

Editorial

Los editores de este boletín nos sentimos particularmente satisfechos de la edición que tenéis entre manos porque hemos batido un récord importante. Este número incluye nada más y nada menos que doce reseñas de tesis doctorales. Aunque esta cifra tan por encima de la media habitual del boletín sea probablemente una fluctuación aleatoria, indica sin duda la buena salud de la astronomía española. Esperamos que la tendencia se mantenga en futuras ediciones.

Sin embargo, no todo son buenas noticias en esta edición. Este número incluye también un artículo dedicado a las últimas decisiones de la Agencia Espacial Europea sobre su programa científico, donde se describen los problemas de la ciencia espacial europea. Nos encontramos en una época de vacas flacas para este importante campo de la astronomía, y no sólo a nivel europeo sino también a nivel internacional. Los recortes han llegado también a la NASA y en particular al telescopio *Hubble*, que puede ver drásticamente recortada su vida útil.

A pesar de todo, la vida sigue. Podréis levantar un poco el ánimo con nuestro habitual artículo sobre el GTC, donde se describen los últimos progresos en su construcción, y el artículo de revisión sobre simulaciones numéricas de chorros relativistas.

También podéis encontrar en esta edición un artículo sobre la Asociación Astronómica de Sabadell, una de las sociedades miembro de la SEA y que realiza una gran actividad de divulgación de la astronomía.

Finalmente, incluimos un par de artículos sobre el tránsito de Venus que tendrá lugar en el mes de junio y que constituye un acontecimiento histórico que no debería dejar de verse.

Saludos afectuosos a todos.

Los editores

La ciencia espacial europea, en peligro

Tiempo de recortes en Cosmic Visions 2020

El comité del programa científico (SPC) de la Agencia Europea del Espacio (ESA) ha aprobado recientemente una reducción en las misiones y proyectos que piensa abordar en la próxima década. Aproximadamente un año antes, el mismo SPC había aprobado la primera parte del programa científico *Cosmic Visions 2020*, en el que se había conseguido encajar una serie de misiones (incluso dos más de las aprobadas con anterioridad, *Venus Express* y *Eddington*) a base de cambiar la estrategia de compra de componentes a la industria, de agrupar misiones en *grupos* fuertemente interrelacionados entre sí y de otras estrategias.

Lamentablemente, aquel plan, válido para el decenio 2002-2012, se mostró muy poco estable, máxime teniendo en cuenta las excepcionales circunstancias que han ocurrido en el último año. La primera de ellas fue que la interrupción de los lanzamientos con Ariane 5 ha provocado unos costes adicionales muy importantes al haber forzado el retraso de la misión *Rosetta* (viaje y aterrizaje en un cometa) y, en menor medida, *SMART-1* (viaje a la Luna por un novedoso sistema de propulsión iónica). A esta desafortunada circunstancia hay que añadir los sobrecostes a los que la ESA ha tenido que hacer frente en las misiones *Planck* (observación del fondo cósmico de microondas) y *Herschel* (observatorio infrarrojo lejano y submilimétrico), esencialmente para financiar partes de instrumentos que las agencias nacionales se habían comprometido a aportar, pero a cuyos gastos no podían hacer frente sin incurrir en retrasos (que hubieran causado nuevos incrementos en el coste de estas misiones). Como no hay dos sin tres la profunda crisis de mercado que atraviesa la industria espacial europea hace que las industrias facturen con toda la antelación posible a la ESA, creando por tanto un problema de liquidez adicional. En mayor o menor medida, las tres causas son reflejo una situación económica poco favorable en Europa.

Sin entrar en cifras, estos hechos han provocado un socavón financiero importantísimo en el programa científico de la ESA. El Consejo de la ESA (órgano que rige este organismo) acordó adelantar una cantidad de dinero al programa científico, pero a devolver antes del año 2006 en el que los Ministros deberán fijar el nuevo presupuesto. Este adelanto de dinero ha servido para poco más que salvar los muebles. De hecho, a parte de continuar con la operación de las misiones ya en órbita, y con las que están en fase de implementación, la situación económica sólo permite comenzar una misión nueva antes de 2006. Es más, la obligación de devolver el "préstamo" antes de ese año, obliga a empezar al menos una misión ya que de otra forma no habría posibilidades de gastar el presupuesto en 2006 (una misión no se improvisa de un día para otro).

Por si fuera poco y de forma casi universal (con las honrosas excepciones de *Gaia* y *Eddington*), los costes de las misiones que se aprobaron en *Cosmic Visions 2020* para el decenio 2002-2012 se han incrementado sensiblemente desde su estimación hace tan solo un año. No sólo hace falta dinero para salir del cuello de botella actual, sino que el coste total del programa aprobado es sensiblemente superior al previsiblemente disponible, en el supuesto que los Ministros decidan "prorrogar" la dotación económica del programa científico durante la próxima década.

Blues para Eddington

En esta situación, la primera decisión que había que tomar fue cuál de las posibles misiones sobre la mesa hay que empezar de inmediato. Realmente sólo había dos misiones que estaban en la parrilla de salida: *Eddington* para hacer astrosismología y descubrir y caracterizar la población de planetas en la zona habitable por un lado y *LISA-PF* (LISA Path Finder, antes *SMART-2*), misión de prueba tecnológica de caída libre, necesaria para acometer el observatorio interferométrico de ondas gravitatorias *LISA* hacia finales del decenio, en colaboración con NASA. La elección estaba cantada. Por un lado, la cancelación de *LISA-PF* (y por consiguiente la participación europea en *LISA*) hubiera implicado la cancelación de la única misión de la ESA en el ámbito de la Física Fundamental. Por otro lado, de las misiones de Astronomía, *GAIA* continuó siendo la primera prioridad científica para la agencia. Estos dos hechos relegaron a *Eddington* a la zona de imposible financiación.

No es difícil darse cuenta de que la pérdida de *Eddington* para la Astronomía, e incluso para la ciencia Europea en general, va a ser de una enorme importancia. Los dos grandes problemas que aborda esta misión son de una enorme relevancia y de un gran impacto en el momento actual. La búsqueda y caracterización de planetas en la zona habitable fuera del sistema solar es uno de los temas con más impacto científico y social que hay en la actualidad y que es consecuencia de una fuerte actividad y liderazgo europeo en la búsqueda de exoplanetas. La astrosismología, técnica cuya aplicación ha estado prácticamente restringida al Sol hasta la fecha, permitiría conocer con gran detalle los interiores estelares y entrar en una nueva época de Astrofísica estelar de precisión, con un enorme impacto colateral en todas las ramas de la Astronomía.

La pérdida de todo este potencial no se verá compensada por la misión *Kepler* (NASA), ya que ésta está diseñada únicamente para encontrar planetas en la zona habitable, optimizando su búsqueda. *Kepler* no será capaz pues de caracterizar la población de estos planetas, ni aportará una visión suficiente como para en-

tender dónde y cómo se forman (algo que necesitamos, por ejemplo, para prepararnos para la misión *DARWIN*). Tampoco *Kepler* abordará la astrosismología, perdiéndose pues todos los avances en esa rama de la Astronomía.

Más sangre

Con la cancelación de *Eddington* sólo se resuelve el problema financiero actual, pero de ninguna manera el futuro. Las nuevas misiones que deberían seguir a *LISA-PF* (*GAIA*, *Bepi Colombo*, *JWST*, *LISA* y *Solar Orbiter*) tienen globalmente un coste estimado muy superior al presupuesto presumiblemente disponible en la próxima década. *GAIA*, en cuyo diseño ya se hicieron sacrificios que redundaron en un abaratamiento de la misión antes de la aprobación de *Cosmic Visions 2020*, quedó tal como estaba y con un lanzamiento previsto antes de 2012.

El coste de *Bepi Colombo* (la misión a Mercurio consistente en dos satélites en órbita y un tercero a depositar en su superficie) también se mantenía dentro de presupuesto, siempre y cuando se dieran los dos condicionantes siguientes: suprimir el elemento de superficie (el satélite que aterrizaría en Mercurio y que durante una semana tomaría medidas *in situ*) y que los instrumentos a bordo de los otros dos elementos orbitales deberían ser financiados íntegramente por los Estados miembros. El primero de estos condicionantes elimina nuevamente la posibilidad de que ESA realice ciencia de gran impacto público, además de la consiguiente pérdida científica. El segundo hace que la misión sea muy difícil de implementar, en un contexto en el que los Estados miembros cada vez son menos proclives a invertir en ciencia básica en general y en ciencias del espacio en particular.

Como ya se ha apuntado, la participación de la ESA en *LISA* también ha bajado en principio su perfil, o al menos se le ha asignado menos dinero del que se esperaba para una participación de igual a igual con NASA. Si bien la prueba tecnológica *LISA-PF* (que se entiende en la actualidad como parte integral del proyecto de observatorio de ondas gravitatorias global) también ha incrementado su coste respecto a la estimación del año 2002, el presupuesto total asignado al proyecto *LISA-PF+LISA* baja en esta reestructuración.

La situación aparentemente más comprometida en estas misiones futuras que entran dentro del programa es la de *Solar Orbiter* (misión para observar el Sol desde 0.2 unidades astronómicas, en co-rotación y acercándose a los polos). Esta misión tendrá que hacer uso de tecnologías que se desarrollarán para *Bepi Colombo* y por consiguiente deberá seguirla con algún tiempo de diferencia. El plan de emergencia aprobado prevé el lanzamiento de *Solar Orbiter* hacia 2014, dos años más tarde que *Bepi Colombo* y fuera de la próxima década. Además no está claro que el nivel de financia-

ción requerido para *Solar Orbiter*, que es sustancialmente superior al presupuestado inicialmente, pueda encuadrarse en su totalidad dentro del presupuesto, sin contar el elevado coste de los instrumentos al que también deberán hacer frente los Estados miembros. La posible participación de NASA en esta misión, en el contexto de la iniciativa *International Living With a Star* (ILWS), podría aliviar en cierta medida esta situación.

Los proyectos que se *salvan* de la quema son *Venus Express* que se lanzará en 2005, los ya planeados *Herschel* y *Planck* y la participación de la ESA en *JWST* (anteriormente *NGST*). Hay que decir que el coste para la ESA de este último también se ha incrementado sensiblemente, ya que la agencia proporcionará no solo el espectrógrafo multiobjeto *NIRSPEC*, la gestión global de la contribución europea a *MIRI* y operaciones científicas durante 5 años, sino que además proveerá el lanzamiento de la misión con un Ariane 5.

Las limitaciones de un programa “de emergencia”

Este programa fue calificado por el propio SPC como un programa de emergencia. Desde todos los puntos de vista se trata de un programa mutilado y ampliamente insatisfactorio, aunque posiblemente no había otra opción en las circunstancias (sobre todo económicas) actuales.

Desde el punto de vista de los autores, que entrevistaron en la propuesta de este programa como miembros de distintos comités asesores de la ESA (SSAC, AWG, SSWG), los principales defectos de este plan son:

- Cancela una misión (*Eddington*) con indudable valía científica y con una enorme carga de impacto social. Esta es una misión de coste muy moderado, sin riesgos, dispuesta para ser implementada de forma inmediata, sin prácticamente costes adicionales para los Estados miembros y con una extensa participación de científicos expertos en sismología, Astrofísica estelar y exoplanetas. Para España la situación es especialmente sangrante, ya que J.M. Mas Hesse lidera el consorcio de más de 30 centros europeos que debía contribuir a la misión, asesorando y supervisando el desarrollo de la instrumentación por parte de la industria, definiendo la estrategia de operación, proporcionando el software de a bordo, calibrando los detectores, etc.
- Otro elemento con gran visibilidad, como es el aterrizaje en Mercurio, también ha debido cancelarse. Hay que tener en cuenta que la ESA anda muy escasa de buenos argumentos para una comunicación eficaz a la sociedad, y ni la cancelación de *Eddington* ni la del elemento de superficie de *Bepi Colombo* van a ayudar.

- Las nuevas misiones confirmadas son todas grandes misiones y todas están previstas para alrededor del 2012 (*GAIA*, *Bepi Colombo*, *LISA*, *JWST* y *Solar Orbiter*). Esto reduce enormemente la flexibilidad del programa y no permite entre medias la inclusión de ninguna otra misión por modesto que fuera su presupuesto y por importantes que fueran sus objetivos.
- No aparecen grandes posibilidades de futuro para después de 2013, ya que prácticamente todo el presupuesto hasta esa fecha está comprometido con las misiones aprobadas y no se podrá antes de esa fecha comenzar de verdad misiones futuras. En particular las dos misiones en estudio que hay para después (*XEUS* observatorio de universo profundo en rayos X y *DARWIN* interferómetro infrarrojo para observar planetas alrededor de otras estrellas) necesitan el desarrollo previo de la tecnología de vuelo en formación que debería haberse verificado con la prueba tecnológica *SMART-3*. Ni que decir tiene que el programa aprobado no contempla la inclusión de ni tan siquiera esta misión precursora.
- Quizás el peor de todos los efectos ha sido que la cancelación de una misión aprobada, por primera vez en la ESA, abrirá una crisis de confianza de los científicos en la agencia. Esto se añadirá al ya poco fiable sistema por el cual los Estados miembros financiaban y proporcionaban en la mayor parte de los casos los instrumentos científicos (con excepciones como *GAIA*, *Eddington* o *NIRSPEC* en *JWST*). En el caso de *MIRI* (instrumento de infrarrojo medio para *JWST*) o de la carga útil de *LISA-PF*, la ESA ensaya un nuevo sistema de acuerdo multilateral para asegurar este esquema, pero cuyo funcionamiento está por ver.

El verdadero problema y la verdadera solución

A pesar de que la motivación directa para la reducción de objetivos en el programa científico *Cosmic Visions 2020* hay que buscarla en los problemas apuntados al principio (el problema de Ariane 5, la financiación de cargas útiles y la situación de la industria espacial en Europa), la cosa viene de antes. Hay que reconocer, en primer lugar, que las misiones aprobadas en el programa *Cosmic Visions 2020* en 2002 entraban con calzador y bajo un esquema muy poco estable. Ese esquema era un intento de acomodar una serie de misiones aprobadas el año 2001 (con el anterior Director Científico de la ESA) y cuyo coste, en el esquema habitual de considerar cada misión por separado, superaba incluso las expectativas más optimistas de financiación. La conferencia ministerial de la ESA de finales de 2001 en Edimburgo hizo buenas las previsiones de los más pesimistas y

asignó al programa científico de la ESA un nivel de recursos para los años 2003-2006 inferior al peor de los escenarios previstos. La reacción que supuso el programa *Cosmic Visions 2020* fue un alarde de optimización y buena voluntad por parte de todos, pero con un problema de viabilidad muy grave. Por si fuera poco, se envió a los poderes públicos un mensaje muy peligroso y es que “optimizando” se podía hacer lo mismo o más con menos dinero.

Pero tampoco hay que buscar ahí el origen de los todos los males. En realidad, no hay más que observar el nivel de recursos que se ha ido asignando a la dirección científica de la ESA desde su inicio, para darse cuenta que ha ido en continuo decrecimiento. A la vez que la ciencia espacial en Europa ha crecido en tamaño y calidad y se han ido generando proyectos cada vez más sólidos y ambiciosos, el presupuesto para llevarlos a cabo ha ido reduciéndose. El momento dramático actual tenía pues que llegar tarde o temprano. ¿Qué podemos hacer para que esta situación no se prolongue más y acabe de hecho matando la ciencia espacial en Europa? Los científicos (astrónomos en mayoría) tenemos la misión de denunciar esta situación en la sociedad y ante nuestros gobernantes. Sin embargo, el nuestro suele ser un lobby de poco peso.

Quizás haya que hacer de la necesidad virtud e intentar concurrir a objetivos comunes con la castigada industria del sector. El hecho de que en Europa no haya una política de defensa común implica que el mercado de la industria espacial del viejo continente se reduce (a partes aproximadamente iguales) al mercado institucional (en su mayor parte la ESA) y al de las comunicaciones. Este último está en un momento de saturación que ha conducido a esta crisis de los últimos años. El mercado institucional (la ESA) es pues la única baza disponible para salvar la crisis del sector, y el programa científico es, de hecho, uno de los destinatarios más importantes de la facturación de la industria espacial a la ESA.

Si los Estados miembros de la ESA no dan un vuelco importante a la asignación de recursos al programa científico, quizás acabe no habiendo industria espacial Europea. En el momento de la publicación de este artículo se habrá reunido ya el Consejo de la ESA (diciembre de 2003) y ojalá haya sembrado ya las primeras semillas para la solución paulatina de este problema. ¡Qué gran noticia si este artículo se hubiera quedado obsoleto antes de su publicación!

Xavier Barcons	barcons@ifca.unican.es
José Cernicharo	cerni@astro.iem.csic.es
Valentín Martínez Pillet	vmp@ll.iac.es
J. Miguel Mas Hesse	mm@laeff.esa.es

La Agrupación Astronómica de Sabadell

Un grupo de jóvenes entusiastas de la astronomía fundaron en 1960 la Agrupación Astronómica de Sabadell. Era entonces una pequeña asociación sin más aspiraciones que divulgar la astronomía en el reducido ámbito local. En la década de los años setenta, y a raíz de una intensa programación de actividades dedicadas a los poseedores de telescopios, la Agrupación experimentó una notable expansión con la afiliación de numerosos aficionados de toda España. Jurídicamente adquirió ámbito estatal e incrementó aquellas actividades en las que podían participar los asociados sin necesidad de desplazarse a la sede de la entidad, con lo cual no era preciso residir en Sabadell o en sus inmediaciones. Este planteamiento, que subsiste hoy en día, ha convertido a la Agrupación Astronómica de Sabadell en la asociación de su tipo con un mayor número de miembros en España.

Desde 1993, la sede de la Agrupación se halla ubicada en un moderno edificio, construido en el Parque de Catalunya, una gran zona verde de Sabadell. El edificio, diseñado exclusivamente para las necesidades de la Agrupación, dispone de una sala de exposiciones, un auditorio, oficinas, biblioteca y un observatorio equipado con moderno instrumental. En total son más de 500 metros cuadrados de superficie dedicados exclusivamente a la astronomía.

El grupo directivo, integrado en 2003 por 24 personas, está formado por una Junta Directiva y una Junta Técnica, cuyos miembros son, en su mayor parte, licenciados en astrofísica, física o en tecnologías (informática y telecomunicaciones, principalmente). En la Agrupación trabajan profesionalmente, a jornada completa, el director del observatorio, doctor en astrofísica, y la secretaria ejecutiva, licenciada asimismo en astrofísica. El resto de directivos llevan a cabo su labor de forma desinteresada.

La programación de la Agrupación Astronómica de Sabadell en la actualidad comprende dos áreas principales: la incentivación y el soporte a la astronomía a nivel amateur, y la divulgación y didáctica de la astronomía.

