Boletín

Sociedad Española de Astronomía

ISSN 1575-3476
Depósito legal M-18326-1999
Número 5, enero 2001

Contenidos

Editorial ..... **i**

IV Reunión Científica de la SEA ..... **ii**
José Angel Docobo Durántez

El Círculo Astronómico Mediterráneo ..... **iii**
Juan Vicente Pérez Ortiz

El Gran Telescopio Canarias en construcción ..... **iv**
Pedro Álvarez Martín

Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica ..... **vi**
Rafael Rodrigo Montero, Gestor del PNAA

El telescopio Liverpool ..... **vii**
Iain A. Steele, Universidad de Liverpool John Moores

Discos protoplanetarios **1**
José Francisco Gómez Rivero

Algunas aplicaciones científicas de la espectroscopia 2D **12**
Evencio Mediavilla Gradolph, Santiago Arribas Mocoroa, Adolfo García Marín, José Luís Rasilla Piñeiro y Begoña García Lorenzo

Tesis doctorales ..... **x**

Métodos de análisis de la radiación cósmica del fondo de microondas y el efecto Sunyaev-Zel'dovich x
José M. Diego Rodríguez

Dinámica de las tormentas de gran escala en las atmósferas de Júpiter y Saturno xi
Ricardo Hueso Alonso

Búsqueda de fuentes cósmicas de radiación gamma de muy alta energía con el detector AIROBICC xii
Abelardo Moralejo Olaizola

Las propiedades del medio interestelar ionizado en galaxias espirales xiii
Almudena Zurita Muñoz

Reseñas de libros ..... **xiv**

Fotografiar el cielo xiv
Vicent Martínez García

Tras la sombra de la luna: últimos eclipses del milenio xiv
Benjamín Montesinos Comino

Comité Editorial

Agustín Sánchez-Lavega (Coordinador)
wupsalaa@bi.ehu.es
Antonio 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

Javier Gorgas
fjg@astrax.fis.ucm.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

Bueno, ahora sí, a pesar de los fastos celebrados hace poco mas de un año, este es el momento de decir que estamos en un nuevo siglo y en un nuevo milenio. El año 2001 y el siglo XXI, a pesar de las perspectivas tecnológicas que muchas novelas y películas profetizaban, no son más que una continuación natural de lo que hemos vivido al final de los 90. Aunque suene de entrada a pesimista, los claroscuros que el año 2000 trajo sobre la ciencia en España y sobre la Astronomía en particular no parece que vayan a disiparse rápidamente en 2001, y es más, da la impresión de que son más abundantes los nubarrones oscuros que los claros a través de los que podamos ver algo de luz. El panorama se parece al de una mala noche de observación.

Pero comencemos con los asuntos positivos. Celebramos en Santiago de Compostela nuestra IV Reunión Científica. Por primera vez se tuvieron que organizar sesiones paralelas, dada la gran demanda de charlas. Los comités científico y local realizaron una buena labor para acomodar todas las solicitudes de contribuciones orales, y como ya se demostró en la reunión de Tenerife, este congreso "multidisciplinar" se va asentando cada vez más como punto de encuentro de la mayoría de los astrónomos españoles y como foro ideal de iniciación para los más jóvenes. Incluimos en este número una reseña de la IV Reunión Científica, escrita por José Angel Docobo.

Durante la Asamblea Ordinaria, se produjo el relevo de parte de la Junta Directiva de la SEA. Jon Marcaide, Artemio Herrero y Rosa Domínguez dejan sus puestos de Presidente, Tesoreso y Vocal a Eduard Salvador, Javier Gorgas y Minia Manteiga; el cargo de Vicepresidente pasa a ser ocupado por José Miguel Rodríguez Espinosa. A los que se van es de ley agradecerles sinceramente todo su esfuerzo en las múltiples tareas que han acometido, y a los que se incorporan, la mejor de las venturas.

Vamos con los nubarrones...todos hemos podido leer en la prensa el seguimiento que se ha hecho de la lamentable situación de muchos investigadores postdoctorales, contratados de forma precaria la mayoría de las veces, debido al hecho de que sus contratos deben estar adscritos a un proyecto de investigación en vigor y a que no siempre coinciden los periodos de evaluación y vigencia de proyectos y contratos. Muchos de ellos no han conseguido la prórroga de sus contratos hasta los cinco años, y desgraciadamente, si algo urgente no se hace, quizás tengan que abandonar la investigación en un futuro no muy lejano, con la consiguiente pérdida de la experiencia fraguada en una larga y sacrificada carrera.

Y eso no es todo: los retrasos en las convocatorias y en los pagos de las anualidades a los proyectos en curso hacen que los grupos de investigación estén literalmente desesperados y más preocupados de resolver sus problemas financieros que de sacar adelante la ciencia para la que solicitaron sus subvenciones.

La creación del Ministerio de Ciencia y Tecnología, que prometía ser una solución a muchos de estos problemas no ha hecho más que empeorar la situación. Da la impresión de que los grandes planes, inversiones y esfuerzos del Ministerio se reducen al campo de las tarifas planas y las telefonías moviles y que se está haciendo muy poco por consolidar el tejido científico español.

Sería muy triste volver a las épocas del "...que inventen ellos...", pero tal y como están las cosas, el desánimo es algo que está cundiendo en demasía en los laboratorios, departamentos universitarios e institutos de Astrofísica españoles. Urgen soluciones por parte de las autoridades políticas, y para ello se necesita que el colectivo de científicos se deje oir, que utilice los foros de que dispone para hacer llegar sus quejas a sus superiores, hacerlas públicas y proponer vias de salida. No quisieramos dejar la impresión de que la batalla está perdida, de modo que animamos desde aqui al colectivo que representa esta sociedad a utilizar esos cauces. Contamos en este Boletín con una contribución de Rafael Rodrigo, gestor del Plan Nacional de Astronomía y Astrofísica. La existencia del nuevo Plan y la presencia de gestores expertos, como en este caso, nos hace albergar esperanzas de que la situación mejorará en el futuro, y de que ellos puedan concienciar a las autoridades del Ministerio de que es imprescindible dar, desde lo mas alto, el empuje que la ciencia merece.

Este número os ofrece además, como ya es habitual, dos artículos de revisión, dos reseñas de libros y dos contribuciones dedicadas a telescopios que pronto van a estar operativos para la comunidad española, el Gran Telescopio Canarias y el Telescopio Liverpool, un atractivo proyecto para aquellos astrónomos interesados en el estudio de objetos variables y de sucesos astronómicamente no predecibles. Continuamos con la serie de artículos dedicados a describir las actividades de aquellas agrupaciones o sociedades cuya labor se centra en la difusión de la Astronomía a nivel popular; esta vez conoceremos un poco más el trabajo y los medios de que dispone el Círculo Astronómico Mediterráneo. No pueden faltar, por último, los ya clásicos resúmenes de algunas tesis doctorales.

Los editores

IV Reunión Científica de la SEA

Como continuación de las celebradas anteriormente en Alicante, San Sebastián y La Laguna, la Sociedad Española de Astronomía organizó su cuarta Reunión Científica del 11 al 14 de septiembre en Santiago de Compostela. Más de 170 astrónomos se dieron cita en la emblemática ciudad gallega con el fin primordial de dar a conocer sus investigaciones recientes, así como para intercambiar resultados y opiniones.

Para la mayoría, fueron cuatro dias vividos con gran intensidad, dado lo apretado del programa, pero, para los organizadores, el trabajo venía de catorce meses atrás cuando se reunió por primera vez el Comité Organizador Científico (COC) en el Observatorio Astronómico Ramón María Aller (OARMA). Dicho comité, constituido por Rosa Domínguez Tenreiro (Presidenta), Xavier Barcons, José Angel Docobo Durántez, Javier Gorgas, Fernando Moreno Insertis y José Miguel Rodríguez Espinosa, comenzó enseguida a marcar las líneas maestras a seguir en cuanto a conferenciantes invitados, primer anuncio, pagina web, criterios para la concesión de ayudas, etc.

Por su parte, el Comité Organizador Local (COL), presidido por quien suscribe y compuesto por miembros y colaboradores del OARMA, J.F. Ling (secretaria), V. Tamazian (secretario), C. Prieto, P. Abelleira, J. Blanco y M. Andrade, dio sus primeros pasos, entre los que destacaría el conseguir una prereserva de plazas en la residencia universitaria Monte da Condesa, próxima al lugar de la Reunión. En un principio, las fechas elegidas habían sido del 18 al 21, para las que disponíamos del Auditorio Universitario, si bien al tenerlas que cambiar por motivos de coincidencia con un Congreso en Valencia, se perdió tal opción y hubo que buscar otra sede, que finalmente fue la Facultad de Matemáticas. Visto el desarrollo de la Reunión Científica, pienso que, al final, el cambio fue beneficioso, ya que pudimos usar dos salas contiguas que de la otra forma hubiera sido más problemático. En efecto, dada la gran asistencia de participantes, fue, por primera vez, necesario arbitrar sesiones paralelas junto a otras de caracter plenario.

Despues de algunas consultas previas, los conferenciantes invitados fueron J.E. Barnes, M. Begelman, R. Jiménez, H.A. McAlister, B. Ruiz Cobo y P. Ruiz Lapuente, a los que hubo que agregar a H. Socas Navarro como autor de la Tesis Doctoral premiada por la SEA. Tras otras dos reuniones del COC, en marzo (Madrid) y en junio (Santiago de Compostela), el programa científico quedó finalmente estructurado en 14 sesiones (8 plenarias), en las que se presentaron 95 comunicaciones representativas de prácticamente todas las ramas de la Astronomía. 50 posters completaron las contribuciones científicas.

El acto inaugural tuvo lugar en el Salón Noble del Pazo de Fonseca y fue presidido por el Excmo. y Magco. Sr. Rector de la Universidad de Santiago, Profesor Francisco Darío Villanueva Prieto y, junto a él, el Ilmo. Sr. Decano de la Facultad de Matemáticas, Prof. Enrique Macías Virgos, el Ilmo. Sr. Presidente de la SEA en funciones, Prof. Eduardo Salvador Solé (el Profesor Marcaide no se pudo desplazar debido a un inoportuno accidente), la presidenta del COC, Prof. Rosa Domínguez Tenreiro y el presidente del COL, Prof. José Angel Docobo Durántez. Después de dicho acto, y en el mismo salón, tuvo lugar la primera sesión científica. Ya por la tarde, y para el resto de los días, éstas se trasladaron a las dos salas habilitadas al efecto en la Facultad y en cuyas inmediaciones estaba también el lugar de exposición de los posters.

Lo apretado de las jornadas de trabajo, unido a la celebración de la Asamblea General de la SEA, no fue impedimento para que los asistentes pudieran disfrutar de los distintos actos sociales preparados por el COL: vino de bienvenida ofrecido por el rectorado en los jardines de Fonseca y amenizado por el cuarteto Loriga Sax, visita guiada a la ciudad monumental, concierto de la coral Cantigas e Agarimos y cena de despedida en la localidad de O Grove que, a pesar de que la niebla deslució la visita a la isla de A Toxa, creo que mereció la pena.

En el apartado de agradecimientos cabe mencionar a las entidades que con su apoyo hicieron posible el evento: Dirección General de Enseñanza Superior, la Xunta de Galicia, la propia SEA, el CSIC, el Instituto de Astrofísica de Canarias, la Universidade de Santiago de Compostela, la Universidad Autónoma de Madrid, la Universidad Complutense de Madrid y Caixa Galicia. Los organizadores (COC y COL) hicimos todo lo posible, y a veces casi lo imposible, para que todo saliera bien. Incluso el tiempo acompañó. Esperamos que se nos sepan disculpar los fallos cometidos.

José Angel Docobo Durántez oadoco@usc.es

El Círculo Astronómico Mediterráneo

El Círculo Astronómico Mediterráneo fue fundado hace diez años, en 1990, para aglutinar a un grupo de Asociaciones de Astrónomos no profesionales asesorados por profesionales en torno a un Observatorio y un Aula de Astronomía, que la Caja de Ahorros del Mediterráneo (CAM), mediante su Obra Social, había instalado en su Centro Educativo del Medio Ambiente "Los Molinos", centro que venía funcionando desde principios de los años 80 en Crevillente, Alicante.

La idea era que, con la colaboración de algunos profesionales de las Universidades de Alicante y Valencia se pusiesen a disposición de los aficionados a la Astronomía, además del Observatorio, con bastante instrumental semiprofesional, una serie de orientaciones para utilizar con provecho dichas instalaciones y asimismo, promover todo cuanto fuese útil para la investigación y divulgación de la Astronomía.

La entidad promotora viene financiando desde entonces todas las actividades del Círculo Astronómico Mediterráneo, que no se limitan al mantenimiento del Observatorio y el Aula de Astronomía, sino que se extienden a otras actividades, como veremos a continuación.

El observatorio contiene en la actualidad un telescopio Newton de 400 mm con focal 1 800 mm, un telescopio refractor apocromático de 160 mm especial para observación de planetas y gran variedad de oculares y filtros, además de cámaras para astrofotografía, un fotómetro fotoeléctrico y una cámara CCD de 700×700 píxeles, además de una CCD st4 para seguimiento y un par de ordenadores.

Se explota en régimen de solicitud de tiempo por las 20 agrupaciones de astrónomos aficionados, asesorados por profesionales, que son atendidos por un Becario Instrumentista, cuya beca, otorgada por el ICE de la Universidad de Alicante, está costeada por la CAM.

En estos años que lleva de funcionamiento se han realizado innumerables visitas para observaciones tanto en programas de divulgación como de trabajos en astrofotografía CCD, etc. El Aula de Astronomía contiene varios telescopios, relojes de sol y otros elementos didácticos, así como un pequeño planetario y una sala de proyecciones, donde se pueden recibir en circuito cerrado las imágenes del observatorio en directo, además de una "Terraza Astronómica".

Desde su fundación, el Círculo Astronómico ha realizado gran cantidad de actividades, como observaciones públicas de eclipses de luna con retransmisiones de televisión. También ha atendido a grupos de escolares y otras asociaciones como Scouts, amas de casa, etc.

Por otro lado, y dentro de la filosofía de apoyo a la divulgación, hemos organizado las II Jornadas Nacionales de Astronomía en la Enseñanza en 1993 y, desde hace cinco años, se viene realizando la Escuela de Astronomía y Astrofísica para Profesores con un gran éxito, en la que el profesorado suele ser en su mayoría perteneciente a la SEA. En 1994 se organizó una expedición a Bolivia para observar el eclipse de sol del 3 noviembre, del que se realizó un vídeo divulgativo sobre este fenómeno.

En nuestro afán por ayudar al desarrollo de la Astronomía, hemos organizado actividades de apoyo al mundo profesional, como:

- Organización de la I Reunión Científica de la SEA.
- Organización del Coloquio 175 de la Unión Astronómica Internacional (IAU) cuyo tema fue "*The Be Phenomenon in Early Type Stars*".
- Ciclos de conferencias sobre Astronomía impartidas por profesionales.

Por otro lado y ya fuera de los presupuestos del Círculo Astronómico Mediterráneo, la CAM, sensible a la demanda social sobre la cultura científica, viene realizando otras actividades ligadas a la Astronomía en las que de alguna manera intervenimos, colaborando u organizando, como son:

- Los cuatro planetarios itinerantes para escolares, denominados "Cosmicam".
- El "Observatorio Móvil", que consiste en un camión dotado de telescopio y cúpula, que imparte cursos de iniciación a la astronomía para adultos con una duración de cinco días en toda la geografía del ámbito CAM.
- El ciclo de conferencias denominado "Nuestros Científicos", que, tanto en Alicante como en Valencia, organiza una conferencia al mes por profesionales de la Astronomía y otras disciplinas.

El Círculo Astronómico Mediterráneo es miembro institucional asociado de la SEA.

Juan Vicente Pérez Ortiz circucam@lycosmail.com

El Gran Telescopio Canarias en construcción

Resumen

El desarrollo del Gran Telescopio Canarias ha entrado ya en su fase de construcción. Las obras en el Observatorio del Roque de Los Muchachos, en la Isla de La Palma, avanzan de forma notoria y el resto de los elementos del telescopio se construyen en diferentes factorías en España y otras regiones Europeas. El proyecto tiene prevista su "Primera Luz" a principios de 2003 e iniciar la explotación científica en 2004.

A lo largo del año 2000 se iniciaron las fases de construcción de los principales elementos que forman el Gran Telescopio Canarias (GTC). Otras se encuentran en avanzado estado de diseño o se está procediendo a su contratación. El proyecto, en su conjunto, avanza dentro del plan de ejecución previsto inicialmente y en el presupuesto asignado.

La obra civil, que se desarrolla en el Observatorio del Roque de Los Muchachos (ORM), en la Isla de La Palma, por parte de la constructora española ACS, está alcanzando ya las cotas máximas de altura, donde se asentarán tanto la cúpula como la estructura metálica del telescopio. Los edificios e instalaciones auxiliares del telescopio se completarán a lo largo del año 2001. Todas estas instalaciones ocuparán unos 2500 metros cuadrados de superficie cubierta situados en una explanada de 5000 metros cuadrados. Desde las páginas *web* del proyecto (`http://www.gtc.iac.es`) se puede ver el avance de la obra a través de una cámara digital.

La cúpula del telescopio, que se instalará en el año 2001 en el ORM, se encuentra en avanzado estado de fabricación por parte de la empresa española URSSA, en las cercanías de Vitoria. URSSA, junto con las también empresas españolas GHESA y MONCAINSA, forman la Unión Temporal de Empresas (UTE), denominada GMU, responsable del diseño, fabricación y montaje de la cúpula del GTC. Actualmente se está realizando el montaje de la cúpula en factoría para realizar pruebas previas a su traslado al Observatorio. La cúpula, de forma esférica, tendrá un diámetro exterior de 35 metros y una masa total de 450 toneladas.

Fig. 2. Inicio del montaje de la cúpula en la factoría de Vitoria (agosto 2000)

Se ha iniciado en Tarragona, por parte de la empresa SCHWARTZ-HAUTMONT, la construcción de la estructura metálica del telescopio. Las empresas españolas SCHWARTZ-HAUTMONT y GHESA forman la UTE SG, responsable del diseño, fabricación y montaje de esta estructura metálica y todos sus mecanismos de movimiento. El montaje y pruebas en factoría está previsto para mediados del año 2001 y su montaje final en el ORM para el año siguiente. Esta estructura metálica tiene una dimensión máxima de 27 metros y un peso de la masa móvil de 350 toneladas. Los movimientos de los ejes del telescopio serán producidos por motores directos a los ejes –siendo el de acimut de 16 metros de diámetro– y serán codificadores ópticos de cinta los que permitirán conocer su posición con suficiente precisión.

Los principales elementos del espejo primario seg-

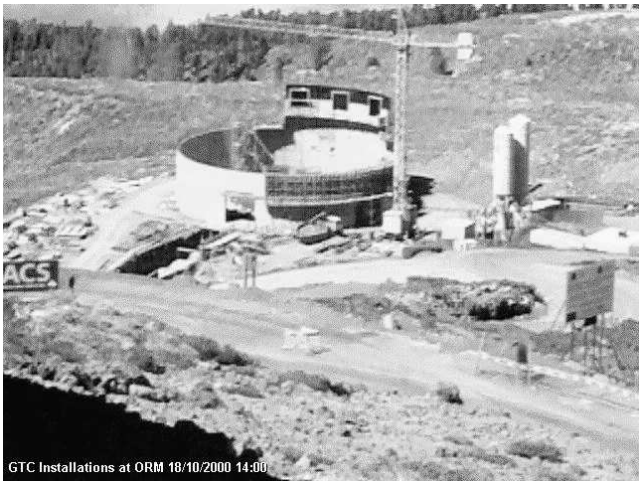


Fig. 1. Vista de los trabajos de Obra Civil en el ORM (octubre 2000)

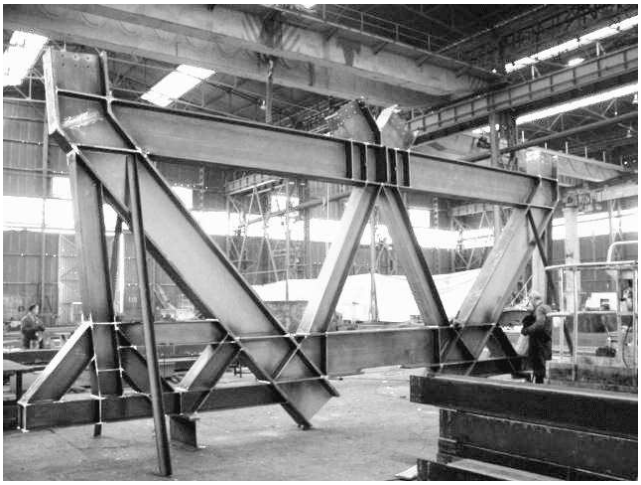


Fig. 3. La construcción de la estructura del telescopio en Tarragona (octubre 2000)

Fig. 4. Fotografía del acto de entrega formal del primer bloque de Zerodur por parte de SCHOTT (enero 2000)

mentado están también en fase de construcción. La empresa alemana SHOTT ya ha entregado 12 de los 42 bloques de ZERODUR que tiene que producir, y REOSC, en Francia, iniciará en breve el pulido de estos bloques, una vez finalice la nueva infraestructura necesaria que está instalando para este proceso. Los sistemas electromecánicos de soporte de los segmentos se están empezando a construir por la empresa española CESA y la fabricación de los sensores de borde entre segmentos será contratada en breve. El espejo primario tendrá finalmente una masa total de 20 toneladas, una superficie óptica equivalente a un círculo de 10.4 metros de diámetro y una calidad superficial CIR=0.81.

