

BOLETÍN DE LA SEA

Editores

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

Portada

Benjamín Montesinos Comino

Comité editorial

Agustín Sánchez Lavega
Antonio Alberdi Odriozola
Fernando Moreno Insertis
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

Ad astra per aspera

Durante la Reunión Científica de septiembre del año pasado, los miembros de la Comisión de Información nos reunimos para planificar las actividades de cara al futuro. Parte de las decisiones que tomamos las veis plasmadas o anunciadas en este boletín. Retomamos las páginas dedicadas a instituciones que se encargan de la divulgación de la Astronomía con un artículo sobre el Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife. Nos hemos propuesto contactar con las agrupaciones de aficionados para facilitar la comunicación entre ellos y los profesionales, algo que se planteó en los inicios de la SEA pero que nunca llegó a cristalizar. Como veis en la última contracubierta –a la hora de leer esto ya habréis recibido algún correo electrónico al respecto– la SEA ya tiene su *blog* o bitácora, y esperamos que todos, en la medida de vuestras ocupaciones, tiempo y entusiasmo, podáis contribuir. A más largo plazo nos hemos planteado abrir en la página web una sección de divulgación, pero con las cautelas que ello supone debido a que este trabajo ha de hacerse de forma continuada y para ello se necesitaría una persona dedicada. Exploraremos si es factible y os iremos comunicando nuestros progresos.

Los editores

Cuando estamos a punto de enviar a la imprenta este número del Boletín hemos conocido el fallecimiento, en el accidente que costó la vida además a otros tres excursionistas, de Eduardo Delgado Donate, contratado postdoctoral, especialista en simulaciones numéricas de galaxias y miembro de la SEA, Maurizio Paniello, estudiante de doctorado del proyecto AMS, y Juan Luis Medina Trujillo, ingeniero informático del proyecto IMAX, todos ellos miembros del Instituto de Astrofísica de Canarias. A sus familias y compañeros del Instituto, las más sinceras condolencias de todos los miembros de la SEA. Descansen en paz.



La imagen que sirve como fondo a los contenidos en la portada muestra una parte de la nube oscura Barnard 30, perteneciente a la región de formación estelar de Lambda Orionis, localizada en la Cabeza de Orión. Las observaciones fueron realizadas con el telescopio espacial Spitzer y la cámara IRAC en el filtro centrado en torno a $8 \mu\text{m}$. La imagen corresponde aproximadamente a una zona de 25×30 minutos de arco y es realmente un mosaico compuesto por unas 180 imágenes individuales. Cortesía de NASA, John Stauffer (IPAC/Caltech), David Barrado y Navascués (LAEFF/INTA), y María Morales Calderón (LAEFF/INTA).

LA SOCIEDAD ESPAÑOLA DE ASTRONOMÍA Y LAS AGRUPACIONES DE ASTRÓNOMOS AFICIONADOS

En la última Reunión Científica de la SEA, celebrada el pasado septiembre en Barcelona, quedó patente el interés de nuestra Sociedad por aproximarse a las asociaciones de astrónomos aficionados. Desde el comité editorial de este Boletín hemos querido participar en ese acercamiento ofreciendo a las asociaciones la posibilidad de darse a conocer en nuestras páginas. En los próximos números planeamos ir presentando las agrupaciones de astrónomos aficionados de nuestro país, divididas por áreas geográficas, junto con los datos de contacto y una breve descripción del origen, instalaciones, intereses y actividades de cada una de ellas. Animamos desde aquí a los miembros de las agrupaciones a colaborar con nosotros en esta tarea, comenzando por registrarse en la lista que está siendo elaborada en el portal Astrowiki, gestionado por la Asociación de Astrónomos Aficionados de la Universidad Complutense (ASAAF), donde además pueden incluir un enlace a su propia página web:

<http://asaaf.fis.ucm.es/astrowiki/>

(buscar la Lista de Asociaciones Astronómicas de España, en la categoría Asociacionismo)

Partiendo de esta lista iremos contactando con las distintas asociaciones para preparar el artículo del área geográfica correspondiente.

Además, la Sociedad Española de Astronomía está preparando toda una serie de acciones para fomentar la colaboración entre astrónomos profesionales y aficionados, las cuales se detallan en la carta abierta del presidente de la SEA a las agrupaciones astronómicas que reproducimos a continuación.

Invitación del presidente de la SEA

Las Agrupaciones Astronómicas o Asociaciones de Astrónomos Aficionados comparten con la Sociedad Española de Astronomía (SEA) el placer de la observación de los cielos, y la fascinación por el Universo. Cada vez más los medios al alcance de las Agrupaciones Astronómicas, o al alcance de algunos astrónomos aficionados, son de gran calidad y potencia. En paralelo, el interés de estos colegas ha crecido por involucrarse en tareas de divulgación, de enseñanza de la Astronomía e incluso de investigación astronómica. Como no podía ser de

otra manera, la SEA apoya estas iniciativas, y reconoce el valor del esfuerzo y tiempo dedicados por estas agrupaciones en bien de la Astronomía.

Desde la Junta Directiva de la SEA queremos ver la posibilidad de realizar acciones de diversa índole en colaboración con las Agrupaciones Astronómicas, o incluso con astrónomos aficionados individuales. El plan es todavía exploratorio, pero creemos que puede resultar beneficioso para ambas comunidades.

La primera acción que quisiéramos iniciar es la de conocernos mejor. Para ello el Boletín de la SEA va a dedicar un espacio a la presentación de las diversas agrupaciones astronómicas, y en colaboración con la Asociación de Astrónomos Aficionados de la Universidad Complutense (ASAAF), vamos a introducir un enlace en la página de la SEA a una lista viva de asociaciones, que está siendo elaborada por la ASAAF y otras agrupaciones (como las de Santander y Jaén), y que esperamos incluya a todas aquellas asociaciones interesadas en la astronomía.

Otra acción que queremos estudiar es la posibilidad de colaborar en la difusión y el disfrute de la Astronomía para el gran público con ocasión del Año Internacional de la Astronomía, que se celebrará con el patrocinio de la ONU durante todo el 2009.

La SEA está asimismo considerando el establecimiento de un programa por el cuál se invitaría a aquellas agrupaciones o aficionados a título individual que estuvieran interesados en colaborar en proyectos de investigación dirigidos por astrónomos profesionales de la SEA. Para ello queremos establecer una página de contacto en la web de la SEA, donde astrónomos profesionales expondrán posibles proyectos de investigación, explicando cuál puede ser la participación de los astrónomos aficionados y las condiciones en las que la colaboración se llevaría a cabo.

Espero que estas ideas de colaboración, y otras que puedan surgir en el futuro sirvan para el avance de la Astronomía y de la cultura científica en nuestro País. Invito desde aquí a las Agrupaciones Astronómicas a colaborar con la SEA, en las formas mencionadas u otras que pudieran surgir en el futuro.

José Miguel Rodríguez Espinosa
Presidente de la SEA

EL MUSEO DE LA CIENCIA Y EL COSMOS DE TENERIFE

Inés Rodríguez Hidalgo

irh@iac.es

¿Por qué un Museo de la Ciencia y el Cosmos en Tenerife?



El Museo de la Ciencia y el Cosmos quiere ser un espacio para la exploración y la experimentación, una gran fiesta de la cultura científica. El visitante puede tocar, leer, oler, preguntar, mirar, empujar, construir, escuchar, examinar, pensar, curiosear, disfrutar... participar, en definitiva, de un sentimiento tradicionalmente reservado a los científicos profesionales: el placer de la Ciencia viva.

Las Islas Canarias, alejadas geográficamente de los circuitos culturales habituales, se encuentran en clara desventaja con respecto a otras regiones españolas. Consciente de esta peculiaridad, el Cabildo de Tenerife se propuso potenciar la creación de una oferta cultural propia y de calidad. En ella no podía faltar un Museo de la Ciencia que, junto con otras instalaciones, forma parte del Organismo Autónomo de Museos y Centros (OAMC) del Cabildo tinerfeño.

La responsabilidad de poner en funcionamiento el nuevo Museo de Ciencia fue asumida por el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC), uno de cuyos fines es la divulgación de los conocimientos científicos. Este centro de investigación aportó para ello un guión museístico serio y meditado, y se comprometió a apoyar en su desarrollo al Museo, que se singularizó añadiendo a su nombre el Cosmos como particular seña de identidad.

Y así, el 11 de mayo de 1993, abrió sus puertas al público el Museo de la Ciencia y el Cosmos. Para la inauguración se invitó a impartir una conferencia al cosmonauta ruso Serguei Krikalev, que permaneció más de 300 días en la estación orbital Mir. Apenas dos meses más tarde, el 6 de julio, tuvo lugar la visita oficial del Príncipe de Asturias, Felipe de Borbón, que fue obsequiado con un holograma.

La ficha técnica

El edificio que alberga el Museo de la Ciencia y el Cosmos está ubicado en un solar de casi 7.500 m², en el término municipal de La Laguna, junto a la sede central del IAC, en la confluencia de la calle Vía Láctea y la Avenida de los Menceyes. La superficie construida, de unos 4.700 m², incluye una planta de acceso, la planta del Museo propiamente dicha, con la gran sala de exposición permanente, un salón de actos con 160 asientos, una sala de planetario con 45 plazas, y un área de descanso. El edificio está rodeado por una gran plaza pública.

El diseño museográfico incluyó los muebles que albergan los experimentos y la imagen institucional del Centro. El recinto del Museo fue concebido como un parque de experiencias didácticas y de módulos informativos dispuestos en una especie de plaza pública por la que el visitante puede pasear libremente. Con las unidades museográficas se intercalan imágenes icónicas, formas simbólicas, elementos abstractos, mini arquitecturas e ilustraciones del artista francés Fernand Léger.

Como logotipo del Museo de la Ciencia y el Cosmos se eligió, cómo no, un sugerente motivo astronómico: el fragmento de la superficie lunar que incluye los “Montes Tenerife”, unas elevaciones situadas a 47° N y 13° W, cercanas al gran cráter Platón, bautizadas así en memoria de Piazzzi Smith, el primer astrónomo que observó el Universo desde las cumbres de la isla.

Los objetivos

El MCC es el lugar adecuado para una visita familiar, individual, de grupo o escolar. Este museo en permanente evolución pretende ser un centro de divulgación científica para todos los públicos, al mismo tiempo que servir de recurso didáctico al servicio de docentes y alumnos de todos los niveles. Independientemente de la edad, sexo y habilidad manual o intelectual del visitante, el Museo invita al público a sentir la emoción del descubrimiento científico, y se propone avivar la curiosidad e interés por aprender, excitar la imaginación, hacerle recobrar la capacidad de asombro, y desarrollar la auto-confianza intelectual, el gusto por la Ciencia, e incluso las ganas de llegar a ser un científico.

Se busca, en definitiva, promover un actitud positiva hacia la Ciencia, presentándola como una componente esencial de la aventura intelectual humana, cercana, omnipresente en la vida cotidiana e imprescindible para ser una persona culta en nuestros días, a la que vale la pena aproximarse con curiosidad e interés, en vez de con temor y desconfianza.

Los contenidos

En el Museo de la Ciencia y el Cosmos no se exponen en vitrinas objetos de gran valor económico, histórico o artístico, sino ideas y experiencias, que se presentan al público como “trocitos” de Ciencia que invitan a jugar, y a aprender jugando.

Los casi cien experimentos del MCC, realizados íntegramente en nuestros talleres, se distribuyen dentro de una sala elíptica similar a una plaza de mercado, ordenadas en las áreas “El Cuerpo Humano”, “¿Cómo Funciona?” y “El Cosmos”, que incluye las secciones “La Tierra”, “El Sol” y “El Universo”. De entre estos experimentos han surgido las salas monográficas de Astronomía y de la Visión, y la atracción “Turismo Cósmico”. Esta original oferta consiste en un viaje fascinante por el Sistema Solar que recrea con tanta imaginación como realismo físico los ambientes de un cometa, el satélite de Júpiter Ío, y el planeta Marte.

El propósito es que el público realice por sí mismo los experimentos, que contienen una breve explicación escrita, unas cuantas “pistas” que, a menudo, pretenden más dejar en el aire una pregunta que ofrecer una respuesta. En su paseo por el MCC, el visitante puede levantar un coche con una sola mano, ir de safari cósmico manejando una realista maqueta de telescopio para buscar por los “cielos” del Museo objetos astronómicos con nombres de animales, construir un puente romano y caminar sobre él, ver nacer pollitos en directo, conocer los observatorios del Teide y del Roque de Los Muchachos, disfrutar en el laberinto de espejos, hacer de hombre o mujer del tiempo ante un “*chroma key*”, probar su habilidad con juegos matemáticos o contemplar Tenerife a vista de pájaro.

En la gran terraza, que alberga un telescopio óptico, se alza una enorme radioantena de 18 m de diámetro con el logotipo del Museo que, además de constituir la imagen más característica del centro, pronto mostrará al público la diversidad de ondas de radio que viajan por nuestra atmósfera.



Figura 1 — Panorámica de 360° de la sala de exposición permanente del Museo.

Mucho más que módulos interactivos

A la exposición permanente se añaden numerosas actividades que son parte esencial de la vida del Museo:

Planetario, que cuenta en la actualidad con cinco programas diferentes, todos realizados por los técnicos del Museo: “Otros soles”, “La medida del tiempo”, “El cielo en movimiento”, y los más recientes “Hubble, telescopio espacial”, estrenado en abril de 2005, con motivo de los 15 años de dicho instrumento, y “A hombros de gigantes”, que revisa los hitos más relevantes de la historia de la Astronomía, estrenado en marzo de 2006.

Talleres didácticos, impartidos prácticamente a diario por el personal del Museo, para escolares de diversos niveles y edades: “Patricia, la niña que quería ser astronauta” y “El cuerpo humano” para los más pequeños; “Sistema Sol-Tierra-Luna”, “El corazón”, “Explorando el Sistema Solar” y “La materia” para primaria; “¿Pesa el aire?”, “¿Lloverá mañana?”, “Cuestión de energía” y “Las fuerzas de la naturaleza”, para niños de 11 a 14 años; y “50.000 voltios”, “Visión nocturna”, “¿Te suena?”, “¿Por qué vuelan los aviones?”, “Controlando la luz” y “El Sol en directo” para chicos de 15 a 18 años.

Mesas redondas, jornadas, cursos, reuniones de grupos locales de carácter científico, congresos... son acogidos frecuentemente en el Salón de Actos.

Conferencias sobre temas científicos, a menudo de gran actualidad, impartidas por expertos, buscando siempre que la exposición sea amena y comprensible por el público no especializado, sin renunciar al rigor.

Exposiciones temporales: se procura traer al Museo exhibiciones científicas que recorren España o Europa, y se organizan exposiciones propias. A modo de ejemplo, el pasado verano la gran escalera de entrada del Museo acogió la exposición realizada por el MCC en colaboración con el Instituto Canario de Bioantropología del OAMC “La Medicina y la Física. Bases físicas de la instrumentación médica”, que presentó una interesante selección de instrumentos médicos antiguos, agrupados por los conceptos físicos en que se basan, junto con paneles explicativos.



Figura 2 — Parte de la exposición “La Medicina y la Física”, abierta al público durante el verano de 2006.

Acampadas astronómicas: varias veces al mes, desde la tarde del viernes al mediodía del sábado, niños y niñas de entre 6 y 12 años, de colegios o de familias particulares, “toman” el Museo acampando en él para aprender Astronomía al tiempo que se divierten.

Noches astronómicas: en viernes de luna creciente, los monitores de Planetario del MCC reciben a los visitantes que desean disfrutar de una observación astronómica guiada desde la terraza, tras una sesión explicativa del cielo de esa noche en el planetario.

AluCINE con el futuro: los domingos a las 16h, en el Salón de Actos, con entrada gratuita y, generalmente, en versión original subtitulada en español, se proyectan películas de ciencia-ficción o relacionadas de algún modo con la Ciencia, seguidas de un animado foro de debate de los aspectos cinematográficos y científicos.

Cumpleaños con las estrellas: los fines de semana dos monitoras especializadas ofrecen a los niños un cumpleaños diferente en el MCC, con entretenidas actividades educativas, juegos, regalos y tarta.

La Cosmoneta es un llamativo vehículo decorado exteriormente con motivos científicos, que lleva experimentos y talleres fuera de las instalaciones del Museo, acercando la Ciencia a cualquier lugar del archipiélago (y de otras islas), además de sumarse a diversas fiestas y eventos culturales.



