

## BOLETÍN DE LA SEA

### Editores

Iñigo Arregui Uribe-Echevarría  
Nicolás Cardiel López  
Xavier Luri Carrascoso  
Belén López Martí  
Ignasi Ribas Canudas  
Jaime Zamorano Calvo

### Portada

Benjamín Montesinos Comino

### Comité editorial

Agustín Sánchez Lavega  
Antonio Alberdi Odriozola  
Fernando Moreno Inertis  
Rafael Rebolo López  
Jaime Zamorano Calvo

**Sociedad Española  
de Astronomía SEA**  
<http://sea.am.ub.es>

**Comisión de información**  
[comi-info@sea.am.ub.es](mailto:comi-info@sea.am.ub.es)

*Ad astra per aspera*



Tenéis en vuestras manos un boletín lleno de novedades, tanto en sus contenidos como en su aspecto. Por un lado, damos la bienvenida a la nueva Junta Directiva de la SEA, que fue renovada en la Asamblea General del pasado mes de septiembre. En particular, el nuevo Presidente de la SEA se dirige a todos nosotros a través de una carta donde efectúa un rápido balance de la astronomía española y nos hace partícipes de sus inquietudes de cara al futuro. También destacamos las novedades entre el equipo de editores del boletín. Después de la llamada de socorro de Benjamín Montesinos en la pasada Asamblea han sido bastantes las personas que se han ofrecido voluntarias para echar una mano. Ahora contamos con tres nuevas incorporaciones al equipo, Iñigo Arregui, Nicolás Cardiel y Belén López, que han participado ya en la elaboración de este boletín y a quienes los más veteranos damos una calurosa bienvenida.

La tercera novedad que queremos destacar es bastante obvia y seguro que la habréis notado nada más empezar a hojear este número. Y es que después de haber utilizado el mismo estilo de compaginación durante varios años ya era hora de renovarse. Un cambio de “look” como se suele decir en inglés. Nos hemos esforzado para hacer el boletín más atractivo y de lectura más agradable, con cambios en algunas fuentes, en las cabeceras y pies, y en la página inicial. Esperamos que el nuevo aspecto sea de vuestro agrado. En breve prepararemos “macros” con el nuevo estilo tanto para los artículos de revisión como para las tesis, con el fin de facilitar el trabajo a los autores y también a los editores.

En cuanto a los contenidos de este número, encontraréis dos artículos sobre la pasada reunión JENAM 2004, uno escrito por el entonces presidente de la SEA y el otro por los organizadores de la reunión. También incluimos un artículo sobre el nuevo Museo de la Ciencia de Barcelona que, después de años de renovación, ha abierto de nuevo sus puertas con una oferta actualizada y ampliada. En cuanto a proyectos e instrumentación, además del habitual resumen de los últimos progresos del GTC, se incluye un artículo sobre la red Euro3D, cuyo objetivo es potenciar la espectroscopía integral entre los astrónomos. El artículo de revisión de este número efectúa un repaso interesantísimo a lo que conocemos en la actualidad sobre las estrellas masivas del centro galáctico. Finalmente, y como ha sido siempre habitual, incluimos los resúmenes de tesis que nos han hecho llegar sus autores. Como ya hemos constatado en otras ediciones del boletín, el número de resúmenes es últimamente más que notable, esta vez nueve. Ello sugiere que la astronomía española goza de una salud excelente en este aspecto. Esperemos que las perspectivas de conseguir un trabajo estable en nuestro país mejoren pronto para estar acordes con la capacidad de formar astrónomos de primer nivel.

**Los editores**

*Las imágenes de la portada muestran dos mosaicos 'multirango' de 400×900 años luz del Centro Galáctico. A la izquierda, en tonos rojos, imágenes de VLA en 90 cm, en verdes, el infrarrojo medio, y en tonos azules, imágenes obtenidas por Chandra en 1-8 keV. A la derecha, imágenes de Chandra en tres bandas de rayos X (rojo, verde y azul indican niveles crecientes de energía) El artículo de revisión de Francisco Najarro trata de las estrellas masivas en esta interesante región. Cortesía de: NASA/UMass/D.Wang et al. (Chandra), VLA/NRL/N.Kassim (radio) y MSX (infrarrojo).*

## CARTA DEL PRESIDENTE DE LA SEA

**J. Miguel Rodríguez Espinosa**

jmr.espinosa@iac.es

Queridos colegas,

Con el año nuevo, que por cierto os deseo sea estupendo tanto profesional como humanamente, comienza su mandato la cuarta Junta Directiva desde la fundación de la SEA. Tengo el honor de presidir esta nueva Junta, y ante todo os agradezco la confianza que habéis depositado en mí. Desde este momento tanto yo como el resto de la Junta estamos a vuestra entera disposición.

La SEA ha crecido monotónicamente en pujanza durante estos 12 años de andadura. Creo poder decir que es una sociedad moderna, activa y que pese a su corta edad ha alcanzado un elevado grado de madurez. Y todo esto gracias a sus miembros. Este crecimiento ha sido paralelo al crecimiento de la Astronomía en nuestro país, que como bien sabéis, ha alcanzado cotas impensables hace unos años. Debemos congratularnos, por tanto, pero no quedarnos aquí.

Lo bueno del momento es que estamos llenos de proyectos y de expectativas. MAGIC es una realidad, el 40 metros de Yebes estará operativo en breve, el GTC debiera empezar a producir ciencia en la segunda mitad de 2006, Calar Alto es ya 50% español y la entrada en ESO está más cerca que nunca. Todo esto en un momento en el que la Astrofísica continúa sorprendiéndonos, hasta el punto de que muchos físicos de altas energías ya empiezan a aparecer por las reuniones científicas de la SEA. Y es que preguntas como ¿cómo empezó el Universo?, o ¿qué es la energía oscura?, o si se detectarán pronto ondas gravitatorias, o si se tendrá que cambiar la gravitación Einsteniana, o si las constantes físicas han variado con la edad del Universo, o si descubriremos planetas tipo Tierra, son preguntas que no dejan indiferente, no solo a los físicos y astrofísicos, sino también al hombre

de la calle. La Astrofísica está pues en el centro del progreso del conocimiento. Nos están mirando. Han invertido en nosotros. Y nosotros tenemos que responder con ciencia, más ciencia y más proyectos ambiciosos y novedosos.

Sé muy bien que no todo es deslumbrante. No sabemos lo que va a pasar con los primeros contratados Ramón y Cajal que aún están sin plaza fija. No vemos que haya un plan bien estudiado de dotación de plazas a centros existentes, o a nuevos centros. Esto es necesario si se quieren rentabilizar las inversiones antes aludidas. Hasta ahora la Astronomía no está sufriendo la escasez de estudiantes que están sufriendo otras ramas de la Ciencia. ¿Sabremos escapar a esta tendencia, o incluso darle la vuelta? ¿Podremos ser un ejemplo para otras ramas de la Ciencia?

Bien, no me quiero alargar en esta primera ocasión. Quisiera sin embargo dar las gracias a mi antecesor, Eduard Salvador, por su “seny” dirigiendo la Sociedad. No creo que yo pueda hacerlo la mitad de bien que él. También quiero agradecer a mis colegas de la Junta Directiva sus ganas de trabajar conmigo. Nos pondremos manos a la obra enseguida. Tenemos el Año Internacional de la Física, con ocasión del aniversario de la Relatividad de Einstein. Algo tenemos que hacer. Me gustaría asimismo que revitalizásemos las comisiones y la propia Junta. Voy a plantear tener reuniones más frecuentes, quizás por videoconferencia para no cargar la tesorería de la Sociedad. Y espero conseguir que cada año que pase sea más útil, y más importante para cada uno de vosotros estar dentro de la SEA.

Estoy a vuestra disposición, como siempre lo he estado, pero ahora con más motivo. ¡Feliz año!

*José Miguel Rodríguez Espinosa es investigador del IAC, responsable científico de GTC y Presidente de la SEA.*

## JENAM 2004 EN GRANADA

Eduard Salvador Solé    [eduard@am.ub.es](mailto:eduard@am.ub.es)

Una vez más se ha celebrado la Reunión Científica bienal de la SEA con gran éxito. Sin duda a ello ha contribuido de forma decisiva el buen hacer de la institución anfitriona, el IAA. Desde aquí agradezco una vez más a todos los que trabajaron tan eficazmente para hacerlo posible, sobre todo a los más jóvenes por su dedicación casi profesional y sin embargo completamente desinteresada, y muy especialmente al Secretario de la SEA y Presidente del Comité Local (y flamante Director del IAA), José Carlos del Toro. También quisiera agradecer la colaboración de todos los miembros del Comité Científico, empezando por su Presidente, Emilio Alfaro, por el gran trabajo realizado en la selección de los magníficos conferenciantes invitados que tuvimos la oportunidad y el gusto de escuchar así como en la organización de las sesiones paralelas.

El hecho de que en esta ocasión la Reunión Científica de la SEA haya coincidido con una JENAM ha permitido constatar los claroscuros de ambas sociedades. Por un lado, estaba la numerosa y entusiasta representación de nuestra pequeña sociedad astronómica nacional (250 personas, es decir, uno de cada dos miembros) y por otro, la más que modesta representación europea (menos de 200 personas). De hecho, por parte de la EAS no acudió ni siquiera su Presidente, por problemas de salud de última hora, ni su Vicepresidente, por razones que desconozco ya que no llegó a excusarse. La comparación resulta aún más elocuente si se atiende a la asistencia a las Asambleas respectivas. En la de la SEA participaron prácticamente todos los miembros numerarios que habían acudido a la cita granadina, mientras que en la de la EAS, fuimos como mucho unas veinte personas perdidas en la inmensidad de la sala de convenciones. No esconde que sentí una cierta incomodidad al ver la notoria ausencia de astrónomos españoles, aunque vista también la de astrónomos europeos, quedaba claro que el problema no era, ni mucho menos, el posible pasotismo autóctono. Con todo, los miembros de la Junta Directiva de la EAS se mostraron en todo momento muy satisfechos de cómo mar-

chaba la JENAM. Valoraron especialmente la cantidad de jóvenes astrónomos asistentes —bien es verdad que españoles en su inmensa mayoría— y el nivel de los conferenciantes invitados. No creo que estos comentarios altamente positivos, tanto antes como después de las Asambleas respectivas, fueran únicamente producto de la cortesía. Así lo demuestra el hecho de que muchos coincidieran en la apreciación de que la JENAM de Granada había sido sin duda una de las más exitosas, tan sólo equiparable a la primera, realizada conjuntamente con la Sociedad Francesa de Astronomía. Más bien parece que la directiva de la EAS empieza a estar acostumbrada al poco interés que despiertan las JENAM entre los astrónomos europeos.

No es mi intención analizar aquí el funcionamiento de la EAS ni su papel en la Astronomía europea. Emilio Alfaro ya comentó, en el pasado número de este Boletín, el tipo de debate que debería hacerse ante la necesidad, cada vez más acuciante, de replantearse la necesidad y los objetivos de una sociedad como la EAS. En cualquier caso, podemos alegrarnos de que la SEA, por el contrario, goce de una buena salud evidente. Con los nuevos miembros incorporados en la Asamblea de Granada, nuestra sociedad ha superado la cifra de 500 miembros, una cifra que muestra claramente el interés que despierta entre los astrónomos profesionales y allegados a la astronomía española en general. Como quedó patente en la Reunión Científica de Granada, la SEA ya no es una sociedad joven e inexperta que inicia su andadura sin saber a ciencia cierta dónde le llevará, sino que, tras 12 años ya de existencia, ha alcanzado, más que su asentamiento definitivo, una sólida madurez que permite augurarle un gran futuro en pos del desarrollo de la Astronomía y Astrofísica en España.

Por si esto no fuera suficiente, también quedó patente en Granada el gran nivel científico alcanzado por nuestro colectivo. Los que llevamos más años en esto recordamos la agradable sensación que nos dejaba la celebración de cada una de las primeras reuniones científicas de la SEA al ver crecer, bienal tras bienal, la Astronomía española en cantidad y calidad. Pues bien, a estas alturas ya no sor-

prende a nadie el nivel de los trabajos presentados por los jóvenes investigadores, totalmente equiparable al del que se realiza en los países con mayor tradición científica. Tanto es así que resulta ahora difícil apreciar el progreso; simplemente, hemos alcanzado por fin la velocidad de crucero. Queda ahora tan sólo mantenerla y a poder ser continuar creciendo en número de astrónomos por habitante hasta alcanzar el que corresponde a nuestro PIB.

Aprovecho la ocasión que me brinda el comentar la pasada Reunión Científica de Granada para despedirme de todos vosotros como Presidente de la SEA. Cuando leáis este artículo ya me habrá relevado José Miguel al que le deseó un mandato lleno de aciertos ya que ilusión y ganas no le faltan. Entiendo que con mi relevo al frente de la sociedad termina su periodo inicial de constitución y afianzamiento. Estoy seguro de que los dos Presidentes que me han precedido, Ramón Canal y Juan Marcaide, convendrán conmigo en que valió la pena apostar en su día por la creación en Es-

paña de una sociedad profesional como la nuestra donde pudieran confluír los intereses de todos nosotros, independientemente de nuestra área y centro de trabajo concretos. Debo deciros que he vivido unos años magníficos trabajando para la SEA desde la Junta Directiva. En ella he coincidido con muchos astrónomos a los que sólo conocía de referencia y que han pasado a ser amigos míos. Desde aquí agradezco a todos ellos su colaboración y gran dedicación y a todos vosotros vuestra comprensión por las posibles deficiencias que haya podido mostrar en el ejercicio de mi cargo. Termina aquí mi último acto oficial y paso a engrosar el ya numeroso grupo de los que hemos servido desde la Junta Directiva de la SEA. Adiós y gracias.

*Eduard Salvador Solé es catedrático en el Departamento d'Astronomia i Meteorologia de la Universitat de Barcelona y ha sido Presidente de la SEA durante los últimos años.*

## JENAM 2004: UNA FAENA IMPRESIONANTE

Emilio J. Alfaro Navarro [emilio@iaa.es](mailto:emilio@iaa.es)

José Carlos del Toro Iniesta [jti@iaa.es](mailto:jti@iaa.es)

Escribir un artículo sobre un acontecimiento que tuvo lugar hace más de dos meses y que, muy probablemente, no aparecerá hasta más de tres después de que tuviera lugar el último acto de la función es una tarea, como mínimo, incómoda, aunque esperamos no sea del todo estéril. Bueno, allá va y que Dios reparta suerte.



El balance de las jornadas que tuvieron lugar entre el 13 y el 17 de septiembre en Granada puede resumirse en dos palabras: im...presionante. Impresionante fue el nivel de participación de los astrónomos europeos que acudieron al congreso e impresionante fue la cantidad y calidad de las contribuciones científicas.



*Fotos realizadas por Jesús Maíz Apellániz.*

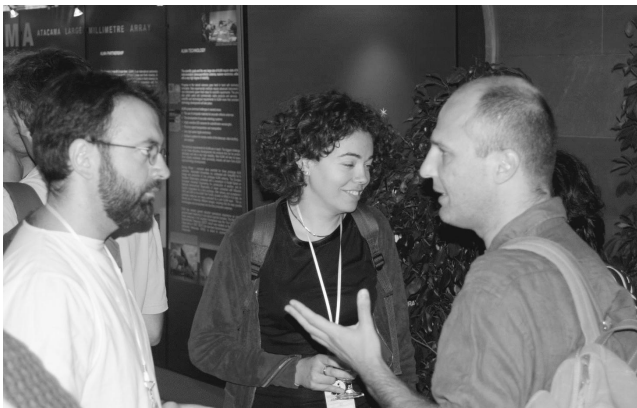
Lord Kelvin afirmó que “cuando uno no puede expresar algo en números, el conocimiento sobre ese hecho es poco satisfactorio”. Obviamente el maestro se refería al conocimiento científico pero también es cierto que los números, y en general las Matemáticas, son propensas a contribuir a la comprensión de cosas que, al menos en apariencia, están lejos del hecho científico. Así que den estas pocas cifras una idea del tamaño del morlaco.



Cuatrocientos cincuenta y dos astrónomos procedentes de treinta países hicieron el paseíllo en el Palacio de Congresos de Granada. Se presentaron treinta y cuatro ponencias por invitación, ciento setenta contribuciones orales y trescientos veinticuatro carteles científicos. La participación en las discusiones científicas fue muy activa y en la mayoría de los casos sólo limitada por el reloj; se dieron unos cuantos avisos. Tanto la Astronomía europea como la española mantuvieron reuniones y seminarios dirimiendo diferentes temas en las salas que se acondicionaron para tal fin. Por citar sólo algunos ejemplos, el Programa Nacional de Astronomía y Astrofísica dedicó una tarde a la revisión de una serie de proyectos seleccionados, como ya es tradición en las reuniones científicas de la SEA, y los miembros de la comisión española encargada de negociar la entrada de España en el ESO encontraron un hueco para poner algunos puntos en común. Tuvieron también lugar las Asambleas Generales de las Sociedades de Astronomía tanto Europea como Española que previamente habían reunido a sus Juntas Directivas respectivas.



El público granadino tuvo la gentileza de acudir al coso en dos ocasiones, con motivo de dos reuniones de divulgación. La última tarde, lleno hasta la bandera, y Belmonte, en torero, con una faena magistral, salió por la puerta grande. Previamente había tenido lugar una mesa redonda con la participación de periodistas científicos, directores de museos o centros de divulgación y astrónomos profesionales. Otra vez el reloj impuso su ley y una tertulia muy entretenida, con gran participación del respetable, tuvo que suspenderse en lo mejor de la faena.



Durante mucho tiempo hemos pretendido arrimar a nuestras tablas a diversos sectores sociales y económicos. Cada vez son más y mejor dotados los proyectos que implican una conexión con la empresa. Las editoriales científicas han tenido en nosotros al mejor de los clientes (¿se dice así?): pagamos por leer y, en muchos casos, por escribir. España es el único país europeo que cuenta con dos grandes instalaciones telescópicas en su suelo, cogestionadas con otros países de Europa. Se está construyendo un telescopio de 10 m, liderado por la comunidad astronómica española, que ha implicado a lo más granado de la industria tecnológica europea. El diseño y desarrollo de nueva instrumentación científica, tanto en tierra como en el espacio, ha dejado de ser una cuestión de otros, y España participa, cuando no lidera, la mayoría de los grandes proyectos europeos. La editorial Springer, el grupo ACITURRI, GMV, CATÓN, ESA, ESO,

CAHA, IAC e IAA le plantaron cara al bicho y allí estuvieron, hasta que el sol se puso. Creemos que se merecen una ovación.

Mucha gente se ha visto envuelta en la organización de la JENAM desde su diseño hasta (que está todavía por venir) la publicación del libro de contribuciones. Reseñar a todos y cada uno de los que han participado necesitaría el espacio entero de la revista e igual se deslizaría alguna injusticia. A todos ellos, que saben quiénes son, gracias por haber puesto su trabajo e ilusión en este proyecto. Con esta cuadrilla, si algo salió o sale mal, la culpa solo puede recaer en los matadores abajo firmantes. Aunque no hemos querido personalizar a ningún colaborador, no podíamos dejar en el tintero a un grupo de personas que por hacerlo bien durante muchos años se han vuelto invisibles: nos referimos al personal de la plaza. El Palacio de Congresos de Granada, no sólo es un edificio funcional, moderno y arquitectónicamente bello, sino que engloba a un equipo humano eficiente y amable que lo embellece aún más. Gracias por hacernos creer que no existen los problemas.



Nos hubiera gustado acabar este balance como los creadores de Asterix finalizaron uno de sus geniales álbumes: "ciento veinte litros de cerveza se necesitaron para organizar este congreso"; nuestra *seniority* y algunos análisis clínicos lo desaconsejaron. Sin embargo, cuando el libro esté en la calle y podamos decir que la faena está cumplida, refrescaremos dos cañas de manzanilla a vuestra salud. Va por ustedes.

<http://www.iaa.csic.es/jenam2004/>

Granada, a 29 de Noviembre de 2004

*Emilio J. Alfaro Navarro y José Carlos del Toro Iniesta son científicos titulares del IAA-CSIC. Ambos formaron parte de los Comités Científico y Local de la JENAM 2004.*

## INAUGURACIÓN DEL NUEVO MUSEO DE LA CIENCIA EN BARCELONA: COSMOCAIXA

Jordi Aloy i Domènech

jaloy.fundacio@lacaixa.es

El pasado 23 de septiembre abrió sus puertas CosmoCaixa, el nuevo Museo de la Ciencia de la Fundación “La Caixa” en Barcelona. Con un área total de 50.000 metros cuadrados y aproximadamente unos 12.000 de superficie accesible al visitante, el Museo ha ampliado su tamaño en un ¡600%! Naturalmente, tal ampliación se ha visto también reflejada tanto en la cantidad como en la calidad del contenido general del Museo, que se estructura ahora en torno a una única gran sala multidisciplinar: la Sala de la Materia. En ella, mediante la interrelación entre objetos reales y módulos de tipo experimental, se propone al visitante un viaje a lo largo de los 13.700 millones de años de evolución de nuestro Universo.

Una de las innovaciones más destacadas introducidas en la Sala de la Materia es que no presenta fronteras físicas que compartimenten el contenido por salas temáticas, tal y como ocurre en otros Museos de Ciencia de tipo más convencional. La

sala se estructura en cuatro grandes ámbitos abiertos, teniendo como eje conductor la evolución de la materia desde su estado más fundamental, la materia inerte, hasta su estado de mayor complejidad, la materia autoconsciente o “civilizada”, pasando por la materia viva y la materia inteligente. Esta particular organización permite al visitante recorrer CosmoCaixa de múltiples maneras, ya que se pueden pensar distintos recorridos en red, relacionando entre sí módulos de los distintos ámbitos según cuales sean sus intereses.

Junto a la Sala de la Materia, CosmoCaixa presenta otros espacios singulares, algunos nuevos y otros de gran tradición, como por ejemplo el Planetario, dedicado a la divulgación de la Astronomía y la Astrofísica, el taller de educación medioambiental ¡Toca Toca!, o el Planetario Burbuja y las salas Click y Flash para aproximar el mundo de la ciencia a los más pequeños. La oferta del museo se completa con talleres tanto para público general como para público escolar, actividades lúdico-científicas para un público de tipo familiar, cursos, ciclos de conferencias, etc.



*Planetario Burbuja.  
Foto de Pilar Aymerich.*

No hace falta decir que la Astronomía y la Astrofísica se hallan ampliamente representadas en la oferta general que CosmoCaixa presenta a sus visitantes. Ya en la misma Plaça de la Ciència, que da acceso al museo propiamente dicho, se pueden encontrar algunos módulos emblemáticos relacionados directamente con la astronomía, como por ejemplo el Reloj de Sol, un cuadrante horizontal de diseño sumamente singular, o la Esfera de las Estaciones, en donde una esfera expuesta al Sol, orientada en la dirección norte sur y con una inclinación idéntica a la del eje de la Tierra, permite conocer las condiciones de iluminación de nuestro planeta por simple observación, así como la estación del año en la cual se encuentra cualquier zona del mundo, con sólo apreciar las diferencias de temperatura mediante el tacto.

Como ya hemos mencionado, en CosmoCaixa los objetos reales cobran un especial protagonismo. En la Sala de la Materia, el visitante puede contemplar una extensa colección de meteoritos metálicos, la mayoría procedentes del yacimiento de Gibeon, en Namibia. Destaca también un magnífico ejemplar procedente de Sikhote-Alin (Siberia oriental, Rusia), en el cual se pueden apreciar perfectamente tanto la corteza de fusión como la forma cónica producida por la ablación atmosférica. Junto a estas piezas extraordinarias, sendos programas multimedia de tipo interactivo permiten profundizar en el estudio de estos fascinantes objetos, auténticos vestigios de la formación de nuestro Sistema Solar. También encontrará una cámara de centelleo, instrumento que permite visualizar el rastro dejado por muones que se generan por la interacción de los rayos cósmicos con los gases de la alta atmósfera.



*Planetario (cúpula exterior). Foto de Olga Planas*

Uno de los principales centros de interés de la sala en lo que a la Astronomía se refiere será sin duda alguna el Heliostato. Este telescopio solar, todavía en proceso de construcción, permitirá a los visitantes observar en tiempo real una imagen del Sol de alta resolución en luz blanca. Al mismo tiempo, un divisor de haz permitirá dirigir parte de la luz incidente hacia un espectroscopio de alta dispersión que proyectará un espectro solar de unos dos metros de longitud y en donde se podrán observar perfectamente las líneas de Fraunhofer presentes en la banda visible. Se espera que todo el conjunto pueda inaugurarse durante el año 2005.