El espejo secundario, actualmente en fase de diseño, será fabricado sobre un substrato de berilio por la empresa francesa REOSC. El substrato de berilio, por su densidad y rigidez, permitirá una masa total de este espejo de tan sólo 55 kilogramos con una dimensión máxima de 1.2 metros. Los mecanismos de movimiento y control de la posición de este espejo serán construidos por la empresa española NTE. El espejo terciario y las cajas de calibración, adquisición y guiado del telescopio, también en fase de diseño, serán construidos por la empresa belga AMOS.

Los instrumentos seleccionados para "Día Uno" son: OSIRIS, una cámara y espectrógrafo de baja resolución en el rango visible con capacidad multiobjeto y fotometría rápida, y CANARICAM, una cámara y espectrógrafo en el rango del infrarrojo medio con capacidad de polarimetría y coronografía. Ambos instrumentos están en fase de diseño y en breve plazo se espera contratar su desarrollo completo.

El desarrollo de OSIRIS está liderado por el Instituto de Astrofísica de Canarias, en colaboración con el Instituto de Astrofísica de la Universidad Autónoma de México y astrónomos de diversos centros españoles.

El desarrollo de CANARICAM está liderado por el Departamento de Astrofísica de la Universidad de Florida. Se está formando un grupo de astrónomos españoles que participan en este instrumento.

La definición y construcción del sistema de control del GTC continua su desarrollo, estando planificado un primer prototipo para su distribución externa a principios de 2001.

El Comité Científico Asesor del GTC, cuya composición se modifica periódicamente, está formado actualmente por los doctores José Miguel Rodríguez Espinosa, Jerry Nelson, Artemio Herrero Davó, Casiana Muñoz Tuñón, Victor Costa Boronat, Luis Colina Robledo, y José Cernicharo, Este Comité, que se reúne periódicamente, analiza el avance del proyecto y hace sus recomendaciones, principalmente en los aspectos relacionados con la definición y prioridades de instrumentación científica, planes de pruebas y proyección futura del telescopio.

Aunque lo mencionemos al final, no menos importante es la proyección internacional del proyecto. El Instituto de Astrofísica de la Universidad Autónoma de México y el Instituto de Astrofísica, Óptica y Electrónica, en Puebla, México, han firmado un principio de acuerdo para participar en el proyecto al nivel de un 5%. El Acuerdo definitivo se pretende firmar antes de finales de este año 2000. Actualmente también se negocia con la Universidad de Florida para su participación al nivel de un 5% a un 10%.

Pedro Álvarez Martín pam@ll.iac.es

Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica

El actual Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica (Plan Nacional de I+D+I), aprobado el pasado 12 de noviembre de 1999 por el Consejo de Ministros, contempla entre sus Áreas Prioritarias la Investigación Básica no orientada. Dentro de la misma se establece por primera vez el Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica (PNAA). Este hecho, deseado desde hace años por la comunidad astrofísica española, puede suponer un elemento de apoyo esencial para los desarrollos futuros, tanto lo que se refiere a grandes instalaciones como en lo concerniente a la investigación básica e instrumentación astronómica.

Se dispone pues de un marco más apropiado para la consolidación de la Astrofísica en nuestro país. Ahora le corresponde a la comunidad dar una respuesta adecuada y dar contenido real a los objetivos principales que en él se plantean. Esta tarea no es sencilla, pues junto con "asignaturas pendientes" como el desarrollo de instrumentación, se ha de realizar una transición de forma continua y sin grandes desequilibrios desde el Programa Nacional de Promoción General del Conocimiento, donde hasta ahora se estaba encuadrado, a los modos de operar de un Programa Nacional más dirigido.

En la convocatoria de Proyectos dentro del PNAA para el año 2000 se exponía el objetivo principal del Programa, así como cuatro objetivos científico-tecnológicos prioritarios: 1) Investigación básica en Astronomía y Astrofísica; 2) Estudios de viabilidad y actividades asociadas al diseño de instrumentación astronómica como fases iniciales del desarrollo de instrumentos de última generación; 3) Explotación científico-tecnológica de los recursos astronómicos existentes; y 4) Investigación y desarrollo de tecnologías implicadas en Astronomía. Los proyectos y acciones del PNAA están ahora enmarcados dentro del Ministerio de Ciencia y Tecnología (MCYT), a través de la Secretaría de Estado de Política Científica y Tecnológica y de su Dirección General de Investigación y Subdirección General de Proyectos de Investigación. Otro tipo de acciones referentes a recursos humanos, grandes instalaciones y demás programas horizontales también se gestionan desde el mismo MCYT.

Como Gestor del PNAA me corresponde una responsabilidad que no podría llevar a buen puerto sin el concurso y la ayuda del resto de la comunidad astronómica nacional. Para ello, hemos de lograr que el PNAA no sólo reaccione rápida y adecuadamente a las propuestas que se reciban, sino que además sea capaz de jugar un papel dinamizador y movilizador de la Astrofísica. Se ha iniciado este primer año con premuras, quizás sin la preparación necesaria y sin el imprescindible contacto con la comunidad investigadora.

Espero que la transparencia en la gestión, el intercambio de ideas (a través de reuniones periódicas con los grupos de investigación) y la realización de una correcta evaluación y seguimiento sean tres de los elementos fundamentales a desarrollar en el futuro más inmediato. No obstante, para cuando este escrito vea la luz, se habrá ya resuelto la convocatoria de Proyectos y gran parte de las Acciones Especiales presentadas. Una treintena en cada una de las convocatorias con una altísima componente de investigación básica, y con una calidad media excelente, avalada no sólo por la ANEP sino por la Comisión de expertos nombrada *ad hoc* del propio PNAA.

En el futuro, el PNAA deberá ser capaz de incentivar, propiciar y potenciar grupos de investigación que doten de contenido real a los otros tres objetivos prioritarios del PNAA. Deberá, además, desempeñar un papel catalizador para otras disciplinas que encuentran en la Astronomía múltiples aplicaciones. Deberá, en definitiva, responder a las expectativas creadas para el desarrollo de la Astrofísica nacional en los próximos años, y este reto se ha de conseguir en un corto espacio de tiempo para poder garantizar la continuidad del PNAA y su mayor proyección. Es una tarea que a todos nos atañe y a la que todos podemos y debemos contribuir.

Rafael Rodrigo Montero, Gestor del PNAA
rodrigo@iaa.es

El telescopio Liverpool

Introducción

El proyecto del telescopio Liverpool nació y creció a partir de la necesidad, reconocida por los astrónomos durante bastante tiempo, de tener un instrumento capaz de observar con continuidad objetos astronómicos cuyo brillo o propiedades espectrales cambian con el tiempo. Estrellas variables, asteroides, cometas, variables cataclísmicas (incluyendo novas), supernovas, cuásares, galaxias Seyfert, fuentes que producen llamaradas en rayos gamma, y objetos cuya luz es amplificada por lentes gravitatorias, son todos ellos ejemplos de fuentes astronómicas que varían. Cambian en escalas de tiempo entre unos segundos y años, algunos de ellos de una forma regular y predecible, otros de forma totalmente impredecible.

La mayoría de telescopios profesionales se operan de un modo que dificulta tanto un seguimiento regular de los objetos como una respuesta rápida a sucesos que no se pueden predecir, los llamados en inglés *Targets of Opportunity*. Los astrónomos solicitan tiempo de observación con varios meses de antelación; se les puede conceder una o dos noches en un telescopio, a veces más, y eso puede no ser lo más óptimo y eficiente para sus planes de observación. Han de viajar al telescopio para realizar las observaciones a lugares distantes de su centro de trabajo, lo que implica uno o más dias de viaje cada vez que haya que cubrir una campaña, y esto es muy ineficiente y costoso si lo que se desea es estudiar objetos variables.

Hasta ahora se han usado telescopios robóticos pequeños, con diámetros menores de un metro, fundamentalmente para el estudio de estrellas variables y para realizar Astronomía de posición. Se han desarrollado con éxito programas en la Universidad de Indiana (*Roboscope*) y con el Círculo Meridiano Automático Carlsberg, en la Isla de La Palma (una colaboración entre Dinamarca, España y el Reino Unido). También se han usado telescopios robóticos para búsquedas automáticas de supernovas en galaxias cercanas, en particular en proyectos realizados por la Universidad de California en Berkeley. La mayoría de esos telescopios utilizan detectores fotoeléctricos sencillos, aunque los más recientes van equipados con cámaras CCD.

El telescopio Liverpool

El telescopio Liverpool (TL en adelante) pretende llevar la Astronomía robótica al campo de telescopios más grandes. El TL es el primero de una serie de telescopios de esta clase construídos por Telescope Technologies Ltd. (TTL), una compañía que ha sido creada por la Universidad de Liverpool John Moores para el diseño y construcción de telescopios de tamaño medio (diámetros entre 2 y 5 metros) de altas prestaciones.

El telescopio se situará en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en la Isla de La Palma, uno de los lugares de observación más privilegiados del mundo. Con una altitud de 2400 metros en la región de vientos alisios del NE hacia el ecuador, el observatorio está inmerso en una corriente de aire estacionaria y libre de perturbaciones que da como resultado uno de los mejores *seeings* del mundo. La calidad media de imagen del observatorio es de $0.7''$. El cielo es uno de los más despejados entre los observatorios profesionales, proporcionando una media de 2400 horas al año en noches astronómicamente útiles (con el Sol más de 18° por debajo del horizonte).

Fig. 1. El telescopio Liverpool en construcción en la factoria TTL en el Reino Unido

Las especificaciones ópticas y de seguimiento del telescopio se muestran en la Tabla 1. El diseño básico del telescopio es altazimutal, con acción hidráulica sobre cada eje. El control del movimiento del telescopio utiliza codificadores de cinta (*tape encoders*) y servomotores DC. El telescopio tiene una unidad de adquisición y guiado (AG) con cuatro puertos laterales y uno directo para el montaje de instrumentos. La selección de instrumentos se realiza a través de un espejo retráctil capaz de rotar, lo que permite instalar hasta cinco instrumentos en el telescopio y pasar de utilizar uno a otro en tiempos muy cortos, de unos dos minutos. El equipo de autoguiado está montado cerca de la unidad AG a una distancia de $15'$ del centro del campo de visión.

El modo normal de operacion del TL será totalmente robótico. Esto significa que el telescopio no será supervisado ni local ni remotamente durante sus operaciones rutinarias. El TL realizará un programa de observaciones prefijado y enviará los datos al observa-

Tabla 1. Especificaciones ópticas y de seguimiento del TL

Item	Especificación
Diámetro del espejo primario	2.0m
Razón focal del espejo primario	f/3
Razón focal final	f/10
Calidad de imagen (campo de 12′)	$< 0.4''$ (80% de la energía en ese círculo)
Calidad de imagen (campo de 42′)	$< 0.6''$ (80% de la energía en ese círculo)
Precisión de apuntado	$< 2''$ rms
Seguimiento en "lazo abierto"	$< 0.2''$ hasta 1 minuto, $< 0.4''$ en 10 minutos
Seguimiento en "lazo cerrado"	$< 0.2''$ en 1 hora
Precisión en el seguimiento con el rotador	$< 0.2''$ en 1 hora

Fig. 2. Diseño del recinto "a cielo abierto" que dará cobijo al TL, permitiendo un flujo de aire sin perturbaciones en el telescopio

dor de la forma que éste especifique. El orden en que se realizarán las observaciones estará determinado por el conjunto de programas del telescopio que considerará factores tales como *seeing*, brillo del cielo, urgencia, y altura de los objetos para decidir cuál será el próximo en la secuencia de observación.

El primer instrumento que se montará en el telescopio será una cámara CCD con un *chip* EEV42-40 de 2048×2048 pixels. Esto proporciona una escala de $0.135''$ por pixel. Se montarán dos ruedas de filtros alineadas con siete posiciones encima de la cámara, permitiendo seleccionar un total de doce filtros; uno de ellos será un filtro neutro de densidad para realizar observaciones planetarias y lunares.

En la actualidad estamos contruyendo dos instrumentos más para el TL. El primero es un prototipo, un espectrógrafo de campo integral. Usará un manojo compacto de fibras ópticas colocado en el plano focal para llevar la imagen de un campo de $\sim 10 \times 10$ segundos de arco a la rendija de un espectrógrafo convencional. Esto permitirá realizar espectroscopia robótica sin la dificultad de tener que posicionar el objeto en una rendija estrecha (típicamente de $\sim 1''$). El segundo instrumento en construcción es SupIRCam, acrónimo de *Supernova Infrared Camera*. Esta cámara de 256×256 pixels está diseñada para realizar imágenes de supernovas en galaxias distantes en el rango 1–2.5 μm, con el propósito de poner ligaduras a la geometría cosmológica del Universo. Las observaciones infrarrojas tienen una ventaja considerable sobre las ópticas, que hoy en día se realizan para este tipo de proyectos, debido a que la luz infrarroja se ve menos afectada por la extinción de polvo en la galaxia que alberga la supernova, la cual introduce errores en las curvas de luz ópticas.

El TL estará encerrado en un recinto de una sola pieza "a cielo abierto". Esto significa que, al abrirse durante la noche, dejará totalmente al descubierto el telescopio, asegurando un equilibrio térmico rápido con sus alrededores de modo que el *seeing* no se verá afectado por lo que hubiera supuesto el estar albergado en una cúpula convencional. Además la eficiencia en la observación será mejor al no tener que aguardar a que la "rendija" de la cúpula se tenga que alinear con el telescopio cuando éste cambia de posición.

El tiempo de observación en el TL estará repartido entre varias comunidades de astrónomos. Como constructor y propietario del telescopio, el 30% del tiempo se utilizará por el *Astrophysics Research Institute* de la Universidad de Liverpool John Moores; 20% del tiempo estará disponible para los astrónomos españoles de acuerdo con los convenios por el uso del observatorio en La Palma. A cambio de la financiación proporcionada por el *Particle Physics and Astronomy Research Council* británico (PPARC), los astrónomos del Reino Unido tendrán acceso al 40% del tiempo de telescopio. El 5% será dedicado a programas internacionales de colaboración y finalmente el 5% restante estará disponible para usos educativos y públicos por colegios, planetarios y astrónomos aficionados del Reino Unido.

Estado actual del proyecto

La página *web* `http://telescope.livjm.ac.uk/` contiene detalles e informes acerca de la construcción del TL. A finales de noviembre de 2000, se completó el ensamblaje del telescopio en la factoría TTL en Liverpool, con la mayor parte de la estructura mecánica terminada y los actuadores hidrostáticos en los ejes de azimut y elevación instalados y probados. Los espejos primario y secundario han sido entregados por los fabricantes y están siendo aluminizados a la hora de escribir este artículo (principios de diciembre de 2000). El anillo superior de la estructura ha sido puesto en su lugar y las celdas que albergarán los espejos han sido también

instaladas. La electrónica está siendo también puesta a punto, y los ordenadores que controlarán el funcionamiento del telescopio están en proceso de pruebas.

Ahora debemos esperar a que pasen los meses de invierno para comezar la obra civil en el observatorio, es decir, establecer los cimientos de hormigón donde descansará el telescopio y su habitáculo. Una vez dado este paso, podremos comenzar a ensamblar el telescopio en La Palma.

Nuestro objetivo es tener la "primera luz" para agosto de 2001, y esperamos estar operando de forma totalmente robótica a finales de 2001 ¡Nos espera un año muy ocupado!

(Traducción del original en inglés por Benjamín Montesinos).

Iain A. Steele, Universidad de Liverpool John Moores
ias@astro.livjm.ac.uk

Discos protoplanetarios

José Francisco Gómez Rivero jfg@laeff.esa.es

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

Abstract

According to present theories, during the star-formation process, dust and gas disks are formed around young stars, which could give rise to planetary systems similar to ours. In this paper we review the observational evidence about the existence of these disks, as well as some of our knowledge about their structure and physical processes. So far, observations of protoplanetary disks have been very constrained in terms of sensitivity and angular resolution (subarcsecond resolution is required for detailed studies). These problems can be solved in the near future using the new generation of millimeter and submillimeter interferometers.

Resumen

Según las teoras actuales, durante el proceso de formación estelar se forman discos de gas y polvo en torno a las estrellas jóvenes, que pueden dar origen a sistemas planetarios similares al nuestro. En este artículo se repasan las pruebas observacionales de la existencia de estos discos, así como algunos de nuestros conocimientos actuales sobre su estructura y procesos físicos. Hasta ahora, las observaciones de discos protoplanetarios han estado muy limitadas en cuanto a sensibilidad y resolución angular (se requieren resoluciones por debajo del segundo de arco para estudiarlos en detalle). Estos problemas podrán resolverse en un futuro próximo con la nueva generación de interferómetros milimétricos y submilimétricos.

Introducción

Hoy en día se piensa que el Sistema Solar se formó a partir del colapso gravitatorio de una nube de gas molecular y polvo. Esta nube, debido a su momento angular residual, fue adquiriendo una forma oblata a medida que progresaba el colapso. De la zona central surgió el sol primitivo, que seguiría acreciendo materia hasta lograr la masa y temperatura necesarias para iniciar las reacciones nucleares. En la periferia quedó un disco en rotación kepleriana, en el que se formaron los planetas mediante acumulaciones locales de polvo y gas. La idea es sugerente, y podría explicar por qué prácticamente todos los planetas del Sistema Solar se mueven en el mismo plano (la eclíptica) y con movimientos de rotación y traslación del mismo sentido.

Este mecanismo de formación debe ser similar en otras estrellas, pues no presupone ningún proceso peculiar en el Sistema Solar. Por lo tanto, esperamos que la existencia de sistemas planetarios sea un fenómeno general en el Universo. Los discos formados en este proceso, precursores de sistemas planetarios, reciben frecuentemente el nombre de "discos protoplanetarios".

Esta teoría sobre el origen de sistemas planetarios no es en absoluto nueva. A menudo se atribuye a Kant (1755) y Laplace (1796) la hipótesis nebular sobre el origen del Sistema Solar. Las ideas de estos autores se asemejan al esquema que hemos expuesto. En realidad, la hipótesis nebular es anterior: el filósofo sueco Emanuel Swedenborg propuso en sus Principia (1734) que el Sistema Solar se formó a partir de un disco de materia en rotación.

Durante la primera mitad del siglo XX, la teoría nebular tuvo que competir con una teoría catastrofista, propuesta por Chamberlin (1904) y Moulton (1905). Según esta teoría, se produjo una interacción cercana (~ 3 $R_\odot$) entre el Sol y otra estrella, en la que ambas perdieron material mediante fuerzas de marea. A partir de los fragmentos arrancados del Sol se formaron los planetas de nuestro sistema.

Aceptar esta teoría catastrofista tiene connotaciones importantes, incluso desde un punto de vista filosófico, ya que este tipo de interacciones tan cercanas entre estrellas debe ser poco frecuente. Por tanto, podríamos pensar que la existencia del Sistema Solar es un hecho relativamente único en el Universo. En contraste, como ya hemos indicado, la hipótesis nebular supone un proceso físico que se da necesariamente en la formación estelar.

Como veremos, existen numerosas pruebas observacionales de la existencia de discos protoplanetarios que, por tanto, apoyan la teoría nebular sobre el origen del Sistema Solar. Además, los numerosos descubrimientos de planetas en torno a otras estrellas (p. ej., Mayor y Queloz 1995; Marcy y Butler 1998; Charbonneau et al. 2000; Henry et al. 2000; Marcy et al. 2000) indican que la existencia de sistemas planetarios es relativamente común. Hasta la fecha se han detectado planetas en torno a unas 50 estrellas.

Evolución de discos y formación estelar

Como ya hemos mencionado, la idea comúnmente aceptada hoy día es que los discos protoplanetarios proporcionan la materia prima a partir de la que se pueden formar los planetas. Sin embargo, su relevancia no se limita a este hecho. Los discos no son sólo un subproducto de la formación estelar. En realidad, desempeñan un papel clave, activo, en todo el proceso que da origen a una estrella. Podemos decir que, probablemente, las estrellas nunca llegarían a ser tales sin la existencia de los discos.

Veamos a grandes rasgos dónde encajan los discos en las distintas fases de la formación estelar. Para más detalles sobre la teoría actual de formación estelar, pueden consultarse los trabajos de Shu et al. (1987) y Hartmann (1998).

Colapso gravitatorio y formación de discos

En líneas generales, las nubes moleculares se encuentran en equilibrio entre las fuerzas expansivas (presión hidrostática y magnética, turbulencia) y la gravedad, que tiende a contraerlas. Sin embargo, en el seno de una nube pueden producirse inhomogeneidades, de modo que algunas zonas adquieran la densidad suficiente como para que el equilibrio se rompa y se inicie un colapso gravitatorio local. Se han observado núcleos de alta densidad ($n > 10^3 - 10^4$ cm^{-3}) en nubes moleculares, utilizando emisión de moléculas que requieren elevadas densidades de termalización, como NH_3 o CS (Myers y Benson 1983; Snell et al. 1984). Los objetos estelares jóvenes suelen encontrarse sumergidos en estas zonas densas (Anglada et al. 1989). Pero la observación directa del colapso gravitatorio no es fácil, y aunque hay estudios sólidos utilizando perfiles de líneas espectrales (p. ej., Zhou et al. 1993; Myers et al. 1995; Mardones et al. 1997), las pruebas observacionales suelen ser muy controvertidas.