Figura 3 — *La Cosmoneta entre lavas en la isla de El Hierro.*

Algunos hitos

“¡El Museo sigue en sus trece!” Con este lema el Museo de la Ciencia y el Cosmos celebraba la pasada primavera su decimotercer aniversario. Algunos hitos destacables de estos trece años de historia son los siguientes:

Jupitermanía, actividad organizada en julio de 1994 en torno al choque del cometa Shoemaker-Lévy con Júpiter. Se ofreció a los dos mil asistentes una observación en directo de los efectos del impacto, gracias a una conexión con los telescopios del Observatorio del Teide, con comentarios de astrofísicos del IAC, así como conferencias divulgativas.

Durante los años 1996 a 2000 se celebraron los cursos “La Astronomía en Canarias”, “5 siglos de Ciencia en Canarias”, “Canarias y la Ecología: un reto para el siglo XXI”, “Las moléculas de la vida” y “El futuro de la Ciencia: Canarias ante el tercer milenio”, organizados por el MCC con la colaboración (según el curso) de la Universidad de La Laguna y otros centros educativos, divulgativos o de investigación de la isla de Tenerife.

A lo largo de tres años seguidos, del 96 al 98, se celebró la “Semana Matemática”, en colaboración con el Seminario de Matemáticas del IES Viera y Clavijo, durante la cual se realizaron talleres y se fabricaron módulos matemáticos, experimentos y juegos.

La “II Reunión de Museos Interactivos y Planetarios de España” tuvo lugar en febrero de 1998 en el MCC.

En junio de 1999 se celebró el “VI Congreso Oxford

de Astronomía y diversidad cultural”, organizado por el IAC y el MCC, en colaboración con la Unidad de Patrimonio del Cabildo de Lanzarote.

La exposición interactiva “33 preguntas sobre el Calendario”, sobre anécdotas y otras peculiaridades del Calendario, en preparación del cambio de siglo y de milenio, fue inaugurada en junio de 2000.

En septiembre de 2001, unas cuatrocientas personas disfrutaron en la Plaza de Santo Domingo de La Laguna, del espectáculo científico y teatral “Calle con Ciencia”, en el que un grupo de actores y músicos les invitaron a participar en numerosos experimentos de Física, Química y Matemáticas. El “pasacalle” volvió a realizarse posteriormente varias veces en La Laguna, Santa Cruz de Tenerife y Las Palmas de Gran Canaria.

El año 2003 tuvo como protagonista principal a la Astronomía, con la exposición “Meteoritos” de febrero a abril, y la iniciativa “Martemanía”, con numerosas actividades en torno a Marte durante el mes de agosto: ciclo de cine, producción especial de planetario, conferencias, conexión con el Observatorio del Teide para recibir las imágenes de Marte en su momento de máximo acercamiento a la Tierra, e inauguración de “Turismo Cósmico”.

Tras la celebración de la Reunión del *Internacional Council for Science* sobre asteroides, el 1 de diciembre de 2004 se celebró el debate público “Asteroides: ¿cómo anunciar un posible impacto?”.



Figura 4 — *Terraza del Museo de la Ciencia y el Cosmos. A la derecha, el telescopio óptico, a la izquierda, la radioantena de 18 m de diámetro con el logotipo del Museo.*

A lo largo de 2005, Año Mundial de la Física, tuvieron lugar numerosas actividades divulgativas bajo el lema “másEinstein 2005”. Los elementos

expositivos de este original proyecto museográfico realizado en la ciudad de La Laguna fueron un centenar de figuras 2D a tamaño natural de Einstein con algunos de sus pensamientos, colocadas en instituciones, centros educativos, locales públicos, establecimientos comerciales... de la localidad; imágenes de Einstein sentado en 30 guaguas, indicando algunos sorprendentes comportamientos de la masa, el espacio y el tiempo, derivados de la Relatividad Especial, y grandes lonas con conceptos de Relatividad y reflexiones del científico, en diferentes lugares de La Laguna y en el propio Museo. Por otra parte, fue editada la “Guía Relativa”, basada en el trabajo del equipo “Cosmoeduca” del Gabinete de Dirección del IAC, que explica la Relatividad Especial de forma sencilla al público no especializado. Este folleto informativo, del que se distribuyeron de forma gratuita 20.400 ejemplares, contiene además preguntas para reflexionar, bibliografía, anécdotas, anuncios y convocatorias de las actividades organizadas por el Museo en este Año. Se editaron 300.000 ejemplares en total de dos bonobuses conmemorativos del proyecto, se crearon nuevos módulos interactivos sobre los descubrimientos de Einstein en 1905, se impartieron las conferencias “Una Relatividad muy especial” y “Elemental, querido Einstein. Taller de Relatividad”, tuvo lugar un ciclo de “Cine y Relatividad”, fueron creadas y emitidas en las cadenas locales cinco cuñas televisivas de 60 segundos con frases de Einstein y llamativas imágenes, se convocó el certamen de obra bidimensional “Arte y Relatividad”, y el actor mejicano Patricio Castillo, especializado en interpretar al científico, representó en dos ocasiones el monólogo “Yo, Einstein”. Una de las iniciativas más estimulantes fue, sin duda, la celebración durante tres jueves consecutivos, en un café público de La Laguna, de los coloquios-debate “No sólo de Relatividad vivió Einstein”, “¿Inventó Einstein la Relatividad” y “Einstein nunca dijo eso de todo es relativo”. En ellos, varios expertos expusieron conceptos de las teorías del gran físico alemán para público en general, pasando a continuación a dialogar con los asistentes en un ambiente informal y relajado.

Nuestro profesor “Einstein” tuvo ocasión también de presenciar los “Juegos de ingravidez” (salto desde una grúa y paseo por la antena) que los visitantes pudieron realizar en la terraza del Museo, con motivo del encuentro “Ciencia en acción”. 80 participantes, 25 personas de la organización, 110 matriculados y más de 1500 visitantes son las ci-

fras de este certamen nacional organizado por las Reales Sociedades Españolas de Física y de Matemáticas, la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, y otras entidades relacionadas con la enseñanza y la divulgación de la ciencia, que fue acogido por el Museo del 23 al 25 de septiembre de 2005.



Figura 5 — En la terraza del Museo, “Einstein” observa curioso al público congregado con motivo del certamen “Ciencia en acción”, en septiembre de 2005. Al fondo, uno de los visitantes experimenta con la gravedad caminando sobre la antena.

El 29 de marzo de 2006, unas cuatrocientas personas asistieron a la transmisión en directo del eclipse total de Sol, realizada por algunos miembros del Museo destacados en Turquía.

Pero si la revisión de actividades y logros resulta gratificante, son más importantes, sin duda, la tarea diaria y los proyectos futuros. Entre ellos cabe destacar el regalo que hemos pedido a los Reyes para los niños (y no tan niños.) de Tenerife: una nueva producción de planetario infantil titulada “Meteorito, una roca del espacio”. Bajo la cúpula disfrutaremos la belleza del cielo nocturno, imágenes astronómicas espectaculares, divertidas marionetas, sugerentes fragmentos de música clásica, y la cálida voz de un narrador de excepción, al

que hemos logrado contagiar nuestro entusiasmo por la idea: Emilio Aragón “Miliki”. Para celebrar que 2007 ha sido declarado Año Heliofísico Internacional, tenemos en proyecto un espectáculo de planetario solar, un taller didáctico sobre polarización de la luz, sesiones especiales de AluCINE con el futuro dedicadas al Sol, diversas conferencias, y una exposición sobre Física Solar desde el espacio, que organizaremos en colaboración con los compañeros “solares” del IAC.

No quiero concluir sin recordar a todos los colegas de la SEA y lectores de este boletín que no sólo de Sol y hermosa Naturaleza vive Tenerife, así que les invito cordialmente a visitar el Museo de la Ciencia y el Cosmos en su próximo viaje a Canarias. Eso sí, debo hacerles una advertencia: desde que crucen la puerta de entrada al Museo, quedarán expuestos a

una atmósfera de cultura científica... lo que puede tener sorprendentes consecuencias como hacerles retroceder a su niñez, despertar su curiosidad, estimular su imaginación o, incluso, aumentar su conocimiento. Simplemente pensé que debían estar advertidos...

Más información sobre el MCC en

<http://www.museosdetenerife.org>

Inés Rodríguez Hidalgo es doctora en Física, en la especialidad de Astrofísica, profesora del Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna, investigadora del Instituto de Astrofísica de Canarias y, desde febrero de 2005, directora del Museo de la Ciencia y el Cosmos del Cabildo de Tenerife.

EL GRAN TELESCOPIO CANARIAS

SEIS SEGMENTOS DEL PRIMARIO, SECUNDARIO Y TERCIARIO INSTALADOS

J. Miguel Rodríguez Espinosa jmr.espinosa@iac.es

Resumen

El telescopio sigue en manos de nuestros ingenieros de control, que han de probar la ingente cantidad de código necesario para que el GTC funcione como una única pieza. Esporádicamente el telescopio se les ha arrebatado a los de control para tareas muy específicas, por ejemplo el inicio de la instalación de segmentos del primario y de los espejos secundario y terciario. Para cuando esta revista esté fuera deberíamos haber tenido luz en el telescopio.

Como en otras ocasiones lo que sigue es el ya tradicional repaso a los diferentes subsistemas del GTC con la idea de dar una imagen clara y actualizada del estado del proyecto.

Cúpula

Durante el verano se ha seguido trabajando en los mecanismos de la cúpula, que son ahora prácticamente nuevos comparados con los que quedaron cuando se fue la contrata que montó la cúpula. Muchos de estos trabajos, por ejemplo el cambio de los motores de las compuertas de observación o la instalación de nuevos tensores para las cadenas de dichas compuertas se han realizado desde el exterior de la cúpula, lo que ha obligado a suspender las tareas siempre que ha habido mal tiempo. En estos casos se proseguía con trabajos en el interior de la cúpula, así como a la limpieza de ésta. La limpieza de la cúpula no ha sido trivial, debido al tamaño. Para ello se ha contratado a una empresa especialista en trabajos verticales, cuya plantilla son casi escaladores profesionales. Dicha empresa ha participado en la limpieza de la cúpula (Fig. 1) así como en la pintura del telescopio. En cuanto al control de la cúpula funciona normalmente la rotación de esta, que puede controlarse desde el sistema de control general del GTC. No así las compuertas de observación, que aún necesitan de algunos elementos electrónicos que han de ser recibidos antes de poderse integrar en el sistema de control. Entretanto dichas compuertas pueden moverse desde un panel de mandos.



Figura 1 — Trabajadores de Verticalia S.A. limpiando la pared interior de la cúpula.

Telescopio

Desde la finalización de la estructura mecánica del telescopio, éste ha estado sometido a pruebas del control de sus ejes de elevación y acimut. Estas pruebas continúan, habiéndose alcanzado precisiones de movimiento cercanas a lo especificado. Se ha visto sin embargo que cuando se mueve simultáneamente la cúpula los errores de medida de los codificadores de acimut aumentan sustancialmente (un factor 6). He de decir que estas pruebas son complejas y requieren un telescopio bien balanceado. Recientemente, el balanceo del telescopio ha tenido que hacerse diariamente ya que se ha estado añadiendo peso casi cada día a la celda del primario. En efecto, se han estado instalando las cajas nodales de los segmentos del primario, así como otros varios armarios de electrónica. Se continúa con pruebas y más pruebas, ajustando los servos de acimut y elevación, y se espera alcanzar los valores especificados en breve. En estos días se han ajustado también los rotadores de instrumentos (Fig. 2), que solo se dejaron presentados cuando el fabricante Tekniker vino la última vez al telescopio. Por último, se han alineado con precisión las bridas de los flancos de anclaje de los focos Cassegrain

doblados, se han terminado una serie de soldaduras necesarias en la araña del secundario, y se ha limpiado y pintado lo que se ha podido del telescopio antes de instalar la óptica. La limpieza ha sido tediosa y complicada debido a que los tubos del telescopio no dejaban de soltar arena y óxido cada vez que se ponía el telescopio en posición horizontal. Al final ante la imposibilidad de limpiar y pintar todo el telescopio se ha optado por una limpieza a fondo y pintado de toda la parte del tubo que está por encima de la celda del primario, así como de la zona donde se alojarían los primeros segmentos. El plan es continuar con la limpieza y pintura del resto en las próximas semanas, con suma precaución al haber ya óptica instalada. Lo cierto es que Pedro Alvarez, el Director del Proyecto, decidió que había que empezar a poner óptica en Diciembre, y así ha sido. Una decisión contestada por algunos colegas que hubieran preferido que se acabase con la limpieza y pintura. El resultado ha sido positivo, creo yo, porque es una forma de ir quemando naves y avanzando, si bien se van dejando atrás tareas que habrá que hacer tarde o temprano y requerirán tiempo. Pero el haber instalado la óptica de primera luz en Diciembre ha llenado de optimismo al equipo.

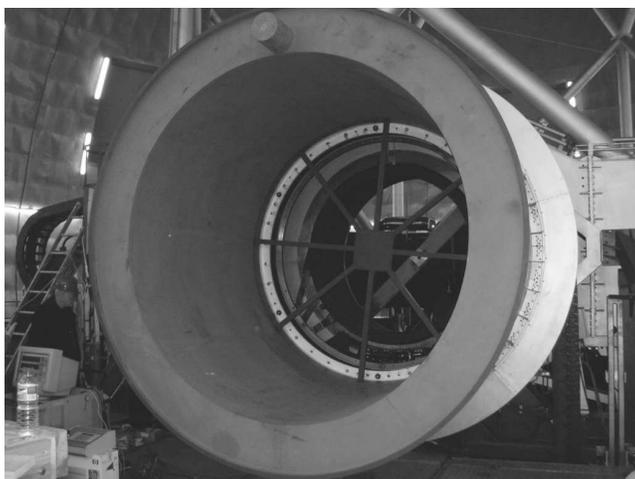


Figura 2 — Pruebas de los servos de uno de los rotadores de instrumentos, cargado con una maqueta con el peso máximo y asimetría máxima permitidas.

Óptica

La preparación para la instalación, y la propia instalación de la óptica han sido procesos que han acaparado, estos últimos meses, no solo al grupo de óptica, sino al jefe de integración, y a personal

de control y electrónica, amén de técnicos de mantenimiento. Ha sido todo un esfuerzo bien planificado, con tareas ajustadas a la hora. Entre estas tareas ha habido que optimizar el aluminizado de segmentos, aprender a aluminizar y a retirar la capa de aluminio de un soporte niquelado sin llevarse el níquel (este es el caso del espejo secundario que es de berilio acabado en níquel). Ha habido que cablear los actuadores, de cada segmento, preparar los alojamientos de los sensores de borde, etc. Simultáneamente se han realizado ensayos realistas de cómo instalar los segmentos en su celda, de cómo moverlos desde la sala de almacén, y de cómo elevarlos e introducirlos por entre la estructura tubular del telescopio para situarlos sobre la vertical de su celda.

Un éxito del equipo de mantenimiento ha sido la fabricación, o mejor, modificación de la garra usada para sujetar los segmentos mientras se elevan hasta su sitio en la celda del primario. Esta garra sujeta los segmentos mientras son elevados (Fig. 3) para posteriormente posicionarlos y bajarlos hasta su lugar en la celda. La garra permite además sujetar los segmentos con un cierto ángulo de inclinación, el correspondiente a su lugar en la celda del primario, que debido a la forma del espejo primario es mayor cuanto mayor es la distancia de los segmentos al centro del primario.

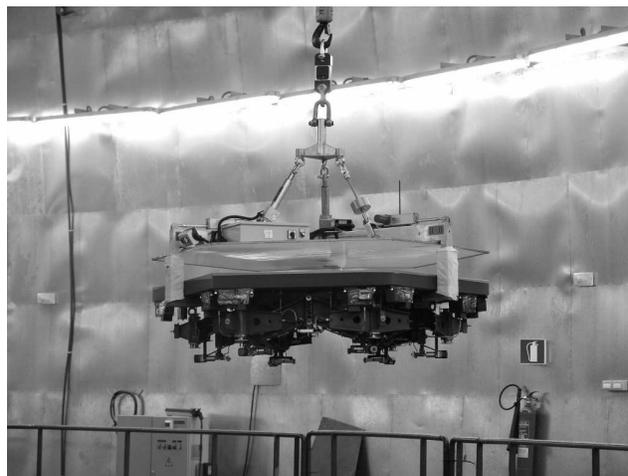


Figura 3 — El primer segmento en ser colocado sujetado por la garra mientras se eleva hacia el tubo del telescopio. Nótese dicha garra, así como los árboles de levas en la parte posterior del segmento. La cara superior del segmento está protegida con una pantalla para esta operación.

El momento álgido de este semestre ha sido sin embargo el inicio de la colocación de la óptica en el telescopio. Esto ha sucedido en diciembre. Duran-

te las dos primeras semanas se colocaron seis segmentos (Figuras 4 y 5) y el terciario, y la siguiente semana, la semana del 18 de diciembre se colocó el secundario en su jaula (Fig. 6). Esta configuración es la que se había previsto para la llamada primera luz técnica, que tendrá lugar si todo va bien el próximo mes de enero.