Entre sus actividades principales figura la edición de publicaciones: se edita cada dos meses una revista y una monografía con temas de interés para el aficionado a la astronomía, se editan comunicados e instrucciones de observación, pósters, un calendario anual y materiales diversos, como se ha hecho recientemente con un planisferio giratorio. Se promueve la observación a través del instrumental propio o el de los asociados con sesiones de trabajo en el observatorio o en campos de observaciones, o campos específicamente dedicados a la obtención de imágenes mediante todas las técnicas (fotografía tradicional, CCD, digital, webcams o vídeo).



Fig. 1.: Sede de la Agrupación en el Parque de Catalunya (Sabadell).

En el ámbito divulgativo se realizan cada mes entre 6 y 12 sesiones de observación destinadas al público, con audiovisuales previos, y numerosas sesiones especialmente concebidas para grupos escolares. En los últimos años han pasado por el observatorio una media de más de ocho mil personas por año. Tienen, asimismo, gran aceptación las conferencias que se llevan a cabo ininterrumpidamente desde hace 15 años cada miércoles por la tarde (excepto de julio a septiembre), tratándose toda clase de temas relacionados con la astronomía. Corren a cargo de conferenciantes miembros de la propia Agrupación o invitados. Al término de cada temporada se publican las conferencias a fin de que puedan ser conocidas por aquellos socios que residen fuera de Sabadell o que no pueden acudir a la sede.

Desde hace muchos años en la Agrupación Astronómica de Sabadell se imparten cursos de iniciación a la astronomía y cursos especializados. Sin embargo, en el periodo 2003-04 se ha renovado e incrementado toda la programación, de manera que este año se imparten 20 cursos y seminarios de temas diferentes que tratan sobre iniciación (para adultos y para niños), manejo de telescopios, descripción del firmamento, etc., o que tratan la astronomía con niveles superiores, como astrofísica o cosmología, temas especializados, como historia de la astronomía, astrobiología, geología planetaria, o tecnologías avanzadas, como el uso de cámaras CCD en los telescopios o el tratamiento informático de imágenes.

Cada dos años se celebra una Convención de Observadores en la que participan exclusivamente los asociados. En la convención de 2003 se han presentado 42 comunicaciones, 3 conferencias y 2 mesas redondas sobre dos grandes áreas temáticas: 1) la exposición de resultados de observaciones y estudios realizados en los dos últimos años y las propuestas de futuros trabajos; y 2) avances tecnológicos en el campo de la astronomía amateur. Cada convención reune a más de un centenar



Fig. 2.: Foto del auditorio de la Agrupación dotado con modernos medios audiovisuales.

de asociados procedentes de los más diversos puntos de España. El contenido de todas las intervenciones, extractado o íntegro, se da a conocer luego a través de publicaciones monográficas.

Buena parte de los trabajos de tipo técnico que desarrollan los miembros de la Agrupación se realizan en coordinación con organismos internacionales, ya que hay equipos en el observatorio con diversas especialidades. Por eso es frecuente la presentación de comunicaciones en congresos y simposios. En agosto de 2001 la Agrupación organizó en Sabadell el XX European Symposium on Occultation Projects (European Section of the International Occultation Timing Association).

Entre las instalaciones de la entidad deben contarse el auditorio, dotado de modernos medios audiovisuales (puede recibir en directo las imágenes facilitadas desde el observatorio), y el propio observatorio.

Bajo una cúpula de 5 m de diámetro se halla un telescopio múltiple: el tubo óptico principal es un reflector Newton de 50 cm de abertura a f/4 transformable en Cassegrain-Relay, a f/15. En paralelo hay dos refractores: uno de 16 cm y otro de 10 cm; éste último se utiliza exclusivamente para la observación del Sol con un filtro interferencial H α de 0.6 Å. Hay, además, otro reflector Newton, de 200 mm, que ofrece imágenes de control mediante una cámara de TV y una webcam. En el equipo accesorio figuran dos cámaras CCD: una FLI CM9 y una SBIG ST6. El telescopio puede operarse desde la propia cúpula, pero lo habitual es hacerlo a través del ordenador desde la cabina de control anexa.

Otro equipamiento importante de la Agrupación es la biblioteca. En ella se reciben las principales publicaciones periódicas del mundo y en ella hay un fondo bibliográfico integrado por 2500 volúmenes. Un apartado especial comprende libros y volúmenes de publicaciones periódicas antiguas procedentes de una valiosa donación que se recibió hace unos años. Se trata de más de doscientos volúmenes que comprenden obras de divulgación y técnicas desde mediados del siglo XIX. Hay ejemplares tan valiosos como el "Atlas Photograpique de la Lune", de Loewy y Puiseux (1895) y revis-

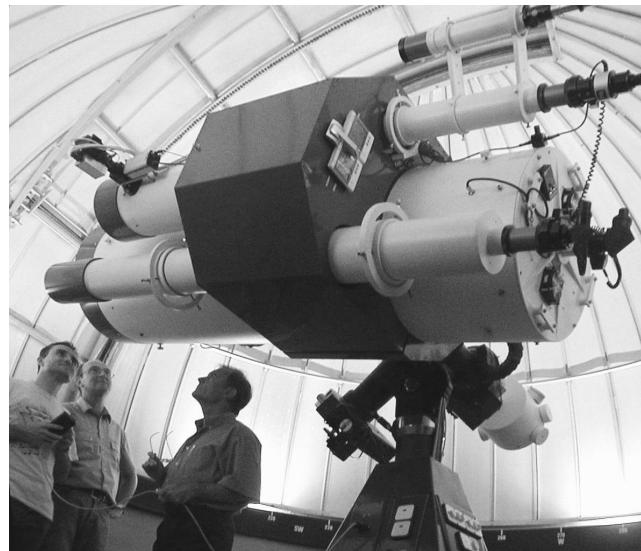


Fig. 3.: Detalle del telescopio reflector Newton de 50 cm de abertura. En paralelo se encuentran instalados dos telescopios refractores de 16 y 10 cm, y un reflector de 20 cm, este último equipado con TV y webcam.

tas desde su número 1, como "Journal du Ciel" (1866). Gracias a esta donación y al fondo propio acumulado desde el año 1960, en la biblioteca se halla la colección completa de la revista "L'Astronomie" (fundada por Camille Flammarion en 1882) hasta la actualidad, que es el órgano de la Société Astronomique de France. Su contenido constituye una exhaustiva historia de la astronomía ya que en sus páginas siempre se han reflejado los últimos avances y acontecimientos. Como pieza también de gran valor histórico, la Agrupación tiene expuesto un magnífico telescopio Manent de 1919, de 162 mm de abertura, equipado con dos grandes cámaras fotográficas, fiel testimonio de una tecnología pasada.

La Agrupación Astronómica de Sabadell se financia básicamente a través de las módicas cuotas que aportan sus socios y mediante las cantidades que se recaudan por los cursos o las sesiones de divulgación. Es una asociación independiente que no percibe subvenciones regulares de ningún organismo o institución. La entidad ha recibido diversos galardones, el más reciente de los cuales ha sido la Placa Narcís Monturiol 2002 al Mérito Científico y Tecnológico, otorgada por la Generalitat de Catalunya. Se trata del máximo galardón existente en Cataluña para instituciones científicas o tecnológicas.

Las actividades, la historia y los trabajos de la Agrupación se reflejan día a día en su página web: www.astrosabadell.org. La Agrupación Astronómica de Sabadell es miembro asociado de la SEA.

El Gran Telescopio Canarias: aceptado el segmento maestro

Resumen

Recientemente se ha completado el pulido del segmento maestro, después de haber finalizado su pulido iónico y comprobar el cumplimiento de las especificaciones ópticas establecidas. El segmento maestro se utilizará como referencia de curvatura para el resto de los segmentos. En otro orden de cosas, se ha colocado finalmente en La Palma, con la precisión nominal, el anillo de acimut, con lo que se comienza ahora a levantar la montura del telescopio. Los instrumentos científicos progresan adecuadamente. La estructura mecánica de ELMER acaba de recibirse en La Laguna, y el resto de sus subsistemas están listos para ser integrados. La óptica de OSIRIS está prácticamente finalizada. CanariCam está asimismo siendo integrado en Florida. El próximo año será de gran actividad tanto por el montaje del telescopio como por los instrumentos que estarán integrándose y probándose.

Cúpula

Una vez cerrado el contrato con el contratista, se encuentra ya muy avanzado el diseño de las soluciones de los problemas que se habían detectado, en particular las dificultades con los mecanismos de accionamiento de la compuerta de observación, y la falta de estanqueidad de las ventanas. Estas soluciones se llevarán a cabo durante la primavera y verano próximos. Entretanto, la cúpula está operativa y las compuertas pueden abrirse y cerrarse para introducir las piezas del telescopio conforme se vayan necesitando.

Telescopio

El anillo de acimut ya está colocado sobre el pilar de hormigón con las tolerancias requeridas. Esta operación ha resultado complicada, habiendo surgido una serie de dificultades que han ralentizado el montaje y fijación de este anillo (Figura 1 y Figura 2). Ahora se está procediendo a la instalación del suelo rotante como primer paso para la colocación de la montura del telescopio, continuando con la celda del primario, el anillo de elevación, para terminar con el tubo superior y la araña del secundario. Todo este proceso debiera estar listo para octubre de 2004, para cuyas fechas la estructura del telescopio estaría preparada para empezar a instalar la óptica.



Fig. 1.: El jefe de montaje de la empresa contratista se muestra satisfecho ante la comprobación de la correcta alineación del anillo de acimut.

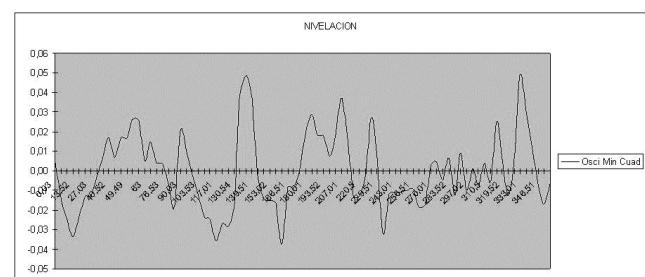


Fig. 2.: Errores de nivelación del anillo de acimut en toda su circunferencia. Nótese la escala de ordenadas en milímetros. El error puede verse que está dentro del requerimiento de 0.1 mm en toda la circunferencia del anillo.

Óptica

El primer segmento del espejo primario, el segmento maestro, se ha completado. Todas las pruebas interferométricas necesarias para su caracterización óptica se han llevado a cabo con éxito. Tenemos un primer segmento muy bueno, con un error de frente de onda de 35 nm rms, resultando en una degradación del 9.83%, frente al 10% requerido, de la intensidad máxima de una imagen limitada por *seeing*. La Figura 3 muestra un interferograma de este segmento, en el que puede verse su calidad óptica. Las irregularidades que se aprecian en un borde y un patrón geométrico visible en la superficie son detalles por debajo del error requerido. Algunas de estas irregularidades se deben a los primeros procesos de pulido iónico. Para próximos segmentos ya se dispone de una estrategia de pulido iónico que evitará estos patrones, con lo que se espera que los próximos segmentos sean incluso mejores que el maestro. Lo importante es que el segmento maestro está dentro de especificaciones y cumple ampliamente con lo requerido para alcanzar el requisito de calidad

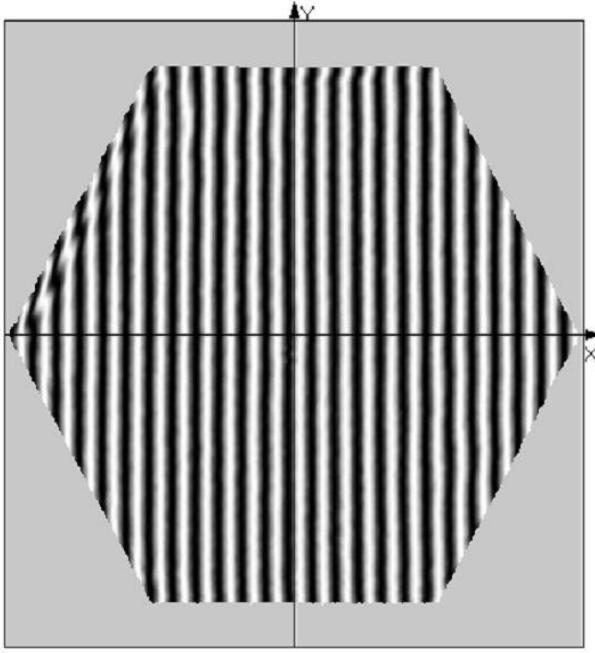


Fig. 3.: Interferograma del segmento maestro. El error de frente de onda es de 34.9 nm rms. (Fotografía cortesía de SAGEM/REOSC).

de imagen del telescopio, que recuerdo se definió en su día como la calidad óptica necesaria para no degradar una calidad de imagen (*seeing*) natural de 0.4 segundos de arco en más de un 10%.

Ya hay varios segmentos en la fase de pulido iónico. Se está preparando además la prueba en asociación de estos segmentos (Fig. 4) respecto del segmento maestro para comprobar que los radios de curvatura de todos los segmentos están dentro de las tolerancias requeridas. El parámetro fundamental ahora es lograr alcanzar un ritmo de pulido de un segmento cada dos semanas para el resto de los segmentos. Este ritmo es necesario para tener los primeros 36 segmentos acabados en el plazo previsto para Día Uno.

Durante el montaje y manipulación de los soportes de los segmentos se ha presentado un problema con éstos consistente en una falta de resistencia ante torsiones. Ya existe una solución que consiste en rigidizar los árboles de palancas, solución que se ha probado y ya se está aplicando con éxito, si bien la aparición de este defecto ha generado un retraso de un par de meses en realizar la prueba en asociación del primer lote de segmentos. Este lote, que debía haber estado terminado antes de final de año, será entregado hacia marzo de 2004. Esperamos sin embargo que el efecto sobre el calendario final sea inferior a estos dos meses.

Los espejos secundario y terciario están en proceso de pulido y se espera que queden totalmente terminados y entregados en la primera mitad del año 2004. Se está trabajando en la optimización de los servos de los mecanismos del espejo secundario. Concretamente,



Fig. 4.: Preparación de las pruebas de los segmentos en asociación (Fotografía cortesía de SAGEM/REOSC).

las prestaciones del secundario en cuanto a basculación (*chopping*) a 5 Hz, no están, todavía, dentro de lo requerido en cuanto a niveles de fluctuación (*jitter*), al no lograr que se stabilice por debajo de 0.025'' (el nivel requerido es 0.015'').

Por último, las cajas de Adquisición y Guiado, así como la Cámara de Verificación han sido aceptadas en factoría y están siendo enviadas al Observatorio donde se esperan para finales de Enero de 2004. Una vez en el ORM se les integrará el sistema de control del GTC y se pondrá este a punto para tener el conjunto preparado para cuando se instalen en el telescopio. Tanto las cajas de Adquisición y Guiado como la Cámara de Verificación han quedado satisfactoriamente bien de acuerdo con las pruebas realizadas en los laboratorios de sus fabricantes respectivos.

Control

Mientras escribimos esta nota acaba de distribuirse la sexta entrega de código de Control. Se ha venido distribuyendo una entrega cada seis meses aproximadamente. Cada entrega contiene más funcionalidad que la anterior manteniendo esencialmente la misma arquitectura. Puede decirse que el control del GTC está finalizado en lo que respecta a la realización de prototipos y diseño del control de mecanismos de los diversos subsistemas. La instalación de equipos de electrónica de control en el edificio está muy avanzada. Ya está equipándose la sala de control como muestran las Figuras 5 y 6.

El control de alto nivel, que es el más cercano a los usuarios está relativamente avanzado, si bien algunos paquetes faltan todavía. Más concretamente, el OPMS (*Observation Products Management Service*), que se encarga de todo lo que tiene que ver con la preparación de propuestas, simuladores de los diversos instrumentos, gestión de la base de datos de los bloques de observación, etc., está bastante avanzado. La Máquina de Ob-



Fig. 5.: Terminales de usuario en la futura sala de control del GTC. La decoración y mobiliario son provisionales.



Fig. 6.: Algunos de los armarios de electrónica de control del GTC ya instalados en el ORM.

servación (OE) está asimismo bastante avanzada. Este módulo utiliza las librerías de apuntado de Pat Wallace para todo lo que tiene que ver con las rutinas de observación. Estas rutinas de apuntado han sido usados por prácticamente todos los telescopios de los últimos años. Menos avanzados están el secuenciador de tareas (Sequencer) y el planificador de observaciones (Scheduler), que se completarán a lo largo del año 2004. Se está trabajando en el control de alto nivel de ELMER, de las cajas de adquisición y guiado y de la cámara de verificación, que se necesita para la pruebas de estos sistemas que estarán en la montaña en la primera mitad del 2004. Todos estos subsistemas utilizan componentes y electrónicas muy similares lo que hace que el sistemas de control de todos ellos sea prácticamente el mismo, lo que facilita no sólo la producción de este control sino las tareas futuras de mantenimiento.

Instrumentación Científica

Los instrumentos científicos de primera luz están iniciando su etapa de integración en laboratorio. CanariCam está bastante avanzado, a pesar de un cierto retraso sufrido debido a que TRecS, el instrumento de Gemini, predecesor de CanariCam, ha tardado más de

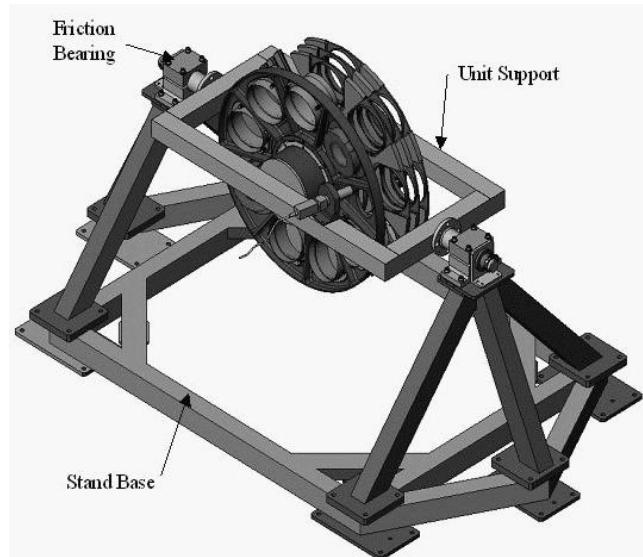


Fig. 7.: Caballete para integración y mantenimiento de las ruedas de OSIRIS.

lo esperado en ponerse a punto en telescopio. La fecha de finalización de CanariCam se sitúa en noviembre de 2004, con tiempo suficiente para llevar CanariCam al GTC antes de Día Uno.