Estos núcleos protoestelares de gas molecular pueden poseer la masa suficiente para formar una estrella, pero no lo hacen de forma directa. El gas de las nubes moleculares tiene una cierta cantidad de momento angular (Goodman et al. 1993). El momento se conserva en la contracción y produce una barrera centrífuga en el plano perpendicular al vector de momento angular, por lo que el colapso continúa preferentemente en la dirección de este vector (Terebey et al. 1984). Así, el resultado esperado al final de esta primera fase de contracción será un cuerpo central (la protoestrella), más un disco en rotación.

De esta forma, la mayor parte del momento angular inicial habrá quedado depositada en el disco. Para estrellas de masa baja, un momento angular específico típico de $j \simeq 10^{21}$ cm^{-2} s^{-1} daría lugar a discos con radios $\sim$ 100 UA (Morfill 1989; Bodenheimer 1995), que son del orden de magnitud del tamaño del Sistema Solar.

Acrecimiento y flujos de materia

La barrera centrífuga impuesta por el momento angular hace que el gas molecular de la nube que siga cayendo al sistema protoestrella+disco se vaya depositando en el disco. Por lo tanto, el material que acumule la protoestrella tras el colapso inicial deberá adquirirlo del disco que lo rodea, mediante un proceso de acrecimiento. Evidentemente, para que el material del disco pueda caer a la protoestrella, aquél debe perder simultáneamente energía mecánica y momento angular.

La liberación de energía es relativamente sencilla de entender. Si el disco es viscoso, la fricción interna del gas convertirá la energía mecánica en térmica. Ésta, a su vez, podrá ser liberada mediante radiación. Sin embargo, la liberación de momento angular es un problema complejo y el proceso concreto por el que se produce no está claro. Una viscosidad puramente molecular no parece suficiente para inducir una pérdida de energía y momento angular lo suficientemente rápida

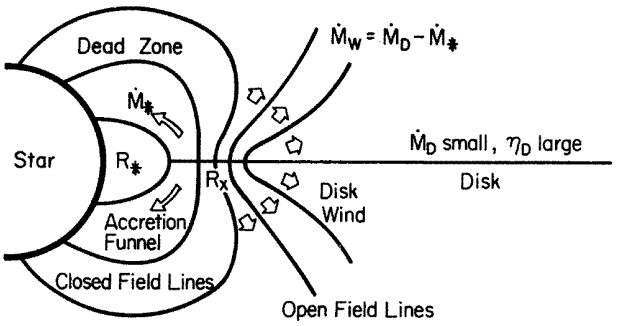


Fig. 1. Modelo de Shu et al. (1994) de vientos magnetocentrífugos. El material del disco en radios menores que R_x (el punto donde la velocidad kepleriana es igual a la velocidad de rotación de la estrella) es forzado por el campo magnético estelar a velocidades subkeplerianas y cae hacia la estrella. El efecto contrario ocurre a radios mayores que R_x, por lo que se produce un viento.

(en un tiempo menor, al menos, que la edad del Universo), por lo que se deben postular otras fuentes de viscosidad.

Los modelos teóricos de estructura o evolución de discos protoplanetarios (p. ej., Ruden 1986; D'Alessio et al. 1998; Huré 2000) suponen que la pérdida de energía se produce a causa de la viscosidad turbulenta, siguiedo la teoría de Shakura y Sunyaev (1973). La viscosidad turbulenta se parametriza siguiendo la "prescripción alfa", que determina un coeficiente de viscosidad $\nu = \alpha c_s H$ (donde c_s es la velocidad local del sonido, H es la escala de altura de presiones en el gas, y α es el parámetro que caracteriza a la viscosidad). La propia teoría de Shakura y Sunyaev (1973) postula que la viscosidad turbulenta produciría transporte de momento, además del de energía. Otros mecanismos que pueden originar la liberación de momento angular incluyen inestabilidades convectivas producidas por la viscosidad turbulenta (Lin y Papaloizou 1980), pares gravitatorios por distribuciones asimétricas de densidad (Lin y Pringle 1987), o inestabilidades hidromagnéticas (Balbus y Hawley 1991; Stepinski et al. 1993).

Otro buen candidato para mediar la liberación de momento angular son los vientos. Un material expulsado a grandes velocidades puede llevar consigo una cantidad apreciable de momento angular. Para ello, el viento debe estar conectado mediante campos magnéticos con el disco, de modo que se ejerzan pares sobre éste, que frenen su velocidad de rotación. Existen diversos modelos teóricos sobre el posible origen magnetohidrodinámico de los vientos en estrellas jóvenes y su conexión con discos protoplanetarios, como posibles agentes liberadores de momento angular (Pudritz y Norman 1983, 1986; Königl 1989; Shu et al. 1994; Paatz y Camenzind 1996; Königl y Pudritz 1999). La figura 1 ilustra el modelo de Shu et al. (1993) de vientos impulsados de forma magnetocentrífuga.

La posibilidad de liberar momento angular mediante vientos es interesante, ya que se han observa-

do fenómenos de flujo de materia en estrellas jóvenes (véase, p. ej., Bachiller 1996). Estos flujos se producen durante gran parte de la evolución estelar temprana y se han observado en escalas muy diferentes: desde chorros circunestelares, muy colimados a unas pocas UA del objeto estelar joven (p. ej., Mundt et al. 1987), hasta flujos moleculares de tamaños interestelares, del orden de parsec (Rodríguez et al. 1980; Snell et al. 1980). Suelen tener morfología bipolar, y su eje de simetría está habitualmente alineado perpendicular a los supuestos discos circunestelares.

Observacionalmente, hay indicios que vinculan directamente los vientos con los procesos de acrecimiento. Varios autores han encontrado correlaciones significativas entre la tasa de pérdida de masa en forma de vientos y la tasa de acrecimiento (Cabrit et al. 1990; Edwards et al. 1993; Hartigan et al. 1995). La relación entre acrecimiento y fenómenos de pérdida de masa parece clara, y bien pudiera ser una relación de causa-efecto.

Formación de planetas

Los planetas deberán formarse durante el periodo de vida del disco. El material básico en su formación es la componente sólida, que en un disco protoplanetario la constituye el polvo.

En una primera fase, los granos de polvo (inicialmente con tamaños del orden de micras) se van adhiriendo unos a otros por fuerzas electrostáticas. Así van creciendo hasta formarse los "planetésimos" (cuerpos con tamaños de ~ 1 km), mientras se depositan en una zona relativamente delgada, en el plano medio del disco. Éste es un proceso relativamente rápido, que se completa en aproximadamente 10^4 años (Lissauer 1993).

Posteriormente, el crecimiento de los cuerpos sólidos continúa mediante colisiones inelásticas, en las que la captura mediante fuerzas gravitatorias ya desempeña un papel importante. Por ello, los cuerpos mayores tienden a crecer más rápidamente y lo hacen hasta que agotan el material sólido del disco que se encuentra dentro de su radio de influencia. De esta forma, en unos 10^6 años (Wetherill y Stewart 1989; Aarseth et al. 1993) quedan una serie de núcleos sólidos aislados.

Este mecanismo explica la formación de los planetas de tipo terrestre y de los núcleos rocosos de los planetas gigantes. Para estos últimos se estima que, cuando el núcleo alcanza una masa crítica de 10 $M_\oplus$, podrá acrecer cantidades significativas de gas (Mizuno 1980), siempre, claro está, que aún quede gas en el disco. Precisamente uno de los problemas de este modelo de "núcleo+acrecimiento" para la formación de planetas gigantes es el de las escalas de tiempo. Se ha calculado que, además de los 10^6 años necesarios para formar los núcleos sólidos, se requieren otros 10^7 años para completar el acrecimiento de una atmósfera de ~ 300 $M_\oplus$ (Pollack et al. 1996). Estos tiempos se encuentran en el límite superior de la vida estimada para los discos protoplanetarios, que está en torno a $10^6 - 10^7$ años (Strom et al. 1989; Strom et al. 1993). En algunos estudios se obtienen incluso tiempos de vida sensiblemente inferiores ($< 10^5$ años, Wolk y Walter 1996). Por tanto, el mecanismo de núcleo+acrecimiento podría ser demasiado lento para conseguir formar planetas gigantes.

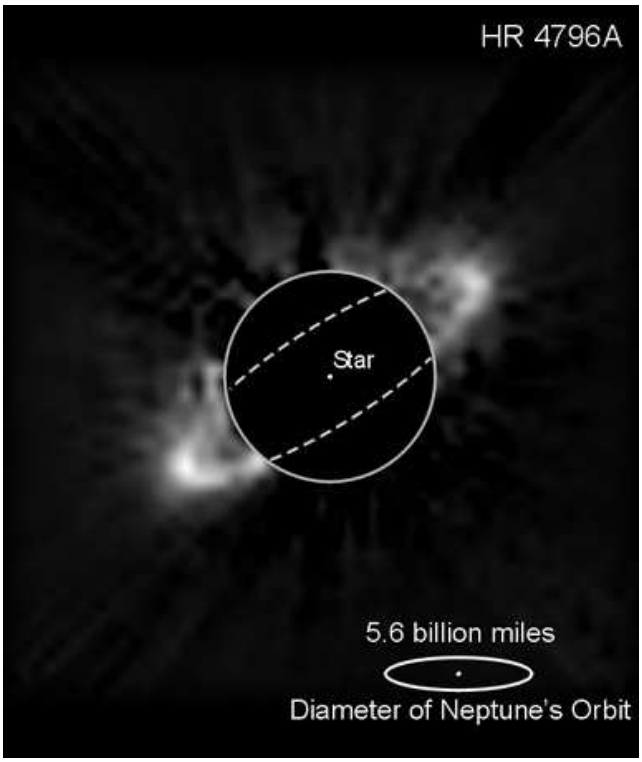


Fig. 2. Imagen en infrarrojo cercano del disco en torno a HR 4796A (Schneider et al. 1999).

Una posible alternativa es la formación de inestabilidades gravitatorias en el disco, que podrían inducir una contracción rápida del gas (Kuiper 1951; Boss 1998). De esta forma, los planetas gigantes podrían formarse en un tiempo corto, comparado con la vida del disco.

Desaparición del disco

Los vientos, la radiación estelar y el acrecimiento de materia hacia la estrella acaban por agotar el material del disco (Shu et al. 1993), especialmente la componente gaseosa, más volátil. Como ya hemos visto, se estima que la vida media de los discos protoplanetarios en estrellas de masa baja es de $10^6 - 10^7$ años (Strom et al. 1989). Los estudios en la región de TW Hya parecen confirmar estos límites de edad de 10^7 años (Muzzerolle et al. 2000). Al final del proceso de formación estelar quedará la estrella en la secuencia principal, rodeada por un sistema planetario. En algunas estrellas de la secuencia principal aún se observan los restos del disco, como en el famoso caso de β Pic (Smith y Terrille 1984) o en HR 4796A (Schneider et al. 1999, fig. 2). Éstos son discos de polvo, en los que ya no hay cantidades apreciables de gas (Liseau y Artymowicz 1998) y que podríamos identificar con el material que produce la luz zodiacal en nuestro Sistema Solar.

El estudio de estos discos residuales permite obtener confirmaciones a la teoría estándar de formación de sistemas planetarios. Por ejemplo, en algunos casos hay indicios de la formación de huecos en los discos por la acción de cuerpos planetarios (Koerner et al. 1998). También es reseñable la detección en el mismo sistema (55 Cnc) tanto de un disco residual (Jayawardhana et al. 2000) como de un planeta (Butler et al. 1997), lo que sugiere una relación entre ambos.

Observaciones de discos en estrellas de masa baja

La mayor parte de estudios sobre discos protoplanetarios se han realizado en estrellas de masa baja. En concreto, se cuenta con numerosas pruebas de la existencia de discos en torno a estrellas T Tauri (estrellas jóvenes con masas < 2 $M_\odot$). Es precisamente en torno a estas estrellas donde se podrían formar sistemas planetarios similares al nuestro, y de forma habitual, ya que parece que prácticamente todas las estrellas T Tauri poseen discos (Strom 1995). Haremos ahora una revisión del tipo de observaciones realizadas en este tipo de discos y de la información que puede obtenerse a partir de ellas.

Distribuciones espectrales de energía y características físicas de discos

Uno de los indicios más clásicos e importantes de la existencia de discos protoplanetarios proviene del estudio de la distribución espectral de energía (DEE) en estrellas jóvenes. Además, estos trabajos han sido útiles para determinar las características físicas de amplias muestras de discos.

Excesos infrarrojos

La DEE de estrellas T Tauri presenta excesos de emisión en longitudes de onda infrarrojas y superiores, sobre lo que esperaríamos únicamente de la fotosfera estelar (Mendoza 1966). Estos excesos pueden explicarse mediante la emisión térmica de polvo circunestelar (Bertout et al. 1988). En cuanto a la distribución de éste, las altas extinciones que se derivan a partir de los excesos infrarrojos son incompatibles con morfologías más o menos esféricas en torno a la estrella, teniendo en cuenta que muchas T Tauri son visibles en el óptico. En cambio, la geometría de un disco ópticamente grueso sí permite ver la estrella en un amplio rango de líneas de visión.

Partiendo ya del modelo de discos, es posible obtener algunas características físicas generales de éstos a partir de la forma de la DEE. En concreto, de las DEE se han determinado densidades superficiales y temperaturas en los discos, suponiendo que estas magnitudes se distribuyen radialmente como leyes de potencia:

$$\Sigma = \Sigma_\circ \left(\frac{r}{r_\circ}\right)^{-p} \; ; \; T = T_\circ \left(\frac{r}{r_\circ}\right)^{-q} .$$

Los exponentes de estas leyes de potencias dan información sobre los posibles fenómenos físicos que tienen lugar en los discos. Por ejemplo, en cuanto a la distribución radial de temperatura, si el polvo del disco simplemente reprocesa la emisión estelar (disco pasivo), el exponente debería ser $q = 0.75$ (Adams et al. 1987). El mismo exponente se obtienen si la fuente dominante de calentamiento es el acrecimiento (Lynden-Bell y Pringle 1974). Con esta ley de temperaturas se reproduce el exceso infrarrojo para fuentes en las que el índice espectral[1] en infrarrojo sea positivo (como en BP Tau, figura 3). Para poder reproducir índices espectrales cercanos a cero (como en el caso de T Tau, figura 3), se precisa un disco cuya temperatura disminuya más lentamente con la distancia ($q = 0.5$, Elmegreen 1982). Esto podría conseguirse mediante procesos de acrecimiento muy energéticos que no sean de origen viscoso (Adams et al. 1988), con discos cuya anchura crezca al aumentar la distancia a la estrella central (Kenyon y Hartmann 1987), o calentando las zonas externas del disco mediante la emisión térmica de una envolvente tenue de polvo, que reprocese la radiación estelar (Natta 1993).

Los modelos actuales tienden a interpretar los excesos infrarrojos en estrellas T Tauri en términos de disco pasivo, ya que las bajas tasas de acrecimiento encontradas (típicamente 10^8 $M_\odot$/año, Hartmann et al. 1998) indican que el calentamiento de los discos está dominado por la radiación estelar. De esta forma, aparte de reproducir la DEE, se puede explicar la presencia de líneas de emisión, por la inversión de temperaturas en las capas altas del disco (Calvet et al. 1991; Chiang y Goldreich 1997).

Excesos ultravioletas

En el otro extremo del espectro, se han observado también excesos ultravioletas. Estos excesos parecen ser un indicio adicional de acrecimiento, pues se pueden modelar considerando la emisión de alta temperatura en la zona de interacción entre el disco y la estrella. En esta zona, el gas debe disminuir su velocidad de rotación kepleriana hasta la velocidad de rotación de la estrella. En el frenado final se libera aproximadamente la mitad de la energía liberada en todo el acrecimiento. Tradicionalmente, esta zona de interacción se ha modelado en términos de "capa límite" (Lynden-Bell y Pringle 1974; Bertout et al. 1988; Popham et al. 1993), con temperaturas ($T \simeq 8000 - 10000$ K). Sin embargo, hoy están más en boga modelos de acrecimiento magnetosférico (Calvet et al. 2000), según los cuales, el gas cae hacia la estrella a lo largo de las líneas de campo magnético, lo que produce un choque en la superficie estelar (ver Fig. 1). Este choque sería responsable del exceso ultravioleta y óptico, mientras que el flujo de material en la magnetosfera produciría los perfiles P Cygny inversos, típicos de estrellas T Tauri (Hartmann et al. 1994; Muzzerole et al. 1998).

Éxitos y limitaciones del estudio de DEE

Los modelos más detallados de la estructura de discos protoplanetarios tienen en cuenta simultáneamente los posibles procesos físicos en los discos, como la irra-

[1] Definido como la pendiente de la función νF_ν frente a $\log(\nu)$, donde F_ν es la densidad de flujo a la frecuencia ν. Este índice es el opuesto de la pendiente de las curvas en la Fig. 3 para $\log(\lambda) > -4$.

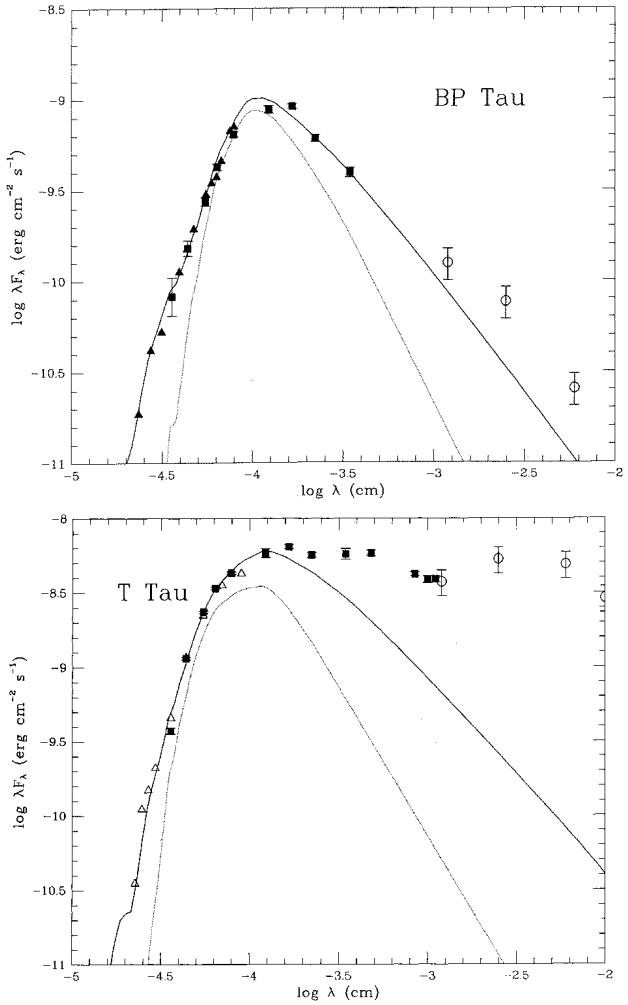


Fig. 3. Distribución espectral de energía en dos estrellas T Tauri (Bertout et al. 1988). Junto con los datos observacionales, se muestran la emisión teórica de la estrella (línea delgada) y de la estrella más un disco de acrecimiento clásico (línea gruesa).

diación estelar, la viscosidad o el acrecimiento (p. ej., D'Alessio, Calvet y Hartmann. 1997; D'Alessio et al. 1998). Estos modelos logran reproducir con éxito la DEE de estrellas T Tauri en todas las longitudes de onda, así como explicar otros datos observacionales, como imágenes o espectroscopia.

Un problema en la determinación de procesos físicos es que las DEE se obtienen con observaciones de baja resolución angular. Los discos no quedan resueltos, por lo que las conclusiones vienen muy determinadas por las suposiciones de los modelos. Parece claro que las DEE siempre dejarán parámetros libres, que no podrán determinarse sin observaciones adicionales, especialmente estudios de línea espectral o imágenes resueltas de discos, que permitan fijar algunos de estos parámetros, como anchura y distribuciones verticales de densidad y temperatura, orientación con respecto a la línea de visión, radio interno y externo, etc. Una determinación precisa de las características físicas de los discos requiere integrar una gran cantidad de datos observacionales de forma consistente con modelos físicos realistas, pero esto es algo que hoy por hoy puede hacerse con pocos objetos.

De todas formas, sí tenemos una idea de las características generales de discos en torno a estrellas de baja masa, a partir de DEE en muestras amplias de objetos. Estudios como los de Beckwith et al. (1990) nos indican que estos discos tienen temperaturas medias en torno a los 100 K, masas entre 0.001 y 1 $M_\odot$ y radios de unas 100 UA.

Pruebas indirectas de discos protoplanetarios

Obviamente, en el estudio de discos protoplanetarios es crítico conseguir imágenes resueltas. La dificultad es evidente, puesto que el radio típico de 100 UA subtiende $0.''7$ a la distancia de la nube de Taurus, una de las regiones de formación estelar más cercanas. Es decir, se requieren observaciones con resolución angular por debajo del segundo de arco. Hoy en día, esto puede conseguirse mediante el *HST*, o con interferómetros en radio.

Un problema adicional, especialmente si queremos estudiar emisión térmica en radio son las bajas temperaturas de los discos ($\sim$ 100 K). Una temperatura de brillo del orden de 100 K con resoluciones inferiores a $1''$ requiere telescopios de gran sensibilidad para su detección.