Figura 4 — Colocación del primer segmento. El equipo de ingenieros y técnicos, dirigidos por Javier Castro, a la derecha, se aseguran de que el segmento encaja en su lugar. La garra la controla remotamente Manuel Medina.



Figura 5 — El primer segmento ya colocado y fijado en su celda. Nótese en primer plano los pesos muertos que se han usado en lugar de los segmentos para equilibrar el telescopio, así como la zona donde se pondrían los próximos segmentos ya liberada de estos pesos muertos.



Figura 6 — El secundario en su jaula, en la parte superior del tubo. Detrás del espejo secundario pueden verse los mecanismos y el hexápodo que realizan los complicados movimientos de dicho espejo.

La instalación de los segmentos ha ido razonablemente bien, si exceptuamos que los actuadores del segundo segmento colocado fallaron cuando ya estaba el segmento en su sitio y se estaba procediendo a su apriete definitivo. Fue un fallo inesperado, un fallo estructural de los actuadores que debieran ser extremadamente rígidos a torsión. A raíz de este fallo se doblaron también la varillas que transmiten los esfuerzos a la cara posterior del segmento, por lo que hubo que quitar el segmento, y cundió cierto desánimo. Tras unas horas de cierto desasosiego, se encontró una manera de reforzar los actuadores frente a torsión, para evitar cualquier otro posible fallo futuro, y se procedió a reforzar el segmento que ya estaba colocado, así como los otros cuatro segmentos que se instalarían en los siguientes días. El segmento cuyos actuadores y árbol de levas habían sido dañados fue reparado sustituyendo dicho árbol por uno de repuesto y cambiando los actuadores. Este segmento fue por tanto restituido en su lugar con lo que se completó el primer lote de segmentos colocados en el telescopio (Fig. 7).

Primera luz técnica

En Enero se tendrá pues la primera luz técnica, calificativo que damos a la primera vez que conseguiremos ver luz estelar en algún detector, previsiblemente la cámara de adquisición de la Caja de Adquisición y Guiado (A&G). El plan previsto consiste en utilizar una gran pieza de cartulina

de aproximadamente un metro cuadrado, con un recuadro en su centro señalando el tamaño de un minuto de arco en el plano focal del GTC. Este es el tamaño del detector de adquisición de la caja de A&G. Puesto que usaremos seis segmentos es de esperar que la primera vez que apuntamos por ejemplo a la Polar, veamos seis imágenes distribuidas, en el mejor de los casos, por los casi 25 minutos del plano focal del GTC. Una vez tengamos las seis imágenes en la cartulina moveremos los actuadores de los segmentos hasta llevar cada una de las imágenes hasta el recuadro central de 1 minuto de arco cuadrado. Cuando las seis imágenes estén en el recuadro podemos introducir en el campo el brazo 1 de la caja de A&G para llevar el haz de luz hasta el detector de adquisición, procediéndose enseguida a un apilado más fino, ya basándonos en la imagen de la cámara de A&G. Esta operación es lo que llamamos la Primera Luz Técnica. A partir de aquí iniciaremos el proceso de mejora de la imagen, con el ajuste cada vez más fino de la óptica. Comenzaremos con una puesta a punto básica de la Caja de A&G, con unos primeros modelos de apuntado, y paulatinamente iremos mejorando la calidad de imagen, iremos aprendiendo del comportamiento del telescopio, el manejo del sistema de control, etc. Esto señala el inicio del período de puesta a punto que se extenderá durante todo un año, hasta poner el telescopio a disposición de la comunidad para las primeras propuestas científicas.



Figura 7 — Los seis segmentos del primer lote colocados en la celda del espejo primario.

Instrumentación Científica

OSIRIS ya está alineado, proceso que se ha llevado a cabo con gran pericia por parte de Roberto López y Carlos Tejada (Fig. 8), ingenieros ópticos del IAC y de la UNAM (México), respectivamente. Pronto se montará OSIRIS en el simulador Nasmyth de la sala de integración del IAC, para pruebas de interfaces mecánicas y flexiones. El calendario de OSIRIS sigue siendo muy agresivo, pero se están dando los pasos adecuados con la idea de estar listo para ir a telescopio en la primavera del 2007.

ELMER no ha sufrido grandes cambios, una vez se han probado sus interfaces en el simulador Nasmyth del IAC. Tampoco se ha avanzado en el sistema de control de ELMER, si bien una vez esté listo el control de la caja de A&G gran parte del software será heredado casi sin cambios por ELMER. Además, el software de pruebas de ELMER podría en caso de necesidad usarse temporalmente en telescopio.

CanariCam está también prácticamente listo para ser enviado a La Palma. Las pruebas de aceptación se han retrasado al haberse estropeado una de la cabezas refrigerantes, que ha tenido que enviarse al fabricante para su arreglo. Esperamos que las pruebas de aceptación puedan iniciarse a finales de enero, una vez resueltos los problemas con la cabeza fría. La revisión de aceptación tendrá lugar en marzo de 2007, a lo que seguirá el envío de CanariCam a GTC.

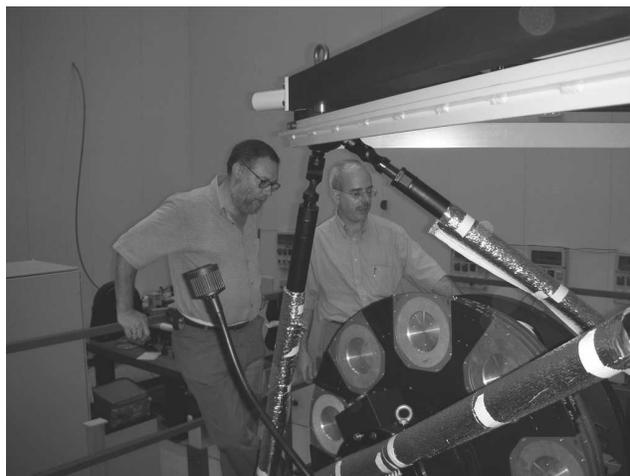


Figura 8 — Jordi Cepa y Pedro Álvarez contemplan OSIRIS en el laboratorio de integración del IAC, ya con sus subsistemas montados, y los elementos ópticos alineados.

Instrumentos de segunda generación

EMIR ha llevado a cabo todas las peticiones de ofertas para los contratos de sus subsistemas. Con lo que ha entrado plenamente en su fase de fabricación. Mientras escribo estas líneas se está decidiendo el contrato del robot criogénico que gestiona las máscaras de EMIR. Se espera iniciar la integración de EMIR en Otoño de 2007. Han surgido problemas con el fabricante de la óptica, que ha producido algunas lentes fuera de especificaciones. El equipo de EMIR está en discusiones permanentes con los fabricantes de la óptica para dar solución a estos problemas. Este año es clave en el desarrollo de EMIR ya que se empezarán a recibir componentes ya fabricados, lo que nos irá dando una idea de las prestaciones que se vayan consiguiendo en laboratorio.

Por fin ha echado a andar el espectrógrafo de resolución intermedia que el Comité Científico de GTC (SAC) había declarado como instrumento de alta prioridad, dado el panorama de instrumentos que ya están en la lista de instrumentos del GTC. Paco Prada, con el apoyo formal del Instituto de Astrofísica de Andalucía (IAA), ha logrado formar un consorcio que realizará un estudio de viabilidad para dicho instrumento. El consorcio incluye participación de varios centros españoles (IAA, IAC, UCM, IEEC, IFAE) a los que se unirán previsiblemente la UB, UVal y UNAM, así como la Universidad de La Florida, y los centros mexicanos IA-UNAM, e INAOE. El tamaño del consorcio formado apunta a la posible complejidad del instrumento que se está proponiendo. Se trataría de un espectrógrafo múltiple, con tres configuraciones distintas, una de baja-media resolución (R 5000), otra de resolución intermedia (R 15000-20000), y

una tercera configuración infrarroja. El instrumento utilizará los 20 minutos de arco disponibles en Nasmyth, empleando un robot posicionador de fibras, que alimentará a un número aún por determinar de espectrógrafos clónicos. De esta manera se cubre un gran campo, al mismo tiempo que se simplifica cada una de los espectrógrafos individuales. El plan previsto incluye tener listo el estudio de viabilidad en la primera mitad de 2007.

Primera luz

Ha llegado fin de año y estamos más cerca que nunca de Primera Luz. ¡Menuda perogrullada!, lo inconcebible sería lo contrario. Sin embargo, estamos a punto. La óptica prevista para primera luz está instalada. Así que antes de que este escrito vea la luz, el telescopio habrá visto su Primera Luz técnica. Oportunamente se dará noticia. ¿Qué nos retiene? La cantidad de cosas, conexiones, detalles, y por supuesto software, que hay que ir cerrando. Nuestra gente ha trabajado sin descanso en varios turnos durante los dos últimos meses. El 23 de diciembre se decidió que un descanso era merecido, una vez terminada la instalación de la óptica. Enero de 2007 se presenta intenso y era preferible un descanso navideño. Así que, enero Primera Luz y a continuación comienzan las pruebas, de Adquisición y Guiado, de apuntado y seguimiento, de la óptica, etc. En el próximo artículo comentaré con algo de detalle estas pruebas.

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

CAMPOS MAGNÉTICOS EN NUBES MOLECULARES Y SU PAPEL EN EL PROCESO DE FORMACIÓN ESTELAR

Josep Miquel Girart

girart@ieec.cat

Resumen

¿Qué papel juegan los campos magnéticos en la evolución de las nubes moleculares y en el proceso de formación estelar? En esta revisión se describe cuales son las posibles respuestas que se dan desde una perspectiva teórica y, especialmente, observacional. A pesar de las dificultades observacionales, empezamos a tener una primera visión de cuales son las propiedades de los campos magnéticos. Los resultados obtenidos a diferentes escalas indican que éstos son lo suficientemente intensos para que cualquier modelo teórico de formación estelar los deba tener en cuenta. En particular hemos encontrado que las propiedades del campo magnético en NGC 1333 IRAS 4A son consistentes con las predicciones de los modelos de formación estelar regulada por difusión ambipolar.

Abstract

Which is the role of the magnetic fields in the evolution of molecular clouds and in the star formation processes? In this review I describe the possible answers that are given from the theoretical and, specially, observational perspective. Despite of the observational difficulties, we start to have a rough picture of the magnetic fields properties. The results obtained at different scales show that these are strong enough so theoretical models should account for them. In particular, we found that the magnetic field properties in NGC 1333 IRAS 4A are consistent with the predictions of the ambipolar diffusion models of star formation.

1. Introducción

En las dos últimas décadas el conocimiento sobre la formación estelar ha avanzado significativamente, especialmente en el caso de las estrellas de baja masa. Esto se debe a la espectacular mejora en la instrumentación astronómica en ondas

(sub)milimétricas y en el infrarrojo y a la sofisticación de los modelos teóricos (en gran parte asociada al incremento en el poder de cálculo numérico). Sin embargo, a pesar de que ha habido una mejora en las técnicas observacionales polarimétricas, éstas han ido a un ritmo bastante más lento. Si a esto le añadimos la dificultad de detectar la polarización (en general es del orden de unas pocas centésimas de la emisión total), tenemos como consecuencia que hoy en día el campo magnético es todavía uno de los parámetros menos conocidos en el estudio de las nubes moleculares y de la formación estelar.

En esta revisión primero se explica resumidamente los dos principales escenarios de formación estelar: difusión ambipolar y turbulencia, describiendo brevemente las propiedades del campo magnético esperado en ambos casos. Seguidamente se detallan las diferentes técnicas observacionales que se pueden utilizar para poder estudiar el campo magnético, y a partir de estas cómo se derivan los parámetros que nos pueden dar información sobre las propiedades de los campos magnéticos. En la siguiente sección se da un repaso actual sobre el estudio observacional de los campos magnéticos, primero haciendo una descripción a diferentes escalas, y después dedicando una atención especial a dos regiones de formación estelar: DR21(OH) y NGC 1333 IRAS 4A, de alta y baja masa, respectivamente.

2. La perspectiva teórica

Actualmente hay un vivo debate sobre cual es el mecanismo clave en la regulación de la formación estelar, la difusión ambipolar o la turbulencia supersónica. Ejemplos recientes de este interesante debate lo tenemos en el artículo de revisión de Mac Low & Klessen (2004) en donde se proclama que la turbulencia interestelar es el agente principal que controla formación estelar. Los principales argumentos a favor del modelo turbulento y en contra del modelo de difusión ambipolar de este artículo de revisión son rebatidos por Mouschovias et al. (2006), quienes defienden el modelo de la difusión ambipolar. Pero estos a su vez,

han sido contra-replicados muy recientemente por Ballesteros-Paredes & Hartmann (2006). Ambos escenarios son capaces de predecir una tasa de formación estelar en la galaxia similar a la observada, aunque sin embargo tienen una base física muy diferente.

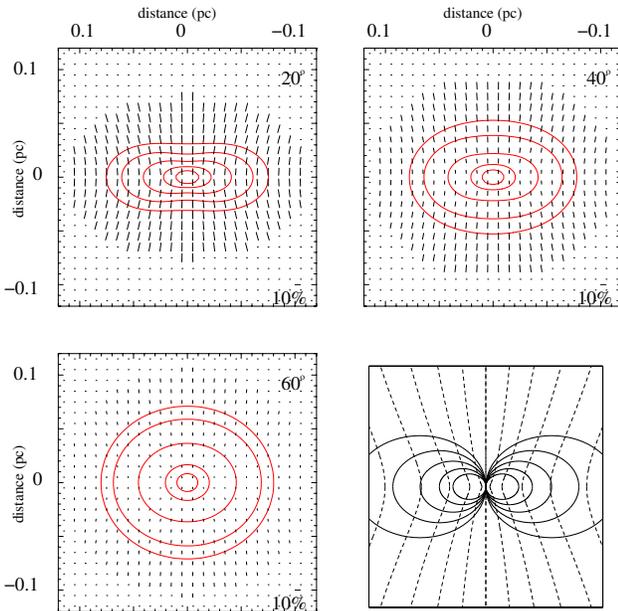


Figura 1 — *Distribución del campo magnético esperado en una nube molecular magnetizada, isotérmica y densa, a partir de observaciones de la emisión polarizada del polvo a $850 \mu\text{m}$ con un haz de $12''$ (Gonçalves et al. 2005). Los tres primeros paneles muestran la distribución del campo magnético (barras) y la intensidad total del polvo para diferentes inclinaciones respecto a la visual. El último panel muestra los contornos de isodensidad (líneas continuas) y las líneas de campo magnético del modelo.*

2.1. Formación estelar controlada por los campos magnéticos

La formación estelar en nubes magnetizadas es considerado en la literatura como el modelo clásico de la formación estelar (e.g. Ciolek & Mouschovias 1993; Fiedler & Mouschovias 1993; Galli & Shu 1993; Allen et al. 2003). Este escenario se basa en la suposición de que el campo magnético interestelar es suficientemente intenso para proporcionar soporte suficiente en las nubes moleculares frente a la gravedad. En este tipo de modelos el proceso clave que permite que la nube acabe colapsando es la difusión ambipolar (Mouschovias 1976, 1991). La difusión ambipolar consiste en la deriva

de las partículas neutras respecto a las ionizadas, lo que provoca que la densidad de energía gravitatoria vaya aumentando paulatinamente respecto a la densidad de energía magnética (contracción casi estática). De esta manera se puede llegar a un momento en que la gravedad acabe dominando y por tanto se inicie el colapso dinámico (a velocidades similares a la velocidad en caída libre). En esta fase el campo magnético es arrastrado por el material en colapso, adquiriendo así una morfología en forma de reloj de arena (Figura 1). Para un núcleo molecular que inicialmente tiene un tamaño de 0.1 pc, la morfología de reloj de arena ocurre en escalas aproximadamente entre 100 y unos miles de unidades astronómicas. Durante la fase de colapso el campo magnético es el principal actor en el proceso de eliminar el exceso de momento angular. Tanto es así que en el caso ideal esto tiene como consecuencia la inhibición de la fragmentación del núcleo y por tanto la formación de sistemas estelares binarios o múltiples. Sin embargo, simulaciones numéricas muestran que si se introducen perturbaciones no axisimétricas, éstas producen fragmentación en un amplio rango de escalas (Nakamura & Li 2003).

Una de las principales objeciones de este escenario es que el tiempo característico de la difusión ambipolar ($\sim 10^7$ años) es significativamente más grande que la vida media de las nubes moleculares, $\sim 10^6$ años, (e.g. Mac Low & Klessen 2004). Sin embargo Mouschovias et al. (2006) muestran que la escala de tiempo de la difusión ambipolar depende de las condiciones iniciales. Éstas son parámetros observacionales y no una predicción de la teoría. De hecho la escala de tiempo de la difusión ambipolar puede ser tan corta como 10^6 años.

