística de variabilidad pueden encontrarse en van Leeuwen et al. (1997a) y se resumen en la tabla 1. La precisión final de la fotometría es función de la magnitud de la estrella y del número de observaciones determinado por la ley de barrido, variando de 0.6 a 7.9 mmag entre $H_p = 3$ y $H_p = 11$ y con una media de aproximadamente 110 medidas por estrella. A partir del análisis χ^2 se aislaron unas 12000 estrellas para un estudio detallado de variabilidad, de las cuales unas 8200 son nuevos descubrimientos. De entre ellas, dos nuevas cefeidas, nueve nuevas RR Lyrae, 35 nuevas δ Scu y SX Phe y 343 nuevas binarias eclipsantes. Cerca de 7000 estrellas variables no pudieron ser resueltas, bien por microvariabilidad, bien por variaciones irregulares, bien porque el periodo no pudo determinarse sólo a partir de la misión.

3. Sistemas dobles y múltiples

Muchos de los objetos observados son en realidad estrellas dobles o múltiples. Sus observaciones no pueden ser tratadas con un modelo estándar de cinco parámetros como en el caso de las estrellas simples (un 85%). Las mayores dificultades son que no existe un modelo único

Productos de la misión *Hipparcos*

Hipparcos Input Catalogue (HIC) (ESA SP-1136, 1992):

Recopilación, homogeneización y obtención de datos astrométricos, fotométricos, tipos espectrales y velocidades radiales:

Vol. 1 a 5: Catálogo principal (introducido en SIMBAD–CDS)

Identificaciones cruzadas

Vol. 6 : Sistemas dobles y múltiples

Vol. 7 : Cartas de identificación

Catálogos *Hipparcos* y *Tycho* (ESA SP-1200, 1997):

Versión impresa, 16 volúmenes:

Vol. 1: Introducción y guía de utilización de datos

Vol. 2: Operaciones del satélite

Vol. 3: Construcción del catálogo *Hipparcos*

Vol. 4: Construcción del catálogo *Tycho*

Vol. 5-9: El catálogo *Hipparcos*

Vol. 10: Anexo: sistemas dobles y múltiples

Objetos del sistema solar

Vol. 11: Anexo: variabilidad *Hipparcos*

Vol. 12: Curvas de luz *Hipparcos*

Vol. 13: Cartas de identificación *Hipparcos*

Vol. 14-16: Millenium Star Atlas

Versión en 6 CD-ROMs (ASCII), Vol. 17:

Disco 1: Vol. 1-12 versión impresa + catálogo *Tycho*

Disco 2: Anexo: fotometría individual *Hipparcos*

Cartas de identificación

Disco 3: Anexo: fotometría individual *Hipparcos*

(extensión)

Disco 4: Anexo A: fotometría individual *Tycho*

Disco 5: Datos intermedios: astrometría *Hipparcos*

Disco 6: Datos: tránsitos *Hipparcos*

Consulta de catálogos *on-line*:

<http://astro.estec.esa.nl/SA-general/Projects/Hipparcos>

Documentación disponible en el CDS:

Hipparcos y *Tycho* utilizando *Vizier* y *Aladin*

Hipparcos introducido en SIMBAD

Anexo B: fotometría individual *Tycho* (*off-line*)

Celestia 2000 (ESA SP-1220, 1998):

1 CD-ROM (no ASCII) + *Software* de interrogación

Catálogos HIC + *Hipparcos* + *Tycho*:

Cálculos: transformación de coordenadas y determinación de M_v

Selección de muestras y mapas estelares

para describir su movimiento y que la reducción astrométrica y fotométrica no puede desacoplarse.

La posibilidad de resolver estrellas múltiples (12195 sistemas) es función de la separación entre las componentes y su diferencia de magnitud. *Hipparcos* fue capaz de resolver aquellos sistemas con $\Delta H_p < 3.5$ mag y separaciones mayores de, en función de H_p , entre $0.12''$ y $0.3''$. La mayoría de los sistemas múltiples descubiertos (2996) tiene separaciones angulares inferiores a $1''$.

En caso de sistemas no resueltos, las observaciones corresponden al fotocentro del conjunto y su solución depende del periodo orbital en relación a la duración de la misión. Sólo para aquellos sistemas con periodos del mismo orden o inferiores al intervalo observacional, pudieron determinarse los parámetros orbitales (235 sistemas). Adicionalmente, en otros 288 sistemas se detectó la duplicidad a través de la variación fotométrica más que el movimiento irregular del fotocentro. Además, 6763 estrellas tratadas como simples y 218 sin solución astrométrica han sido clasificadas como supuestas dobles.

El catálogo *Tycho*

El catálogo *Tycho* está basado en la detección, a partir de una cierta relación señal/ruido (1.5 o 1.8), de las estrellas en cada paso por los *star mappers*. El catálogo es completo al 99.9% y 90% a $V_T = 10.0$ y $V_T = 10.5$, respectivamente, aunque el grado de completitud depende también del índice de color y de la posición, debido a la ley de barrido. Las principales características están contenidas en la tabla 2. Incluye notas de calidad astrométrica, indicadores de variabilidad y/o duplicidad. Cerca de 900000 estrellas están clasificadas como estrellas 'recomendadas' de referencia puesto que tienen alta calidad astrométrica y no han sido detectadas como dobles. Puesto que el error en el movimiento propio es para muchas estrellas superior al movimiento propio mismo, no pueden calcularse posiciones en épocas diferentes a la de *Hipparcos* para usarse como estrellas de referencia. El catálogo de referencia ACT (Urban et al. 1998) contiene 990000 estrellas con movimientos propios mejorados utilizando los catálogos Astrográfico y *Tycho*.

Tabla 2. Principales características del catálogo *Tycho*

Número de objetos	1058332
Densidad estelar media	≈ 25 estrellas grado ⁻²
Magnitud límite	$V_T \sim 11.5$
Magnitud de completitud	$V_T \sim 10.5$
$\langle \sigma \rangle$ (todas, J1991.25)	25 mas
$\langle \sigma \rangle$ ($V_T < 9$, J1991.25)	7 mas
Errores sistemáticos	< 1 mas
$\langle \sigma_{B_T} \rangle, \langle \sigma_{V_T} \rangle$ (todas)	0.07, 0.06 mag
$\langle \sigma_{B_T} \rangle, \langle \sigma_{V_T} \rangle$ ($V_T < 9$)	0.014, 0.012 mag
Número medio observaciones	130

El catálogo incluye fotometría precisa y homogénea para cada estrella: B_T y V_T , derivadas del recuento

de fotones en los *star mappers* y V y $B - V$ Johnson, derivados de $B_T - V_T$ mediante transformaciones, así como notas sobre análisis (preliminares) de variabilidad a partir de los 130 tránsitos (en media) de cada estrella. Aunque la fotometría de *Tycho* es de calidad inferior a la de *Hipparcos*, es de suma importancia puesto que proporciona información sobre el color, muy valiosa en los trabajos de explotación científica.

El gran volumen de datos (aproximadamente 100 Gigabytes) no pudieron ser explotados al máximo en la primera reducción. Actualmente, en Copenhage, se está llevando a cabo una segunda reducción (prevista que finalice en 1999), a partir de la superposición de los fotones recibidos de una estrella en dos pasos consecutivos (campos de visión *preceding* y *following* del telescopio *Hipparcos*). Esta segunda reducción utiliza el catálogo actual, la re-reducción del *Guide Star Catalogue* (GSC, cerca de 6 millones de estrellas) y el Catálogo Astrográfico. Esto permitirá mejorar las posiciones y la fotometría de las estrellas débiles del catálogo actual, a la vez que alcanzar una magnitud límite de 12 (completitud hasta 11.5), con un contenido de alrededor de tres millones de estrellas (Høg et al. 1997a).

Errores sistemáticos y tratamiento estadístico de los datos

Para que la calidad intrínseca de los datos se conserve en su aplicación a problemas concretos y, especialmente en aquellos de corte estadístico, deben hacerse una serie de consideraciones previas: el estudio de los posibles errores sistemáticos presentes en los catálogos, la correcta utilización de la matriz de covarianzas en los parámetros astrométricos y el adecuado tratamiento estadístico de las paralajes en términos de distancia y luminosidad. Brown et al. (1997a) y Luri y Arenou (1997) realizaron una primera valoración, no exhaustiva pero fundamental, de estos aspectos, dedicando también especial atención a los posibles sesgos derivados de la selección y completitud de las muestras de trabajo.

Un primer error sistemático en las posiciones y movimientos propios de *Hipparcos* puede provenir del enlace con el sistema de referencia extragaláctico (ICRS), aunque estaría siempre por debajo de los errores estándares ya comentados.

Se han identificado diferencias a escala local (pocos grados) entre las reducciones de FAST y NDAC (~ 0.5 mas·año⁻¹) –en el Observatorio de Meudon se están analizando estas diferencias en la región de las Pleiades– aunque a gran escala se ha comprobado que estas diferencias son inferiores a 0.1 mas·año⁻¹.

También se ha realizado una estimación del error en el punto cero de las paralajes absolutas de *Hipparcos*, siendo éste probablemente inferior a 0.1 mas.

Se ha apuntado la posible existencia de errores sistemáticos en la paralaje por efectos de binariedad. Se está realizando un estudio más detallado aunque, en principio y de acuerdo al proceso de reducción de los

sistemas múltiples, los parámetros astrométricos de posición y movimientos propios son sensibles al proceso de modelización del sistema múltiple pero no las paralajes.

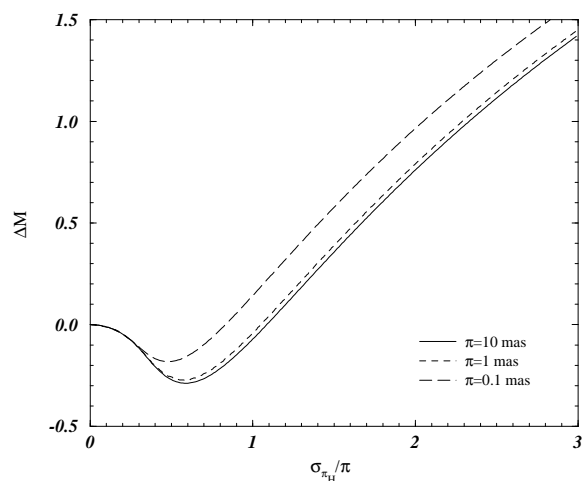


Fig. 2. Sesgo en la determinación de la magnitud absoluta en función del error relativo en la paralaje. ΔM es la diferencia entre el valor esperado $E[m + 5 \log \pi_H + 5]$ y la magnitud absoluta real de la estrella para distintos valores de la paralaje (Brown et al. 1997)

Aunque los errores sistemáticos sean pequeños en comparación con los errores estándar, un tratamiento estadístico incorrecto de los datos puede implicar importantes sesgos. Así, la determinación usual de distancia como $d = 1/\pi$ es, dada la distribución no simétrica del error en d , una estimación sesgada, y su corrección es sólo posible desde un punto de vista estadístico. La determinación de la magnitud absoluta a partir de paralajes observadas puede considerarse no sesgada cuando el error relativo ($\Delta\pi/\pi$) es inferior al 10% pero las estrellas son en media 0.2 mag más brillantes cuando este error relativo es del 50% y 0.8 mag más débiles cuando éste es del 200% (fig. 2).

También aparecen importantes sesgos en la determinación de la magnitud absoluta media de una muestra al realizar un truncamiento, directa o indirectamente, en las paralajes observadas o al aplicar un criterio de selección basado en el error relativo en la paralaje (Luri y Arenou, 1997).

Como se ha indicado, el catálogo *Hipparcos* proporciona, además de los errores estándar en los cinco parámetros astrométricos, la matriz completa de los coeficientes de correlación. Esta debe ser tenida en consideración, por ejemplo, en el cálculo de posiciones y movimientos propios en una época distinta de J1991.25 (el mismo catálogo suministra las rutinas en C y Fortran), o en la determinación del error en la velocidad espacial, propagado a partir de los parámetros astrométricos (Meillon, 1997).

Primeros resultados científicos

Exponemos a continuación algunos ejemplos, que creemos significativos, del impacto de los datos de *Hipparcos*, agrupados en cuatro grandes áreas: sistema solar, física estelar, física galáctica y escala cósmica de distancias y edades. Otras aportaciones de carácter general se exponen a continuación, mostrando como los catálogos *Hipparcos* y *Tycho* suponen, por su homogeneidad y precisión, el sistema de referencia estelar básico para todos los trabajos astrométricos y fotométricos a realizar en la próxima década.

Los resultados de la misión son de aplicación a otras misiones espaciales: han sido (satélite ISO) y serán utilizados por ESOC para la determinación de la dinámica de vuelo (Batten, et al. 1997); *AXAF*, *XMM* e *INTEGRAL* (Giménez et al. 1997) utilizarán dichos catálogos para obtener posiciones precisas y magnitudes para el guiado, la posterior reconstrucción astrométrica de las imágenes y la calibración de magnitudes. Cabe también citar que el catálogo *Tycho* ha servido como sistema de referencia fotométrico para la recalibración de las magnitudes publicadas en el GSC, permitiendo, para las estrellas con $V < 11.5$, reducir los errores sistemáticos del catálogo a 0.1 mag.

Fienga et al. (1997) han evaluado la aportación de *Hipparcos* (densidad media de tres estrellas grado cuadrado) al proceso de reducción astrométrica de observaciones fotográficas de objetos del sistema solar. La mejora es indiscutible, el error externo en una imagen individual pasa de $0.271''$ al utilizar el catálogo PPM a $0.029''$ al utilizar *Hipparcos* (4 estrellas de referencia). Actualmente se considera que la precisión obtenida con *Hipparcos* permitirá avanzar en el estudio de fenómenos tales como la refracción basada en perfiles de atmósfera realistas o efemérides relativistas.

Resultados preliminares de *Hipparcos* fueron utilizados para mejorar la predicción de fenómenos en el sistema solar tales como el instante de impacto entre el cometa Shoemaker-Levy 9 y Júpiter o la asistencia a la navegación de la sonda Galileo en su encuentro con el asteroide Ida. Más recientemente, García-Sánchez et al. (1998) han utilizado la precisión obtenida en el movimiento propio para determinar qué estrellas cercanas pueden visitar la vecindad solar perturbando la nube de Oort.

1. Sistema solar

En el programa de observación de *Hipparcos* se incluyeron una selección de objetos del sistema solar (planetas mayores, satélites planetarios y asteroides) con un doble objetivo: disponer de posiciones precisas para ajustar el sistema de referencia dinámico al ICRS y estudiar las propiedades dinámicas y físicas de estos objetos. La posición precisa de asteroides permite mejorar sus efemérides y, en el caso de pasos muy cercanos entre objetos, proceder a la determinación de sus masas; las observaciones fotométricas proporcionan, por otra parte, información sobre sus propiedades de rotación.

Hipparcos ha proporcionado posiciones astrométricas precisas para los satélites Europa, Titán y Japeto, y para 48 asteroides, con un error estándar medio de 10 – 15 mas, sobrepasando la precisión en las observaciones realizadas en tierra con círculo meridiano en un factor 10. La precisión fotométrica es de 0.02–0.03 mag (Hestroffer, 1997). Como ejemplo podemos citar la precisión alcanzada en la determinación de la masa de Ceres ($4.785 \pm 0.039 \times 10^{-10} M_{\odot}$), obtenida a partir de la perturbación que crea en la órbita de otros 4 asteroides, precisión superior a la hasta ahora determinada desde tierra (Viateau y Rapaport, 1997).

Tycho ha proporcionado astrometría y fotometría en dos filtros para 5 pequeños planetas, los satélites Ganímedes, Calisto y Titán y los planetas mayores Urano y Neptuno. La precisión en las posiciones es del mismo orden que las observaciones realizadas en tierra con el círculo meridiano de La Palma.

Actualmente, las posiciones de Europa y Titán, por *Hipparcos*, y Ganímedes y Calisto, por *Tycho*, están siendo utilizadas para comprobar las últimas efemérides JPL de los planetas Júpiter y Saturno (Morrison et al. 1997). Para Saturno, las observaciones *Hipparcos* muestran un acuerdo excelente con las últimas efemérides en declinación, pero no así en ascensión recta; por el contrario, persisten las discrepancias entre las observaciones (*Hipparcos* y terrestres) de Júpiter y sus efemérides en declinación. Estas diferencias no están todavía interpretadas.

2. Física estelar

La disponibilidad de paralajes trigonométricas y movimientos propios para un gran número de estrellas repartidas por prácticamente todas las zonas del diagrama HR (fig. 3) ha permitido considerar la calibración de luminosidades bajo un nuevo enfoque. Hasta ahora, las calibraciones existentes eran inhomogéneas, desconociéndose en muchos casos sus incertidumbres y los posibles sesgos derivados de los procesos de selección de las muestras utilizadas. Se ha desarrollado un método de determinación de paralajes estadísticas (Luri et al. 1996) que, mediante la técnica de máxima verosimilitud, permite utilizar toda la información astrométrica y astrofísica disponible para un tratamiento estadístico y riguroso del problema, incluyendo aspectos como la modelización de la función de completitud de las muestras, los efectos derivados de los errores observacionales o la separación de grupos con distintas propiedades cinemáticas y físicas.

El método proporciona también una estimación no sesgada de las distancias individuales de las estrellas. Aplicado a las estrellas del *survey Hipparcos* sin peculiaridades en el espectro y sin indicios de binariedad o variabilidad (Gómez et al. 1997), se constata que la dispersión intrínseca en las distintas clases de luminosidad es superior a la hasta ahora aceptada. El estudio de las posiciones en el diagrama HR de las estándares espectroscópicas MK evidencia que las calibraciones basadas en la clase de luminosidad son muy imprecisas.

El método ha demostrado ser especialmente apto para la determinación de luminosidades y propiedades cinemáticas de grupos peculiares como las estrellas de Bario (Mennessier et al. 1997), las estrellas variables de largo período –Miras y semiregulares– (Barthés y Luri, 1998), y las estrellas A metálicas y peculiares (Figueras et al. 1998).