Pero la estrella del museo desde el punto de vista astronómico es, por supuesto, el Planetario. El Planetario ha sufrido también una profunda renovación. No tan sólo ha aumentado significativamente tanto el tamaño de la cúpula de proyección como su capacidad, sino que también ha modernizado sus sistemas de reproducción audiovisual. En efecto, el nuevo Planetario de CosmoCaixa tiene ahora una capacidad para 128 personas y dispone de una cúpula de proyección de 14 metros de diámetro, mostrando ésta una ligera inclinación, de tan sólo  $8^\circ$ , que privilegia ligeramente la sección delantera de la cúpula. Como simulador astronómico se ha escogido el sistema Digistar II, de la empresa norteamericana Evans & Sutherland. Se trata de un sistema digital que permite no tan sólo proyectar el cielo desde un punto de vista topocéntrico, tal y como ocurre en los planetarios clásicos de tipo optomecánico, sino que permite también desplazarse tanto por el espacio como por el tiempo. Así, el sistema Digistar permite navegar con total libertad por un volumen de espacio de hasta 900 años luz de radio centrado en la posición del Sol, y proyectarse en el tiempo tanto hacia el futuro como hacia el pasado, con un margen de más menos un millón de años. La versatilidad de este sistema informático permite, pues, no sólo representar el cielo y sus movimientos fundamentales tal y como se ven desde la Tierra, sino también los objetos de nuestro Sistema Solar, los movimientos propios de las estrellas, las posiciones relativas de éstas vistas desde cualquier perspectiva, etc. Naturalmente, debido a su naturaleza digital, el procesador gráfico del sistema Digistar permite también proyectar diferentes tipos de simulaciones y objetos en 3D, y no necesariamente astronómicos: así podemos proyectar desde un modelo realista del sistema binario SS433 a una molécula de ADN o una figura geométrica, como por ejemplo una ban-



da de Moebius.

El simulador astronómico se complementa con un sistema de proyección de vídeo a cúpula completa, el cual permite reproducir una única imagen en movimiento que cubre en su totalidad la cúpula de proyección, y con un sistema de sonido Dolby Home Cinema 5+1, que permite generar un sonido envolvente de alta calidad.

Aunque en un futuro se espera producir programas propios o en régimen de coproducción con otros planetarios de prestaciones similares, como por ejemplo el que ya está en curso con el Planetario de la Cité de l'Espace de Toulouse, el Planetario de CosmoCaixa Barcelona ha iniciado su andadura con tres programas de producción ajena. Se trata de *Génesis, del Big Bang a la exploración del Espacio*, un programa de divulgación general adquirido al Museo de los Niños de Caracas (Venezuela) y posteriormente ampliado y adaptado por los equipos de CosmoCaixa Madrid y CosmoCaixa Barcelona; *Galaxias lejanas*, un programa algo más complejo producido por el Planetario de Vaulx-en-Velin (Francia), y que trata sobre la naturaleza de las galaxias y la estructura del Universo a gran escala; y por último *El ciego de ojos de estrellas*, un programa producido por el Planetario de Saint Etienne (Francia), dirigido a un público eminentemente infantil y familiar.

A partir de 2005, el Planetario iniciará su programación dirigida al público escolar. Basándose en la experiencia acumulada a lo largo de más de 20 años, el equipo del planetario del museo ha programado diversas sesiones temáticas, de carácter docente, que permiten tratar los diferentes tópicos astronómicos básicos de interés curricular para alumnos desde sexto de Primaria hasta Educación Secundaria Obligatoria. Los programas preparados tratan sobre la ubicación de la Tierra en el espacio, la esfera celeste, las constelaciones y cómo orientarse en el cielo nocturno, los movimientos básicos del firmamento visto desde la Tierra, la Eclíptica y el Zodíaco, los eclipses de Sol y de Luna, las estaciones del año, las fases de la Luna, el cielo visible desde diferentes latitudes y los movimientos aparentes y reales de los planetas y Leyes de Kepler.

Asimismo, el equipo del planetario está desarrollando también programas especiales, de nivel superior, dirigidos a colectivos especialmente interesados en Astronomía y Astrofísica, como por ejemplo estudiantes universitarios, grupos de aficionados a la Astronomía o asistentes a cursos.



*Esfera de las Estaciones. Foto de Pilar Aymerich.*

No podemos terminar nuestra relación sin mencionar el Planetario Burbuja: un espacio diseñado especialmente para que los niños de 3 a 9 años se introduzcan en el fascinante mundo de la Astronomía. Sumergidos en un ambiente de gran belleza visual y casi podríamos decir que “mágico”, los más pequeños pueden, de manera amena y lúdica, empezar a familiarizarse con el cielo nocturno y con los distintos fenómenos astronómicos más cotidianos: el día y la noche, el año, las estaciones, las fases lunares. Para ello se utiliza un pequeño planetario optomecánico, una maqueta de grandes dimensiones del sistema Sol-Tierra-Luna y maquetas manipulables de los distintos planetas del Sistema Solar.

Vivimos en una época en que la mayoría de los habitantes de las grandes ciudades han olvidado cómo es el cielo nocturno. La contaminación lumínica ahoga la luz de las estrellas y convierte nuestro cielo en una cubierta plomiza, homogénea y difusa. Los planetarios permiten a los ciudadanos redescubrir el firmamento y volverse a emocionar con el fascinante Universo en el que vivimos y del que formamos parte. Los planetarios no son tan sólo una inmejorable herramienta didáctica, sino que pueden ser el punto de partida para concienciar a la sociedad sobre la necesidad de recuperar lo que nunca debimos perder: el cielo estrellado. En este aspecto, como en tantos otros, CosmoCaixa cumple perfectamente su papel como lugar de encuentro entre la ciencia y el conjunto de la sociedad, y en definitiva, como espacio abierto para el debate y la reflexión.

*Jordi Aloy i Domènech trabaja en el Planetario CosmoCaixa de Barcelona.*

## EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS: ONCE SEGMENTOS EN LA PALMA Y EL ANILLO DE ELEVACIÓN MONTADO

J. Miguel Rodríguez Espinosa

jmr.espinosa@iac.es



Figura 1 — Uno de los muñones de elevación siendo instalado en la estructura del telescopio.

### *Resumen*

Los últimos seis meses han visto crecer el GTC, si bien algo menos rápidamente. Y es que el alineado del anillo de elevación ha llevado tiempo. En cuanto a segmentos, habían llegado 12, seis nuevos del segundo lote. Desafortunadamente, uno de ellos presentaba problemas de limpieza óptica y ha sido devuelto al fabricante. Los instrumentos científicos están más cerca de su terminación. También el control avanza, y en los próximos meses vamos a estar probando las pantallas de usuario de varios

de los sistemas más importantes del GTC. Estas pantallas serán la cara del GTC ante sus usuarios. Como en otras ocasiones, lo que sigue es el ya tradicional repaso a los diferentes subsistemas del GTC, de modo que quede una imagen clara del estado del proyecto.

### *Cúpula*

Las reparaciones de los defectos con que quedó la cúpula, después de cerrado el contrato con la em-

presa adjudicataria, están prácticamente finalizadas. Se han cambiado completamente los mecanismos de guía de las cadenas de tracción de las compuertas de observación. Todo ha sido llevado a cabo por el personal de operación y mantenimiento del GTC. Además, los trabajos se han realizado de modo que no se interrumpiesen las tareas de montaje del telescopio, de manera que se ha trabajado

en su reparación sólo cuando los montadores del telescopio no necesitaban abrir la cúpula. Queda pendiente el sellado de las ventanas de ventilación. Se va a poner un sellado temporal para experimentar con él, antes de poner el definitivo. Pronto se probará el sistema de control de cúpula, con lo que ésta quedará terminada, a falta sólo de resolver el ya mencionado sellado de las ventanas.

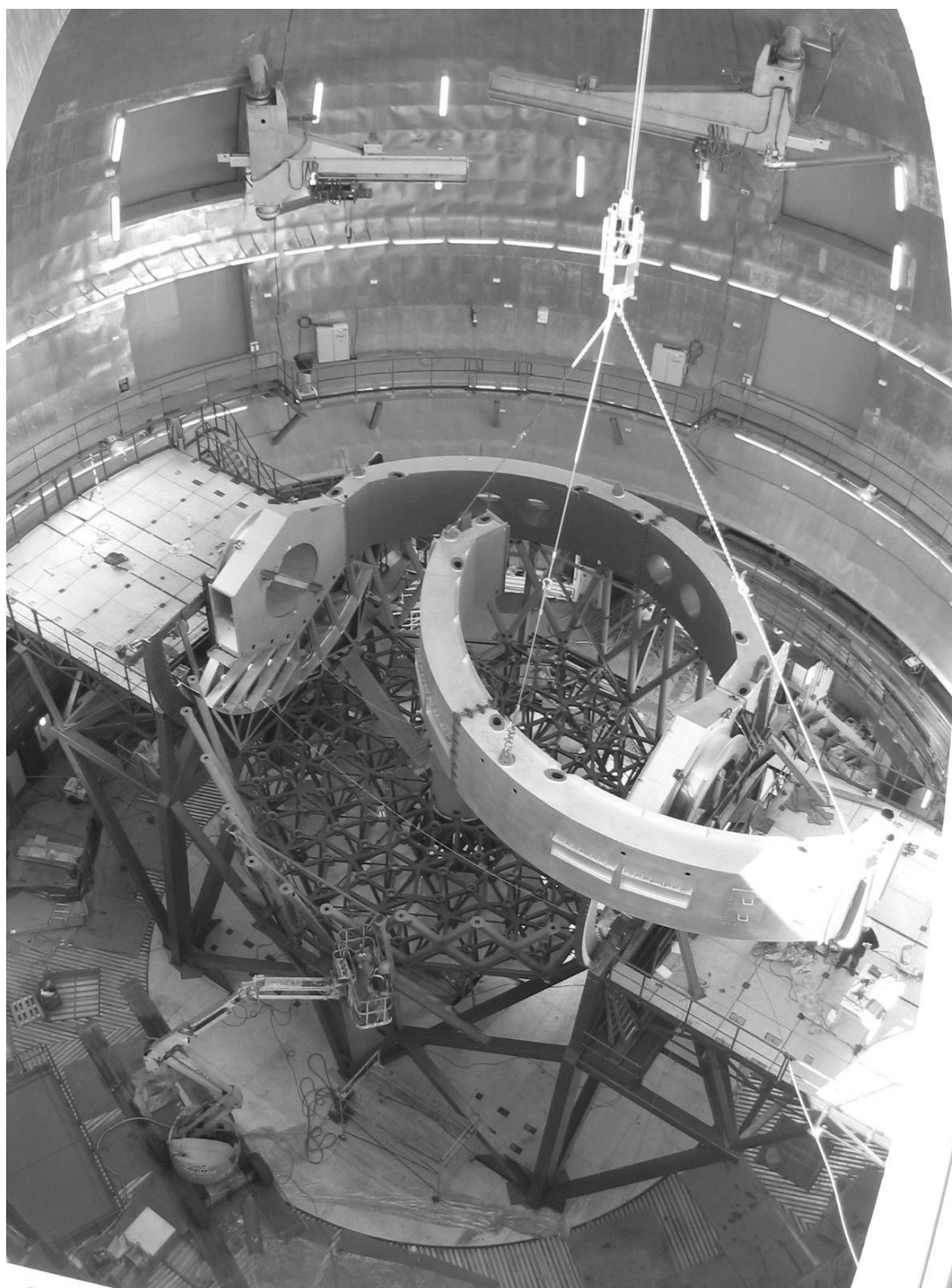


Figura 2 —  
*Una de las secciones en que se dividió el anillo de elevación en el momento de introducirse en la cúpula e instalarse en su sitio.*

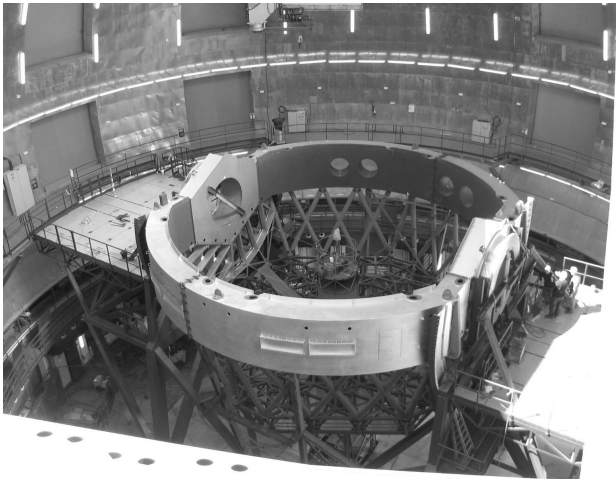


Figura 3 — *El anillo de elevación completado.*

### *Telescopio*

La montura mecánica del telescopio sigue creciendo, si bien una vez llegados al anillo de elevación el crecimiento en altura se ha detenido un poco. La colocación precisa del anillo de elevación es muy importante. Cualquier error en la colocación de este anillo, y en particular de los muñones que definen el eje de elevación, influirá en el apuntado y seguimiento del telescopio. Las figuras 1, 2 y 3 muestran imágenes del montaje de los muñones de elevación y de las piezas del anillo de elevación. En el momento de escribir esto, el alineado del anillo

se ha completado con la precisión requerida.

Entre tanto se llevaba a cabo este alineado, la araña del secundario se ha montado y tensado en el exterior (Fig. 4), y todas las piezas del tubo superior están listas, también en el exterior, para su introducción en la cúpula y subsiguiente montaje. En estos momentos se está uniendo el tubo inferior al anillo de elevación. Hasta ahora, este tubo inferior, que es el que soporta la celda del primario, sólo estaba presentado con tornillos. Una vez finalizadas estas actividades se comenzará a levantar el tubo superior y, por último, la araña del secundario. Antes de que vean la luz estas líneas la montura del telescopio debería estar acabada. A esto seguirán las actividades de cableado, instalación de motores, líneas de refrigeración (aire, agua a diversas temperaturas, nitrógeno y helio), así como fibra óptica para los datos. El telescopio será probado en los primeros meses de 2005, esperándose su acabado y entrega por parte de la compañía constructora en abril de 2005. A esto seguirá un período de pruebas del control de los ejes principales, acimut y elevación, y enseguida, mediante un pequeño refractor que se sujetará al anillo de elevación, se realizarán pruebas de apuntado y seguimiento hasta construir un primer modelo de apuntado del telescopio. La idea es entender el comportamiento de la estructura mecánica antes de instalar óptica en el telescopio.

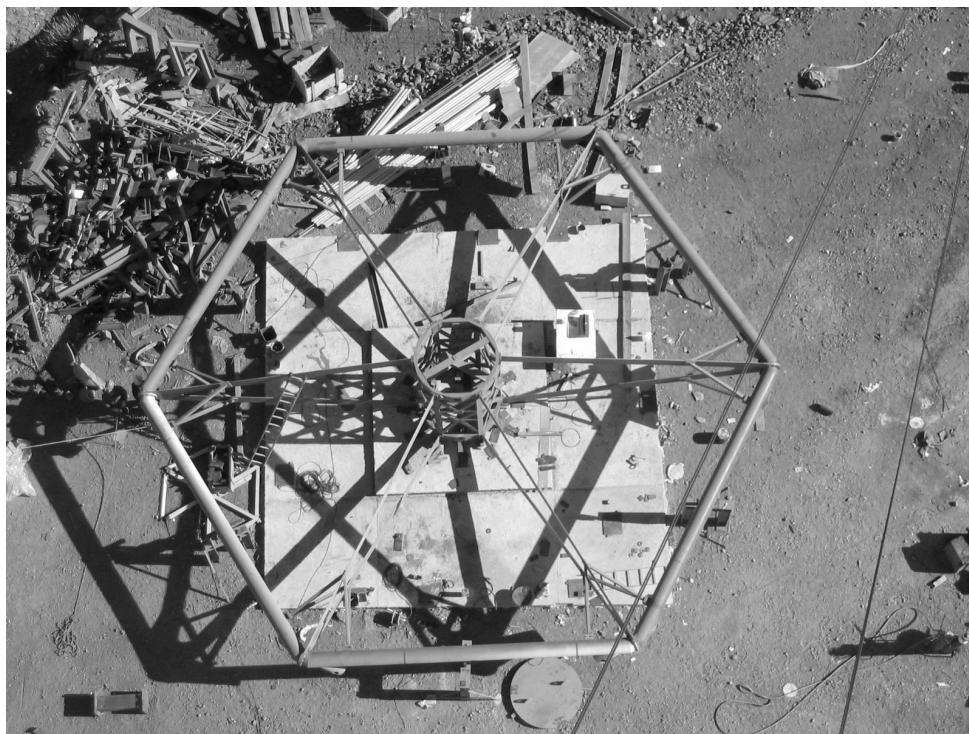


Figura 4 — *La araña del espejo secundario montada en el exterior del edificio, preparándose para su introducción en el interior de la cúpula.*

## Óptica

Si en la pasada edición comentaba la recepción del primer lote de seis segmentos en La Palma, en esta edición he de informar de la llegada del segundo lote. Esta pauta no será siempre así, sino que se acelerará, de modo que espero que en el próximo artículo pueda decir que hemos recibido el tercer y cuarto lotes.

Sin embargo, decía en el título de este artículo que solo 11 segmentos están ahora en La Palma. En efecto, uno de los segmentos tuvo que ser devuelto a París debido a problemas de limpieza óptica. Se trata de pequeñas oquedades microscópicas que aparecen en la superficie óptica del segmento. Son difíciles de ver, y posiblemente su efecto, una vez enmascarado con el aluminizado del segmento, sería insignificante. En todo caso, la densidad superficial de estos defectos era superior a lo especificado, y se decidió no aceptar el segmento.

En la sala de almacenaje de los segmentos, en el edificio del GTC, se han habilitado unas estanterías para apilar los segmentos hasta que puedan instalarse en el telescopio (Fig. 5). Hay espacio para almacenar cuatro lotes (24 segmentos), tres lotes en estanterías y uno más en el suelo. Espero que no haya que almacenar un quinto lote, sino que ya se pueda llevar directamente al telescopio.



Figura 5 — Dos lotes de segmentos apilados en estanterías en la sala de espejos del edificio del GTC. En las estanterías de la foto aún se puede montar otra fila de segmentos. El cuarto lote iría en el suelo.

El espejo secundario, recordemos, el espejo de berilio que tantos problemas dio para la producción del sustrato, está en su última etapa de pulido. Es-

ta etapa final está siendo más lenta de lo esperado. Confiamos que el pulido iónico final se haya terminado cuando leáis este informe y el espejo secundario pueda estar en La Palma a principios de año. Los mecanismos que producen los movimientos del secundario ya han sido probados exhaustivamente. La convergencia hacia las especificaciones de estabilidad entre los ciclos de basculación ha sido complicada, sobre todo por el ciclo útil de 80% que se estableció. Se ha tenido por tanto que hacer una ligera reducción de las especificaciones. Esencialmente, la relajación ha sido en un pequeño factor, y a frecuencias por encima de  $4.5\text{ Hz}$ , de modo que las prestaciones de estabilidad durante la basculación quedarán en valores de 0.026 segundos de arco. Recordemos que los modelos realizados en su día indicaban que no sería necesario bascular el secundario a frecuencias por encima de 3 Hz, con lo que esperamos que no haya degradación apreciable de las prestaciones del secundario. Por otra parte, Javier Castro, nuestro ingeniero jefe de óptica, está bastante convencido de que podrá optimizar los servos una vez esté el secundario en La Palma, con lo que el resultado final será un excelente espejo secundario.

El espejo terciario sí que está finalizado. En estos momentos se encuentra en Bélgica, donde se le está acoplando su montura y completando la documentación de entrega. El terciario llegará a La Palma en breve.

## Instrumentación científica

Los instrumentos científicos de primera luz han avanzado en su proceso de integración. Tal es el caso de OSIRIS, CanariCam y ELMER. También los instrumentos de segunda generación avanzan a buen ritmo.

OSIRIS prosigue su proceso de acabado de los diversos elementos mecánicos y ópticos para su integración en los talleres del IAC, que se espera comenzar en enero de 2005. Los barriletes de la cámara están terminándose de montar en México. Deberían llegar al IAC en breve. En cuanto a la mecánica, la estructura de soporte del colimador ha sido fabricada de nuevo para resolver unos problemas que se plantearon. En estos momentos está a punto de ser enviada al IAC. También la estructura de anclaje al rotador Nasmyth está en avanzado estado de fabricación (Fig. 6). El cambiador de máscaras, una de las piezas más complicadas de

OSIRIS, está en el taller mecánico del IAC, donde se están fabricando sus piezas. Ya hay gran parte del mismo fabricado (Fig. 7).

La actividad científica del grupo de OSIRIS continúa con la preparación de las propuestas de observación que utilizarán el tiempo garantizado. Son muchas y diversas propuestas, en las que participan un apreciable número de colegas. Se espera que estas propuestas permitan demostrar las capacidades de los diversos modos de observación de OSIRIS. En particular, el proyecto OTELO, que es el proyecto clave de OSIRIS, está siendo preparado minuciosamente. OTELO aprovechará la versatilidad de los filtros sintonizables de OSIRIS para hacer un muestreo profundo de la población de objetos con líneas de emisión en un volumen bien definido del Universo. OSIRIS será, por el momento, el único instrumento con filtros sintonizables en un telescopio de la clase 10 metros.



Figura 6 — El flanco de anclaje de OSIRIS al rotador Nasmyth del GTC en la factoría de Valencia donde se está fabricando.

ELMER sigue en su esquina del taller mecánico del IAC, en el espacio acondicionado *ad hoc* que mencionamos en la pasada edición. En enero se trasladará a la nueva sala de montaje de instrumentos del IAC, que se está terminando en estos momentos. El grupo de ELMER está elaborando un detallado plan de pruebas que se empezará a desarrollar en enero. ELMER no ha avanzado tan rápido como hubiera sido posible de haber estado listo el software de control de sus mecanismos.



Figura 7 — El selector de máscaras de OSIRIS en el taller del IAC. Este subsistema, de gran complejidad, se está fabricando enteramente en el taller del IAC, y consta de más de 1800 piezas. El cambiador de máscaras estará operativo en los primeros meses de 2005.

CanariCam continúa su integración en el Departamento de Astronomía de la Universidad de Florida. Víctor Sánchez Béjar, uno de nuestros astrónomos de soporte, continúa visitando Florida para seguir de cerca la integración y pruebas de CanariCam. Recientemente se han detectado flexiones en la placa fría de este instrumento, que han provocado un retraso de las pruebas previstas. Es aún pronto para saber cuánto influirá este retraso en la fecha final de entrega de CanariCam, pero no se espera que afecte al calendario final del GTC. Está prevista una visita de Charlie Telesco en los próximos días, que nos dará información de primera mano del estado de CanariCam.

### *Instrumentos de segunda generación*

EMIR prosigue su avance después de pasar con éxito su revisión de diseño preliminar. Se acaba de recibir un criostato de pruebas (Fig. 8), con el que se pretende probar gran parte de los mecanismos y lentes de EMIR que han de operar en frío. Ha surgido una dificultad en la contratación del mecanismo de cambio de máscaras, que también ha de operar en frío y es por ello de gran complejidad. En efecto, realizado el concurso para el contrato de este subsistema, no se ha presentado ninguna empresa, incluyendo algunas que habían expresado su interés. Parece que varias de las posibles empresas se percataron de la complejidad del mecanismo en el momento de hacer la licitación. EMIR está ahora realizando un programa de demostración, consistente en financiar modestamen-

te a algunas empresas para que realicen pruebas tendientes a demostrar que pueden fabricar el robot de máscaras con las prestaciones requeridas, entiendan la problemática y reduzcan así su nivel de riesgo. La idea es relanzar el concurso con la esperanza de que varias empresas, habiendo participado en el programa de demostración, estén en condiciones de competir y presentar propuestas aceptables.



Figura 8 — *El criostato de pruebas de EMIR ya integrado en uno de los laboratorios del IAC. Este criostato, de más de un metro de diámetro, será utilizado para probar en frío lentes y otros elementos ópticos de EMIR, muy especialmente la ventana de entrada, que por su tamaño es un elemento complicado de EMIR*

El IP de EMIR está fomentado la formación de grupos científicos que preparen proyectos para el tiempo garantizado de EMIR. La idea es que EMIR se pruebe y se explote bajo diversos proyectos, de modo que sus capacidades queden bien demostradas bajo gran variedad de modos observacionales. Por su parte, el grupo GOYA (*Galaxy Origins and Young Assembly*) ha seguido con la preparación de su propio programa científico, que ya está dando resultados de gran interés.