OSIRIS acaba de subcontratar la fabricación de su estructura mecánica a una empresa valenciana. Dicha estructura estará finalizada en la primera mitad de 2004, al igual que las ruedas de filtros y elementos dispersores que se están fabricando y llegarán al IAC en Marzo de 2004. Diversos útiles para el manejo de grandes piezas mecánicas también se están diseñando para facilitar la integración y futuro mantenimiento de OSIRIS. Un ejemplo de este tipo de estructuras puede verse en la Figura 7. El cambiador de máscaras, que se ha diseñado enteramente en el IAC, estará asimismo terminado para mayo de 2004. La óptica de OSIRIS está acabada o en sus últimas etapas de fabricación según qué elementos. Ha habido un problema con el filtro sintonizable azul en el que el fabricante no ha alcanzado la mínima separación de placas requerida, por lo que ha sido necesario repetir su fabricación. En todo caso, ambos filtros sintonizables, el azul y el rojo, estarán acabados y listos para ser probados a principios de 2004. Significa esto que el grueso de la integración de OSIRIS comenzará en la primavera de 2004. El equipo OSIRIS sigue trabajando activamente en el programa científico del tiempo garantizado. Han establecido una fecha límite para propuestas de tiempo garantizado para mitad de 2004.

ELMER, o mejor dicho su estructura mecánica, llegó hace unos días al taller del IAC donde se va a realizar la integración del resto de sus subsistemas. Las pruebas realizadas hasta ahora en fábrica han sido muy satisfactorias. En particular las prestaciones relativas a flexiones de la estructura y repetibilidad de los mecanismos están dentro de lo especificado. El aspecto



Fig. 8.: La estructura mecánica de ELMER en su contenedor de transporte.

de ELMER es fenomenal como puede apreciarse en la Figura 8.

La integración de ELMER ha dado comienzo mientras escribimos este informe. En el taller mecánico del IAC se ha habilitado un espacio relativamente limpio para ello. Hace unos días se llevaron a cabo en el laboratorio de GRANTECAN (Fig. 9) las pruebas de transmitancia del colimador y lente de campo, que han resultado excepcionales, con valores de transmitancia un par de puntos porcentuales por encima de lo especificado. Del mismo modo, los espejos planos, pulidos y recubiertos en INAOE, muestran una reflectancia extraordinaria. El grueso de la integración de ELMER se llevará a cabo en la primera mitad de 2004, y se espera que el instrumento esté completamente listo para su envío al ORM a finales de 2004.

Astrónomos de Soporte

A principios de septiembre se incorporaron a GTC los dos primeros astrónomos de soporte. Se trata de Luis Corral Escobedo y de Víctor Sánchez Béjar. Luis es un astrónomo mexicano especialista en estrellas masivas. Luis fue el responsable de la puesta a punto del telescopio de 2.5 m de Cananea en el norte de México. Víctor es especialista en objetos de baja masa. Víctor ha sido astrónomo de soporte en el Observatorio del Teide y tiene amplia experiencia especialmente en imagen óptica e infrarroja de objetos muy débiles. Tanto Luis como Víctor han comenzado a trabajar en la preparación de los procedimientos de puesta a punto del GTC y sus instrumentos, incluyendo la caja de Adquisición y Guiado y Cámara de Verificación. Está previsto aumentar el número de astrónomos de soporte a lo largo del año 2004.



Fig. 9.: Marisa y Ernesto manipulando el colimador durante las pruebas de transmitancia en el laboratorio.

Ciencia con el GTC

El segundo congreso sobre Ciencia con el GTC se celebrará los días 16 a 18 de Febrero en el Castillo de Chapultepec, uno de los parajes más emblemáticos de la Ciudad de México. En esta ocasión se quiere enfatizar la ciencia a realizar con los primeros instrumentos del GTC. Es también una excelente ocasión para que la comunidad española conozca la antena submilimétrica de 50 m que se está construyendo en el Cerro La Negra, Puebla, México, y al que los astrónomos españoles tendrán acceso, si bien minoritario, gracias a los acuerdos de participación de México en el GTC.

Un nuevo aspecto de este congreso será la posibilidad de realizar talleres de trabajo sobre temas específicos, lo que conferirá valor añadido a la reunión, y facilitará que se establezcan colaboraciones de cara a la utilización del tiempo de colaboración en el GTC.

Pedro Alvarez Martín

pam@ll.iac.es

J. Miguel Rodríguez Espinosa

espinosa@ll.iac.es

El tránsito de Venus del 8 de junio de 2004

Introducción

El próximo 8 de junio Venus pasa por delante del disco solar, un fenómeno infrecuente (se da en pares separados por 8 años casi cada 130 años). La última vez que sucedió fue en 1882, la próxima será en el 2012, y luego en el 2117. Se trata de un suceso notable, observable a simple vista, que generará sin duda una gran atención por parte del público general y en especial por parte de los medios de comunicación que, cada vez más, consiguen hacer de cada acontecimiento astronómico un momento en el que parece que no hay otras cosas que mirar en el mundo. Sin duda, como gente que tiene en la astronomía su profesión y a menudo su vocación, a todos nos encanta que algo así pase, que nuestra ciencia se ponga *de moda*, como sucedió el pasado agosto con el asunto de la oposición marciana, en noviembre con el último eclipse total de sol, incluso con el bólido observado el 4 de enero de 2004, por mencionar sólo algunos de los últimos *booms* mediáticos de la astronomía.

Algo que sucede cada siglo y poco es lo bastante raro como para que llame la atención. Como además se puede observar a simple vista, como los eclipses, resulta lo bastante cercano a la gente como para incrementar su interés.

Un inciso

Deberemos pasarnos el año avisando que la única manera segura de observar un tránsito de Venus es utilizar un sistema de proyección de la imagen del disco solar, que las gafas de eclipses, los vidrios de soldador y cualquier otro tipo de filtros están objetivamente desaconsejados en un caso de estos, porque estamos hablando de observar al Sol *entero* durante varias horas... convendrá mejor pasarse de agorero con las previsibles consecuencias irreparables en la visión, y habremos de repetirlo una y mil veces. Y serán pocas...

La vertiente histórica

Tiene además esa componente histórica interesante que permite dar un *volumen* a la noticia apasionante: por ejemplo, podemos recordar que fue Johannes Kepler el primero en calcular un suceso de este tipo; o el dato poco conocido de que la primera vez que se usó para medir la paralaje solar un tránsito de Venus fue en 1639, cuando el párroco y astrónomo Jeremiah Horrocks calculó que la distancia al Sol era de unos 95 millones de km. Ligado al tema está, desde luego, la proposición de Edmund Halley de establecer puestos de observación de un tránsito de Venus a diferentes latitudes para poder

hacer mediciones más precisas de la paralaje solar (en 1716). Por no hablar de las 70 expediciones que en 1761 observaron el tránsito, posiblemente la primera vez en que se acometía una investigación científica de carácter global; o cómo en el tránsito de ocho años después se cuentan más de ciento cincuenta observaciones *oficiales*.

Los tránsitos de 1874 y 1882 fueron la consagración de las expediciones científicas, del valor de las sociedades científicas, la aparición de ilustres aficionados, las primeras veces que se usaba la fotografía y casi el cine... la presencia de los periódicos que hacía que todo el fenómeno trascendiera los ámbitos científicos y alcanzar al gran público. Como ven, hay donde elegir...

Aprovechando para divulgar

Un poco por estas razones, un poco porque es mejor prever las cosas y adelantarse a los acontecimientos, desde diversas instituciones se ha comenzado a trabajar para poder dotar a este tránsito de Venus, el primero del milenio, de una cobertura en la que los científicos, los divulgadores, los aficionados o los educadores podamos presentar la información, ilusionar con proyectos atractivos y hasta emocionar un poco a toda la sociedad. Estoy convencido de que es un buen momento para hacerlo, y para poder tomar las riendas nosotros, consiguiendo así que la comunicación que se vaya haciendo del fenómeno sea lo más adecuada posible, y evitando, al menos intentándolo, que al ser la presión de los medios de comunicación la que mueve a estos sectores a hablar del asunto, se pierda la oportunidad de dar a conocer, y reivindicar en cierto grado, la Astronomía (así, con mayúscula) y su proyección social. Que sea, además de un servicio público por nuestra parte, una buena ocasión para hacernos valer. A alguien le podrá parecer un tanto frívolo plantear estos objetivos, pero creo que es precisamente con ocasión de estos fenómenos mediáticos cuando se debe dar a conocer el trabajo de los astrónomos y astrofísicos, la proyección social de una ciencia que todos valoramos objetivamente, pero que es tan desconocida.

Preparándonos para el acontecimiento

En diferentes instancias ya se está moviendo el asunto. Por ejemplo, el ESO, junto con la Asociación Europea para la Enseñanza de la Astronomía (EAAE), el Observatorio de París, el *Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides* (IMCCE) y el Instituto Astronómico de la Academia de Ciencias de Chequia comenzaron a promover el año pasado el proyecto VT-2004, que ha conseguido apoyo comunitario en el marco de la Semana Europea de la Ciencia 2004. Se trata de un proyecto con la participación de 27 países europeos, que pretende dirigirse no sólo al público en general, sino hacer especial énfasis en el mundo educativo, y promoviendo observaciones sistemáticas del

fenómeno, una especie de reproducción de las expediciones que en siglos pasados permitieron realizar las mediciones de la paralaje solar. Desde la coordinación del VT-2004, como se puede ver en el sitio web que ya está activo: www.vt-2004.org, se ha propuesto una estructura nodal, de manera que las actividades puedan fluir hacia los diferentes países mediante nodos nacionales. El Planetario de Pamplona se ha ofrecido para dar ese servicio al proyecto VT-2004. Y ya está activo, aunque aún sin contenidos -que se introducirán pronto- el sitio web: <http://www.venus04.org/> donde queremos centralizar la información y servir de enlace a las diferentes actividades del proyecto.

Las Reales Sociedades de Física y Matemáticas, dentro de su proyecto *Física+Matemáticas en Acción* van a aprovechar este fenómeno para proponer un premio dentro de este proyecto a los trabajos escolares que tengan relación con la observación y el uso astronómico de los tránsitos de Venus.

Pero nos parecía importante que, además de llevar adelante este proyecto europeo, y el proyecto educativo español, utilicemos [venus04.org](http://www.venus04.org) para dar a conocer cualquier otra iniciativa sobre el fenómeno astronómico. Estamos poniéndonos en contacto estos días con las agrupaciones astronómicas, con la red de planetarios y museos de ciencia, y con otros sectores que pueden estar interesados en dar a conocer o en promover actividades diferentes: documentación, observaciones públicas, observaciones *científicas*, la elaboración de foros de discusión y preguntas, consejos, portales de información astronómica, etcétera.

Agradezco la oportunidad que me ofrece el boletín de la SEA de dar a conocer los primeros pasos de este proyecto, porque creo que el sector profesional debe ser uno de los que más se puede implicar en este proyecto. Estamos abiertos a todas las ideas, tenemos tiempo suficiente como para comenzar a configurar un menú bastante apetitoso para el público y los medios de comunicación. El uso de la Red, la amplificación que los aficionados y los centros de divulgación, así como el mundo educativo, son factores que resultarán claves para conseguirlo.

¡Este año se van a enterar de lo que vale un astrónomo! (con perdón).

Javier Armentia javarm@pamplonetario.org
Planetario de Pamplona
<http://www.pamplonetario.org/>
<http://www.venus04.org/>

Datos sobre el tránsito de Venus

En la tabla adjunta se dan, para diferentes ciudades españolas, los instantes de los contactos del disco del planeta con el disco solar, el instante de máximo acercamiento entre los centros de ambos, la altura del Sol en el instante de los contactos exteriores y máximo acercamiento y la separación mínima. Como podéis ver, desde todo el territorio español, excepto Canarias, se podrá seguir el tránsito en su totalidad, aunque con el Sol a muy poca altura durante el primer contacto.

¡Buen tiempo para todos y que disfrutéis del tránsito!

Eduard Masana

emasana@am.ub.es

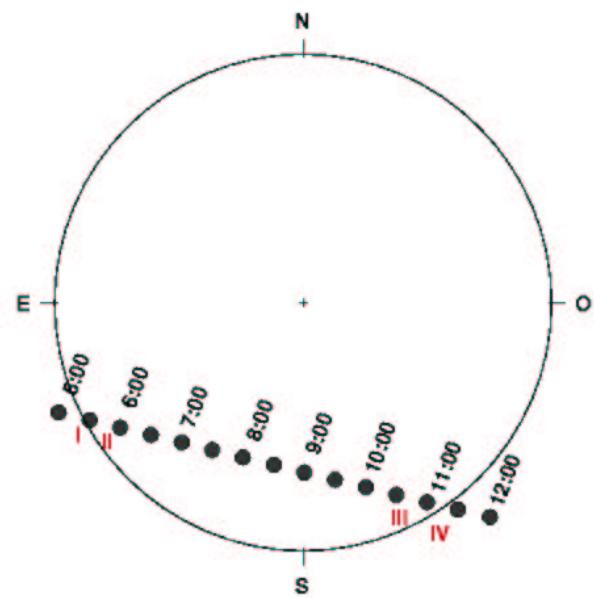


Fig. 1.: Esquema del paso de Venus por delante del disco solar. Se muestra la posición geocéntrica de Venus respecto al Sol cada 30 minutos. Todas las horas están dadas en Tiempo Universal: deben añadirse dos horas para obtener el tiempo civil en la península, Baleares, Ceuta y Melilla y una hora en las Canarias.

	Primer contacto exterior (I)		Primer contacto interior (II)		Máximo acercamiento		Segundo contacto interior (III)		Segundo contacto exterior (IV)		Separación mínima
	TU h m s	Alt o	TU h m s	TU h m s	Alt o	TU h m s	TU h m s	Alt o	"		
Badajoz	5 20 28.3	2	5 40 12.9	8 24 03.1	36	11 05 50.6	11 25 05.7	69	639.3		
Barcelona	5 20 24.2	10	5 40 04.0	8 23 31.4	43	11 05 09.8	11 24 23.5	71	638.8		
Ceuta	5 20 33.6	2	5 40 16.3	8 24 15.1	38	11 06 07.7	11 25 20.1	72	638.3		
Logroño	5 20 22.5	7	5 40 05.4	8 23 36.0	40	11 05 14.4	11 24 30.4	68	639.7		
Madrid	5 20 26.6	5	5 40 09.7	8 23 49.2	39	11 05 31.8	11 24 46.7	70	639.3		
Melilla	5 20 35.0	4	5 40 16.0	8 24 13.1	40	11 06 05.5	11 25 16.6	74	637.8		
Murcia	5 20 31.1	6	5 40 11.8	8 23 56.1	41	11 05 41.9	11 24 54.3	73	638.3		
Oviedo	5 20 19.7	5	5 40 04.9	8 23 37.4	37	11 05 16.2	11 24 34.0	66	640.3		
Palma de Mallorca	5 20 27.5	6	5 40 06.5	8 23 39.2	40	11 05 20.6	11 24 32.9	71	638.9		
Pamplona	5 20 21.7	8	5 40 04.3	8 23 32.5	40	11 05 10.0	11 24 26.0	68	639.7		
Sta Cruz Tenerife	8 25 05.9	28	11 07 27.5	11 26 39.7	67	637.8		
Santander	5 20 20.0	6	5 40 04.0	8 23 33.2	39	11 05 10.8	11 24 28.0	67	640.1		
S. de Compostela	5 20 19.5	3	5 40 06.1	8 23 44.3	35	11 05 25.7	11 24 44.2	65	640.5		
Sevilla	5 20 31.2	2	5 40 14.8	8 24 09.0	37	11 05 58.8	11 25 12.5	71	638.8		
Toledo	5 20 27.6	5	5 40 10.7	8 23 52.7	39	11 05 36.5	11 24 51.2	70	639.2		
Valencia	5 20 28.5	7	5 40 09.2	8 23 47.0	42	11 05 29.7	11 24 42.8	72	638.6		
Valladolid	5 20 23.8	5	5 40 07.9	8 23 44.7	38	11 05 25.6	11 24 41.8	68	639.8		
Vitoria-Gasteiz	5 20 21.6	7	5 40 04.8	8 23 34.4	40	11 05 12.3	11 24 28.7	68	639.8		
Zaragoza	5 20 24.2	8	5 40 06.0	8 23 37.0	41	11 05 16.0	11 24 30.9	70	639.3		

ARTÍCULO DE REVISIÓN

Numerical Simulations of Relativistic Jets

Miguel A. Aloy

maa@MPA-Garching.MPG.DE

José M^a Ibáñez

Jose.M.Ibanez@uv.es

José M^a Martí

Jose-Maria.Marti@uv.es

Abstract

In this work we review the role of numerical simulations in our basic understanding of extragalactic jets and gamma-ray bursts. Numerical, hydrodynamic simulations of relativistic jets have become an indispensable tool (along with theory and observations) in order to understand the physics of astrophysical phenomena as diverse as extragalactic jets from active galactic nuclei, galactic microquasars or gamma-ray bursts. A common characteristic of all these phenomena (besides their intrinsic relativistic nature) is that they involve a huge range of distance scales, some of which are not directly accessible to observations. This explains why numerical simulations have been used (e.g., in the case of formation of jets) as laboratory experiments trying to fill the gaps that are unresolved by direct observations.

Resumen

En el presente trabajo se repasa el papel desempeñado por las simulaciones numéricas en nuestro conocimiento básico de los chorros extragalácticos y las erupciones de rayos gamma. Las simulaciones hidrodinámicas numéricas se han convertido en una herramienta indispensable (junto a la teoría y las observaciones) para entender la física de fenómenos astrofísicos tan diversos como chorros extragalácticos, microcuásares galácticos o erupciones de rayos gamma. Una característica común a todos estos fenómenos (al margen de su naturaleza intrínsecamente relativista) es que involucran un rango enorme de escalas, algunas de las cuales no son directamente accesibles a las observaciones. Ello explica por qué las simulaciones numéricas se han usado (por ejemplo, en el caso de formación de chorros) como experimentos de laboratorio que intentan cubrir los huecos que no son resueltos mediante observaciones directas.

Introduction

As early as in 1918, H.D. Curtis (1918), discovered “a curious straight ray... connected with the nucleus by a thin line of matter” in the giant elliptical galaxy M87. This fact represented the discovery of a new type of astronomical objects now known as extragalactic jets.

With the advent of long baseline radio interferometry in the seventies, many extragalactic jets were imaged (e.g., Cygnus A, Perley et al. 1984; Fig. 1) and the first models of continuous injection (Scheuer 1974, Blandford & Rees 1974), tested. Nowadays the list of galaxies with jets, detected and imaged in a wide range of frequencies, from radio to γ rays, is long and jets are a common ingredient of a class of AGNs, namely radio-loud AGNs. In a widely accepted scenario (Fossati et al. 1998, and references therein), a single population of electrons is responsible for the emission from radio to the UV/soft X-rays by the synchrotron mechanism, and at higher frequencies by the inverse-Compton process.