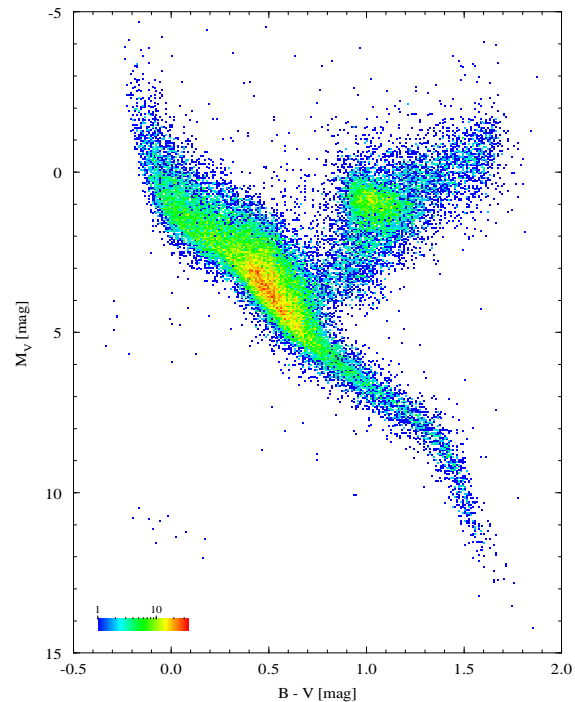


Fig. 3. Diagrama color-magnitud para 41704 estrellas simples con errores relativos en la paralaje mejor que el 20% y $\sigma_{B-V} \leq 0.05$ mag

Merece especial interés el estudio de la posición en el diagrama HR de las estrellas subenanas y subgigantes de población II. Utilizando temperaturas efectivas derivadas del método IRFM, un número suficiente de estrellas con paralajes trigonométricas con precisión superior al 15 % han permitido por primera vez comprobar la validez de los modelos teóricos de evolución estelar para estrellas pobres en metales, pudiendo determinar la edad de las estrellas del halo independientemente de los cúmulos globulares (Cayrel et al. 1997a, Jordi et al. 1997a). En esta línea, los paralajes *Hipparcos* han permitido la determinación de gravedades superficiales de estas estrellas, con lo que es posible disponer de una estimación más precisa de las abundancias de los elementos que desempeñan un papel fundamental en las teorías de nucleosíntesis (Nissen et al. 1997), y, del conocimiento de su estado evolutivo, avanzar en la interpretación de las abundancias de elementos ligeros, Li, Be y B (así (la paralaje obtenida para HD 84937 indica que no hay contradicción entre la proporción isotópica del litio observada y los modelos estándar que explican su destrucción).

Eyer y Grenon (1997), analizando las medidas fotométricas individuales (H_p) proporcionadas por *Hip-*

parcos (más de 13 millones de observaciones), describen el diagrama HR en términos de estabilidad, microvariabilidad y variabilidad, dedicando especial atención a los límites de la banda de inestabilidad existente en torno al llamado *gap* de Böhm-Vitense. Por otra parte, dado que la magnitud H_p ha sido determinada con mucha precisión para un número elevado de estrellas y que corresponde a una banda mucho más ancha que la magnitud V Johnson, H_p va a permitir una mejor determinación de la corrección bolométrica. Una primera estimación, por comparación con los modelos de Kurucz (ATLAS9), puede encontrarse en Cayrel et al. (1997b).

Las estrellas binarias eclipsantes con líneas dobles en los espectros son especialmente adecuadas para la comprobación de los modelos teóricos de evolución. Si bien masas y radios pueden obtenerse con precisiones de entre 1–2%, la temperatura efectiva, además de las diferencias sistemáticas con respecto a las temperaturas teóricas (Cayrel et al. 1997a, Jordi et al. 1997b), tiene asociados errores que pueden ser superiores al 10%. Ribas et al. (1998) y Jordi et al. (1997c) aprovecharon la precisión de las paralajes de *Hipparcos* para determinar las temperaturas de un conjunto de binarias eclipsantes y está en curso la comprobación de los modelos evolutivos con distinta composición química (Z , Y). Otra aplicación obvia de las paralajes de *Hipparcos* es la mejora en los valores de las masas de estrellas binarias con órbita conocida. Söderhjelm et al. (1997) recalculan los elementos orbitales y obtienen masas individuales con errores entre un 5 y un 20% para 15 binarias, y redefinen la relación masa-luminosidad.

Con *Hipparcos*, las distancias individuales de las estrellas pertenecientes al cúmulo de las Hyades han sido determinadas con una precisión superior al 5% (0.1 mag en media). Ajustando los modelos teóricos a la parte inferior del diagrama HR de este cúmulo, Perryman et al. (1998) y Lebreton et al. (1997) estiman su contenido de helio en $Y = 0.26 \pm 0.02$ y su edad en 625 ± 50 Myr. Considerando también velocidades radiales de CORAVEL, Brown et al. (1997b) evalúan por primera vez la estructura tridimensional del cúmulo, deduciendo una dispersión interna de velocidades de $0.3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

Van Leeuwen y Hansen Ruiz (1997) tratan los datos intermedios de *Hipparcos* para eliminar las correlaciones entre los parámetros astrométricos (no despreciables en un área pequeña del cielo) e incorporan movimientos propios relativos desde tierra para redeterminar la distancia a las Pleiades. La paralaje resultante indica que el cúmulo es un 15% más cercano que las determinaciones hasta ahora aceptadas (principalmente basadas en calibraciones fotométricas), situando su secuencia por debajo de las predicciones teóricas. Hasta el momento, no existe explicación alguna a tal diferencia. Se han barajado ideas con respecto a un contenido anómalo de He, pero éste debería ser de entre 0.35 y 0.40, cuando la abundancia medida de helio tanto en las regiones H II, como en cúmulos muy jóvenes y asociaciones es del orden de 0.26. Esta discrepancia observada debe valorarse en un escenario más global:

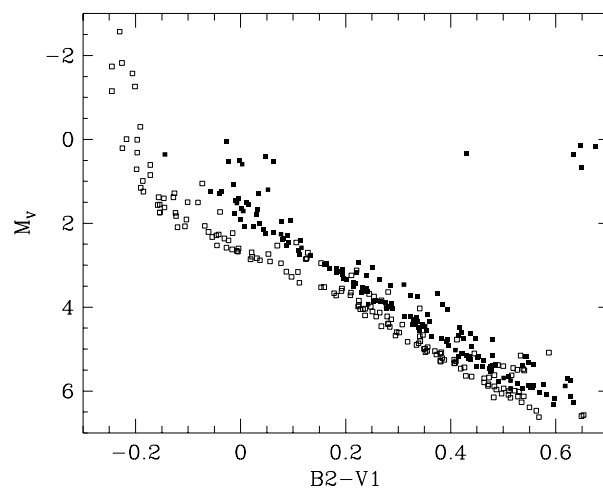


Fig. 4. Secuencias de los cúmulos Praesepe (símbolos negros) y Pleiades (símbolos blancos). Para $B_2 - V_1 > 0.20$ la diferencia es aproximadamente constante y de 0.5 mag (Mermilliod et al. 1997)

el papel que los cúmulos cercanos (y en particular las Pleiades) tienen en la determinación de la escala de distancias y en las teorías de evolución estelar (ZAMS e isocronas empíricas). Mermilliod et al. (1997) obtienen una misma secuencia principal para Praesepe, Coma Ber, α Persei y Blanco 1 a pesar de sus diferencias en metalicidad, mientras que las Pleiades, IC 2391 y 2602 definen una secuencia 0.5 mag más débil que los cúmulos anteriores (fig. 4). Así, los resultados obtenidos por *Hipparcos* no corresponden a las expectativas teóricas: la posición de la secuencia principal no está únicamente relacionada con la metalicidad o cualquier otro parámetro conocido.

3. Física galáctica

Trabajos preliminares sobre la determinación de la función de luminosidad en el entorno solar (Murray et al. 1997) muestran una sustancial contribución de *Hipparcos* en el rango $M_v < 9$, siendo necesaria la utilización de los datos *Tycho* para avanzar a magnitudes más débiles. De confirmarse los resultados preliminares, la distribución estelar observada en la secuencia principal y en la región de las subgigantes queda representada mejor con una función inicial de masa (IMF) más plana que la de Salpeter (Sabas, 1997) confirmando que el ritmo de formación estelar en el pasado fue superior al actual (Bertelli et al. 1997).

El estado dinámico de un sistema estelar queda descrito por la función de distribución en el espacio de las fases $F(\mathbf{x}, \mathbf{v})$, pudiendo de ella deducirse el potencial gravitatorio y por tanto la distribución de masas del sistema. A partir de los datos obtenidos por *Hipparcos*, es posible, por primera vez en la historia, seleccionar muestras extensas y homogéneas libres de efectos sistemáticos. Así, el equipo de trabajo liderado

por Binney, a partir de una muestra extensa (14369 estrellas) no sesgada cinemáticamente, analiza la función de distribución de velocidades estelares en el entorno solar ($f(\mathbf{v})$), no sólo para estrellas de los primeros tipos, sino también para estrellas pertenecientes a la población vieja del disco. Binney et al. (1997) muestran como la discontinuidad de Parenago emerge con excepcional claridad con un aumento lineal muy bien definido entre $(B - V) = 0.4$ y $(B - V) = 0.6$; establecen la velocidad del Sol respecto del estándar local del reposo en $(U_{\odot}, V_{\odot}, W_{\odot}) = (11.0 \pm 0.6, 5.3 \pm 1.7, 7.0 \pm 0.6) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, claramente distinto del valor clásico de Delhaye $((9, 12, 7) \text{ km} \cdot \text{s}^{-1})$, resultado que podía estar sesgado por la presencia de estrellas con elevado movimiento propio. Dehnen (1998) muestra como los ejes del elipsoide de velocidades residuales, que como es sabido aumentan hacia tipos espectrales avanzados, presentan un aumento superior en la componente perpendicular al plano galáctico. De aquí puede deducirse que el calentamiento vertical del disco afecta más a las poblaciones dinámicamente calientes, cobrando importancia el mecanismo de dispersión por brazos espirales.

La función de distribución de velocidades residuales para estrellas jóvenes presenta muchas subestructuras, los llamados grupos móviles. *Hipparcos*, al reducir sustancialmente los errores observacionales en las tres componentes de la velocidad espacial, ha permitido constatar claramente la existencia de dichos grupos (Figuera et al. 1997) así como detectar subestructuras dentro de los mismos (Asiain, 1998), avanzando en la comprensión del origen, la evolución y los mecanismos de persistencia de tales estructuras (fig. 5).

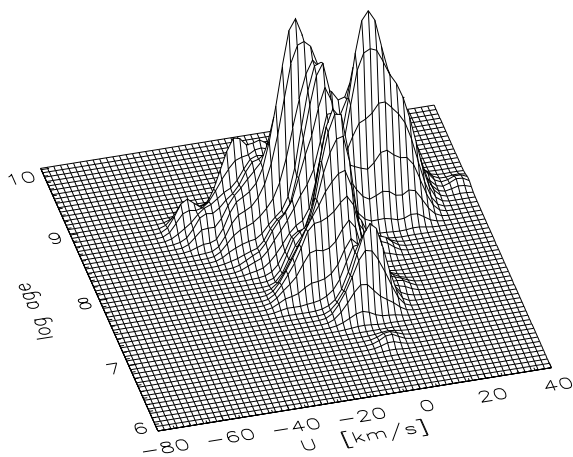


Fig. 5. Distribución en el plano $(U, \log(\text{edad}))$ de las estrellas pertenecientes a grupos móviles. Se detectan subestructuras en los grupos clásicos de Pleiades, Sirius, IC2391 y Hyades (Asiain, 1998)

Mediante el contraste de datos *Hipparcos* con modelos dinámicos de Galaxia empieza a ser viable abordar estudios de estructura a gran escala como la presencia

de la barra central (Raboud et al. 1998) o la combadura del disco -*galactic warp* (Smart et al. 1997). A menor escala, se han ajustado los parámetros que dan cuenta de la estructura del cinturón de Gould permitiendo un análisis más detallado de su movimiento de expansión (Torra et al. 1997). Por otra parte, Crézé et al. (1998) estiman la densidad local de masa en $0.076 \pm 0.015 M_{\odot} \cdot \text{pc}^{-3}$, un valor claramente inferior a determinaciones previas, no dejando por tanto margen a la existencia de una componente de materia oscura del disco. Miyamoto y Tsujimoto (1997) estiman el radio del halo masivo de nuestra galaxia en 50 - 100 kpc, con una masa total de $5.5 - 11.1 \times 10^{12} M_{\odot}$. Herramientas fundamentales en astronomía galáctica como son los modelos de extinción interestelar están también siendo revisados basándose en los datos proporcionados por el satélite (Chen et al. 1998).

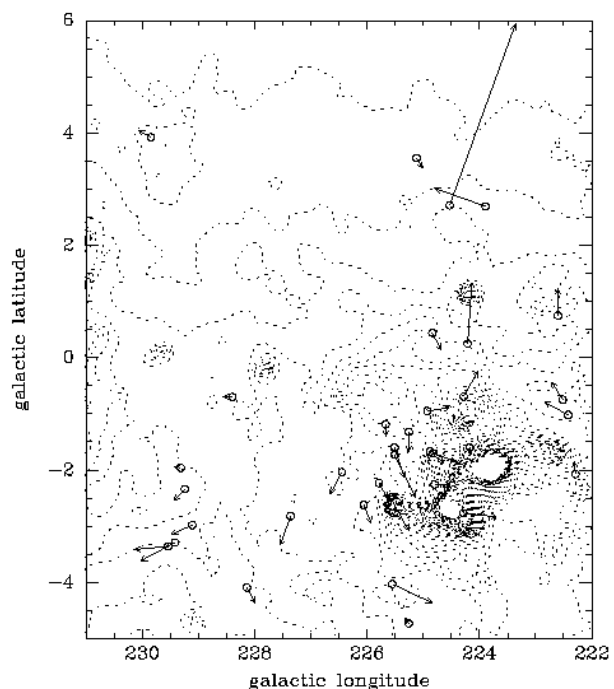


Fig. 6. Posiciones y velocidades de las estrellas en la región de Canis Majoris (Comerón et al. 1998)

A más pequeña escala, los movimientos propios derivados de *Hipparcos* (fiables para estrellas situadas hasta 1-2 kpc) permiten profundizar en el estudio de la estructura y evolución de las asociaciones OB (de Zeeuw et al. 1997) así como analizar estructuras cinemáticas en expansión en regiones de formación estelar reciente. Comerón et al. (1998) confirman la existencia de episodios de formación estelar en cadena en las regiones de Cygnus y Canis Majoris. El aporte energético de las estrellas masivas de la asociación Cyg OB2, cerca del centro de la burbuja de Cygnus, es suficiente para impulsar la formación estelar en el anillo que la rodea. En el caso de Canis Majoris, parece más posible que las estrellas se formaran de los restos de una nube molecular donde estalló una supernova. Este escenario viene corroborado por las observaciones de *Hipparcos* de la

región (fig. 6): la expansión de las estrellas OB a partir del punto $(l, b) = (226.5^\circ, -1.6^\circ)$ y la detección de una estrella *runaway* –posible compañera del progenitor de supernova– cuya trayectoria pasa por el centro de la expansión.

4. Escala cósmica de distancias y edad del Universo

La calibración de la magnitud absoluta de las estrellas cefeidas clásicas y las RR Lyrae es un pilar fundamental en la determinación de la escala de distancias galáctica y extragaláctica. Dentro de nuestra galaxia, estas estrellas permiten la estimación de la distancia a los cúmulos globulares –los objetos más viejos del sistema– y de aquí, la determinación de sus edades mediante ajustes de diagramas color-magnitud a los modelos teóricos de evolución estelar, siendo así posible establecer un límite inferior a la edad del Universo. Paralelamente, mediante la aplicación de dichas calibraciones a la determinación de la distancia a galaxias cercanas es posible establecer acotaciones al valor de la constante de Hubble.

Por primera vez *Hipparcos* ha permitido abordar el estudio de dichas calibraciones utilizando paralajes trigonométricas (238 estrellas cefeidas y 186 estrellas RR Lyrae han sido observadas por el satélite). No obstante, aún teniendo en cuenta la precisión alcanzada, la elevada distancia a la que se encuentran estos objetos hace que sólo 12 RR Lyrae y 6 cefeidas clásicas tengan una precisión en la paralaje *Hipparcos* mejor que el 30%. Por ello, es obligado un riguroso tratamiento estadístico de los datos que minimice en lo posible los sesgos derivados de la presencia de errores observacionales y la incompletitud de las muestras, siendo también fundamental un riguroso tratamiento de la absorción interestelar. La complejidad de este proceso es la causante de las discrepancias aparecidas en las calibraciones de luminosidad publicadas en este último año, utilizando ya todas ellas datos *Hipparcos*. A continuación se exponen algunos de los resultados obtenidos quedando patente la necesidad de profundizar en el origen de estas discrepancias.

Feast y Catchpole (1997) determinan el punto cero de la relación Periodo – Luminosidad (PL) de las cefeidas utilizando sólo paralajes, ponderando las ecuaciones con un peso inversamente proporcional al cuadrado del error en la paralaje (75% del peso en sólo 25 estrellas) e imponiendo el valor de la pendiente en la relación PL. Comentan estos autores que sus resultados no están sesgados al no utilizar las paralajes para la determinación de las distancias a las cefeidas de forma individual sino calculando directamente el punto cero de la relación PL. Consecuencias de los resultados obtenidos son: la distancia a las nubes de Magallanes aumenta en un 10% (módulo de distancia de 18.70 ± 0.10) con respecto a los últimos trabajos (observaciones HST, Freedman et al. 1994), la distancia a M31 aumenta en un 17% y la magnitud absoluta de las RR Lyrae pasa a ser $M_v(\text{RR}) = 0.3$ mag para $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.9$, 0.3 magnitudes más brillante que los valores hasta ahora

aceptados. De aquí, la edad de los cúmulos globulares se reduce a ~ 11 Gyr (Feast y Whitelock 1997) – los resultados pre-*Hipparcos* establecían su edad en ~ 14.6 Gyr –, pasando a ser compatible con determinaciones recientes de la edad del Universo (9–12 Gyr, establecida a partir de observaciones HST).