### *Astrónomos de soporte*

No ha habido suerte con la contratación de nuevos astrónomos de soporte, al haber declinado nuestra oferta los candidatos seleccionados. El anuncio se va a volver a lanzar con la expectativa de mejor suerte esta vez. Nos enfrentamos a una etapa apasionante en el desarrollo del GTC. Este año va a estar cargado de las primeras pruebas interesantes del telescopio y de muchos de sus subsistemas. La cantidad de trabajo delante de nosotros es apabullante, pero interesante.

Cualquier astrónomo interesado en la puesta en marcha de un telescopio y de su instrumentación podrá colmar sus aspiraciones. Esperamos mejor suerte en esta próxima convocatoria, en la que trataremos de dejar más claramente explicadas las condiciones de contratación, así como las posibilidades de futuro en el GTC. Invitamos a toda la comunidad a estar atenta a la nueva convocatoria, que saldrá más o menos en las fechas en que vea la luz este boletín.

*José Miguel Rodríguez Espinosa es investigador del IAC y director científico del proyecto GTC.*

## EURO3D: UN INTENTO DE APROXIMAR LA ESPECTROSCOPIA 3D A LA COMUNIDAD ASTRONÓMICA

S.F. Sánchez Sánchez    `sanchez@caha.es`

M. M. Roth                    `mmroth@aip.de`

E. Mediavilla Gradolph    `emg@iac.es`

La espectroscopía 3D (o integral) es un término general para definir la espectroscopía de un área (continua) del cielo y obtiene su nombre de sus dos dimensiones espaciales más su dimensión espectral. Existe un número creciente de instrumentos que utilizan esta técnica, muestreando el cielo mediante rejillas de lentes, fibras ópticas o cortadores de imágenes (*image slicers*), y empaquetando espectros de diferentes posiciones del cielo en un detector 2D. En comparación con el gran volumen de datos y la gran variedad de métodos específicos requeridos para la reducción y el análisis de los mismos, existe un grupo bastante reducido de centros con suficiente experiencia, casi todos ellos involucrados en el desarrollo instrumental. Desde hace algunos años se ha hecho evidente la falta de experiencia en espectroscopía integral convenientemente difundida en la comunidad astronómica y su uso, dentro de dicha comunidad, se ha visto reducido a un grupo altamente especializado. Es más, la mayoría de los paquetes de reducción y análisis de este tipo de datos estaban orientados (y limitados) a un solo instrumento, por lo que la experiencia con uno de ellos no garantizaba la capacidad para trabajar con otro.

Debido a estas razones, y teniendo en cuenta la evidente posición de liderazgo internacional de Europa en este tipo de técnicas, la Unión Europea financió con 1.5 millones de euros la red Euro3D [1] para la promoción de la espectroscopía integral (HPRN-CT-2002-00305). Dicha red, la cual integra 11 institutos de toda Europa (Fig. 1), en los cuales se ha desarrollado el ~90% de los espectrógrafos 3D existentes en el mundo, comenzó su andadura en junio de 2002 (*Kick-off meeting* en Tenerife), y tendrá una duración de 3.5 años. Durante este periodo de tiempo se ha propuesto entrenar a un grupo de 11 postdocs en este área, desarrollando, a la vez, estándares de almacenamiento de datos y programas de visualización y análisis válidos para todos y cada uno de los instrumentos existentes (y por existir). Con esta actividad se pretende promover el uso de la espectroscopía integral entre la comunidad astronómica europea

mediante (1) la creación de proyectos comunes entre los diferentes grupos que trabajan usando esta técnica, (2) el entrenamiento de una nueva generación de astrónomos especialistas en la misma y (3) la creación de paquetes de uso común, independientes del instrumento utilizado y que serán distribuidos de forma gratuita a toda la comunidad científica.



Figura 1 — Distribución de los miembros de la red Euro3D

### Estado del proyecto

Euro3D celebró recientemente su revisión a medio plazo en Lyon (21-22 Octubre 2004), coincidiendo con un *workshop* sobre desarrollo de software de análisis. Durante el mismo se pusieron de manifiesto los diferentes logros obtenidos por la red, tanto en el plano puramente científico, como en el de estandarización y creación de software. Dentro de los mismos cabe destacar:

— La creación de un formato estándar de almacenamiento de datos de espectroscopía 3D totalmente independiente del instrumento con el que se obtuvo: el formato Euro3D [2]. Dicho formato consiste en una definición estricta de tablas FITS, con lo que puede ser leído por la mayor parte de los paquetes estándares de análisis de datos astronómicos. Al mismo tiempo es lo suficientemen-



te flexible como para permitir almacenar datos de muy diferente tipo de instrumentos de espectroscopía integral.

— La creación de una librería de entrada/salida de datos, la librería LCL [3], escrita en C, e implementada para python, tcl y perl. Dicha librería permite el manejo de los datos en el formato Euro3D, así como otra serie de formatos (cubos, imágenes 2D, tablas, ...) de forma sencilla.

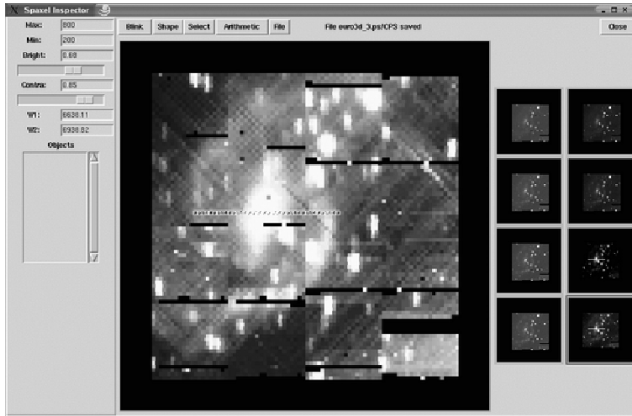


Figura 2 — *Inspector de spaxels, elementos espaciales, en E3D. Permite visualizar la distribución espacial de los datos a diferentes longitudes de onda, así como la selección de espectros en diferentes posiciones. E3D comprende también un inspector espectral y una ventana principal.*

— La creación de un programa de visualización, E3D [4], que permite visualizar y analizar datos de espectroscopía 3D (Fig. 2), utilizando el formato Euro3D como formato nativo, pero permitiendo importar/exportar datos en otros formatos (por ej., cubos de datos). E3D permite crear mapas y gráficas tanto espectrales como espaciales en diferentes formatos (postscript, ...), así como animaciones para presentaciones [4] (Fig. 3).

— La creación de más de 20 proyectos científicos nuevos entre los diferentes nodos de la red, cubriendo un amplio rango de problemas científicos, desde el estudio del centro de nuestra galaxia [4] hasta emisores de Ly $\alpha$  a alto corrimiento al rojo [5].

### *Euro3D y la comunidad astronómica española*

La espectroscopía 3D tiene una amplia tradición en España donde instrumentos como INTEGRAL [6] fueron realmente pioneros en este tipo de técnicas. La comunidad astronómica española está representada en la red Euro3D por el IAC, nodo de

la misma, donde E. Mediavilla lidera el proyecto científico de lentes gravitatorias. La actividad de dicho grupo, que opera INTEGRAL en el WHT (La Palma), así como el hecho de que PMAS [7] (*Potsdam Multi-Aperture Spectrophotometer*) esté actualmente instalado en el telescopio de 3.5m de Calar Alto, siendo accesible a la comunidad astronómica española como un instrumento de uso público, ha generado toda una actividad renovada en este campo dentro de nuestro país. De hecho 3 de los 11 postdocs de la red son españoles (J. Falcón, A. Monreal y S.F. Sánchez).

Dicha actividad ha propiciado que el próximo año la escuela de invierno del IAC esté dedicada completamente a la espectroscopía integral, y en particular a entrenar a toda una nueva generación de astrónomos en las técnicas y paquetes desarrollados por la red Euro3D, con el fin de que esta técnica se convierta en un breve espacio de tiempo en una técnica de uso general.

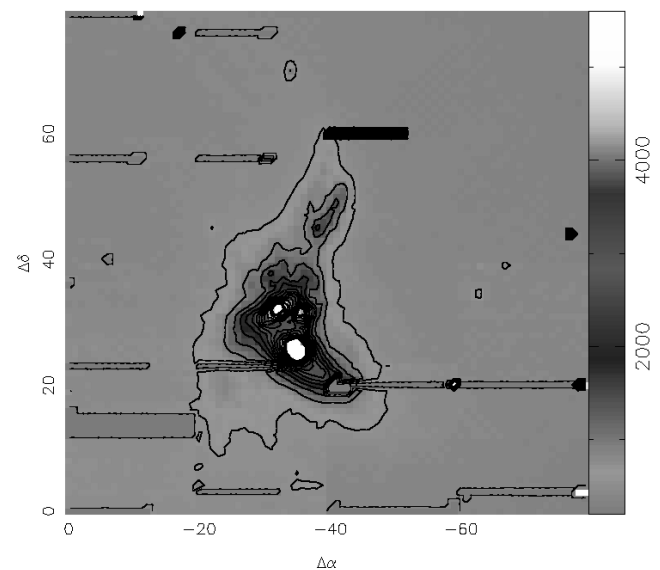


Figura 3 — *Mapa de la emisión H $\alpha$  en una galaxia en colisión observada con VIMOS/VLT, creado utilizando E3D.*

Tal y como hemos indicado, la espectroscopía 3D es una técnica prioritaria dentro del desarrollo de la Astronomía europea, liderada por ESO. En la actualidad el VLT/UT3 está 100% dedicado a este tipo de instrumentos (VIMOS, GIRAFFE, FLAMES, ...), y dos de los proyectos principales de desarrollo instrumental dentro de la misma, KMOS y MUSE, son espectrógrafos 3D. La probable entrada de España en ESO nos fuerza a renovar nuestros conocimientos en este tipo de técnicas con el fin de ser competitivos con nuestros colegas europeos. La generalización del uso de espectroscopía integral ya

se ha notado incluso en nuestro país, donde PMAS ha sido el segundo instrumento más utilizado en el 3.5m de Calar Alto en los últimos tres semestres, tendencia confirmada para el próximo semestre de 2005 (10 noches de tiempo español aprobadas), dejando de ser un instrumento para uso específico de especialistas. Lamentablemente, la falta de un instrumento de este tipo para GTC a corto plazo, a pesar de esfuerzos como ATLANTIS [8], podría suponer una pérdida de competitividad en un marco en el cual la espectroscopía 3D se convierta en una técnica de uso general.

### Referencias

- 1 Walsh, J. R. & Roth, M. M.: 2002, The Messenger, 109, 54
- 2 Kissler-Patig, M., Copin, Y., Ferruit, P., Pécontal-Rousset, A., Roth M.M., 2004, AN, 325, 159
- 3 Pécontal-Rousset, A., Ferruit, P., et al., 2004, AN, 325, 163

- 4 Sánchez, S. F., 2004, AN, 325, 167
- 5 Horrobin, M., Eisenhauer, F., Tecza, M. et al., 2004, AN, 325, 88
- 6 Bower, R. G. , Morris, S. L. , Bacon, R. et al., 2004, MNRAS, 351, 63
- 7 Arribas, S., Carter, D., Cavaller, L., et al.: 1998, Proc. SPIE, 3355, 821
- 8 Roth, M. M., Bauer, S., Dionies, F., et al. : 2000, in Proc. SPIE, Vol. 4008, 277-288
- 9 Prieto, A., Arribas S., Mediavilla E., et al., <http://www.iac.es/project/ATLANTIS/>

*S.F. Sánchez Sánchez es astrónomo perteneciente al Centro Astronómico Hispano Alemán de Calar Alto. M. M. Roth trabaja en el Astrophysikalisches Institut Potsdam. E. Mediavilla investiga en el Instituto de Astrofísica de Canarias IAC.*

# ESTRELLAS MASIVAS EN EL CENTRO GALÁCTICO

Francisco Najarro de la Parra

najarro@damir.iem.csic.es

## Resumen

En esta revisión, repasamos la reciente historia de los cúmulos de estrellas masivas en el centro galáctico. El artículo examina también el enorme salto cuantitativo que han supuesto tanto la revolución de los detectores en el infrarrojo como la evolución de los modelos de estrellas calientes. Tras un breve recorrido a través del cúmulo central, presentamos resultados de estudios de metalicidad en los cúmulos del “Quintuplet” y del “Arches”. El análisis de las estrellas LBV (*Luminous Blue Variable*) del “Quintuplet” permite, por primera vez, obtener medidas directas de la metalicidad y de la relación entre elementos- $\alpha$  y Fe. Nuestros resultados preliminares apuntan hacia un ligero enriquecimiento de los elementos- $\alpha$  con respecto a Fe y sugieren una función inicial de masa dominada por estrellas masivas, consistente con lo ya encontrado en el cúmulo del “Arches” a partir de estudios fotométricos. Por otro lado, a partir de nuestro análisis del cúmulo del “Arches”, presentamos un nuevo método, basado en la abundancia de N en estrellas WNL (*Wolf-Rayet Nitrogen Late*), para obtener la metalicidad de cúmulos muy jóvenes. Nuestros resultados son consistentes con una metalicidad solar en ambos cúmulos.

## Abstract

We review quantitative spectroscopic studies of massive stars in the Galactic Center clusters. Thanks to the impressive evolution of IR detectors and the new generation of line blanketed models for the extended atmospheres of hot stars, we are able to accurately derive the physical properties of the massive stars in these clusters. Our analysis of the LBVs in the Quintuplet cluster provides, for the first time, a direct estimate of  $\alpha$ -elements and Fe chemical abundances in these objects. Preliminary results point to a slightly enhanced enrichment of  $\alpha$  compared to Fe and suggest an initial mass function dominated by massive stars, as found for the Arches cluster. On the other hand, from our analysis of the Arches cluster, we introduce a new method to estimate metallicity in very

young clusters based on the N abundance of WNL stars and the theory of evolution of massive stars. Results indicating solar metallicity are presented.

## Introducción

El progreso espectacular que han experimentado los detectores en el infrarrojo (IR) desde mediados de los ochenta ha permitido llevar a cabo estudios espectroscópicos estelares en los parsecs centrales de nuestra galaxia. La detección en el parsec central de un cúmulo que emitía en He I (Krabbe et al. 1991) puso sobre la mesa la importante cuestión acerca de la naturaleza de sus miembros así como el papel de éstos en el balance energético de dicha región de nuestra galaxia. En cierto modo, el descubrimiento del cúmulo de He I desencadenó una mejora considerable en los modelos de estrellas calientes en el infrarrojo, cuya teoría era sobrepasada claramente por las observaciones. Por primera vez, se obtuvieron valores fiables de luminosidad, temperatura, pérdida de masa, abundancia de He y número de fotones ionizantes para los miembros más brillantes del cúmulo (Najarro et al. 1994, 1997). Dichos resultados resolvieron el rompecabezas energético del parsec central e impulsaron una serie de cotas y desafíos a la teoría de evolución de estrellas masivas.

En la actualidad, sabemos que el centro galáctico constituye una región única de formación de estrellas masivas en la Vía Láctea. Sólo nubes moleculares con densidades superiores a las del disco son capaces de sobrevivir a las tremendas fuerzas de marea en el centro. Dichas nubes tienen temperaturas aproximadamente tres veces mayores que las del disco y presentan también fuertes campos magnéticos (Morris 1993; Morris & Serabyn 1996). El calentamiento de la materia interestelar en el centro galáctico es motivo de debate (Morris & Serabyn 1996). Las altas temperaturas de una gran fracción del gas molecular, las bajas temperaturas del polvo (20-30 K) y la extraordinaria complejidad química han conducido a proponer que el calentamiento de la materia interestelar del centro galáctico está dominado por choques producidos por cúmulos de estrellas masivas evolucionadas (Martín-Pintado et al. 1999, 2001). De hecho, los estudios recientes de los datos de *ISO* han mostrado que la radiación ultravioleta generada por los

cúmulos del “Quintuplet” y los “Arches” estimada por medio de los análisis cuantitativos de estrellas masivas pueden dominar el calentamiento del gas y el polvo sobre regiones de decenas de pársecs (Rodríguez-Fernández et al. 2001).

Por otro lado, si tenemos en cuenta que el ritmo actual de densidad de formación estelar es  $10^{-7} M_{\odot} \text{ yr}^{-1} \text{ pc}^{-3}$ , 250 veces superior a la media de la Galaxia, esta región se convierte en un laboratorio ideal para abordar cuestiones cruciales en Astrofísica como la universalidad de la función inicial de masas (IMF) o la masa más alta que puede alcanzar una estrella (Figer, 2004). De hecho, el centro galáctico alberga tres cúmulos densos y masivos que se han formado en los 30 parsecs centrales en los últimos 5 millones de años. El cúmulo central y los cúmulos del “Quintuplet” y “Arches” contienen aproximadamente el 10% de las estrellas masivas conocidas en la Galaxia. Cada cúmulo tiene una masa alrededor de  $10^4 M_{\odot}$ . La extrema juventud (2–2.5 Maños, Figer et al. 2002; Najarro et al. 2004) del cúmulo del “Arches” permite abordar las cuestiones arriba citadas mediante estudios puramente fotométricos (Figer 2004), mientras que el cúmulo central y el del “Quintuplet” al tener el doble de edad pueden haber perdido ya sus miembros más masivos en forma de supernovas.

Las razones tanto de la existencia como de la procedencia de una población tan alta de estrellas masivas en un medio tan hostil siguen siendo objeto de debate. Sabemos que hay un gran anillo molecular ( $r \sim 300 \text{ pc}$ ) que origina movimientos espirales de material molecular en torno al centro debido a perturbaciones gravitacionales. Una vez que se inicia este tipo de actividad, podemos imaginar que habrá un gran número de nubes viajando hacia una región de volumen muy reducido y se originarán colisiones nube-nube (Morris & Serabyn 1996). Para poder producir unos cúmulos tan masivos y compactos, es necesaria una formación estelar muy eficiente y en episodios muy cortos, reforzando así la hipótesis de colisiones entre nubes (Figer & Morris 2002). De hecho, vemos cúmulos parecidos en pares de galaxias que se están fusionando, como “La Antena”. Sin embargo, hay cabos más que sueltos para explicar por qué se formaron estos tres cúmulos en los últimos 5 millones de años y no hay trazas de formación de cúmulos entre 5 y 20 Maños. Si se hubieran formado, las simulaciones con N-cuerpos indican que se habrían disuelto pero habrían dejado también cientos de super-gigantes rojas que no vemos en la

actualidad (Figer et al. 2004). Todos estos hechos observacionales han llevado a postular una historia de formación estelar continua como explicación más plausible de la población actual en el centro galáctico (Blum et al. 2003; Figer et al. 2004).

Otro aspecto crucial que aún sigue siendo fuente de controversias es la metalicidad del centro galáctico. La metalicidad, que juega un papel fundamental en la evolución de las estrellas masivas, es muy importante para entender la evolución química del centro galáctico. Por un lado, basándose en observaciones de la fase gaseosa, Shields & Ferland (1994) obtuvieron una metalicidad dos veces solar a partir de las líneas de emisión de argón y nitrógeno, mientras que las líneas de neón indicaban metalicidad solar. A partir de análisis diferenciales de supergigantes frías, Carr, Sellgren, & Balachandran (2000) y Ramirez et al. (2000) obtuvieron fuertes indicaciones de abundancia solar para el Fe. Por otro lado, Maeda et al. (2002) analizaron la emisión local de rayos-X en torno a Sgr A East y derivaron una metalicidad cuatro veces superior a la solar. Parece crucial, por tanto, obtener estimaciones de la metalicidad a través de análisis directos y confrontarlos con los derivados en estudios de estrellas frías y fase gaseosa. Los estudios espectroscópicos de las fotosferas y vientos de las estrellas calientes masivas constituyen trazadores ideales de la abundancia de los metales, ya que proporcionan información muy reciente (las estrellas son muy jóvenes) de las nubes donde se formaron las estrellas.

En este artículo, revisamos el enorme progreso que ha tenido lugar en la última década tanto en el campo observacional como en el de la espectroscopía cuantitativa de estrellas masivas en el infrarrojo. Haciendo parada en cada uno de los tres cúmulos del centro galáctico, analizaremos las diferentes e importantísimas aportaciones de cada uno de ellos en el campo de la física estelar.

### *Cómo empezó todo: el cúmulo central y primeros modelos*

Debido a la alta extinción en la dirección del centro galáctico ( $A_v \sim 30 \text{ mag}$ ), las detecciones de estrellas en dicha zona de la Galaxia tuvieron que aguardar al desarrollo de la tecnología de detectores en el infrarrojo y vencer de este modo las apenas 3 magnitudes de extinción en la banda K. Así, Becklin & Neugebauer (1968) descubrieron las pri-

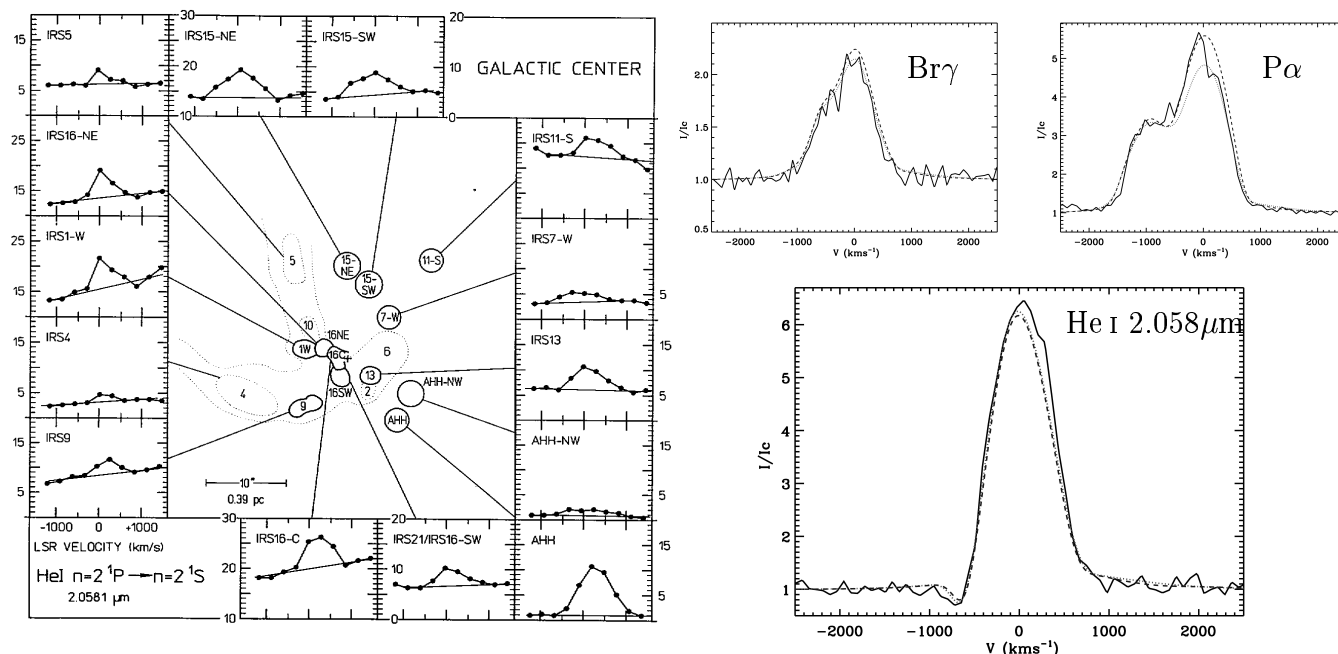


Figura 1 — Descubrimiento del cúmulo de estrellas de He I (Krabbe et al. 1991) y primeros modelos espectroscópicos llevados a cabo (Najarro et al. 1994) para uno de sus miembros: la estrella AHH/AF (véase la discusión en el texto).

meras estrellas jóvenes en el parsec central de nuestra galaxia, mientras que Rieke & Lebofsky (1982) confirmaron la identificación de supergigantes azules y rojas en la región, postulando la existencia de un brote de formación estelar responsable tanto del gas ionizado como del polvo caliente en la zona. Forrest et al. (1987) detectaron una supergigante azul como “la fuente extraña de Br $\alpha$ ” y Allen, Hyland & Hillier (1990) obtuvieron un espectro en la banda K de dicho objeto (la estrella AF, Allen-Forrest) muy similar al de estrellas muy masivas evolucionadas en las Nubes de Magallanes.