2.2. Formación estelar inducida por la turbulencia

Este escenario se basa en que la formación estelar está regulada por la turbulencia interestelar y en la suposición de que la energía turbulenta es mayor que la magnética. La evidencia de que la turbulencia es importante se basa en los anchos de las líneas de emisión que se observan en las nubes moleculares: éstos son claramente más grandes que el ancho térmico esperado. Myers & Goodman (1988) mostraron que la dispersión de velocidades causante del ensanchamiento no térmico de las líneas tiene un origen magnético, es decir que en las nubes

moleculares la turbulencia es de origen MHD. Los modelos de nubes moleculares turbulentas predicen que ésta es suficiente para proporcionar soporte frente a la gravedad a gran escala en las nubes moleculares, pero a la vez, la misma turbulencia puede generar a nivel local regiones o fluctuaciones de alta densidad (*clumps*), gravitatoriamente inestables y que dan lugar a formación estelar “rápida”, si los comparamos con los tiempos de escalas típicos de la difusión ambipolar (Mac Low & Klessen 2004; Ballesteros-Paredes & Hartmann 2006a). El principal problema de este escenario es que la escala de tiempo de la turbulencia es corta (menos de 10^6 años), y por tanto es necesario fuentes generadoras de turbulencia de manera más o menos continua. Este problema se resuelve parcialmente porque tanto teóricamente como observacionalmente los defensores de este escenario encuentran evidencias de que las nubes moleculares son objetos transitorios en nuestra galaxia, es decir que la vida media de una nube molecular es como mucho unos pocos millones de años (Hartmann et al. 2001). Las fuentes generadoras de turbulencia más importantes son las producidas a gran escala (Ballesteros-Paredes et al. 2006). Ejemplos de este tipo de fuentes son las inestabilidades gravitatorias creadas por la interacción disco-halo o en los brazos espirales (Gómez de Castro & Pudritz 1992; Li et al. 2005).

En el modelo turbulento estándar el campo magnético es débil y por tanto las nubes moleculares y los núcleos densos son siempre magnéticamente supercríticos. Además la turbulencia hace que la distribución del campo magnético no sea coherente sino caótica (Li & Nakamura 2004).

3. Técnicas observacionales para estudiar el campo magnético

Existen diferentes técnicas que nos permiten estudiar las propiedades de los campos magnéticos en las nubes moleculares, la mayoría se basan en la detección de emisión polarizada. Las medidas de polarización generalmente se expresan en la forma de los parámetros de Stokes (I, Q, U, V), en donde I es la intensidad total de la radiación, Q y U son las dos polarizaciones lineales (ortogonales entre sí) y V es la polarización circular. En el caso de la polarización lineal, la intensidad polarizada viene dada

por:

$$I_p = \sqrt{Q^2 + U^2} - \sigma_{I_p}^2 \quad (1)$$

en donde σ_{I_p} es el ruido *rms* asociado a la intensidad de polarización y se introduce como corrección de sesgo ($Q^2 + U^2$ es una cantidad intrínsecamente positiva). El grado de polarización lineal es $p = I_p/I$. El ángulo de polarización es:

$$\phi = 1/2 \tan^{-1}(Q/U) \quad (2)$$

3.1. Polarización del polvo interestelar

Desde los años cuarenta se sabe que la luz estelar en algunas regiones está parcialmente absorbida por la presencia de nubes de gas y polvo en la trayectoria que describe la luz hasta llegar a nosotros, y que además la emisión está polarizada linealmente (Hiltner 1949; Hall 1949). Al poco del descubrimiento de la polarización de la luz estelar causada por la absorción del polvo interestelar, aparecieron dos modelos completamente diferentes para explicar la polarización.

Davis & Greenstein (1951) propusieron que los granos se alinean debido a la relajación paramagnética. En las condiciones del medio interestelar los granos de polvo no esféricos giran rápidamente. La presencia en los granos de polvo de materiales paramagnéticos, o bien de incrustaciones ferromagnéticas, provocan en presencia de un campo magnético exterior que se generen unas fuerzas de torsión. Éstas tienden a alinear el eje menor (y de rotación) con la dirección del campo magnético.

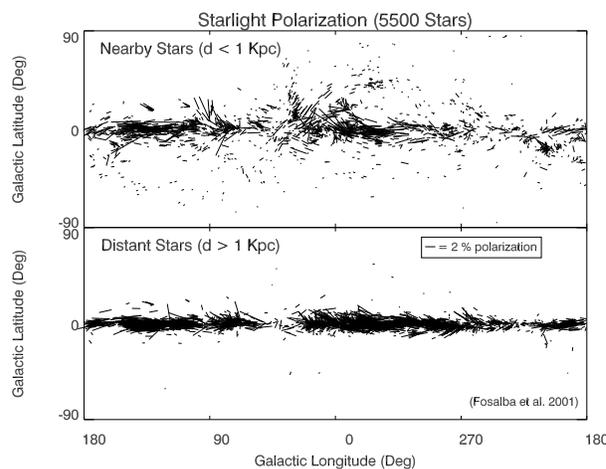


Figura 2 — Polarización de la luz estelar en la Vía Láctea para estrellas cercanas (panel de arriba) y lejanas (panel de abajo). Figura de Fosalba et al. (2002b).

Por otra parte, Gold (1951) sugirió que el polvo interestelar se puede alinear mecánicamente, es decir si está inmerso en una corriente de partículas que se muevan a velocidades supersónicas (el polvo se alinea paralelo a la dirección de la corriente). Sin embargo ambos mecanismos no acabaron de ser satisfactorios: el tiempo característico de relajación paramagnético es mayor que el tiempo característico de desalineamiento causado por las colisiones con átomos y moléculas, mientras que se ha visto que la alineación mecánica es posible que se pudiera producir sólo en muy determinadas condiciones y no es un proceso ubíquo.

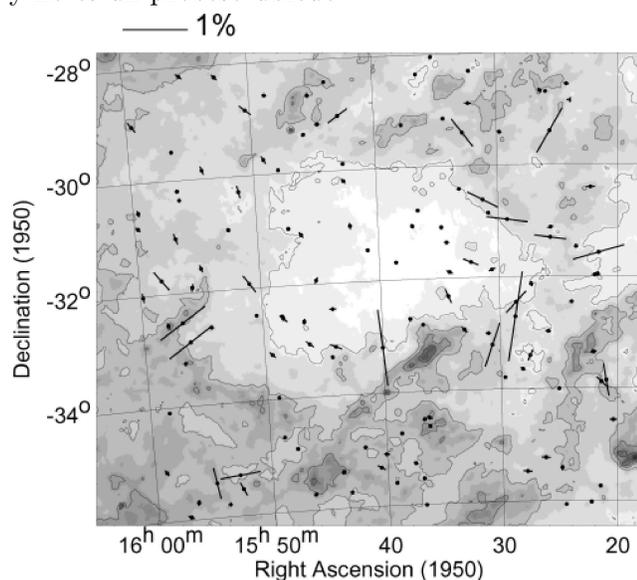


Figura 3 — Imagen de la emisión en $100 \mu\text{m}$ de IRAS en la región de Lupus 1. Las barras indican la dirección de polarización estelar (la longitud es proporcional al grado de polarización). Imagen de Alves & Franco (2006).

Los granos de polvo en el medio interestelar no son una población homogénea ni en cuanto a composición, estructura interna y tamaño (Draine 2003). Esto hace que intentar modelar el comportamiento de los granos de polvo en presencia de campos magnéticos sea una tarea muy complicada, y de los diferentes posible mecanismos no está del todo claro cual es el que domina (véase por ejemplo Lazarian 2003). A pesar de esto, se cree que los granos de polvo de tamaño mayor que $0.1 \mu\text{m}$ giran a velocidades muy por encima a la rotación térmica debido a las fuerzas de torsión generadas ya sea por formación del H_2 (Purcell 1977) o por radiación estelar (Draine & Weingartner 1996). En estas circunstancias la disipación paramagnética sí puede ser un proceso eficiente.

Absorción polarizada (por el polvo) de estrellas de fondo

Si una fracción de las partículas de polvo está alineada con el campo magnético la absorción es más efectiva en la dirección perpendicular al campo magnético, y por tanto la luz estelar tras atravesar una nube molecular nos aparecerá polarizada linealmente, con el vector de polarización paralelo a la componente del campo magnético en el plano del cielo. El inconveniente principal de esta técnica es que no permite un muestreo uniforme del campo magnético y que dado que la fracción de polarización suele ser de unos pocos %, este muestreo se limita a regiones de relativamente baja extinción visual. Por esto esta técnica es válida si se quiere cartografiar el campo magnético a gran escala en las regiones más difusas de la nubes moleculares (e.g. Heiles 2000; Alves & Franco 2006).

Emisión polarizada del polvo

Dada las bajas temperaturas que hay en nubes moleculares ($10\text{--}30 \text{ K}$), los granos de polvo emiten la radiación principalmente en el rango de ondas del infrarrojo lejano y en el submilimétrico. De la misma manera que los granos de polvo absorben y polarizan parcialmente la luz estelar que atraviesa las nubes moleculares, estos granos de polvo también emiten radiación polarizada linealmente por el mismo mecanismo. Las primeras detecciones de la emisión polarizada se realizaron con telescopios aerotransportados en el infrarrojo lejano (Cudip et al. 1982; Hildebrand et al. 1983).

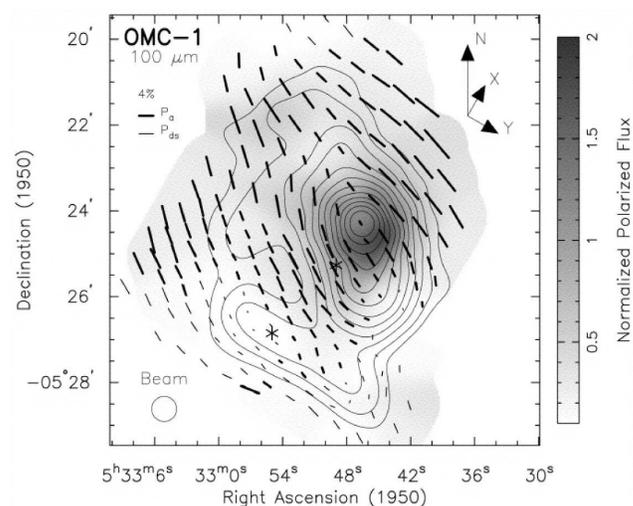


Figura 4 — Cartografiado de la emisión polarizada del polvo (barras) en la región de formación estelar de alta masa de Orion-K/Irc2. Los contornos y escala de grises muestran la intensidad total de la emisión del polvo a $100 \mu\text{m}$. Figura de Scheuning (1998).

El gran avance realizado en el último decenio en el desarrollo de cámaras bolométricas submilimétricas

cas, y en particular en telescopios como el JCMT y el CSO, ha permitido una eclosión de observaciones de la emisión polarizada en nubes moleculares a resoluciones angulares del orden de $\sim 15''$, cartografiando regiones entre unas pocas décimas a varios parsec (e.g. Matthews 2005). También la instalación de placas polarizadoras en telescopios de síntesis de abertura milimétrica ha permitido resolver la emisión polarizada a resoluciones angulares de solo unos pocos segundos de arco (e.g. Rao et al. 1998; Lai et al. 2001).

3.2. Emisión polarizada de moléculas

Bajo la acción de un campo magnético los estados rotacionales se desdoblán en subniveles magnéticos (excepto para el estado fundamental). Esto permite que en determinadas condiciones la emisión aparezca parcialmente polarizada. Los dos mecanismos más importantes son el efecto Zeeman y el efecto Goldreich-Kylafis. Sin embargo aunque potencialmente la detección de la emisión polarizada en líneas moleculares nos podría dar información valiosa (por ejemplo el estudio del campo magnético en las diferentes componentes en velocidad de la nube), observacionalmente es la técnica que menos resultados ha proporcionado, por las condiciones restrictivas que son necesarias para detectar la emisión polarizada.

Efecto Zeeman

Los campos magnéticos del medio interestelar producen un desdoblamiento de las líneas moleculares, con una separación $\Delta\nu_Z$, que viene dada por:

$$\Delta\nu_Z = \frac{g\mu_o}{\hbar} B \quad (3)$$

en donde B es la intensidad del campo magnético, g es el factor de Landé de la transición observada y μ_o es el momento magnético de la molécula. Sólo si $\Delta\nu_Z$ es lo suficientemente grande, es decir del orden de magnitud del ancho de línea, se podrá detectar el desdoblamiento y por tanto medir directamente la intensidad del campo magnético. Sin embargo, en las condiciones del medio interestelar, sólo se puede medir el efecto Zeeman si el momento magnético de la molécula o bien el campo magnético son grandes. En el primer caso, solo aquellas moléculas que tienen un momento angular electrónico tienen un momento magnético grande, que es del orden del magnetón de Bohr, $\mu_o = e\hbar/2m_e$ (m_e es la masa del electrón). Ejemplo de este tipo de moléculas con abundancias su-

ficientes en las nubes moleculares para ser detectadas son el CN, OH, o C₂S (Heiles et al. 1993). Para el resto de moléculas el momento magnético es del orden del magnetón nuclear, $\mu_o = e\hbar/2m_n$ (m_n es la masa del núcleo), que es 3 órdenes de magnitud más pequeño que el magnetón de Bohr. En la mayoría de casos en la que se puede detectar el efecto Zeeman, $\Delta\nu_Z$ es significativamente más pequeño que el ancho de la línea, lo que hace que el desdoblamiento no sea observable directamente. En estos casos, el efecto Zeeman se puede detectar midiendo la polarización circular (es decir el parámetro de Stokes V), ya que:

$$V(\nu) = 2 \frac{g\mu_o}{h} \frac{dI}{d\nu} B_{los} \quad (4)$$

en donde $dI/d\nu$ es la derivada en frecuencia de la intensidad de la línea. En este caso el efecto Zeeman solo permite medir la componente del campo magnético a lo largo de la visual. En la figura 5 se muestra un ejemplo de clara detección del efecto Zeeman.

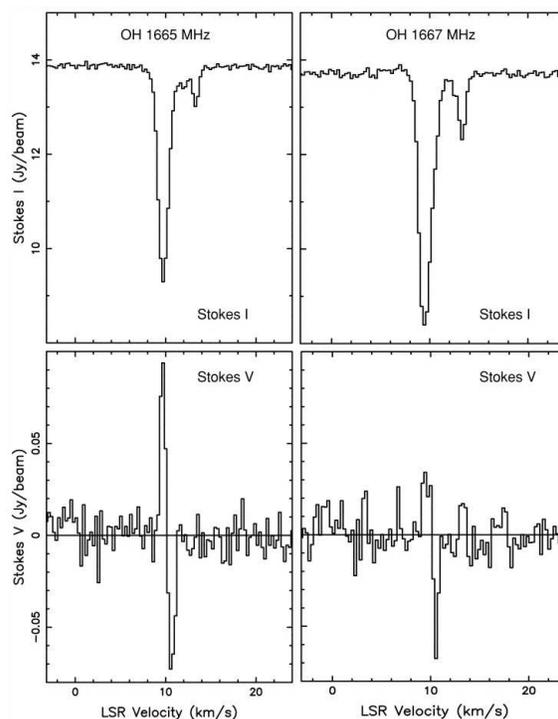


Figura 5 — Ejemplo de la detección del efecto Zeeman en la línea de OH a 1667 MHz (Crutcher et al. 1999a). Los paneles de arriba y abajo muestran la emisión en el parámetro de Stokes I y V, respectivamente.

Tal como se muestra en la ecuación 3 el desdoblamiento no depende de la frecuencia, por lo que

las transiciones a más baja frecuencia suelen ser las óptimas para poder medir el efecto Zeeman (e.g. Heiles & Crutcher 2005). Tradicionalmente, las líneas más usadas para detectar el efecto Zeeman son la línea de 21 cm del hidrógeno atómico y las de 18 cm del OH. La primera traza más bien nubes difusas atómicas, mientras que las transiciones a 18 cm del OH suelen trazar las regiones de más baja densidad en la nubes moleculares, $n(\text{H}_2) \simeq 10^3 \text{ cm}^{-3}$. Dada la baja frecuencia de estas líneas, las observaciones realizadas con telescopios de una antena proporcionan una resolución angular muy baja ($> 10'$).