En clara contradicción con los resultados anteriores, Pont et al. (1997) estiman la distancia y la edad del cúmulo globular M92 utilizando estrellas de campo débiles en metales observadas por *Hipparcos*. Ajustando la secuencia del cúmulo a dichas estrellas estiman la edad en 14 ± 1.2 Gyr (fig. 7), siendo la fuente dominante de error los ingredientes en los modelos de evolución estelar (del orden de ± 2 Gyr).

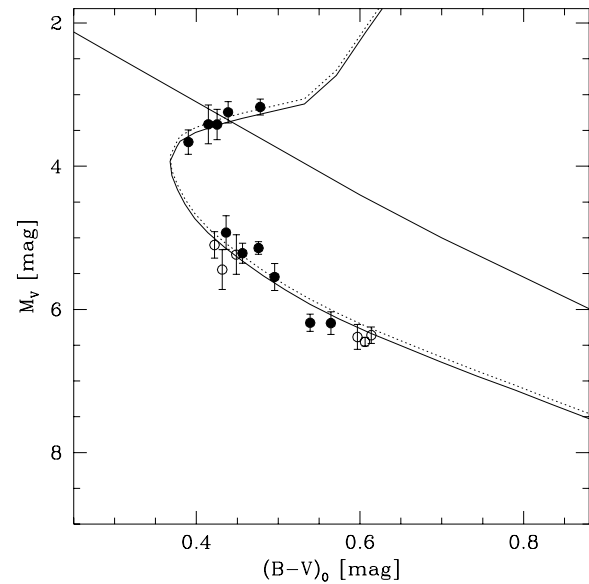


Fig. 7. Secuencia del cúmulo globular M92 ajustada a las estrellas subenanas con $[\text{Fe}/\text{H}] < -1.8$ y $\sigma_\pi/\pi < 0.15$ (posibles binarias indicadas con círculos vacíos). Línea continua: $(m_o - M) = 14.61$ mag, línea discontinua: $(m_o - M) = 14.68$ mag. Se indica también la secuencia de las Hyades (Pont et al. 1997)

Volviendo a la determinación de la escala de distancias y basándose en los trabajos de Feast (1995) a partir de cefeidas en cúmulos, si se corrige la distancia a las Pleiades de acuerdo con los resultados derivados de *Hipparcos* (Mermilliod et al. 1997), el módulo de distancia a las nubes de Magallanes se mantiene en 18.33 ± 0.10 , en clara contradicción con los resultados obtenidos por Feast y Catchpole (1997) y Paturel et al. (1997) (tabla 3). Más recientemente, Luri et al. (1998) aplican el método de determinación de paralajes estadísticas (citado en la sección de física estelar) para derivar independientemente las calibraciones de luminosidad de las estrellas cefeidas y RR Lyrae. El módulo de distancia a las nubes de Magallanes deducido de estas calibraciones se estima en ~ 18.3 (tabla 3), obteniendo, por primera vez, resultados coherentes a partir de ambos tipos de estrellas. Como se ha expuesto más arriba, sólo la valoración rigurosa de los sesgos presentes en las calibraciones pueden eliminar estas discrepancias.

Tabla 3. Módulo de distancia a la Gran Nube de Magallanes utilizando datos *Hipparcos*

Cefeidas – Feast y Catchpole, 1997	18.70 ± 0.10
Cefeidas – Paturel et al. 1997	18.72 ± 0.02
Cefeidas – Pleiades	18.33 ± 0.10
Miras – van Leeuwen et al. 1997b	18.54 ± 0.18
RR Lyrae – Fernley et al. 1998	18.26 ± 0.15
RR Lyrae – Luri et al. 1998	18.37 ± 0.23
Cefeidas – Luri et al. 1998	18.29 ± 0.17

Futuras misiones: la astronomía al microsegundo de arco

La misión *Hipparcos* ha iniciado una nueva era en la astronomía estelar. El éxito de la misión, tanto desde el punto de vista conceptual como de resultados científicos, evidencia la necesidad de progresar en la misma línea. Es por esa razón que ya se han planteado futuras misiones espaciales cuyo objetivo es obtener precisiones del orden del μs (microsegundo de arco). A este nivel de precisión, objetivos inalcanzables por *Hipparcos* (un mapa tridimensional de la Galaxia, búsqueda de planetas tipo Júpiter, enanas marrones, observación de objetos extragalácticos, test de la Relatividad General, etc.; Perryman et al. 1997b) pueden ser fácilmente abordables.

Manteniendo el liderazgo europeo en astrometría espacial, ESA ha considerado como posible misión *cornerstone* dentro del programa Horizonte 2000+ una misión dedicada a la astrometría con ánimo de alcanzar precisiones de μs . Lindegren et al. (1994), Lindegren y Perryman (1997) y Høg et al. (1997b) han planteado un diseño inicial. Basándose en ese concepto un grupo de científicos europeos, en su mayoría con alguna implicación anterior en *Hipparcos*, estamos trabajando para presentar a ESA en la primavera del 1999 una propuesta formal. Tal misión (GAIA, Global Astrometric Interferometer for Astrophysics) tiene como objetivo la medida de posiciones, movimientos propios anuales y paralajes con precisiones de $10 \mu\text{s}$ de arco para estrellas hasta magnitud aproximadamente 15, aunque la magnitud límite de la misión es de aproximadamente 20. La propia definición de la misión contempla la obtención de datos fotométricos, clasificación espectral y velocidades radiales para las $1.3 \cdot 10^9$ estrellas accesibles. Si ESA selecciona y aprueba GAIA, éste podría lanzarse en el año 2010, y se obtendrían resultados al cabo de unos 8–10 años.

La misión DIVA (Röser et al. 1997), de iniciativa alemana, está planteada como continuadora de la misión *Hipparcos*. Consiste en un pequeño satélite diseñado para observar todas las estrellas hasta magnitud 10.5 y con magnitud límite 15 (un millón de estrellas). Con dos años de misión pueden obtenerse paralajes con errores del orden de 0.3 mas , movimientos propios con errores del orden de 0.5 mas año^{-1} y fotometría de ban-

da ancha y banda intermedia con precisión de 3 y 10 mmag, respectivamente (para $V = 10.5$).

No podemos cerrar estas líneas sin citar otras misiones entre cuyos objetivos está el alcanzar las medidas de ángulos con precisiones del μs : la estadounidense SIM (Boden et al. 1997), LIGHT en el Japón (Yoshizawa et al. 1997) o STRUVE por parte de Rusia (Ilin et al. 1997).

Conclusiones

Gracias a un diseño excelente del satélite, una estrategia operacional pionera y una rigurosa tarea de preparación y reducción de los datos, *Hipparcos* ha obtenido una precisión (astrométrica y fotométrica) sin precedentes, realizando un recubrimiento completo del cielo con un único instrumento. La precisión obtenida en los parámetros astrométricos (posiciones bariocéntricas, movimientos propios y paralajes absolutas) ha sido unas dos veces superiores a la nominal. Para unas 20000 estrellas, a partir de *Hipparcos* las distancias se conocen con un error relativo menor del 10%. La cantidad y calidad de los datos fotométricos obtenidos por *Hipparcos* y *Tycho* deben destacarse como uno de los éxitos de la misión y señalarse el descubrimiento de unas 8000 nuevas variables y la detección y estudio de unos 12000 sistemas múltiples.

Aunque el tiempo transcurrido desde el término de la reducción y la publicación de los resultados (junio 1997) es todavía corto, las primeras aportaciones científicas, permiten afirmar que las implicaciones en campos tan diversos como el sistema solar, la física estelar, el estudio de la galaxia y, especialmente la calibración de distancias extragalácticas, ya son o van a ser importantes.

La calidad de los datos *Hipparcos* ha supuesto la necesidad de reformar las herramientas de cálculo y en particular, el tratamiento estadístico. Sesgos, selección de muestras, correlaciones entre parámetros astrométricos, etc. juegan ahora un papel importante, permitiendo su consideración, reconciliar determinaciones discrepantes en magnitud como por ejemplo, la distancia a la Gran Nube de Magallanes.

Evidentemente, algunos problemas todavía permanecen abiertos, y otros nuevos emergen del análisis de resultados. Pero los trabajos realizados hasta ahora permiten pronosticar que, en un futuro próximo, la comunidad científica conseguirá un avance sustancial en la comprensión de los fundamentos básicos de la física estelar y la astronomía galáctica.

El éxito de *Hipparcos* ha permitido plantear ya una futura misión espacial (GAIA) astrométrica, fotométrica y espectroscópica, con precisión del microsegundo de arco y hasta magnitud 20. GAIA proporcionará, en un futuro no exageradamente lejano, datos de un volumen significativo de nuestra galaxia; las capacidades de una misión como GAIA permitirán además muestrear *in situ* todas las poblaciones estelares, proporcionando datos observacionales fundamentales para

un conocimiento más exacto de las leyes que rigen el origen, la evolución y la dinámica de nuestra galaxia.

Bibliografía

- Arias E.F., et al., 1995, A&A 303, 604
 Asiain R., 1998, Tesis Doctoral. Universidad de Barcelona
 Barthés D., Luri X., 1998, A&A (en preparación)
 Batten A., et al., 1997, ESA SP-402, 191
 Bertelli G., et al., 1997, ESA SP-402, 501
 Betti B., Sansò F., 1983, Proc. FAST Thinkshop, Univ. Padova, 317
 Binney J., et al., 1997, ESA SP-402, 473
 Boden A., et al., 1997, ESA SP-402, 789
 Brown A.G.A., et al., 1997a, ESA SP-402, 63
 Brown A.G.A., et al., 1997b, ESA SP-402, 681
 Cayrel R., et al., 1997a, ESA SP-402, 219
 Cayrel R., et al., 1997b, ESA SP-402, 433
 Chen, B., et al., 1998, A&A 336, 137
 Comerón F., et al., 1998, A&A 330, 975
 Crézé M., et al., 1998, A&A 329, 920
 Dehnen W., 1998, AJ 115, 2384
 ESA, 1997, The Hipparcos and Tycho Catalogues, ESA SP-1200
 Eyer L., Grenon M., 1997, ESA SP-402, 467
 Feast M. W., 1995, en *Astrophysical Applications of Stellar Pulsation*, (eds. R. Stobie y P. Whitelock), ASP Conf. Series 83, 209
 Feast M. W., Catchpole, R.M., 1997, MNRAS 286, L1
 Feast M. W., Whitelock, P.A., 1997, ESA SP-402, 625
 Fernley J. et al., 1998, A&A 330, 515
 Fienga A., et al., 1997, ESA SP-402, 157
 Figueras F., et al., 1997, ESA SP-402, 519
 Figueras F., et al., 1998, en *Contrib. Astron. Obs. Skalnaté Pleso* 27, 184
 Folkner W.M., et al., 1994, A&A 287, 279
 Freedman W.L., et al., 1994, ApJ 427, 628
 García - Sánchez J., et al., 1998, ApJ (en prensa)
 Giménez A., et al., 1997, ESA SP-402, 199
 Gómez A.E., et al., 1989, en 'The Input Catalogue', ESA SP-1111 Vol II, p. 89
 Gómez A.E., et al., 1997, ESA SP-402, 207
 Hestroffer D., 1997, ESA SP-402, 35
 Høg E., et al., 1997a, ESA SP-402, 25
 Høg E., et al., 1997b, ESA SP-402, 783
 Ilin A.E., et al., 1997, ESA SP-402, 831
 Jordi C., et al., 1997a, ESA SP-402, 283
 Jordi C., et al., 1997b, en 'Fundamental Stellar Properties: The Interaction between Observation and Theory' (ed. T.R. Bedding), p. 138
 Jordi C., et al., 1997c, ESA SP-402, 409
 Kovalevsky J., et al., 1997, ESA SP-1200, Vol. 3, p. 387
 Lebreton Y., et al., 1997, ESA SP-402, 231
 van Leeuwen F., et al., 1997a, A&A 323, L61
 van Leeuwen F., et al., 1997b, MNRAS 287, 955
 van Leeuwen F., Hansen Ruiz C.S., 1997, ESA SP-402, 689
 Lindegren L., Perryman M.A.C., 1997, ESA SP-402, 799
 Lindegren L., et al., 1994, en 'GAIA - Global Astrometric Interferometer for Astrophysics', SPIE Conf. Proceedings, Vol. 1947, p. 147
 Luri X., Arenou, F., 1997, ESA SP-402, 449
 Luri X., et al., 1996, A&AS 117, 405
 Luri, X., et al., 1998, A&A Letters (en prensa)
 Meillon L., et al., 1997, ESA SP-402, 591
 Mermilliod J.-C., et al., 1997, ESA SP-402, 643
 Mennessier M.O., et al., 1997, A&A 326, 722
 Miyamoto M., Tsujimoto T., 1997, ESA SP-402, 537
 Morrison L.V., et al., 1997, ESA SP-402, 149
 Murray C.A., et al., 1997, ESA SP-402, 485
 Nissen P.E., et al., 1997, ESA SP-402, 225
 Paturel G., et al., 1997, ESA SP-402, 629
 Perryman M.A.C., Turon C., (Eds.), 1989, "The Input Catalogue", ESA SP-1111, Vol II
 Perryman M.A.C., Vaghi S., 1989, "The Hipparcos Satellite", ESA SP-1111, Vol I, p. 11
 Perryman M.A.C., Lindegren L., Murray A., (Eds.), 1989, "The Data Reductions", ESA SP-1111, Vol III
 Perryman, M.A.C., et al., 1997a, A&A 323, L49
 Perryman, M.A.C., et al., 1997b, ESA SP-402, 743
 Perryman, M.A.C., et al., 1998, A&A 331, 81
 Pont, F., et al., 1997, ESA SP-402, 699
 Raboud D., et al., 1998, A&A 335, 61
 Ribas I., et al., 1998, A&A 330, 600
 Röser S., et al., 1997, ESA SP-402, 777
 Sabas V., 1997, Tesis Doctoral, *Observatoire de Meudon*
 Scargle J.D., 1982, ApJ 263, 835
 Scargle J.D., 1989, ApJ 343, 874
 Schwarzenberg-Czerny A., 1989, MNRAS 241, 153
 Smart R.L., et al., 1997, ESA SP-402, 715
 Söderhjelm S., et al., 1997, ESA SP-402, 251
 Torra, J., et al., 1997, ESA SP-402, 513
 Turon C., et al., 1992, ESA SP-1136
 Urban, S.E., et al., 1998, AJ 115, 2161
 Viateau B., Rapaport M., 1997, ESA SP-402, 91
 Yoshizawa M., et al., 1997, ESA SP-402, 795
 de Zeeuw P.T., et al., 1997, ESA SP-402, 495

Explosiones cósmicas de rayos gamma: los fenómenos más energéticos del Universo

Alberto J. Castro-Tirado ajct@laeff.esa.es

Laboratorio de Astrofísica Espacial
y Física Fundamental (LAEFF-INTA)
Apartado 50727, E-28080 Madrid

Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA-CSIC)
Apartado 03004, E-18080 Granada

Abstract

Since their discovery in 1973, Gamma-Ray Bursts (GRBs) have remained for many years one of the most elusive mysteries in High Energy-Astrophysics. The main problem regarding the nature of GRBs has usually been the lack of knowledge of their distance scale. About 800 GRBs are detected annually in the full sky, but only a few of them can be localized accurately to less than half a degree. For many years, follow-up observations by other satellites and ground-based telescopes were conducted, but no counterparts at other wavelengths were found.

The breakthrough took place in 1997, thanks to the observation by BeppoSAX and RossiXTE of the fading X-ray emission that follows the more energetic gamma-ray photons once the GRB event has ended. This emission (the afterglow) extends at longer wavelengths, and the good accuracy in the position determination by BeppoSAX has led to the discovery of a dozen of counterparts at other wavelengths in 1997-98 greatly improving our understanding of these puzzling sources. Now it is widely accepted that most bursts originate at cosmological distances (with redshifts in the range 0.83-3.42 for 3 host galaxies), but the final solution of the GRB problem is still far away.

Resumen

Desde que se anunció su descubrimiento en 1973, las explosiones cósmicas de rayos- γ (GRBs) han sido uno de los misterios de la astrofísica de altas energías. El problema tradicional ha sido la falta total de conocimiento de la escala de distancias, porque a pesar de que actualmente se detectan unas 300 explosiones al año en toda la esfera celeste, muy pocas llegan a ser localizadas con una precisión inferior a 1° . Por muchos años, tanto por medio de telescopios en tierra como por parte de instrumentos a bordo de algunos satélites científicos, se han realizado observaciones de seguimiento en diversas longitudes de onda, pero sin haber podido hallar las anheladas contrapartidas a energías inferiores de las de los rayos-X/ γ .

El gran avance ha tenido lugar en 1997-98, gracias a la observación por parte de los satélites *BeppoSAX* y

RossiXTE de la emisión decreciente de rayos-X que inmediatamente, prosigue tras la explosión inicial observada en rayos- γ . Esta radiación (el llamado *afterglow*) se extiende hasta longitudes de onda mayores, por lo que el localizar esta emisión con una precisión de pocos minutos de arco, ha permitido descubrir las primeras contrapartidas en el óptico y en radio, mejorando sobremanera nuestro conocimiento de estos enigmáticos objetos.

Hoy en día, está ampliamente aceptado que la mayoría de los GRBs, sino todos, acontecen a distancias cosmológicas, siendo pues los los objetos más energéticos del Universo ($E \sim 10^{53}$ erg), a pesar de su limitada duración. Los brillantes remanentes que dejan tras de sí estas explosiones en todas las longitudes de onda, a buen seguro nos permitirán ahondar en el conocimiento de las galaxias a alto corrimiento al rojo, muchas de ellas con brotes de formación estelar y, en definitiva, del Universo temprano. Pero la solución final del enigma aún está lejos.