La gran revolución llegó con el descubrimiento de Krabbe et al. (1991) de un cúmulo de objetos que emitían en la línea He I 2.058  $\mu\text{m}$  (véase la Fig. 1). La aparición de dicho cúmulo cuestionó la posible naturaleza de los objetos, dada la enorme dificultad para formar estrellas bajo las condiciones físicas reinantes en los 10 parsecs centrales. Así, Morris (1993) sugirió que las fuentes de He I se formaban a partir de las colisiones entre estrellas gigantes y agujeros negros que se desplazan hacia el centro galáctico mediante fricción dinámica. En la colisión, el agujero negro adquiriría temporalmente una atmósfera y un viento tomando la apariencia de una estrella caliente perdiendo masa. Alternativamente, se postuló la formación de estrellas masivas bajo condiciones momentáneas favorables

(fase de mayor densidad de gas) o a través de fusión de estrellas de baja masa en la zona densa central (Eckart et al. 1993). Esta controversia quedó resuelta con el análisis cuantitativo de la estrella AF (AHH), el objeto más brillante en He I 2.058  $\mu\text{m}$  del cúmulo. Después de analizar la física de formación de la línea de He I 2.058  $\mu\text{m}$  en vientos estelares, Najarro et al. (1994) encontraron que la estrella AF era en realidad una supergigante azul (OIfpe/WN9) rica en He, caracterizada por un fuerte viento estelar y que aportaba una importante fracción de los fotones ionizantes de H de la región (véase la Fig. 1).

Dicho análisis se llevó a cabo con un modelo unificado (fotosfera + viento) para las atmósferas en expansión de estrellas calientes. El modelo (Hillier 1987, 1990) consistía en un método fuera de equilibrio termodinámico local (NLTE) en el que se resolvía la ecuación de transporte en geometría esférica y sujeto a las ecuaciones del equilibrio estadístico y equilibrio radiativo. El modelo suponía, asimismo, estado estacionario y usaba la ecuación de continuidad para determinar la estructura de densidad a través de un campo de velocidad y pérdida de masa dados. La ecuación de transporte se resolvía, bien mediante la aproximación de Sobolev, o a través de una solución más precisa en el sistema de referencia de la materia (*comoving-*

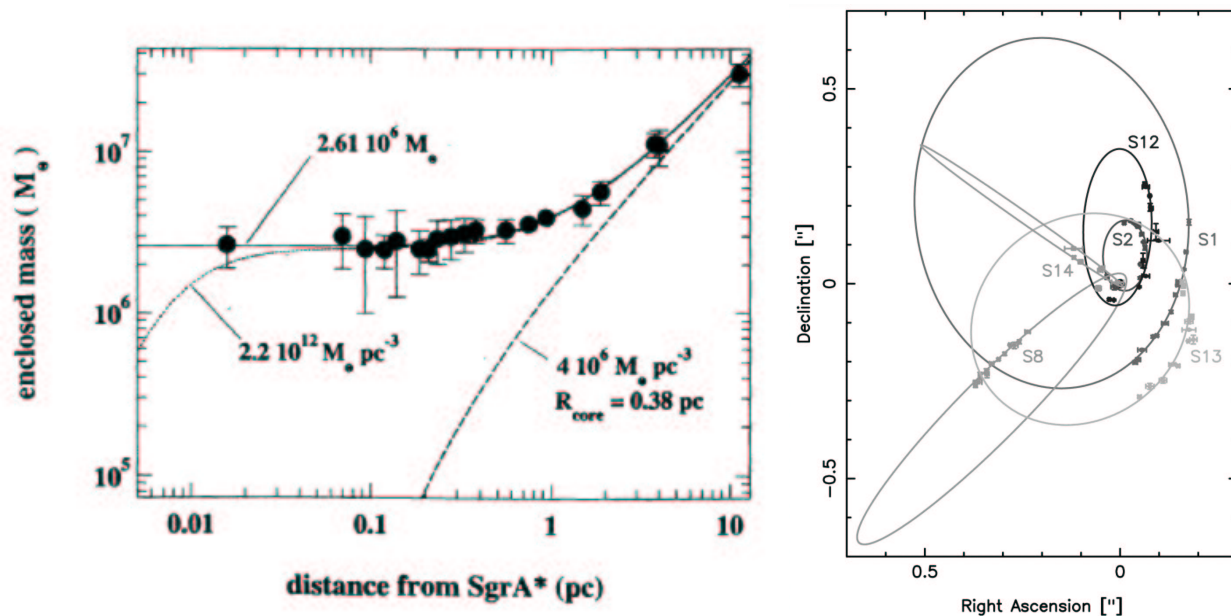


Figura 2 — **Izquierda:** Masa total contenida en función de la distancia real a Sgr A\* (figura tomada de Genzel et al. 1997). La curva con trazo largo discontinuo representa el modelo de masa para el cúmulo visible, mientras que la curva continua representa el modelo del cúmulo más una masa puntual de  $2.6 \times 10^6 M_{\odot}$ . **Derecha:** Posiciones y órbitas proyectadas de las estrellas S1, S2, S8, S12, S13, y S14 alrededor de Sgr A\* (figura tomada de Schöedel et al. 2003).

frame). La atmósfera se suponía compuesta exclusivamente de H y He.

El subsiguiente análisis de otros ocho objetos del cúmulo (Najarro et al. 1997) confirmó la naturaleza de éstos como supergigantes azules, con vientos muy densos ( $\dot{M} \approx 5 - 80 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) con velocidades de expansión moderadas ( $v_{\infty} \approx 300 - 1000 \text{ km s}^{-1}$ ), temperaturas efectivas entre 17000 y 30000 K y luminosidades de  $1 - 30 \times 10^5 L_{\odot}$ . La emisión de los objetos en He I  $2.058 \mu\text{m}$  se originaba en los vientos estelares y no era de carácter nebuloso como habían postulado otros autores (Geballe et al. 1984). Najarro et al. (1997) identificaron las estrellas de emisión de He I como las dominantes de la inyección de energía en el parsec central y como miembros más luminosos (en cierto modo representaban la punta del iceberg) de un cúmulo estelar joven que se formó hace unos pocos millones de años.

Más tarde, Paumard et al. (2001) revisaron la población de estrellas con líneas de emisión y establecieron dos categorías para éstas: estrellas muy brillantes con líneas estrechas ( $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$ ) y estrellas más débiles con líneas anchas ( $\sim 1000 \text{ km s}^{-1}$ ), con una concentración predominante de las primeras en unos pocos segundos de arco alrededor de Sgr A\* (la fuente de radio asociada al centro dinámico de la galaxia). Hoy sabemos que el

cúmulo central contiene más de 30 estrellas masivas evolucionadas con masas iniciales  $> 20 M_{\odot}$ . La estimación actual de la población incluye 9 Wolf-Rayets, 20 estrellas con características espectrales del tipo Ofpe/WN9 en la banda K, algunas supergigantes rojas y alrededor de 100 estrellas de tipo espectral O (O7 y más tardías, Figer 2003). Es más, estudios de variabilidad durante siete años consecutivos (Ott et al. 1999) han permitido también identificar la presencia de una binaria eclipsante de corto periodo. Se trata de IRS16SW, una de las estrellas analizadas por Najarro et al. (1997) y que constituye uno de los sistemas binarios con mayor masa conocidos ( $\geq 100 M_{\odot}$ ).

Otro de los debates que dividía a la comunidad científica a principios de los noventa era la existencia o no de un agujero negro masivo en el centro de la Galaxia, coincidiendo con la fuente de radio Sgr A\*. Comparado con otros agujeros negros postulados en el centro de otras galaxias, Sgr A emitía solo modestamente en el IR, y ello llevó a parte de la comunidad a defender una situación dominada por un cúmulo isoterma y quizá la presencia de un pequeño  $\sim 100 M_{\odot}$  y algo “anorético” agujero negro. Para poder discernir entre esta posibilidad o la presencia de una gran masa oscura central era necesario obtener estimaciones dinámicas a corta distancia ( $< 0.5 \text{ pc}$ ) del centro. La presencia del

cúmulo de estrellas calientes en el parsec central, permitió el uso de éstas para obtener, a través de sus velocidades radiales, la dispersión de velocidades y una estimación de la masa central usando el teorema del virial y el método de Bahcall-Tremaine (1981). Así, Krabbe et al. (1995), usando la dispersión de velocidades de 35 estrellas, determinaron la existencia de una masa central oscura de unos  $3 \times 10^6 M_{\odot}$  dentro de una zona de 0.14 pc alrededor del centro dinámico. Posteriormente, Genzel et al. (1996) extendieron este estudio de velocidades radiales a 223 fuentes confirmando el resultado de Krabbe et al. (1995) mientras que Eckart & Genzel (1996, 1999) mediante un espectacular estudio de movimientos propios estrecharon el cerco y obtuvieron evidencia de que los 2.6 millones de masas solares concentrados en el centro tenían que estarlo en forma de un agujero negro masivo (Fig. 2). Desde entonces, diversos grupos han seguido trabajando y en la actualidad se han determinado órbitas completas (Schöedel et al. 2003) para un número importante de estrellas (Fig. 2).

Desde el punto de vista de la física estelar la aparición del cúmulo de He I dejó abiertos una serie de interrogantes, planteando los siguientes desafíos:

- Dada la naturaleza de la línea He I  $2.058 \mu\text{m}$  en emisión, las estrellas del cúmulo ocupaban una zona muy estrecha y normalmente poco poblada del diagrama H-R. En particular, los modelos evolutivos (Schaller et al. 1992) no predecían un número tan elevado de objetos en ese estadio evolutivo tan breve. Quedaba pues la pelota en el tejado de la teoría de evolución de estrellas masivas. Dicha teoría debía conseguir una mezcla y transporte de elementos a la superficie más efectiva que incrementase notablemente la duración de la fase OIfpe/WN9. Los nuevos modelos evolutivos con rotación (Meynet & Maeder, 2005) apuntan en esta dirección.
- Los modelos sólo proporcionaban las abundancias de H y He. La estimación de la metalicidad era crucial para entender, no sólo la evolución de las estrellas del cúmulo, sino también el enriquecimiento químico del centro galáctico.
- ¿Era el cúmulo del centro una *rara avis*, o por el contrario nos encontrábamos ante un efecto de selección —lo primero que se hizo fue mirar al parsec central— y cabría esperar

la presencia de otros cúmulos similares en el centro galáctico?

La detección de otros dos cúmulos jóvenes (“Quintuplet” y “Arches”) a 30 parsecs en proyección del centro galáctico con un alto contenido de estrellas muy masivas (entre ellas la “Pistol Star”), vino a constatar que las estrellas de He I del cúmulo central representaban sólo la punta del iceberg, y se hacía pues necesario un estudio más sistemático y en profundidad de la zona. A continuación, revisamos la evolución de las observaciones y modelos posteriores a los primeros análisis del cúmulo central, así como las aportaciones cruciales de los nuevos cúmulos al campo de las estrellas masivas.

### *Evolución de observaciones y modelos*

Durante la última década se han obtenido espectros IR de alta calidad de estrellas calientes (Morris et al. 1996; Hanson, Conti & Rieke 1996; Figer, McLean & Najarro 1997; Blum et al. 1997). La mayoría de dichos espectros se obtuvieron con resolución media-baja ( $R \sim 500-2000$ ), la cual es suficiente para clasificar espectralmente los objetos, pero claramente insuficiente en la mayoría de los casos para realizar estudios espectroscópicos cuantitativos detallados. La Fig. 3 muestra la banda H de la “Pistol Star” obtenida con UKIRT-CGS4 y a una resolución de  $R \sim 5000$ , y la importancia de una resolución espectral media-alta y alta relación señal-ruido (S/N) en las observaciones de estrellas masivas con vientos fuertes. Vemos como una resolución de  $R \sim 1000$  en la misma región espectral imposibilita la identificación y aislamiento de importantes líneas de diagnóstico. La cantidad de nuevas líneas metálicas de diagnóstico que aparecen al incrementar la resolución es considerable. Las líneas aisladas de Si II, Mg II y Fe II en el infrarrojo constituyen un regalo incalculable para los espectroscopistas en la determinación de abundancias metálicas en objetos altamente oscurecidos. La disponibilidad de datos espectroscópicos de alta resolución y relación S/N ha mejorado sensiblemente con la nueva generación de espectrógrafos infrarrojos en los telescopios de clase 8 y 10 metros (ISAAC, NIRSPEC, etc.).

Para poder analizar los nuevos datos, el modelo unificado que introdujimos en la sección anterior necesitaba incorporar la presencia de otros metales así como de un tratamiento correcto del *line-blanking*. Así, el nuevo modelo (Hillier & Miller





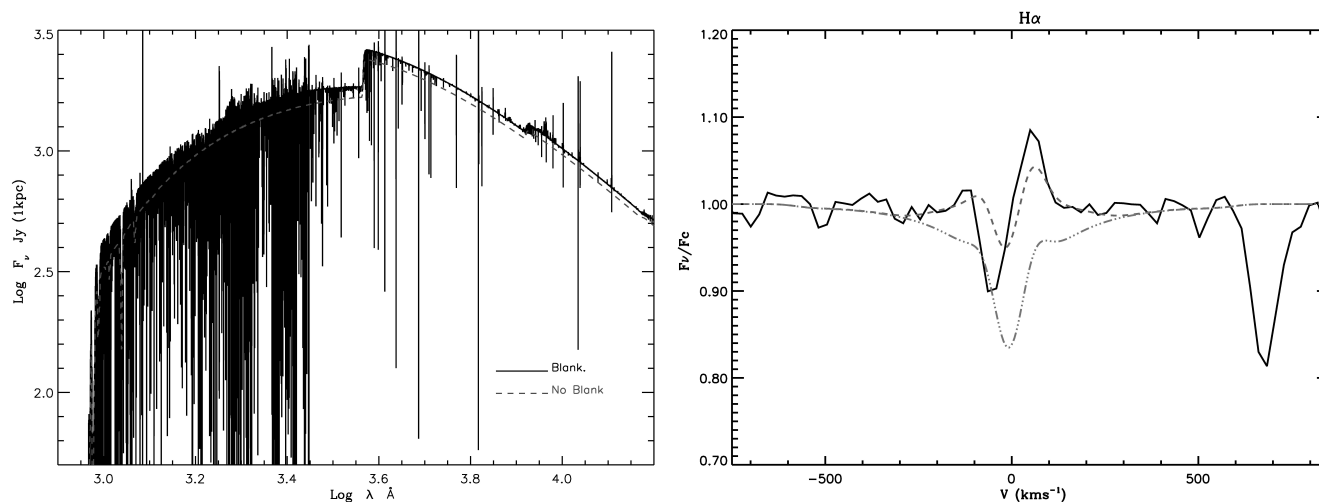


Figura 4 — *Impacto de los nuevos modelos con “line-blanketing” en los estudios espectroscópicos cuantitativos de estrellas calientes* **Izquierda:** Comparación en la distribución de flujo entre modelos con y sin line-blanketing. El flujo bloqueado en el UV aparece, a través de la conservación de éste y del back-warming en el óptico e IR. **Derecha:** Efecto de los cambios en la estructura de ionización del hidrógeno debido al blanketing en los perfiles  $H\alpha$ . En el caso de las supergigantes de tipo B, los nuevos modelos (línea quebrada-puntos) causan que la línea pase a estar en absorción, por lo que se requiere una pérdida de masa tres veces mayor para compensar los efectos del blanketing.

plet” es la presencia de dos estrellas (“Pistol Star” —asociada a la región de radio conocida como “la pistola”— y #362) del tipo LBV, variables azules luminosas que presentan espectros infrarrojos ricos en líneas metálicas (véanse las Figs. 5 y 6). Estas líneas permiten obtener una estimación directa de la metalicidad a través de estudios espectroscópicos cuantitativos y así caracterizar el historial de enriquecimiento de la metalicidad de la región. Es más, usando las líneas de Fe II, Si II y Mg II (Najarro et al. 2005, en preparación) podemos medir la relación entre el hierro y los elementos- $\alpha$ . Esta relación es crucial para entender si la función inicial de masas (IMF) se comporta como la IMF de otros cúmulos galácticos o si, en realidad, está dominada por estrellas masivas confiriéndole una pendiente más plana. Si la IMF está dominada por estrellas masivas, debemos esperar una mayor deposición de elementos- $\alpha$  comparado con Fe ya que se produciría un valor superior a la media de supernovas tipo SNII frente a supernovas de tipo SNIa.

Para realizar el estudio de las LBVs “Pistol Star” y #362 hemos supuesto que la atmósfera está compuesta por H, He, C, N, O, Mg, Si y Fe (en algunos modelos también se incluyó Ni). A continuación presentamos resultados preliminares de un análisis espectroscópico detallado de ambos objetos.

#### Las LBVs del “Quintuplet”: “Pistol Star” y #362

Comparándolos con los resultados que obtuvimos en Figer et al. (1998) usando modelos sin “blanketing”, los nuevos modelos con “blanketing” nos proporcionan una mejora considerable en nuestro conocimiento sobre las propiedades físicas de la “Pistol Star”. La Fig. 5 muestra el excelente ajuste de nuestro modelo a las observaciones en las bandas H, K, L y Br $\alpha$  de esta estrella. El modelo no sólo reproduce satisfactoriamente el espectro de H y He sino que también ajusta las líneas de emisión de Si II, Mg II y Fe II presentes en la atmósfera y viento de la estrella. El nuevo modelo resuelve la dicotomía que encontramos en Figer et al. (1998). Los modelos de H y He, proporcionaban dos ajustes igualmente satisfactorios de “alta” y “baja” luminosidad (véase la Fig. 6). Las líneas de Si II, Mg II y Fe II “prefieren” claramente el modelo de baja luminosidad y son incompatibles con la temperatura derivada para el modelo “H” de Figer et al. (1998). Encontramos una luminosidad en torno a  $1.75 \times 10^6 L_{\odot}$  y una temperatura  $T_{\text{eff}} \sim 11000$  K. Este resultado, que reduce nuestra estimación previa de la luminosidad en un factor dos, confirma la importancia de la nueva generación de modelos. De hecho, la reducción en la luminosidad supone una reducción en la estimación de la masa inicial de la estrella. Dicha masa se situaría en torno a

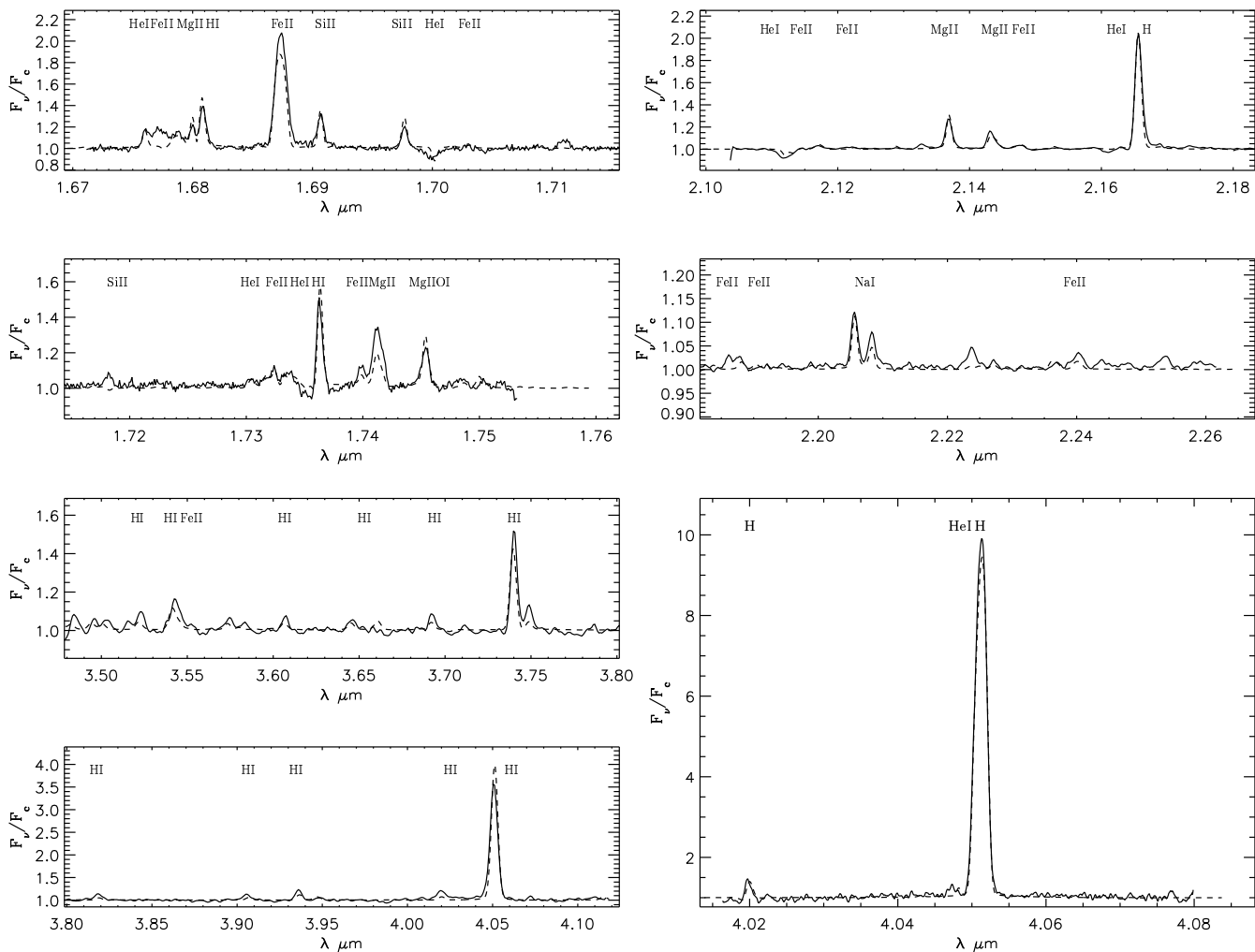


Figura 5 — Ajustes a observaciones infrarrojas de la LBV “Pistol Star” en el cúmulo del “Quintuplet” con los nuevos modelos con “blanketing” (véase la discusión en el texto).

las  $120 M_{\odot}$  frente a las casi  $300 M_{\odot}$  que sugerían nuestros primeros modelos (Figer et. al 1998). Este resultado es muy importante en el marco de la posible existencia de un límite superior de masas (Figer 2004, ver también sección del “Arches”) en estos cúmulos. El nuevo valor sería pues compatible con los resultados encontrados para el cúmulo del “Arches” que indican una masa máxima en torno a  $120\text{--}150 M_{\odot}$ .

También hacemos notar que, debido a la baja  $T_{\text{eff}}$  y alta densidad del viento del objeto, encontramos una degeneración en la relación H/He (abundancia de Helio). En principio, podemos variar la relación H/He desde 10 hasta 0.05 (en número) y conseguir ajustes de igual calidad para las líneas de He y H escalando consistentemente la pérdida de masa y variando mínimamente la temperatura (véase Hillier et al. 1998 para una discusión detallada de este efecto). La única línea que puede ayudar, en

cierto modo, a romper esta degeneración es la de absorción de He I  $2.112\mu\text{m}$ , la cual parece favorecer una relación H/He entre 3 y 0.05 en número.