Por otra parte el Very Large Array (VLA) proporciona resoluciones angulares de $3''$ a $60''$ a las longitudes de onda de 18 cm, lo que permite cartografiar la intensidad del campo magnético en la visual (e.g. Crutcher et al. 1999b). El OH tiene transiciones a 2.2 cm que trazan gas a altas densidades y temperaturas, $\simeq 10^7 \text{ cm}^{-3}$ y $\simeq 150 \text{ K}$, (Gusten et al. 1994). Por tanto, en principio podrían ser buenas candidatas para detectar el campo magnético en las regiones densas alrededor de protoestrellas. Desafortunadamente, el OH no es una molécula trazadora de gas denso, pues su abundancia disminuye proporcionalmente al aumento de la densidad (Leung et al. 1984). El CN o el CCS se pueden usar como alternativa al OH para detectar el campo magnético en las regiones de densidad moderada o alta de las nubes moleculares. Sin embargo, el desdoblamiento Zeeman es muy pequeño ($\sim 1 \text{ kHz mG}^{-1}$, Bel & Leroy 1989), y esto hace que en la actualidad se dispongan de muy pocas detecciones del efecto Zeeman, y de hecho sólo para la molécula del CN (Crutcher et al. 1999b).

Un caso aparte son los máseres. Por ejemplo en el caso del agua o de OH, el efecto máser se produce a densidades muy altas ($n(\text{H}_2) \simeq 10^7\text{--}10^9 \text{ cm}^{-3}$) en donde el campo magnético puede ser lo suficientemente alto ($\gg 1 \text{ mG}$) y las líneas lo suficientemente estrechas para que el desdoblamiento Zeeman sea observable (Sarma et al. 2002).

Polarización lineal: Efecto Goldreich-Kylafis

Las líneas espectrales moleculares también pueden presentar polarización lineal, conocido como efecto Goldreich-Kylafis (Goldreich & Kylafis 1981). Sin embargo las condiciones para que esto ocurra son bastante complicadas (Heiles et al. 1993).

En presencia de un campo magnético externo, los estados rotacionales se dividen en subniveles magnéticos π y σ , que son ortogonales y están

orientados con respecto la dirección del campo magnético. Si el campo de radiación responsable de la excitación de estas transiciones es anisotrópico, entonces las poblaciones de los subniveles π y σ son afectados de manera diferente por la absorción y la emisión estimulada de la radiación, lo que genera que las componentes π y σ tengan intensidades diferentes, y por tanto la emisión molecular provocada por el campo de radiación tenga una polarización neta. Si la intensidad de la componente σ es mayor que la de la componente π , la emisión tendrá una polarización lineal neta perpendicular a la dirección del campo magnético. En el caso opuesto será paralela. Sin embargo, hay que tener en cuenta que las poblaciones de los niveles también se pueblan via colisiones, y éstas no distinguen entre subniveles magnéticos, es decir generan emisión no polarizada. Por tanto es condición necesaria que la emisión no este completamente dominada por colisiones.

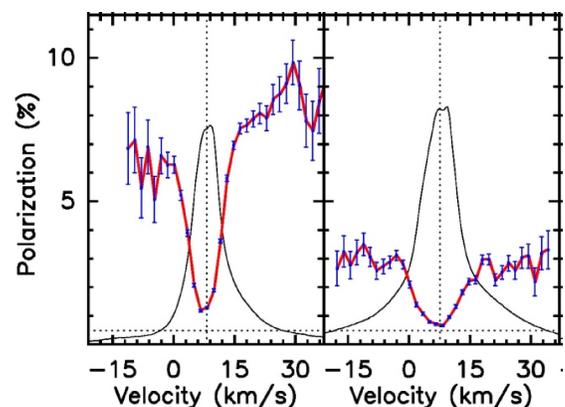


Figura 6 — Ejemplo de la polarización lineal de líneas moleculares térmicas, obtenido con el polarímetro del JCMT (Girart et al. 2004). La figura muestra dos espectros de la intensidad total de la transición rotacional CO $J = 2-1$ (línea con trazo delgado) en la región de Orion IRc2/KL. Superpuesto a estos espectros se muestran la fracción de polarización lineal (línea con trazo grueso y barras verticales que indican la incertidumbre de la medida).

Dada la posibilidad de que la polarización lineal neta observada sea paralela o perpendicular a la componente del campo magnético en el plano del cielo, es necesario disponer de un análisis detallado del transporte radiativo de las condiciones físicas en las que se produce la emisión. Los trabajos pioneros de Goldreich y Kylafis (Goldreich & Kylafis 1981, 1982; Kylafis 1983), realizados usando

sólo dos niveles rotacionales, mostraron que la dirección de la polarización depende de la relación entre la visual, la dirección del campo magnético y la dirección del gradiente de velocidad. La fracción de polarización máxima ocurre a una profundidad óptica de $\tau = 1$ y puede alcanzar valores de hasta $\sim 20\%$. Deguchi & Watson (1984) encontraron que si se utilizan varios niveles rotacionales en el cálculo, la fracción de polarización máxima derivada disminuye un factor dos. Lis et al. (1988) mostraron que los gradientes en la temperatura de excitación también pueden generar polarización lineal.

La detección de la emisión polarizada linealmente fue una tarea infructuosa durante casi las dos décadas siguientes a la publicación del trabajo de Goldreich y Kylafis (Wannier et al. 1983; Barvainis & Wootten 1987; Lis et al. 1988; Glenn et al. 1997). No fue hasta 1999 que se reportó la primera detección en una nube molecular del centro galáctico (Greaves et al. 1999). Ese mismo año Girart et al (1999) realizaron el primer cartografiado de la polarización lineal molecular. Estas observaciones se hicieron simultáneamente con la observación de la polarización del polvo. Desde entonces, las detecciones reportadas han sido escasas, pero todas ellas con resultados interesantes (e.g. Lai et al. 2003; Cortes et al. 2005, 2006).

3.3. Análisis espectral de moléculas ionizadas

Una técnica novedosa es la de intentar obtener información del campo magnético a partir del análisis espectral de la emisión de moléculas ionizadas (Houde et al. 2000a, 2000b). En presencia de un campo magnético los iones son forzados a realizar movimientos giromagnéticos. En regiones débilmente ionizadas en las que haya un flujo de partículas con una velocidad neta no alineada con el campo magnético, éste, si es lo suficientemente intenso, tenderá a frenar el movimiento de los iones en la dirección perpendicular al campo. Como consecuencia las líneas de emisión de las moléculas ionizadas presentarán un perfil más estrecho y las alas de alta velocidad (que se observan en moléculas neutras) quedarán significativamente suprimidas. Este efecto ocurre siempre y cuando la velocidad media local no sea nula.

Las líneas de emisión molecular son en la mayor parte de los casos mucho más anchas que la anchu-

ra térmica, lo cual es resultado de la presencia de la turbulencia. En estos casos sí que debería observarse el estrechamiento de los perfiles de las líneas de especies ionizadas. Observaciones de diferentes transiciones de HCN, HCO^+ , N_2H^+ e isótopos en varias nubes moleculares densas sirvieron a Houde et al. (2000a, 2000b, 2002) para demostrar este efecto (véanse las figuras 5 y 6).

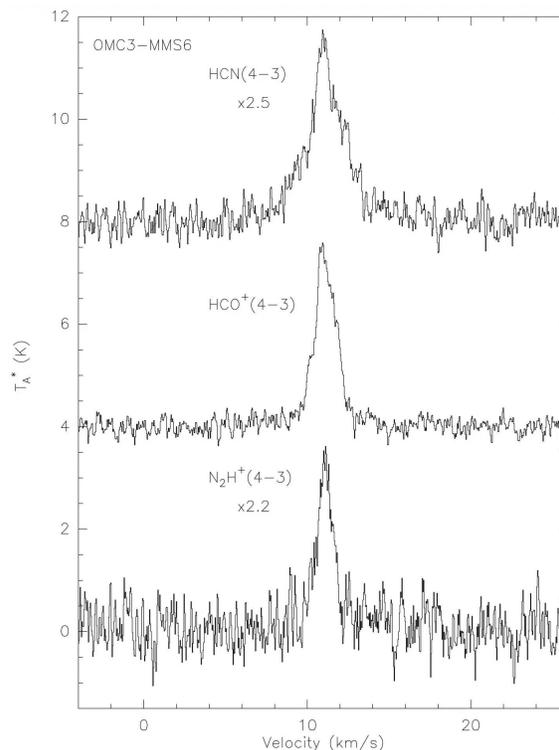


Figura 7 — Espectros de la transición rotacional $J = 4-3$ para tres moléculas, dos de ellas ionizadas en la región de formación estelar OMC-MMS6 (Houde et al. 2000a). Obsérvese que la molécula neutra tiene un ancho de línea más grande que las dos moléculas ionizadas, lo cual se interpreta como una evidencia de la presencia de un campo magnético en la nube.

Además Houde et al. observaron regiones de núcleos densos poco masivos en los que las líneas de emisión son estrechas ($\Delta v \sim 0,4$ km/s), y por tanto en donde la contribución térmica a la anchura es comparable a la turbulenta, y encontraron que tal como se espera en estos casos, no hay una diferencia significativa en la anchura espectral para moléculas ionizadas y neutras. Esta técnica aparte de demostrar que el campo magnético es lo suficientemente intenso para generar la diferencia de anchuras, no proporciona directamente información sobre su propiedades. Sin embargo si se conoce el campo de velocidades de la nube a gran

escala, entonces la medida de la razón entre anchos de línea de moléculas ionizadas y neutras sirve para poder estimar la inclinación de la dirección de campo magnético con respecto a la visual (Houde et al. 2002).

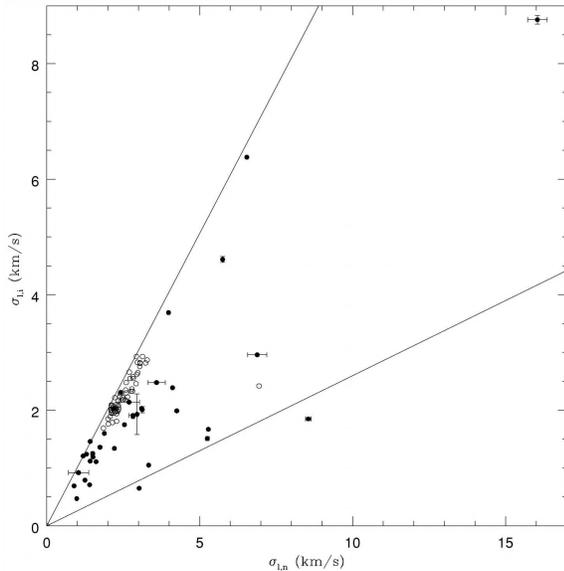


Figura 8 — Anchura de línea para moléculas ionizadas (σ_i) con respecto a la anchura para moléculas neutras (σ_n) observada en una muestra de varias posiciones en las nubes moleculares de M17 y Orion A (Houde et al. 2002). Las líneas muestran el rango mínimo y máximo (σ_i/σ_n 0.3 y 1.0, respectivamente) que teóricamente se espera en una nube molecular turbulenta.

3.4. Estrategias observacionales

Como acabamos de ver existen diferentes técnicas que nos permiten obtener información de los campos magnéticos en las nubes moleculares. Sin embargo todas ellas sólo nos proporcionan información parcial. Así, idealmente la combinación de varias de dichas técnicas nos permitirían un conocimiento completo del campo magnético. Actualmente, son muy pocos los casos en los que se haya conseguido este objetivo (véase más abajo el ejemplo en la región de alta masa de DR21(OH)).

- *Nubes moleculares a densidades bajas o moderadas (escalas ≥ 1 pc).* En estas regiones, las dos técnicas más apropiadas son las observaciones de polarización del polvo tanto en emisión como en absorción (de la luz estelar), las cuales pueden ser complementarias: en las regiones de más baja densidad columnar, donde la emisión del polvo es de-

masiado débil, el uso de estrellas de fondo es adecuado, mientras cuando la densidad columnar es suficientemente alta para detectar la emisión polarizada del polvo, la extinción puede ser demasiado alta para usar estrellas de fondo. Además estas dos técnicas se pueden complementar con observaciones del efecto Zeeman del OH.

- *Regiones densas de las nubes moleculares, flujos moleculares (escalas de $\sim 0,1-1$ pc).* Las observaciones de la emisión polarizada linealmente del polvo y de líneas moleculares tanto con telescopios de una antena como con interferómetros proporcionan información útil. También la detección del efecto Zeeman de moléculas con un momento dipolar grande (CN, CCS) pueden ser de utilidad para estudiar el campo a estas escalas.

- *Discos protoplanetarios y densidades muy altas (escalas de 100 AU).* Este tipo de regiones requiere instrumentación que proporcione una resolución angular muy alta ($< 1''$), es decir mediante el uso de interferómetros sub/milimétricos y la técnica VLBI. Estas regiones se pueden estudiar mediante observaciones de máseres de agua y OH, aunque con suficiente sensibilidad se podrían llevar a cabo observaciones de la emisión polarizada del polvo.

Hemos visto anteriormente que la polarización lineal del polvo y líneas moleculares permiten estudiar la morfología del campo magnético proyectado en el plano del cielo. Pero indirectamente se puede derivar la componente en el plano del cielo de la intensidad del campo magnético, B_p : suponiendo que el ángulo de dispersión de la polarización es debido a las perturbaciones en las líneas de campo magnético producidas por la turbulencia o por ondas Alfvén, B_p viene dada dado por (Chandrasekhar & Fermi 1953; Lai et al. 2001):

$$B_p = Q \sqrt{4\pi\rho} \frac{\delta v_{los}}{\delta\theta_{int}} \quad (5)$$

En esta ecuación (C–F de aquí adelante) ρ es la densidad de masa promedio, δv_{los} es la dispersión en velocidad en la visual, $\delta\theta_{int}$ es la dispersión angular de las líneas de campo, que coincide con la dispersión medida en el plano del cielo de los ángulos de polarización (Houde 2004). $Q = 1$ corresponde a la ecuación C–F original dada por Chandrasekhar & Fermi (1953). Simulaciones de nubes magnetizadas turbulentas sugieren que $Q \simeq 0,5$ (Ostriker et al. 2001).

El parámetro clave en los modelos de difusión ambipolar para saber si el campo magnético es suficiente para proporcionar soporte a las nubes fren-

te a la gravedad es el cociente de masa a flujo magnético M/Φ_B (Crutcher 1999): $M/\Phi_B \propto N(\text{H}_2) \times B$, en donde $N(\text{H}_2)$ es la densidad columnar del gas molecular. Cuando la gravedad y el campo magnético están en equilibrio entonces el valor crítico es $(M/\Phi_B)_{crit} = 1/\sqrt{63G}$. Normalmente en la literatura se da el cociente masa-flujo magnético en unidades del valor crítico, $\lambda \equiv (M/\Phi_B)/(M/\Phi_B)_{crit}$.

Otro parámetro muy importante es el cociente entre la energía turbulenta y la energía magnética, β_{turb} . Este cociente depende del ancho de línea turbulento, σ_{turb} , y de la velocidad Alfvénica, V_A : $\beta_{turb} = \sigma_{turb}^2/V_A^2$. Observacionalmente este parámetro se puede calcular a partir de la dispersión intrínseca los vectores de polarización (Lai et al. 2002): $\beta_{turb} \propto \delta\theta_{int}^2$.

4. La perspectiva observacional

4.1 Observaciones a gran escala

Las observaciones de la polarización de la luz estelar en regiones con una extinción visual baja o moderada son un instrumento eficaz para poder estudiar a gran escala el campo magnético de la galaxia. Así por ejemplo Heiles (2000) y Fosalba et al. (2002a, 2002b: véase Fig. 1) muestran la distribución de la polarización estelar en la Vía Láctea. En general las líneas de campo siguen las estructuras galácticas. Así en el plano el plano galáctico las líneas de campo magnético son paralelas a este. También se observan perturbaciones debidas a supernovas.

Continuando con observaciones a gran escala, pero realizadas con el polarímetro SPARO en el telescopio de 2 m a $450 \mu\text{m}$ en el polo sur Li et al. (2006) han observado varias nubes moleculares gigantes en el plano galáctico. Con una resolución angular de $4'$ (~ 3 pc a la distancia de las regiones observadas) cartografian la emisión del polvo y su polarización a escalas de unas pocas decenas de pc. Li et al. encuentran una correlación de la dirección del campo magnético con la orientación del disco galáctico, lo que sugiere que la dirección del campo magnético galáctico se preserva durante la formación de las nubes moleculares gigantes. Estudiando la dispersión de los vectores de polarización Li et al. obtienen que la densidad de energía magnética es comparable a la densidad de energía turbulenta.