Besides extragalactic jets, there are cases of well collimated jets in several compact binary systems in our Galaxy, as SS433 (see, e.g., Margon 1984). The jets emerging from this source propagate at a quarter of the speed of light, c . Even larger speeds have been inferred from other galactic X-ray sources (e.g., GRS 1915+105, Mirabel & Rodriguez 1994; GRO J1655-40, Hjellming & Rupen 1995), now called microquasars, consisting in compact binaries harboring a black hole or a neutron star (see, e.g., Paredes & Martí 2002 for a review). The transverse apparent motions of several radio components (i.e., local brightness peaks in radio maps) in this last two sources exceeds the light speed. This phenomenon, commonly known as superluminal motion, is also observed in many extragalactic jets at parsec scales (see, e.g., Jorstad et al. 2001). Apparent superluminal motions are a prediction (Rees 1966) of relativistically expanding sources close to the line of sight. Under these conditions, the time lapse between the positions in the sky of an emitting blob moving close to the speed of light, as measured by a distant observer, reduces because the blob almost *catches* up with the radiation it emits. In this way, the apparent speed of the motion projected on the sky can exceed the light speed. Within the nowadays accepted standard model (Blandford & Königl 1979) the superluminal motions and the jet flux asymmetries (produced by the Doppler beaming of the emission in the direction of motion) are interpreted as the result of relativistic bulk motions in the flow which could reach speeds of up to 99.9% c close to the central source decelerating up to 95% c at larger distances (hundreds of kiloparsecs in the most powerful sources). The relativistic jet paradigm is supported by many other arguments (see, e.g., Ghisellini et al. 1993).

Inferred jet velocities close to the speed of light and recent very-long-baseline-interferometric (VLBI) radio observations (Junor et al. 1999) suggest that jets are formed and collimated within less than 100 gravitational radii of the event horizon of the black hole. Current theoretical models assume that accretion disks are the source of the bipolar outflows which are further collimated and accelerated via magnetohydrodynamic (MHD) processes (see, e.g., Celotti & Blandford 2001, Meier et al. 2001, Marscher et al. 2002). There is a large num-

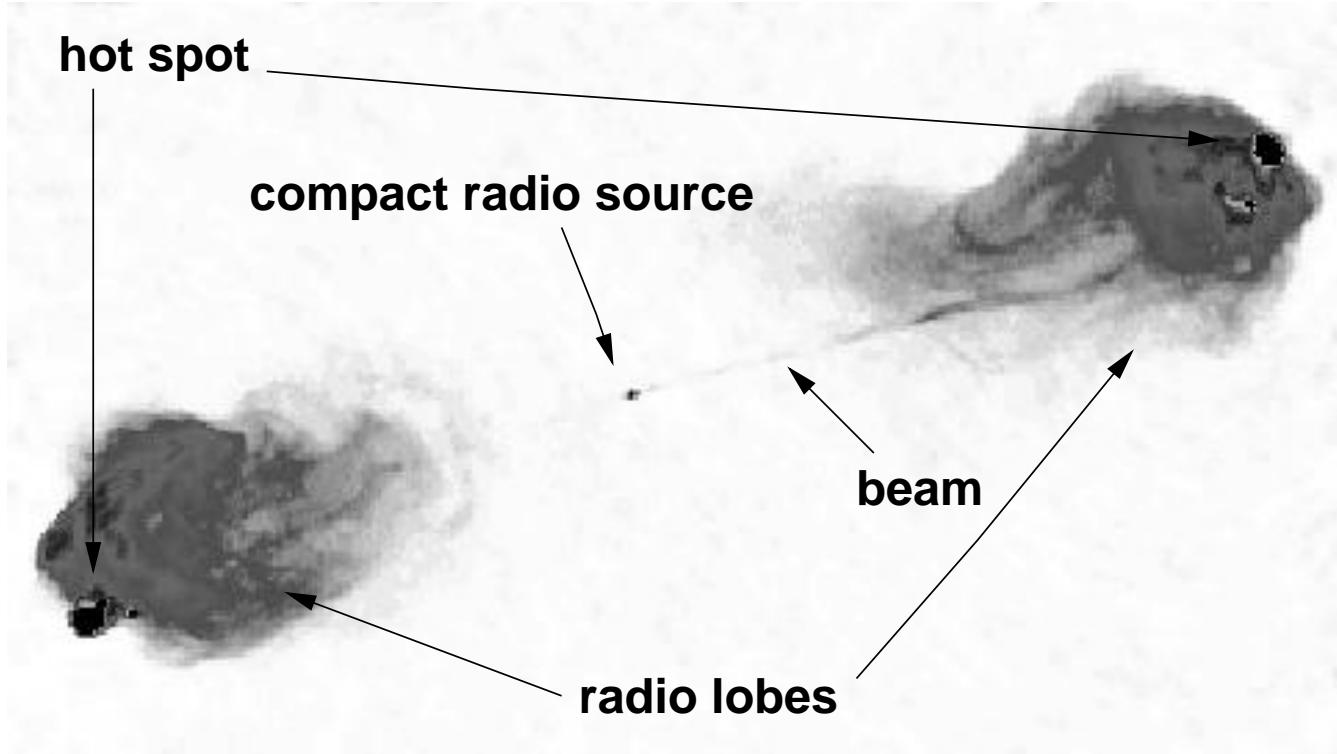


Fig. 1.: Cyg A at 6cm (from Perley et al. 1984) showing the two oppositely directed jets. The beams are the channels through which huge amounts of relativistic particles and energy are transported from the nucleus of the radio galaxy to the intergalactic medium, feeding extended regions of diffuse radio emission, the radio lobes. The hot spots at the edges of the radio lobes are the sites of impact of the beams on the ambient medium. The brightest beam has a (deprojected) length of ≈ 66 kpc. Compact radio cores like the one appearing at the center of the image are the targets for very long baseline interferometric (VLBI) studies.

ber of parameters which are potentially important for jet powering: the black hole mass and spin, the accretion rate and the type of accretion disk, the properties of the magnetic field and of the environment (Meier et al. 1997, Meier 2000).

At parsec scales, the jets, observed via their synchrotron and inverse Compton emission at radio frequencies with VLBI imaging, appear to be highly collimated with a bright spot (the core) at one end of the jet and a series of components which separate from the core, sometimes at superluminal speeds (see Gómez et al. 2001 and Fig. 2). These moving components, usually preceded by outbursts in emission at radio wavelengths, are interpreted in terms of traveling shock waves (*shock-in-jet models*; Hughes et al. 1985, Marscher & Gear 1985) or interacting instability modes (Hardee 2000, 2003).

Finally, the morphology and dynamics of jets at kiloparsec scales are dominated by the interaction of the jet with the surrounding extragalactic medium, the jet power being responsible for dichotomic morphologies (the so called Fanaroff-Riley I and II classes (Fanaroff & Riley 1974, FR I and FR II, respectively; see Fig. 3). Whereas current models (Bicknell 1996, Laing 1996,

Laing & Bridle 2002a, 2002b) interpret FR I morphologies as the result of a smooth deceleration from relativistic to non-relativistic, transonic speeds on kpc scales due to a slower shear layer, flux asymmetries between jets and counter-jets in the most powerful radio galaxies (FR II) and quasars indicate that relativistic motion extends up to kpc scales in these sources, although with smaller values of the overall bulk speeds (Bridle et al. 1994). The detection by the Chandra satellite of strong X-ray emission from jets at large scales (0.1-1 Mpc; e.g., PKS0637-752; Chartas et al. 2000, GB1508+5714; Siemiginouska et al. 2003), interpreted as scattered inverse Compton radiation from the cosmic microwave background (Celotti et al. 2001), bears additional support to the hypothesis of relativistic bulk speeds on these scales.

Despite the thirty years of intensive research in the field of extragalactic jets the basic questions are still standing: how and why jets are formed, collimated and the plasma accelerated up to highly relativistic speeds; what are jets made of; which is the role of magnetic fields at subparsec, parsec and kiloparsec scales; how can jets in powerful sources remain collimated along nine decades in initial radius; what lies behind the mor-

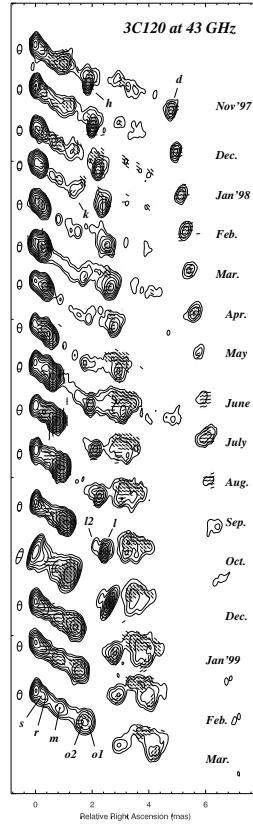


Fig. 2.: 3C120 at 43 GHz. The sequence covers, from top to bottom, the evolution of the inner few parsecs in the source during 17 months, starting on November 1997. Contours give the total intensity, polarized intensity is shown on a gray scale, and bars indicate the direction of the magnetic polarization vector. Blobs of radio emission appear to separate from the leftmost radio component (the radio core). The motion of these components is superluminal, with speeds between 4 to 6c. Image courtesy of J.L. Gómez.

hological dichotomy between FR I and FR II sources; which is the influence of jets in the evolution of the intergalactic/intracluster medium.

Numerical simulations in the frame of classical fluid dynamics have become a powerful tool in the study of extragalactic jets since the first simulations by Rayburn (1977) and, remarkably, Norman et al. (1982) verified the jet model of Blandford & Rees (1974) and Scheuer (1974) for classical double radio sources. Since then, the complexity of the simulations has increased continuously in parallel with the computational power (almost doubling every year due to hardware and software advances), algorithm development (use of conservative methods for compressible ideal fluids and magnetofluids and techniques for mesh refinement), and the better understanding of the jet phenomenon, focusing on the study of the morphology, dynamics and non-linear sta-

bility of jets at kpc scales (see the reviews of Norman 1993, 1996 and Ferrari 1998; Fig. 4).

Another example of astrophysical outflows having relativistic speeds are gamma-ray bursts (GRBs). GRBs are sudden bursts whose bulk energy is emitted in the range 30 keV to 2 MeV. The standard theoretical model used to explain GRBs is the so called *fireball* model where a fraction of the gravitational binding energy released by accretion of a thick torus onto a stellar mass black hole is used to form e^-/e^+ pairs which annihilate into photons that release energy over the baryons of the system. Provided the baryon load of the fireball is not too large, the baryons can be accelerated to ultra-relativistic speeds with Lorentz factors $> 10^2$ (for recent reviews, see e.g., Djorgovski et al. 2002; Mészáros 2002; Piran 1999; Piran 2000 or in this Boletín, Castro-Tirado 1998).

From the measured GRB distances and luminosities the isotropic gamma-ray energy releases should be $\sim 10^{54}$ erg. However, there are serious theoretical problems to understand how such a huge amount of energy can be released even in phenomena involving compact objects. A way to reduce the energy budget is to consider that the radiation from GRBs is strongly beamed (the measured isotropic equivalent energy is reduced by a factor $\chi = \Delta\Omega/4\pi$, $\Delta\Omega$ being the solid angle subtended by the conical outflow). Indeed, there exists observational evidence supporting that the gamma-ray and afterglow radiation of (some) GRBs is not emitted isotropically, but may be beamed (for a review, see e.g., Djorgovski et al. 2002). Particularly, Sari et al. (1999) found that the rapid temporal decay of several GRB afterglows is more consistent with the evolution of a relativistic conical flow or jet after it slows down and spreads laterally than with spherical (isotropic) blast wave models. Using all GRB afterglows with known distances Frail et al. (2001) derived their conical opening angles. These show a wide variation (2° to 20°) reflecting the observed broad distribution in fluence and luminosity for GRBs. Taking the corrected emission geometry into account Frail et al. find that the gamma-ray energy release is narrowly clustered around $5 \cdot 10^{50}$ erg. This value is comparable to the energy releases detected in ordinary supernovae. A similar conclusion can be drawn by estimating the fireball energy based on X-ray afterglow observations (Freeman & Waxman 2001), and by modeling the broadband emission of well-observed afterglows (Panaitescu & Kumar 2002). A number of observations (Djorgovski et al. 2002) and numerical simulations (Aloy et al. 2000b, Zhang et al. 2002) have supported the hypothesis of anisotropic (i.e., conical) expansion (see the section *Jets from GRBs*).

In the field of GRBs, there is a large number of poorly understood issues that we can split in four big classes (Frail 2003). The first one concerns the phenomenology and includes unresolved questions like why

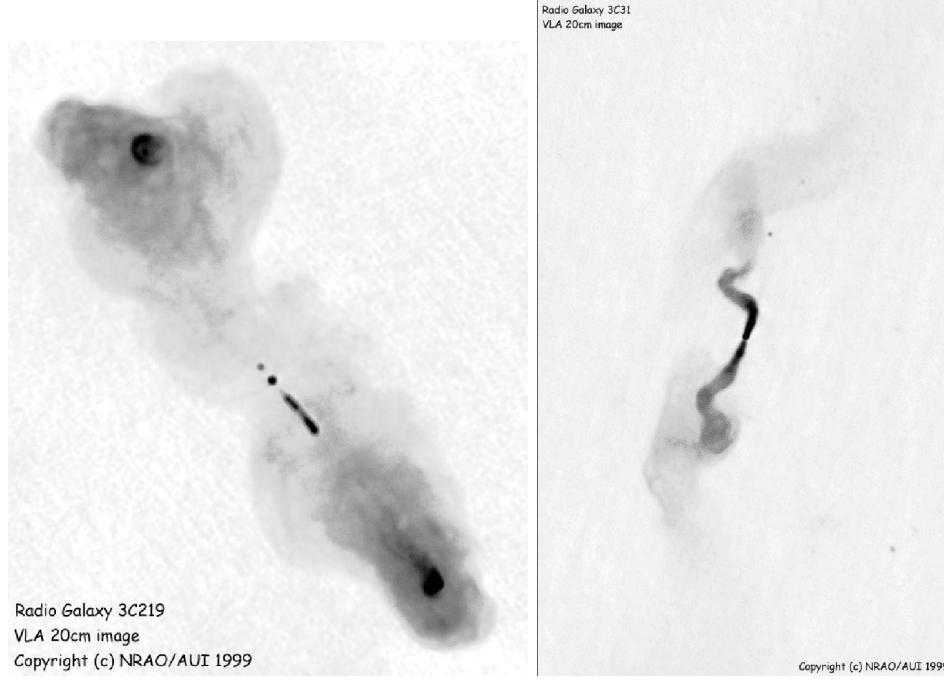


Fig. 3.: FR I/FR II morphological dichotomy. The typical morphological elements of a FR II radio galaxy (asymmetric and well collimated beams, hot spots, radio lobes) are distinctly recognized in the image of 3C219. 3C31, the archetype of FR I radio galaxies, have more symmetrical, less collimated beams disolving into diffuse radio lobes without hot spots.

there exists such a large diversity of GRBs and which is the relative rate of different cosmic explosions related to them. The second set refers to the nature of the central engines (i.e., which objects are the progenitors of GRBs). The third set corresponds to the explosion physics, like, e.g., how the energy is extracted and partitioned among the baryons, photons, non-thermal particles and magnetic fields, how is the outflow launched and propagates, or how does the fireball interact with its surroundings. Finally, the last class is related to the extent to which GRBs can be used as tools or new windows in other areas of astrophysics like, e.g., whether GRBs are standard candles for cosmology, whether they are sources of extrasolar neutrinos or whether GRB events can also be hosts of ultra-high energy ($> 10^{19}$ eV) particles.

In the nineties, the numerical simulation of relativistic jets and GRBs was triggered by the development of new numerical techniques able to solve the equations of relativistic hydrodynamics under the extreme conditions (i.e., large flow Lorentz factors and strong shocks) found in these scenarios. Most of these new techniques (see Martí & Müller 1999, 2003 or Aloy & Martí 2002 for recent reviews) exploit the hyperbolic and conservative character of the equations of relativistic hydrodynamics and have allowed, for the first time, the simulation of jets at parsec scales (where the indications for relativistic speeds are strong) and to probe possible scenarios of jet formation in the context of general relativistic magnetohydrodynamical (GRMHD) processes.

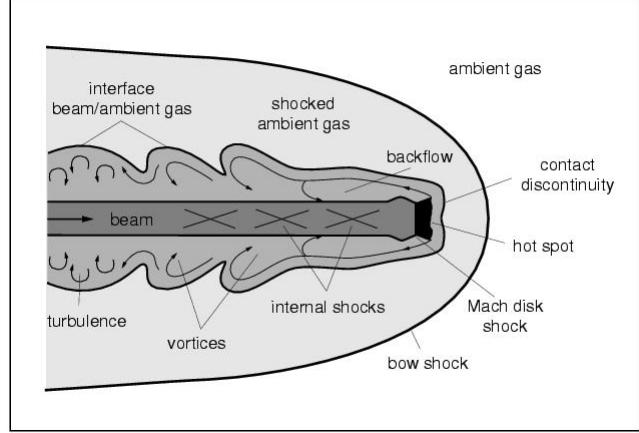


Fig. 4.: Schematic view of the morphological elements of a supersonic jet propagating in a homogenous ambient medium as derived from numerical simulations (image taken from Müller 1998). The morphology and dynamics of the jet is governed by the head-on interaction of the jet with the ambient gas that produces a terminal shock (the hot spot) where the beam material is deflected towards the source forming the so-called *cocoon* (the extended radio lobes).

In the field of GRBs, as they were originally associated with spherically symmetric relativistic fireballs, a number of numerical relativistic hydrodynamic simulations of one-dimensional flows has been performed. Only very recently, the fact that GRBs can be the result of

collimated ultrarelativistic outflows has been taken into account in multi-dimensional numerical simulations (see the section *Jets from GRBs*).

Large-scale, extragalactic jets: morphology, dynamics and long term evolution

Morphology and dynamics of relativistic jets

The implications of relativistic flow speeds and/or relativistic internal energies in the morphology and dynamics of large scale jets were the subject of the first numerical investigations on relativistic jets. The main effect introduced by relativistic dynamics is that both the internal energy and the Lorentz factor increase the effective inertial mass of the beam (Martí et al. 1994, 1995, 1997; Duncan & Hughes 1994), making relativistic jets to behave like denser classical jets. These equivalence has been further explored by Komissarov & Falle (1996a, 1998) and Rosen et al. (1999).

Summarizing the results obtained in the aforementioned works, it can be established that relativistic jets give rise to two different morphologies according to the relevance of relativistic effects (Fig. 5). Fast, hot beams (i.e., beams with internal energies larger than their rest-mass energies) have little internal structure (as they are almost in pressure equilibrium with their surroundings) and relatively smooth cocoons without backflow. The lack of internal structure reflects the great stability of the beam surface against the growth of pinch instabilities (the most disruptive modes in cylindrically symmetric flows) which would evolve into internal shocks. This result has been confirmed recently by Rosen et al. (1999) who have performed new simulations exploring the effects of internal energy in the stability properties of relativistic jets. The faster cases (i.e., beam flow Lorentz factors ≥ 5) do not seem to develop either the reflecting mode or the ordinary mode (typical of low beam Mach number flows; Norman et al. 1984) in the time scales considered. Their morphologies (featureless jets and stable terminal shocks) resemble those observed in naked quasar jets like 3C273 (Davis et al. 1985). On the other hand, the dependence of beam internal structure with flow speed suggests that relativistic effects may be relevant in understanding the difference between slower, knotty BL Lac and faster, smoother quasar jets (Gabuzda et al. 1994).