Una consecuencia muy importante de esta degeneración es que sólo es posible obtener un límite superior en las fracciones de masa derivadas para Fe, Si y Mg. Nuestros modelos muestran que una vez que la relación H/He cae por debajo de 2, las abundancias metálicas deben escalarse a valores menores, es decir, si  $H/He \leq 2$ , sólo obtendremos un límite superior en las abundancias metálicas. La razón de este límite estriba en que al reducir la relación H/He, debemos aumentar la pérdida de masa para compensar la pérdida de H y así seguir ajustando los perfiles. Para el resto de los metales, la situación es diferente. Como su abundancia no se altera, el aumento de la pérdida de masa conlleva un aumento de las anchuras equivalentes de las líneas que se formen en el viento,

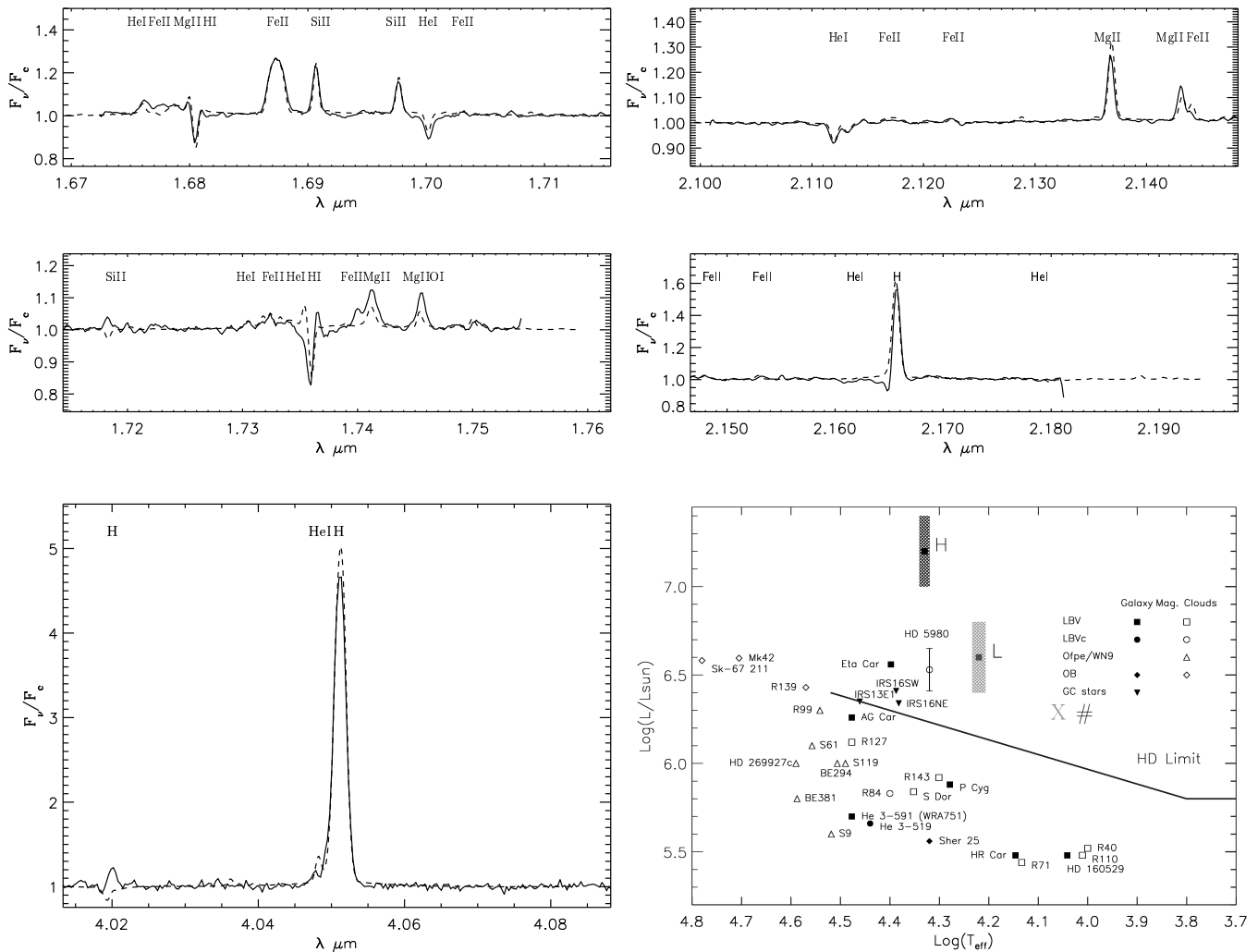


Figura 6 — Ajustes a observaciones infrarrojas de la LBV #362 en el cúmulo del “Quintuplet” con los nuevos modelos con blanketing. También mostramos la nueva posición en el diagrama H-R de la “Pistol Star” (X) y #362 (#). Los modelos H y L corresponden a los valores obtenidos por Figer et. al.(1998) para la “Pistol Star” a partir de modelos de H y He sin blanketing. Las correcciones en la temperatura son considerables (véase la discusión en el texto).

por lo que será necesario disminuir la abundancia metálica para compensar el incremento en  $\dot{M}$ . El valor de H/He a partir del cual será necesario escalar las abundancias metálicas vendrá determinado por la dependencia del escalado de  $\dot{M}$  en función de H/He y por la sensibilidad de las líneas metálicas a  $\dot{M}$ . Nuestro modelos indican que en el dominio de parámetros en el que se encuentran nuestros objetos, es necesario reducir las abundancias metálicas a partir de valores H/He en torno a 1–2 y menores.

Así, en el caso de la “Pistol Star” el límite superior que obtenemos para el Fe es de metalicidad solar (véanse los ajustes en la Fig. 5). Esta estimación es particularmente robusta ya que contamos con un alto número de líneas de FeII de diagnóstico. Es más, si suponemos que el objeto posee un enrique-

cimiento de He consistente con una fase evolutiva de LBV,  $H/He \geq 2$ , podemos concluir que la “Pistol Star” posee abundancia de Fe solar. La abundancia de Si se obtiene a partir de dos líneas de SiII en la banda H. Estas líneas son extremadamente sensibles a la temperatura efectiva de la estrella y a la zona de transición entre fotosfera y viento. Por tanto, nuestra abundancia derivada para el silicio,  $Si \approx 1.4 Si_{\odot}$  debería ser contemplada con cierta cautela.

El magnesio, por el contrario, proporciona un mayor número de líneas de diagnóstico a través del MgII tanto en la banda H como en la banda K. Nuestro análisis apunta a una abundancia en torno a  $Mg \approx 1.6 Mg_{\odot}$ . Este leve enriquecimiento de los elementos- $\alpha$  frente al Fe parece favorecer la situa-

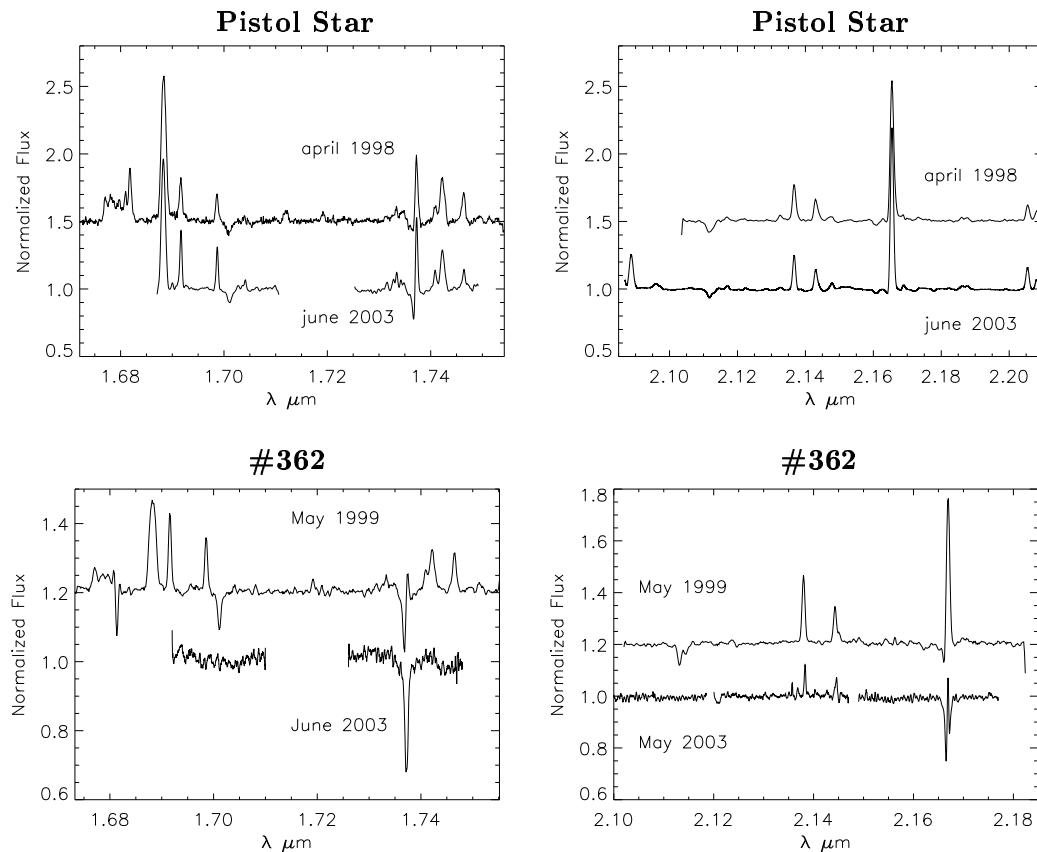


Figura 7 — Variabilidad de la “Pistol Star” y #362.

ción de una IMF dominada por estrellas masivas en el centro galáctico. Este resultado es de gran relevancia y necesita ser confirmado con el análisis de otras estrellas en el cúmulo. Finalmente, conviene resaltar que nuestro resultado de abundancia de Fe solar obtenido por un método directo, está de acuerdo con estimaciones obtenidas a partir de análisis diferenciales de estrellas frías en el centro galáctico (Carr et al. 2000; Ramirez et al. 2000).

La Fig. 6 muestra que la otra LBV del cúmulo, #362, es prácticamente una gemela de la “Pistol Star”. De hecho, nuestros modelos muestran el mismo tipo de degeneración en la relación H/He. Obtenemos, del mismo modo, una luminosidad en torno a  $1.7 \times 10^6 L_{\odot}$  y una temperatura efectiva sólo algo mas fría  $T_{\text{eff}} \sim 10500$  K. La masa inicial ( $\sim 120 M_{\odot}$ ) estimada para #362 es compatible, al igual que para el caso de la “Pistol Star”, con el límite superior de masas encontrado en el cúmulo del “Arches” (véase la sección del “Arches”). El análisis de las líneas de Fe proporciona una abundancia solar de Fe como límite superior, mientras que para los elementos- $\alpha$  obtenemos  $\text{Si} \approx 1.8 \text{ Si}_{\odot}$  y  $\text{Mg} \approx 2.2 \text{ Mg}_{\odot}$ . Este valor es consistente con el ligero enriquecimiento de elementos- $\alpha$  encontrado

también para la “Pistol Star”

### Variabilidad Espectroscópica

Una de las características principales de las LBVs es el cambio de su tipo espectral a través de sus excursiones al rojo en el diagrama H-R. La Fig. 7 muestra espectros en las bandas H y K obtenidos para la “Pistol Star” y #362 en dos épocas diferentes: 1998 (CGS4-UKIRT) y 2003 (NIRSPEC-KeckII). Los espectros obtenidos en 2003 con NIRSPEC-KeckII han sido degradados a la resolución de los espectros de 1998. La Fig. 7 muestra que mientras que la “Pistol Star” no presenta cambios apreciables en su apariencia espectroscópica, la estrella #362 muestra un cambio severo en su tipo espectral. Las líneas de He I y Si II se han desvanecido, las de Mg II se han debilitado enormemente y las líneas de hidrógeno de la serie de Bracket han pasado de emisión a absorción. Los datos de 2003 indican que la estrella ha comenzado una excursión hacia el rojo en el diagrama H-R, enfriándose un poco y expandiéndose de modo ostensible. Dicha expansión ha causado una reducción severa de la densidad del viento. Este resultado es, a su vez, consistente con los datos fotométricos (Figer, comunicación privada) que

muestran un incremento de la magnitud K de la estrella. El aspecto más relevante de los datos de 2003 viene dado por la posibilidad de, por primera vez en una LBV, obtener una estimación directa de la gravedad (masa) de la estrella a partir de las alas de las líneas de absorción de H (Najarro et al., en preparación).

### *El cúmulo del “Arches”*

El cúmulo del “Arches” (Figer et al. 1999b, 2002), asociado a los filamentos en forma de arco detectados en radio, es el cúmulo más joven y denso de los cúmulos del centro galáctico. Contiene miles de estrellas, incluyendo al menos 160 estrellas O y alrededor de 10 WNLs (estrellas WN que aún muestran presencia de hidrógeno en su superficie, Chiosi & Maeder 1986). El cúmulo es muy joven ( $\leq 2.5$  Maños), y las únicas estrellas con líneas de emisión presentes son del tipo WNLs y OIf<sup>+</sup>. Los espectros infrarrojos de estas estrellas están dominados por líneas de H, He I, He II y N III. Algunas muestran también líneas débiles de C III/IV. El cúmulo reúne todos los requerimientos para el estudio de la pendiente de la IMF a altas masas, así como para la estimación de la existencia de un posible límite superior en la masa que una estrella puede alcanzar. Estos requerimientos son:

- Se encuentra a una distancia lo suficientemente cercana para que se puedan resolver los miembros individuales.
- Hay una gran cantidad de masa en forma de estrellas.
- Es lo suficientemente joven para que no haya miembros en fase pre-supernova y lo suficientemente viejo para que las estrellas hayan emergido de sus nubes natales.

La Fig. 8 (tomada de Figer 2004) muestra la función de masas en el cúmulo del “Arches” extendida a masas muy altas según las medidas llevadas a cabo por Figer et al. (1999a). La pendiente de la IMF aparece más plana que la de Salpeter (que se muestra por comparación), favoreciendo la formación de estrellas muy masivas. Es importante notar que la Fig. 8 indica que deberíamos esperar la presencia de estrellas masivas de hasta 500-1000 masas solares y, sin embargo, no se detecta ninguna más allá de  $\sim 120 M_{\odot}$ . De este modo la Fig. 8

sugiere claramente la existencia de un límite superior de masas en torno a  $\sim 150 M_{\odot}$ .

### *Estudios de metalicidad: un nuevo y potente método*

La ausencia de estrellas del tipo B-supergigante tardío y LBVs en el cúmulo del “Arches”, debido a la juventud de éste, impide el uso de estos objetos para obtener estimaciones directas de la relación elementos- $\alpha$  vs. Fe, como hemos visto con anterioridad en el caso del “Quintuplet” o como se puede también llevar a cabo en el parsec central. Tratándose del cúmulo más joven del centro galáctico, cualquier pista sobre su metalicidad constituiría la “imagen de última hora” referente al enriquecimiento metálico de la región central de la Vía Láctea.

Para el análisis de las estrellas del cúmulo del “Arches” hemos incluido las siguientes especies en la composición de los modelos: H, He, C, N, O, Si, Fe y Ni. Las restricciones observacionales (Figer et al. 2002) están dadas por los espectros en la banda K (véase la Fig. 9), las medidas fotométricas de banda estrecha obtenidas con *HST*/NICMOS (filtros  $F_{F110W}$ ,  $F_{F160W}$  y  $F_{F205W}$ ) y la anchura equivalente de P $\alpha$  obtenida asimismo con NICMOS (filtros  $F_{F187N}$  y  $F_{F190N}$ ). La identificación de los objetos se ha hecho de acuerdo con la nomenclatura establecida Figer et al. (2002). A continuación, presentamos los resultados de nuestro análisis (Najarro et al. 2004).

Los espectros reducidos y los ajustes realizados con los modelos se muestran en la Fig. 9. Los tres espectros superiores corresponden a algunas de las estrellas más luminosas del cúmulo. De acuerdo a la descripción proporcionada en Figer et al. (2002), se trata de estrellas Wolf-Rayet ricas en nitrógeno con vientos muy densos y velocidades terminales moderadas. Los dos espectros inferiores en la Fig. 9 corresponden a estrellas ligeramente menos evolucionadas con características morfológicas correspondientes a estrellas OIf<sup>+</sup>. Las principales líneas de diagnóstico de H y He presentes en las porciones de la banda K observada (véase la figura 9) son: Br $\gamma$ , las líneas de He I a 2.058  $\mu\text{m}$ , 2.060  $\mu\text{m}$ , 2.112/3  $\mu\text{m}$ , 2.160-66  $\mu\text{m}$  y 2.181  $\mu\text{m}$  y las líneas de He II a 2.165  $\mu\text{m}$ , 2.189  $\mu\text{m}$ . Las principales líneas de carbono que pueden ser usadas para establecer límites superiores a la abundancia de este elemento son: C IV 2.070  $\mu\text{m}$  y C III 8-7 a 2.114  $\mu\text{m}$ . Es importante destacar las líneas de

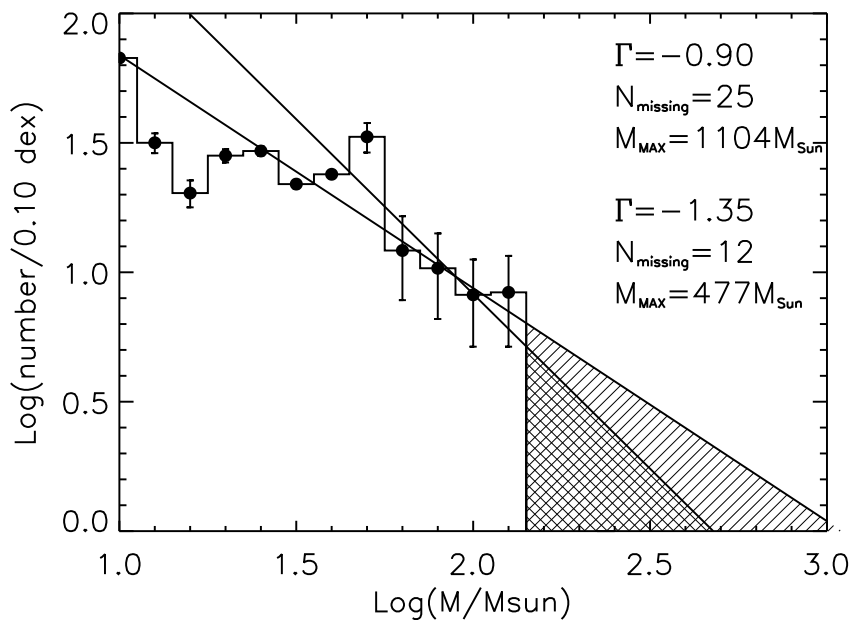


Figura 8 — Función de masas del cúmulo del “Arches” (Figer 2004). También se muestra la función de Salpeter (con mayor pendiente,  $\Gamma = -1.35$ ) para comparar. Las regiones sombreadas indican que deberíamos esperar la presencia de un número significativo de estrellas con masas excediendo  $120 M_{\odot}$ . El diagrama muestra pues la existencia de un límite superior de masas

N III 8-7 a  $2.103 \mu\text{m}$  y  $2.115 \mu\text{m}$  así como el doblete de N III  $5p^2P-5s^2S$  a  $2.247 \mu\text{m}$  y  $2.251 \mu\text{m}$ . Figer et al. (1997) mostraron que estas líneas de N III aparecen en emisión sólo para un rango estrecho de temperaturas y densidades, que tiene lugar en la fase evolutiva WN9h (WNL). La diferente naturaleza de las energías de los multipletes responsables de estas líneas de N III proporciona unas restricciones muy fuertes de cara a la determinación de la abundancia de nitrógeno. Así, nuestros modelos indican que, dada la relación señal ruido de las observaciones, podemos trazar fácilmente cambios relativos del orden del 20% en la abundancia de nitrógeno, por lo que un error del 30% puede ser considerado como una estimación segura como muestra la Fig. 10 (izquierda).

La Tabla 1 muestra los parámetros estelares obtenidos para las estrellas WNL (objetos #3, #4 y #8), junto con los derivados para dos estrellas de tipo espectral OIf<sup>+</sup> (#10 y #15) en el cúmulo. Cabe destacar la extremada sensibilidad de los perfiles de He I y He II en esta zona del dominio de parámetros a pequeños cambios en la temperatura efectiva de las estrellas. Estimamos que los errores en la temperatura quedan por debajo de los 1000 K. En nuestro análisis, usamos la intensidad relativa entre las líneas de H y He I para derivar la relación He/H en todos los objetos, mientras que

la intensidad absoluta de dichas líneas proporciona una estimación de la pérdida de masa,  $\dot{M}$ . Los parámetros estelares presentados en la Tabla 1 ( $\dot{M}$ , abundancia de He y N) reflejan la clara diferencia en morfología entre los espectros observados de las estrellas WNL y OIf<sup>+</sup>. Quizá el resultado más relevante obtenido de nuestro análisis sea la fracción de abundancia de nitrógeno,  $Z(\text{N})$ , en la superficie de las estrellas WNL. Los tres objetos presentan una abundancia en torno al  $\sim 1.6\%$ , muy por encima del límite superior obtenido para las estrellas OIf<sup>+</sup> ( $\sim 0.6\%$ ). Las estrellas de tipo WNL no exhiben ninguna línea primaria de diagnóstico en la banda K para estimar su metalicidad. Sin embargo, haciendo uso de los modelos de evolución de estrellas masivas, podemos anticipar el valor crucial de  $Z(\text{N})$  en la determinación de la metalicidad en las estrellas WNL.

Según los modelos evolutivos de Schaller et al. (1992) y Charbonnel et al. (1993), al entrar en la fase evolutiva WNL, la estrella presenta todavía importantes trazas de H en su superficie junto con un fuerte enriquecimiento de helio y nitrógeno y una fuerte reducción de carbono y oxígeno (consistente con material CNO procesado). Es más, una vez que la estrella masiva alcanza esta fase evolutiva, mantiene un valor de  $Z(\text{N})$  prácticamente constante durante toda la fase y este valor depen-

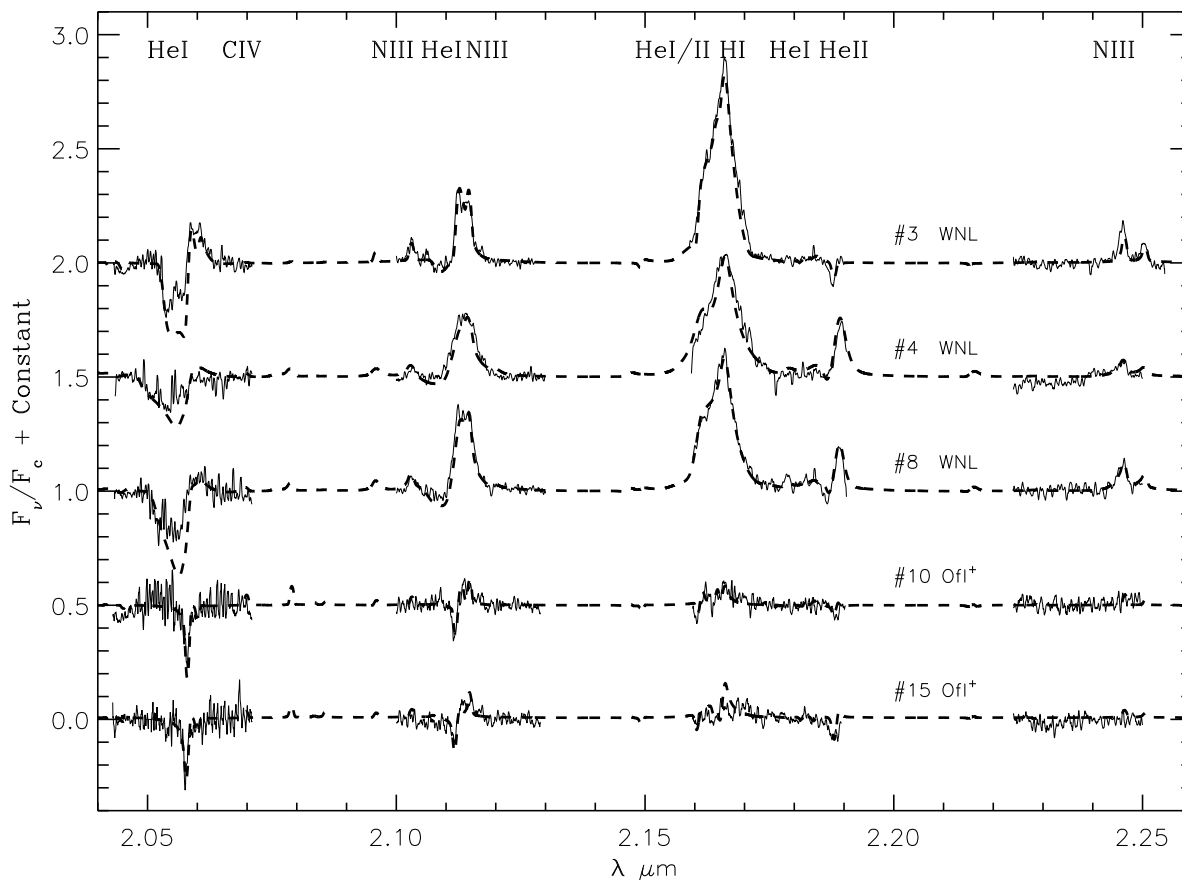


Figura 9 — Observaciones espectroscópicas (línea continua) y ajustes de modelos (línea quebrada) de tres estrellas WNLs y dos estrellas Off<sup>+</sup> en el cúmulo del “Arches”.

de exclusivamente de modo lineal de la metalicidad (véase la gráfica de la derecha en la Fig. 10). En realidad, el valor máximo de  $Z(N)$  en la fase WNL queda fijado por el contenido inicial de CNO (suma de las fracciones de masa de C, N y O) presentes en la nube natal. Si como cabe esperar, la abundancia de CNO en la nube natal se escala con la del resto de metales, los valores de  $Z(N)$  en la fase WNL trazarán la metalicidad del cúmulo. Es más, este valor no estará prácticamente afectado por la pérdida de masa adoptada o la presencia de rotación estelar durante la evolución (Meynet et al. 2004). De este modo, una vez que hayamos identificado claramente una estrella en la fase evolutiva WNL, podremos llevar a cabo estudios espectroscópicos y usar la fracción de abundancia en la superficie de N para estimar la metalicidad. La relación He/H, el bajo límite superior obtenido para la muy reducida abundancia de carbono y los valores de  $T_{\text{eff}}$  y  $\dot{M}$  indican que los objetos #3, #4 y #8 se encuentran en dicha fase evolutiva. El valor de  $Z(N)$  derivado ( $\sim 1.6\%$ ) es el esperado

para metalicidad solar, según los modelos evolutivos. Debido al comportamiento lineal de  $Z(N)$  con la metalicidad, podemos hacer uso de las incertidumbres en la determinación de la abundancia de N y así obtener un error de aproximadamente un 30% en la estimación de la metalicidad (véase la Fig. 10, panel izquierdo). La fiabilidad de nuestro método queda demostrada en la Fig. 10 (derecha), donde mostramos la fracción superficial de masa de nitrógeno en función del tiempo para estrellas con masas iniciales de 60, 85, y 120  $M_{\odot}$ , y metalicidades equivalentes a 2, 1, y 0.4 veces solar, adoptando las pérdidas de masa canónicas (Schaller et al. 1992). La región sombreada representa el valor derivado de  $Z(N)$  con los modelos para las estrellas WNL incluyendo el error arriba señalado ( $\pm 30\%$ ).