Introducción

En la década de los años 60, los cuatro satélites norteamericanos de la serie *Vela* —así llamados por el verbo español *velar*— fueron puestos en órbita para verificar si la Unión Soviética cumplía el Tratado de No Proliferación del Armamento Nuclear (1963). Durante 1967-73, sus detectores recogieron en 16 ocasiones un notable incremento del número de fotones- γ con respecto al nivel de fondo. Teniendo en cuenta la diferencia en los tiempos de llegada del frente de onda a cada una de los cuatro satélites que orbitaban la Tierra, se determinó que los sucesos no estaban relacionados ni con nuestro planeta ni con el Sol. Suponía pues el descubrimiento de explosiones de rayos- γ cósmicas y de origen desconocido (a las que a partir de ahora nos referiremos abreviadamente como GRBs, del inglés *Gamma-Ray Bursts*), publicado en el ya clásico artículo de Klebesadel, Strong y Olson (1973) titulado “Observación de explosiones de rayos gamma de origen cósmico”. Véase también Bonnell y Klebesadel (1996) para una descripción más detallada de los hechos. Desde entonces, grupos comenzaron a desarrollar nueva instrumentación a fin de estudiar el fenómeno.

Los GRBs aparecen como breves pero intensos fogonazos de rayos- γ cósmicos, emitiendo la mayor parte de su energía por encima de ~ 0.1 MeV (Fig. 1). Se detectan con instrumentación similar a la usada por los físicos de partículas en sus laboratorios. La diferencia radica en que los detectores de GRBs han de ser situados como parte de la carga útil de globos, cohetes o satélites, pues a 40 km de altura sólo se pueden detectar fotones por encima de ~ 25 keV debido a la atenuación por causa de la atmósfera (véase Giménez y Castro-Tirado 1998). Actualmente se observan unos 300 GRBs al año, pero muy pocos se pueden localizar de manera precisa.

Existen diversos métodos para determinar la posición de los GRBs en la bóveda celeste. En el caso de

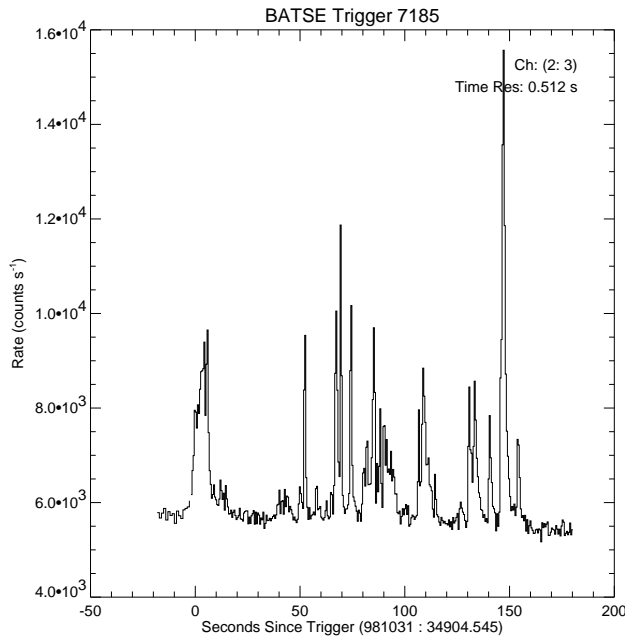


Fig. 1. Con una duración de ~ 150 -s, GRB 981031 es una de las explosiones cósmicas más duraderas observadas por el instrumento BATSE a bordo del *CGRO*.

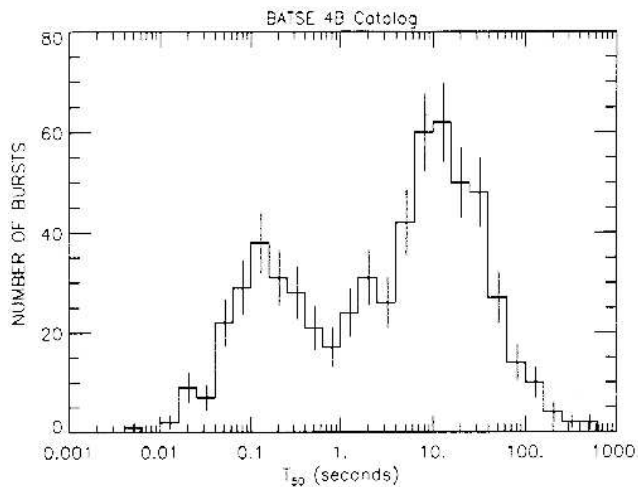


Fig. 2. La distribución bimodal de los GRBs presentes en el catálogo 4B de BATSE. De Meegan et al. (1998).

dos o más instrumentos en el mismo satélite (y sin posibilidad alguna de obtener una imagen), es necesario tener en cuenta las distintas intensidades del mismo GRB en cada uno de los diferentes detectores, pero ello sólo proporciona posiciones con errores de varios grados. En otros casos, como cuando se emplean instrumentos de gran campo y capaces de producir una imagen, se puede reducir el error hasta $\sim 1^\circ$. Las mejores posiciones, del orden de 0.1 - 0.2° se consiguen cuando se dispone de instrumentación en satélites muy alejados entre sí (la llamada *Red Interplanetaria*, *IPN*), de modo que a partir de los diferentes tiempos de llegada del frente de onda a cada satélite, se pueden afinar las posiciones hasta $2'$.

En cuanto a la estructura temporal, fue adverti-

do de inmediato que cada GRB era diferente de los demás y cualquier intento de realizar una clasificación morfológica ha fracasado. Las duraciones oscilan entre varios ms y más de 1 h (Hurley et al. 1994), llegando a medirse variaciones en escalas de 0.2 ms (Bhat et al. 1992, Scargle et al. 1998), lo que implicaría regiones con unas dimensiones de menos de 60 km, en ausencia de movimientos relativistas. Sí que hay una clara evidencia de una distribución bimodal por lo que respecta a la duración, pudiéndose diferenciar dos clases de GRBs: de corta duración (< 2 s), que suponen un $\sim 25\%$ del total y de larga duración (≥ 2 s), el $\sim 75\%$ restante (Kouveliotou et al. 1993). Estos últimos tienen un promedio de 20-30 s (véase la Fig. 2). Con respecto a un posible carácter repetitivo, hasta la fecha no hay evidencia alguna de más de un GRB producido por una misma fuente.

Por lo que se refiere a sus características espectrales, se han observado una gran diversidad de espectros. El continuo en rayos- γ es ancho, normalmente muy duro y no térmico, ajustándose muchas veces a una doble ley de potencias (Fig. 3). En algunos casos, se han detectado GRBs con emisión en la banda clásica de rayos X, con fotones incidentes de hasta 2 keV (Murakami et al. 1991), mientras que en otros casos, se han observado fotones con energías de 18 keV 1.5 h después de iniciado el GRB (Hurley et al. 1994).

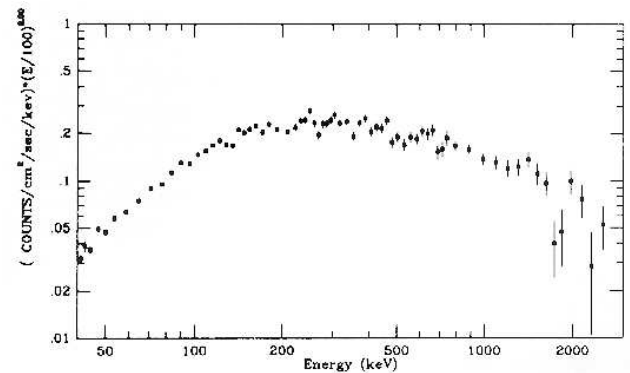


Fig. 3. Espectro en la banda de los rayos- γ de uno de los GRBs más intensos observados hasta la fecha: GRB 910503. De Schaefer et al. (1994a).

El instrumento KONUS en las *Venera 11* y *12* determinó en los años 80 las zonas de error para más de 150 GRBs por medio del primero de los métodos descrito anteriormente. Fue la primera indicación de que los GRBs estaban distribuidos de manera isotrópica en todo el cielo, no siguiendo, por tanto, la distribución de las fuentes brillantes de rayos-X en el plano galáctico (Mazets et al. 1981a). El experimento BATSE (Fishman 1989) a bordo del *Observatorio Compton de Rayos- γ* (*CGRO*) desde 1991, fue expresamente diseñado para probar que los GRBs estaban relacionados con estrellas de neutrones en la Galaxia y, por ello, deberían de presentar una concentración hacia el plano galáctico. Sin embargo, y después de más de 1600 observaciones (Fig. 4), los resultados son totalmente compatibles con una distribución isotrópica de las fuentes (Meegan et

al. 1992), confirmando pues los resultados de KONUS. Los momentos de la distribución son $\langle \cos \theta \rangle = -0.015 \pm 0.0014$ (dipolar) y $\langle \sin^2 b \rangle = 0.337 \pm 0.008$ (cuadrupolar)¹, muy próximos a los valores esperados de 0 y 1/3 para una distribución isotrópica.

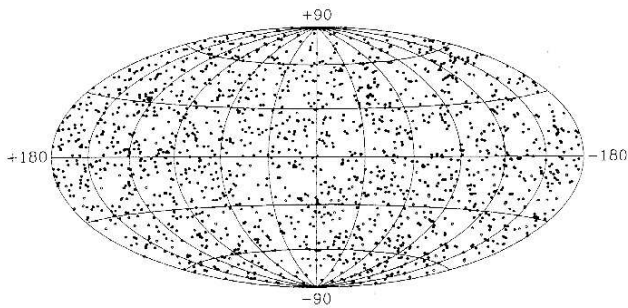


Fig. 4. La distribución en la esfera celeste (coordenadas galácticas) de los 1637 GRBs del catálogo 4B de BATSE. Adaptado de Meegan et al. (1998).

La distribución de las fuentes no es homogénea, como se deriva de la relación $\log N - \log S$ (o similares), tal como se aprecia en la Fig. 5. Hay una deficiencia de GRBs débiles (Meegan et al. 1994), conforme a lo esperado en el caso de que la distribución fuera uniforme en el espacio (supuestamente euclideo), que seguiría la recta de pendiente $-3/2$. Una excelente revisión de todas estas características observacionales hasta ahora mencionadas puede verse en el trabajo de Fishman y Meegan (1995).

Esta isotropía aparente, unida a la ya comentada deficiencia de explosiones débiles, ha llevado recientemente a muchos teóricos a creer que los GRBs puedan ocurrir a distancias cosmológicas, aunque la posibilidad de que exista una pequeña fracción de GRBs en nuestra galaxia, en una escala de cientos de pc o incluso en el propio halo, no puede ser descartada. Si los GRBs ocurrieran a distancias cosmológicas, la energía puesta en juego sería del orden de 10^{53} erg, con modelos que requieren bien el colapso de parejas de estrellas de neutrones o de agujeros negros (o mixtos) en sistemas binarios, o bien de las llamadas supernovas de tipo I “fallidas”. De ello hablaremos más adelante.

Actualmente sabemos de la importancia de detectar emisión esporádica asociada con los GRBs en otras longitudes de onda. Detallaremos en este artículo todos los esfuerzos realizados en la búsqueda de contrapartidas. Primero hasta 1996, para después centrarnos en los importantes descubrimientos realizados en 1997 y 1998. Anteriores artículos de revisión pueden consultarse en Schaefer (1994), Hartmann (1995), Vrba (1996), Greiner (1996), Castro-Tirado (1998) y Hurley (1998).

¹ $\theta = \arccos(\cos l \times \cos b)$ es el ángulo respecto al centro galáctico y (l, b) son la longitud y latitud galácticas.

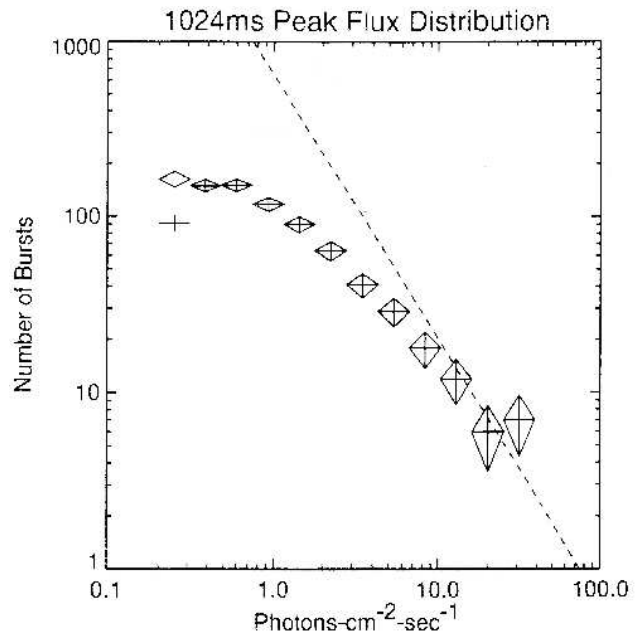


Fig. 5. La distribución cumulativa del flujo máximo observado para cada GRB es equivalente al diagrama $\log N - \log S$. Nótese la desviación con respecto a línea punteada, de pendiente $-3/2$, que seguiría la distribución homogénea de fuentes en el espacio (supuestamente euclideo). Adaptado de Meegan et al. (1998).

Búsquedas anteriores a 1997

Búsquedas en rayos-X

La observación de rayos-X por debajo de 20 keV es de vital importancia para comprender la naturaleza de los procesos físicos que intervienen en los GRBs. La mayoría de los experimentos tienen límites inferiores de detección en torno a los 20-40 keV. No obstante, unos pocos fueron diseñados para ser sensibles en el rango de los rayos-X blandos (0.1-1 keV) o en la banda X clásica (1-10 keV).

En 1972, el espectrómetro del *Apolo 16*, detectó fotones-X en el rango 2-8 keV para GRB 720427² (Trombka et al. 1974). Wheaton et al. (1973) observaron en GRB 720514 la presencia de una señal simultánea que duró más que el fenómeno gamma y en 1984, Katoh et al. detectaron la cola X de GRB 811016, que perduró más de 30 s tras el cese de la emisión de fotones- γ . *Ginga* igualmente recogió emisión hasta 1.5 keV, con rayos-X suaves para 8 explosiones (Murakami et al. 1991, Yoshida y Murakami 1994). Además, una significativa fracción ($\sim 10\%$) de todos los GRBs detectados por WATCH en *Granat* mostraron colas de rayos-X en el rango 6-20 keV (Castro-Tirado et al. 1994a). Connors y McConnell (1996) también propusieron que la fuente X esporádica que detectó *HEAO 1* tras GRB 780506 pudiera estar relacionada con la propia explosión. Por ello, ya parecía obvio que, al menos en algunos

²los GRBs se designan por seis números: AAMMDD donde AA es el año, MM el mes y DD el día en el que se han observado. Así, GRB 720427 ocurrió el 27 de abril de 1972.

GRBs, la emisión X perduraba más que la emisión γ .

Por medio del satélite *Einstein* (=HEAO 2), comenzaron en la década de los años 80 las búsquedas profundas de contrapartidas de rayos-X persistentes y situadas en las zonas de error de GRBs. Se observaron cinco zonas y exceptuando un objeto (en GRB 781119, Grindlay et al. 1982), ninguna otra fuente puntual llegó a observarse. Presuponiendo que las explosiones se originaban en estrellas de neutrones galácticas, como entonces se creía, se pudieron derivar límites superiores para la temperatura superficial (Pizzichini et al. 1986). La región de GRB 781119 fue observada por *Exosat* (Boer et al. 1988), sin encontrar objeto alguno, pero *Asca* y *Rosat* “redescubrieron” la fuente X, derivando un flujo $F_{(0.5-8 \text{ keV})} \sim 1.6 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Hurley et al. 1996, Boer et al. 1997a). Esta no fue, sin embargo, la única evidencia de una fuente X asociada con un GRB, pues un segundo caso fue el observado por *Asca* en GRB 920501 (Murakami et al. 1996). El espectro de rayos-X estaba fuertemente absorbido en bajas energías, implicando una absorción consistente con la que se deriva de la densidad de columna en esa dirección de nuestra Galaxia, lo que sugería que la fuente X estaba muy distante. Otro intento fue el de Greiner et al. (1995), quienes usando la base de datos de *Rosat* detectaron 27 fuentes de rayos-X en 45 zonas de error. Pero en virtud de la identificación óptica de las mismas, no se pudo relacionar ninguna de ellas con un GRB. Además, el número de fuentes encontradas correspondía con el que se deberían de encontrar conociendo la densidad de las mismas. Sólo se pudo establecer un límite superior al flujo de rayos-X en $F_{(0.1-2.4 \text{ keV})} \sim 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Otro campo (GRB 940301) fue observado por *Rosat* cuatro semanas después, sin revelar igualmente contrapartida X variable alguna (Greiner et al. 1996a). En resumen, no había indicios de emisión X a los pocos días de haberse detectado un GRB.

Búsquedas en el EUV

Las búsquedas en el extremo ultravioleta (EUV) sólo se han podido realizar desde 1992, tras el lanzamiento del satélite *EUVE*. Una observación cuasi-simultánea del campo de GRB 921013b, se produjo al azar ~ 11 horas después. No se llegó a encontrar fuente alguna en el EUV dentro de la zona de error (Castro-Tirado et al. 1998a).

Otra observación, esta vez mucho más profunda, de GRB 920325, se realizó 17 meses después de la explosión. *EUVE* no llegó a encontrar contrapartida alguna, imponiendo ciertos límites en el caso de que una estrella de neutrones fuera la responsable del fenómeno (Hurley et al. 1995).

Búsquedas ópticas

El rango óptico es sin duda el más accesible desde tierra, y por ello unos de los primeros intentos para hallar la contrapartida fue la búsqueda en archivos. La estrategia consistía en suponer que los GRBs son de

naturaleza repetitiva. En ese caso, se utilizaba toda la información disponible en los mayores archivos de placas disponibles, para así intentar detectar emisión óptica esporádica (los llamados OTs, del inglés *Optical Transients*) en las correspondientes zonas de error.