Dadas las dificultades en obtener imágenes resueltas de discos protoplanetarios, durante muchos años esto fue inviable, y sólo se disponía de indicios "indirectos" de su existencia. Con indirectos queremos decir que se deducía la existencia de discos bien a partir de observaciones de baja resolución (como en el caso de las DEE), o a partir de otros fenómenos y estructuras supuestamente relacionados con los discos, pero sin recibir emisión del disco en sí.

Como ejemplo, podemos citar la emisión de líneas prohibidas en óptico de estrellas T Tauri, que proviene de vientos estelares. Los espectros de estas líneas suelen ser asimétricos, con tendencia a aparecer desplazados hacia el azul (Appenzeller et al. 1984; Edwards et al. 1987), como vemos en la figura 4. La interpretación clásica es que una "pantalla" de polvo de unas 100 UA de tamaño absorbe la emisión que estaría desplazada al rojo. Un disco circunestelar parece el candidato ideal para bloquear esta emisión.

Los estudios de polarización en óptico e infrarrojo muestran a menudo que los vectores de polarización en las zonas más cercanas a las estrellas jóvenes se orientan perpendicularmente a chorros y flujos. Esta propiedad puede explicarse si la radiación es dispersada por un disco circunestelar (Bastien y Ménard 1988, 1990).

Ya hemos visto que los fenómenos de pérdida de materia parecen también estar relacionados con el acrecimiento en discos. En observaciones de alta resolución se ha podido comprobar que los chorros estelares en T Tauris aparecen colimados en distancias muy cercanas a la estrella central, del orden de decenas de UA (Mundt et al. 1987; Gómez de Castro 1993; Rodríguez et al.

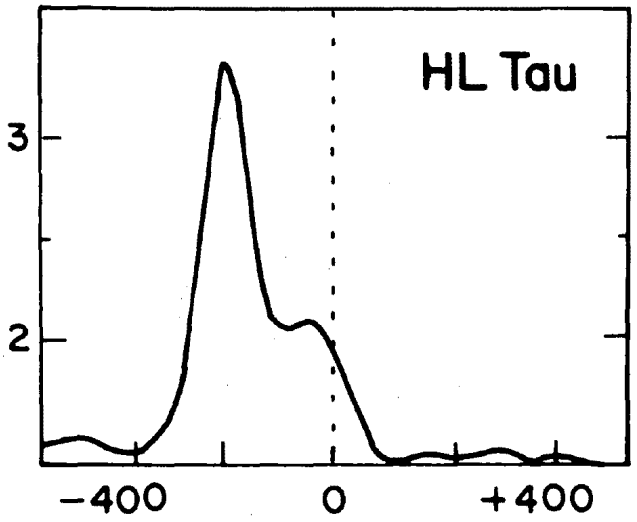


Fig. 4. Espectro de la línea prohibida [OI] en 6300 Å, en la estrella HL Tau (Edwards et al. 1987). El eje de abscisas representa velocidad en km/s. El de ordenadas, intensidad relativa.

1994; Bacciotti et al. 2000; Dougados et al. 2000). Esto indica que el agente colimador en estas regiones (supuestamente un disco) debe también tener un tamaño de unas pocas UA.

A mayor escala, mediante observaciones de líneas moleculares se han detectado estructuras aplanadas de gas molecular, similares a discos y a menudo alineadas en dirección perpendicular a flujos moleculares. Sin embargo su tamaño es al menos un orden de magnitud superior al de los discos protoplanetarios (p. ej., 2000 UA en HL Tau, Sargent y Beckwith 1991; 2800 UA en DG Tau, Kitamura et al. 1996), y en algunos casos son discos en rotación en torno a estrellas binarias (Koerner et al. 1993; Dutrey et al. 1994). Existen estructuras de este tipo incluso con tamaños interestelares ($\sim 0.1 - 1$ pc; Torrelles et al. 1983, 1994); estos "toroides" interestelares fueron propuestos como agentes colimadores de flujos moleculares (Torrelles et al. 1983). En realidad, los verdaderos discos protoplanetarios, en los que se produce el acrecimiento y la formación de planetas, deben encontrarse sumergidos en estas estructuras a gran escala. Sin embargo, su existencia apoya la idea de la formación de estructuras aplanadas en el proceso de formación estelar, por conservación del momento angular.

Observaciones de emisión continua

La emisión térmica del polvo en los discos puede estudiarse desde el infrarrojo a las ondas de radio. Las observaciones en radio permiten hoy por hoy una mejor resolución espacial, por la existencia de interferómetros (p.ej., VLA, Plateau de Bure, OVRO, BIMA). Durante años el esfuerzo por conseguir imágenes de discos con gran resolución ha sido constante. Sin embargo, la resolución angular de discos se encuentra en el límite de sensibilidad de los interferómetros actuales.

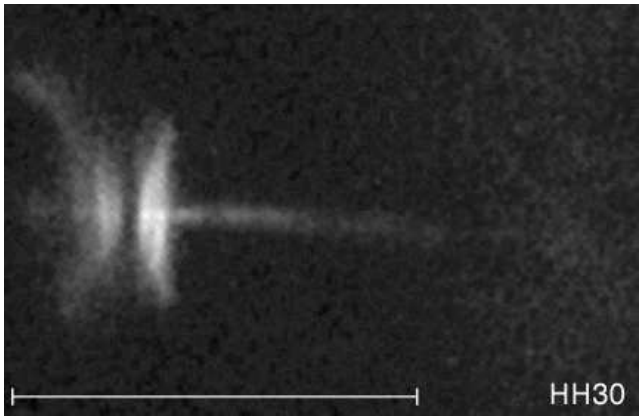


Fig. 5. Imagen óptica de HH 30 tomada con *HST* (Burrows et al. 1996). Puede apreciarse un disco de canto, con un chorro colimado perpendicular a aquél. La escala marcada en la parte inferior corresponde a 1000 UA.

Hemos visto que estudios de baja resolución angular han permitido obtener algunas características físicas de los discos, como en los estudios de Beckwith et al. (1990). Pronto se intentó forzar al máximo las capacidades de los interferómetros, para obtener pruebas directas de la existencia de discos con tamaños de ~ 100 UA. Por ejemplo, Keene y Masson (1990) dedujeron la existencia de una estructura circunestelar de sus datos en 1.3 cm de L1551, con un radio de 45 UA. Aunque la resolución no era suficiente para obtener una imagen directa, las visibilidades interferométricas eran consistentes con una estructura de este tipo. Lay et al. (1994) pudieron resolver los discos en L1551 y HL Tau realizando interferencia entre dos telescopios submilimétricos en Mauna Kea (CSO y JCMT). Posteriormente se han obtenido imágenes de estructuras circunestelares alargadas con tamaños de ~ 100 UA, siempre en el límite de sensibilidad y resolución de los interferómetros (p. ej, Rodríguez et al. 1992, 1998; Wilner et al. 1996, 2000; Mundy et al. 1996).

Probablemente las pruebas más contundentes de la existencia de discos protoplanetarios provienen de datos de *HST*. La imagen de HH 30 obtenida por Burrows et al. (1996) muestra claramente un disco de canto con el aspecto esperado según los modelos vigentes: un radio de 250 UA, más grueso en las zonas externas, y con un chorro colimado perpendicular a él (Fig. 5). Otro ejemplo de disco observado por *HST* se encuentra en TW Hya (Krist et al. 2000). También se han obtenido siluetas de discos en la nube de Orión iluminados externamente por estrellas masivas, o en contraste contra el fondo brillante de una nebulosa de reflexión (O'Dell et al. 1993).

La página de *HST* (`http://oposite.stsci.edu/`) muestra éstos y otros ejemplos de discos protoplanetarios.

Estas imágenes, por tanto, junto con todo el anterior cuerpo de datos de menor resolución, apoyado con estudios teóricos, nos permiten afirmar con seguridad la existencia de discos protoplanetarios en torno a

otras estrellas.

Estudios de líneas espectrales térmicas

Los estudios de línea espectral tienen múltiples ventajas sobre los de continuo. En este caso, la fuente de emisión es el gas del disco. Los espectros proporcionan información cinemática, sobre los movimientos de rotación o posibles expansiones y contracciones. Además, estudiando transiciones entre distintos niveles de energía, o para diferentes moléculas y especies isotópicas, se pueden obtener con bastante fiabilidad densidades y temperaturas, y de una forma más directa, con menos suposiciones previas que las necesarias para obtener estos parámetros a partir de observaciones de continuo.

Lo ideal sería poder realizar espectroscopia de discos de forma que éstos puedan resolverse angularmente. Desafortunadamente, esto no ha sido aún posible con líneas térmicas. Por ahora, sólo contamos con datos de la emisión global de líneas moleculares de todo el disco. El perfil de las líneas sí es compatible con emisión procedente de discos. Así, observaciones milimétricas de isótopos de CO en estrellas T Tauri revelan perfiles con doble pico (Handa et al. 1995; Koerner y Sargent 1995). Estos espectros se ajustan bien a los modelos de emisión de líneas en discos sin resolver (Omodaka et al. 1992; Beckwith y Sargent 1993).

Las líneas infrarrojas de CO (Hartmann y Kenyon 1987; Calvet et al. 1991; Carr et al. 1993; Najita et al. 1999) también han permitido estudiar las zonas más internas (< 1 UA) y calientes (≥ 1000 K) de los discos, una zona especialmente activa, en la que se produce la interacción entre el disco, la estrella y los vientos. Estas líneas de CO muestran perfiles explicables mediante rotación del gas.

Como ya mencionamos, han podido obtenerse imágenes resueltas de estructuras mayores, como toroides interestelares (Torrelles et al. 1983) o discos en torno a estrellas binarias (Dutrey et al. 1994). Sin embargo, pocos telescopios actuales tienen la resolución adecuada para realizar imágenes de discos protoplanetarios, y los que la tienen, se quedan cortos de sensibilidad (como en el caso de las líneas de NH_3 con el VLA, Gómez et al 1993).

Poder resolver discos protoplanetarios mediante líneas moleculares será un paso muy importante en la comprensión de su estructura y procesos físicos. Para ello seguramente tendremos que esperar a la nueva generación de interferómetros milimétricos y submilimétricos, cuya construcción y desarrollo se encuentra ya en marcha (p. ej., Submillimeter Array, ALMA, ver el último apartado de este artículo).

Discos en estrellas de masa intermedia y alta

Hemos centrado nuestra discusión en estrellas de tipo solar, pero es de esperar que existan también discos protoplanetarios en torno a estrellas más masivas, ya que los procesos que dan origen a un disco se producirán también en ellas. Aquí nos encontramos de nuevo con el problema de la resolución angular, agravado por el hecho de que la región de formación estelar masiva más cercana (la nube de Orión) se encuentra a unos 500 pc. Esto supone que con una resolución de $1''$ sólo podremos obtener imágenes nítidas de estructuras con tamaños ≥ 1000 UA. Si suponemos que el radio de los discos es proporcional a la masa de la estrella, estaremos también cerca del límite de resolución angular.

Las mismas pruebas indirectas de la existencia de discos que vimos para el caso de las T Tauri son trasladables directamente a estrellas de masa intermedia y alta. En concreto, para estrellas Herbig Ae/Be (el equivalente a estrellas T Tauri para masas intermedias, $2-10\,M_\odot$) se han realizado estos estudios. Por ejemplo, podemos citar la presencia de excesos infrarrojos (Hillenbrand et al. 1992; Lada y Adams 1992). Sin embargo, estos excesos no han sido asociados tan fácilmente con discos como en el caso de T Tauris. En muchos casos, el exceso infrarrojo puede reproducirse mediante una envolvente, sin necesidad de invocar la presencia de un disco (Hartmann et al. 1993; Miroshnichenko et al. 1997). En general, tanto envolvente como disco probablemente deben contribuir de forma significativa al exceso infrarrojo (Miroshnichenko et al. 1999).

Del mismo modo, también se tienen indicios de la presencia de discos en estrellas de masa intermedia y alta mediante mapas de polarimetría (Asselin et al. 1996; Quirrenbach et al. 1997), líneas prohibidas desplazadas al azul (Corcoran y Ray 1997), líneas moleculares con doble pico en radio (Mannings y Sargent 1997), líneas infrarrojas de CO procedentes de las zonas internas del disco (Najita et al. 1996), estructuras toroidales a mayores escalas (Torrelles et al. 1983), e incluso presuntos discos marginalmente resueltos (Gómez et al. 1999). Y como en el caso de estrellas T Tauri, se encuentra una correlación entre vientos y excesos infrarrojos para estrellas Herbig Ae/Be, que sugiere que los vientos son impulsados por acrecimiento (Corcoran y Ray 1998).

Para las estrellas más masivas (tipos O y B tempranos), algunos modelos (Hollenbach et al. 1994; Yorke y Welz 1996) postulan que las regiones HII ultracompactas representan la emisión de gas de un disco circunestelar, que está siendo fotoionizado por la estrella central. Esto explicaría el elevado número (y por tanto, la larga duración) de regiones HII ultracompactas.

A pesar de las semejanzas, debe haber ciertas diferencias con los discos de estrellas T Tauri. Por ejemplo, la mayor energía de la radiación y de los vientos estelares, así como las mayores tasas de acrecimiento influirán en la estructura y la evolución de estos discos y afectarán también a la posible formación de planetas. Estos discos tienen una vida más corta ($< 3 \times 10^5$ años, Hillenbrand et al. 1992) que en estrellas de masa baja.

Emisión máser en discos

En los entornos de estrellas masivas puede producirse emisión máser de moléculas (p., ej., H_2O, OH, metanol) con mayor facilidad, debido a las condiciones más energéticas impuestas por las estrellas. Esta emisión

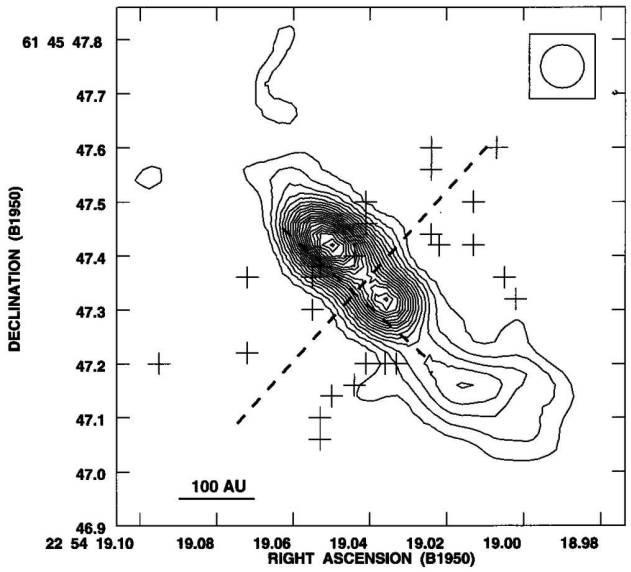


Fig. 6. Emisión de continuo en 1.3 cm (contornos) y emisión máser (cruces) en Cepheus A HW2 (Torrelles et al. 1996). Los máseres parecen distribuirse en un disco, perpendicular al chorro trazado por el continuo.

se produce tras la inversión de poblaciones entre niveles de energía, mediante choques o bombeo radiativo. A menudo, la emisión máser es muy intensa, lo que permite estudiarla con gran resolución angular usando interferómetros de radio (0.1″ con VLA, y del orden de milisegundos con VLBA y VLBI). A esta ventaja se une el que estas líneas proporcionan información cinemática de las zonas de emisión.

Sin embargo, una desventaja es que la emisión máser se produce en zonas con unas condiciones muy concretas, con densidades elevadas y bajo un flujo externo de energía intenso. Por lo tanto, mediante su observación no se obtiene un muestreo completo del gas emisor, lo que dificulta su interpretación morfológica y física.

En muchas ocasiones, los máseres parecen trazar zonas de choque a lo largo de flujos de materia. Su distribución en esas fuentes tiene orientaciones parecidas a chorros o flujos moleculares (Tofani et al. 1995; Cesaroni et al. 1997; Torrelles et al. 1997, 1998). En otros casos, sin embargo, se distribuyen en estructuras más o menos lineales y orientadas en dirección perpendicular a estos flujos, por lo que se sugiere que la emisión proviene de un disco (Fig. 6). Estructuras de este tipo se han encontrado mediante emisión máser de H_2O (p. ej., Matveyenko et al. 1988; Torrelles et al. 1996, 1998; Slysh et al. 1999), SiO (Plambeck et al. 1990) o metanol (Norris et al. 1993, 1998).

Los radios de estos supuestos discos está dentro del rango esperado, entre 15 UA (Slysh et al. 1999) y 500 UA (Shepherd y Kurtz 1999). Además, la cinemática suele ser consistente con rotación, aunque no se pueden descartar otros movimientos, como contracción o expansión (Torrelles et al. 1997).

Se piensa que los máseres de metanol tienden a trazar discos vistos de canto (Norris et al. 1998). Sin embargo, en el caso de los máseres de H_2O, no está claro por qué los máseres parecen trazar flujos en algunas fuentes y discos en otras. Se ha sugerido que esta dicotomía podría ser un efecto evolutivo, de forma que los máseres en fuentes más jóvenes tienden a trazar discos (Torrelles et al. 1997).

Apuntes para el futuro

Un importante paso observacional pendiente es poder resolver discos protoplanetarios utilizando líneas moleculares térmicas. Mediante este tipo de estudios se podrán conocer con detalle la estructura y los procesos físicos en los discos. Ya hemos visto que la instrumentación actual impone serias restricciones sobre este tipo de estudios, pero los nuevos interferómetros milimétricos y submilimétricos los tendrán a su alcance.

Así, Gómez y D'Alessio (2000) predicen que varias líneas moleculares de un disco como el de HL Tau podrán ser detectadas y resueltas con el Submillimeter Array del Smithsonian Astrophysical Observatory (que comienza con sus pruebas de operaciones este mismo año), aunque en el límite de su sensibilidad. Sin embargo, con bastante seguridad estas líneas podrán ser estudiadas a fondo con ALMA (Atacama Large Millimeter Array), que proporcionaría una gran relación señal/ruido. Queremos destacar especialmente el caso de ALMA, un proyecto inicialmente impulsado por NRAO y en cuyo desarrollo participan varios países, incluida España. Con respecto a los discos protoplanetarios, la gran sensibilidad de este interferómetro permitirá el estudio de numerosas líneas moleculares en amplias muestras de fuentes con disco.

Son muchas las líneas de investigación que se podrán abordar con esta nueva instrumentación en el estudio de discos protoplanetarios. A modo de ejemplo, apuntaremos algunas de ellas:

- Estudios de estructura y evolución de abundancias moleculares en las distintas zonas del disco, distinguiendo las regiones de formación de planetas gigantes y terrestres. Estas observaciones involucran moléculas con elementos claves para la vida (C, O, N, S).
- Separación entre el gas y el polvo en distintos estados evolutivos. Esto podría determinarse mediante comparaciones de mapas de continuo y de líneas moleculares. La acumulación del polvo en el plano medio del disco es un paso importante en la formación de planetas.
- Detección de protoplanetas de tipo joviano, mediante su emisión térmica en continuo.
- Determinación directa de la estructura vertical y radial de densidad y temperatura, a partir de observaciones de diferentes transiciones moleculares.
- Detección de huecos en discos, producidos por los planetas en formación.
- Estimación de la magnitud, naturaleza y distribución de la turbulencia (un proceso fundamental en

el acrecimiento), mediante el estudio de los perfiles de líneas.
– Determinación de las zonas de producción de vientos colimados, en escalas muy pequeñas para comprobar las distintas teorías que relacionan vientos con discos.

Agradecimientos

El autor agradece especialmente a Paola D'Alessio por su ayuda y sus comentarios a este manuscrito. También agradece la financiación de la Junta de Andalucía y del proyecto PB980670-C02 de la DGESIC. Las imágenes mostradas en las figuras 2 y 5 son del archivo de STScI-NASA.