4.2 Regiones densas de la nubes moleculares. Escalas intermedias

Los telescopios de infrarrojo lejano aerotransportados (KAO) y submilimétricos (JCMT, CSO) han proporcionado numerosos trabajos sobre la polarización del polvo con resoluciones angulares entre $14''$ y $35''$ cartografiando regiones de un tamaño típicamente entre 0.1 y 1 pc (e.g. Vallée & Bastien 1995; Dotson et al. 2000; Matthews et al. 2001; Chrysostomou et al. 2002; Houde et al. 2004). Estos estudios muestran que la emisión polarizada del polvo es ubicua, es decir se detecta en todas las regiones observadas, típicamente con una fracción de polarización del 1% al 10%. Una característica de las regiones observadas es que la fracción de polarización disminuye al aumentar la intensidad el polvo (véase Fig. 9). Esto puede indicar que en las regiones más intensas hay una disminución de la eficiencia del alineamiento de los granos de polvo (Lazarian et al. 1997), o bien que el campo magnético tiene una estructura no resuelta por las observaciones, lo que provocaría un efecto de dilución (Fiege & Pudritz 2000; Gonçalves et al. 2005).

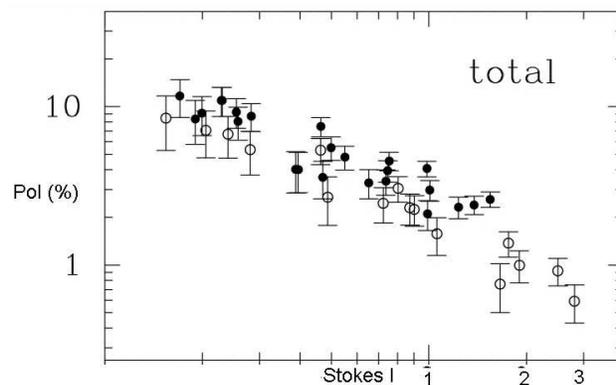


Figura 9 — La variación del porcentaje de polarización con respecto la intensidad total (Stokes I) en W51 e1/e2 (Lai et al. 2001).

Generalmente en las regiones observadas los vectores de polarización del polvo muestran una distribución suave, sin cambios bruscos, y con unos valores en la dispersión no demasiado grandes, lo cual indica una morfología del campo magnético relativamente uniforme (véase Fig. 4). Esto a su vez sugiere que los campos magnéticos son lo suficientemente intensos para no estar significativamente perturbados por la turbulencia.

A partir de las observaciones polarimétricas, principalmente del efecto Zeeman, Crutcher (1999) encuentra que la intensidad del campo magnético aumenta con la densidad como $B \propto \rho^\kappa$, con $\kappa=0.47\pm 0.08$. Este índice concuerda con la predicción de los modelos de difusión ambipolar, en los que se espera que $\kappa=0.5$. En el caso de colapso de una nube con un campo magnético débil es de esperar que $\kappa=2/3$ (Mestel 1966). Basu (2000) ha calculado de la distribución esperada del campo magnético en función de la densidad y de la dispersión de velocidad, σ_v para nubes moleculares triaxiales con el campo magnético orientado a lo largo del eje menor. Los datos observacionales confirman la predicción realizada por Basu (véase Fig. 10), lo cual indica que los campos magnéticos juegan un papel importante en la evolución de las nubes moleculares.

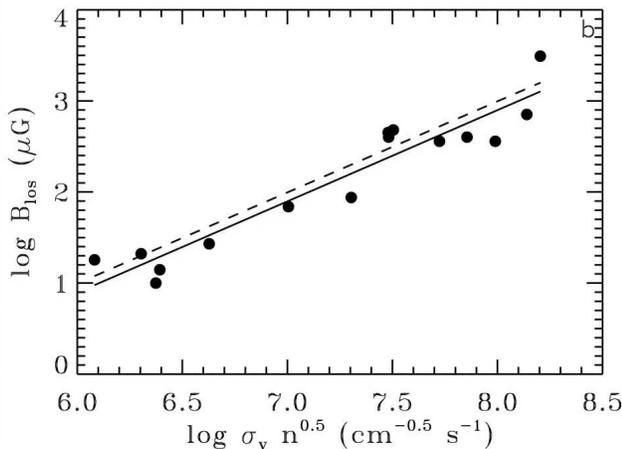


Figura 10 — Gráfica logarítmica de B_{los} vs. $\sigma_v \rho^{1/2}$ (Basu 2000). La línea continua muestra el mejor ajuste a los datos: La discontinua los valores esperados en el caso de nubes magnéticamente críticas (el cociente masa-flujo magnético es $\lambda = 1$).

4.3 Núcleos densos sin estrellas

En la actualidad hay mucho interés en estudiar este tipo de regiones, pues probablemente son el estadio evolutivo previo a la formación de un objeto protoestelar en su interior.

Observaciones del efecto Zeeman en CCS y OH en estas regiones todavía no han dado resultados positivos (Crutcher et al. 1993; Levin et al. 2001). En cambio, sí se han podido cartografiar la emisión polarizada del polvo en varias núcleos densos prestelares (Crutcher et al. 2004; Kirk et al. 2006).

En las regiones estudiadas los ejes magnéticos aparecen ligeramente desalineados ($\sim 20^\circ$) con el eje menor de los núcleos. A partir de la expresión C–F los valores que se obtienen de la componente de la intensidad del campo magnético en el plano del cielo están en el rango $B_P \simeq 10\text{--}160 \mu\text{G}$. En todas las regiones observadas el cociente entre la masa y el flujo magnético da valores ligeramente supercríticos ($\lambda \simeq 1$), pero dada la incertidumbre geométrica (sólo se mide la componente en el plano del cielo del campo) no se puede descartar que alguno de estos núcleos sean subcríticos. Si se tiene en cuenta las energías térmica, turbulenta y magnética y la presión exterior, entonces estos núcleos parecen estar virializados (Kirk et al. 2006).

A pesar que la muestra de objetos estudiada es pequeña, parece haber evidencia de evolución en las propiedades del campo magnético con la densidad. Así, en los núcleos sin estrellas que presentan un densidad más baja, el campo magnético es más débil y el soporte gravitatorio aparentemente lo proporciona principalmente la energía térmica, mientras que en los núcleos más densos el soporte gravitatorio se reparte a partes iguales entre la energía térmica, turbulenta y magnética (Kirk et al. 2006). En la Figura 11 se muestra el caso de un núcleo prestelar de baja densidad.

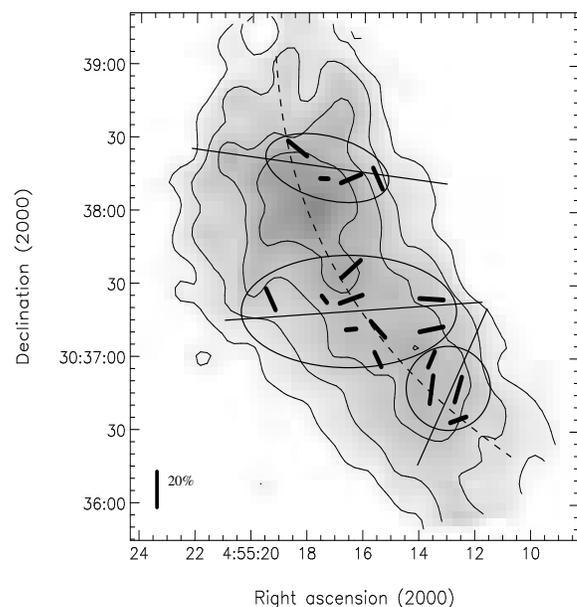


Figura 11 — Cartografiado de la emisión del polvo en el núcleo denso prestelar L1571B. Las barras indican la dirección del campo magnético. Figura de Kirk et al. (2006).

4.4 Cartografiado a alta resolución angular

La instalación en 1997 de placas polarizadoras de cuarto de onda a 1 mm en el interferómetro de BIMA abrió la posibilidad de obtener imágenes de la emisión polarizada del polvo y línea a alta resolución angular (Rao et al. 1998; Girart et al. 1999). Esta misma técnica ha sido ya usada con éxito con el Submillimeter Array (SMA). Los resultados obtenidos hasta el momento por ambos instrumentos se pueden considerar como la antesala de lo que ALMA proporcionará gracias a su enorme sensibilidad.

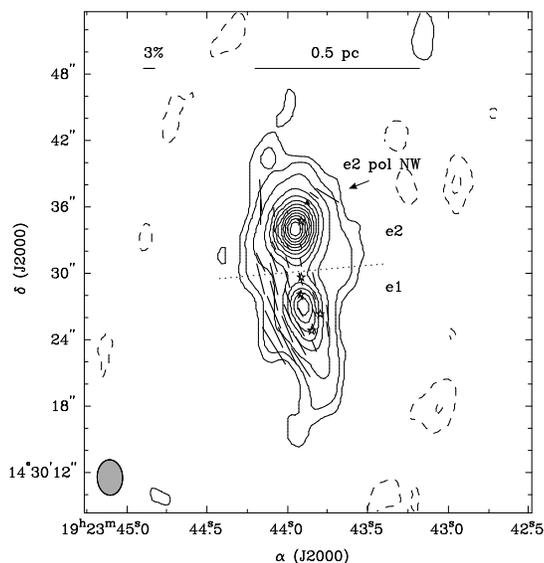


Figura 12 — Cartografiado de la polarización (barras) y la emisión total (contornos) del polvo a 1.3 mm obtenido con BIMA en los núcleos moleculares masivos W51 e1/e2 (Lai et al. 2001).

En la mayoría de regiones observadas con BIMA a alta resolución angular (e.g. Fig. 12) se encuentran propiedades de la emisión polarizada similares a las que ya se habían obtenido a más baja resolución angular con telescopios como el JCMT: es decir por regla general se observa una disminución de la polarización al aumentar intensidad del polvo; los vectores de polarización (y por tanto del campo magnético) muestran una estructura coherente y uniforme (e.g. Lai et al. 2001; 2002; Cortes & Crutcher 2006). Esto es una indicación de que los campos magnéticos también son intensos e importantes en el rango de densidades trazadas por este tipo de observaciones ($\sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$). Utilizando la ecuación C-F se obtiene que los campos magnéticos tienen intensidades típicas del orden de $B_p=1 \text{ mG}$. En la mayoría de casos las re-

giones observadas son magnéticamente supercríticas y la energía magnética es mayor que la turbulenta. Aunque en algún caso la energía magnética y turbulenta combinadas parecen ser suficientes para proporcionar soporte frente a la gravedad (Matthews et al. 2005). Hay un par de regiones en las que se encuentra evidencia de una morfología de reloj de arena (Lai et al. 2002; Cortes et al. 2006), aunque el ejemplo más espectacular es el de NGC 1333 IRAS 4A (véase § 4.6).

Comentario aparte merecen los resultados que se han obtenido recientemente en observaciones polarimétricas de máseres de agua a muy alta resolución angular ($\sim \text{mas}$) con el VLBA en la región de formación estelar masiva de Cefeo A (Vlemmings et al. 2006). La intensidad del campo magnético medida es de hasta 600 mG en una región que parece estar asociada al disco circunestelar (de confirmarse esto sería la primera vez que se mide el campo magnético en un disco circunestelar). Del análisis de los datos se encuentra que el campo magnético probablemente juega un papel importante en dar forma al flujo expansivo asociado a la protoestrella masiva de Cep A.

4.5. DR21(OH): Observaciones complementarias del campo magnético

DR21(OH) es una región de formación estelar de alta masa que forma parte del complejo de nubes moleculares de Cygnus X. La distancia a esta región es de unos 3 kpc. Está formada por dos núcleos moleculares densos, MM 1 y MM 2, separados una distancia de 0.1 pc y que contienen una masa total de $\sim 125 M_\odot$ y una luminosidad total de unos $7000 L_\odot$. La ausencia de regiones HII ultracompactas y la presencia de flujos moleculares sugiere que las fuentes jóvenes masivas están todavía en una fase protoestelar. Ésta es una de las pocas regiones en las que se ha podido obtener información sobre el campo magnético utilizando las diferentes técnicas descritas anteriormente:

- El efecto Zeeman ha sido detectado en líneas de CN en ambos núcleos a partir de observaciones realizadas con el telescopio IRAM 30 m con una resolución angular de $23''$ (Crutcher et al. 1999b). Las componentes en la visual del campo magnético medido son de $B_{\text{los}}=0.4$ y 0.7 mG para MM 1 y MM 2, respectivamente. Estas intensidades corresponden a una región de alta densidad, $n(\text{H}_2) = 10^5\text{--}10^6 \text{ cm}^{-3}$, que es la densidad trazada

por las líneas de CN.

- La emisión polarizada del polvo ha sido detectado con el JCMT a 0.85 mm (Vallée & Fiege 2006) y con BIMA a 1.3 y 2.7 mm (Lai et al. 2003a; Cortes et al. 2006). Los datos del JCMT muestran que DR 21(OH) se encuentra embebido en un filamento molecular denso de 4 pc de largo y menos 1 pc

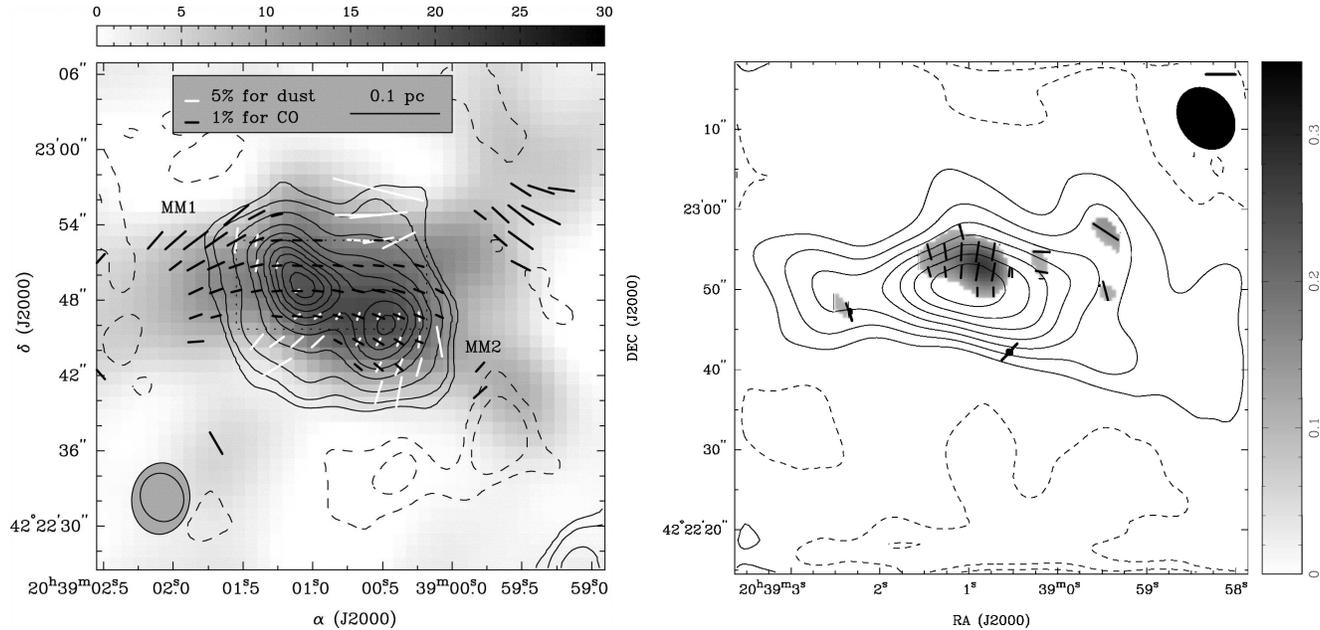


Figura 13 — Panel izquierdo: Polarización del polvo a 1.3 mm (barras blancas) y del CO $J=2-1$ (barras negras) en DR 21(OH). La escala de grises y los contornos enseñan la intensidad total del CO $J=2-1$ y del polvo, respectivamente (Lai et al. 2003). Panel derecho: Polarización del CO $J=1-0$ (barras negras) en la misma región. Los contornos enseñan la intensidad total del CO $J=1-0$ (Cortes et al. 2005).

La intensidad del campo magnético en el plano del cielo es de 0.9 y 1.3 mG para MM 1 y MM 2, valores similares al derivado con el JCMT.

- Las mismas observaciones del polvo realizadas con BIMA detectaron la polarización del CO $J=2-1$ y $1-0$ (Lai et al. 2003a; Cortes et al. 2006).

Ambas transiciones muestran emisión polarizada del CO extendida (bastante más que la del polvo). Sorprendentemente los vectores de polarización de estas dos transiciones son ortogonales (véase la figura 13). El análisis teórico llevado a cabo por Cortes et al. (2005) de las condiciones de excitación del gas molecular que traza la emisión polarizada del CO muestra que la ortogonalidad entre los vectores de polarización de las dos transiciones rotacionales puede ocurrir cuando la profundidad óptica y la excitación son anisotrópicas en un medio de baja densidad ($n(\text{H}_2) \simeq 100 \text{ cm}^{-3}$).