El primer OT fue descubierto por Schaefer en 1981, tras examinar una placa de Harvard tomada en 1928 (OT 1928³), que incluía la pequeña zona de error de GRB 781119. Atteia et al. (1985) buscaron en placas que suponían un tiempo de exposición total de más de 1500 horas, pero no pudieron detectar OT alguno. Un segundo OT fue localizado en tres placas diferentes, cercano a la posición de GRB 781006b, por Greiner y Motch (1995) quienes propusieron a una estrella dMe, produciendo una fulguración de gran amplitud, como la causante del OT, aunque probablemente sin relación alguna con el GRB. Otro firme candidato resultó ser OT 1905, encontrado por Hudec et al. (1994) pero ligeramente alejado de la posición de GRB 910219.

Aunque estos OTs han sido aceptados por la mayoría de la comunidad científica como reales, otros ~ 40 candidatos han sido propuestos, pero la mayoría de ellos rechazados por tratarse de defectos presentes en las placas (más detalles en Hudec 1993, 1995). Pero en definitiva, *no* hay pruebas convincentes de que los OTs encontrados en placas y los GRBs tengan relación con el mismo fenómeno físico.

Las búsquedas profundas comenzaron en los años 80 para las zonas de error más reducidas: aquellas proporcionadas por *IPN*: GRB 781119 (estudiada por Pedersen et al. 1983) y GRB 790406 (por Chevalier et al. 1981). Con la llegada de los nuevos y mayores detectores CCD, se efectuaron nuevos intentos para GRB 790329 y otras zonas de error (Vrba et al. 1995). Los telescopios más potentes, tales como el 6-m del Cáucaso y el *Telescopio Espacial Hubble* (*HST*), escudriñaron varias regiones como las de GRB 790613 (Sokolov et al. 1996), GRB 790325 y 920406 (Schaefer et al. 1997a), pero no se llegó a identificar contrapartida persistente en ningún caso. Además, por lo general se ha encontrado que las zonas de error más pequeñas no contienen galaxias relativamente brillantes (hasta magnitud ~ 20), lo que se ha convenido en denominar el problema de la ‘no existencia de galaxias madre’ (en inglés ‘*the no-host problem*’, Fenimore et al. 1993). Era pues obvio que los GRBs, si estaban situados a distancias cosmológicas, no provendrían de galaxias normales: bien deberían de ocurrir en galaxias sublumínicas, o bien de alguna manera, habrían sido expelidos de las galaxias madre por alguna razón.

Las mayores esperanzas de encontrar emisión óptica se centraban en el caso de obtener imágenes simultáneas al GRB. La primera búsqueda de emisión óptica simultáneamente a un GRB fue realizada por Grindlay et al. (1974), sin resultado positivo. Hudec et al. (1987) y Hudec (1993) encontraron cinco GRBs para los cuales existían placas simultáneas, pero con idéntico resultado, el cual va a ser una constante en este tipo de

³los OTs se designan bien por el año en que se produjeron o bien siguiendo la misma notación de los GRBs.

búsquedas. Greiner et al. (1996b) encontraron placas en un intervalo de ± 12 horas, siendo la mejor para GRB 920824, donde una exposición relativamente profunda fue encontrada en Dushanbe. Concluyeron que la emisión típica de un GRB es a un nivel inferior a $F_{opt}/F_{\gamma} \sim 2$ durante el GRB y $F_{opt}/F_{\gamma} \sim 20-400$ unas pocas horas después, con F_{γ} y F_{opt} los flujos máximos en rayos- γ y en el óptico. El instrumento GROSCE proporcionó límites más restrictivos (magnitud 10) para más de 30 casos, muchos de ellos mientras la emisión gamma aún perduraba (Lee et al. 1996). Resultados adicionales para GRBs detectados por el instrumento WATCH en *Granat* fueron publicados por Castro-Tirado et al. (1994b), quienes no detectaron emisión esporádica alguna por encima de magnitud 18, a partir de las siguientes 12 horas de la ocurrencia de los GRBs. Observaciones igualmente profundas para GRB 930131 fueron dadas a conocer por Schaefer et al. (1994b), McNamara y Harrison (1994) y Barthelmy et al. (1994). Estos últimos sólo obtuvieron límites superiores para otros 3 GRBs, entre 35 horas y 8 días después. El único OT encontrado cuasi-simultáneamente a un GRB es el comunicado por Borovička et al. (1992), quienes encontraron un objeto en el borde de la zona de error para GRB 790929 en una placa tomada 7.1 horas después del fenómeno γ . Además, sendas detecciones en idéntica posición existían en otras dos placas. La posición del mismo es consistente con la estrella HDE 249119, que ha revelado ser bastante activa, con más de 10 ocasiones en las cuales la amplitud es superior a 0.5 mag (Štěpán & Hudec 1996), aunque no es probable que esta estrella fuera la causante de GRB 790929. En resumen, tampoco en el óptico se había conseguido un gran avance, a pesar de las búsquedas tan intensivas.

Búsquedas en el IR cercano

La primera búsqueda profunda de contrapartidas en el infrarrojo (IR) cercano fue la de Schaefer et al. (1987), quienes investigaron siete zonas de error a 2.2 μm . No se encontró ningún candidato convincente, hasta una magnitud límite de $K = 19$ en dos de las regiones. Sin embargo, Larson et al. (1997) ha encontrado que en seis de las zonas proporcionadas por *IPN*, existen galaxias relativamente brillantes en el IR, lo que en parte, solventaría el problema de la falta de galaxias madre en las zonas de error más pequeñas. Esto ha sido confirmado por Klose et al. (1996) en GRB 790418. En el caso de la ya reseñada fuente X presumiblemente asociada a GRB 920501, Blaes et al. (1997) hallaron que uno de estos objetos es una galaxia Seyfert de tipo 1, y Drinkwater et al. (1997) identificaron la galaxia con la fuente X detectada por *Einstein*, *Asca* y *Rosat*. ¿Es esta Seyfert la verdadera contrapartida de GRB ?

Búsquedas en el IR medio

Schaefer et al. (1987) también buscaron infructuosamente contrapartidas persistentes en el IR medio, usando la base de datos del satélite *IRAS* a 12, 25, 60 y 100 μm , dentro de 23 zonas de GRBs bien localizados.

Búsquedas en milimétricas

Dos observaciones simultáneas fueron obtenidas, al azar, por el satélite *COBE*, al correlacionar GRBs que ocurrieron durante los 8 meses en los cuales se solapó la misión con la del *CGRO* (Bontekoe et al. 1995, Stacy et al. 1996). El límite superior resultó ser 31000 Jy (2σ) a 53 GHz. Un análisis de probabilidad fue efectuado por Ali et al. (1997), intentando discernir un cambio en el nivel de emisión a estas longitudes para otros 81 GRBs, durante los primeros dos años de la misión (1990-91). Los límites superiores (con un 95 % de confianza) fueron 175, 192 y 645 Jy a 31, 53 y 90 GHz respectivamente. Miembros de otro equipo, a cargo de FLIRT (*Fallbrook Low-frequency Immediate Response Telescope*) buscaron emisión rápida proveniente de GRBs a 74 MHz, con un tiempo de respuesta de entre 2 y 12 min. Resultados preliminares para una muestra de 12 GRBs apuntaron la inexistencia de fuente alguna por encima de ~ 100 Jy (Balsano et al. 1996).

Búsquedas en radio

Por lo que respecta a búsquedas cuasi-simultáneas, una observación al azar en la dirección de GRB 920711 se realizó a 151 MHz con CLFST (*Cambridge Low-Frequency Synthesis Telescope*) entre 2 y 4 días después de la ocurrencia de GRB 920711. No se detectó fuente alguna hasta 40 mJy (Koranyi et al. 1994). Este radiotelescopio observó asimismo GRB 940301 una hora después de la explosión, imponiendo un límite superior entre 200 Jy el primer día y 80 mJy un mes después. Este tipo de observaciones se repitió para otros dos GRBs, con límites de 35 Jy a las 2.5 horas de GRB 950430, y de 16 Jy 1 hora después de GRB 950706 (Green et al. 1996). Tampoco se detectó radiofuente alguna a 4.86 y 1.4 GHz en la zona de GRB 930131 (Schaefer et al. 1994b). Observaciones con el VLA (*Very Large Array*) 23 horas después de GRB 940217, sólo proporcionaron un límite superior de $\leq 4 \mu\text{Jy/haz}$, según Palmer et al. (1985). Resultado igualmente negativo fue el de Frail et al. (1994) para GRB 940301: límites de 3.5 mJy y 55 mJy a 1.4 GHz y 0.4 GHz respectivamente.

Se ha sugerido que si los GRBs estuvieran relacionados con estrellas de neutrones en rotación altamente magnetizadas, emitirían emisión radio polarizada durante los episodios de emisión persistentes, entre GRB y GRB. Mapas profundos obtenidos por el VLA de la zona de error de GRB 781119 revelaron dos fuentes, una de las cuales mostraba cierto grado de polarización (Hjellming y Ewald 1981), mientras que la otra estaba asociada con la fuente de rayos-X detectada por *ROSAT* (Hurley et al. 1996). Schaefer et al. (1989) encontraron cuatro radiofuentes en otras 10 zonas de error de GRBs, aunque ninguna de ellas presentaba propiedades poco usuales, concluyendo pues que ninguna de ellas estaba asociada al fenómeno gamma. Observaciones más profundas realizadas con el VLA para GRB 920501, entre 13 días y nueve meses tras la explosión, sólo proporcionaron límites de 235 $\mu\text{Jy/haz}$ y 77 $\mu\text{Jy/haz}$

a 1.4 y 8.4 GHz respectivamente. Y de $\mu\text{Jy/haz}$ para GRB 930706 nueve días después (Palmer et al. 1995).

Búsquedas en VHE/UHE

En un caso (GRB 940217) se detectaron fotones con energías de hasta 18 GeV, 1.5 horas después (Hurley et al. 1994). Hay modelos que predicen emisión incluso en el rango de los TeV (Meszaros et al. 1994, Halzen et al. 1991). Una detección positiva, sin duda, posibilitaría poner ciertas cotas a determinados modelos, porque no se espera emisión en el rango de TeVs si los GRBs ocurren a distancias cosmológicas debido a la interacción de estos fotones con los del fondo de radiación de microondas e IR. Este proceso llevaría a producir pares siendo importante a partir de $E \geq 30$ TeV, como han señalado Wdowczyk et al. (1992), Mannheim et al. (1997) y Stecker y de Jager (1997). De hecho, a $E \geq 50$ TeV, pudiera haber evidencias de una detección con el experimento Dublin ASA (GRB 910511, Plunkett et al. 1995). El resto de la instrumentación actual (*arrays* y telescopios Cerenkov) sólo han proporcionado límites superiores a estas energías. Una búsqueda sistemática la efectuaron Bhat et al. (1996) con AES-KGF para rayos- γ en el rango de los PeV. Consideraron sólo los 39 GRBs con mayor fluencia⁴ ocurridos durante el periodo abril 1991-marzo 1993. Los límites superiores obtenidos fueron 2×10^{-12} fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Otro intento lo realizaron Catanese et al. (1996) para 115 GRBs con el detector CASAMIA, con límites superiores de 6×10^{-12} fotones $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E \geq 160$ TeV. Tampoco el experimento HEGRA en La Palma detectó por encima de 1 TeV un exceso significativo para más de 150 GRBs (Krawczynski et al. 1996, Padilla et al. 1997). En el rango 0.25-4 TeV, se ha llegado a sugerir que el Observatorio Whipple, podría, bajo condiciones ideales, detectar ~ 1 suceso al año (y sólo ~ 0.01 para HEGRA), pero hasta la fecha sólo se han conseguido límites superiores (Connors y McConnell 1996), lo mismo que para el experimento EAS-TOP ASA a $E \geq 10$ TeV (Aglietta et al. 1995).

Neutrinos y muones

La búsqueda de neutrinos, antineutrinos y muones provenientes bien del propio mecanismo intrínseco al GRB –como ha sido propuesto por Mészáros y Rees (1993) o Paczynski y Xu (1994)– o bien de los muones que se han de producir en la Tierra como consecuencia de los neutrinos, no llegaron a revelar ningún exceso con respecto al número normalmente observado en ausencia de un GRB. Estos experimentos fueron el telescopio LSD del Mount Blanc (Aglietta et al. 1995), el detector de Irvine-Michigan-Brookhaven (IMB) (LoSecco 1994, Becker-Szendy 1995) y el detector de muones Soudan-2 (De Muth et al. 1994). Los límites superiores establecidos hasta la fecha fueron $6 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ (para $\nu_e, \nu_\mu,$

⁴la fluencia (S) es el flujo integrado en unidad de tiempo (unidades de erg cm^{-2}).

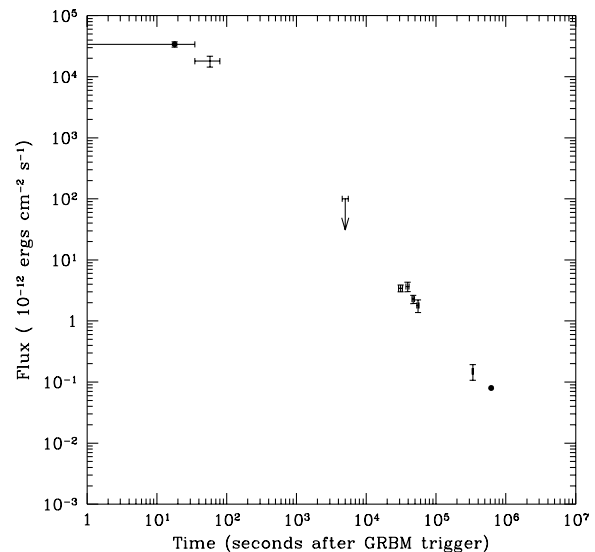


Fig. 6. La emisión de rayos-X que siguió a GRB 970228, según los datos de *BeppoSAX*, *Asca* y *Rosat*. Adaptado de Costa et al. (1997).

ν_τ a $20 \leq E_\nu \leq 100$ MeV) y $2.1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ (para $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ a $20 \leq E_\nu \leq 100$ MeV) (Aglietta et al. 1995).

1997 y 1998: Detección de las primeras contrapartidas en otras longitudes de onda

Emisión decreciente en rayos X

Con el lanzamiento del satélite *BeppoSAX*, ha sido posible detectar por vez primera, el 28 de Febrero de 1997, la primera evidencia clara de una cola de rayos X –el llamado *X-ray afterglow* en inglés– que siguió a GRB 970228. El satélite apuntó tan sólo 8 horas después a la posición gamma, conocida con una precisión de 5' gracias a las magníficas prestaciones de sus cámaras de gran campo (WFC) y allí encontró una fuente de rayos-X intensa, cuyo flujo X varió un factor 20 en 3 días. Véase la Fig. 6. No había duda alguna sobre su relación con GRB 970228. La fluencia en rayos-X era $\sim 40\%$ de la fluencia en rayos- γ , según Costa et al. (1997). Por ello esta emisión X no es solamente la cola de emisión a baja energía de la emisión γ del GRB, sino también un importante canal por el cual se disipa parte de la energía en una escala de tiempo completamente diferente. Otro de los resultados más importantes ha sido el origen no térmico de esta radiación (Frontera et al. 1998a).

Más de una veintena de veces se ha podido observar desde entonces este fenómeno: la mayoría por *BeppoSAX*, pero también por *RosatiXTE*, *Asca* y *Rosat*. Así por ejemplo, GRB 970828 (Marshall et al. 1997a, Remillard et al. 1997) ha sido igualmente detectado por *Asca* (Murakami et al. 1997) y *Rosat* (Greiner et

al. 1997). El espectro de rayos-X observado por *Asca* está fuertemente absorbido en la parte de los X de baja energía (implicando una densidad de columna $N_H \sim 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, Yoshida et al. 1998), lo que sugiere que el GRB ha ocurrido en un medio ultradenso.

Búsqueda de contrapartidas en el EUV

Boër et al. (1997b) han comunicado una observación por EUVE ~ 20 horas después de GRB 971214, pero sin detectar emisión alguna a 100 \AA . Asumiendo $N_H \sim 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, el límite superior al flujo en este rango es $1.7 \times 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Las contrapartidas ópticas

La mejora de la localización de los GRBs en virtud de la detección de su emisión en rayos-X por *BeppoSAX* y *RXTE* (conjuntamente con la *Tercera Red Interplanetaria de satélites*, *IPN3*) ha permitido en 1997-98 la detección de las primeras contrapartidas ópticas tan buscadas en los últimos 25 años. Así, el primer OT asociado sin lugar a dudas con un GRB ha sido el identificado para GRB 970228 el 28 de Febrero de 1997, 20 horas después de la explosión- γ , por Groot et al. (1997), gracias a la detección de la emisión X por *BeppoSAX*. A posteriori sería detectado por Pedersen et al. (1997) y Guarnieri et al. (1997), durante la fase de subida al máximo observada en la curva de luz. Éste se alcanzó ~ 20 horas después del fenómeno ($V \sim 21.3$), siendo seguido por un declive en forma de ley de potencias, con $F \propto t^{-1.2}$ (Galama et al. 1997, Bartolini et al. 1998). Se ha detectado igualmente un objeto extenso en la misma posición, tanto con telescopios en tierra (van Paradijs et al. 1997) como a partir de observaciones del *HST* 1 mes después (Sahu et al. 1997). Éstas se han vuelto a repetir 6 meses después y permitieron detectar el residuo del GRB (a $V = 28$) superpuesto a una fuente extensa ($V = 26$, Fruchter et al. 1997), habiéndose interpretado el objeto extenso como una galaxia, en virtud a las similitudes (diámetro aparente, tamaño) con otras presentes en la toma profunda del *HST* (el *Hubble Deep Field*).