Bibliografía

Aarseth, S. J., Lin, D. N. C., Palmer, P. L. 1993, ApJ, 403, 351
Adams, F. C., Lada, C. J., Shu, F. H. 1987, ApJ, 312, 788
Adams, F. C., Lada, C. J., Shu, F. H. 1988, ApJ, 326, 865
Anglada, G., Rodríguez, L. F., Torrelles, J. M., Estalella, R., Ho, P. T. P., Cantó, J., López, R., Verdes-Montenegro, L. 1989, ApJ, 341, 208
Appenzeller, I., Oestreicher, R., Jankovics, I. 1984, A&A, 141, 108
Asselin, L., Menard, F., Bastien, P., Monin, J., Rouan, D. 1996, ApJ, 472, 349
Bacciotti, F., Mundt, R., Ray, T. P., Eislöffel, J., Solf, J. Camezind, M. 2000, ApJ, 537, L49
Bachiller, R. 1996, ARA&A, 34, 111
Balbus, S. A., Hawley, J. F. 1991, ApJ, 376, 214
Bastien, P., Ménard, F. 1988, ApJ, 326, 334
Bastien, P., Ménard, F. 1990, ApJ, 364, 232
Beckwith, S. V. W., Sargent, A. I. 1993, ApJ, 402, 280
Beckwith, S. V. W., Sargent, A. I., Chini, R. S., y Guesten, R. 1990, AJ, 99, 1024
Bertout, C., Basri, G., Bouvier, J. 1988, ApJ, 330, 350
Bodenheimer, P. 1995, ARA&A, 33, 199
Boss, A. P. 1998, ApJ, 503, 923
Burrows, C. J., et al. 1996, ApJ, 473, 437
Butler, R. P., Marcy, G. W., Williams, E., Hauser, H., Shirts, P. 1997, ApJ, 474, L115
Calvet, N., Hartmann, L., Strom, S. E. 2000, en Protostars and Planets IV, ed. V. Mannings, A. P. Boss, S. S. Russell (Tucson: Univ. of Arizona Press), 377
Calvet, N., Patiño, A., Magris, G. C., D'Alessio, P. 1991, ApJ, 380, 617
Cabrit, S., Edwards, S., Strom, S. E., Strom, K. M. 1990, ApJ, 354, 687
Carr, J. S., Tokunaga, A. T., Najita, J., Shu, F. H., Glassgold, A. E. 1993, ApJ, 411, 37
Chamberlin, T.C. 1904, en Yearbook of the Carnegie Institute (Washington, DC: Carnegie Institute), 195
Charbonneau, D., Brown, T. M., Latham, D. W., Mayor, M. 2000, ApJ, 529, L45
Chiang, E. I., Goldreich, P. 1997, ApJ, 490, 368
Corcoran, M., Ray, T. P. 1997, A&A, 321, 189
Corcoran, M., Ray, T. P. 1998, A&A, 331, 147
D'Alessio, P., Calvet, N., Hartmann, L. 1997, ApJ, 474, 397
D'Alessio, P., Cantó, J., Calvet, N., Lizano, S. 1998, ApJ, 500, 411
Dougados, C., Cabrit, S., Lavalley, C., Ménard, F. 2000, A&A, 357, 61
Dutrey, A., Guilloteau, S., Simon, M. 1994, A&A, 286, 149
Edwards, S., Cabrit, S., Strom, S. E., Heyer, I., Strom, K. M., Anderson, E. 1987, ApJ, 321, 473
Edwards, S., Ray, T., Mundt, R. 1993, en Protostars and Planets III, ed. E. H. Levy y J. I. Lunine (Tucson: Univ. Arizona Press), 567
Elmegreen, B. 1982, en Formation of Planetary Systems, ed. A. Brahic (Toulouse: Cephadues), 63
Goodman, A. A., Benson, P. J., Fuller, G. A., Myers, P. C. 1993, ApJ, 406, 528
Gómez, J. F., D'Alessio, P. 2000, ApJ, 535, 943
Gómez, J. F., Sargent, A. I., Torrelles, J. M., Ho, P. T. P., Rodríguez, L. F., Cantó, J., Garay, G. 1999, ApJ, 514, 287
Gómez, J. F., Torrelles, J. M., Ho, P. T. P., Rodríguez, L. F., Cantó, J. 1993, ApJ, 414, 333
Gómez de Castro, A. I. 1993, ApJ, 412, 43
Handa, T., et al. 1995, ApJ, 449, 894
Hartigan, P., Edwards, S., Ghandour, L. 1995, ApJ, 452, 736
Hartmann, L. 1998, Accretion Processes in Star Formation (Cambridge: Cambridge Univ. Press)
Hartmann, L., Calvet, N., Gullbring, E., D'Alessio, P. 1998, ApJ, 495, 385
Hartmann, L., Kenyon, S. J. 1987, ApJ, 323, 714
Hartmann, L., Kenyon, S. J., Calvet, N. 1993, ApJ, 407, 219
Hartmann, L., Hewett, R., Calvet, N. 1994, ApJ, 423, 669
Henry, G. W., Marcy, G. W., Butler, R. P., Vogt, S. S. 2000, ApJ, 529, L41
Hillenbrand, L. A., Strom, S. E., Vrba, F. J., Keene, J. 1992, ApJ, 397, 613
Hollenbach, D., Johnstone, D., Lizano, S., Shu, F. 1994, ApJ, 428, 654
Huré, J. M. 2000, A&A, 358, 378
Jayawardhana, R., Holland, W. S., Greaves, J. S., Dent, W. R. F., Marcy, G. W., Hartmann, L. W., Fazio, G. G. 2000, 536, 425
Kant, I. 1755, Allgemeine Naturgeschichte und Theorie des Himmels (Darmstadt: Wissenshaftliche Buchgesellschaft)
Keene, J., Masson, C. R. 1990, ApJ, 355, 635
Kenyon, S. J., Hartmann, L. 1987, ApJ, 323, 714
Kitamura, Y. Kawabe, R., Saito, M. 1996, ApJ, 457, 277
Koerner, D. W., Ressler, M. E., Werner, M. W., Backman, D. E. 1998, ApJ, 503, L83
Koerner, D. W., Sargent, A. I. 1995, AJ, 109, 2138
Koerner, D. W., Sargent, A. I., Beckwith, S. V. W. 1993, ApJ, 408, L93
Königl, A. 1989, 342, 208
Königl, A., Pudritz, R. E. 2000, en Protostars and Planets IV, ed. V. Mannings, A. P. Boss, S. S. Russell (Tucson: Univ. of Arizona Press), 759

Krist, J. E., Stapelfeldt, K. R., Ménard, F., Padgett, D. L. Burrows, C. J. 2000, ApJ, 538, 793
Kuiper, G. P. 1951, Proc. Natl. Acad. Sci., 37, 1
Lada, C. J., Adams, F. C. 1992, ApJ, 393, 278
Laplace, P. S. 1796, Exposition du Système du Monde (Paris: Imprimerie du Cercle Social)
Lay, O. P., Carlstrom, J. E., Hills, R. E., Phillips, T. G. 1994, ApJ, 434, 75
Lin, D. N. C., Papaloizou, J. 1980, MNRAS, 191, 37
Lin, D. N. C., Pringle, J. E. 1987, MNRAS, 225, 607
Liseau, R., Artymowicz, P. 1998, 334, 935
Lissauer, J. J. 1993, ARA&A, 31, 129
Lynden-Bell, D., Pringle, J. E. 1974, MNRAS, 168, 603
Mannings, V., Sargent, A. I. 1997, ApJ, 490, 792
Marcy, G. W., Butler, R. P. 1998, ARA&A, 36, 57
Marcy, G. W., Cochran, W. D., Mayor, M. 2000, en Protostars and Planets IV, ed. V. Mannings, A. P. Boss, S. S. Russell (Tucson: Univ. of Arizona Press), 1285
Mardones, D., Myers, P. C., Tafalla, M., Wilner, D. J., Bachiller, R., Garay, G. 1997, ApJ, 489, 719
Matveyenko, L. I., Graham, D. A., Diamond, P. J. 1988, en IAU Symp 129, The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics, ed. M. J. Reid, J. M. Moran (Dordrech: Kluwer), 257
Mayor, M., Queloz, D. 1995, Nature, 378, 355
Mendoza, E. E. 1966, ApJ, 143, 1010
Miroshnichenko, A., Ivezic, Z., Elitzur, M. 1997, ApJ, 479, L153
Miroshnichenko, A., Ivezic, Z., Vinkovic, D., Elitzur, M. 1997, ApJ, 520, L115
Mizuno, H. 1980, Prog. Theor. Phys., 64, 544
Morfill, G. E. 1989, en Low Mass Star Formation and Pre-Main Sequence Objects, ed. B. Reipurth (Garching: ESO), 191
Moulton, F. R. 1905, ApJ, 22, 165
Mundt, R., Brugel, E. W., Bührke, T. 1987, ApJ, 319, 275
Mundy, L. G., et al. 1996, ApJ, 464, L169
Myers, P. C., Bachiller, R., Casselli, P., Fuller, G. A., Mardones, D., Tafalla, M., Wilner, D. J. 1995, ApJ, 449, L65
Myers, P. C., Benson, P. J. 1983, ApJ, 266, 309
Muzerolle, J., Calvet, N., Briceño, C., Hartmann, L., Hillenbrand, L. 2000, ApJ, 535, L47
Muzerolle, J., Hartmann, L., Calvet, N. 1998, AJ, 116, 455
Najita, J., Edwards, S., Basri, G., Carr, J. 2000, en Protostars and Planets IV, ed. V. Mannings, A. P. Boss, S. S. Russell (Tucson: Univ. of Arizona Press), 457
Najita, J., Carr, J. s., Glassgold, A. E., Shu, F. H., Tokunaga, A. T. 1996, ApJ, 462, 919
Natta, A. 1993, ApJ, 412, 76
Norris, R. P., et al. 1998, ApJ, 508, 275
Norris, R. P., Whiteoak, J. B., Caswell, J. L., Wieringa, M. H., Gough, R. G. 1993, ApJ, 412, 222
O'Dell, C. R., Wen, Z., Hu, X. 1993, ApJ, 410, 696
Omodaka, T. Kitamura, Y. Kawazoe, E. 1992, ApJ, 396, L87
Paatz, G., Camenzind, M. 1996, A&A, 308, 77
Plambeck, R. L., Wright, M. C. H., Carlstrom, J. 1990, ApJ, 348, L65
Pollack, J. B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P., Lissauer, J. J., Podolak, M., Greenzweig, Y. 1996,Icarus, 124, 62
Popham, R., Narayan, R., Hartmann, L., Kenyon, S. 1993, ApJ, 415, L127
Pudritz, R. E., Norman, C. A. 1983, ApJ, 274, 677
Pudritz, R. E., Norman, C. A. 1986, ApJ, 301, 571
Quirrenbach, A., et al. 1997, ApJ, 479, 477
Rodríguez, L. F., Cantó, J., Torrelles, J. M., Gómez, J. F., Anglada, G., Ho, P. T. P. 1994, ApJ, 427, L103
Rodríguez, L. F., Cantó, J., Torrelles, J. M., Gómez, J. F., Ho, P. T. P. 1992, ApJ, 393, L29
Rodríguez, L. F., D'Alessio, P., Wilner, D. J., Ho, P. T. P., Torrelles, J. M., Curiel, S., Gómez, Y., Lizano, S., Pedlar, A., Cantó, J., Raga, A. C. 1998, Nature 395, 355
Rodríguez, L. F., Ho, P. T. P., Moran, J. M. 1980, ApJ, 240, L149
Ruden, S. P. 1986, Tesis doctoral, Univ. of California, Santa Cruz.
Sargent, A. I., Beckwith, S. V. W. 1991, ApJ, 382, 31
Schneider, G. 1999, ApJ, 313, L127
Shakura, N. I., Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337
Shepherd, D. S., Kurtz, S. E. 1999, ApJ, 523, 690
Shu, F. H., Adams, F. C., Lizano, S. 1987, ARA&A, 25, 23
Shu, F. H., Johnstone, D., Hollenbach, D. 1993, Icarus, 106, 92
Shu, F., Najita, J., Ostriker, E., Wilkin, F., Ruden, S., Lizano, S. 1994, ApJ, 429, 797
Slysh, V. I., Val'tts, I. E., Migenes, V., Fomalont, E., Hirabayashi, H., Inoue, M., Umemoto, T. 1999, ApJ, 526, 236
Smith, B. A., Terrile, R. J. 1984, Science, 226, 1421
Snell, R. L., Loren, R. B., Plambeck, R. L. 1980, ApJ, 239, L17
Snell, R. L., Mundy, L. G., Goldsmith, P. F., Evans, N. J., II, Erickson, N. R. 1984, ApJ, 276, 625
Stepinski, T. F., Reyes-Ruiz, M., Vanhala, H. A. T. 1993, Icarus, 106, 77
Strom, K. M., Strom, S. E., Edwards, S., Cabrit, S., Skrutskie, M. F. 1989, AJ, 97, 1451
Strom, S. E. 1995, Rev. Mex. Astron. Astrof. SC, 1, 317
Strom, S. E., Edwards, S., Skrutskie, M. F. 1993, en Protostars and Planets III, ed. E. H. Levy y J. I. Lunine (Tucson: Univ. Arizona Press), 837
Swedenborg, E. 1734, Principia Rerum Naturalium (Leipzig: Sumptibus Friderici Hekelii)
Terebey, S., Shu, F. H., Cassen, P., 1984, ApJ, 286, 529
Tofani, G., Felli, M., Taylor, G. B., Hunter, T. R. 1995, A&AS, 112, 299
Torrelles, J. M., Gómez, J. F., Ho, P. T. P., Rodríguez, L. F., Anglada, G., Canto, J. 1994, ApJ, 435, 290
Torrelles, J. M., Gómez, J. M., Rodríguez, L. F., Curiel, S., Anglada, G., Ho, P. T. P. 1998, ApJ, 505, 756
Torrelles, J. M., Gómez, J. F., Rodríguez, L. F., Curiel, S., Ho, P. T. P., Garay, G. 1996, ApJ, 457, L107
Torrelles, J. M., Gómez, J. F., Rodríguez, L. F., Ho, P. T. P., Curiel, S., Vazquez, R. 1997, ApJ, 489, 744
Torrelles, J. M., Rodríguez, L. F., Canto, J., Carral, P., Marcaide, J., Moran, J. M., Ho, P. T. P. 1983, ApJ,

274, 214
Wetherill, G. W., Stewart, G. R. 1989, Icarus, 77, 330
Wilner, D. J., Ho, P. T. P., Kastner, J. H., Rodríguez, L. F. 2000, ApJ, 534, L101
Wilner, D. J., Ho, P. T. P., Rodríguez, L. F. 1996, ApJ, 470, L117
Wolk, S. J., Walter, F. M. 1996, AJ, 111, 2066
Yorke, H. W., Welz, A. 1996, A&A, 315, 555
Zhou, S., Evans, N. J., II, Kömpe, C., Walmsley, C. M. 1993 ApJ, 404, 232

Algunas aplicaciones científicas de la espectroscopia 2D

Evencio Mediavilla Gradolph, Santiago Arribas Mocoroa, Adolfo García Marín, José Luís Rasilla Piñeiro y Begoña García Lorenzo

emg@iac.es, sam@iac.es, agm@iac.es, jlr@iac.es y bgarcia@iac.es

Instituto de Astrofísica de Canarias, Via Láctea s/n, 38200 La Laguna - Tenerife

Abstract

Two-dimensional, or integral field, spectroscopy (IFS) is a new instrumental technique devised for obtaining a 2D distribution of spectra from an extended object. Using 2D spectroscopy, all the information, spatial and spectral, is simultaneously recorded. This is an important advantage with respect to conventional techniques such as Fabry–Perot or long-slit scanning. Instrumental designs for IFS based on the use of optical fibres are simple and very flexible. The study of gravitational lenses and of ionized gas in the central regions of galaxies have been until now the main fields of application of IFS. However, the use of this technique in pioneering scientific areas will be furthered by new instrumental developments, especially by the construction of systems designed for large telescopes. In this article we introduce the concept and present its scientific applications. A more detailed description of the technique and instrumentation can be found in Arribas & Mediavilla (2000).

Resumen

La espectroscopia bidimensional o espectroscopia de campo integral es una nueva técnica instrumental que permite obtener una distribución 2D de espectros de un objeto extenso. Frente a las técnicas convencionales (como Fabry-Perot o *barridos* con rendija larga) la espectroscopia 2D presenta la gran ventaja de que toda la información espectral y espacial es recogida simultáneamente. Entre los sistemas de espectroscopia bidimensional, los basados en el uso de fibras ópticas se distinguen por su sencillez y flexibilidad. El estudio de las lentes gravitatorias y de la cinemática en las regiones centrales de las galaxias son los campos científicos en los que se ha usado con más interés la espectroscopia 2D. Sin embargo, la aplicación de esta técnica en otras áreas inéditas se verá impulsada en un futuro muy próximo por la entrada en funcionamiento de nuevos instrumentos muchos de ellos concebidos para los grandes telescopios. En este artículo introduciremos el concepto y nos centraremos en las aplicaciones científicas. Una descripción detallada de la técnica y de la instrumentación puede encontrarse en Arribas y Mediavilla (2000).

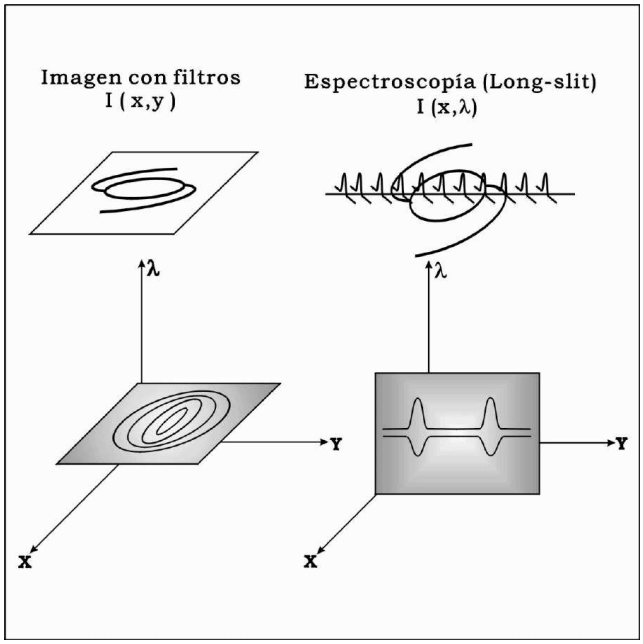


Fig. 1. Técnicas clásicas de observación (imagen con filtros estrechos y espectroscopia de rendija larga) en un espacio 3D, $I(x, y, \lambda)$.

Introducción

Las dos técnicas clásicas más utilizadas en Astronomía para observar objetos extensos son imagen con filtros y espectroscopia de rendija larga. Con la primera de ellas se obtiene la intensidad del objeto como una función de dos coordenadas espaciales en una banda fotométrica dada, $I_{\lambda\pm\Delta\lambda}(x, y)$. Con la espectroscopia de rendija larga se obtiene una colección de espectros a lo largo de una dirección espacial (ej. diagrama velocidad-posición), $I_{x\pm\Delta x}(y, \lambda)$. En un espacio 3D en el que se incluyan las dos coordenadas espaciales y el dominio espectral, (x, y, λ), las imágenes y los diagramas velocidad-posición corresponden a superficies planas (ver Figura 1).

Sin embargo, muchos programas científicos requieren obtener una colección de espectros regularmente distribuidos sobre un objeto extenso. Esto es, se necesita información 3D, $I(x, y, \lambda)$. Pero los detectores actualmente en uso (CCDs) son planos y hay que resolver el problema de cómo almacenar información tridimensional, un cubo de datos, en un detector bidimensional (ver Figura 2). La solución clásica consiste en utilizar los métodos clásicos secuencialmente, usando el tiempo para *barrer* una de las tres coordenadas. Por ejemplo (Figura 3) podemos hacer una serie de exposiciones distintas desplazando cada vez el telescopio en la dirección perpendicular a la rendija una distancia igual al ancho de la misma, de forma que la rendija *barra* el objeto, obteniendo un conjunto de diagramas velocidad-posición $\{I_{x_i\pm\Delta x}(y, \lambda), x_i = x_{i-1}+2\Delta x\}$. Esta es la técnica de *barridos* con rendija larga. Otra técnica alternativa, la interferometría Fabry-Perot, consiste en utilizar un filtro ajustable en λ cambiando la

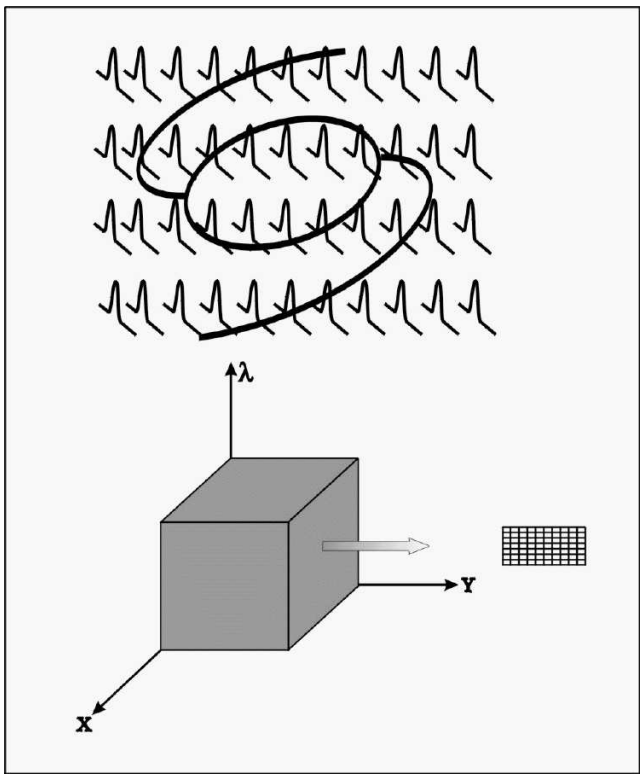


Fig. 2. El *cubo de datos*, $I(x, y, \lambda)$.