Highly supersonic models in which kinematic relativistic effects due to high beam Lorentz factors dominate, display extended overpressured cocoons (Fig. 5). The cocoon mean pressure increases proportionally with the beam Lorentz factor. This result is the relativistic variant of that found by Begelman & Cioffi (1989) on the production of overpressured cocoons by classical hypersonic jets. The prominence of cocoons

in these highly supersonic models depends on the ratio of beam velocity and jet propagation velocity. For jets with propagation speeds well below the beam velocity thick cocoons are found although the high propagation efficiency makes them thinner than in the classical case. The cocoon overpressure causes the formation of a series of oblique shocks within the beam. In these models, the instantaneous accelerations and decelerations of the jet (also observed in classical jet simulations; Norman et al. 1982; Kössl & Müller 1988) causes the formation of vortices at the jet head which grow with time as they are advected down along the cocoon surface.

Long term evolution

Numerical simulations of relativistic jets like those discussed in the previous Section, typically cover the jet evolution along few tens of the initial jet radii, corresponding to time scales much smaller than those in real sources. The problem of simulating the long term evolution (i.e., $\approx 10^7$ yrs) of extragalactic jets is the limit on the time step imposed by the light speed. As an example, a simulation with a reasonable spatial resolution (i.e., 20 numerical zones across the jet radius) would need about 10^6 time iterations. Martí et al. (1998) and Komissarov & Falle (1996a, 1998) considered the long term evolution of powerful, relativistic, cylindrically-symmetric jets. Komissarov & Falle (1996a, 1998) studied models of FRII radio sources with finite initial opening angles which are recollimated by the high-pressure cocoon. In the model considered by Martí et al. (1998), a powerful jet (beam kinetic power 10^{47} erg s $^{-1}$ when scaled according to a beam radius of 0.35 kpc and an ambient density 10^{-26} g cm $^{-3}$) is assumed to propagate through a uniform, static atmosphere in pressure equilibrium with the beam at the injection point. The evolution of the jet was simulated for a period of $\approx 3 \cdot 10^6$ years.

The estimated initial hot spot propagation speed in Martí et al. (1998) model was $0.26c$ (in agreement with recent hot spots advance speeds measurements in compact symmetric objects; Owsianik & Conway 1998, Taylor et al. 2000), significantly larger than the advance speeds inferred for powerful radio sources from spectral ageing (0.01c to 0.1c; Liu et al. 1992). After an initial transient period, in which the jet evolves almost as if it were one-dimensional, the evolution is dominated by a deceleration phase (also present in Komissarov & Falle's simulations) after which it becomes nearly steady. The simulation reproduces some properties of powerful extragalactic radio jets (lobe inflation, hot spot advance speeds and pressures, deceleration of the beam flow along the jet) and can help to constrain the values of basic parameters (such as the particle density and the flow speed) in the jets of real sources. Whereas in Komissarov & Falle's models the secular deceleration is due to the finite initial opening angle, the model in Martí et al. (1998) decelerates due to the in-

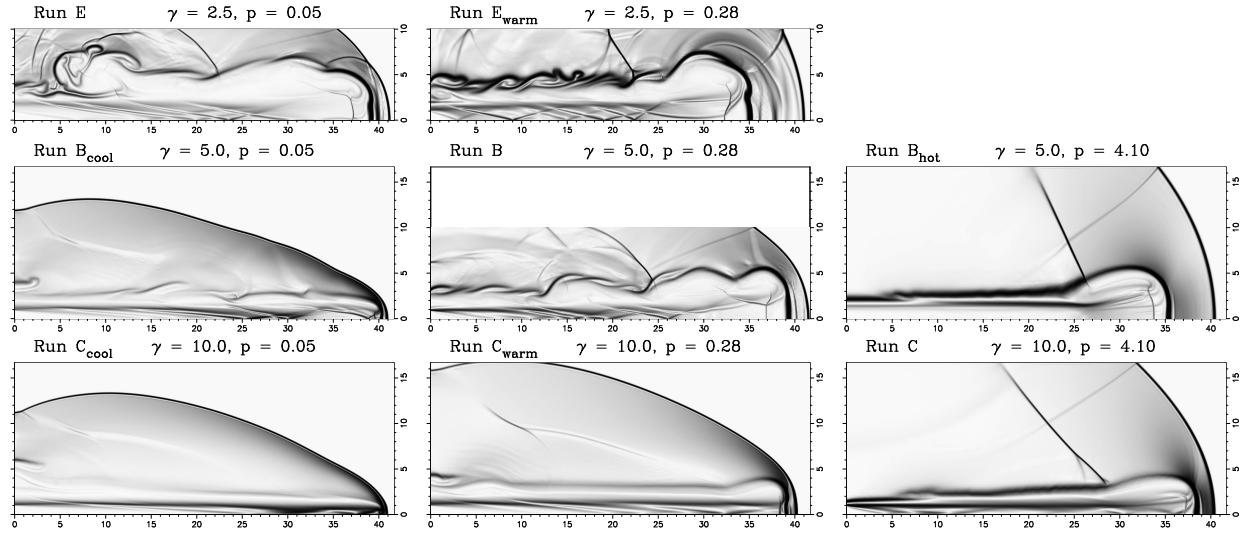


Fig. 5.: Relativistic effects in the morphology of jets. From top to bottom, schlieren plots of jet models with increasing initial Lorentz factor. From left to right, models with higher specific internal energies (from *cool* to *hot*). Beams with little internal structure and thin cocoons are found towards the bottom-right corner (fast, hot beams). Models with extended cocoons, are found close to the top-left corner (cold, highly supersonic jets). Figure from Rosen et al. (1999).

crease of the jet section with distance, as a consequence of 1) the presence of internal shocks within the beam (which increase the beam pressure favoring the sideways expansion of the jet), and 2) the numerical viscosity inherent to the hydrodynamical code (amplified by the coarse resolution used in the numerical simulation -4 zones per beam radius-) which allows for the spread of the momentum of the beam.

In Scheck et al. (2002) (Fig. 6) the problem of the jet composition (e/p versus e^-/e^+) has been approached in the context of long-term relativistic simulations ($\approx 6 \cdot 10^6$ yrs) seeking for signatures of the composition in the extended morphology of radio jets. The problem of jet composition remains open for more than two decades. Measurements of circular polarization in jets (Homan & Wardle 1999) favour e^-/e^+ jets. However, X-ray observations of blazars associated with OVV quasars impose strong constraints on the e^-/e^+ pair content of jets (Sikora & Madejski 2000). On the other hand, the composition of jets is tightly related to their formation mechanisms (Celotti & Blandford 2001, Sol et al. 1989) and can be on the basis of the FRI/FR II dichotomy (Celotti 1998). Both the morphology and the dynamic behaviour are almost independent on the composition assumed for the jets in the 2D simulations of Scheck et al. (2002).

Three dimensional simulations

A number of recent papers (Nishikawa et al. 1997, 1998; Aloy et al. 1999b) have considered three dimensional (3D) hydrodynamical (magnetohydrodynamical, in the case of the works of Nishikawa et al.) simulations of relativistic jets. In their simulations, Nishikawa et al. studied mildly relativistic jets (Lorentz factor 4.56) propagating both along and obliquely to an ambient magnetic field. The small resolution used for the simulation (5 numerical zones per jet radius) and the short evolution (20 dynamical time units) preclude to extract definite conclusions about the morphology and dynamics of 3D relativistic jets. This is also the case of Aloy et al. (1999b) simulations, using the code GENESIS (Aloy et al. 1999). Despite the fact that these simulations have the largest resolution -8 cells per beam radius- ever used in a 3D simulation of a relativistic jet and covered the longest time evolution (75 dynamical time units), the simulations only described the one dimensional initial phase. Aloy et al. (1999b) simulations are discussed later in this review in the context of emission from 3D relativistic jets (Aloy et al. 2000a).

More recently, Hughes et al. (2002) have considered the problems of precession and deflection by an external density gradient of 3D relativistic jets. Bodo et al. (2003) have studied the process of deceleration of kiloparsec scale relativistic jets in three dimensions, in the

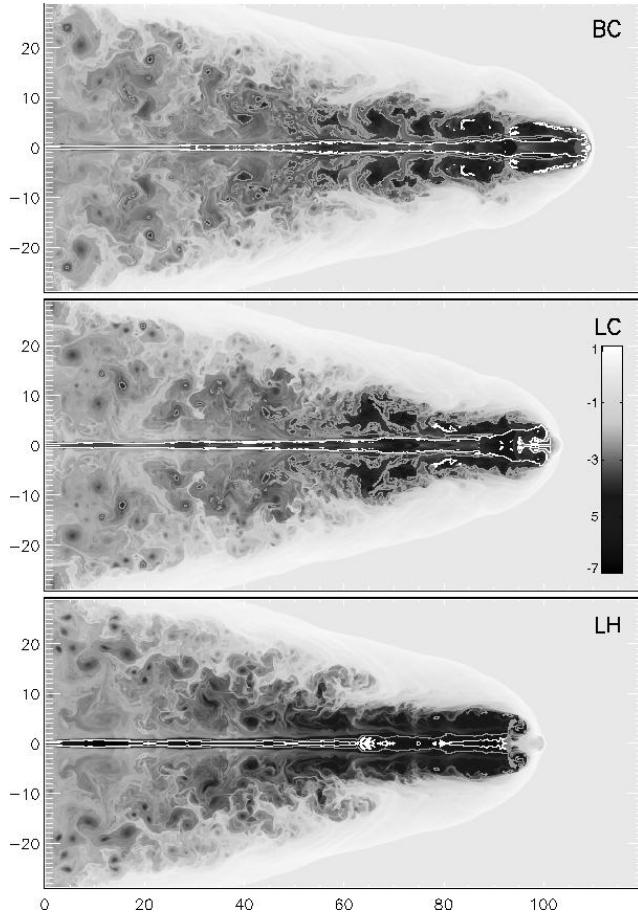


Fig. 6.: Density distribution of three evolved jets with different compositions and temperatures. From top to bottom: barionic, cold jet; leptonic (i.e., e^-/e^+), cold jet; leptonic, hot jet). Despite the global energetics of the models are the same, models display differences in the beam and the cocoon, both wider in the case of the leptonic, hot model. From simulations of Scheck et al. (2002).

context of the FR I/FR II dichotomy. The authors investigate the role of the evolution of Kelvin-Helmholtz instabilities in the jet/ambient interface and the induced turbulent entrainment in the process of deceleration. Again the resolution used (6 zones per beam radius across the beam, 3 along) is too small to obtain conclusive answers to the problem.

Parsec-scale extragalactic jets

Simulations of superluminal sources

The development of multidimensional relativistic hydrodynamical codes has allowed the simulation of parsec scale jets and superluminal radio components. The presence of emitting flows at almost the speed of light enhance the importance of relativistic effects (relativistic Doppler boosting, light aberration, time delays) in the appearance of these sources. A detailed mode-

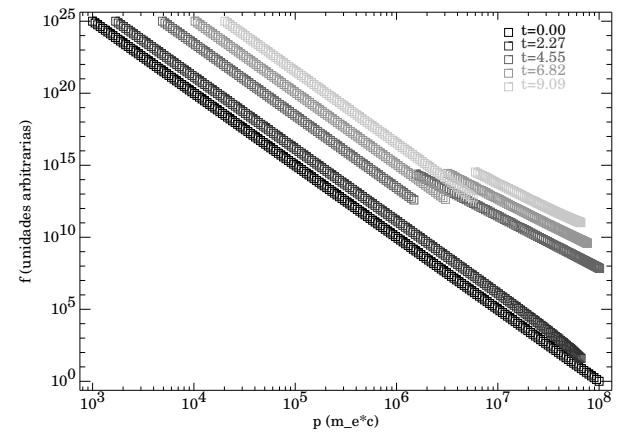


Fig. 7.: Evolution of a power-law electron distribution due to adiabatic compression, synchrotron radiation losses and shock acceleration. Adiabatic compression causes the overall shift of the initial distribution to higher energies. The effect of radiative losses is the responsible of the bending of the electron distribution at high energies at $t = 2.27$. The larger energization between $t = 2.27$ and $t = 4.55$ is due to the acceleration suffered by the non-thermal electron distribution after crossing a shock (at $t = 4.44$). The effect of acceleration of thermal electrons is also taken into account. Figure courtesy of I. Agudo.

ling of this appearance has to include a combination of hydrodynamics and synchrotron radiation transfer to compare with observations (e.g., Gómez 2002). The equations of radiative transfer for the synchrotron radiation are then integrated along the line of sight (with retarded emission and absorption coefficients in order to account for light-travel time delays). In Gómez et al. (1995, 1997) the equations for the whole set of Stokes parameters are solved. A simpler formulation for the transfer of synchrotron radiation can be obtained when neglecting the different polarizations (Mioduszewski et al. 1997). Further simplifications can be considered by ignoring opacity effects (Komissarov & Falle 1996b, 1997).

Models should also specify the radio emission (i.e., synchrotron emissivity and opacity) associated with a given flow. In all simulations performed to date, the hydrodynamical internal energy density is distributed among the synchrotron emitting electrons according to a power law and an ad-hoc magnetic field is assumed, with energy density proportional to the fluid pressure. An important improvement in the models would be to include the transport of relativistic electrons in the jet evolution, to account for non-adiabatic effects like radiative losses and particle accelerations of the non-thermal population. This has been already accomplished by Jones et al. (1999) for non-relativistic MHD jet simulations. Agudo (2002; Fig. 7) has made steps in this direction for the case of relativistic jets.

In the hydrodynamical models discussed by Gómez et al. (1997) and Komissarov & Falle (1996b, 1997), jets propagate through pressure-decreasing atmospheres to account for the observed jet opening angles. Superluminal components (Fig. 8) are produced by triggering perturbations in these steady jets which propagate at almost the jet flow speed. Typical perturbation setups are sinusoidal variations or discontinuities. The simulations of Mioduszewski et al. (1997) (see also Hughes et al. 1996), who considered sinusoidal variations of the input jet Lorentz factor from almost 1 to 10, are an example of the first case, although the large amplitude of the perturbations causes them to propagate at barely relativistic speeds.

The dynamic interaction between the induced traveling shocks and the underlying steady jet and the relativistic effects in the radiation transfer can account for the complex behavior observed in many sources. The following is a list of observational trends which admit an interpretation within the hydrodynamical shock-in-jet model of compact radio sources:

- a) Isolated (3C279; Wehrle et al. 2001) and regularly spaced stationary components (0836+710, Krichbaum et al. 1990; 0735+178, Gabuzda et al. 1994; M87, Junor & Biretta 1995; 3C371, Gómez & Marscher 2000). Stationary features in radio maps may be associated with isolated or periodic recollimation shocks as an alternative to jet bends.
- b) Variations in the apparent motion and light curves of components (3C345, 0836+71, 3C454.3, 3C273, Zensus et al. 1995; 4C39.25, Alberdi et al. 1993; 3C263, Hough et al. 1996). They may be the result of variations in the pattern Lorentz factor of the perturbation associated with the passage of a perturbation through nonuniform regions of the undisturbed jet (Gómez et al. 1997) or changes in the brightness distribution in extended components (Mioduszewski et al. 1997).
- c) Coexistence of sub- and superluminal components (4C39.25, Alberdi et al. 1993; 1606+106, Piner & Kingham 1998) and differences between pattern and bulk Lorentz factors (Mrk 421, Piner et al. 1999).
- d) Dragging of components (0735+178, Gabuzda et al. 1994, 3C120, Gómez et al. 1998; 3C279, Wehrle et al. 1997). They can be the result of the interaction of moving and stationary components (see the unconvolved maps of model OP in Gómez et al. 1997) sometimes associated with sudden flux increments.
- e) Trailing components (3C120, Gómez et al 1998, 2001, Jorstad et al. 2001; Cen A, Tingay 2001). The excitation of cylindrical perturbation modes

in the beam due to the passage of the perturbation can lead to weak oblique shocks which can be detected (with enough linear resolution) as weak components trailing the main traveling knot (Agudo et al. 2001).

The first three-dimensional simulation of a superluminal source was presented in Aloy et al. (2003). The authors studied the evolution of a compact blob of matter (the supposed superluminal component in the shock-in-jet models) along a curved, precessing, relativistic jet. The computational domain in this simulation was a box of $14 \times 14 \times 90$ beam radii covered by a uniform Cartesian grid of $168 \times 168 \times 1080$ numerical cells. The accounting (for the first time in a 3D simulation) of the light travel time delays in the emitted radiation and the size of the computational domain (more than 30 million zones) makes this simulation unique. The simulation reproduces several standard observations in actual superluminal sources, like steady and superluminal radio components with large flux variations, and makes some predictions (e.g., *pop-up components*, components appearing suddenly at some distance further downstream the jet). However, the most important conclusion of the work was that the interpretation of observed radio-maps is error-prone when naively associating single shocks to superluminal components. Most observable features should not be related to fluid bulk motions, but instead to a complex combination of bulk and phase motions, viewing angle selection effects, and non-linear interactions between perturbations and the underlying jet and/or ambient medium. In other words, the work recognizes the inherent difficulties in probing the physical conditions in parsec scale jets.

Emission from 3D relativistic jets and observational signatures of jet stratification

Aloy et al. (2000a) studied the radio emission properties of 3D relativistic hydrodynamic jet models, focusing on the observational consequences of the interaction between the relativistic jet and the surrounding medium. Under very general conditions, the interaction gives rise to a stratification of the jet where a fast spine is surrounded by a slow high energy shear layer.

Shear layers (with distinct kinematical properties and magnetic field configurations) appear naturally in some models of jet formation (Sol et al. 1989) and have been invoked in the past by several authors (Komissarov 1990, Laing 1996, Laing & Bridle 2002a, 2002b) in order to account for a number of observational characteristics of FRI radio sources. Recently, Swain et al. (1998) have found evidence of shear layers in FRII radio galaxies (3C353), and Attridge et al. (1999) have inferred a two-component structure in the parsec scale jet of the source 1055+018.