La segunda contrapartida óptica está asociada a GRB 970508 siendo descubierta por Bond (1997) y ha sido observada sólo tres horas después de la explosión en imágenes sin filtro obtenidas por Pedersen et al. (1998a) y 4 horas en las bandas *U* y *R*, donde mostraba un fuerte exceso UV (Castro-Tirado et al. 1998b). La curva de luz alcanzaba el máximo dos días después ($R = 19.7$, Djorgovski et al. 1997) y fue seguida por un declive en forma de ley de potencias del tipo $t^{-1.2}$ (Fig. 7). Este residuo óptico ha sido estudiado en varios observatorios (Chevalier et al. 1997, Garcia et al. 1997, Mignoli et al. 1997, Schaefer et al. 1997b, Sokolov et al. 1998). Los primeros espectros se obtuvieron en Calar Alto (Castro-Tirado et al. 1997) y Hawaii (Metzger et al. 1997a), siendo este último el que ha permitido determinar el corrimiento al rojo ($z \geq 0.835$) constituyendo

la primera prueba de que al menos una fracción considerable de los GRBs ocurren a distancias cosmológicas (Metzger et al. 1997b). Observaciones posteriores (Pedersen et al. 1998a, Castro-Tirado et al. 1998c) indican la presencia de una fuente de brillo constante, supuestamente la galaxia que alberga el GRB. La luminosidad de la galaxia está por debajo de la *rodilla* de la función de luminosidad, L^* , y la detección de líneas de absorción de Mg I, conjuntamente con intensa emisión de [O II] –ambas indicativas de un medio denso– sugiere que la galaxia de GRB 970508 pudiera ser una galaxia compacta azul, con intensa formación estelar (Pian et al. 1998).

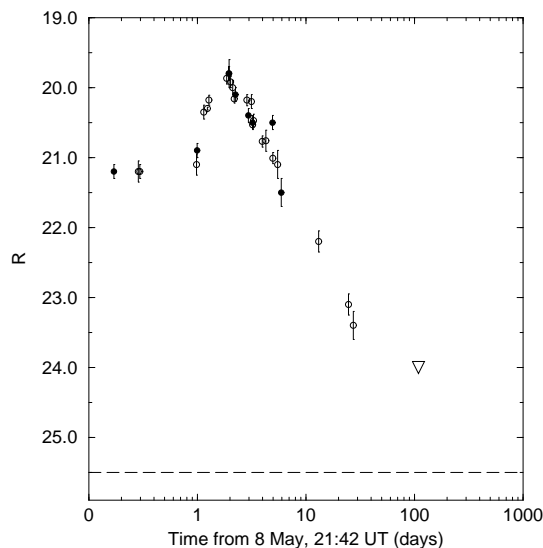


Fig. 7. La curva de luz del residuo óptico dejado por GRB 970508, en la banda *R*. Basado en observaciones obtenidas en La Palma, Calar Alto y Loiano. La línea horizontal a trazos indica la magnitud de la fuente con contribución constante, la galaxia, con $R \sim 25.5$. Adaptado de Castro-Tirado et al. (1998b).

El tercer residuo óptico asociado a un GRB se ha observado para GRB 971214, e identificado por Halpern et al. (1997) como un objeto de magnitud $I = 21.2$, que se debilitó 1.4 mag en 1 día. Independientemente, este objeto fue advertido por Itoh et al. (1997). Observaciones posteriores han confirmado el declive, igualmente siguiendo una ley de potencias (Diercks et al. 1997, Castander et al. 1997) con $F \propto t^{-1.4}$, de manera similar, pero más rápida, que los otros dos GRBs ya mencionados. Una serie de espectros de la galaxia madre ($R = 25.6$) adquiridos 1 mes después revelaron la existencia de una galaxia con $z = 3.42$ (Kulkarni et al. 1998), con una tasa de formación estelar de $1.0 \pm 0.5 M_{\odot} \text{ año}^{-1}$. Dada la distancia a la Galaxia, se deriva una emisión –supuestamente isotrópica– en rayos- γ de $3 \times 10^{53} \text{ erg}$, descartando gran parte de los modelos teóricos sobre los que hablaremos más adelante.

Con posterioridad, se han encontrado nuevas contrapartidas ópticas para otros cinco GRBs, siendo los casos más relevantes los de GRB 980425 y GRB 980703. Para GRB 980425, se ha hallado una supernova (SN

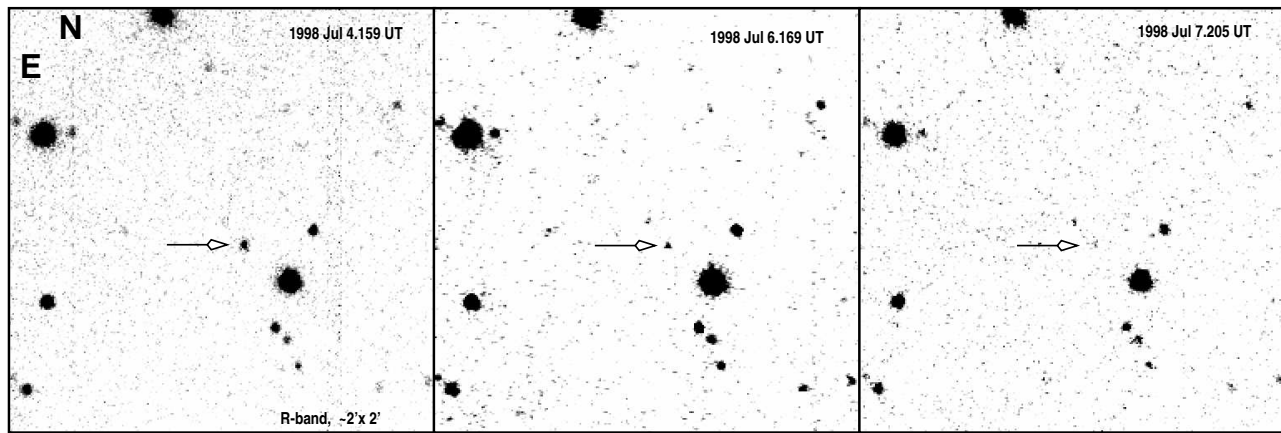


Fig. 8. El OT relacionado con GRB 980703, descubierto con el IAC-80 (Zapatero-Osorio et al. 1998), durante los cuatro días posteriores a la emisión γ . La última imagen muestra la galaxia madre ($R \sim 22.5$) que alberga el GRB cuyo OT es visible en las dos primeras imágenes.

1998bw) en la galaxia ESO 184-82 (a $z = 0.0085$) un día después de la ocurrencia del GRB (Galama et al. 1998). Aunque hay muchas dudas de que se trate de la contrapartida óptica, el hecho de que se produjera hacia el 24 de abril y las características de la emisión radio, favorecen la relación SN 1998bw/GRB980425 y apuntan a una población de GRBs debido a un tipo concreto de SNs.

La contrapartida de GRB 980703 ha sido encontrada independientemente por Bloom et al. (1998) y Zapatero-Osorio et al. (1998). Véase la Fig. 8. Un espectro obtenido a los pocos días reveló la línea de [O II] a $z = 0.96$, conjuntamente con líneas de absorción de Fe II y Mg II (Djorgovski et al. 1998). La galaxia madre es pues una galaxia compacta con brotes de formación estelar en la que la tasa de formación estelar es de $\sim 63 M_{\odot} \text{ año}^{-1}$. Ello de nuevo refuerza la idea de que parte de los GRBs están relacionados con la formación de estrellas masivas. La emisión –supuestamente isotrópa– en rayos- γ es $\sim 3 \times 10^{52}$ erg.

A pesar de búsquedas intensivas, no se han hallado contrapartidas ópticas ~ 1 día tras la explosión para GRB 970111, GRB 970402 o GRB 970828 (Gorosabel et al. 1998a, Pedersen et al. 1998b, Groot et al. 1998).

Contrapartidas en el IR cercano

Se han observado contrapartidas IR para GRB 970228, GRB 970508, GRB 971214, GRB 980329 y GRB 980703. Para GRB 970228, el flujo IR disminuye de $J = 21.0$ ($K \geq 19.5$) el 18 de marzo de 1997 (Klose y Tuffs 1997) hasta $J = 23.5$ ($K = 22.0$) el día 30 de marzo (Soifer et al. 1997). En el caso de GRB 970508, el flujo IR pasa de $K = 18.4$ a $K = 19.2$ en tres días (Morris et al. 1997). GRB 971214 es detectado en la banda K 3.5–5 horas después, comprobando que la luminosidad IR en este intervalo de tiempo se mantenía constante (Gorosabel et al. 1998b) mientras que en la banda J se observa disminuyendo de $J = 20.3$, el 15 de diciembre,

a $J = 21.5$ un día después (Tanvir et al. 1997). El caso de GRB 980329 es único, pues sólo ha sido claramente detectado en K (Larkin et al. 1998). Los datos en H para GRB 980703 revelan nuevamente la fase inicial de luminosidad constante, como en GRB 971214 (Castro-Tirado et al. 1998d).

Búsqueda de contrapartidas en el IR medio

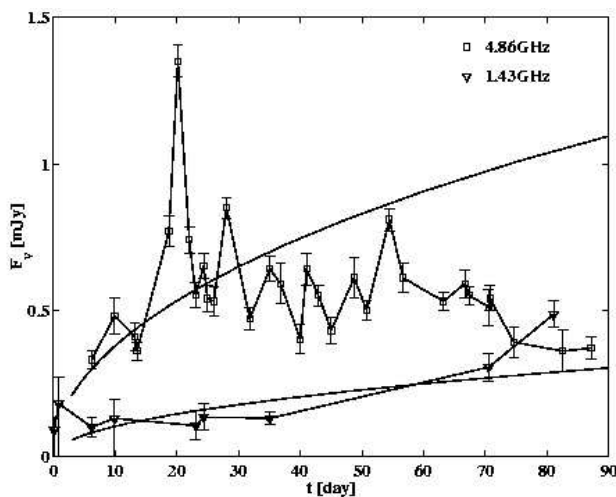
Siguiendo la detección de GRB 970402, el *Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO)* ha efectuado sendas observaciones 55 horas y 8 días después, en las bandas 8–15 μm (ISOCAM) y 174 μm (ISOPHOT). Se han detectado un total de 50 fuentes en la zona de error correspondiente, 7 de las cuales se encontraban en la posición de la fuente de rayos-X presumiblemente relacionada con la explosión. Con la excepción de BL Cir, ningún objeto variable se encontraba en la zona de error. Los límites superiores ($5\text{-}\sigma$) fueron $F_{(12\mu\text{m})} \leq 0.14$ mJy y $F_{(174\mu\text{m})} \leq 350$ mJy (Castro-Tirado et al. 1998e). Un balance positivo sí que se tiene para GRB 970508 (~ 60 μJy a 10 μm , Hanlon et al. 1998). Los resultados de la observación de GRB 980329 por el mismo satélite están siendo objeto de un detallado análisis en el momento de escribir estas líneas (Metcalf et al. 1998).

Detección en el rango milimétrico

GRB 970508 ha sido revelado como una fuente puntual a 86 GHz con el interferómetro del Plateau de Bure (PdB, IRAM), con un flujo de ~ 2 mJy entre el 19 y el 21 de mayo de 1997 (Bremer et al. 1998). En el caso GRB 971214, no se advierte ninguna emisión a 850 μm con el Telescopio James Clerk Maxwell. El límite superior es de 1 mJy entre el 17 y el 22 de diciembre (Smith y Tilanus 1997). GRB 980329 sí que ha sido detectado a 850 μm una semana después, a 4.5 ± 1.0 mJy, decauyendo poco después. Por último, observaciones con el PdB para GRB 980519 sólo aportan límites superiores (Bremer 1998).

Tabla 1. GRBs detectados por *BeppoSAX* y *RXTE* en 1997-98

GRB	rayos-X	óptico-IR	radio	Referencias
970111	sí ?	no	no	Feroci et al. (1998a)
970228	sí	sí	no	Costa et al. (1997)
970402	sí	no		Piro et al. (1997a)
970508	sí	sí	sí	Piro et al. (1997b)
970616	sí ?	no	no	Marshall et al. (1997b)
970815	sí ?	no	no	Smith et al. (1997)
970828	sí	no		Remillard et al. (1997a)
971024	sí	no		
971214	sí	sí	no	Antonelli et al. (1997)
971227	sí ?	no		Sofitta et al. (1997)
980109	no	sí ?		in 't Zand et al. (1998)
980326	sí	sí		Celidonio et al. (1998)
980329	sí	sí	sí	Frontera et al. (1998b)
980425	sí ?	sí ?	sí ?	Sofitta et al. (1998)
980515	?			Feroci et al. (1998b)
980519	sí	sí	sí	Muller et al. (1998)
980613	sí	sí		Smith et al. (1998)
980703	sí	sí	sí	Levine et al. (1998)

**Fig. 9.** La curva de luz de la radio fuente asociada a GRB 970508 durante los tres primeros meses, basado en las observaciones del VLA junto con dos de las predicciones de Waxman (1997). Adaptado de Frail et al. (1997b).

Detección de contrapartidas en radio

No se han encontrado para GRB 970111 o GRB 970228 (Frail et al. 1997a), sin embargo, observaciones rápidas con el VLA en la zona del GRB 970508, sí que han permitido detectar una radiofuente variable a 1.4, 4.8 y 8.4 GHz. Coincide con el remanente óptico y además mostraba un comportamiento poco frecuente, de tal modo que ha permanecido a un nivel de brillo constante, pero con fulguraciones ocasionales durante las cuales el flujo se incrementaba en un factor dos ó tres (Frail et al. 1997b), lo que también apoyaría la idea de la Galaxia como un núcleo galáctico activo (Fig. 9). Observacio-

nes con el VLBI no permitieron resolver la fuente (Taylor et al. 1997) y Frail et al. (1997a) han propuesto que las fluctuaciones serían el resultado de la dispersión por parte de las irregularidades en el gas interestelar ionizado. Además, el amortiguamiento de las fluctuaciones en función del tiempo, sugiere que la fuente se ha expandido hasta un diámetro considerablemente mayor. También ha sido detectada a 15 GHz (Pooley y Green 1997).

Otros dos GRBs con emisión radio han sido GRB 980329 y GRB 980703. El primero ha sido detectado con el VLA por Taylor et al. (1998) como una radiofuente altamente variable (un factor 4 en 1 día), al igual que GRB 970508. Es esta variabilidad la que ha llevado a descubrir una galaxia de magnitud $R = 25.5$ en dicha posición. El OT es prácticamente invisible en el óptico, siendo sólo detectado en el IR, debido a la alta extinción. El espectro en radio durante el primer mes después del GRB es de la forma $F(\nu) \propto \nu^{1/3}$ con un corte a bajas frecuencias debido a la autoabsorción sincrotrón.

GRB 980519 y GRB 980703 también se han detectado en radio. En este último, se han observado las mismas fluctuaciones que en el caso de GRB 980508, debidas a las irregularidades del gas interestelar ionizado (Frail et al. 1998). La Tabla 1 resume las características observacionales de los GRBs observados por *BeppoSAX* y *RossiXTE* en 1997 y 1998.

Modelos teóricos

Las observaciones descritas anteriormente han proporcionado la visión completa del espectro multirango de un GRB, como en el caso del GRB 970508 (Fig. 10).

¿ Pero qué es lo que origina el GRB? El mecanismo

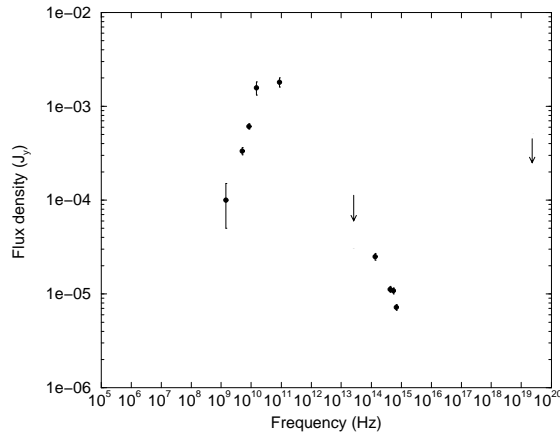


Fig. 10. El espectro multirango de GRB 970508 el ~ 20 de mayo de 1997, 12 días después del GRB, de Castro-Tirado (1998). Basado en observaciones obtenidos en el VLA, Ryle, IRAM PdBI, ISO, Keck y 6-m SAO (Frail et al. 1997b, Pooley y Green 1997, Bremer et al. 1998, Hanlon et al. 1998, Morris et al. 1997 y Sokolov et al. 1998). $p = 2.2$ según Galama et al. (1998).

interno que produce el GRB es uno de los enigmas que aún tardará tiempo en resolverse. No en vano, hasta 1994 existían más de 150 modelos teóricos publicados (véase Nemiroff 1994). El hecho de aceptar hoy en día que la gran mayoría –sino todos– los GRBs ocurran en otras galaxias, ha descartado casi todos los modelos existentes, salvo aquellos que invocan mecanismos capaces de producir 10^{51-54} erg en pocos segundos tales como:

i) coalescencia de estrellas de neutrones en un sistema binario (Narayan et al. 1992): tales estrellas de neutrones perduran durante $\sim 10^9$ años, adquiriendo altas velocidades de escape que hacen que los sistemas se encuentren lejos de las regiones densas donde se formaron sus progenitores. Este modelo admite la variante de sustituir una o las dos componentes por agujeros negros.

ii) una supernova “fallida” (Woosley 1993) o *hypernova* –término acuñado por Paczyński en 1998– en el que estrellas muy masivas producen una “bola de fuego sucia” con una luminosidad ~ 300 veces superior a la una SN normal. El final de tales estrellas masivas se produce en $\sim 10^6$ años, y una consecuencia natural de este modelo es que los GRBs estén asociados a regiones densas, con polvo abundante y en regiones activas de formación estelar. Actualmente estos son los modelos más favorecidos.

Lo único que parece claro es que una serie de choques internos son los que producen la emisión- γ tal como la vemos, y que los choques externos son los responsables del *afterglow* cuyo modelo detallamos a continuación.