Con el fin de probar la validez de nuestro nuevo método para estimar la metalicidad basado en la abundancia de N, podemos comparar nuestros resultados con estimaciones previas de abundancia para este tipo de estrellas en regiones de diferente

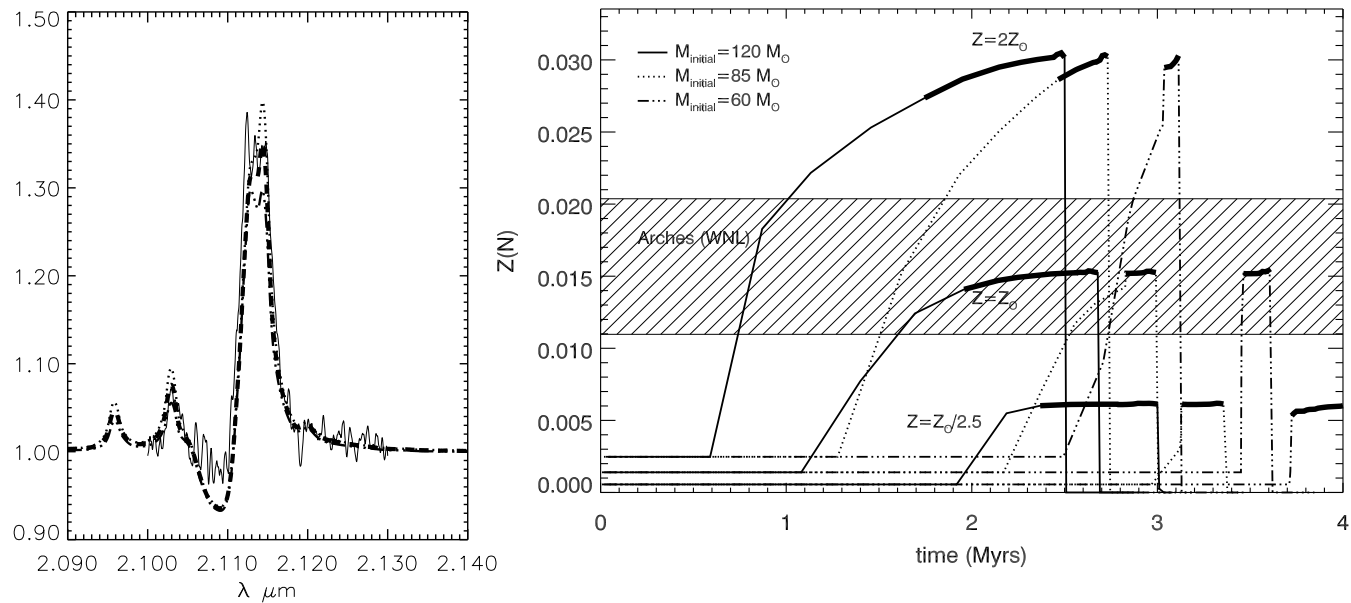


Figura 10 — **Izquierda:** Nivel de estimación de error en la abundancia de N. Se muestran las observaciones (continua) en la región 2.10-2.13  $\mu\text{m}$  junto con el mejor modelo (quebrada) y otros dos modelos en los que la abundancia de N se ha variado en  $\pm 30\%$ . **Derecha:** abundancia de nitrógeno (fracción de masa en la superficie) en función del tiempo usando los modelos de Ginebra. Las observaciones son consistentes con metalicidad solar y una edad de 2-2.5 Maños. Ver discusión en el texto.

metalicidad. De hecho, Crowther (2000) encontró que la abundancia superficial de N alcanzada durante la fase WNL en la pequeña nube de Magallanes (0.3%) reproducía satisfactoriamente el espectro observado de Sk-41. Es más, Crowther et al. (1995) encontraron abundancias superficiales correspondientes a metalicidad solar en su análisis óptico de estrellas WNL galácticas.

Otro resultado relevante de la Fig. 10 y la Tabla 1 es la coherente estimación de las masas y edades de estos objetos. Las luminosidades de #4 y #8 son consistentes con masas iniciales de  $\sim 120 M_{\odot}$  para las estrellas WNL, mientras que la luminosidad de #15 parece ser consistente con masas en torno a 70–90  $M_{\odot}$  para las estrellas de tipo OIf<sup>+</sup>. Si adoptamos estas masas, misma abundancia inicial y formación coetánea del cúmulo, encontramos que tanto las WNL como las estrellas O encajan perfectamente en un cúmulo de metalicidad solar con una edad de 2-2.5 Maños (véase también Najarro et al. 2004).

Finalmente, cabe señalar que nuestra estimación de metalicidad solar para los cúmulos del “Arches” y “Quintuplet” parece no seguir la tendencia del gradiente encontrado en el disco galáctico (Rolleston et al. 2000; Smartt et al. 2001), pero es consistente con los resultados obtenidos a partir de las estrellas frías (Carr et al. 2000; Ramirez et al. 2000).

Este hecho puede implicar que el medio interestelar (ISM) del disco no se extiende interiormente hasta el centro galáctico, o que las estrellas del CG se han formado a partir de un ISM que posee una historia de enriquecimiento metálico diferente del disco. Nuestros resultados, por otro lado, parecen más consistentes con los valores obtenidos para el bulbo (Frogel et al. 1999; Felzing et al. 2000).

### *Mirando al futuro : descubriendo el iceberg*

Los estudios de los tres cúmulos en el centro galáctico han revelado la importancia de la espectroscopía cuantitativa en el infrarrojo para poder caracterizar con detalle las zonas de nuestra Galaxia oscurecidas en el ultravioleta y óptico. La cuestión relevante ahora es si nos encontramos ante un descubrimiento aislado o si, por lo contrario, nos hemos topado con la punta del iceberg. La intuición parece preferir la segunda posibilidad. En cuanto se dispuso de instrumentación infrarroja adecuada, la comunidad científica se miró al ombligo, en este caso el ombligo de la Galaxia, y aparecieron estos tres cúmulos. Sería pues esperable encontrarnos ante un “boom” de detección de cúmulos de estrellas masivas en nuestra galaxia. En los últimos años se han llevado a cabo



Tabla 1 — *Estrellas WNL y Oif<sup>+</sup> en el cúmulo del “Arches”. Identificaciones de los objetos según Figer et al. (2002). Límites superiores están indicados como (:). He/H es en número y el resto de abundancias son fracciones en masa.  $\eta = \dot{M}v_{\infty}/(L_*/c)$ , es el performance number y  $Q$  es la tasa de fotones ionizantes en fotones/s. Datos de Najarro et al. (2004).*

Parámetro	Objeto “Arches”				
	#3	#4	#8	#10	#15
$R_*(R_{\odot})$	43.5	39	48	48	29
$L_*(10^5 L_{\odot})$	10.3	16.5	18.5	18.5	5.85
$T_{\text{eff}}(10^4 \text{K})$	2.79	3.32	3.09	3.07	2.95
He/H	0.50	0.57	0.67	0.33	0.33
Z(He)	0.65	0.68	0.71	0.56	0.56
Z(N)	1.7	1.4	1.6	0.6:	0.6:
Z(C)	0.02:	0.03:	0.02:	0.08:	0.15:
$\dot{M}(10^{-6} M_{\odot} \text{ yr}^{-1})$	21.5	32.5	45.0	4.3	9.11
$v_{\infty}(\text{km s}^{-1})$	840	1400	1100	1000:	1000:
Clumping factor f	0.1	0.15	0.08	0.1	0.1
$\eta = \dot{M}v_{\infty}/(L_*/c)$	0.72	1.35	1.32	0.11	0.75
$\text{Log}Q_{H^+}$	49.4	49.9	49.9	49.8	49.2
$\text{Log}Q_{He^+}$	47.3	48.6	48.5	48.4	47.3

importantes estudios tanto desde el punto de vista del análisis individual como sistemático. Dentro del primer grupo, cabe destacar los estudios infrarrojos en CygOB2 (Comerón et al. 2002) y Westerlund-1 (Clark, Negueruela, et al. en prep.; Negueruela et al., en prep.) que sitúan estos cúmulos como serios candidatos a “Supercúmulos” en nuestra galaxia. Dentro de los estudios sistemáticos, usando el *survey* de 2MASS, Bica et al. (2003) identificaron 167 candidatos a cúmulos estelares en el IR sólo en el hemisferio norte y zona ecuatorial de la Vía Láctea. Es obvio que el espectrógrafo multiobjeto EMIR para el GTC, precedido con un importante trabajo de selección por parte de LIRIS en el WHT, ofrecerá la oportunidad de estudiar en detalle la población de gran parte de estos cúmulos y así abordar cuestiones esenciales como cuáles son las estrellas más masivas que podemos formar, la universalidad (¿Salpeter?) de la IMF, abundancias químicas en diferentes regiones galácticas e implicaciones en los modelos de evolución galáctica, mecanismos de formación estelar: acreción vs. fusión, propiedades de los vientos estelares en función de la metalicidad, flujos ionizantes o la aparición de nuevos “monstruos” tipo “Pistol Star” en nuestra galaxia.

### Agradecimientos

Agradezco a Don Figer, John Hillier, Rolf Kudritzki, Tom Geballe, Reinhard Genzel, Andreas Eckart, Dieter Lutz y Alfred Krabbe por la enriquecedora colaboración en el campo de estrellas masivas en el centro galáctico. Muchas gracias también a Jesús Martín-Pintado y Artemio Herrero por sus comentarios sobre el manuscrito. F. N. agradece la financiación de los proyectos AYA2004-08271-C02-02, PNAYA-2003-02785-E y ESP2002-01627, y el programa Ramón y Cajal.

### Referencias

- Allen, D.A., Hyland, A.R., Hillier, D.J., 1990, MN-RAS, 244, 706  
 Bahcall, J.N., Tremaine, S. 1981, ApJ, 244,805  
 Bica, E., Dutra, C. M., Soares, J., & Barbuy, B. 2003, A&A, 404, 223  
 Blum, R.D, Ramond, T.M., Conti, P.S., Figer, D.F., & Sellgren, K., 1997, AJ, 113, 1855  
 Blum, R. D., Ramírez, S. V., Sellgren, K., & Olsen, K., 2003, ApJ, 597, 323  
 Carr, J.S., Sellgren, K., & Balachandran, S.C., 2000, ApJ, 530, 307  
 Charbonnel, C., Meynet, G., Maeder, A., Schaller, G., & Schaerer, D. 1993, A&As, 101, 415

- Chiosi, C. & Maeder, A. 1986, *Annual Review of A&A*, 24, 329
- Comerón, F., et al. 2002, *A&A*, 389, 874
- Crowther P. A. 2000, *A&A*, 356, 191
- Crowther, P. A., Hillier, D. J., & Smith, L. J. 1995, *A&A*, 293, 403
- Eckart, A., Genzel, R., Hofmann, R., Sams, B.J., Tacconi-Garman, L.E., 1993, *ApJ* 407, L77
- Eckart, A. & Genzel, R., 1996, *Nature*, 383, 415
- Eckart, A. & Genzel, R. 1999, *Journal of Astrophysics and Astronomy*, 20, 187
- Feltzing, S., & Gilmore, G. 2000, *A&A*, 355, 949
- Figer, D.F., McLean, I.S., & Najarro, F., 1997, *ApJ*, 486, 420
- Figer, D. F., Najarro, F., Morris, M., McLean, I. S., Geballe, T. R., Ghez, A. M., & Langer, N. 1998, *ApJ*, 506, 384
- Figer, D.F., McLean, I.S., & Morris, M., 1999a, *ApJ*, 514, 202
- Figer, D.F., Kim, S.S., Morris, M., Serabyn, E., Rich, R.M., & McLean, I.S., 1999b, *ApJ*, 525, 750
- Figer, D.F., Najarro, F., Gilmore, D., Morris, M., Kim, S.S., et al., 2002, *ApJ*, 581, 258
- Figer, D. F., & Morris, M. 2002, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 285, 381
- Figer, D.F., 2003, en *proceedings of IAU Symp*, 212, Eds. K.A. van der Hucht, A. Herrero & C. Esteban, p. 487
- Figer, D.F., 2004, en *proceedings of "IMF@50"*
- Figer, D. F., Rich, R. M., Kim, S. S., Morris, M., & Serabyn, E., 2004, *ApJ*, 601, 319
- Forrest, W.J., Shure, M.A., Pipher, J.L., Woodward, C.A., 1987, in "The Galactic Center", AIP-CP, 155,153
- Frogel, J.A., Tiede, G.P., & Kuchinski, L.E. 1999, *AJ*, 117, 2296
- Glass, I. S., Catchpole, R. M., & Whitelock, P. A. 1987, *MNRAS*, 227, 373
- Geballe, T.R., Krisciunas, K., Lee, T.J., Gatley, I., Wade, R., Duncan, W.D., Garden, R., Becklin, E.E., 1984, *ApJ*, 284, 118
- Geballe, T.R., Najarro, F., & Figer, D.F., 2000, *ApJ*, 530, L97
- Genzel, R., Eckart, A., Ott, T., & Eisenhauer, F. 1997, *MNRAS*, 291, 219
- Genzel, R., Thatte, N., Krabbe, A., Kroker, H., & Tacconi-Garman, L. E. 1996, *ApJ*, 472, 153
- Hanson, M.M., Conti, P.S., & Rieke, M.J., 1996, *ApJSS*, 107, 281
- Hillier, D.J., & Miller, D.L., 1998, *ApJ*, 496, 407
- Hillier, D.J., & Miller, D.L., 1999, *ApJ*, 519, 534
- Hillier, D.J., Crowther, P.A., Najarro, F., Fullerton, A.W., 1998, *A&A*, 340, 483
- Krabbe, A., Genzel, R., Drapatz, S., & Rotaciuc, V., 1991, *ApJ*, 382, L19
- Krabbe, A., Genzel, R., Eckart, A., Najarro, F., Lutz, D., Cameron, M., Kroker, H., Tacconi-Garman, L. E., Thatte, N., Weitzel, L., Drapatz, S., Geballe, T., Sternberg, A., Kudritzki, R., 1995, *ApJL*, 447, L95
- Maeda, Y., et. al., 2002, *ApJ*, 570, 671
- Martín-Pintado, J., Gaume, R. A., Rodríguez-Fernández, N., de Vicente, P., & Wilson, T. L., 1999, *ApJ*, 519, 667
- Martín-Pintado, J., Rizzo, J. R., de Vicente, P., Rodríguez-Fernández, N. J., & Fuente, A., 2001, *ApJL*, 548, L65
- Meynet, G., Maeder, A., Schaller, G., Schaerer, D., & Charbonnel, C. 1994, *A&A Supp.*, 103, 97
- Meynet, G., & Maeder, A., 2004, *A&A*, 404, 975
- Meynet, G., & Maeder, A., 2005, *A&A*, (in press)
- Morris, M., 1993, *ApJ*, 408, 496
- Morris, M. & Serabyn, E., 1996, *ARA&A*, 34, 645
- Morris, P.W., Eenens, P.R.J., Hanson, M.M., Conti, P.S., & Blum, R.D, 1996, *ApJ*, 470, 597
- Najarro, F., Hillier, D.J., Kudritzki, R.P., Krabbe, A., Genzel, R., Lutz, D., Drapatz, S., & Geballe, T.R., 1994, *A&A*, 285, 573
- Najarro, F., Krabbe, A., Genzel, R., Lutz, D., Kudritzki, R.P., & Hillier, D.J., 1997, *A&A*, 325, 700
- Najarro, F., Figer, D.F., Hillier, D.J., Kudritzki, R.P., 2004, *ApJ*, 611, L108
- Ott, T., Eckart, A., & Genzel, R. 1999, *ApJ*, 523, 248
- Paumard, T., Maillard, J.P., Morris, M., Rigaut, F., 2001, *A&A*, 366, 466
- Ramirez, S.V., Sellgren, K., Carr, J.S., Balachandran, S.C., Blum, R., Terndrup, D.M., & Steed, A., 2000, *ApJ*, 537, 205
- Rieke, G.H., Lebofsky, M.J., 1982, in "The Galactic Center", AIP-CP 155, 194
- Rolleston, W.R., Smartt, S.J., Dufton, P.L., & Ryans, R.S.I., 2000, *A&A*, 363, 537
- Rodríguez-Fernández, N. J., Martín-Pintado, J., & de Vicente, P. 2001, *A&A*, 377, 631

Schaller, G., Schaerer, D., Meynet, G., & Maeder, A., 1992, A&A, 96, 269

Schödel, R., Ott, T., Genzel, R., Eckart, A., Mouawad, N., & Alexander, T. 2003, ApJ, 596, 1015

Shields, J.C., & Ferland, G.J., 1994, ApJ, 430, 236

Smartt, S.J., Venn, K.A., Dufton, P.L., Lennon,

D.J., Rolleston, W.R., & Keenan, F.P., 2001, A&A, 367, 86

*Francisco Najarro de la Parra es investigador del Instituto de Estructura de la Materia, CSIC.*

# ESTUDIO NUMÉRICO DE LA DINÁMICA DEL PROCESO DE FILAMENTACIÓN AMBIPOLAR EN UN PLASMA MAGNETIZADO

Mercedes Franqueira Pérez

merche.fr@terra.es

Tesis doctoral dirigida por Ana I. Gómez de Castro (UCM) y Michel Tagger (CEA Saclay)

Centro: Facultad de Ciencias Matemáticas, Universidad Complutense de Madrid

Fecha de lectura: 18 de noviembre de 2003

El proceso de *filamentación ambipolar* del campo magnético es el proceso por el cual la disipación de turbulencia hidromagnética en plasmas magnetizados con distribuciones espaciales no homogéneas de la fracción de ionización conduce a:

- la compresión de las líneas de campo y la formación de filamentos en las zonas más ionizadas inicialmente,
- la separación eficiente de las partículas neutras e ionizadas.

El propósito principal de esta tesis consiste en realizar un estudio de la dinámica del proceso de filamentación ambipolar mediante simulaciones numéricas. Hasta la fecha tan sólo se había realizado un estudio analítico unidimensional del proceso. Sin embargo, de forma simultánea a la filamentación ambipolar, se produce también una transmisión de cantidad de movimiento en la dirección de propagación de la perturbación hidromagnética al gas a través del cual se propaga, con lo que ambos procesos entran en competición en lo que a transporte de material se refiere. Por tanto, la característica que nos interesa cuantificar, principalmente, es la *eficiencia real* del proceso de filamentación, así como los parámetros físicos de los que ella depende. De este modo podremos evaluar el impacto que este fenómeno tiene en los diferentes medios en los que podría estar produciéndose.

En primer lugar hemos revisado los resultados teóricos existentes hasta el momento con objeto de cuantificar la relación entre la fuerza que genera la filamentación ambipolar y la fuerza que impulsa al material en la dirección de propagación de la perturbación. Dicha relación prevé que el mecanismo de filamentación ambipolar será más eficaz en medios relativamente fríos y fuertemente magnetizados, que presenten inhomogeneidades en la fracción de ionización de un tamaño que sea de

unas pocas veces la longitud ambipolar del medio (longitud del recorrido libre medio de las partículas neutras).

Para determinar la eficiencia real del proceso de filamentación ambipolar hemos resuelto numéricamente el sistema de ecuaciones en derivadas parciales no lineales que gobierna la dinámica de un plasma magnetizado que consta de dos fluidos (iones y partículas neutras). El código numérico construido a tal fin resuelve el problema bidimensional cartesiano utilizando el método de diferencias finitas explícito en el tiempo para todos los términos salvo el correspondiente a la interacción entre iones y partículas neutras, en una malla de las denominadas escalonadas o alternadas. Resuelve el sistema de ecuaciones en diferencias utilizando el método de separación de operadores e introduciendo los correspondientes términos de viscosidad artificial. Los algoritmos que hemos utilizado están basados en los empleados por Stone y Norman (1992) en su código hidrodinámico ZEUS-2D, para todos los casos salvo el tratamiento de los términos magnéticos y el transporte de los momentos lineales. El código y la convergencia de las soluciones calculadas fueron probados mediante la resolución de problemas con solución conocida.

Seguidamente, el código numérico fue adaptado al problema de la filamentación ambipolar mediante el estudio de las condiciones numéricas que limitan el espacio de parámetros y de las características físicas del proceso, que es necesario introducir en las condiciones iniciales y de contorno. El efecto de la filamentación se aisló de cualquier otro que pudiera enmascararlo prohibiendo la entrada de material en el dominio de integración. Con estas *restricciones*, el mecanismo resulta ser eficiente, apreciándose una amplificación (un factor 2.5) de la inhomogeneidad inicial en la fracción de ionización, localizada en la zona en que la onda hidromagnética comienza a amortiguarse. Sin embargo,

dichos resultados no reproducen la esperada intensificación del campo magnético salvo de un modo meramente residual. Esto es debido a la *difusión del campo magnético* causada por la resistividad numérica que el método numérico utilizado introduce en el sistema.

Por último, se realizaron simulaciones *sin restricciones* y con parámetros realistas, que describen la evolución del proceso de filamentación en dos medios de características similares, en los que se dan las condiciones necesarias para que el proceso tenga lugar: la cromosfera solar, donde podría dar lugar a estructuras tales como las espículas, y en la componente templada e ionizada del medio interestelar difuso, donde se han observado filamentos cuyo origen parece estar relacionado con la disipación de turbulencia hidromagnética. En ambos

casos (con ciertas limitaciones numéricas provocadas por la débil amortiguación de las ondas de alta frecuencia en estos medios) hemos obtenido que el contraste en la fracción de ionización aumenta entre un 25% y un 70%, aunque dicho incremento no se produce únicamente en la zona en que la onda comienza a amortiguarse. Este comportamiento es debido a la aceleración y transporte del material en la dirección de propagación de la onda. El proceso de filamentación ambipolar provoca además una separación espacial entre partículas neutras e ionizadas, por lo que el material es transportado de forma desigual en la dirección de propagación. Esto es debido al régimen de velocidades que se crea en esa dirección: las velocidades son mayores en las zonas más ionizadas, por lo que se favorece el transporte de iones frente al de partículas neutras.