- El efecto de interacción ciclotrón en moléculas

de ancho. De la polarización se deriva que el campo magnético va a lo largo del filamento con una intensidad de $B_{\text{pos}}=0.1-0.2$ mG. En cuanto a las observaciones con BIMA, ambas longitudes de onda muestran resultados similares: la polarización sólo se detecta en una pequeña fracción de la región trazada por el polvo.

ionizadas ha sido medido por Lai et al (2003b) a partir observaciones con OVRO de la transición $J=1-0$ de H^{13}CO y H^{13}CN con una resolución angular de $\sim 6''$. En MM 1 el cociente ancho de línea ión-neutro es de 0.82 ± 0.04 , dentro de los valores esperados teóricamente (Houde et al. 2002b).

Con todas estas técnicas usadas se puede inferir información bastante más completa sobre las propiedades del campo magnético. Así, a una escala de ~ 1 pc el filamento molecular asociado a DR 21(OH) tiene una presión total compuesta a partes iguales por la energía turbulenta y la energía magnética (Vallée & Fiege 2006). Acercándonos al gas circunestelar denso en MM 1 y MM 2, si se combinan los resultados obtenidos de la polarización del polvo y del efecto Zeeman en CN se obtiene que la intensidad total del campo magnético es de 1.0 y 1.5 mG para MM 1 y MM 2 y que el campo magnético está orientado hacia el observador con una inclinación respecto a la visual de 60° (Lai et

al. 2003b). Un valor similar de la inclinación es obtenido a partir del análisis espectral ión-molécula en combinación con el efecto Zeeman en CN, aunque este mismo análisis deriva una intensidad del campo algo menor, 0.4 mG (Lai et al. 2003a). Lai et al. (2003b) deduce que MM 1 es magnéticamente supercrítico y que la turbulencia es el principal mecanismo de soporte en MM 1 frente a la gravedad.

El análisis comparativo de la polarización del CO $J=2-1$ y del polvo a 1.3mm sugiere que la polarización del CO es paralela a la dirección del campo magnético, y éste paralelo al eje mayor de DR 21(OH) (Lai et al. 2003b). Si se tiene en cuenta que la polarización del CO traza la envoltura de baja densidad ($n(\text{H}_2) \sim 100 \text{ cm}^{-2}$) alrededor de DR 21(OH), entonces se deduce un campo magnético de $10 \mu\text{G}$ y que esta región es magnéticamente subcrítica (Cortes et al. 2005).

En resumen, de los diferentes estudios realizados parece deducirse el siguiente e interesante escenario para esta región de formación estelar de alta masa: a bajas densidades ($n(\text{H}_2) \sim 100 \text{ cm}^{-2}$), la nube está fuertemente magnetizada, es decir el campo magnético es el principal mecanismo que proporciona soporte frente a la gravedad. A medida que va aumentando la densidad la turbulencia va ganando paulatinamente importancia, hasta llegar a densidades del orden de $n(\text{H}_2) \sim 10^6 \text{ cm}^{-2}$, en donde se ha convertido en el principal mecanismo de soporte frente a la gravedad. Sin embargo el campo magnético es suficientemente intenso para que no se le pueda ignorar.

4.6. NGC 1333 IRAS4A: colapso de una nube magnetizada

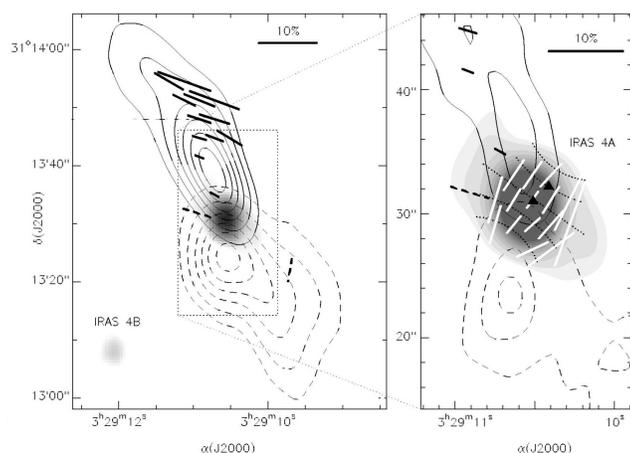


Figura 14 — Cartografiado de la polarización li-

neal del CO $J=2-1$ (barras negras) y el polvo a 1.3 mm (barras blancas) en NGC 1333 IRAS 4A. Los contornos muestran la emisión del CO asociada al flujo molecular, la escala de grises la emisión del polvo. Figura extraída de Girart et al. (1999).

NGC 1333 es un región muy activa de formación estelar de masa baja e intermedia que forma parte del complejo de nubes moleculares de Perseo, situado a una distancia de unos 300 pc. NGC 1333 IRAS4A (IRAS 4A) es una fuente muy embebida en el estadio evolutivo más temprano (objetos estelares jóvenes de clase 0) con una luminosidad bolométrica de unas $12 L_{\odot}$, y que ha sido objeto de numerosos estudios (Sandell et al. 1991; Di Francesco et al. 2001; Belloche et al. 2006). IRAS 4A tiene una emisión muy intensa en el continuo y en la emisión de líneas submilimétricas (Sandell et al. 1991). Tiene asociado un flujo molecular altamente colimado en la dirección norte-sur (Blake et al. 1995). Observaciones interferométricas a alta resolución muestran que IRAS 4A es un sistema binario protoestelar, con una separación de $1,8''$, 540 AU en proyección (Lay et al. 1995; Looney et al. 2000). El análisis espectral de la emisión molecular muestra que el gas denso circunestelar asociado a IRAS 4A está colapsando con una alta tasa de acreción (Mardones et al. 1997; Di Francesco et al. 2001). Los flujos expansivos asociados a estrellas jóvenes cercanas es posible que hayan inducido o ayudado en el proceso de formación estelar en esta fuente (Belloche et al. 2006).

La intensa emisión del polvo asociada a IRAS 4A lo convierten en un buen candidato para el estudio de la emisión polarizada del polvo. Las primeras observaciones de la polarización del polvo, realizadas con radio telescopios de una antena (resoluciones angulares de $15''$), no resolvieron la emisión polarizada (e.g. Minchin et al. 1995; Tamura et al. 1995). Observaciones a 1.3 mm a alta resolución angular ($3''$) realizadas con BIMA detectaron, y de hecho cartografiaron, simultáneamente la emisión polarizada del polvo asociada al material circunestelar y la emisión polarizada del CO $J=2-1$ en el flujo molecular asociado con IRAS 4A (Girart et al. 1999). Las propiedades de la polarización lineal del CO, del polvo y las propiedades cinemáticas del flujo molecular concuerdan con las predicciones teóricas de Goldreich & Kylafis (1982), y por tanto permiten deducir la dirección del campo magnético en el flujo. De este estudio se sugiere que la deflexión

observada del flujo molecular podría ser el resultado de la interacción entre el propio flujo y el campo magnético, tal como predicen Hurka et al. (1999). El mapa de polarización de la emisión del polvo es consistente aproximadamente con una morfología de reloj de arena para el campo magnético. El trabajo de Girart et al. (1999) muestra que, en general, como las dos técnicas muestrean densidades columnares diferentes, usadas conjuntamente permitirán estudiar la morfología del campo magnético sobre áreas más amplias de lo que una sola de estas técnicas hubiese permitido.

Recientemente, Girart et al. (2006) han llevado a cabo observaciones de la emisión polarizada del polvo a 0.8 mm usando el Submillimeter Array con una resolución de $\sim 1''$. Esto ha permitido resolver perfectamente la emisión polarizada y confirmar los resultados obtenidos con BIMA, tal como se muestra en la figura 15. Estos resultados obtenidos concuerdan con las predicciones de los modelos de formación estelar de estrellas de baja masa en nubes moleculares magnetizadas (los modelos de difusión ambipolar) a escalas de unas pocas centenas de unidades astronómicas: la gravedad ha ganado la partida al campo magnético, lo cual provoca el colapso dinámico de la nube, arrastrando las líneas de campo magnético que adquieren la forma de reloj de arena. Además se encuentra que en esta etapa de colapso dinámico el campo magnético es substancialmente más importante que la turbulencia en la evolución del sistema.

En IRAS 4A el eje normal a la envoltura circunestelar se encuentra entre el eje del campo magnético y el eje del flujo molecular. Esto sugiere que cuando se inició el colapso de la región los ejes de rotación y magnético no estaban alineados, lo cual puede haber sido importante en la fragmentación de la nube y a partir de aquí en la formación de un sistema binario (Girart et al. 2006), tal como muestran simulaciones numéricas recientes (Machida et al. 2006).

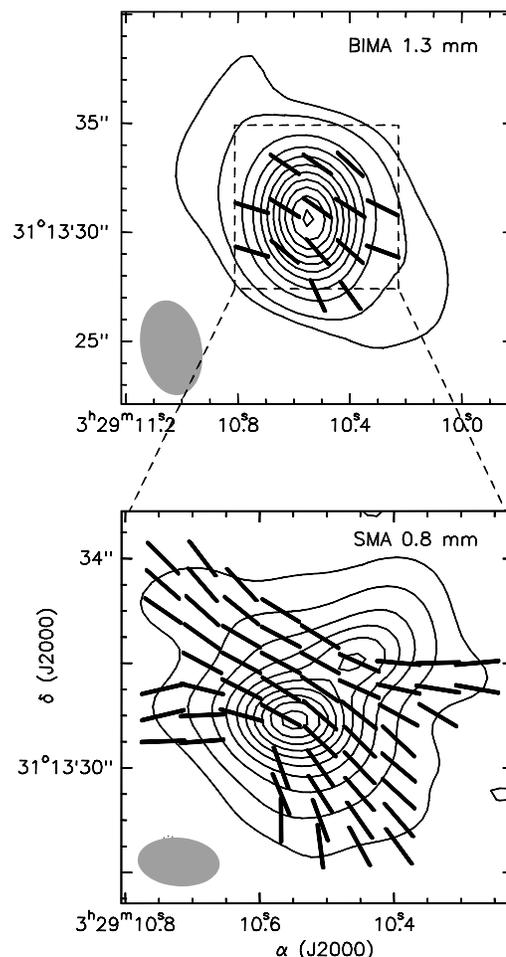


Figura 15 — Mapa de la intensidad total del polvo, superpuesto con los vectores del campo magnético obtenidas a 1.3 mm con BIMA (Girart et al. 1999) y a 0.8 mm con el SMA (Girart et al. 2006).

5. Conclusiones

En este artículo se ha repasado el conocimiento que tenemos de los campos magnéticos en la nube molecular y su importancia en el proceso de formación estelar. Las observaciones realizadas en los últimos años empiezan a dar una visión global sobre los campos magnéticos. A las diferentes escalas se observa que estos son lo suficientemente intensos para que no debieran ser ignorados por los modelos que tratan la evolución de las nubes moleculares y el proceso de formación estelar. De hecho se empieza a tener evidencia observacional de alguna de las predicciones de los modelos de difusión ambipolar, pero en muy pocos objetos, y por tanto queda la duda si estos resultados son aplicables en general a otras regiones. El caso más claro es la región de formación estelar de baja ma-

sa NGC 1333 IRAS 4A, en la que las propiedades del campo magnético deducidas por Girart et al. (2006) a partir de observaciones polarimétricas del polvo con el SMA concuerdan con los modelos teóricos clásicos de formación estelar en nubes moleculares magnetizadas. Finalmente destacar que ALMA proporcionará una sensibilidad tan grande que observaciones de la polarización del polvo se podrán realizar en multitud de regiones de formación estelar a una resolución angular muy buena (≤ 1 arcsec). Esto permitirá estudiar cómo varía el campo magnético en los diferentes estadios evolutivos de las protoestrellas. En cuanto a la polarización de líneas moleculares con ALMA seguramente se podrá detectar sin tantas dificultades los efectos Zeeman y Goldreich-Kylafis.

Agradecimientos

Este artículo es fruto de la labor realizada gracias a un contrato dentro del programa “Ramón y Cajal” del MEC, al proyecto AYA2005-08523-C03-02 del mismo ministerio y a la ayuda 2004 BE 00370 de la Generalitat de Catalunya. Finalmente quiero agradecer a Richard M. Crutcher (Universidad de Illinois en Urbana-Champaign) por haberme iniciado en este campo.

Referencias

Allen, Al. Li, Z.-Y., & Shu, F. H. 2003, ApJ, 599, 363
 Alves, F. O., & Franco, G. A. P. 2006, MNRAS, 366, 238
 Ballesteros-Paredes, J., & Hartmann, L. 2006, ArXiv Astrophysics e-prints, arXiv:astro-ph/0605268
 Ballesteros-Paredes, J., Klessen, R. S., Mac Low, M.-., & Vazquez-Semadeni, E. 2006, ArXiv Astrophysics e-prints, arXiv:astro-ph/0603357
 Barvainis, R., & Wootten, A. 1987, AJ, 93, 168
 Basu, S. 2000, ApJ, 540, L103
 Bel, N., & Leroy, B. 1989, A&A, 224, 206
 Blake, G. A., et al. 1995, ApJ, 441, 689
 Belloche, A., Hennebelle, P. & André, P. 2006, A&A, 453, 145
 Ciolek, G. E., & Mouschovias, T. C. 1993, ApJ, 418, 774
 Chandrasekhar, S., & Fermi, E. 1953, ApJ, 118, 113
 Chrysostomou, A., et al. 2002, A&A, 385, 1014

Cortes, P. C., & Crutcher, R. M. 2006, ApJ, 639, 965
 Cortes, P. C., Crutcher, R. M., & Matthews, B. C. 2006, ApJ, 650, 246
 Cortes, P. C., Crutcher, R. M., & Watson, W. D. 2005, ApJ, 628, 780
 Cudip, W., Furniss, I., King, K. J., & Jenings, R. E. 1982, MNRAS, 200, 1169
 Crutcher, R. M., et al. 1993, ApJ, 407, 175
 Crutcher, R. M., et al. 1999a, ApJ, 515, 275
 Crutcher, R. M., et al. 1999b, ApJ, 514, L121
 Crutcher, R. M., Nutter, D. J., Ward-Thompson, D., & Kirk, J. M. 2004, ApJ, 600, 729
 Davis, L. J., & Greenstein, J. L. 1951, ApJ, 114, 206
 Deguchi, S. & Watson, W. D. 1984, ApJ, 285, 126
 Di Francesco, J., et al. 2001, ApJ, 562, 770
 Dotson, J. L., et al. 2000, ApJS, 128, 335
 Draine, B. T., & Weingartner, J. C. 1996, ApJ, 470, 551
 Draine, B. T. 2003, ARA&A, 41, 241
 Fiege, J. D., & Pudritz, R. E. 2000, ApJ, 544, 830
 Fiedler, R. A., & Mouschovias, T. C. 1993, ApJ, 415, 680
 Fosalba, P., Lazarian, A., Prunet, S., & Tauber, J. A. 2002a, ApJ, 564, 762
 Fosalba, P., Lazarian, A., Prunet, S., & Tauber, J. A. 2002b, AIP Conf. Proc. 609: Astrophysical Polarized Backgrounds, 609, 44
 Galli, D. & Shu, F. H. 1993, ApJ, 544, 243
 Girart, J. M., Crutcher, R. M., & Rao, R. 1999, ApJ, 525, L109
 Girart, J. M., Greaves, J. S., Crutcher, R. M., & Lai, S.-P. 2004, Ap&SS, 292, 119
 Girart, J. M., Rao, R., & Marrone, D. P. 2006, Sci., 313, 812
 Glenn, J., Walker, C. K., & Jewell, P. R. 1997, ApJ, 479, 325
 Gold, T. 1951, Nat, 169, 322
 Goldreich, P., & Kylafis, N. D. 1981, ApJ, 243, L75
 Goldreich, P., & Kylafis, N. D. 1982, ApJ, 253, 606
 Gómez de Castro, A., & Pudritz, R. E. 1992, ApJ, 395, 501
 Gonçalves, J., Galli, D., & Walmsley, M. 2005, A&A, 430, 979
 Greaves, J. S., Holland, W. S., Friberg, P., & Dent, W. R. F. 1999, ApJ, 512, L139