Las características observacionales de las contrapartidas de los GRBs tienen acomodo dentro de los llamados modelos de “bola de fuego” (del inglés *fire-*

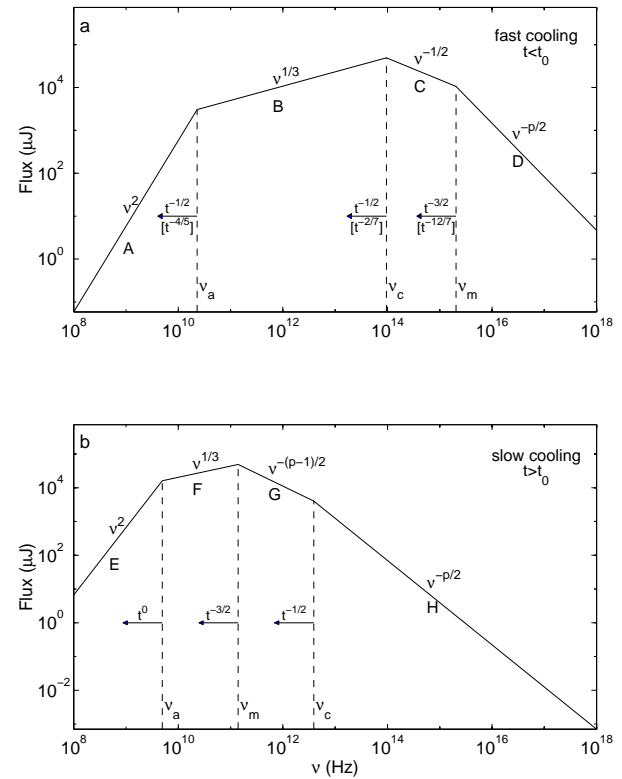


Fig. 11. El espectro multirango que se predice para una onda de choque relativista con una distribución de electrones en forma de ley de potencias como la descrita en el texto. Se muestran los dos casos de enfriamiento lento ($t > t_0$) y rápido ($t < t_0$). De Sari et al. (1998). Cómparese el segundo con el espectro de la figura 10.

ball models) propuestos por Mészáros et al. (1994), Mészáros y Rees (1997), Tavani (1997), Vietri (1997), Waxman (1997), Wijers et al. (1997), etc. En ellos, una fuente compacta libera $\sim 10^{53}$ erg en pocos segundos. El plasma se acelera a velocidades relativistas (formando la llamada bola de fuego) y la radiación emitida se debe a electrones con factores de Lorentz muy altos. La onda esférica de choque que se va moviendo por delante de la bola de fuego, va decelerándose conforme va chocando y barriendo el medio interestelar que va encontrando a su paso, produciendo emisión sincrotrón que se observa –casi siempre– desde los rayos-X hasta las ondas de radio (el ya reseñado *afterglow*).

Las propiedades de la onda de choque se pueden derivar a partir de las características del espectro de radiación sincrotrón (Sari et al. 1998) y el espectro multirango va a quedar descrito por tres parámetros:

a) la frecuencia de sincrotrón ν_m : la población de electrones presenta una distribución inicial de factores de Lorentz γ_e en forma de ley de potencias $dN d\gamma_e \propto \gamma_e^{-p}$ para valores mayores que un factor de Lorentz mínimo $\gamma_e \geq \gamma_m$ (i.e. por encima de la frecuencia de sincrotrón ν_m), que corresponde a los electrones de menor energía inyectados;

b) otra frecuencia ν_c (de corte) asociada al enfria-

miento de los electrones: lento ($\nu_c > \nu_m$) o rápido ($\nu_c < \nu_m$);

c) al flujo máximo $F_{\nu, max}$.

Aunque inicialmente $\nu_c < \nu_m$, al cabo de un tiempo t_0 , $\nu_c = \nu_m$ pues $\nu_c \propto t^{-1/2}$ y $\nu_m \propto t^{-3/2}$. En ese momento, la evolución de la onda de choque pasa a ser adiabática, con $\nu_c > \nu_m$ y el espectro varía como $F_\nu \propto \nu^{-(p-1)/2}$ para $\nu_m \leq \nu \leq \nu_c$; $F_\nu \propto \nu^{-p/2}$ para $\nu > \nu_c$ y $F_\nu \propto \nu^{1/3}$ para $\nu < \nu_m$. Véase la Fig. 11.

Así pues, la evolución del flujo en función del tiempo para una determinada frecuencia viene en función del evolución de ν_c ($\propto t^{-1/2}$) y ν_m ($\propto t^{-3/2}$). Para $\nu \leq \nu_c$ el flujo decae conforme a una ley de potencias de exponente α , $F \propto t^\alpha$ con $\alpha = (2-3p)/4$, lo que permite una segunda determinación independiente de p .

Aunque el comportamiento que se ha predicho se ha observado, en parte, en varios de los *afterglows*, aún quedan bastantes puntos por resolver (véase Katz y Piran 1998).

Conclusiones

La existencia de emisión de rayos-X posterior a la explosión gamma, es algo que se confirma en casi todos los casos estudiados hasta la fecha. No es el caso de las contrapartidas ópticas/IR, sólo detectadas en un $\sim 50\%$ de las ocasiones.

Hoy en día, está ampliamente aceptado que la mayoría de los GRBs, sino todos, acontecen a distancias cosmológicas, siendo pues los objetos más energéticos del Universo ($E \sim 10^{53}$ erg), a pesar de su limitada duración. Los brillantes remanentes que dejan tras de sí estas explosiones en todas las longitudes de onda, a buen seguro nos permitirán ahondar en el conocimiento de las galaxias a alto corrimiento al rojo, muchas de ellas con brotes de formación estelar y, en definitiva, del Universo temprano.

BeppoSAX y *RossiXTE* han abierto una nueva ventana en el campo de las explosiones cósmicas de rayos gamma. Se espera que tanto estos satélites como *CGRO* facilitarán los descubrimientos de otras contrapartidas y, conjuntamente con los futuros observatorios en altas energías (*AXAF*, *SPECTRUM X/T*, *XMM*, *INTEGRAL*, *HETE 2*) y próximos ingenios de la *Cuarta Red Interplanetaria*, *IPN4*, solventarán definitivamente el misterio de los GRBs.

Agradecimientos

Estoy muy agradecido a numerosos colegas por muchas y fructíferas discusiones. En particular a S. Brandt, M. Cerviño, E. Costa, M. Feroci, G. Fishman, F. Frontera, S. Golenetskii, J. Greiner, J. Gorosabel, S. Guzyi, R. Hudec, K. Hurley, J. Isern, J. C. Kouveliotou, N. Lund, J. M. Más, L. Metcalfe, H. Pedersen, M. de Santos, A. Shlyapnikov, R. Sunyaev, W. Wenzel, B. Wilson, C. Wolf, W. Wenzel y A. Yoshida. Asimismo agradecer a los comités españoles de asignación de tiempos por el

continuo apoyo a las observaciones de oportunidad que requiere la dura –y fuertemente competitiva– investigación en este campo. También es de justicia mencionar aquí el continuo apoyo de mi esposa, M. E. Alcoholado-Feltström, quien tantas veces ha esperado mi regreso cuando tras un GRB, he acudido de inmediato a los observatorios más cercanos (especialmente Calar Alto) a fin de obtener las correspondientes imágenes y, allí mismo efectuar el análisis pertinente durante las siguientes 40 horas (sin dormir).

Bibliografía

- Aggletta, M. et al. 1995, *A&SS. Sci.* 231, 327
 Ali, S. et al. 1997, *ApJ* 487, 114
 Antonelli, L. al. 1997, *IAU Circ.* 6792
 Atteia, J.-L. et al. 1985, *A&A* 152, 174
 Balsano, R. J. et al. 1996, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 575
 Barthelmy, S. D. et al. 1994, en *Gamma-ray Bursts*, eds. G. J. Fishman, J. Brainerd y K. Hurley, *AIP* 307, 392
 Bartolini, C. et al. 1998, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. A. Meegan, R. Preece y T. Koshut, *AIP* 428, 540
 Becker-Szendy, R. et al. 1995, *ApJ* 444, 415
 Bhat, P. N. et al. 1992, *Nature* 359, 217
 Bhat, P. N. et al. 1996, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 585
 Blaes, O., Todd, H., Antonucci, R., Hurley, K. y Smette, A. 1997, *ApJ* 479, 868
 Bloom, J. et al. 1998, *ApJ*, en prensa
 Boër, M., Atteia, J.-L., Gottardi, M. et al. 1988, *A&A* 202, 117
 Boër, M. et al. 1997a, *ApJ* 481, L39
 Boër, M. et al. 1997b, *IAU Circ.* 6795
 Bond, H. 1997, *IAU Circ.* 6655
 Bonnell, J. T. y Klebesadel, R. W. 1996, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 977
 Bontekoe, T. R. et al. 1995 *Ap&SS* 231, 285
 Borovička, J. et al. 1992, *A&A* 258, 379.
 Bremer, M. 1998, comunicación personal
 Bremer, M. et al. 1998, *A&A* 332, L13
 Castander, F. et al. 1997, *IAU Circ.* 6791
 Castro-Tirado, A. J. et al. 1994a, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. G. J. Fishman, J. J. Brainerd y K. Hurley, *AIP* 307, 17
 Castro-Tirado, A. J. et al. 1994b, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. G. J. Fishman, J. J. Brainerd y K. Hurley, *AIP* 307, 404
 Castro-Tirado, A. J. et al. 1997, *IAU Circ.* 6657
 Castro-Tirado, A. J. 1998, en *UV Astrophysics beyond the IUE Final Archive*, eds. R. González-Riestra, W. Wamsteker y, R. Harris, R., *ESA SP-413*, p. 659
 Castro-Tirado, A. J. et al. 1998a, *A&A*, en prensa
 Castro-Tirado, A. J. et al. 1998b, *Sci* 279, 1011
 Castro-Tirado, A. J. et al. 1998c, *IAU Circ.* 6848
 Castro-Tirado, A. J. et al. 1998d, *ApJ*, en prensa

- Castro-Tirado, A. J. et al 1998e, *A&A* 330, 14
- Catanese, M. et al. 1996, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 598
- Celidonio, G. et al. 1998, *IAU Circ.* 6851
- Chevalier, C. et al. 1981, *A&A* 100, L1
- Chevalier, C. et al. 1997, *IAU Circ.* 6663
- Connaughton, V. et al. 1996, in *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 603
- Connors, A. y McConnell, M. 1996, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 607
- Costa, E. et al. 1997, *Nat* 387, 783
- DeMuth, D. et al. 1994, in *Gamma-Ray Bursts*, eds. G. J. Fishman, J. J. Brainerd y K. Hurley, *AIP Conf. Proc.* 307, 475
- Diercks, A. et al. 1997, *IAU Circ.* 6791
- Djorgovski, S. G. et al. 1997, *Nat* 387, 876
- Djorgovski, S. G. et al. 1998, *ApJ*, en prensa
- Drinkwater, M. J. et al. 1997, *IAU Circ.* 6600
- Fenimore, E. et al. 1993, *Nat* 366, 40
- Feroci, M. et al. 1998a, *A&A* 332, L29
- Feroci, M. et al. 1998b, *IAU Circ.* 6909
- Fishman, G. J. et al., 1989, in *Proc. GRO Science Workshop*, ed. N. Johnson (Washington DC: NRL), (2) 39
- Fishman, G. J. y Meegan, C. A. 1995, *ARA&A* 33, 415
- Frail, D. et al. 1994, *ApJ* 437, L43
- Frail, D. et al. 1997a, *ApJ* 438, L91
- Frail, D. et al. 1997b, *Nat* 389, 261
- Frail, D. et al. 1998, *ApJ*, en prensa
- Frontera, F. et al. 1998a, *ApJ* 493, L67
- Frontera, F. et al. 1998b, *IAU Circ.* 6853
- Fruchter, A. et al. 1997, *IAU Circ.* 6747
- Galama, T. et al. 1997, *Nat* 387, 479
- Galama, T. et al. 1998, en preparacion
- Garcia, M. et al. 1997, *IAU Circ* 6661
- Giménez, A. y Castro-Tirado, A. J. 1998 en *Astronomía X*, Ed. Sirius, Madrid (en español), ISBN: 84-86.639-83-2
- Gorosabel, J. et al. 1998a, *A&A*, en prensa
- Gorosabel, J. et al. 1998b, *A&A* 335, L5
- Green, D. A. et al. 1996, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 617
- Greiner, J. y Motch, C. 1995, *A&A* 294, 177
- Greiner, J., Boër, M., Kahabka, P., Motch, C. y Voges, W. 1995, en *Lives of Neutron stars*, eds. M. Alpar et al., *NATO ASI C450*, Kluwer, 519
- Greiner, J. 1996a, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 627
- Greiner, J. et al. 1996b, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP Conf. Proc.* 384, 622
- Greiner, J. et al. 1997, *IAU Circ.* 6757
- Grindlay, J. E. et al. 1974, *ApJ* 192, L113
- Grindlay, J. E. et al. 1982, *Nat* 300, 730
- Groot P.J. et al. 1997, *IAU Circ.* 6584
- Groot P.J. et al. 1998, *ApJ* 493, L27
- Guarnieri, A. et al. 1997, *A&A* 328, L13
- Halpern, J. et al. 1997, *Nat* 393, 41
- Halzen, F. et al. 1991, *Nat* 353, 807
- Hanlon, L. et al. 1998, *A&A*, en prensa
- Hartmann, D. H. 1995, en *Flares and Flashes*, eds. J. Greiner, H. W. Duerbeck y R. E. Gershberg, *LNP* 454, 367
- Hjellming, R. M. y Ewald, S. P. 1981, *ApJ* 246, L137
- Hudec R. et al. 1987, *A&A* 75, 71
- Hudec R. 1993, *Astrophys. Lett. Comm.* 28, 359
- Hudec R. et al. 1994a, *A&A* 284, 839
- Hudec R. 1995, *Ap&SS* 231, 239
- Hurley, K. et al. 1994, *Nat* 372, 652
- Hurley, K. et al. 1995, *ApJ* 445, 348
- Hurley, K. et al. 1996, *ApJ* 469, L105
- Hurley, K. 1998, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. A. Meegan, R. Preece y T. Koshut, *AIP* 428, 387
- in 't Zand, J. et al. 1998, *IAU Circ.* 6805
- Itoh, N. et al. 1997, *IAU Circ.* 6788
- Katoh, M. et al. 1984, en *High Energy Transients in Astrophysics*, ed. S. Woosley, *AIP* 115
- Katz, J. I. y Piran, T. 1998, in *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. A. Meegan, R. Preece y T. Koshut, *AIP* 428, 689
- Klebesadel, R.W., Strong, I.B. y Olson, R.A. 1973, *ApJ* 182, L85
- Klose, S. et al. 1996, *ApJ* 470, L93
- Klose, S. y Tuffs, R. 1997, *IAU Circ.* 6611
- Koranyi, D. M. et al. 1994, *MNRAS* 271, 51
- Kouveliotou, C. et al. 1993, *ApJ* 413, L101
- Krawczynski, H. et al. 1996, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 656
- Kulkarni, S. et al. 1998, *Nat* 393, 35
- Larkin, J. et al. 1998, *GCN*, 44
- Larson, S. et al. 1996, *ApJ* 460, L95
- Lee, B. et al. 1996, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, *AIP* 384, 671
- Levine, A. et al. 1998, *IAU Circ.* 6966
- LoSecco, J. 1994, *ApJ* 425, 217
- Mannheim, K. et al. 1996, *ApJ* 467, 532
- Marshall, F. et al. 1997a, *IAU Circ.* 6727
- Marshall, F. et al. 1997b, *IAU Circ.* 6683
- Mazets, E. P. et al. 1981a, *Nat* 290, 378
- Mazets, E. P. et al. 1981b, *Ap&SS* 80, 3
- McNamara, B. y Harrison, T. E. 1994, *AJ* 107, 1825
- Meegan, C. A. et al. 1992, *Nat* 355, 143
- Meegan, C. A. et al. 1994, en *Gamma-Ray Bursts*, *AIP Conf. Proc.* 307, 3
- Meegan, C. et al. 1998, en *Gamma-Ray Bursts*, eds. C. A. Meegan, R. Preece y T. Koshut, *AIP* 428, 3
- Mészáros, P. y Rees, M. J. 1993, *ApJ* 418, L59
- Mészáros, P. et al. 1994, *ApJ* 432, 181
- Mészáros, P. y Rees, M. J. 1997, *ApJ* 476, 232
- Metcalfe, L. et al. 1998, en preparación
- Metzger, M. R. et al. 1997a, *IAU Circ.* 6655
- Metzger, M. R. et al. 1997b, *Nat* 387, 878
- Mignoli, M. et al. 1997, *IAU Circ.* 6661