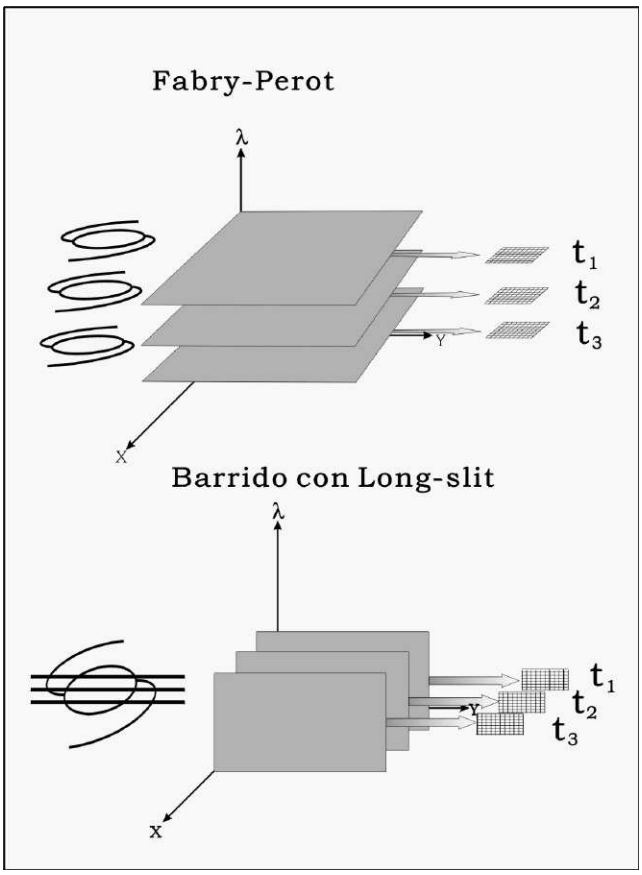


Fig. 3. Métodos secuenciales: Fabry-Perot y *barridos* con rendija larga.

coordenada espectral en sucesivas exposiciones y obteniendo una colección de imágenes de banda estrecha[1] $\{I_{\lambda_i \pm \Delta\lambda}(x, y), \lambda_i = \lambda_{i-1} + 2\Delta\lambda\}$. Con estas técnicas se secuencia el cubo de datos en una colección de superficies (idealmente planos paralelos, ver Figura 3). Aparte de otros inconvenientes prácticos y técnicos, la principal desventaja conceptual de estas técnicas es que diferentes partes del cubo de datos se obtienen bajo diferentes condiciones instrumentales y atmosféricas.

Para superar estos problemas, se han desarrollado recientemente nuevas técnicas (conocidas genéricamente como espectroscopia 2D o espectroscopia de campo integral) que permiten almacenar simultáneamente la función $I(x, y, \lambda)$, el cubo de datos, en un detector 2D. Estas técnicas pueden basarse en una o dos etapas. En la primera, la imagen se fragmenta en varios elementos en el plano focal. En la segunda, los fragmentos se redistribuyen a la entrada del espectrógrafo generalmente alineados. En la Figura 4 se ilustra esta transformación en dos etapas con un haz de fibras. El plano focal se discretiza usando una matriz de fibras. En el otro extremo del haz las fibras se disponen alineadas formando una seudo-rendija a la entrada del espectrógrafo. De esta manera, cuando el telescopio apunta a un objeto extenso, el haz de fibras lo discretiza en una matriz de regiones en el plano focal y se obtiene un espectro para cada una de estas regiones en el espectrógrafo, *simultáneamente*.

La mayor parte de las ventajas de la espectroscopia 2D son consecuencia de la simultaneidad en la obtención de la información espectral y espacial. La simultaneidad garantiza, sobre todo, la homogeneidad de los datos. Una de las consecuencias más relevantes es la posibilidad de caracterizar e incluso corregir en los espectros los efectos de la refracción atmosférica diferencial (Arribas et al. 1999). Estos efectos afectan de manera muy severa a las técnicas secuenciales clásicas, especialmente a las observaciones con rendija larga. Por otro lado, las prestaciones espectrales dependen básicamente del espectrógrafo y permiten la observación de grandes rangos en λ, una importante ventaja respecto a la interferometría Fabry-Perot. La espectroscopia 2D presenta también ventajas prácticas. No hay necesidad de centrar la rendija ni de adaptar la anchura de la rendija a las condiciones atmosféricas (ya que la resolución espectral viene definida por el tamaño de las fibras sobre el detector). Además, la reducción, calibración y homogeneización de los datos no presenta dificultades especiales.

Las técnicas de espectroscopia 2D se basan en el uso de (i) micro-lentes, (ii) micro-espejos, (iii) fibras ópticas ó (iv) una solución mixta. Los sistemas de fibras ópticas ofrecen, frente a las otras alternativas, flexibilidad y simplicidad. Los sistemas basados en micro-lentes o micro-espejos exigen diseños ópticos muy específicos. Los sistemas basados en el uso de fibras, por

[1] En realidad, la interferometría Fabry-Perot *barre* el cubo de datos con superficies que no son planas.

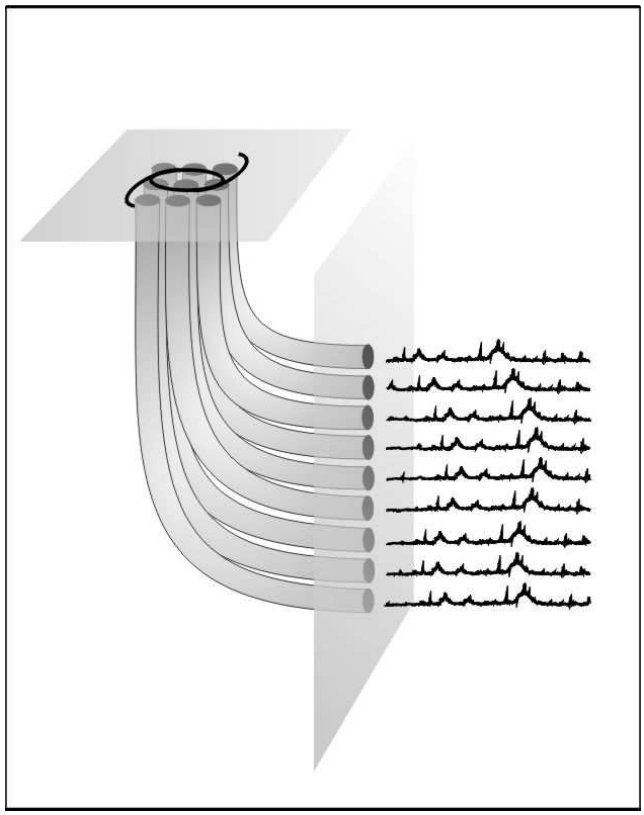


Fig. 4. La imagen se discretiza en el plano focal con una matriz de fibras que se alinea a la entrada del espectrógrafo formando una seudo-rendija.

el contrario, son extraordinariamente flexibles y pueden adaptarse con facilidad a espectrógrafos convencionales. Por otra parte, un espectrógrafo alimentado con fibras no necesita estar sujeto al telescopio, ni cerca del plano focal, lo que simplifica enormemente el diseño del instrumento y su estabilidad frente a flexiones mecánicas y permite su aislamiento térmico.

Las primeras pruebas relevantes de sistemas de espectroscopia 2D basadas en el uso de fibras ópticas fueron llevadas a cabo al principio de la década de los 80 por Vanderriest en el CFHT. Algunos años después nació una generación de instrumentos pioneros que tuvieron el mérito de producir los primeros resultados científicos y de enseñar a la comunidad científica el potencial de esta nueva técnica: SILFID/ARGUS (CFHT, Vanderriest y Lemonier 1988), DensePack (KPNO, Barden y Wade 1988), HEXAFLEX (WHT, Arribas, Mediavilla y Rasilla 1991) y MPFS (6m, Afanasiev, Vlasiouk y Green 1995). En la actualidad hay disponibles varios instrumentos para obtener espectroscopia 2D; 2D-FIS (WHT, García et al. 1994), MOS/ARGUS (CFHT, Vanderriest 1995), INTEGRAL (WHT, Arribas et al. 1998) y WYN-DensePack (WIYN-KPNO, Barden e Ingerson 1998); pero el gran desarrollo de esta técnica se va a producir en un futuro próximo cuando una nueva generación de instrumentos (muchos de ellos planeados para grandes telescopios) entre en funcionamiento rutinario (ver

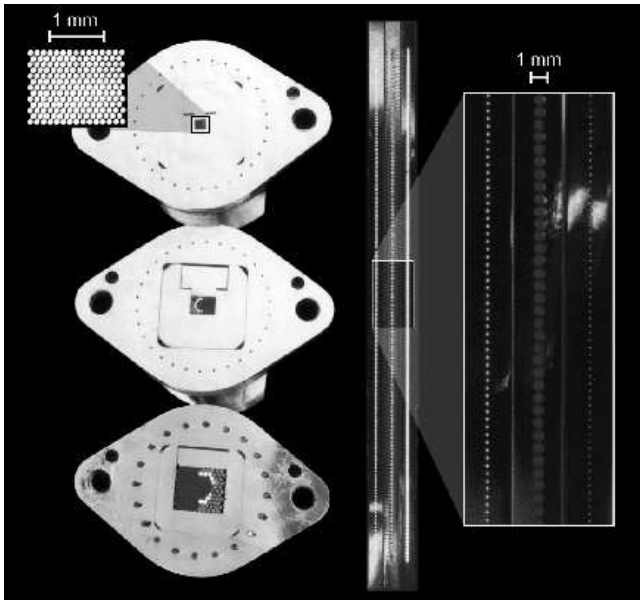


Fig. 5. Fotografía de las matrices (plano focal) y seudo-rendijas (entrada del espectrógrafo) de los haces de fibras de INTEGRAL.

Arribas y Mediavilla 2000).

Para ilustrar el uso científico de los instrumentos basados en el uso de fibras ópticas vamos a describir brevemente a INTEGRAL, un sistema de uso común situado en el foco Nasmyth del WHT en La Palma. En su configuración estándar, INTEGRAL dispone de tres haces que están simultáneamente montados a la entrada del espectrógrafo de fibras WYFFOS. En el plano focal los tres haces están situados en una rueda giratoria que permite intercambiarlos en segundos. En la Figura 5 podemos ver las matrices de fibras que van al plano focal y las tres seudo-rendijas que van a la entrada del espectrógrafo. En el esquema de la Figura 6 podemos ver las características de los tres haces. El primer haz tiene una resolución espacial bastante buena (aunque el área de cielo que cubre es muy pequeña). Por el contrario el tercero tiene un campo bastante grande a expensas de empeorar la resolución espacial. El segundo haz tiene propiedades intermedias. De esta manera, el observador puede escoger en segundos el haz que desea dependiendo de los objetivos científicos o de la atmósfera. Estas son las características básicas de INTEGRAL. En Arribas et al. (1998) pueden encontrarse otros detalles más técnicos.

Aplicaciones

Ilustraremos las aplicaciones con observaciones reales. En la Figura 7 se muestra un conjunto de espectros tomados del sistema lente gravitatoria Q0957+561 con el haz SB2 de INTEGRAL cuyas características describimos en la sección anterior. Utilizando este haz se han obtenido 189 espectros homogéneamente distribuidos sobre una superficie de $16'' \times 12''$ con un mues-

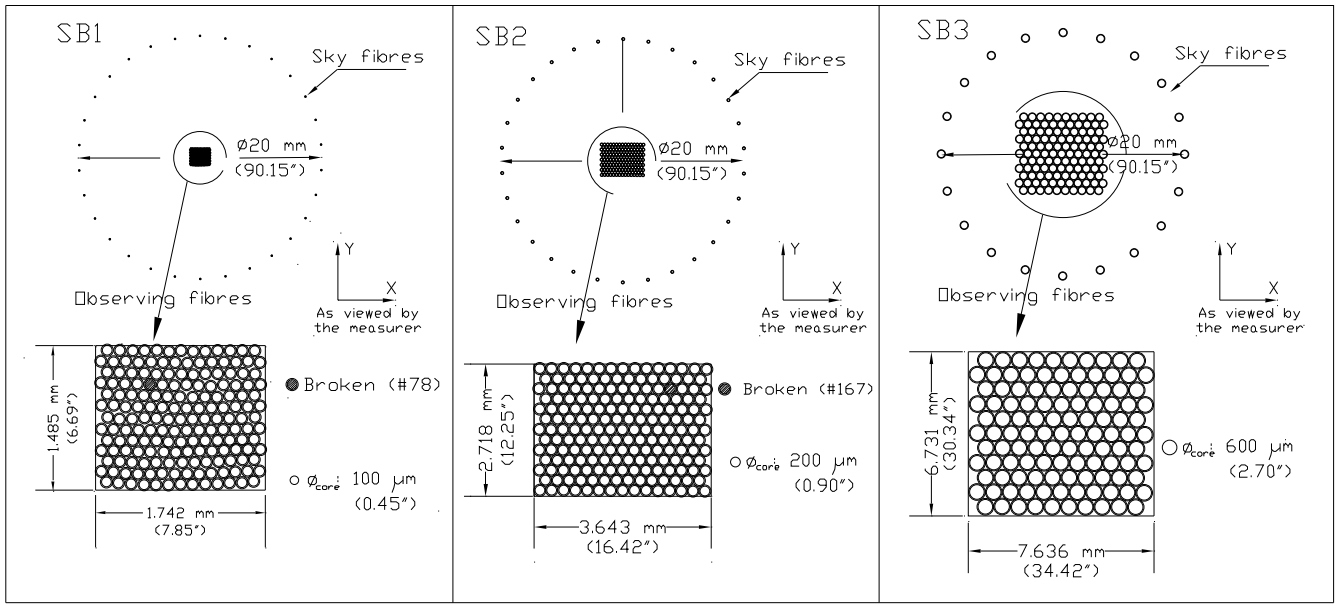


Fig. 6. Esquema mostrando las características geométricas de los haces de fibras de INTEGRAL.

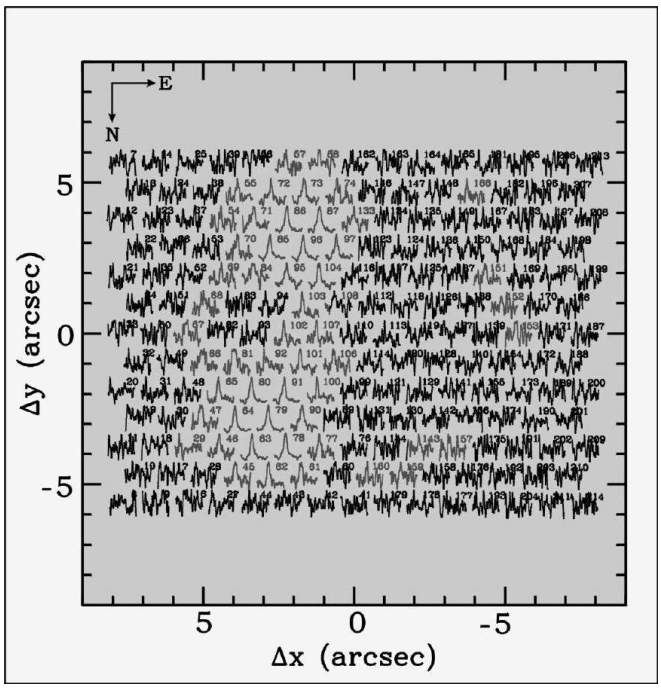


Fig. 7. Distribución 2D de espectros tomados con el haz SB2 de INTEGRAL del sistema lente gravitatoria doble Q 0957+561. Aunque el rango espectral observado es considerablemente más amplio, en esta figura se ha representado una pequeña región alrededor de la línea de emisión CIII]λ1909. En la figura puede reconocerse fácilmente emisión en las dos imágenes compactas del sistema.

treo espacial de $1''$. Para cada uno de los espectros se pueden estimar magnitudes como el continuo en una banda seleccionada, la emisión en una línea o el desplazamiento al rojo. A partir de las determinaciones del continuo para los 118 espectros y de sus coordenadas, $\{(x_i, y_i, I_i), i = 1, 118\}$, se puede interpolar una imagen del continuo en esa banda (Figura 8, panel superior). De igual manera se pueden construir imágenes correspondientes a otros parámetros como la intensidad de la emisión en una línea (Figura 8, panel central) o un mapa de desplazamientos al rojo (Figura 8, panel inferior).

En general, a partir de un conjunto de espectros de un objeto extenso se pueden crear mapas de cualquier característica espectral como (i) bandas del continuo, (ii) intensidad de una línea, (iii) campos de velocidad media asociados a líneas de emisión o de absorción, o (iv) anchuras de las líneas. En García-Lorenzo, Mediavilla y Arribas (1999), pueden encontrarse ejemplos de todos estos mapas. Si se combinan dos líneas puede obtenerse otro tipo de información como (v) mapas de densidad electrónica derivados del cociente entre las líneas del [SII]$\lambda\lambda$6717, 6731 (Mediavilla, Arribas y Rasilla 1992), (vi) mapas del grado de ionización a partir de las líneas [OIII]λ5007 y Hβ (García-Lorenzo, Mediavilla y Arribas 1999), o (vii) mapas de extinción a partir de las líneas de Balmer (Mediavilla, Arribas y Rasilla 1992). Finalmente, la combinación de más líneas puede dar información aún más completa sobre las condiciones físicas en el objeto bajo estudio. Por ejemplo, (viii) combinando los cocientes [OIII]λ5007/Hβ y [NII]λ4959/Hα, pueden obtenerse diagramas de diagnóstico como el presentado en del Burgo, Mediavilla y Arribas (2000) que permiten estudiar los mecanismos de fotoionización en el gas de la región circumnuclear de M 31 (Figura 9). Estos son sólo algunos ejemplos de la riqueza y profundidad de los análisis que pueden llevarse a cabo a partir de la espectroscopia 2D de un objeto. A continuación ilustraremos estas aplicaciones (y otras no mencionadas como la determinación de índices espectrales) con algunos resultados científicos concretos.

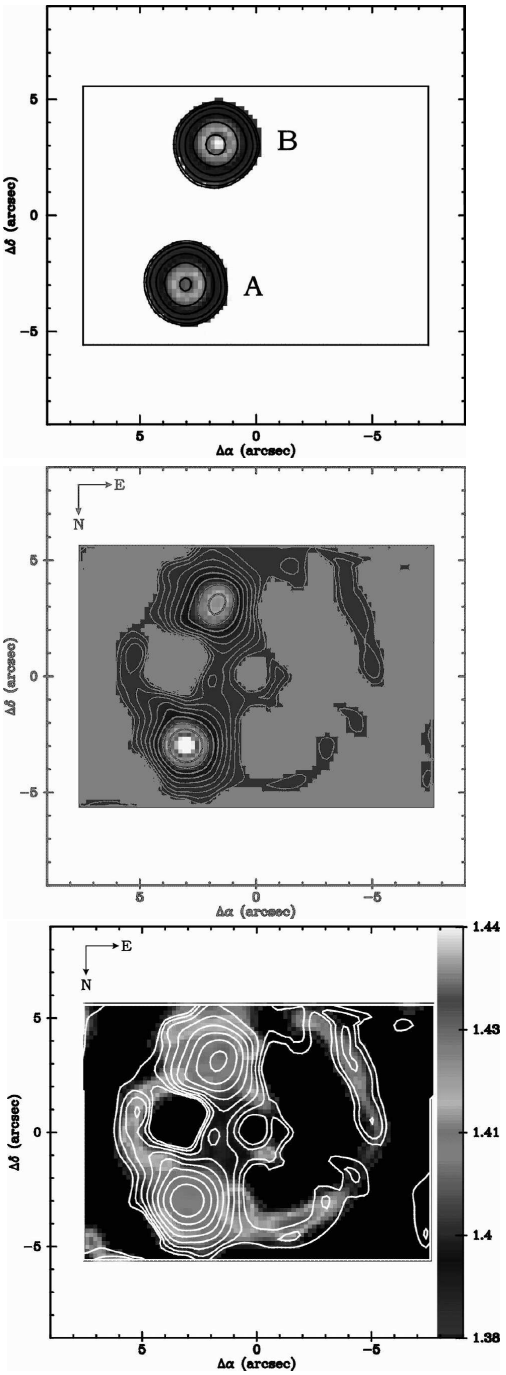


Fig. 8. Arriba: Mapa de intensidad del continuo en una banda adyacente a la línea CIII]λ1909 obtenido a partir de los espectros de la Figura 7. En este mapa pueden reconocerse las dos imágenes puntuales correspondientes a las componentes compactas del sistema lente. **Centro**: Mapa de intensidad de la emisión en la línea CIII]λ1909 obtenido a partir de los espectros de la Figura 7. Además de las componentes compactas observadas en el mapa del continuo (arriba) pueden reconocerse un puente de luz conectando ambas componentes y, con menor relación S/R, dos arcos de emisión extensa. **Abajo**: Mapa de desplazamientos al rojo asociado a los espectros de la Figura 7 (niveles de grises). Sobre este mapa se ha sobreimpuesto el mapa de intensidad de la emisión en la línea CIII]λ1909 del panel central (isofotas). De acuerdo con esta figura, el puente de luz que conecta las componentes compactas es una estructura muy azulada si comparamos su desplazamiento al rojo con el del cuásar fuente.