The jet model analyzed in Aloy et al. (2000a) is characterized by a two-component structure with a fast

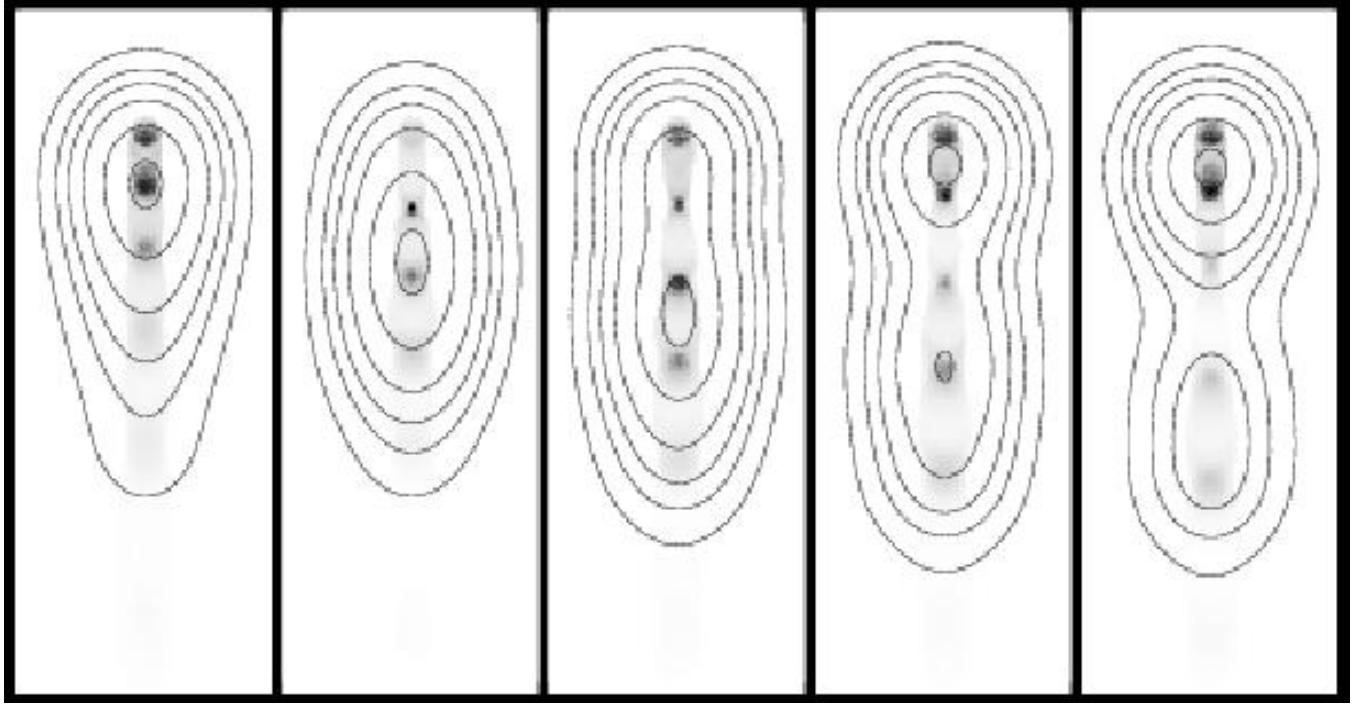


Fig. 8.: Computed radio maps of a compact relativistic jet showing the evolution of a superluminal component (from left to right). Two resolutions are shown: present VLBI resolution (contours) and resolution provided by the simulation (gray scale). From simulations of Gómez et al. (1997).

(Lorentz factor ~ 7) inner jet and a slower (Lorentz factor ~ 1.7) shear layer with high specific internal energy. As discussed in Aloy et al. (1999b), the formation of the shear layer is dominated by the numerical viscosity inherent to the hydrodynamics code and not by the turbulent shear. Despite this fact, the computed jet models still allow to study the physics of shear layers in relativistic jets and their observational consequences. Different *ad hoc* distributions of the magnetic field in the jet spine and shear layer can be considered. Aloy et al. (2000a) model assumes that the magnetic field of the jet consists of two components. A toroidal field present both in the jet spine and the shear layer, and a second component (in equipartition with the toroidal field) aligned in the shear layer and radial in the jet spine. The resulting projected magnetic field is aligned in the shear layer and is perpendicular in the jet spine, as suggested by several observations (Laing 1996; Swain et al. 1998; Attridge et al. 1999). An extra randomly oriented magnetic field component (containing 60% of the total magnetic field energy) is assumed both for the shear layer and jet spine.

The imposed magnetic field geometry together with the structure of the hydrodynamical jet model, allows to interpret several observational trends:

- a) Inhomogeneous distributions of apparent speeds within knots. The presence of emitting fluid elements moving at different velocities and orientations could lead to local variations of the apparent superluminal motion within the jet which could

explain the proper motions of individual features observed within knots in M87 (Biretta et al. 1995).

- b) Rails of low polarization along jets. As a result of the helical field in the shear layer, the apparent orientation of the magnetic field at the jet edges is parallel to the jet axis. For the jet spine, the toroidal and radial components of the magnetic field yield a net polarization perpendicular to the jet axis. Rails of low polarization can be observed where the apparent magnetic field rotates between being parallel (in the shear layer) to being perpendicular to the jet axis, as observed in 3C 353 (Swain et al. 1998).
- c) Top/down emission asymmetries. Recent observations of jet cross section emission asymmetries in the blazar 1055+018 (Attridge et al. 1999) can be explained by assuming the existence of a shear layer with an helical magnetic field. These asymmetries arise from the dependence of the synchrotron radiation coefficients on the sinus of the angle between the magnetic field and the line of sight in the fluid frame (which is different on the top and on the bottom of the jet due to the helical structure of the magnetic field).

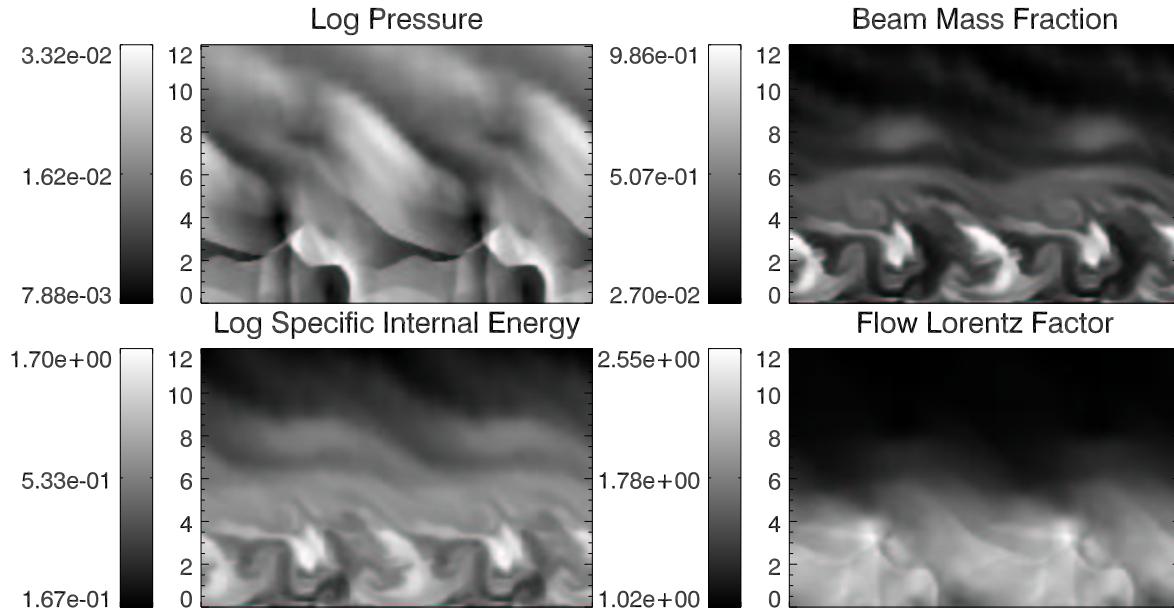


Fig. 9.: Development of Kelvin-Helmholtz instability in the interface of a *warm*, relativistic jet and an homogeneous ambient medium. Flow is from left to right and has periodic boundaries. The jet filled originally a slab of width unity close to the bottom boundary. The different panels show the pressure and specific internal energy distributions (in logarithmic scale) once the growth of Kelvin-Helmholtz instabilities have developed a fully turbulent flow. The process of mixing is apparent in the panel of the beam mass fraction, initially equal to 1 (white) in the beam and 0 (black) in the ambient. The Lorentz factor of the initial jet (5) has reduced to a half in the course of the evolution due to mass entrainment. From simulations of Perucho et al. (2003b).

BL Lac jets

BL Lac objects are thought to be relativistic jets seen at small angles to the line of sight (Urry & Padovani 1995), and their remarkably featureless radio-through-X-ray spectra are well fitted by inhomogeneous jet models (Bregman et al. 1987). According to the internal shock model, the light curves produced by BL Lacs can be modeled as the result of multiple dense (much denser than the environment), relativistic, cold shells (e.g., Spada et al. 2001).

Mimica et al. (2003) have developed a scheme which treats the injection and evolution of ultrarelativistic nonthermal electrons, taking into account their synchrotron radiation, their radiative losses and the back coupling of the emitted radiation on the dynamics of the thermal fluid. Their simulations improve existing analytic (one-zone) models (e.g., Spada et al. 2001) by computing a more realistic hydrodynamic evolution of the fluid (using the code GENESIS). This allows Mimica et al. (2003) to constrain some of the physical properties of the emitting regions in BL Lac jets like, e.g., the efficiency of shell collisions in converting their bulk kinetic energy into emitted radiation (which is of $\sim 1\%$), the influence of the environmental medium in the shell evolution and collision, etc.

Jet interpretation from linear Kelvin-Helmholtz stability analysis

The linear stability analysis of relativistic flows against Kelvin-Helmholtz perturbations goes back to the seventies (see Birkinshaw 1991 for a review). Nowadays, the combination of hydrodynamical simulations and linear stability analysis has provided another step towards the understanding of relativistic jets in extragalactic sources and microquasars. There is some consensus in the fact that most of the features (even the large amplitude ones) observed in real jets admit an interpretation in terms of the growth of Kelvin-Helmholtz normal modes. This linear stability analysis has been successfully applied to probe the physical conditions in the jets of several sources (e.g., S5 0836+710, Lobanov et al. 1998; 3C273, Lobanov & Zensus 2001; 3C120, Walker et al. 2001; see also the introduction of Hardee et al. 2001). In Hardee et al. (1998) and Rosen et al. (1999), the internal structures found in a set of relativistic axisymmetric kpc jet simulations were analyzed. In the context of steady, pc-scale jets, a combination of linear stability analysis and axisymmetric hydrodynamical simulations has been used to predict the existence of *fine structure* appearing in the wake of superluminal components (Agudo et al. 2001), later discovered in 3C120 (Gómez et al. 2001). Hardee (2000) and Hardee

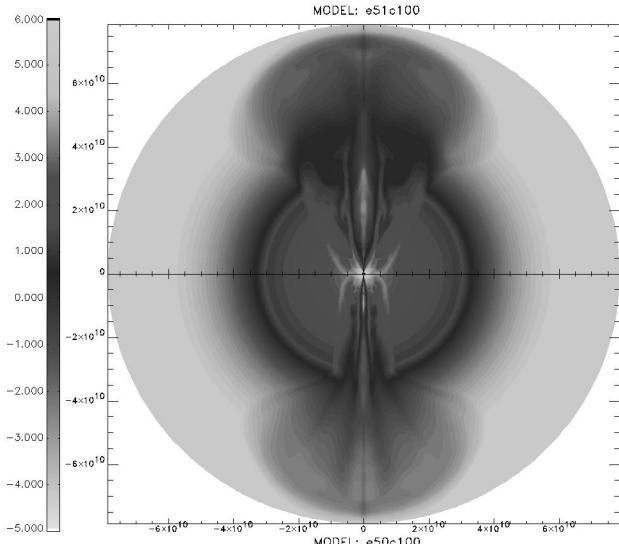


Fig. 10.: Snapshots of the logarithm of the rest-mass density after the jets have broken out the surface of the collapsar (simulations by Aloy et al. 2000b). The top (bottom) half corresponds to a model where $10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ ($10^{50} \text{ erg s}^{-1}$) of pure thermal energy have been released on scales smaller than $6 \cdot 10^7 \text{ cm}$. The total simulated time ($\approx 5 \text{ s}$) corresponds to about 10^3 rotations of the innermost circular orbit around a central Schwarzschild black hole of $\approx 3.72 M_\odot$. The jets generated in this models are much lighter than the environment and display a very irregular distribution of Lorentz factors (with maxima ≈ 40) and internal shocks (which, in case of being preserved in the subsequent evolution, can yield the expected variability observed in long-lasting GRBs). The beam and the surrounding cocoon is radiation dominated and, therefore, the variations of the rest-mass density are decoupled from those of the thermal pressure.

et al. (2001) have extended the analysis to the three-dimensional structures generated in steady jets by precession and focussing on the distributions of internal energy density and flow velocity. Finally, Hardee & Hughes (2003) have considered the stabilization effect of mildly relativistic winds surrounding relativistic jets both theoretically and by means of three-dimensional relativistic hydrodynamic simulations. These authors find that outflowing winds around relativistic jets can suppress large-scale asymmetric structures while allowing axisymmetric structures to develop.

Very recently, Perucho et al. (2003a, 2003b) have started to investigate in detail the process of transition of the Kelvin-Helmholtz instability modes from the linear to the non-linear regime in relativistic jets with the aim of characterising the relation between the long-term evolution of the instability and the initial jet parameters (see Fig. 9). Perucho and coworkers use the so-called temporal approach in which the time evolu-

tion of the instability is studied in a fixed slice of the jet allowing for a huge spatial resolution (e.g., 400 zones per beam radius across the beam). The work has interesting implications in the understanding of long-term jet stability and, again, the morphological differences between FR I and FR II sources.

Jets from GRBs

Due to the fact that originally GRBs were associated with spherically symmetric relativistic fireballs, a number of simulations of one-dimensional flows were performed. Panaitescu et al. (1997) modeled the interaction between an expanding adiabatic fireball and a stationary external medium whose density is either homogeneous or varies with distance as a power law. Kobayashi et al. (1999) studied the evolution of an adiabatic relativistic fireball expanding into a cold uniform medium. Daigne & Mochkovitch (2000) simulated the evolution of internal shocks in a relativistic wind with a very inhomogeneous initial distribution of the Lorentz factor. Tan et al. (2001) investigated the acceleration of shock waves to relativistic velocities in the outer layers of exploding stars.

Only very recently the indications suggesting that GRBs are associated to ultrarelativistic conical winds or jet structures (see the Introduction) has been taken into account in multi-dimensional numerical simulations. Aloy et al. (2000b) modeled ultra-relativistic jets in the context of the collapsar progenitor model of MacFadyen & Woosley (1999). They simulated the formation and propagation of an axisymmetric jet through the mantle and envelope of a collapsing massive star ($10 M_\odot$) using the GENESIS code (Aloy et al. 1999). The jet forms as a consequence of an assumed energy deposition of $\sim 10^{51} \text{ erg/sec}$ within a 30° cone around the rotation axis. At break-out, i.e., when the jets reach the surface of the stellar progenitor, the maximum Lorentz factor of the jet flow is about 20 (Fig. 10). These results have also been confirmed by Zhang et al. (2002) who performed a parameter study of the propagation of 2D relativistic jets through the stellar progenitor of a collapsar by varying the initial Lorentz factor, opening angle, power and internal energy of the jet, as well as the radius where it is injected. Zhang et al. (2002) also simulated the evolution after the escape of the jet where the outflow is able to speed up to a terminal value of the Lorentz factor of approximately 150.

Granot et al. (2000, 2001) performed 2D and 3D relativistic hydrodynamic simulations of the deceleration and lateral expansion of an adiabatic relativistic jet with an initial Lorentz factor 23.7 as it expands into an ambient medium. The hydrodynamic calculations used an adaptive mesh refinement code. They found that the sideways propagation is different than that predicted by simple analytic models. The physical

conditions at the sides of the jet are significantly different from those at the front of the jet, and most of the emission occurs within the initial opening angle of the jet assumed to be 0.2 radians.

Three dimensional simulations

The first three dimensional simulations of relativistic jet propagation and break out in massive Wolf-Rayet stars have been performed by Zhang et al. (2003). These jets are thought to be responsible for GRBs. The authors conclude that as jets emerge from the stellar surface, they are surrounded by a cocoon of less energetic, but still highly relativistic ejecta that expands and becomes visible at much larger polar angles. The cocoons of the jets (although less energetic than the beams) may be the origin of X-ray flashes and other high-energy transients which will be visible to a larger fraction of the sky, albeit to a shorter distance than common gamma-ray bursts. Jet stability is numerically examined in three-dimensional calculations. It turns out that if the jet changes angle by more than three degrees in several seconds, it will dissipate, producing a broad beam with excessively small Lorentz factor to produce a common gamma-ray burst.

Stability

In the field of GRBs the stability properties of relativistic jets formed in the course of the collapse of a massive progenitor (from simulations of Aloy et al. 2000b) have been examined by Aloy et al. (2002) and Gómez & Hardee (2003). Aloy et al. (2000b) numerical simulations show the presence of a strong shear in the bulk velocity of such jets. This shear can be responsible for a very rapid shear-driven instability that arises for any velocity profile. This conclusion has been confirmed both by numerical simulations and theoretical analysis (Aloy et al. 2002). The instability leads to rapid fluctuations of the main hydrodynamical parameters (density, pressure, Lorentz factor, etc.). However, the perturbations of the density are effectively decoupled from those of the pressure because the beam of the jet is radiation-dominated. The characteristic growth time of instability is much shorter than the life time of the jet and, therefore, may lead to a complete turbulent beam. In the course of the non-linear evolution, these fluctuations may yield to internal shocks which can be randomly distributed in the jet. In the case that internal shocks in a ultrarelativistic outflow are responsible for the observed phenomenology of gamma-ray bursts, the proposed instability can well account for the short-term variability of gamma-ray light curves down to milliseconds. Gómez & Hardee (2003) use the linearized, relativistic fluid equations to find the Kelvin-Helmholtz modes that are triggered by recollimation shocks within the jet. The modes will grow as they propagate with the jet. These are of interest since the light curves of

GRBs show evidence of a variable flow from the GRB engine. Gómez & Hardee (2003) also evaluate effects of grid scaling in the numerical simulation and show that short wavelength modes are suppressed by grid scaling before the jet breaks out of the Helium shell.

Simulations of jet formation

According to the present understanding, extragalactic jets are generated by MHD processes in the vicinity of compact objects (see the Introduction). Koide et al. (1999, 2001) have developed a GRMHD code and applied it to the problem of jet formation from (Schwarzschild and Kerr) black hole accretion discs in the context of Blandford & Payne's mechanism (Blandford & Payne 1982). In the case of jets from Schwarzschild black holes (Koide et al. 1998), jets are formed with a two-layered shell structure consisting of a fast gas pressure-driven jet (Lorentz factor ≈ 2) in the inner part and a slow magnetically driven outflow in the outer part both of which being collimated by the global poloidal magnetic field penetrating the disc. In the case of counter rotating discs around Kerr black holes (Koide et al. 2002), a new powerful magnetically driven jet is formed inside the gas pressure driven jet. This jet is accelerated by a strong magnetic field created by frame dragging in the black hole ergosphere. Through this process, the magnetic field extracts the rotational energy of the black hole corroborating Blandford & Znajek's mechanism (Blandford & Znajek 1977). The same authors (Koide et al. 2002) have further explored this second mechanism for jet formation in the case of a Kerr black hole at maximal rotation immersed in a uniform, magnetically dominated corona with no disc. The magnetic field lines across the ergosphere are twisted by frame dragging. The line twist propagates outwards as a torsional Alfvén wave train carrying electromagnetic energy and leading to the generation of a Poynting flux jet. Using a 3D GRMHD code Nishikawa et al. (2002) have investigated the dynamics of a freely falling corona and of a Keplerian accretion disc around a Schwarzschild black hole. The disc and the corona are threaded by a uniform poloidal magnetic field. The magnetic field is tightly twisted by the rotation of the disc, and plasma in the corona is accelerated by the Lorentz force to form bipolar relativistic jets as in previous simulations assuming axisymmetry.