- Morris, M. et al. 1997, IAU Circ. 6666
Muller, J. et al. 1998, IAU Circ. 6910
Murakami, T. et al. 1991, Nat 350, 592
Murakami, T. et al. 1996, PASJ 48, L9
Murakami, T. et al. 1997, IAU Circ. 6732
Narayan, R. et al. 1992, ApJ 395, L83
Nemiroff, R. 1994, Comments Astrophys. 17, 189
Paczyński, B. y Xu, G. 1994, ApJ 427, 708
Paczyński, B. 1998, ApJ 494, L45
Padilla, L. et al. 1997, Proc. XXV ICRC 3, 57
Palmer, D. et al. 1995, A&SS 231, 315
Pedersen, H. et al. 1983, ApJ 270, L43
Pedersen, H. et al. 1997, IAU Circ. 6580
Pedersen, H. et al. 1998a, ApJ 496, 311
Pedersen, H. et al. 1998b, A&A, en preparación
Pian, E. et al. 1998, ApJ 492, L103
Piro, L. et al. 1997a, IAU Circ. 6617
Piro, L. et al. 1997b, IAU Circ. 6656
Pizzichini, G. et al. 1986, ApJ 301, 641
Plunkett, S. et al. 1995, A&SS 231, 271
Pooley, G. y Green, D. 1997, IAU Circ. 6670
Remillard, R. et al. 1997 IAU Circ. 6726
Sahu, K. et al. 1997, Nat 387, 476
Sari, R. et al. 1998, ApJ 497, L17
Scargle, J. D. et al. 1998, en Gamma-Ray Bursts, eds. C. A. Meegan, R. Preece & T. Koshut, AIP 428, 181
Schaefer, B. E. et al. 1984, ApJ 286, L1
Schaefer, B. E., Cline, T. L., Desai, U. et al. 1987, ApJ 313, 226
Schaefer, B. E., Cline, T. L., Atteia, J.-L. et al. 1989, ApJ 340, 455
Schaefer, B. E. 1994, en Gamma-ray Bursts, eds. G. J. Fishman, J. J. Brainerd y K. Hurley, AIP 307, 382
Schaefer, B. E. et al. 1994a, ApJS 92, 292
Schaefer, B. E. et al. 1994b, ApJ 422, L71
Schaefer, B. E. et al. 1997a, ApJ 489, 693
Schaefer, B. E. et al. 1997b, IAU Circ. 6658
Smith, D. A. et al. 1997, IAU Circ. 6718
Smith, I. A. y Tilanus, R. P. J. 1997, GCN 24
Smith, I. A. y Tilanus, R. P. J. 1998, GCN 50
Smith, M. J. S. et al. 1998, IAU Circ. 6938
Sofitta, P. et al. 1997, IAUC 6797
Sofitta, P. et al. 1998, IAUC 6884
Soifer, B. et al. 1997, IAU Circ. 6619
Sokolov, V. V. et al. 1996, Astron. Lett. 22, 563
Sokolov, V. V. et al. 1998, en Gamma-Ray Bursts, eds. C. A. Meegan, R. Preece y T. Koshut, AIP 428, 525
Stacy, J. G. et al. 1996, en Gamma-Ray Bursts, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, AIP 384, 702
Stecker, F. W. y de Jager, O. C. 1997, ApJ 476, 712
Štěpán, P. y Hudec, R. 1996, A&A 305, 869
Tavani, M. 1997, ApJ 483, L87
Tanvir, N. et al. 1997, IAU Circ. 6796
Taylor, G. B. et al. 1997, Nat 389, 263
Taylor, G. B. et al. 1998, GCN 40
Trombka, J. I. et al. 1974, ApJ 194, L27
van Paradijs, J. et al. 1997, Nat 386, 686
Vietri, M. 1997, ApJ 488, L105
Vrba, F. et al. 1995, ApJ 446, 115
Vrba, F. 1996, en Gamma-Ray Bursts, eds. C. Kouveliotou, M. F. Briggs y G. J. Fishman, AIP 384, 565
Waxman, E. 1997, ApJ 489, L33
Wdowczyk, J. et al. 1972, J. Phys. A, 5, 1419
Wheaton, W. A. et al. 1973, ApJ 185, L57
Wijers, R. A. M. J. et al. 1997, MNRAS 288, L51
Woosley, S. 1993, ApJ 405, 273
Yoshida, A. y Murakami, T. 1994, en Gamma-Ray Bursts, eds. G. J. Fishman, J. J. Brainerd y K. Hurley, AIP 307, 333
Yoshida, A. et al. 1998, en Gamma-Ray Bursts, eds. C. A. Meegan, R. Preece y T. Koshut, AIP 428, 441
Zapatero-Osorio, M. R. et al. 1998, IAU Circ. 6747
-

Tesis doctorales

Parámetros físicos de manchas estelares

Pedro Amado González pja@sunct.ct.astro.it

Director/es: Brendan Byrne

Centro: Armagh Observatory/Queen's University of Belfast (Northern Ireland)

Lectura: 5 de diciembre de 1997

En este trabajo se revisa la validez de la hipótesis más importante introducida en los modelos fotométricos a la hora de interpretar las curvas de luz y color de estrellas con manchas. Dicha hipótesis es el uso de la función de Planck como modelo de distribución espectral de energía (DEE) para la fotosfera y las manchas en estrellas activas frías. Para ello, se realizaron nuevas calibraciones de parámetros fundamentales para estrellas de los últimos tipos. Dos de éstas, la calibración del índice de color (I_c-K) frente a la temperatura efectiva y la del parámetro de brillo superficial con el índice de color (I_c-K), parecen seguir relaciones diferentes para estrellas de distinto tipo de luminosidad. A su vez, los índices de color ($U-B$) y, en menor manera, ($B-V$) para las estrellas de tipo RS CVn de tipo espectral K y M, enanas, subgigantes y gigantes, aparecieron claramente afectados por el nivel de actividad, lo cual los invalida como "termómetros" para dichos tipos de estrella.

Muchos autores se han esforzado en determinar el efecto producido en la imagen reconstruida de la fotosfera estelar debido a los errores intrínsecos de los datos fotométricos o la indeterminación de algunos de los parámetros estelares, como la inclinación del eje rotacional. Sin embargo, muy poco se ha dicho del efecto debido al desconocimiento de la DEE de la luz proveniente de las manchas. Para este trabajo de tesis, se desarrolló un programa Fortran, usando las calibraciones arriba mencionadas, para producir curvas de luz y color sintéticas de estrellas con manchas, lo cual ha mostrado lo diferente que pueden llegar a ser los parámetros calculados para las manchas (especialmente áreas y temperaturas) si se utiliza una DEE errónea. También se calcularon curvas de luz teóricas de distribuciones de manchas problemáticas (manchas polares, en bandas ecuatoriales y con dos componentes de diversa temperatura) para estudiar la capacidad del programa a la hora de detectarlas en observaciones reales.

Además de los estudios teóricos anteriormente mencionados, el programa se usó también para determinar los parámetros de las manchas en estrellas observadas. Para restringir mejor dichos parámetros y ayudar a superar las dificultades inherentes a los diversos métodos existentes para el modelado de manchas, se combinaron modelos fotométricos y de bandas moleculares de Óxido de Titanio (TiO) de la estrella activa AG Dor. Los resultados sugieren que la presencia de la banda de TiO en el espectro de esta estrella es debida sólo a la componente de la distribución de manchas uniformemente distribuida sobre la fotosfera estelar.

Galaxias con formación estelar intensa: sistemas binarios y emisión X

Miguel Cerviño Saavedra mcs@laeff.esa.es

Director/es: José Miguel Mas Hesse

Centro: Laboratorio de astrofísica Espacial y Física Fundamental (INTA)

Lectura: 24 de abril de 1998

En este trabajo se desarrollan modelos de síntesis evolutiva de población estelar en los que se incluye la evolución de sistemas binarios en un rango de edades de 0 a 30 millones de años desde la formación de las estrellas masivas del brote.

El trabajo extiende los modelos presentados por Mas-Hesse & Kunth (1991, A&ASS, 88, 317) y Cerviño & Mas-Hesse (1994 A&A, 284, 749) incorporando la emisión en rayos X y la influencia de sistemas binarios en la evolución del brote de formación estelar, obteniéndose la emisión multirango desde radio a rayos X de galaxias que han sufrido este tipo de procesos. También se han actualizado los valores utilizados en versiones anteriores del código para los casos que haya sido necesario. Dado que tanto la emisión en rayos X como la influencia de sistemas binarios no ha sido estudiada anteriormente se ha hecho un especial énfasis en estos aspectos.

Por último hemos aplicado los modelos a un conjunto de galaxias con distintos grados de actividad (galaxias con formación estelar y núcleos activos de galaxias) para discriminar cuál es el origen de la emisión en los distintos rangos de energía del continuo multirango.

Astrometría y fotometría de cúmulos abiertos: NGC 1750 y NGC 1758

David Galadí-Enríquez dgaladi@am.ub.es

Director/es: Carme Jordi y Enric Trullols

Centro: Departament d'Astronomia i Meteorologia, Universitat de Barcelona

Lectura: 23 de marzo de 1998

Presentamos una contribución al estudio observacional de los cúmulos abiertos empleando técnicas astrométricas y fotométricas. El trabajo aborda la obtención y reducción de observaciones, el desarrollo y uso de técnicas novedosas de tratamiento y análisis de los datos, y alcanza diversas conclusiones acerca de dos cúmulos abiertos poco estudiados hasta la fecha. El área analizada comprende una región de 5 grados cuadrados en la dirección del anticentro galáctico, en Taurus. En esta zona, fuentes previas proponen hasta tres cúmulos abiertos superpuestos: NGC 1746, NGC 1750 y NGC 1758.

Nuestra fotometría CCD *UBVRI* absoluta fue obtenida en Calar Alto. Comprende datos para 3224 estrellas y alcanza una magnitud límite $V = 20$.

La fotometría fotográfica y la astrometría fotográfica se obtuvieron de un conjunto de 30 placas fotográficas de diversos orígenes, con una diferencia de época máxima de 103 años. La mayoría de las placas se midieron en el Observatorio de Paris empleando la máquina MAMA.

La calibración fotométrica de las placas permitió obtener fotometría fotográfica *BVR* para 39762 estrellas. La transformación al sistema estándar se efectuó utilizando las medidas CCD como referencia.

La astrometría se elaboró aplicando una versión del algoritmo iterativo de superposición central. Las posiciones y los movimientos propios relativos están libres de efectos de magnitud, gracias al tratamiento riguroso de las ecuaciones de magnitud utilizando las medidas astrométricas CCD como referencia. Las observaciones CCD se incorporan como una 'seudo-placa' en el proceso de cálculo de movimientos propios. Se obtienen movimientos propios relativos para 45036 estrellas. Los errores internos medios son de 1 mas/yr tanto en x como en y para estrellas billantes ($R < 16$).

Los métodos clásicos paramétricos para la segregación de cúmulo y campo no son aplicables en nuestro caso. Se elabora un método no paramétrico para la determinación empírica de funciones de frecuencias en un espacio observacional bidimensional arbitrario mediante estimadores locales de la densidad basados en funciones núcleo. La aplicación a una muestra seleccionada de nuestras observaciones permite la asignación de probabilidades individuales de pertenencia en tres planos observacionales: cinemáticos (movimientos propios), espacial (x, y) y fotométrico (diagrama color-magnitud). Se identifican así 92 miembros de NGC 1750 y 66 miembros de NGC 1758 hasta $R = 15$.

El análisis de las relaciones de miembros permite determinar los parámetros físicos fundamentales de los

cúmulos. El exceso de color de ambos objetos es $E(B - V) = 0.34$. NGC 1750 se halla a 630 pc del Sol y tiene una edad de 200 ± 50 Myr. NGC 1758 está a 760 pc del Sol y su edad es de 400 ± 100 Myr. La separación mutua, el movimiento relativo y la diferencia de edades de los cúmulos permite afirmar su independencia física. La entrada de catálogo NGC 1746 no corresponde a ningún objeto real en la zona observada.

Galaxias Seyfert: Una perspectiva con el Observatorio Espacial Infrarrojo (ISO)

Ana María Pérez García

apg@11.iac.es

Director/es: José Miguel Rodríguez Espinosa

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Lectura: 17 de julio de 1998

la emisión en el IR lejano no es de origen nuclear.

Las galaxias Seyfert, y en general las galaxias activas, emiten una parte muy importante de su luminosidad en el infrarrojo medio y lejano. Por ello, el estudio de la emisión IR en las galaxias Seyfert es fundamental para entender el origen de su extraordinaria actividad, así como para discernir la relación entre los distintos tipos de galaxias Seyfert.

Dos importantes cuestiones no están aún resueltas. No está claro por ejemplo si la radiación IR de las galaxias Seyfert es toda de origen térmico o si por el contrario hay alguna contribución de emisión no térmica. Por otro lado no se conoce si la emisión en el IR lejano es extensa, y si lo es, cuál es su extensión. Los datos del satélite ISO ofrecen la posibilidad, por primera vez, de hacer un estudio exhaustivo de las distribuciones espectrales de energía en el IR medio y lejano de una muestra completa de galaxias Seyfert.

En este trabajo hemos aplicado a las distribuciones espectrales de energía un método de inversión bayesiano obteniendo dos resultados fundamentales: 1) que la distribución espectral IR de energía en galaxias Seyfert puede explicarse mediante emisión térmica de energía y 2) que esta emisión es suma de tres componentes térmicas, una templada, una fría y otra muy fría. La interpretación inmediata de este resultado es que la parte más caliente del espectro en el IR medio y lejano es emisión térmica de polvo calentado por el núcleo activo y/o por brotes de formación estelar activa en la región circumnuclear, mientras que la emisión más fría está originada en la galaxia huésped, por polvo calentado en regiones de formación estelar en el disco y por el campo de radiación del medio interestelar.

La comparación entre los parámetros obtenidos del análisis de las distribuciones espectrales de energía para los dos tipos de galaxias Seyfert (temperaturas, flujos, luminosidades), y los resultados de las correlaciones con la emisión de los objetos en otros rangos espectrales (radio y rayos X) remarcan la importancia de la galaxia huésped. Por otra parte, en general, las propiedades nucleares quedan explicadas por el modelo unificado de AGN, que mantiene que la diferencia entre las Seyfert 1 y las Seyfert 2 se deben a efectos de orientación.

Se ha conseguido también cartografiar la emisión IR lejana de parte de los objetos de la muestra, llegándose a la conclusión de que la emisión es extensa, y que su extensión es comparable a la extensión en el rango óptico de los objetos. La existencia además de una región brillante extranuclear en el mapa de uno de los objetos nos afirma en la idea de que gran parte de

Reseñas de libros

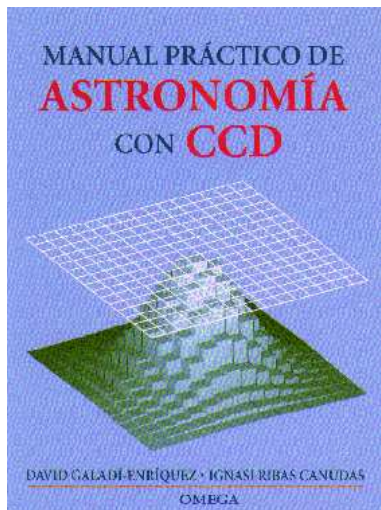
Manual práctico de astronomía con CCD

Autor/es: David Galadí-Enríquez e Ignasi Ribas Canudas

Editorial: Omega

Páginas: 130 **ISBN:** 84-282-1169-8

Precio: 2500 pta.



Esta obra constituye una novedad destacada en el mercado de libros de astronomía en lengua castellana. Es un manual básico sobre la estructura, funcionamiento y utilización de cámaras CCD, en el que no se ha descuidado la explotación científica de las imágenes obtenidas. El libro está destinado a la comunidad de astrónomos aficionados, aunque los estudiantes de astronomía a nivel universitario lo encontrarán provechoso para su formación práctica.

Los autores, investigadores del Departament d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona, han pretendido, y a mi entender conseguido, poner a disposición de los aficionados avanzados los conocimientos que necesitan para introducirse en las técnicas CCD. Es de esperar que la difusión de este libro (claro y riguroso) contribuya a mejorar la calidad y la cantidad de las aportaciones de los aficionados a la astronomía española.

El libro, conciso pero completo, comienza con un breve capítulo dedicado a la evolución histórica de los detectores astronómicos, al que siguen los dedicados a la descripción de la estructura y funcionamiento de las cámaras CCD, el tratamiento básico de las imágenes, los puntos básicos de la fotometría y la astrometría con CCD, y orientaciones sobre técnicas de reconstrucción digital de imágenes. Cabe mencionar el esfuerzo de normalización terminológica (a veces discutible) realizado por los autores, plasmado en un completo glosario final que incluye también los términos en inglés y la traducción adoptada.

Si bien algunos asuntos podrían haberse tratado más en profundidad, y aunque el número y calidad de las ilustraciones es susceptible de mejora, el *Manual práctico de astronomía con CCD* constituye un excelente punto de partida para aficionados y estudiantes.

Jordi Torra Roca

jordi@am.ub.es

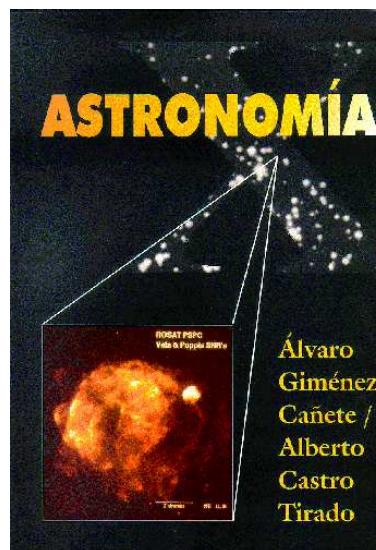
Astronomía X

Autor/es: Álvaro Giménez Cañete y Alberto Castro Tirado

Editorial: Equipo Sirius

Páginas: 270 **ISBN:** 84-86639-83-2

Precio: 2650 pta.



No hay muchos libros sobre Astronomía de rayos X, y entre ellos *Astronomía X* ocupa un lugar destacado. Para empezar, es el único libro monográfico en castellano sobre este tema que conozco. Esto lo hace muy adecuado tanto como material de trabajo para estudiantes, como para introducción para el público interesado en Astronomía.

Pero los méritos de este libro distan mucho de acabarse en el hecho de estar escrito en castellano, a mi modo de ver conjuga de manera muy acertada dos objetivos importantes. Por un lado, transmite la "aventura del saber", en el sentido de que los pasos iniciales en esta rama de la Astronomía tenían mucho de espíritu de frontera, de probar posibilidades nuevas y de explorar territorios desconocidos, y este espíritu está muy bien reflejado en los capítulos iniciales del libro.

Por otro lado, trata con detenimiento las técnicas fundamentales de observación en rayos X (que, por ser distintas a las del óptico, requieren mayor explicación), los principales instrumentos (pasados, presentes y futuros), y los mecanismos de los principales tipos de fuentes de emisión de rayos X. Esta vertiente del libro lo hace muy adecuado también como introducción a la Astronomía de rayos X para estudiantes de posgrado.

Este acierto en compaginar con éxito estos dos aspectos (la divulgación y el rigor), junto con su formato atractivo y su precio asequible (2650 ptas si se compra directamente del Equipo Sirius, que son los editores) lo hacen muy recomendable para un público muy amplio.

Otros libros adecuados para introducirse en la Astronomía de rayos X son: *The X-ray Universe* de W. Tucker y R. Giacconi (1986, *Harvard University Press*), y *Exploring the X-ray Universe* de P.A. Charles y F.D. Seward (1995, *Cambridge University Press*). El primero está escrito a un nivel más elemental, y el segundo es más detallado en sus descripciones Astrofísicas. *Astronomía X* cubre con brillantez el nivel intermedio.

Francisco J. Carrera Troyano carreraf@ifca.unican.es



Sociedad Española de Astronomía
Av. Diagonal, 647
E-08028 Barcelona

Secretaría: secretaria@sea.am.ub.es
Teléfono: 93-4021125

<http://sea.am.ub.es>