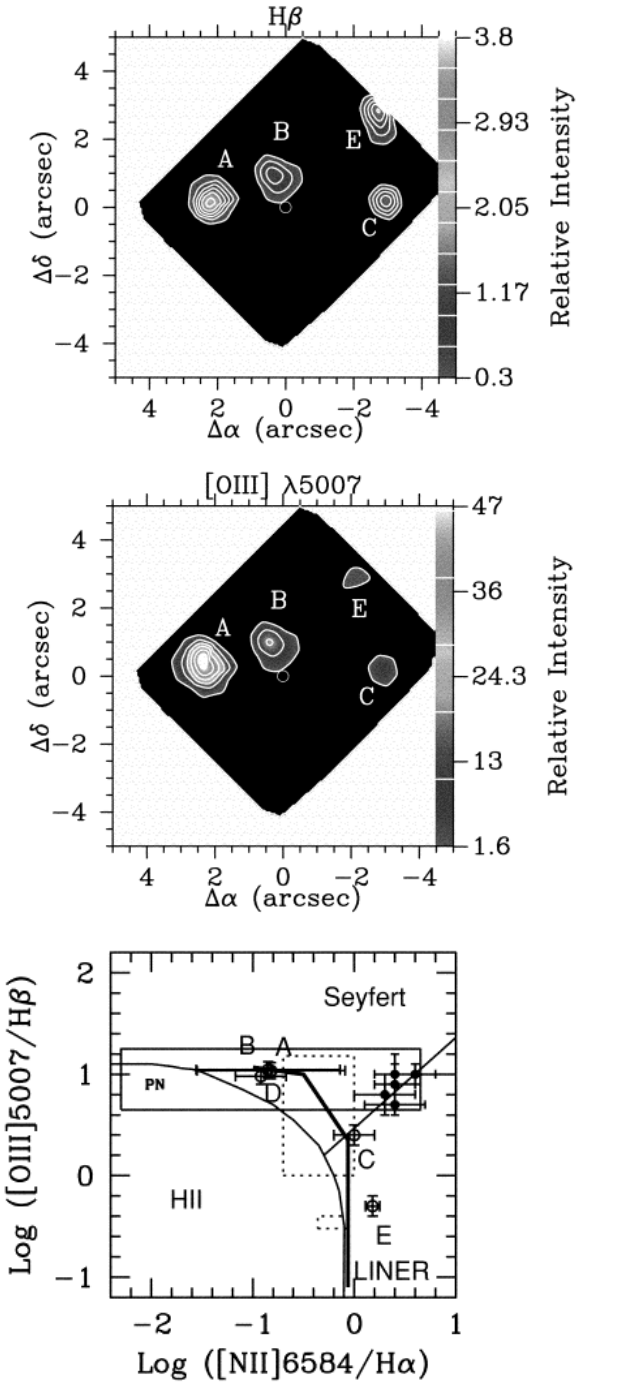


Fig. 9. Arriba y centro: Mapas de intensidad en las líneas de Hβ y [OIII]λ5007 mostrando las regiones de gas de alta ionización detectadas con INTEGRAL en la región circumnuclear de M 31. Estas regiones no habían podido ser detectadas con métodos tradicionales y se ignoraba la existencia de gas ionizado en la región más cercana al núcleo. (Cortesía de ApJ). **Abajo**: En este diagrama de diagnóstico se han representado las regiones (A, B, C, D y E) de gas ionizado detectadas con INTEGRAL en el entorno circumnuclear de M 31. Algunas de estas regiones (A, B y D) presentan cocientes de líneas típicas de las galaxias Seyfert. Otra se sitúa en la región de los LINERS (C) y otra en una zona intermedia (E). De acuerdo con este diagrama, M 31 podría albergar un nucleo activo de muy baja luminosidad. (Cortesía de ApJ).

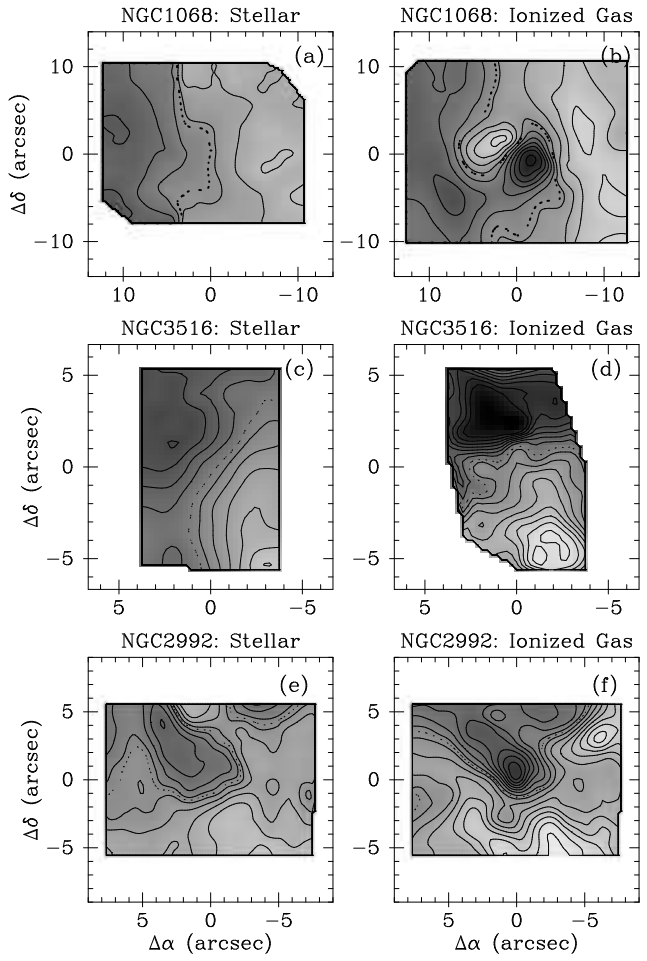


Fig. 10. Campos de velocidad correspondientes a las estrellas y al gas ionizado en la región central de tres galaxias. El desacoplo entre las cinemáticas estelar y gaseosa es patente. En NGC 1068 y NGC 3516, los mapas de gas ionizado presentan importantes distorsiones que los apartan de una cinemática regular asociada a rotación. El mapa de velocidad estelar de NGC 1068 también presenta una fuerte distorsión en la parte central que podría atribuirse a la captura y fusión de una galaxia satélite.

Resultados científicos

Como hemos comentado anteriormente la espectroscopia 2D es especialmente adecuada para observar regiones de objetos extensos de tamaños relativamente pequeños ($\leq 30''$). Dos áreas de investigación, galaxias y lentes gravitatorias, merecen particular interés.

Galaxias

Este es el campo de investigación en el que más se ha aplicado la espectroscopia 2D. Hay muchos artículos publicados acerca de la dinámica y las condiciones físicas en el gas ionizado (e.g. García- Lorenzo, Mediavilla y Arribas 1999), la cinemática estelar (e.g. García-Lorenzo et al. 1997), el estudio de la población estelar (Peletier et al. 1999), o las galaxias infrarrojas ultraluminosas (Colina, Arribas y Borne 1999). Como ejemplo de estos resultados, en la Figura 10 mostramos la comparación entre las cinemáticas estelar y del gas ionizado en tres galaxias. En Arribas y Mediavilla (2000) se revisan estos estudios y se discuten algunos resultados generales obtenidos con la espectroscopia 2D. Otros campos de interés son el estudio de las regiones HII gigantes en galaxias y la estructura y dinámica de las galaxias enanas azules compactas.

Lentes Gravitatorias

Los sistemas lentes gravitatorias consisten en varias fuentes, puntuales y extensas, agrupadas en una región muy pequeña ($\sim 3'' \times 3''$). Debido a estas circunstancias es muy difícil estudiarlos con rendija larga y son candidatos ideales para la espectroscopia 2D. Aunque ya desde los primeros tiempos del desarrollo de la espectroscopia 2D las lentes gravitatorias fueron reconocidas como un objetivo especialmente adecuado (después del cometa Halley un sistema lente, H 1413+117, fue el primer objeto observado con SILFID/ARGUS en 1989), varios factores (la baja eficiencia de los instrumentos primitivos de fibras y la necesidad de contar con buenas condiciones atmosféricas) guiaron las observaciones hacia objetos más asequibles. Por este motivo, a pesar de ser otra de las áreas clásicas de aplicación de la espectroscopia 2D, este campo permanece aún casi virgen si nos atenemos a las enormes posibilidades que encierra. Entre los sistemas lente observados se encuentran H 1413+117 (Angonin et al. 1990), Q 0957+561 (Vanderriest 1993), arcos gigantes en Abell 2218 y 370 (Soucail 1998) y, sobre todo, el sistema Q 2237+0305. El descubrimiento en este sistema tan compacto de un arco de emisión (Figura 11) ilustra perfectamente el tipo de estudios que pueden llevarse a cabo con espectroscopia 2D (ver Mediavilla et al. 1998 y referencias allí citadas).

Otras áreas de investigación

Como ya hemos comentado, el cometa Halley fue el primer objeto observado con SILFID/ARGUS (Malivoir et al. 1990). Aunque no haya habido más trabajos en este campo, los cometas, planetas, corona solar y otros objetos de nuestro sistema planetario son objetivos muy adecuados para la espectroscopia 2D. En cometas brillantes, por ejemplo, el seguimiento espectroscópico continuado permitiría estudiar la compleja dinámica de la coma de estos objetos.

Otro campo muy prometedor e inexplorado es el estudio de las condiciones físicas y la cinemática del gas ionizado en nebulosas planetarias, regiones HII, objetos Herbig-Haro, sistemas T-Tauri y remanentes de supernovas. En muchos de estos casos (como en las nebulosas bipolares) las líneas de emisión pueden ser muy intensas facilitando la obtención de mapas de velocidad y el estudio de la variación en 2D de los diferentes parámetros que caracterizan las condiciones físicas del gas ionizado.

Por último, utilizando un sistema de fibras ópticas especialmente diseñado (Arribas, Mediavilla y Fuensa-

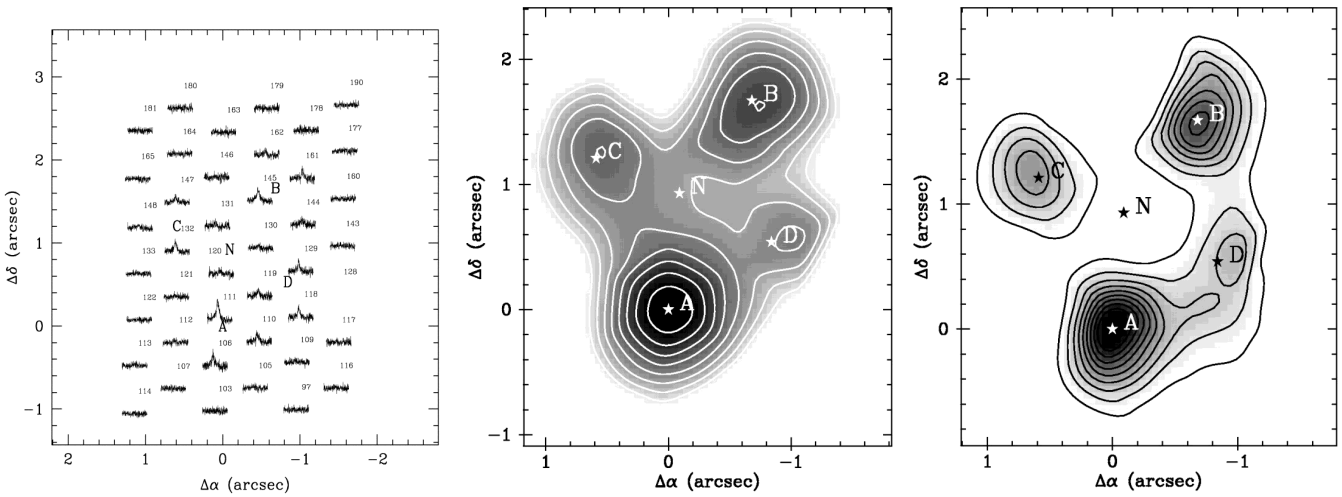


Fig. 11. Izquierda: Distribución 2D de espectros tomados con el haz SB1 de INTEGRAL del sistema lente gravitatoria cuádruple Q 2237+0305. Aunque el rango espectral observado es considerablemente más amplio, en esta figura se ha representado una pequeña región alrededor de la línea de emisión CIII]λ1909. Las excelentes condiciones de *seeing* (por debajo del segundo de arco) han permitido aislar la emisión procedente de cada una de las componentes del sistema. (Cortesía de ApJ). **Centro**: Mapa de intensidad del continuo en una banda adyacente a la línea CIII]λ1909 obtenido a partir de los espectros del panel izquierdo. Pueden reconocerse las cuatro imágenes compactas que aparecen bién resueltas. (Cortesía de ApJ). **Derecha**: Mapa de intensidad de la emisión en la línea CIII]λ1909 obtenido a partir de los espectros del panel izquierdo. Además de las cuatro componentes compactas observadas en el mapa del continuo (panel central) puede reconocerse un arco de emisión uniendo las componentes A, D y B. Un modelo del sistema lente sugiere que el arco podría ser la imagen magnificada y distorsionada por el efecto lente de una región de gas ionizado de grandes dimensiones en la galaxia que hospeda al cuásar fuente. (Cortesía de ApJ).

lida 1998) es posible combinar las ventajas de la espectroscopia 2D con los objetivos de la coronografía. Esta técnica, la espectroscopia 2D ecualizada, ha permitido discriminar e identificar objetos muy cercanos y de muy diferente brillo a partir de sus espectros.

Se puede encontrar este mismo artículo, con las figuras en color en la página:
`http://www.ing.iac.es/~bgarcia/integral/sea`.

Bibliografía

Afanasiev, V.L., Vlasiouk, V.V., Green, R.F., 1995, en *Tridimensional Optical Spectroscopic Methods in Astrophysics*, Ed. G. Comte y M. Marcelin, ASP Conf. Ser., Vol. 71, p. 266

Angonin, M.C., Remy, M., Surdej, J., Vanderriest, C., 1990, A&A, 233, L5

Arribas, S., Mediavilla, E., Rasilla J.L., 1991, ApJ, 369, 270

Arribas, S., Carter, D., Cavaller, L., del Burgo, C., Edwards, R., Fuentes, J., García, A., Gentles, B., Herreros, J.M., Jones, L., Mediavilla, E., Pi, M., Pollacco, D., Rees, P., Sosa, N., 1998, Proc. SPIE, Vol. 3355, p. 821

Arribas, S., Mediavilla, E., Fuensalida, J.J., 1998, ApJ, 505, L43

Arribas, S., Mediavilla, E., García-Lorenzo, B., del Burgo, C., Fuensalida, J.J., 1999, A&ASS, 136, 189

Arribas, S., Mediavilla, E., 2000, en *Imaging the Universe in Three Dimensions*, Eds. van Breugel y Bland-Hawthorn, ASP Conf. Ser., Vol. 195, p. 295

Barden, S.C., Ingerson, T.E., 1998, en *Fiber Optics in Astronomy III*, Eds. S. Arribas, E. Mediavilla y F. Watson, ASP Conf. Ser., 152, 60

Barden, S.C., Wade, R.A., 1988, en *Fiber Optics in Astronomy*, Ed. S. Barden, ASP Conf. Ser, Vol. 3, p. 113

Bershady, M.A., Andersen, D., Ramsey, L., Horner, S., 1998, en *Fiber Optics in Astronomy III*, Eds. S. Arribas, E. Mediavilla y F. Watson, ASP Conf. Ser., Vol. 152, p. 253

Colina, L., Arribas, S., Borne, K.D., 1999, ApJ, 527, L13

del Burgo, C., Mediavilla, E., Arribas, S., 2000, ApJ, 540, 741

García-Lorenzo, B., Mediavilla, E., Arribas, S., 1999, ApJ, 518, 190

García-Lorenzo, B., Mediavilla, E., Arribas, S., del Burgo, C., 1997, ApJ, 483, L99

García, A., Rasilla, J.L., Arribas, S., Mediavilla, E., 1994, Proc. SPIE, Vol. 2198, p. 75

Malivoir, C., Encrenaz, Th., Vanderriest, C., Lemonnier, J.P., Kohl-Moreira, J.L., 1990, Icarus, 87, 412

Mediavilla, E., Arribas, S., Rasilla, J.L., 1992, ApJ, 396, 517

Mediavilla, E., Arribas, S., del Burgo, C., Oscoz, A., Serra-Ricart, M., Alcalde, D., Falco, E.E., Goicoechea, J.L., García-Lorenzo, B., Buitrago, J., 1998, ApJ, 503, L27

Peletier R.F., Vazdekis, A., Arribas, S., del Burgo, C.,

García-Lorenzo, B., Gutierrez, C., Mediavilla, E., Prada, F., 1999, MNRAS, 310, 863

Soucail, G., 1998, en *Fiber Optics in Astronomy III*, Eds. S. Arribas, E. Mediavilla y F. Watson, ASP Conf. Ser., Vol. 152, p. 161

Vanderriest, C., 1993, en *Fiber Optics in Astronomy II*, Ed. P.M. Gray, ASP Conf. Ser., Vol. 37, p. 338

Vanderriest C. 1995, en *3D Optical Spectroscopic Methods in Astronomy*, Eds. G. Comte y M. Marcelin, ASP Conf. Ser., Vol. 71, p. 209

Vanderriest, C., Lemonier, J.P., 1988, en *Instrumentation for ground-based Astronomy*, Ed. L. Robinson, New York, Springer-Verlag, p. 304

Tesis doctorales

Métodos de análisis de la radiación cósmica del fondo de microondas y el efecto Sunyaev-Zel'dovich

José M. Diego Rodríguez diego@ifca.unican.es

Director/es: Enrique Martínez-González
Centro: Instituto de Física de Cantabria
Lectura: 14 de septiembre de 2000

En esta tesis se ha efectuado un estudio del Fondo Cósmico de Microondas (FCM) a través de dos tipos de análisis distintos. Un primero basado en la función de partición y un segundo en el cual se estudia la rugosidad del FCM. En el trabajo hecho con la función de partición se desarrollaron tres métodos nuevos para analizar el FCM. El primer método utilizaba la función de partición como un modo de caracterizar el FCM en diferentes escalas e incluyendo información concerniente a los distintos momentos. Se efectuó un análisis de máxima verosimilitud con el fin de buscar los mejores parámetros (índice espectral y amplitud del espectro del FCM) que ajustaban el modelo del FCM a los datos DMR del satélite COBE. Los resultados mostraron ser compatibles con lo obtenido por otros grupos. El segundo método se centró en la búsqueda de características fractales en los datos de COBE. En esta parte del trabajo se concluyó que estos datos no arrojaban evidencia a favor de que pudiesen ser fractales. El último método buscó posibles señales no-Gaussianas en los mismos datos. La presencia o no de tales señales es de vital importancia en cosmología. El método mostró que los datos de COBE eran compatibles con la hipótesis de gaussianidad. El trabajo llevado a cabo con la rugosidad del FCM llegó a conclusiones similares al trabajo anterior referente a los valores del índice espectral y amplitud del espectro de potencias del FCM. No obstante, en este trabajo se apunta la ventaja de este método frente a otros en el caso de señales con alta señal/ruido, pues el resultado se vuelve independiente de la amplitud del espectro. Ambos trabajos mostraron la utilidad de estos métodos novedosos en la aplicación a futuros datos del FCM. La ventaja de estos métodos fractales frente a los considerados estándar se fundamenta en el hecho de que los primeros son $O(N)$, mientras que los métodos estándar generalmente son $O(N^3)$. Por lo tanto, las técnicas fractales estudiadas resultan atractivas para su aplicación a futuros datos del FCM dada la gran cantidad de datos que aportarán estos experimentos.

Aparte del estudio del FCM basado en técnicas fractales, también se estudiaron los cúmulos de galaxias con datos recientes en el óptico y rayos–X así como con datos simulados de futuros experimentos milimétricos con los cuales se podrá estudiar el efecto Sunyaev–Zel'dovich (ESZ). Combinando datos en el óptico y de rayos-X se obtuvieron unos límites muy robustos para parámetros cosmológicos tales como la densidad del universo o la amplitud del espectro de potencias. Así por ejemplo, se mostró que dichos datos sólo eran compatibles con valores de la densidad $\Omega \approx 0.3$ (ver figura 1). También se obtuvieron resultados muy interesantes concernientes a las leyes de escala en cúmulos de galaxias (relaciones $L_x - T$ y $T - M$). Este trabajo mostró la importancia de combinar datos provenientes de diferentes experimentos. Dicha combinación permite excluir modelos que no sean simultáneamente compatibles con todos los datos considerados, redundando por tanto en una reducción significativa de la degeneración en los parámetros del modelo que describe tales datos. Con el mejor modelo obtenido en este trabajo se realizaron posteriormente predicciones de detección del ESZ simulando las características del satélite Planck. Estas predicciones han mostrado que futuros experimentos del FCM supondrán una fuente de estudio muy importante en el campo de los cúmulos de galaxias a través de este efecto. Con los datos del ESZ se podrán hacer trabajos similares a los realizados con datos de rayos–X, aunque los mejores resultados se obtendrán de la combinación de datos de rayos-X con datos del ESZ. Una de las conclusiones más importantes de esta parte del trabajo es que, con sólo una pequeña muestra (≈ 300 cúmulos) del total de cúmulos observados por Planck, será posible reducir en gran medida las degeneraciones existentes en los parámetros cosmologicos (previa detección del corrimiento al rojo de los cúmulos).

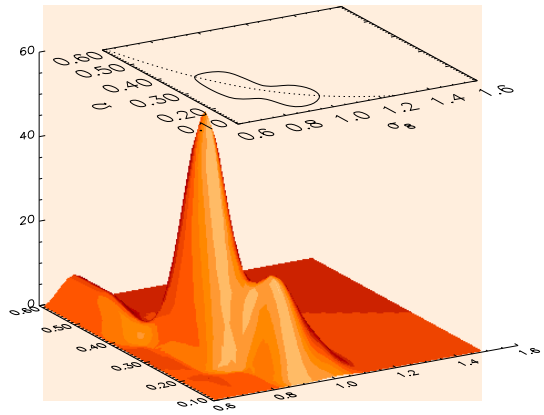


Fig. 1. Probabilidad marginalizada en el espacio $\sigma_8 - \Omega$. La degeneración en estos parámetros existente con los conjuntos de datos cuando son considerados separadamente se ve reducida de modo drástico al combinar los distintos conjuntos de datos.