Finally, let us note that direct numerical simulations of the Blandford and Znajek mechanism have been undertaken by Komissarov (2001) solving the time dependent equations of (force-free, degenerate) electrodynamics in a Kerr black hole magnetosphere.

The formation of GRB jets was first considered by MacFadyen & Woosley (1999) in the context of the collapsar model (Woosley 1993) using a Newtonian hydrodynamics code, and including a realistic equation of state (EoS) and the effects due to the self-gravity

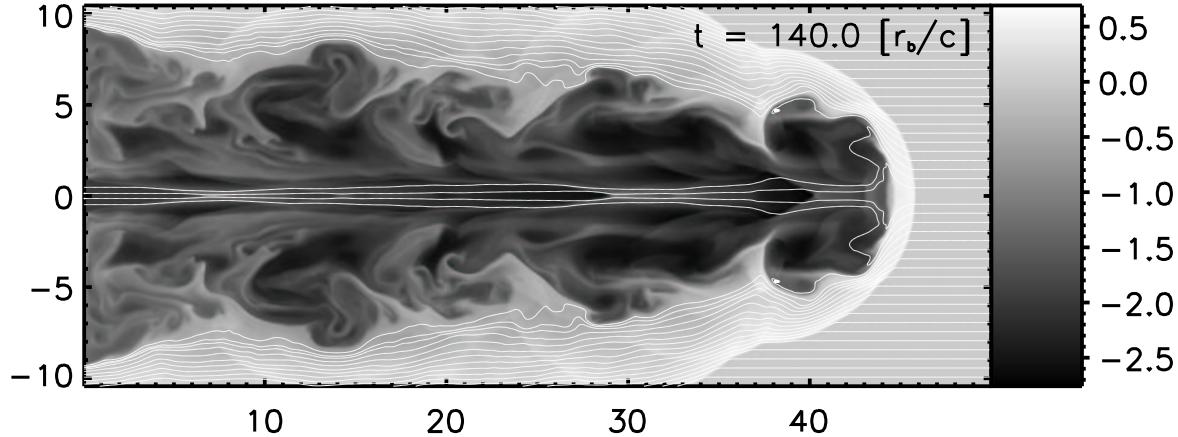


Fig. 11.: Snapshot of the logarithm of the rest-mass density of an axisymmetric magnetized jet. Over imposed some magnetic field lines are drawn (in white). The poloidal magnetic field has a strength which is in equipartition with the thermal pressure. The initial jet has a density 10^{-2} times smaller than that of the uniform, steady ambient medium and it is slightly overpressured. The jet is injected through a circular nozzle of 1 beam radius with an initial axial velocity of $0.99c$ and a Mach number of 6.0. An ideal EoS is assumed with adiabatic index $\gamma = 5/3$. The resolution employed is of 40 numerical cells per each beam radius at the injection nozzle. A third order parabolic piecewise interpolation algorithm is used to improve the spatial accuracy. The simulation has used a modified version of the GENESIS code that includes magnetic fields and has been run on a IBM Regatta System with 4 CPUs for ≈ 120 hours. Courtesy of T. Leismann.

of the collapsing star. Aloy et al. (2000b) also performed simulations of the same scenario (i.e., starting from the same initial model as MacFadyen & Woosley (1999), that results from a consistent simulation of the stellar evolution of a massive, main sequence star) but using a general relativistic hydrodynamical code with a simplified (but realistic) EoS and higher numerical resolution. In both cases axisymmetry was assumed and the results are qualitatively the same, i.e., an axisymmetric jet forms as the result of an assumed energy release in the system, not as a consequence of having imposed an injection boundary condition. The newly formed jet is continuous, even for variable energy deposition rates, although highly non-uniform (particularly at the very beginning of the jet formation -up to ≈ 0.2 s when some episodic ejections precede the formation of a quasi-steady jet). The initial collimation of the beam is due to the inertial confinement provided by the dense interior of the progenitor. In both cases the simulations last for $\approx 10^3$ rotational periods of the last stable circular orbit of the accretion disc, i.e., the duration of the simulations permits to consider also the propagation through the progenitor until the jets break out the surface of the star.

Very recently, Proga et al. (2003) have performed a follow up of the work of MacFadyen & Woosley (1999) but including magnetic fields by using the ZEUS-2D MHD code (Stone & Norman 1992). The authors conclude that MHD effects alone are enough to launch, accelerate and sustain a strong polar outflow. Indeed, the outflow is Poynting flux-dominant and, therefore, this provides favorable initial conditions for the subsequent production of a baryon-poor fireball.

Conclusions

The development during the nineties of new numerical techniques able to solve the equations of relativistic hydrodynamics under extreme conditions (i.e., large flow Lorentz factors and strong shocks) revolutionized the field of extragalactic jets and, more recently, GRBs. In the case of extragalactic jets, present simulations cover all the relevant scales from the subparsec scale, at which jets are formed, and that remain unaffordable to observations, up to the megaparsec scale. In the field of GRBs, simulations have also addressed every scale from their formation ($\simeq 10^7$ cm) to the late afterglow evolution ($\simeq 10^{18}$ cm). The first simulations of superluminal sources have been also performed, allowing to test the basic shock-in-jet models for parsec scale jets. However, despite the success of simulations in interpreting the overall structure, dynamics and appearance of extragalactic jets, they have also shown the difficulties in probing the physical conditions in these sources. In this context, the interpretation of the jet structure on the light of the linear Kelvin-Helmholtz stability analysis appears as an alternative to the shock-in-jet models although the basic hypothesis (that the linear stability analysis remains valid for variations of the order of the background values) needs to be proven by accurate numerical simulations.

With a couple of exceptions, all the numerical simulations performed up to now describe the plasma in extragalactic jets as a single component ideal gas either non-relativistic or ultra-relativistic. None of the simulations has been combined with a consistent electron transport to account for the nonadiabatic pro-

ses (radiative losses, particle acceleration) affecting the synchrotron emission from these sources (although the first steps towards accomplishing this aim have already been given). We note that a consistent description of the non-thermal particle transport, yielding an accurate spectral evolution, would help to elucidate the nature of radio components in superluminal sources discriminating between the two models quoted in the previous paragraph. The inverse Compton process must be incorporated in order to fit the spectra of these sources beyond the radiofrequencies. Magnetic fields have only been considered in the formation scenarios and their role at parsec and kiloparsec scale must be studied (only Komissarov 1999 has considered the propagation of light, relativistic jets carrying toroidal magnetic fields; see Fig. 11 for a relativistic jet with poloidal magnetic field). Concerning the simulations of jet formation, they must consider the process of accretion consistently and not as a boundary condition. Simulations must be extended in time (present simulations, e.g., Koide et al. 1998, 2002, only cover a couple of orbital periods of the inner accretion disc) and the outflows must reach ultrarelativistic speeds.

By means of numerical simulations in the field of GRBs a number of key issues have been addressed like, e.g., the dynamical evolution of internal and external shocks in relativistic fluids or the formation of long GRBs in the context of the collapsar model. However, there is still a large number of ingredients that simulations are missing. Most of these further ingredients are common to those required in simulations of extragalactic jets, pointed out in the preceding paragraph. This is not surprising if we consider that both phenomena have a number of common aspects: probably they are generated as relativistic, collimated plasma fueled from central engines involving both the accretion of matter onto a compact object and the observed non-thermal emission is produced in optically thin regions by non-thermal populations of relativistic particles.

Acknowledgements

We would like to thank the editors of this Boletín for their kind invitation to contribute with the present article. We are also indebted to Iván Agudo, Luis Antón, José Luis Gómez, Tobias Leismann, Alan Marscher, Ewald Müller, Juan Antonio Miralles, Manuel Perucho,... for years of fruitful collaboration. José A. Font is acknowledged for his careful reading of the manuscript and his comments. Finally we thank I. Agudo, J.L. Gómez, T. Leismann and M. Perucho for providing us with plots and figures for the present review. M.A. Aloy would like to thank the support obtained under the MPG-CSIC agreement (Maria Bueno programm). The authors acknowledge partial support from the Spanish Dirección General de Enseñanza Superior grant AYA-2001-3490-C02.

Referencias

- [1] Agudo, I. 2002, Chorros relativistas en núcleos activos de galaxias: hidrodinámica y emisión, PhD Thesis
- [2] Agudo, I., Gómez, J.L., Martí, J.M., Ibáñez, J.M., Marscher, A.P., Alberdi, A., Aloy, M.A. & Hardee, P.E. 2001, ApJ, 549, L183
- [3] Alberdi, A., Krichbaum, T.P., Marcaide, J.M., Wittel, A., Graham, D.A., Inoue, M., Morimoto, M., Booth, R.S., Ronnang, B.O., Colomer, F., Rogers, A.E.E., Zensus, J.A.; Readhead, A.C.S., Lawrence, C.R., Vermeulen, R., Bartel, N., Shapiro, I.I., Burke, B.F. 1993, A&A, 271, 93
- [4] Aloy, M.A., Ibáñez, J.M.ª, Martí, J.M.ª & Müller, E. 1999, Astrophys. J. Suppl. 122, 151
- [5] Aloy, M.A., Ibáñez, J.M.ª, Martí, J.M.ª, Gómez, J.L. & Müller, E. 1999, ApJ, 523, L125
- [6] Aloy, M.A., Ibáñez, J.M.ª, Martí, J.M.ª, Gómez, J.L., & Müller, E. 2000, ApJ, 528, L85
- [7] Aloy, M.A., Müller, E., Ibáñez, J.M.ª, Martí, J.M.ª & MacFadyen, A. 2000, ApJ, 531, L119
- [8] Aloy, M.A. & Martí, J.M.ª. 2002, in Relativistic Flows in Astrophysics, eds. A.W. Guthmann, M. Georganopoulos, A. Marcowith, K. Manolakou, Springer Verlag Series "Lecture Notes in Physics", 589, 197
- [9] Aloy, M.A., Martí, J.M.ª, Gómez, J.L., Agudo, I., Müller, E., Ibáñez, J.M.ª 2003, ApJ, 585, L109
- [10] Aloy, M.A., Ibáñez, J.M.ª, Miralles, J.A. & Urpin, V. 2002, A&A, 396, 693
- [11] Attridge, J.M., Roberts, D.H. & Wardle, J.F.C. 1999, ApJ, 518, L87
- [12] Begelman, M.C. & Cioffi, D.F. 1989, ApJ, 345, L21
- [13] Bicknell, G.V. 1996, in Energy Transport in Radio Galaxies and Quasars, eds. P.E. Hardee, A.H. Bridle and J.A. Zensus., ASP Conference Series, Vol. 100, 253
- [14] Biretta, J.A., Zhou, F. & Owen, F. 1995, ApJ, 447, 582
- [15] Birkinshaw, M. 1991, in Beams and Jets in Astrophysics, ed. P.A. Hughes, Cambridge University Press, 278
- [16] Blandford, R.D. & Königl, A. 1979, ApJ, 232, 34
- [17] Blandford, R.D. & Payne, D.G. 1982, MNRAS, 199, 883
- [18] Blandford, R.D. & Rees, M.J. 1974, MNRAS, 169, 395

- [19] Blandford, R.G. & Znajek, R.L. 1977, MNRAS, 179, 433
- [20] Bodo, G., et al. 2003, New Astron. Rev., 47, 557
- [21] Bregman, J., Maraschi, L., & Urry, C.M. 1987, in Exploring the Universe with the IUE Satellite, ed. Y. Kondo (Dordrecht: Reidel), 685
- [22] Bridle, A.H., Hough, D.H., Lonsdale, C.J., Burns, J.O., & Laing, R.A. 1994, Astronom. J., 108, 766
- [23] Castro-Tirado, A. 1998, Boletín SEA, 1, 14
- [24] Celotti, A. 1998, in Astrophysical jets: open problems, ed. S. Massaglia and G. Bodo, Gordon and Breach, 79
- [25] Celotti, A. & Blandford, R.D. 2001, in Black Holes in Binaries and Galactic Nuclei, eds. L. Kaper, E.P.J. van den Heuvel and P.A. Woudt, Springer, Berlin, 206
- [26] Celotti, A., Ghisellini, G. & Chiaberge, M. 2001, MNRAS, 321, L1
- [27] Chartas, G. et al. 2000, ApJ, 542, 655
- [28] Curtis, H.D. 1918, Pub. Lick Obs., Descriptions of 762 Nebulae and Clusters photographed with the Crossley Reflector, 13, 31
- [29] Daigne, F. & Mochkovitch, R. 2000, A&A, 358, 1157
- [30] Davis, R.J., Muxlow, T.W.B. & Conway, R.G. 1985, Nature, 318, 343
- [31] Djorgovski et al. 2002, in Proc. Ninth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity, eds. V.G. Gurzadyan, R.T. Jantzen and R. Ruffini, World Scientific, Singapore, 319
- [32] Duncan, G.C. & Hughes, P.A. 1994, ApJ, 436, L119
- [33] Fanaroff, B. L. & Riley, J. M. 1974, MNRAS, 167, 31
- [34] Ferrari, A. 1998, ARA&A, 36, 539
- [35] Fossati, G., Maraschi, L., Celotti, A., Comastri, A., & Ghisellini, G. 1998, MNRAS, 299, 433
- [36] Frail, D.A. et al. 2001, ApJ, 562, L55
- [37] Frail, D.A. 2003, Invited talk in the GRB 2003 meeting, Santa Fe (USA).
- [38] Freedman, D.L. & Waxman, E. 2001, ApJ, 547, 922
- [39] Gabuzda, D.C., Mullan, C.M., Cawthorne, T.V., Wardle, J.F.C. & Roberts, D.H. 1994, ApJ, 435, 140
- [40] Ghisellini, G., Padovani, P., Celotti, A., & Maraschi, L. 1993, ApJ, 407, 65
- [41] Gómez, J.L. 2002, in Relativistic Flows in Astrophysics, eds. A.W. Guthmann, M. Georganopoulos, A. Marcowith, K. Manolakou, Springer Verlag Series "Lecture Notes in Physics", 589, 169
- [42] Gómez, E. & Hardee, P.E. 2000, in Proceedings of the IAU Symposium 192, SUPERNOVAE (10 years of SN1993J), eds. J.M. Marcaide y K.W. Weiler; astro-ph/0311134
- [43] Gómez, J.L. & Marscher, A.P. 2000, ApJ, 530, 245
- [44] Gómez, J.L., Martí, J.M.ª, Marscher, A.P., Ibáñez, J.M.ª & Marcaide, J.M. 1995, ApJ, 449, L19
- [45] Gómez, J.L., Martí, J.M.ª, Marscher, A.P., Ibáñez, J.M.ª, & Alberdi, A. 1997, ApJ, 482, L33
- [46] Gómez, J.L., Marscher, A.P., Alberdi, A., Martí, J.M.ª & Ibáñez, J.M.ª (1998), ApJ, 499, 221
- [47] Gómez, J.L., Marscher, A., Alberdi, A., Jorstad, S.G. & García-Miró, C. 2000, Science, 289, 2317
- [48] Gómez, J.L. et al. 2001, ApJ, 561, L161
- [49] Granot, J., Miller, M., Piran, T. & Suen, W.M. 2000, in Gamma-ray bursts, 5th Huntsville Symposium, eds. R.M. Kippen, R.S. Mallozzi and G.J. Fishman, AIP Conference Series, Vol. 526, Institute of Physics, Melville, New York, 540
- [50] Granot, J., Miller, M., Piran, T., Suen, W.M. & Hughes, P.A. 2001, in Gamma-ray bursts in the afterglow era, eds. E. Costa, F. Frontera and J. Hjorth, Springer, Berlin, 312
- [51] Hardee, P.E. 2000, ApJ, 533, 176
- [52] Hardee. P.E. 2003, ApJ, 597, 798
- [53] Hardee, P.E. & Hughes, P.A. 2003, ApJ, 583, 116
- [54] Hardee, P.E., Rosen, A., Hughes, P.A. & Duncan, C.G. 1998, ApJ, 500, 599
- [55] Hardee, P.E., Hughes, P.A., Rosen, A. & Gómez, E.A. 2001, ApJ, 555, 744
- [56] Hjellming, R.M., & Rupen, M.P. 1995, Nature, 375, 464
- [57] Homan, D.C. & Wardle, J.F.C. 1999, Astronom. J., 118, 1942
- [58] Hough, D.H., Zensus, J.A. & Porcas, R.W. 1996, ApJ, 464, 715
- [59] Hughes, P.A., Aller, H.D., Aller, M.F. 1985, ApJ, 298, 301