## EMISIÓN DE RAYOS X DE NOVAS CLÁSICAS

Glòria Sala Cladellas

sala@ieec.uab.es

**Tesis doctoral dirigida por** Margarita Hernanz Carbó

**Centro:** Institut d'Estudis Espacials de Catalunya e Instituto de Ciencias del Espacio (CSIC)

**Fecha de lectura:** 22 de septiembre de 2004 (Universitat de Barcelona)

La detección de emisión de rayos X procedente de las novae clásicas después de su explosión proporciona información crucial sobre el fenómeno de nova. Las propiedades y la duración de la emisión de rayos X blandos son indicadores directos de la capa de combustión termonuclear de hidrógeno remanente en la superficie de la enana blanca, mientras que la emisión de rayos X duros representa un diagnóstico de las condiciones en el material eyectado por la nova y puede indicar el restablecimiento del acrecimiento en el sistema binario. *ROSAT* detectó muy pocas novae con emisión de rayos X blandos, contrariamente a lo esperado en base a cálculos de orden de magnitud del tiempo nuclear de combustión del hidrógeno remanente.

En esta tesis, se ha desarrollado un modelo numérico para simular las condiciones en la envoltura de la enana blanca, que permanece con combustión estacionaria de hidrógeno después de la explosión de nova. Se han considerado cinco composiciones químicas, correspondientes a abundancias realistas de novae de CO y de ONe basadas en los modelos de José & Hernanz (1998, ApJ, 494, 680). La evolución se aproxima como una secuencia de es-

tados estacionarios con masas decrecientes. Los resultados muestran que una envoltura de enana blanca con combustión estacionaria de hidrógeno evoluciona a lo largo de un *plateau* de luminosidad casi constante y próxima a la luminosidad de Eddington para la enana blanca, reduciendo su radio fotosférico e incrementando la temperatura efectiva a medida que la masa de la envoltura rica en hidrógeno se ve reducida por la combustión termonuclear. La luminosidad y la masa de la envoltura durante esta fase dependen de la masa de la estrella y la abundancia de hidrógeno en la envoltura como

$$L(L_{\odot}) \simeq 5.95 \times 10^4 \left( \frac{M_c}{M_{\odot}} - 0.536X_H - 0.14 \right),$$

$$\log M_{\text{env}}(M_{\odot}) \simeq 0.42X_H - \left( \frac{M_c}{M_{\odot}} - 0.13 \right)^3 - 5.26.$$

Las reacciones termonucleares continúan hasta que la masa de la envoltura se ve reducida a un valor mínimo crítico,

$$\log M_{\text{env}}^{\text{min}}(M_{\odot}) \simeq 0.13X_H - \left( \frac{M_c}{M_{\odot}} - 0.13 \right)^3 - 5.26,$$

por debajo del cual no existe una solución estable para la envoltura con combustión estacionaria. En este momento de la evolución, que coincide aproximadamente con el máximo de temperatura efectiva, cesa la combustión termonuclear y la estrella se empieza a enfriar. Con los valores típicos encontrados para la luminosidad ( $\sim 4 \times 10^4 L_{\odot}$ ) y la masa de la envoltura ( $\sim 10^{-6} M_{\odot}$ ) para soluciones estables con combustión estacionaria de hidrógeno, la escala de tiempo nuclear durante el cual durará esta fase en las novae post-explosivas es de solamente unos meses o pocos años, explicando la no detección de emisión de rayos X blandos en la mayoría de las novae observadas por *ROSAT*.

Los resultados de los modelos de envoltura de enana blanca se han comparado con observaciones en rayos X de novae después de la explosión. En concreto, se han comparado los resultados teóricos con las observaciones realizadas por *ROSAT* de las tres novae que detectó dicho satélite con emisión de rayos X blandos: V1974 Cyg (Nova Cygni 1992), GQ Mus (Nova Muscae 1983) y Nova LMC 1995. A partir de esta comparación se obtienen límites para los valores de la masa de la enana blanca, la masa de la envoltura, y la abundancia de hidrógeno en la envoltura. El caso que permite un estudio más detallado es V1974 Cyg, observada por *ROSAT* en 16 ocasiones durante los dos años siguientes a la explosión. La evolución de los parámetros espectrales de la emisión de rayos X blandos de V1974 Cyg es compatible con la evolución indicada por los modelos de envoltura.

Sin embargo, el número de observaciones de novae realizadas por *ROSAT* es limitado. Con el fin de ampliar el número de observaciones en rayos X de novae después de la explosión, y con el principal objetivo de determinar las propiedades y la duración de la fase de combustión estacionaria de hidrógeno, se han realizado observaciones con el satélite europeo *XMM-Newton* de cinco novae galácticas (Nova Sco 1997, Nova Sco 1998, Nova Sgr 1998, Nova Oph 1998, Nova Mus 1998) entre dos y cuatro años después de la explosión. Cada fuente ha sido observada en tres ocasiones, con una observación cada seis meses. Cuatro de las cinco novae han sido detectadas por las cámaras EPIC a bordo de *XMM-Newton*, siendo las novae Sgr 1998 y Oph 1998 las fuentes más intensas. En los dos casos, el espectro de rayos X blandos indica que la combustión termonuclear en la envoltura de la enana blanca ya ha cesado. Los resultados más relevantes corresponden a la Nova Oph 1998 (V2487 Oph), para la que se ha detectado que el acrecimiento se ha restablecido en el sistema binario menos de 1000 días después de la explosión (Hernanz & Sala, 2002, *Sci*, 298, 393). Además, fue la primera nova detectada en rayos X también antes de la explosión, durante el *All Sky Survey* realizado por el satélite *ROSAT* en 1990. En el momento del descubrimiento de la nova ya se constató que la posición de ésta se encontraba dentro de la caja de error de *ROSAT*, pero con *XMM-Newton* hemos confirmado que la fuente detectada en 1990 y la Nova Oph 1998 son la misma fuente.

## THERMAL X-RAY EMISSION FROM YOUNG TYPE IA

### SUPERNOVA REMNANTS

Carles Badenes Montoliu

badenes@physics.rutgers.edu

Tesis doctoral dirigida por Eduardo Bravo Guil

Centro: Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) e Institut d'Estudis Espacials de Catalunya (IEEC)

Fecha de lectura: 17 de julio de 2004

En esta tesis se estudia la relación entre las supernovas (SN) de Tipo Ia y la emisión en rayos X de los remanentes de supernova (SNR) jóvenes (con edades desde unos pocos centenares hasta varios miles de años) originados en explosiones de este tipo. El objetivo es utilizar las observaciones de SNRs con alta resolución espacial y espectral dis-

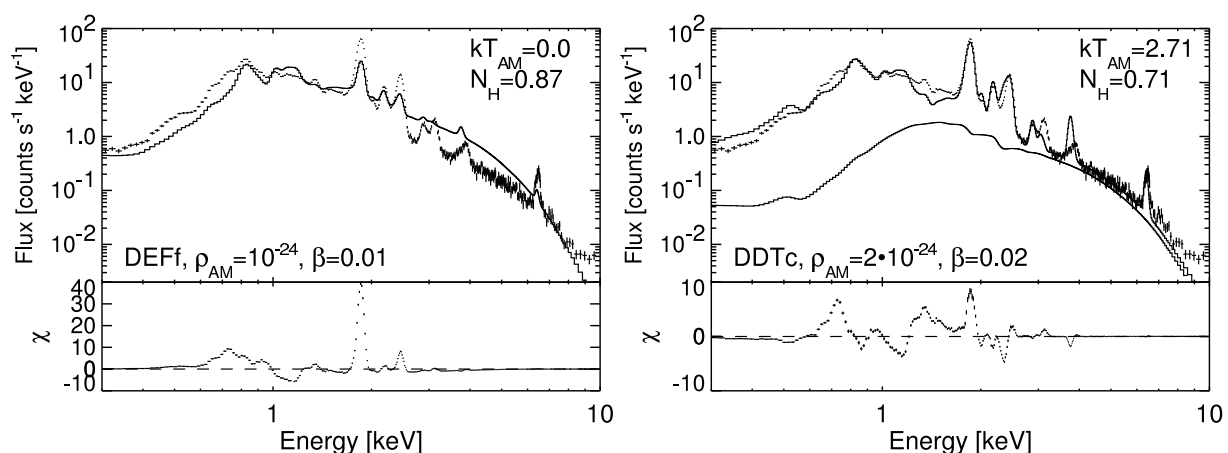
ponibles gracias a los observatorios *XMM-Newton* y *Chandra* para determinar los detalles de la física de estas explosiones. Actualmente, varios modelos o paradigmas de explosión son capaces de reproducir de forma aproximada las curvas de luz y espectros ópticos de las supernovas de Tipo Ia. La estructura (perfil de densidad y composición

química) del material expulsado por la supernova varía según la propagación del frente de combustión a través de la enana blanca, sea subsónica, supersónica o una combinación de ambas, resultando en explosiones de tipo deflagración, detonación retardada, detonación retardada pulsante o sub-Chandrasekhar.

Por otra parte, los remanentes de supernova se encuentran entre las fuentes difusas de rayos X más brillantes del cielo, y en muchos de ellos las líneas de emisión provenientes del material rico en metales expulsado por la supernova dominan el espectro (en la figura puede verse un ejemplo). Este hecho proporciona una oportunidad para estudiar la nucleosíntesis asociada con la supernova, siempre que se disponga de las herramientas adecuadas para extraer los parámetros físicos relevantes del SNR, a partir de las observaciones. Los modelos espectrales convencionales utilizados en el análisis de la mayoría de observaciones en la banda X no son adecuados para los SNRs jóvenes, porque contienen simplificaciones fundamentales (choques de geometría plana, plasmas de composición homogénea, etc.), que no son válidas en este caso. El plasma de los SNRs es calentado de forma prácticamente instantánea por las ondas de choque que se producen en el SNR, pero la baja densidad (comparable a la del medio interestelar) del material hace que la ionización de los metales se produzca lentamente, en escalas de tiempo comparables a la edad del SNR. Debido a esto, la emisión térmica en la banda X está íntimamente ligada a

los detalles de la estructura interna, composición e ionización del plasma. Para tratar este problema de forma autoconsistente, es necesario calcular la evolución hidrodinámica del SNR, así como la evolución temporal de la ionización del plasma y la emisión de rayos X asociada. Estos procesos vienen determinados fundamentalmente por el perfil de densidad y composición del material expulsado por la supernova y por la estructura del medio ambiente que rodea al sistema progenitor en el momento de la explosión.

Partiendo de varios ejemplos de cada uno de los paradigmas de explosiones de Tipo Ia, que se consideran viables en la actualidad, se ha elaborado una biblioteca de modelos de emisión X en SNRs jóvenes. La comparación de estos modelos con las observaciones elimina muchas de las ambigüedades inherentes al análisis espectral de SNRs basado en herramientas más simplificadas, y permite establecer una conexión directa entre el espectro X del SNR y la estructura del material expulsado por la supernova. Esta biblioteca de modelos se ha comparado con el espectro del remanente de la supernova de Tycho (SN 1572), con resultados prometedores. Aun teniendo en cuenta las complejidades de la comparación entre modelos y observaciones (muchas de ellas relacionadas con imperfecciones en los códigos espectrales necesarios para los cálculos), los resultados apuntan claramente a una explosión de tipo detonación retardada para la supernova de Tycho.



Los mejores modelos de tipo deflagración (izquierda) y detonación retardada, comparados con el espectro del SNR de Tycho observado por el satélite XMM-Newton (derecha).

# TRANSPORTE RADIATIVO EN LÍNEAS MOLECULARES: APLICACIONES EN ASTROFÍSICA

Andrés Asensio Ramos

aasensio@iac.es

Tesis doctoral dirigida por Javier Trujillo Bueno (IAC-CSIC) y José Cernicharo Quintanilla (DAMIR-CSIC)

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

Fecha de lectura: 2 de julio de 2004

Esta tesis presenta el desarrollo de una serie de métodos y técnicas para resolver problemas de transporte radiativo en líneas moleculares, y su aplicación en algunos campos de investigación en astrofísica molecular.

Nuestro primer objetivo ha consistido en el desarrollo de un eficiente código de transporte radiativo para líneas moleculares en atmósferas estelares con geometría esférica y campos de velocidad macroscópicos, sin suponer Equilibrio Termodinámico Local (ETL). Para resolver tales problemas de transporte radiativo, es necesario primero calcular las concentraciones moleculares en cada punto del medio. Para tal fin, hemos desarrollado un código que permite obtener las abundancias moleculares, suponiendo la aproximación de equilibrio químico instantáneo. Como en los plasmas astrofísicos las escalas de tiempo dinámicas suelen ser menores que los tiempos de formación de moléculas, hemos desarrollado también un código que permite obtener la variación en el tiempo de las abundancias moleculares, mediante la resolución de las ecuaciones de evolución química. Este tipo de ecuaciones deben estar basadas en una red de reacciones suficientemente realista para cada problema particular. Hemos aplicado estas técnicas para solucionar varios problemas clave en física solar y estelar, como el enigma del gas frío en las atmósferas de tipo solar.

En esta tesis mostramos en detalle cómo generalizar a geometría esférica los métodos iterativos más rápidos de solución de problemas de transporte radiativo que existen actualmente: el método de la iteración  $\Lambda$  acelerada (basado en el método de Jacobi) y los métodos iterativos desarrollados por Trujillo Bueno & Fabiani Bendicho (1995), los cuales están basados en la iteración Gauss-Seidel y SOR. Mostramos que las excelentes propiedades de convergencia de tales métodos en atmósferas

plano-paralelas se mantienen en geometría esférica. La tasa de convergencia de estos métodos es muy alta, con un tiempo de cómputo por iteración semejante al de la iteración  $\Lambda$ , siendo además idóneos para la solución de complejos problemas de transporte radiativo en plasmas tridimensionales. El código que hemos desarrollado mediante la implementación de estos métodos de transporte radiativo constituye una herramienta muy poderosa para una gran variedad de aplicaciones en astrofísica molecular, incluyendo el problema, particularmente complejo, del transporte radiativo en máseres astronómicos.

Una parte significativa de esta tesis se centra en la investigación de las propiedades espectro-polarimétricas de las líneas moleculares, con el objetivo de desarrollar nuevas herramientas de diagnóstico para la investigación empírica del magnetismo solar y estelar. Para ello, hemos investigado las señales de polarización producidas por el efecto Zeeman o por procesos de dispersión, incluyendo el efecto Hanle. Por ejemplo, presentamos un método muy general para calcular el efecto de un campo magnético sobre los niveles rotacionales de las moléculas diatómicas, mediante la diagonalización numérica del Hamiltoniano efectivo.

En cuanto concierne a las señales de polarización en líneas moleculares inducidas por el efecto Zeeman, hemos investigado el origen físico de perfiles de polarización anómalos observados en manchas solares, mostrando que son producidos por líneas infrarrojas de CN, las cuales muestran un patrón Zeeman muy particular. Para extraer información empírica de este tipo de observaciones espectro-polarimétricas, hemos desarrollado un código de inversión de perfiles de Stokes inducidos por el efecto Zeeman molecular. Hemos investigado en detalle el espectro de polarización circular, producido por la molécula de CH en la banda G, y



hemos realizado observaciones con novedosos polarímetros que corroboran nuestras predicciones teóricas. Por último, hemos observado por primera vez las señales de polarización producidas por el efecto Zeeman en líneas de FeH en manchas solares, resaltando su potencial interés para explorar empíricamente el magnetismo solar y estelar.

Finalmente, hemos investigado las señales de polarización lineal producidas por procesos de dispersión en líneas de MgH, C<sub>2</sub> y CN, las cuales han sido descubiertas recientemente mediante observaciones espectro-polarimétricas realizadas muy cerca del borde del disco solar. Hemos realizado un análisis exhaustivo de las propiedades de las bandas moleculares que producen señal de polarización lineal. Mediante la aplicación de la teoría cuántica de la polarización, investigamos cómo los procesos de bombeo óptico inducen desequilibrios en las poblaciones de los subniveles magnéticos

pertenecientes a cada nivel molecular e interferencias mecano-cuánticas entre ellos y cómo la presencia de débiles campos magnéticos modifica esta polarización atómica (y la polarización lineal emergente) a través del efecto Hanle. Enfatizamos que una interpretación rigurosa de la polarización por dispersión observada en las líneas moleculares requiere abandonar el uso de modelos unidimensionales de la atmósfera estelar y utilizar en su lugar modelos hidrodinámicos tridimensionales que describen la inhomogeneidad y el estado dinámico del plasma. Teniendo en cuenta la diferente sensibilidad al campo magnético que tienen las líneas de C<sub>2</sub> observadas, hemos sido capaces de poner algunas restricciones a las distribuciones de campo magnético turbulento en las zonas granulares, constatando que los campos magnéticos en tales zonas del plasma solar deben ser muy débiles.

## ESTUDIO INFRARROJO DE ESTRELLAS OH/IR GALÁCTICA

Francisco M. Jiménez Esteban

Francisco.Jimenez-Esteban@hs.uni-hamburg.de

Tesis doctoral dirigida por Pedro Gracia Lario y Dieter Engels

Centro: ESAC–Estación de Seguimiento de Satélites ESA

Fecha de lectura: 23 de julio de 2004

En esta tesis presentamos un estudio de estrellas OH/IR galácticas llevado a cabo principalmente en el rango de longitudes de onda del infrarrojo, aunque para el análisis también hemos usado datos en el óptico y radio.

En primer lugar, hemos analizado 371 fuentes *IRAS* pertenecientes a la llamada ‘muestra de Arcibo’ de estrellas OH/IR. Se ha obtenido astrometría y fotometría en el infrarrojo cercano, y determinado las principales propiedades fotométricas de la muestra. Los pocos objetos sin contrapartida en el infrarrojo cercano han sido identificados como variables OH/IR fuertemente oscurecidas o como OH/IR no variables al comienzo de la fase post-AGB. La distribución relativa en el diagrama de colores *IRAS* [12]–[25] vs. [25]–[60] de las fuentes con y sin contrapartida óptica, al igual que sus característicos colores en el infrarrojo cercano, se han interpretado como una consecuencia del incremento del espesor óptico de sus envolturas circunestelares (ECS). La conexión entre los datos en el infrarrojo cercano y medio ha sido estudiada con la

ayuda del diagrama de colores K–[12] vs. [12]–[25], encontrando una clara correlación. Ésta ha sido interpretada como un indicador del incremento de la contribución de la emisión en el infrarrojo medio (procedente del polvo frío de la ECS) con respecto a la del infrarrojo cercano (procedente de la estrella central y del polvo caliente que la rodea) sobre el total de la distribución espectral de energía. Así, la distribución de las estrellas OH/IR observada en diagrama K–[12] vs. [12]–[25] se explica como la consecuencia de los diferentes espesores ópticos de sus ECS.

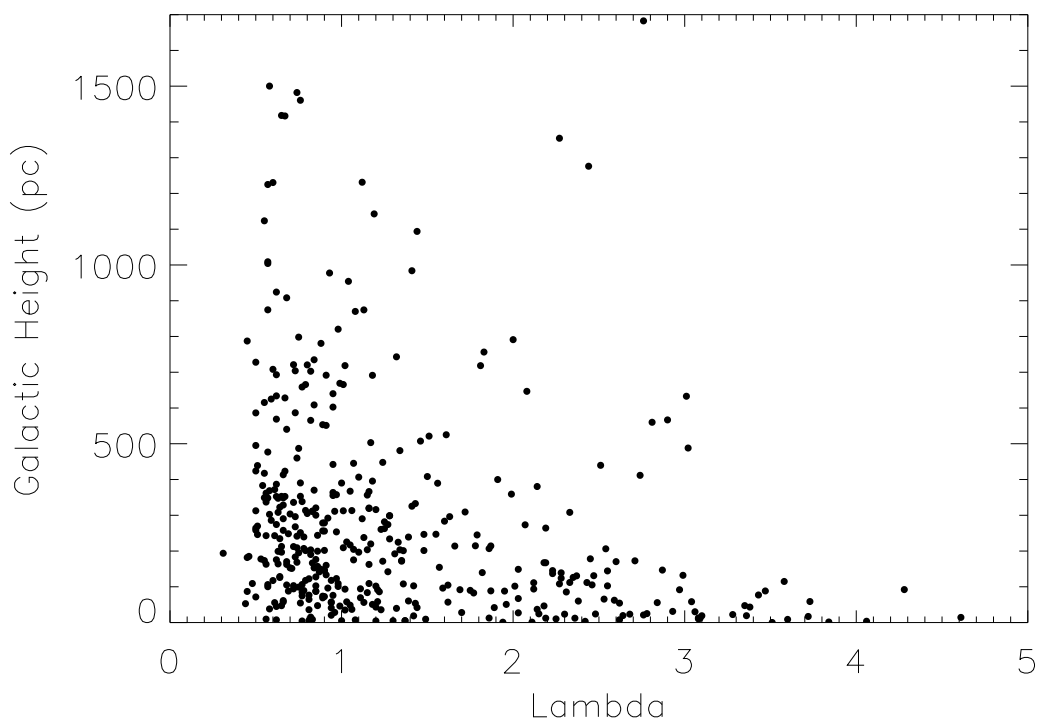
Posteriormente, se ha realizado el mismo análisis a una muestra de 94 estrellas OH/IR mucho más enrojecidas pertenecientes al catálogo GLMP, encontrando que sus propiedades fotométricas son una extensión de las encontradas para la ‘muestra de Arcibo’.

Como un subproducto, hemos creado el atlas de estrellas OH/IR más extenso existente hasta la fecha. Este atlas consiste en cartas de identificación en el óptico y en el infrarrojo cercano para un total

de 465 estrellas OH/IR, todas ellas estudiadas en esta tesis.

Con esta amplia muestra de estrellas OH/IR recopilada, hemos interpretado la secuencia de colores que muestran en el diagrama *IRAS* (que nosotros hemos denominado la ‘secuencia AGB rica en oxígeno’) en términos del estado evolutivo y/o de la masa de la estrella progenitora. Para ello, previamente hemos determinado la distribución de luminosidad de un grupo de estrellas OH/IR localizadas en la dirección del Bulbo Galáctico, y asumiendo que son parte de la población del mismo, hemos podido asignarles una distancia común

equivalente a la del Centro Galáctico. Dado que la distribución de luminosidad obtenida para estas estrellas está fuertemente concentrada entorno a  $3500 L_{\odot}$ , hemos asignado este valor al resto de estrellas OH/IR como una primera aproximación a su verdadera luminosidad. De este modo, hemos podido explorar tanto su distribución de distancia como de altura galáctica, encontrando una clara relación entre el parámetro  $\lambda$  (que incrementa a lo largo de la ‘secuencia AGB rica en oxígeno’) y la altura galáctica (ver figura), indicando que la fracción de estrellas con gran masa se incrementa con  $\lambda$ .



*Distribución de la altura galáctica en función de  $\lambda$  para todas las fuentes estudiadas, excluyendo las pertenecientes al Bulbo Galáctico.*

Basándonos en estos resultados, hemos propuesto un escenario evolutivo en el cual todas las estrellas OH/IR evolucionan desde la zona más azul de la ‘secuencia AGB rica en oxígeno’ hacia los colores más rojos, al tiempo que incrementan el espesor óptico de la ECS. Incluso las estrellas OH/IR de poca masa ( $\approx 1 M_{\odot}$ ) son capaces de crear envolturas lo suficientemente gruesas como para prevenir su detección en el óptico justo al final de la fase AGB, apareciendo como fuentes muy enrojecidas

en el diagrama de colores *IRAS*. Sin embargo, sólo las estrellas más masivas son capaces de alcanzar los colores *IRAS* más rojos.

Finalmente, hemos estudiado en detalle las propiedades fotométricas de una muestra de 25 fuentes *IRAS* galácticas, seleccionadas todas ellas como posibles candidatas a estrellas variables de largo periodo en una etapa avanzada de la fase AGB. Los resultados presentados son el producto de un programa de seguimiento llevado a cabo durante

más de 10 años. Nuestro estudio incluye también el análisis detallado de las curvas de luz, el cual muestra que, en muchos casos, éstas están lejos

de ser simétricas y presentan variaciones seculares que aún están por explicar.

## GALAXIAS, CÚMULOS DE GALAXIAS Y EL INTERCAMBIO DE CAMPO MAGNÉTICO

África Castillo Morales

acm@ugr.es

Tesis doctoral dirigida por Eduardo Battaner López y Sabine Schindler

Centro: Departamento de Física Teórica y del Cosmos, Universidad de Granada

Fecha de lectura: 5 de noviembre de 2004

Los cúmulos de galaxias están formados por varios componentes observables: cientos de galaxias, gas caliente entre las mismas y, para algunos cúmulos, partículas relativistas y campo magnético. Estos componentes emiten radiación en diferentes longitudes de onda, desde radio hasta rayos X. La combinación de las observaciones realizadas en este amplio rango de frecuencias junto con los modelos teóricos, nos permite tener un mejor conocimiento de estos objetos.