Dinámica de las tormentas de gran escala en las atmósferas de Júpiter y Saturno

Ricardo Hueso Alonso wuahualr@bi.ehu.es

Director/es: Agustín Sánchez Lavega
Centro: Universidad del País Vasco
Lectura: 9 de Noviembre de 2000

En esta tesis presentamos un estudio de la meteorología de las tormentas de gran escala que se forman en las atmósferas de los planetas gigantes gaseosos. El estudio de estas tormentas es de gran interés, ya que las características observadas y predichas por los modelos numéricos proporcionan información sobre regiones profundas de la troposfera veladas a la observación directa y ponen límites razonables a factores como la composición química atmosférica. Paralelamente, son consideradas como fenómenos fundamentales para entender la estructura vertical atmosférica y los fenómenos meteorológicos globales propios de los planetas gigantes gaseosos, como la existencia de las corrientes de vientos alternantes en latitud y la presencia de grandes vórtices de circulación anticiclónica de larga vida como la Gran Mancha Roja de Júpiter.

La tesis trata inicialmente otros aspectos destacados de la meteorología joviana. En particular, las características dinámicas observadas en un sistema de ondas atmosféricas de escala planetaria descubierto por nuestro grupo en el hemisferio Sur de Júpiter. También se presenta un estudio morfológico y teórico de las regiones jovianas conocidas como 5-μm *hotspots*. El interés de estas áreas viene determinado por ser en una ellas en la que la sonda Galileo penetró en la atmósfera de Júpiter en 1995. Los resultados de la sonda Galileo mostraron que se trataba de una región muy seca y casi sin nubes por la que la radiación térmica se escapa al exterior como si se tratase de agujeros en la cubierta de nubes. En la tesis se presenta el análisis de la morfología de estas áreas y de sus movimientos horizontales, utilizando imágenes de las sondas *Voyager* y un modelo dinámico unidimensional de carácter convectivo en el que las áreas calientes se comportan como regiones de descenso masivo en las que el aire frío y seco de los niveles superiores desciende hasta niveles profundos, desecando la atmósfera y sufriendo importantes procesos de mezcla con su entorno.

El objetivo central de esta tesis es el desarrollo de modelos de tormentas convectivas en los planetas gigantes gaseosos. Estas tormentas se observan en las imágenes obtenidas por las sondas espaciales y los telescopios terrestres como regiones de nubes densas y elevadas de gran opacidad. Las tormentas convectivas sufren cambios morfológicos muy rápidos, pudiendo desarrollarse en escalas comprendidas entre los 1000 y 20 000 km que, en algunos casos, pueden alterar ocasionalmente el aspecto visual del planeta en áreas que cubren un círculo paralelo completo. Tal es el caso de las Grandes Manchas Blancas de Saturno, que constituyen el caso más extremo de este tipo de formaciones.

En esta tesis realizamos, por primera vez en el campo de las atmósferas de los planetas gigantes, un modelo numérico tridimensional de carácter local que permite estudiar en detalle las condiciones en que estas tormentas se forman simulando el desarrollo y comportamiento de tormentas locales para condiciones ambientales determinadas.

El modelo 3D permite afirmar que las tormentas convectivas en el caso de Júpiter tienen su origen en la nube de agua, habiendo una muy débil actividad convectiva relacionada con las nubes superiores de amoníaco. Cuando las condiciones ambientales son favorables al desarrollo de tormentas, el modelo predice velocidades verticales ascendentes de hasta 150 m/s en los cúmulos, con una posible fragmentación de las tormentas de gran tamaño en células convectivas de escalas en torno a los 50–100 km. Cada uno de los cúmulos puede desarrollarse en cuestión de horas, excitando la formación de tormentas cercanas en su proximidad que producirían las grandes estructuras nubosas observadas desde Tierra.

Para Saturno, el modelo predice la existencia de movimientos convectivos moderados en las nubes superiores de amoníaco capaces de alcanzar niveles atmosféricos elevados y de explicar la mayor parte de las tormentas observadas en esta atmósfera, pero no las impresionantes características de las Grandes Manchas Blancas de Saturno. Las tormentas de amoníaco se desarrollarían con una intensidad muy inferior a las tormentas de agua jovianas, produciendo movimientos verticales máximos de 30 m/s. La nube profunda de agua puede desarrollar tormentas convectivas solamente bajo condiciones atmosféricas muy particulares por lo que, posiblemente, estas tormentas ocurren con muy baja frecuencia. Sin embargo, en caso de desarrollarse, son capaces de formar tormentas de 280 km de altura, con velocidades verticales de hasta 160 m/s, reproduciendo en los niveles superiores características similares a las observadas en las Grandes Manchas Blancas. Es por esto que concluimos identificando tales fenómenos como tormentas de agua que se originan en la base de la nube de agua bajo condiciones favorables, que se presentan de manera muy rara en la atmósfera de Saturno.

Agradecimientos: Esta tesis doctoral se ha desarrollado con una beca predoctoral del Gobierno Vasco.

Búsqueda de fuentes cósmicas de radiación gamma de muy alta energía con el detector AIROBICC

Abelardo Moralejo Olaizola abelardo@gae.ucm.es

Director/es: José Luis Contreras González y María Victoria Fonseca González
Centro: Departamento de Física Atómica, Molecular y Nuclear. Universidad Complutense de Madrid
Lectura: 23 de Noviembre de 2000

La detección desde el suelo de la luz Cherenkov producida por las cascadas de $e^{\pm}$ iniciadas en la alta atmósfera por fotones de muy alta energía es actualmente la técnica más empleada en astronomía gamma desde tierra. La energía umbral de esta clase de telescopios, que viene determinada por la necesidad de discriminar la luz Cherenkov del resto de contribuciones a la luz de fondo del cielo nocturno, varía entre 300 GeV y las decenas de TeV (dependiendo fundamentalmente de la superficie de los colectores de luz y del tamaño del campo de visión). Este rango espectral es, por el momento, inaccesible a los telescopios embarcados en satélites, de áreas efectivas muy reducidas. La mayor dificultad que comparten todas las técnicas de astronomía gamma terrestre es la existencia de un fondo isótropo de cascadas debidas a rayos cósmicos cargados, mucho más abundantes que las iniciadas por fotones. Sólo seis objetos han sido detectados con certeza a $E_\gamma > 300$ GeV: tres *pleriones* (la Nebulosa del Cangrejo, 1706-44 y Vela), un SNR *shell-type* (SN 1006), y dos objetos BL Lac (Markarian 421 y Markarian 501).

El detector AIROBICC (*AIR-shower OBservation with angle-Integrating Cherenkov Counters*) es parte del experimento HEGRA (*High Energy Gamma Ray Astronomy*), situado en el observatorio del Roque de los Muchachos (isla de La Palma), a 2200 metros de altitud. AIROBICC es una matriz de 97 contadores de fotones Cherenkov dispuestos en una superficie cuadrada de unos 200×200 metros. Los contadores, que constan de un fotomultiplicador y un concentrador de luz, determinan el tiempo de llegada y la densidad del frente de fotones Cherenkov (que es aproximadamente un disco de unos pocos nanosegundos de espesor) en sus respectivas posiciones, lo que permite reconstruir la dirección del primario (perpendicular al frente) con una resolución angular de unas décimas de grado. El campo de visión de AIROBICC es de alrededor de 1 estereorradián. El ritmo de detección de cascadas oscila entre 20 y 30 hercios, dependiendo de las condiciones de observación, y la energía umbral para fotones de incidencia vertical es de unos 15 TeV.

En este trabajo se presenta el análisis de los datos registrados por AIROBICC entre 1994 y 1999 en busca de posibles anisotropías en la distribución de cascadas debidas a fuentes puntuales de radiación gamma. Se han seleccionado 197 objetos que, por diversas razones, se consideran buenos candidatos a emisores de muy alta energía (*AGNs* y *SNRs* entre ellos), y se ha evaluado la significación estadística de los excesos (o defectos) de

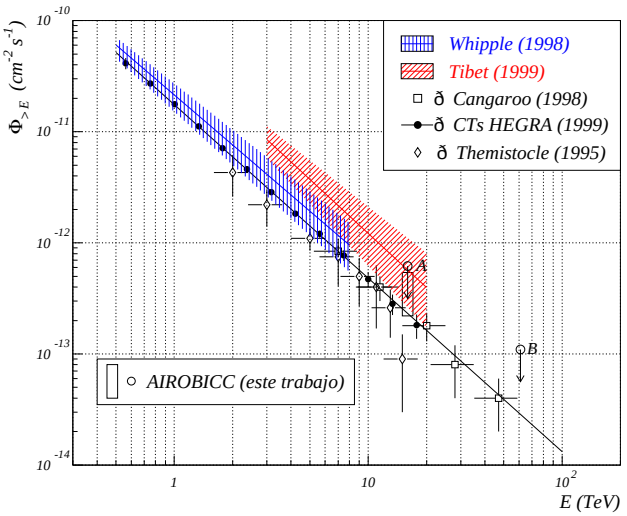


Fig. 1. Espectro de muy alta energía de la nebulosa del Cangrejo. Se muestran los resultados obtenidos con AIROBICC junto a los de otros autores.

sucesos observados, en su entorno, sobre el fondo esperado de rayos cósmicos. No hemos encontrado evidencias estadísticamente significativas de emisión gamma continua procedente de ninguno de estos objetos. La distribución de significaciones es compatible con una gausiana de media 0 y varianza 1, como se esperaría en ausencia de fuentes. Para los 197 objetos se han establecido límites superiores al flujo (al 90% de nivel de confianza) que son en media de 1.3 veces el de la Nebulosa del Cangrejo, la candela estándar en este rango de energías. Es interesante destacar que esta fuente, la más intensa a energías de alrededor de 1 TeV, presenta el tercer mayor exceso observado en la muestra (2.3 desviaciones estándar sobre el fondo esperado). Interpretando este pequeño exceso como debido a fotones, el flujo obtenido (Fig. 1) es compatible con las medidas de otros experimentos.

La búsqueda de emisión gamma continua se ha extendido a todo el cielo observable por AIROBICC (la banda de declinación, δ, comprendida entre 0 y 60°), utilizando un método de análisis más sencillo y menos sensible, con resultado igualmente negativo. De nuevo, las anisotropías observadas en la distribución de cascadas atmosféricas son atribuibles a fluctuaciones estadísticas del fondo de rayos cósmicos. Los límites superiores absolutos al flujo varían (con δ) entre 6 y 10 veces el de la Nebulosa del Cangrejo.

Finalmente, hemos realizado una búsqueda de posibles excesos debidos a actividad esporádica de las 197 fuentes candidatas de nuestro catálogo. No hemos hallado evidencias de emisión en escalas de tiempo de 1 a 5 horas. Se ha dedicado especial atención al estudio del *flare* experimentado por Mrk 501 durante 1997. El límite impuesto por AIROBICC en dicho periodo confirma el endurecimiento del espectro de esta fuente entre 1 y 20 TeV. La memoria de la tesis se encuentra disponible en `http://www.gae.ucm.es/tesis/`.

Las propiedades del medio interestelar ionizado en galaxias espirales

Almudena Zurita Muñoz azurita@ll.iac.es

Director/es: John E. Beckman y Maite Rozas
Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias
Lectura: 19 de enero de 2001

En esta tesis presentamos un estudio detallado de las propiedas del gas ionizado en galaxias espirales a partir de observaciones en la línea de emisión Hα: imagen CCD en banda estrecha y observaciones con un interferómetro Fabry-Perot.

Hemos realizado el análisis de la cinemática del hidrógeno ionizado en la galaxia espiral barrada NGC 3359. A partir de observaciones Fabry-Perot con el instrumento TAURUS, hemos realizado los mapas de momentos: intensidad, velocidad y dispersión de velocidades, y hemos construído la curva de rotación y el mapa de velocidades residuales. Movimientos no circulares de entre 30 y 40 km s^{-1} (proyectados en la línea de visión) son característicos en la zona de la barra de esta galaxia, que muestran la respuesta del gas al potencial gravitacional de la barra.

La emisión en Hα de las galaxias espirales está caracterizada por las brillantes regiones HII. Hemos estudiado las poblaciones completas de regiones HII en las galaxias espirales NGC 7479 y NGC 3359, usando imágenes de buena resolución espacial y alta calidad fotométrica. Las propiedades estadísticas (funciones de luminosidad – FLs –, distribución de diámetros, densidad de regiones en el disco) y físicas (densidades medias, factores de llenado, masa de H^+) de estas regiones han sido analizadas. En ellas hemos encontrado rasgos que confirman la existencia una transición entre las propiedades de las regiones HII menos luminosas y las más luminosas. En trabajos anteriores, esta transición se ha denominado *transición de Strömgren* y se ha interpretado en términos de la limitación en densidad de las regiones que tienen luminosidad mayor que la que marca la transición ($L_{\rm Str}$).

Sin embargo, una contribución importante ($\sim 50\%$) a la luminosidad total en Hα, no proviene de las regiones HII, sino de una componente de gas ionizado, denominado "difuso"por su bajo brillo superficial y gradiente de brillo (el llamado DIG). Hemos realizado un detallado y cuidadoso análisis de esta componente difusa en una muestra de seis galaxias espirales, separando su emisión de la de las regiones HII. Hemos utilizado para ello el método más preciso: la sustracción de las regiones HII de las imágenes de estas galaxias.

La distribución del DIG y su relación geométrica con las regiones HII ha sido estudiada. Hemos cuantificado y acotado la emisión del DIG ($\sim 10^{41}$ erg s^{-1} en Hα) la cual restringe las posibles, aunque previamente no establecidas, fuentes de ionización.

Además del estudio puramente observacional del gas ionizado en espirales, hemos analizado las implicaciones que se derivan de la hipótesis de limitación en densidad para las regiones HII más luminosas. Una implicación directa del escape de fotones ionizantes de las regiones HII (i.e. de la limitación en densidad) es la posibilidad de que éstos ionicen el gas difuso ionizado del que antes hablábamos. Hemos comprobado que la potencia que estas regiones suministran es más que suficiente para ionizarlo. Sin embargo, y no sólo cuantitativamente, las regiones HII son excelentes candidatas como fuentes. Hemos realizado mapas que muestran la distribución de fotones ionizantes en el disco de la galaxia espiral NGC 157 (para la que disponíamos de un mapa en HI), debido al transporte radiativo de la radiación ionizante que escaparía de las regiones limitadas en densidad. Los modelos, pese a la simplicidad con que han sido realizados, muestran un excelente acuerdo con la distribución del gas difuso ionizado en esta galaxia.

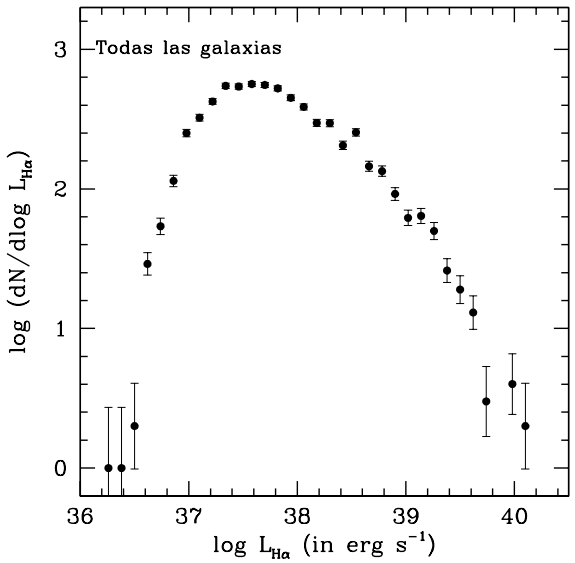


Fig. 1. FL compuesta incluyendo las regiones HII de todas las galaxias en las cuales el pico/cambio de pendiente (a la luminosidad de Strömgren, $L_{\rm Str} \sim 10^{38.6}$ erg s^{-1}) en la FL ha sido detectado: NGC 157, NGC 925, NGC 3359, NGC 3631, NGC 4321, NGC 6764, NGC 6814, NGC 6951 y NGC 7479. El pico es un rasgo de amplitud 6σ, mayor que cualquier irregularidad de la función.

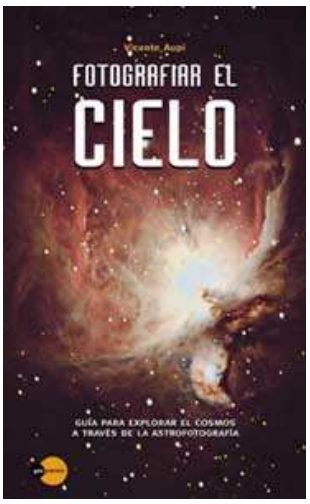
El escape de fotones ionizantes de las regiones HII tiene más implicaciones. El balance energético entre la potencia que las regiones HII suministran y la requerida para explicar la emisión observada en Hα, indica que hay una exceso de radiación ionizante que, es de suponer, escapa hacia el halo de las galaxias y el medio intergaláctico. Las implicaciones de este escape han sido también analizadas.

Además, la alta luminosidad de la transición de Strömgren y su constancia en las galaxias observadas hasta la fecha, ha sido propuesta como candela estándar para la medida de distancias extragalácticas. Hemos calibrado la luminosidad de Strömgren a partir de la función de luminosidad en Hα de dos galaxias cuyas distancias se han medido en el marco del proyecto del telescopio espacial *Hubble* que tiene como fin la determinación de la escala de distancias extragalácticas. La dispersión en el valor de L_{Str} ha sido también calculada, usando las funciones de luminosidad de varias galaxias previamente observadas por nuestro grupo.

Reseñas de libros

Fotografiar el cielo

Autor/es: Vicente Aupí
Editorial: Editorial GeoPlaneta
Páginas: 224 **ISBN:** 84-08-03345-X
Precio: 3900 pesetas, 23.44 euros



Entre los miembros asociados de la SEA contamos con astrónomos aficionados, cuyo trabajo en la divulgación de la Astronomía es ciertamente importante. El caso de Vicente Aupí, un experimentado aficionado, periodista y escritor, es un claro ejemplo. Después de publicar su "Atlas del firmamento" (1998, ed. GeoPlaneta), su nuevo libro, "Fotografiar el cielo", hace accesible a un público amplio una afición cautivadora: observar el cielo y fotografiarlo.

El libro, redactado con esmero, cuenta con detalladas explicaciones sobre telescopios, monturas, cámaras, filtros y películas, que permiten al lector adentrarse paso a paso en las técnicas necesarias para que la fotografía de los astros sea una experiencia gratificante.

Aupí acierta con el lenguaje. Su experiencia en la redacción de artículos de divulgación científica se explota al máximo en "Fotografiar el cielo". Introduce adecuadamente las nociones de astronomía que necesita en cada capítulo. Posteriormente explica las técnicas fotográficas que deben utilizarse para obtener con éxito imágenes del Sol, la Luna, planetas, cometas y objetos del cielo profundo. Las recetas no sólo vienen en forma de consejos útiles para quien quiere adentrarse en la fotografía astronómica, sino acompañadas de excelentes tablas que proporcionan una información imprescindible para resolver las dificultades técnicas que puedan surgirle.

El libro está ilustrado con más de 300 fotografías. Muchas de ellas son propias del autor y de otros colegas con los que comparte afición y noches de enfoques y disparos de obturador. En muchos casos, estas imágenes serán retos para el aficionado neófito.

En definitiva, un libro ameno e instructivo que contribuye a la divulgación de la Astronomía en uno de sus aspectos más prácticos: la observación del cielo y la astrofotografía.

Vicent Martínez García `vicent.martinez@uv.es`

Tras la sombra de la luna: últimos eclipses del milenio

Autor/es: Miquel Serra, Jesús Burgos, Gotzon Cañada, Miguel C. Díaz, Ángel Gómez Roldán, Inés Rodríguez
Editorial: Shelios Expediciones Científicas S.L
Páginas: 96 **ISBN:** 607-1027-O
Precio: 2500 pesetas, 15.03 euros

"La fórmula ciencia + aventura + divulgación es una atractiva propuesta". Esta frase, que podemos leer en la contraportada del libro que reseñamos es un buen resumen de lo mucho y bueno que nos vamos a encontrar en sus páginas.

Shelios (una fusión de Luna y Sol, de Selene y Helios) es un grupo de personas que en los años 1998 y 1999 se aventuraron a encontrarse *in situ* con los tres últimos eclipses de Sol totales del milenio. Algunos de estos expedicionarios nos cuentan en este libro, una mezcla de aventura y ciencia, las experiencias vividas a lo largo de los viajes y nos describen a la vez qué son los eclipses, cuál es el interés científico de los mismos, qué se ve, qué se estudia, cómo es nuestro Sol...

En el libro están mezclados, de una forma realmente amena, diarios de las expediciones, páginas históricas, científicas, instrucciones de cómo fotografiar un eclipse solar... Las ilustraciones –tanto diagramas como fotografías, todos ellos en color– son espectaculares y el texto extremadamente fácil y atractivo de seguir.

Ciñéndonos a la parte dedicada a la Astronomía, tanto la descripción de lo que es el Sol, como el por qué y cuando se producen los eclipses, están tratados con rigor y con explicaciones sencillas para introducir a la gente de la calle en términos o conceptos que suponen un paso más allá de lo que normalmente se conoce a nivel popular.

Me gustaría destacar que la experiencia de *Shelios* no acabó en esas tres expediciones. En septiembre de este año la expedición *Shelios 2000* viajó a Groenlandia, para el estudio de las auroras boreales y para los años 2001 y 2003 están previstas expediciones al África austral y a la Antártida para observar dos eclipses totales de Sol en esas regiones. ¡Esperamos que todas estas aventuras nos deparen libros tan atractivos como éste!.

Para adquirir el libro basta que envieis un correo a la dirección `shelios@shelios.com` que aparece en la página web `www.shelios.com` que os invito a visitar.

Benjamín Montesinos Comino `bmm@laeff.esa.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