- Gusten, R., Fiebig, D., & Uchida, K. L. 1994 ApJ, 286, L51
- Hall, J. S. 1949, Sci. 109, 166
- Hartmann, L., Ballesteros-Paredes, J., & Bergin, E. A. 2001, ApJ, 562, 852
- Heiles, C. 2000, AJ, 119, 923
- Heiles, C. & Crutcher 2005, Cosmic Magnetic Fields: Lecture notes in Physics, Vol. 664, 137
- Heiles, C., Goodman, A. A., McKee, C. F., & Zweibel, E. G. 1993, en Protostars and Planets III, p. 279
- Hildebrand, R. H. 1984, ApJ, 284, L51
- Hiltner, W. A. 1949, Sci., 109, 165
- Houde, M., et al. 2000a, ApJ, 536, 857
- Houde, M., et al. 2000b, ApJ, 537, 245
- Houde, M., et al. 2002, ApJ, 569, 803
- Houde, M., et al. 2004, ApJ, 604, 717
- Houde, M. 2004, ApJ, 616, L111
- Hurka, J. D., Schmid-Burgk, J. & Hardee, P. E. 1999, ApJ, 512, L139
- Kirk, J. M., Ward-Thompson, D., Crutcher, R. M. 2006, MNRAS, 369, 1445
- Kylafis, N. D. 1983, ApJ, 267, 137
- Lai, S.-P., Crutcher, R. M., Girart, J. M., & Rao, R. 2001, ApJ, 561, 864
- Lai, S.-P., Crutcher, R. M., Girart, J. M., & Rao, R. 2002, ApJ, 566, 925
- Lai, S.-P., Girart, J. M., & Crutcher, R. M. 2003a, ApJ, 598, 392
- Lai, S.-P., Velusamy, T., & Langer, W. D. 2003b, ApJ, 596, L239
- Lazarian, A., Goodman, A. A., & Myers, P. C. 1997, ApJ, 490, 273
- Lazarian, A. 2003, J.Quant.Spectrosc.Radiat.Trans. 79, 881
- Lay, O. P., Carlstrom, J. E., & Hills, R. E. 1995, ApJ, 452, L73
- Leung, C. M., Herbst, E., & Huebner, W. F. 1984, ApJSS, 56, 231
- Levin, S. M., et al. 2001, ApJ, 555, L805
- Li, H. et al. 2006, ApJ, 648, 340
- Li, Y., Mac Low, M.-M., & Klessen, R. S. 2005, ApJ, 626, 823
- Li, Z.-Y., & Nakamura, F. 2004, ApJ, 609, L83
- Lis, D. C. et al. 1988, ApJ, 328, L304
- Looney, L. W., Mundy, L. G., & Welch, W. J. 2000, ApJ, 529, 477
- Mac Low, M.-M., & Klessen, R. S. 2004, Reviews of Modern Physics, 76, 125
- Machida, M. N., Matsumoto, T., Hanawa, T. & Tomisaka, K. 2006, ApJ, 645, 1227
- Mardones, D., Myers, P. C., & Tafalla, M. 1997, ApJ, 489, 719
- Matthews, B. C., Wilson, C. D. & Fiege, J. D. 2001, ApJ, 562, 400
- Matthews, B. C., Lai, S.-P., Crutcher, R. M., & Wilson, C. D. 2005, ApJ, 626, 959
- Matthews, B. C. 2005, ASP Conf. Ser. 343: Astronomical Polarimetry: Current Status and Future Directions 343, 99
- Mestel, L. 1966, MNRAS, 133, 265
- Minchin, N. R., Sandell, G., & Murray, A. G. 1995, A&A, 293, L61
- Mouschovias, T. C. 1976, ApJ, 207, 141
- Mouschovias, T. C. 1991, ApJ, 373, 169
- Mouschovias, T. C., Tassis, K., & Kunz, M. W. 2006, ApJ, 646, 1043
- Myers, P. C., & Goodman, A. A. 1988, 1988, ApJ, 326, L30
- Nakamura, F., & Li, Z.-Y. 2003, 594, 363
- Purcell, E.M. 1979, ApJ, 231, 404
- Ostriker, E. C., Stone, J. M., & Gammie, C. F. 2001, ApJ, 546, 980
- Rao, R., et al. 1998, ApJ, 502, L75
- Sandell, G., et al. 1991, ApJ, 376, L17
- Sarma, A. P., et al. 2002, ApJ, 580, 928
- Tamura, M., Hough, J. H., & Hayashi, S. S. 1995, ApJ, 448, 346
- Vallée, J. P., & Bastien, P. 1995, A&A, 294, 831
- Vallée, J. P., & Fiege, J. D. 2006, ApJ, 636, 332
- Vlemmings, W. H. T., Diamond, P. J., van Langevelde, H. J., & Torrelles, J. M. 2006, A&A, 448, 597
- Wannier, P. G., Scoville, N. Z., & Barvainis R. 1983, ApJ, 267, 126

Josep Miquel Girart es investigador del Institut de Ciències de l'Espai (CSIC) y del Institut d'Estudis Espacials de Catalunya, IEEC.

ESTUDIO RADIOASTRONÓMICO DE LAS CONDICIONES FÍSICAS, CINEMÁTICAS Y QUÍMICAS DEL ENTORNO QUE RODEA A LOS OBJETOS ESTELARES JÓVENES DE BAJA MASA

Itziar de Gregorio-Monsalvo

idegrego@eso.org

Tesis doctoral dirigida por José Francisco Gómez Rivero

Centro: Laboratorio de Asfrofísica Espacial y Física Fundamental (LAEFF-INTA)

Fecha de lectura: 25 de mayo de 2006

En esta tesis presentamos un estudio detallado de la interacción de los objetos estelares jóvenes de baja masa con su medio circundante, mediante la caracterización de las condiciones físicas, la cinemática y la química de su entorno. Estos estudios se han realizado utilizando como herramienta fundamental la información proporcionada por las líneas moleculares de emisión en radio, a través de observaciones con antena única de alta sensibilidad complementadas con observaciones interferométricas. Para ello, se han puesto a punto los equipos de espectroscopía de la antena de 70 metros (DSS-63) situada en el complejo espacial de NASA en Robledo de Chavela, Madrid.

Presentamos la búsqueda sistemática de más alta sensibilidad de máseres de H_2O en glóbulos de Bok, utilizando la antena DSS-63. Como criterio de selección elegimos indicadores de formación estelar, como fuentes de radiocontinuo, centros de flujos moleculares, picos de trazadores moleculares de alta densidad y fuentes IRAS. Hemos observado 207 posiciones y detectamos emisión máser de H_2O en siete glóbulos de Bok (CB 3, CB 34, CB 54, CB 65, CB 101, CB 199 y CB 232). Todas excepto CB 3 son detecciones nuevas, con lo que incrementamos de tres a nueve el número de glóbulos de Bok con emisión máser conocida. Este estudio se complementa con las primeras observaciones interferométricas, usando el VLA, en algunos de los glóbulos de Bok que presentan máser de H_2O , hallando las posiciones precisas de dichos máseres. En el caso de CB 3, CB 54, CB 101 y CB 232 identificamos sus fuentes excitadoras.

Realizamos una búsqueda de emisión de CCS y amoníaco a 1 cm en objetos estelares jóvenes con presencia de máseres de H_2O como signo de formación estelar. Esta búsqueda se ha realizado con la antena DSS-63, para estudiar las propiedades

físicas, la cinemática y la edad de dichas regiones. Detectamos emisión de CCS en seis fuentes (L1448C, L1448-IRS3, B1-IRS, NGC2071-North, GF9-2 y L1251A). Todas estas regiones, excepto B1-IRS, son mostradas aquí por primera vez emitiendo a 1 cm. Hemos buscado la relación entre la presencia de CCS y las propiedades físicas de los objetos centrales, sus flujos moleculares y la emisión de NH_3 . Encontramos que en las regiones emisoras de CCS, el NH_3 presenta máximos de emisión significativamente más intensos que en regiones sin emisión de CCS, pero intensidades integradas similares, lo que sugiere un medio menos turbulento, es decir, más joven, en el primer grupo. Además, obtenemos buenos candidatos para posteriores estudios con alta resolución de la cinemática y las propiedades físicas del medio.

Este estudio se completa con observaciones interferométricas, usando el VLA, en CCS, NH_3 y máseres de H_2O en la región que rodea el objeto joven B1-IRS. Estudiamos la cinemática de la región y la relación entre el objeto central y el medio circundante. Obtenemos una distribución de CCS en distintos "grumos", con un patrón de velocidad que indica una fuerte interacción del gas trazado por esta molécula con el flujo molecular existente en la región. Esto sugiere la posibilidad de un aumento local de la abundancia de CCS mediante química inducida por choques. Además observamos por primera vez una anticorrelación espacial entre el CCS y el NH_3 a escalas de $\simeq 5''$ (ver Fig. 1).

Intentamos utilizar por primera vez la técnica de calibración cruzada aplicada a líneas espectrales térmicas con el VLA, observando simultáneamente la emisión en CCS y máser de H_2O a 1 cm en torno a la fuente IRAS 16293–2422 y usando la emisión intensa de los máseres de H_2O para trazar las variaciones atmosféricas a 1 cm. Si bien no se

detecta emisión de CCS, el radiocontinuo a la frecuencia de esta línea mejora claramente su relación señal-ruido al aplicar esta técnica.

Por último, presentamos un prometedor método estadístico para estimar las características observacionales que pueden ser más relevantes en la obtención de los parámetros físicos de discos protoplanetarios. Con este fin, hemos desarrollado una red de modelos de emisión de la línea $C^{17}O(3-2)$ en discos protoplanetarios con distintas propiedades físicas. Como resultado preliminar, este método permite distinguir relativamente bien entre discos con distintos radios y en menor medida entre diferentes tasas de acrecimiento de masa. Además, presentamos un estudio de detectabilidad de nuestros discos modelados con los interferómetros SMA y ALMA, todos los cuales podrán ser detectados con ALMA en una hora de tiempo de integración.

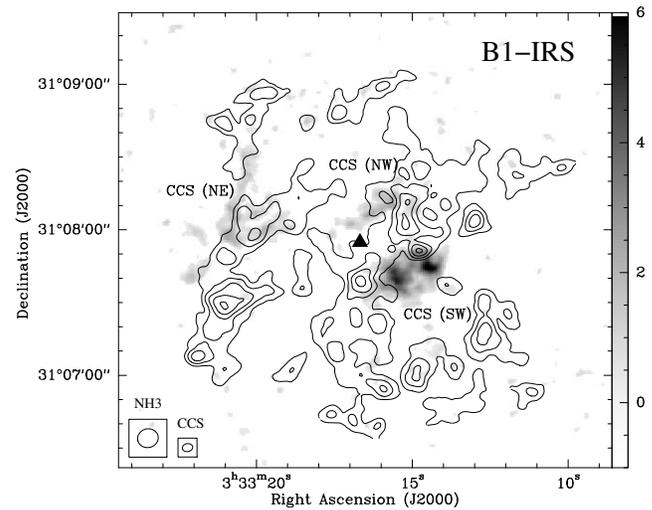


Figura 1 — Mapa de intensidades integradas de CCS (escala de grises, comprendida de -1 a 6 $mJy\ haz^{-1}$) y NH_3 (contornos, representados de 40 a 120 $mJy\ haz^{-1}$ con incrementos de 20 $mJy\ haz^{-1}$). El triángulo representa la fuente central observada a $2\ \mu m$.

FORMACIÓN ESTELAR EN CÚMULOS A LONGITUDES DE ONDA MM Y SUBMM

Aina Palau

apalau@am.ub.es

Tesis doctoral dirigida por Robert Estalella y Paul T. P. Ho

Centro: Universitat de Barcelona

Fecha de lectura: 20 de marzo de 2006

En sus primeras etapas de formación los objetos estelares se encuentran submergidos en nubes densas de gas y polvo. Estas nubes absorben su emisión y la reemiten en el rango mm y submm. El objetivo de este trabajo es estudiar las primeras etapas de la formación estelar en cúmulos, así como el papel de las interacciones entre los diferentes objetos del cúmulo. Para ello, se observaron cuatro regiones de formación estelar en modo de cúmulo a longitudes de onda mm y submm con alta resolución angular y alta sensibilidad.

La primera región estudiada, HH 211, forma estrellas de baja masa y pertenece al cúmulo IC 348. En esta región se estudió, con el *Submillimeter Array* (SMA), la formación de uno de los miembros más jóvenes, HH211mm, en el continuo submm y en $CO(3-2)$ y $SiO(8-7)$. Se encontró que un viento de ángulo ancho parece ser el mecanismo que impulsa el flujo molecular de esta fuente. Por otro

lado, en HH 211 no parece haber evidencias de interacción entre los diferentes objetos del cúmulo.

Puesto que en las regiones de formación estelar de alta masa se espera una mayor densidad de estrellas que en las de baja masa, las otras tres regiones estudiadas son de masa intermedia/alta. Para llevar a cabo el proceso de selección de estas tres regiones, se partió de dos muestras de objetos protoestelares de masa alta de la literatura. Los criterios de selección se basaron en la luminosidad (mayor que $10^3 L_{\odot}$), distancia (menor que 3.5 kpc), emisión intensa en el rango mm para observaciones de antena única, y emisión débil y compacta en el rango centimétrico. El proceso de selección se completó con la ayuda de observaciones del VLA (Very Large Array) y de la antena única IRAM 30 m.

Para el caso de IRAS 00117+6412, observada con el PdBI (*Plateau de Bure Interferometer*) a 1 y 3 mm, en $N_2H^+(1-0)$, $CS(5-4)$ y $CH_3OH(5-4)$,

se detectaron dos fuentes compactas en el mm, que se encuentran en estados evolutivos diferentes. Dado que los dos objetos están a diferentes distancias de la estrella masiva, asociada con una región HII ultra-compacta, esta región es un excelente candidato para estudiar la interacción entre el frente de ionización de la estrella masiva y las protoestrellas formadas a su alrededor.

La región IRAS 20343+4129 se observó con el SMA a 1 mm y en CO (2-1), y se propone que una de las fuentes infrarrojas más brillantes está creando una cavidad y acumulando material ambiente en sus paredes, trazado por las condensaciones de polvo detectadas. Se descubrió un flujo molecular bipolar alargado en la dirección este-oeste claramente asociado con otra de las fuentes infrarrojas brillantes, que se clasificó como Clase I de masa intermedia.

Finalmente, en la región IRAS 20293+3952 se encontró, a partir de observaciones con el *Berkeley-Illinois-Mariland Array* (BIMA) y el VLA, dos nubes de gas denso trazado por N_2H^+ (1-0) y NH_3 (1,1) y NH_3 (2,2), y una gran variedad de objetos estelares jóvenes, la mayoría asociados a la zona norte de la nube principal. Los diferentes objetos estelares abarcan como mínimo un orden de magnitud en masa y se encuentran en estados evolutivos diferentes. Se encontró, a través del estudio del cociente de densidades columnares de NH_3 respecto a N_2H^+ , que la diferenciación química en la nube principal es importante. Además, gracias a las observaciones de CH_3OH (2-1), y a los mapas obtenidos de temperatura rotacional y densidad columnar del NH_3 , parece que no sólo el objeto de alta masa interactúa con la nube principal, sino que también los objetos de baja masa interactúan con el gas denso a través de sus flujos moleculares.

Con estos nuevos datos y otros recogidos de la literatura, se compiló una tabla de cinco regiones candidatas a protoestrellas de alta masa observadas con sensibilidades mejores que $1 M_\odot$, y se encontró que el número de fuentes mm alrededor de la protoestrella de alta masa es menor que el número de fuentes infrarrojas alrededor de estrellas de alta masa. Dado que nuestras observaciones sugieren que la formación estelar en cúmulos es continuada, el menor número de fuentes mm parece indicar que la escala de tiempo en que un objeto estelar joven es brillante en el mm es menor que la escala de tiempo en que un objeto estelar joven es brillante en el infrarrojo. Además, se encontró una escala espacial típica de 0.1–0.3 pc asociada a grupos de objetos estelares en un estado evolutivo particular. Para acabar, la distribución espacial de los objetos estelares jóvenes en las regiones estudiadas se explica no únicamente por la interacción entre los diferentes objetos, sino también por las condiciones iniciales de la nube molecular original.

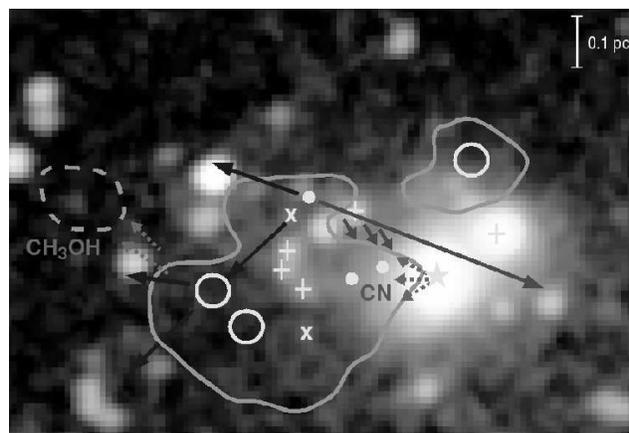


Figura 1 — Esquema de la interacción entre los diferentes objetos del cúmulo en IRAS 20293+3952.