En esta tesis presentamos el análisis de las distribuciones del gas y de la materia oscura en una muestra de diez cúmulos de galaxias cercanos ( $0.03 < z < 0.09$ ) cuyas temperaturas se encuentran entre 4.4 y 9.4 keV. Estos cúmulos de galaxias han sido estudiados en detalle a través de sus observaciones en rayos X a partir de las cuales se han deducido propiedades físicas globales como la masa del gas y la masa total del cúmulo, la fracción en masa del gas y su extensión relativa. Hemos analizado las posibles correlaciones entre estas propiedades comparándolas con los resultados obtenidos para el caso de cúmulos de galaxias más distantes. En este análisis se ha encontrado una dependencia interesante entre la extensión relativa del gas (expresada como la razón entre las fracciones en masa del gas en los radios  $r_{500}^1$  y  $0.5 \times r_{500}$ ) y la masa total del cúmulo. La extensión del gas relativa a la extensión de la materia oscura tiende a ser mayor en los cúmulos menos masivos. Esta dependencia podría estar relacionada con la intervención de procesos de precalentamiento del medio intracumular durante la formación de estas estructuras.

Además, presentamos en esta tesis las nuevas observaciones en rayos X obtenidas para dos

cúmulos de galaxias morfológicamente diferentes, CL 0939+4713 y RBS797. La determinación del estado dinámico de los cúmulos de galaxias a diferentes desplazamientos al rojo es muy importante para la Cosmología. El observatorio de rayos X *XMM-Newton* ofrece la posibilidad de realizar un estudio espectroscópico con mayor resolución, permitiéndonos obtener mejores mapas de temperatura y metalicidad. Hemos analizado la observación del cúmulo CL 0939+4713 ( $z=0.41$ ), obtenida con *XMM-Newton*, confirmando que se trata de un sistema dinámicamente joven. Esta conclusión se ve apoyada por la distribución de temperatura encontrada en este cúmulo: se distingue una región de temperatura más elevada entre los dos subcúmulos principales, indicando que se encuentran al comienzo de un proceso de fusión.

En varios cúmulos de galaxias cercanos se ha detectado la interacción entre el gas del medio intracumular y la radiofuente situada normalmente en el centro del cúmulo, observándose una anticorrelación entre la emisión en rayos X y la radioemisión. En la observación realizada con el satélite *Chandra* mostramos la presencia de depresiones en la emisión de rayos X del cúmulo RBS797, donde se distinguen claramente mínimos en la emisión cerca del centro del cúmulo. Probablemente, el gas del medio intracumular se ha visto desplazado desde las regiones de menor hacia las de mayor emisión en rayos X, debido a la presión de las partículas relativistas contenidas en los radio lóbulos. RBS797 ha sido el primer cúmulo de galaxias distante en el que se ha encontrado evidencia de este tipo de interacción.

Las observaciones en la longitud de onda de radio

<sup>1</sup>  $r_{500}$  se define como el radio dentro del cual la densidad media del cúmulo es 500 veces la densidad crítica.

muestran la presencia de otros componentes interesantes en los cúmulos de galaxias: las partículas relativistas y el campo magnético. Estos son componentes dinámicamente importantes tanto en galaxias como en cúmulos de galaxias. Sin embargo, la interacción entre el campo magnético intra- y extra-galáctico ha recibido poca atención hasta ahora, aunque su interconexión es de gran interés. Estudiando en detalle la dinámica estelar y gaseosa de las regiones más centrales ( $r \leq 1$  kpc) de las galaxias espirales con una inclinación intermedia y con algún tipo de actividad nuclear, podemos determinar cuánto campo magnético ha sido eyectado (o está cayendo) desde el núcleo galáctico o desde la región más interna del disco galáctico al medio intracumular. Para emprender esta tarea, hemos utilizado en esta tesis el instrumento INTEGRAL, basado en un sistema de fibras ópticas, en combinación con el espectrógrafo de fibras WYFFOS situado en el WHT, en La Palma. Hemos

empleado la espectroscopía bidimensional para estudiar las regiones circumnucleares de dos galaxias, NGC 5033 y NGC 4321. Se han identificado sus estructuras de ionización a través de los diferentes mapas obtenidos de las líneas de emisión y hemos estudiado la cinemática de los emisores ionizados comparando la cinemática estelar y gaseosa.

El estudio detallado de la dinámica de la región central de una galaxia es una herramienta bastante útil para el estudio de los flujos del gas (y por lo tanto de campo magnético) y de las estrellas, hacia o desde el medio intergaláctico. Esto es importante para entender la interacción entre la galaxia y el cúmulo de galaxias al que pertenece. En las galaxias estudiadas en esta tesis no parece existir un importante flujo de gas, por lo que se están llevando a cabo nuevas observaciones para ser analizadas con las técnicas desarrolladas anteriormente y poder así estudiar la interconexión de la galaxia con el medio intracumular.

## CINEMÁTICA DEL GAS IONIZADO EN GALAXIAS ESPIRALES

Mónica Relaño Pastor

mpastor@iac.es

**Tesis doctoral dirigida por** John E. Beckman Abramson y Maite Rozas Espadas

**Centro:** Instituto de Astrofísica de Canarias

**Fecha de lectura:** 19 de abril de 2004

La cinemática interna de las regiones H II en galaxias espirales presenta muchas dificultades para su estudio, y los detalles de los mecanismos que producen la dispersión de velocidad en sus perfiles espectrales son aún desconocidos. Desde que Terlevich & Melnick (1981) propusieran que las regiones H II son sistemas virializados han aparecido en la literatura varios intentos de confirmar esta hipótesis, pero nunca con éxito. Aunque se han propuesto varios mecanismos que dan lugar a las dispersiones de velocidad supersónicas, uno de los principales problemas para verificar cualquiera de ellos ha sido la falta de observaciones con suficiente calidad. La mayoría de los intentos para estudiar este problema se han limitado a regiones H II individuales extragalácticas cercanas, que pueden ser bien resueltas espacialmente, o a muestras muy pequeñas de regiones H II extragalácticas más distantes.

En la tesis doctoral se ha tratado de superar estas limitaciones observacionales y se ha presenta-

do un estudio completo de la cinemática interna de las regiones H II más luminosas de una muestra de tres galaxias espirales de tipo tardío: NGC 1530, NGC 3359 y NGC 6951. El catálogo de las luminosidades en  $H\alpha$  de la población de regiones H II proporciona una muestra adecuada sobre la que basar el estudio de la cinemática y supera las limitaciones de las muestras previas, permitiendo además un análisis estadísticamente robusto para extraer conclusiones generales.

Las observaciones en la línea de emisión  $H\alpha$  fueron realizadas con el instrumento Fabry-Pérot TAURUS-II en el foco Cassegrain del WHT (4.2m) en el Observatorio del Roque de los Muchachos en La Palma. Estas observaciones se complementaron con catálogos de regiones previamente derivados y extraídos a partir de observaciones con filtros de banda estrecha en  $H\alpha$ .

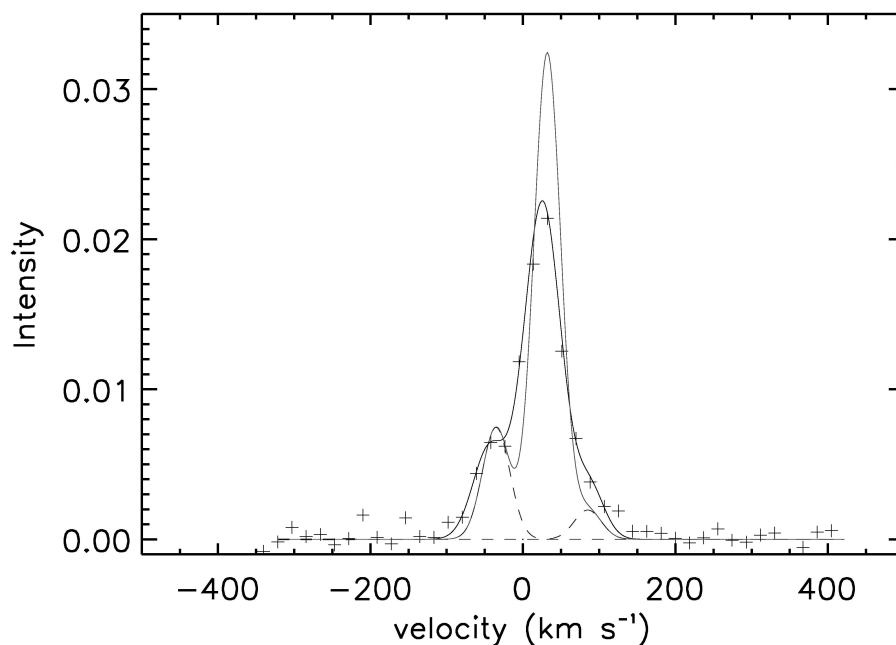
Hemos estudiado los perfiles integrados de emisión de las regiones H II más luminosas de NGC 1530, NGC 3359 y NGC 6951 ajustando cada uno con

un número óptimo de funciones gaussianas. La dispersión de velocidad de la componente central de cada perfil, relacionada con el movimiento turbulento interno dentro de la región, puede ser representada en un diagrama anchura turbulenta de la línea ( $\sigma_{\text{turb}}$ ) frente al logaritmo de la luminosidad en  $H\alpha$  para el conjunto completo de regiones H II estudiadas. A partir de la definición de la envolvente superior en el logaritmo de luminosidad en  $H\alpha$  y su ajuste lineal hemos sido capaces de mostrar que la envolvente en este diagrama es el lugar de las regiones H II en equilibrio del virial, mientras que aquellas regiones situadas encima de la envolvente en la coordenada  $\sigma_{\text{turb}}$  deben estar afectadas por otros mecanismos de inyección de energía en el gas que tienden a ensanchar la componente central del perfil espectral.

Además, hemos estudiado y confirmado la existencia de componentes de alta velocidad y baja intensidad en las partes externas de las componentes principales de los espectros de emisión observados y hemos desarrollado un análisis detallado para mostrar una clara distinción entre las alas y las colas extendidas de baja amplitud de la función respuesta del instrumento Fabry-Pérot. Un análisis detallado ha mostrado que las alas son producidas por la emisión de una cáscara en expansión

dentro de la propia región H II. Hemos cuantificado la energía involucrada en la expansión de esta cáscara y hemos propuesto dos mecanismos para su formación y expansión. Mientras que la cáscara con pequeños radios puede ser producida por la interacción de los vientos estelares con el medio interestelar circundante, la radiación de las estrellas masivas probablemente desempeña un papel importante en impulsar la cáscara a radios mayores.

Finalmente, se ha estudiado el campo completo de velocidad global de la galaxia NGC 1530 a partir de las observaciones Fabry-Pérot en  $H\alpha$ . El campo de velocidad de esta galaxia ha sido usado en esta tesis para hacer un estudio detallado de los movimientos no circulares producidos por la barra de esta galaxia. Hemos encontrado flujos cuasi-elípticos de gas alrededor de la barra y hemos mapeado los campos de cizalladura y de compresión asociados con la barra y la zona central. Además, hemos relacionado estos campos con la tasa de formación estelar local. Por otro lado, hemos demostrado, por primera vez, una relación directa entre la morfología de las calles de polvo y la del campo de velocidad y hemos mostrado un flujo espiral de gas ionizado hacia el núcleo galáctico.



*Deconvolución del perfil espectral de una región HII en NGC 1530. La línea continua representa el resultado del ajuste al perfil observado y la línea discontinua es el resultado del ajuste del perfil deconvolucionado. La línea discontinua con puntos muestra las componentes de baja intensidad y alta velocidad en el espectro deconvolucionado.*

# ESTUDIO CINEMÁTICO Y DE FUENTES DE IONIZACIÓN DE GALAXIAS INFRARROJAS ULTRALUMINOSAS CON ESPECTROCOPIA DE CAMPO INTEGRAL

Ana Monreal Ibero

amonreal@aip.de

Tesis doctoral dirigida por Santiago Arribas Mocoroa (STSci-IAC-CSIC) y Luis Colina Robledo (IEM-CSIC)

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias

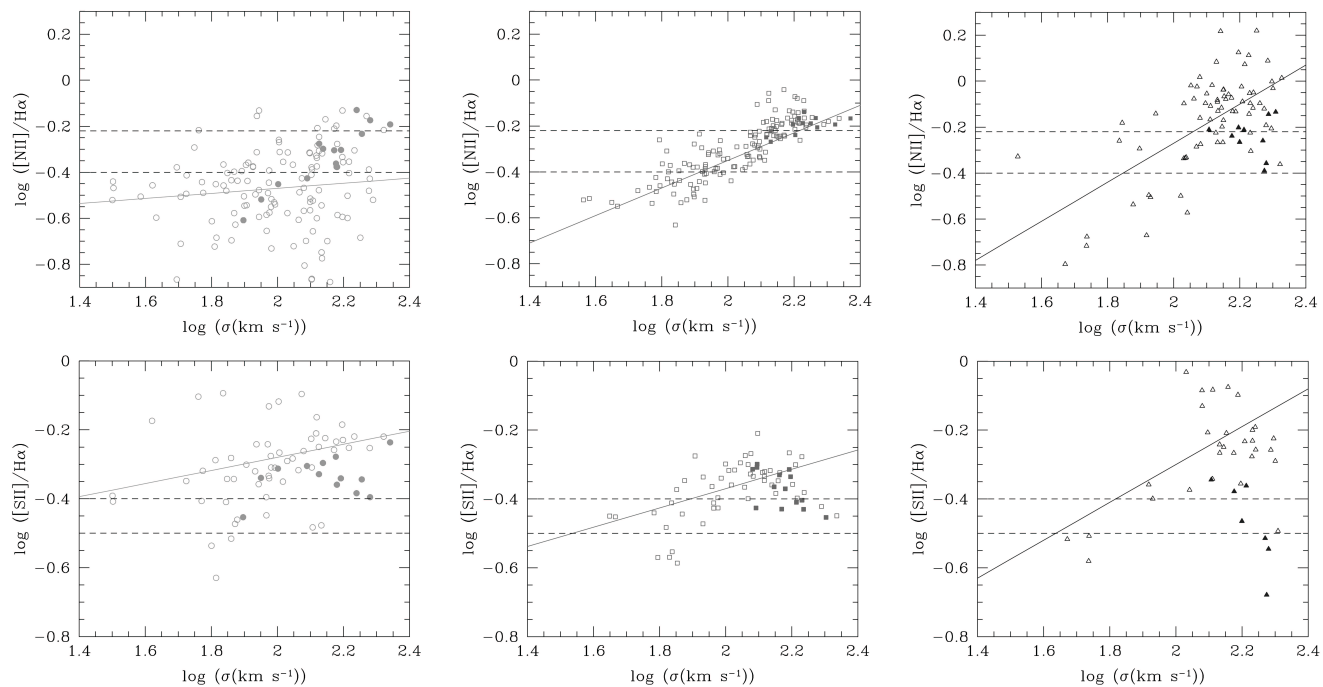
Fecha de lectura: 22 de julio de 2004

Las Galaxias Infrarrojas Ultraluminosas a bajo *redshift* (ULIRGs) se descubrieron con el satélite *IRAS* a finales de la década de los 80. Se definen como aquellos objetos con una luminosidad en el infrarrojo de  $L_{\text{IR}}[8 - 1000\mu\text{m}] \gtrsim 10^{12} L_{\odot}$ , que se explica por medio de una intensa formación estelar y/o núcleos activos, que calientan el polvo que hay en la galaxia.

No está claro su papel en la evolución de galaxias, aunque parece que son un paso intermedio entre el choque de dos o más galaxias y la formación de una galaxia elíptica y, tal vez, un cuásar. Presen-

tan una estructura morfológica, cinemática y de ionización extensa y bastante compleja, por lo que la espectroscopía de campo integral (ECI) resulta una herramienta muy adecuada para estudiar este tipo de objetos.

En esta tesis, se presenta el análisis detallado de tres ULIRGs, mediante la utilización de datos de ECI e imagen de alta resolución en varios filtros. Además, se analizan las posibles implicaciones que los resultados individuales pueden tener en el estudio de las ULIRGs en su conjunto.



Correlación entre la dispersión de velocidades y los cocientes  $[\text{N II}]\lambda 6584/\text{H}\alpha$  y  $[\text{S II}]\lambda\lambda 6717,6731/\text{H}\alpha$ . Los círculos, los cuadrados y los triángulos representan los datos para IRAS 12112+0305, IRAS 14348-1447 e IRAS 15250+3609, respectivamente. Los símbolos rellenos representan las fibras circumnucleares de cada galaxia mientras que el resto de ellas están representadas con símbolos huecos. Las líneas discontinuas horizontales señalan la frontera aproximada entre una ionización de tipo región H II y una de tipo LINER. Se ha representado en línea continua el ajuste a una recta de los datos no nucleares.

Hemos encontrado que la estructura morfológica del gas ionizado en estos sistemas es similar, aunque con diferencias, a la de la componente estelar. Estas diferencias pueden atribuirse al efecto combinado de la extinción diferencial y las características de las poblaciones estelares presentes.

Por otra parte, estos sistemas presentan una cinemática no regular, que no puede asociarse a rotación simple de un disco, y que está dominada por el proceso de fusión. Además, existen indicios de supervientos en las zonas centrales de las tres galaxias, por lo que éste podría ser un fenómeno muy habitual en las ULIRGs.

En lo que a la extinción se refiere, su estructura en estas galaxias es claramente no uniforme y mayor hacia las zonas centrales. El no considerar los efectos de la extinción diferencial puede provocar una sobreestimación de la masa  $\lesssim 15\%$ .

Fuera de las regiones nucleares, se ha encontrado una correlación entre el estado de ionización de una determinada zona del sistema y la dispersión de velocidades que resulta compatible con la existencia de espectros de tipo LINER asociados a choques provocados por el proceso de fusión.

En relación a la fuente capaz de explicar la enorme

luminosidad de estos sistemas, los brotes de formación estelar detectados en el óptico e infrarrojo pueden dar cuenta de únicamente  $\lesssim 20\%$  de la luminosidad total de estos sistemas, estando la fuente responsable del resto de la luminosidad oculta a estas longitudes de onda. Argumentos dinámicos y observaciones en otros rangos del espectro parecen indicar que el resto de la luminosidad se puede explicar mejor por brotes de formación estelar que por un agujero negro similar al que se encuentra en los cuásares ópticos.

Estas galaxias muestran gran cantidad de formación estelar fuera del núcleo que parece seguir una evolución paralela al proceso de fusión. En los tres sistemas se han encontrado regiones de formación estelar extranucleares con propiedades que las convierten en buenas candidatas a Galaxias Enanas de Marea.

Por último, la observación de sistemas similares a las ULIRGs pero a mayor desplazamiento al rojo es complicada. En caso de utilizar rendija larga, se perderían los detalles de su compleja estructura, mientras que con ECI, resultaría complicado conseguir una S/R suficiente para realizar un estudio similar al desarrollado en la presente tesis.

## FAST MAGNETOHYDRODYNAMIC WAVES IN LINE-TIED SOLAR CORONAL FLUX TUBES

Antonio Jesús Díaz Medina

toni.diaz@uib.es

Tesis doctoral dirigida por Jose Luís Ballester Mortes y Ramón Oliver Herrero

Centro: Universitat de les Illes Balears

Fecha de lectura: 25 de junio de 2004

El objetivo de esta tesis es estudiar los modos magnetohidrodinámicos (MHD) rápidos que soportan estructuras coronales ancladas en la fotosfera. En particular, se han estudiado de forma teórica las ondas MHD en distintos tipos de estructuras coronales sujetas a la condición de *line-tying*, concentrándonos en modos de oscilación estacionarios, sobretodo en sus frecuencias y la distribución espacial de la amplitud de dichos modos. Hemos caracterizado los modos propios de oscilación de dos tipos de estructuras presentes en la corona: bucles coronales (*coronal loops*), tubos anclados en la fotosfera llenos de material caliente, y fibrillas de protuberancias solares (*prominence fibrils*), que

son la estructura fina de nubes densas y frías en la corona (protuberancias). Para su estudio hemos incluido algunas simplificaciones: hemos alineado las estructuras con el eje  $z$  cartesiano y hemos supuesto que el plasma en cada región es uniforme.

Para hallar las soluciones, linealizando las ecuaciones de la MHD hemos deducido un par de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales para la perturbación de la presión magnética y de la velocidad. Considerando el valor de la  $\beta$  del plasma muy pequeño (es decir, despreciamos los efectos de la presión hidrodinámica en la ecuación del movimiento) se obtiene la ecuación de Laplace para la perturbación de la presión magnética. Sin em-

bargo, es necesaria una segunda ecuación para la perturbación de velocidad, ya que interviene en las condiciones que rigen la perturbación en las superficies de contacto entre plasmas con distintas propiedades.

Partiendo de estas ecuaciones diferenciales, hemos aplicado separación de variables para su resolución. Debido a la condición de *line-tying* se obtiene un problema de Sturm-Liouville, que hemos resuelto analíticamente en los casos sencillos y numéricamente en casos más realistas. La solución analítica incluye el uso de todas las autofunciones del problema, por lo que obtenemos un sistema de ecuaciones para los coeficientes de cada autofunción. De la condición para obtener soluciones no triviales obtenemos las relaciones de dispersión que gobiernan los modos.

Una vez obtenidas las relaciones de dispersión, podemos aplicar los resultados a modelos de las estructuras coronales que queremos estudiar. En primer lugar hemos tratado los *bucles coronales*, modelándolos como tubos cilíndricos de plasma más denso que el material coronal que los rodea. En el caso de un tubo homogéneo (alejado de la realidad, pero útil como primer ejemplo), comprobamos que la condición de *line-tying* motiva la aparición de más familias de modos confinados respecto a los resultados clásicos de un tubo infinito. Sin embargo, si se añade algún tipo de estructura en el eje  $z$  (es decir, en dirección longitudinal), tal como una capa densa en los pies simulando la cromosfera, estas nuevas familias desaparecen, quedando sólo superposiciones de ellas, aunque las frecuencias son similares a las de los modos del tubo homogéneo dominantes.

Además, hemos estudiando los cambios al introducir perfiles de densidad en el eje  $z$ . Para ello, hemos asumido distintos perfiles de calentamiento coronal con sus correspondientes equilibrios y hemos hallado los modos de oscilación del bucle. En los modelos que hemos utilizado la densidad es relativamente uniforme cerca del ápex y crece al acercarse a los pies, pero como éstos están anclados en la fotosfera, la amplitud de la oscilación es muy pequeña en la región de más densidad y

los modos tienen una frecuencia similar a la de un tubo homogéneo con la densidad del ápex, pero con algo más de amplitud cerca de la fotosfera. Además, las diferencias entre los distintos tipos de calentamiento son muy pequeñas, por lo que no nos permite distinguir en qué parte actúa éste, sólo con las observaciones.

En lo referente a *fibrillas de protuberancias*, en primer lugar hemos estudiado los modos de oscilación de una única fibrilla, comenzando con un modelo cartesiano ilimitado en una dirección (llamada  $y$ ) sin propagación a lo largo de la misma. El resultado más importante es que pocos modos quedan atrapados en la fibrilla, mientras que el resto son evanescentes y se propagan por la corona. Además, en los modos supervivientes todo el entorno coronal vibra con la fibrilla (la amplitud no decae hasta unas 1000 veces la anchura de la estructura). Sin embargo, estos resultados son modificados si se permite propagación en el eje  $y$ , permitiendo más modos no evanescentes con mejor confinamiento de la energía de la oscilación cerca de la fibrilla.

Por otra parte, también hemos estudiado el caso de más de una fibrilla cartesiana. Como resultado, aparecen modos en fase y en oposición de fase, pero lo más importante es que, para valores de los parámetros similares a los esperados en la corona, el único modo atrapado es aquel en que todas las fibrillas vibran en fase y el medio coronal vibra con ellas con casi la misma amplitud (de manera similar a toda la protuberancia oscilando como un bloque homogéneo), pero con una frecuencia distinta a la de una única fibrilla.

En último lugar, hemos hallado los modos de una fibrilla cilíndrica. Sigue habiendo muy pocos modos confinados, pero éstos ya no hacen vibrar todo el entorno, por lo que la energía de la oscilación queda casi toda en la fibrilla. Además, los periodos resultantes dependen de las características del plasma, por lo que podemos hacer *sismología coronal*: determinar parámetros del plasma a partir de las observaciones. Por ejemplo, aplicado a las observaciones de oscilaciones en fibrillas estimamos un campo magnético del orden de 10 Gauss, coherente con otras determinaciones.