- [60] Hughes, P., Duncan, C. & Mioduszewski, A. 1996, in Energy Transport in Radio Galaxies and Quasars, ed. P.E. Hardee, A.H. Bridle & J.A. Zensus (ASP Conference Series, Vol. 100), p. 137
- [61] Hughes, P.A., Miller, M.A. & Duncan, C.G. 2002, ApJ, 572, 713
- [62] Jones, T.W., Ryu, D. & Engel, A. 1999, ApJ, 512, 105
- [63] Jorstad, S.G., Marscher, A.P., Mattox, J.R., Wehrle, A.E., Bloom, S.D. & Yurchenko, A.V. 2001, Astrophys. J. Suppl. 134, 181
- [64] Junor, W. & Biretta, J.A. 1995, Astronom. J., 109, 500
- [65] Junor, W., Biretta, J.A. & Livio, M. 1999, Nature, 401, 891
- [66] Kobayashi, S., Piran, T. & Sari, R. 1999, ApJ, 513, 669
- [67] Kössl, D. & Müller, E. 1988, A&A, 206, 204
- [68] Koide, S., Shibata, K. & Kudoh, T. 1998, ApJ, 495, L63
- [69] Koide, S., Shibata, K. & Kudoh, T. 1999, ApJ, 522, 727
- [70] Koide, S., Meier, D.L., Shibata, K. & Kudoh, T. 2000, ApJ, 536, 668
- [71] Koide, S., Shibata, K., Kudoh, T. & Meier, D. 2001, J. Korean Astron. Soc., 34, S215
- [72] Koide, S., Shibata, K., Kudoh, T. & Meier, D. 2002, Science, 295, 1688
- [73] Komissarov, S.S. 1990, Soviet. Astron. Lett., 16(4), 284
- [74] Komissarov, S.S. 1999, MNRAS, 308, 1069
- [75] Komissarov, S.S. 2001, MNRAS, 326, L41
- [76] Komissarov, S.S. & Falle, S.A.E.G. 1996a, in Energy Transport in Radio Galaxies and Quasars, ed. P.E. Hardee, A.H. Bridle & J.A. Zensus (ASP Conference Series, Vol. 100), p. 173
- [77] Komissarov, S.S. & Falle, S.A.E.G. 1996b, in Energy Transport in Radio Galaxies and Quasars, ed. P.E. Hardee, A.H. Bridle & J.A. Zensus (ASP Conference Series, Vol. 100), p. 165
- [78] Komissarov, S.S. & Falle, S.A.E.G. 1997, MNRAS, 288, 833
- [79] Komissarov, S.S. and Falle, S.A.E.G. 1998, MNRAS, 297, 1087
- [80] Krichbaum, T.P., Hummel, C.A., Quirrenbach, A., Schalinski, C.J., Witzel, A., Johnson, K.J., Muxlow, T.W.B. & Qian, S.J. 1990, A&A, 230, 271
- [81] Laing, R.A. 1996, in Energy Transport in Radio Galaxies and Quasars, eds. P.E. Hardee, A.H. Bridle and J.A. Zensus, ASP Conference Series, Vol. 100, 241
- [82] Laing, R.A. & Bridle, A.H. 2002a, MNRAS, 336, 328
- [83] Laing, R.A. & Bridle, A.H. 2002b, MNRAS, 336, 1161
- [84] Liu, R., Pooley, G. & Riley, J.M. 1992, MNRAS, 257, 545
- [85] Lobanov, A.P., Krichbaum, T.P., Witzel, A., Kraus, A., Zensus, J.A., Britzen, S., Otterbein, K., Hummel, C.A. & Johnston, K. 1998, A&A, 340, L60
- [86] Lobanov, A.P. & Zensus, J.A. 2001, Science, 294, 128
- [87] MacFadyen, A. & Woosley, S.E. 1999, ApJ, 524, 262
- [88] Margon, B. 1984, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 22, 507
- [89] Marscher, A.P., Jorstad, S.G., Gómez, J.L., Aller, M.F., Teräsranta, H., Lister, M.L. & Stirling, A.M. 2002, Nature, 417, 625
- [90] Marscher, A.P. & Gear, W.K. 1985, ApJ, 298, 114
- [91] Martí, J.M^a & Müller, E. 1999, in Living Reviews in Relativity, <http://www.livingreviews.org/Articles/>
- [92] Martí, J.M^a & Müller, E. 2003, in Living Reviews in Relativity, <http://www.livingreviews.org/Articles/>, to appear
- [93] Martí, J.M^a, Müller, E., & Ibáñez, J.M^a 1994, A&A, 281, L9
- [94] Martí, J.M^a, Müller, E., Font, J.A. & Ibáñez, J.M^a 1995, ApJ, 448, L105
- [95] Martí, J.M^a, Müller, E., Font, J.A., Ibáñez, J.M^a & Marquina A. 1997, ApJ, 479, 151
- [96] Martí, J.M^a, Müller, E. & Ibáñez, J.M^a 1998, in Open Problems on Astrophysical Jets, ed. S. Massaglia & G. Bodo (Gordon and Breach: Amsterdam), p. 149
- [97] Meier, D.L. 2000, ApJ, 548, L9
- [98] Meier, D.L., Eddington, S., Godon, P., Payne, D.G. & Lind, K.R. 1997, Nature, 388, 350

- [99] Meier, D.L., Koide, S. & Uchida, Y. 2001, *Science*, 291, 84
- [100] Mészáros, P. 2002, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 40, 137
- [101] Mimica, P., Aloy, M.A., Müller, E., & Brinkmann, W., 2003, *A&A*, in press
- [102] Mioduszewski, A.J., Hughes, P.A. & Duncan, G.C. 1997, *ApJ*, 476, 649
- [103] Mirabel, I.F., & Rodriguez, L.F. 1994, *Nature*, 371, 46
- [104] Müller, E. 1998, in *Computational Methods for Astrophysical Fluid Flow*, eds. O. Steiner & A. Gautschy, 27th Saas-Fee Advanced Courses/Lecture Notes 1997 (Springer-Verlag, Berlin).
- [105] Nishikawa, K.-I., Koide, S., Sakai, J.-I., Christodoulou, D.M., Sol, H. & Mutel, R.L. 1997, *ApJ*, 483, L45
- [106] Nishikawa, K.-I., Koide, S., Sakai, J.-I., Christodoulou, D.M., Sol, H. & Mutel, R.L. 1998, *ApJ*, 498, 166
- [107] Nishikawa, K.-I., Koide, S., Shibata, K., Kudoh, T. & Sol, H. 2002, in *Proc. Oxford Radio Galaxy Workshop*, eds. R. Laing & K. Blundell, Pub. Astron. Soc. of the Pacific in press; and astro-ph/0202396
- [108] Norman, M.L. 1993, in *Astrophysical Jets*, ed. D. Burgarella, M. Livio & C. O'Dea (Cambridge University Press: Cambridge) p. 211
- [109] Norman, M.L. 1996, in *Energy Transport in Radio Galaxies and Quasars*, ed. P.E. Hardee, A.H. Bridle & J.A. Zensus (ASP Conference Series, Vol. 100), p.405
- [110] Norman, M.L., Smarr, L., Winkler, K.-H.A. & Smith, M.D. 1982, *A&A*, 113, 285
- [111] Norman, M.L., Winkler, K.-H.A. & Smarr, L. 1984, in *Physics of Energy Transport in Extragalactic Radio Sources*, ed. A.H. Bridle & J.A., Eilek (NRAO Workshop 9), p. 150
- [112] Owsianik , I., & Conway, J.E. (1998), *A&A*, 337, 69
- [113] Panaitescu, A. et al. 2002, *ApJ*, 482, 942
- [114] Panaitescu, A. & Kumar, P. 2002, *ApJ*, 571, 779
- [115] Paredes, J.M. & Martí, J. 2002, *Boletín SEA*, 8, 22
- [116] Perley, R.A., Dreher, J.W., & Cowan, J.J. 1984, *ApJ*, 285, L35
- [117] Perucho, M., Hanasz, M., Martí, J.M.^a, Sol, H. 2003a, in *Highlights of Spanish Astrophysics III*, ed. J. Gallego, J. Zamorano & N. Cardiel (Kluwer Academic Publishers), p. 143
- [118] Perucho, M., Hanasz, M., Martí, J.M.^a, Sol, H. 2003b, in prep.
- [119] Piner, B.G. & Kingham, K.A. 1998, *Geodetic ApJ*, 507, 706
- [120] Piner, B.G., Unwin, S.C., Wehrle, A.E., Edwards, P.G., Fey, A.L. & Kingham, K.A. 1999, *New Astron. Rev.*, 43, 711
- [121] Piran, T. 1999, *Physics Reports*, 314, 575
- [122] Piran, T. 2000, *Physics Reports*, 333-334, 529
- [123] Proga, D., et al. 2003, *ApJ*, 599, L5
- [124] Rayburn, D.R. 1977, *MNRAS*, 179, 603
- [125] Rees, M.J. 1966, *Nature*, 211, 468
- [126] Rosen, A., Hughes, P.A., Duncan, G.C. & Hardee, P. E. 1999, *ApJ*, 516, 729
- [127] Sari, R., Piran, T. & Halpern, J.P. 1999, *ApJ*, 519, L17
- [128] Scheck, L., et al. 2002, *MNRAS*, 331, 615
- [129] Scheuer, P.A.G. 1974, *MNRAS*, 166, 513
- [130] Siemiginowska, A., Smith, R.K., Aldcroft, T.L., Schwartz, D.A., Paerels, F., Petric, A.O 2003, *ApJ*, 598, L15
- [131] Sikora, M. & Madejski, G. 2000, *ApJ*, 534, 109
- [132] Sol, H., Pelletier, G. & Asséo, E. 1989, *MNRAS*, 237, 411
- [133] Stone, J.M. & Norman, M.L. 1992, *Astrophys. J. Suppl.* 80, 753
- [134] Swain, M.R., Bridle, A.H. & Baum, S.A. 1998, *ApJ*, 507, L29
- [135] Tan, J.C., Matzner, C.D. and McKee, C.F. 2001, *ApJ*, 551, 946
- [136] Taylor, G.B., Marr, J.M., Pearson, T.J., & Readhead, A.C.S. 2000, *ApJ*, 541, 112
- [137] Tingay, S.J., Preston, R.A. & Jauncey, D.L. 2001, *Astronom. J.*, 122, 1697
- [138] Urry, C.M., & Padovani, P. 1995, *PASP*, 107, 803
- [139] Walker, R.C., Benson, J.M., Unwin, S.C., Lystrup, M.B., Hunter, T. R., Pilbratt, G. & Hardee, P.E. 2001, *ApJ*, 556, 756

[140] Wehrle, A.E. et al. 1997, American Astronomical Society, 191st AAS Meeting, Bulletin of the American Astronomical Society, 29, 1304

[141] Wehrle, A.E., Piner, B.G., Unwin, S.C., Zook, A.C., Xu, W., Marscher, A.P., Teräsranta, H. & Valtaoja, E. 2001, ApJ Suppl. Series, 133, 297

[142] Woosley, S.E. 1993, ApJ, 405, 273

[143] Zensus, J.A., Cohen, M.H. & Unwin, S.C. 1995, ApJ, 443, 35

[144] Zhang, W. Woosley, S.E. & MacFadyen, A.I. 2003, ApJ, 586, 356

[145] Zhang, W. Woosley, S.E. & Heger, A. 2003, submitted to ApJ; astro-ph/0308389

TESIS DOCTORALES

Tesis doctorales

Chorros relativistas en núcleos activos de galaxias: hidrodinámica y emisión

J. Iván Agudo Rodríguez iagudo@mpifr-bonn.mpg.de

Director/es: José Luis Gómez Fernández y Antonio Alberdi Odriozola

Centro: Instituto de Astrofísica de Andalucía (CSIC)

Lectura: 20 de diciembre de 2002

Casi tres decenios después del descubrimiento los chorros relativistas en núcleos activos de galaxias aún no se conocen con precisión cuáles son sus condiciones físicas, sus mecanismos de radiación a altas energías (óptico y rayos X) o cuál es la influencia del medio intergaláctico en su dinámica. Ayudar a responder estos interrogantes ha sido la motivación de esta Tesis Doctoral.

En su primera parte se presenta un estudio de la formación y evolución de ondas de choque. Éste hace uso de los códigos numéricos relativistas hidrodinámico y de emisión sincrotrón dependientes del tiempo desarrollados en la Universidad de Valencia y el IAA (CSIC), véase la página 17 de este mismo *Boletín de la SEA*. Las simulaciones muestran la existencia de un nuevo tipo de componentes de emisión (*componentes de arrastre*, Fig. 1), inducidas en los chorros por la evolución a lo largo de éstos de ondas de choque intensas. Este tipo de componentes presenta una amplia dispersión en velocidades, pudiendo ser desde estacionarias, cuando se encuentran en regiones cercanas al núcleo de emisión, hasta superlumínicas (con velocidades proyectadas sobre el plano del cielo superiores a c). Además, las *componentes de arrastre* son fácilmente identificables observacionalmente. No son eyectadas desde el núcleo de los chorros, como indican los modelos estándar, sino que aparecen tras el paso de componentes más intensas.

La parte de simulaciones se completa con la presentación de un nuevo esquema numérico para la simulación de la evoluciónpectral de partículas no-térmicas en fluidos relativistas. Este nuevo código numérico, tiene en cuenta las pérdidas (ganancias) de energía por expansión (compresión) del plasma, por radiación y el efecto del paso de las partículas por ondas de choque. Esto hace de este nuevo código una herramienta adecuada para la simulación de la emisión a altas energías (óptico y rayos X) de chorros relativistas en las que los anteriores efectos son no despreciables.

En la segunda parte de la Tesis se presentan estudios observacionales con interferometría de muy larga línea de base (conocidas por su acrónimo en inglés, VLBI) de la Radio Galaxia 3C 120 y el objeto de tipo BL Lacertae PKS 0735+178. Ambos han resultado en conjuntos multi-época de imágenes polarimétricas, obtenidas con el VLBA a distintas longitudes de onda centimétricas y

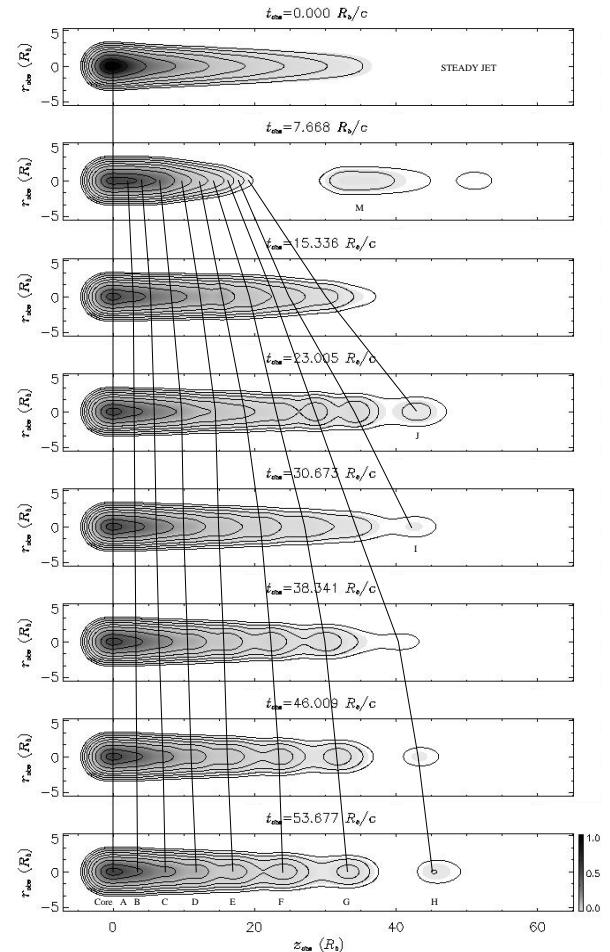


Fig. 1.: Secuencia de radio mapas simulados de densidad de flujo calculados para un ángulo de visión de 10° . La simulación muestra cómo el paso de la componente **M** induce una rica estructura de *componentes de arrastre* con diferentes velocidades.

milimétricas (entre 6 cm y 7 mm). La resolución angular del VLBA a 7 mm (del orden de 0.15 milisegundos de arco) unida a la cercanía de 3C 120 ($z=0.033$) y a un adecuado muestreo temporal de la fuente permitieron obtener las primeras evidencias observacionales del modelo de *componentes de arrastre*. También fue posible confirmar la existencia de curvaturas en las regiones más internas del chorro en 3C 120. Ésto apoya las evidencias de patrones helicoidales encontrados anteriormente en la estructura a escalas del kilo-parsec en esta Radio Galaxia.

Los análisis espectro-polarimétricos y cinemáticos de las componentes de emisión en los chorros de 3C 120 y PKS 0735+178 han permitido además obtener evidencias de interacciones de los mismos con el medio que los circunda. El modelo fenomenológico de interacción se basa en la presencia de rotación de Faraday y absorción libre-libre de la radiación en regiones curvadas de ambos chorros. Dicho modelo es consistente con la existencia, en las cercanías de dichas regiones, de gradientes de densidad en el medio externo ionizadas por interacción con los chorros.

Magnetohydrodynamic Waves in Sheared Coronal Magnetic Structures

Iñigo Arregui Uribetxeberria arregi@hubble.uib.es

Director/es: José Luis Ballester y Ramón Oliver

Centro: Universitat de les Illes Balears

Lectura: 29 de octubre de 2003

Esta tesis pretende contribuir al estudio teórico de las oscilaciones en estructuras magnéticas de la corona solar, tales como arcadas magnéticas coronales, en el contexto de la Sismología Coronal. El objetivo de este tipo de estudios es profundizar en el conocimiento del comportamiento de las ondas magnetohidrodinámicas (MHD) en la corona solar. La tesis aborda dos cuestiones que no han sido contempladas hasta el momento. Por una lado, se considera el hecho, bien fundamentado por las observaciones, de que estas estructuras están cizalladas, y por tanto, poseen una componente del campo magnético en la dirección a lo largo de la estructura. Por otro lado, se considera la propagación de las ondas en la dirección longitudinal de la estructura magnética.

Primeramente se ha realizado la deducción analítica de las ecuaciones diferenciales para las ondas MHD que describen perturbaciones ideales, lineales y adiabáticas de un equilibrio bidimensional, cizallado, general, con invariancia longitudinal. Las únicas restricciones de este equilibrio son la ausencia de gravedad y la asunción de plasma frío (no hay presión de plasma). El resultado de la derivación muestra que estas ecuaciones pueden expresarse en términos de dos ecuaciones diferenciales acopladas de segundo orden para las componentes de la perturbación de la velocidad en las direcciones normal y perpendicular al campo magnético en equilibrio. En ausencia de propagación longitudinal y cizalladura, y en la aproximación de plasma frío, las ecuaciones describen modos MHD rápidos y de Alfvén desacoplados. La inclusión de cizalladura y/o propagación longitudinal produce el acoplamiento de los dos tipos de modos, de manera que no existen modos rápidos y de Alfvén puros en este tipo de estructuras.

La segunda parte de la tesis se ha dedicado al desarrollo de un programa numérico para la resolución de las citadas ecuaciones. Para ello se ha utilizado un programa existente que permite obtener la frecuencia y la estructura espacial de los modos MHD rápido y lento en estructuras bidimensionales sin cizalladura. Dicho programa ha sido modificado para investigar los modos MHD rápido y de Alfvén en estructuras bidimensionales cizalladas, incluyendo además propagación a lo largo del eje de la estructura. Primeramente, se han implementado las ecuaciones obtenidas en el programa numérico. Seguidamente, se ha incluido un esquema *staggered grid* para resolver dichas ecuaciones diferenciales en dos mallas (una para cada componente de la velocidad) cuyos nodos están intercalados entre sí en la dirección perpendicular a las superficies magnéticas.

Esto ha permitido la obtención fidedigna de la estructura espacial de modos con singularidades en estas superficies magnéticas, tales como los modos de Alfvén.

Finalmente, la tesis analiza los modos normales de oscilación de diversos equilibrios que representan arcadas magnéticas de la corona solar. Se ha considerado un equilibrio sencillo consistente en un campo recto, inclinado, con estratificación de la densidad en la dirección vertical. El estudio de las oscilaciones de este equilibrio ha permitido, por una parte, testar el código numérico pues, en este caso, se pueden obtener algunas aproximaciones analíticas para la frecuencia y distribución espacial de los modos rápido y de Alfvén acoplados, cuando el acoplamiento es débil. Por otra parte, también se ha podido estudiar en detalle el acoplamiento fuerte entre los modos rápido y de Alfvén y los resultados obtenidos han sido cruciales para comprender las propiedades oscillatorias de equilibrios más complejos. Seguidamente, se han considerado modelos de arcadas más realistas, tales como una arcada potencial, una arcada potencial con campo longitudinal constante y una arcada *force-free*. En todos estos equilibrios, la no uniformidad de las variables físicas, así como la curvatura del campo magnético, producen una gran complejidad en el espectro y la estructura espacial de los modos dando lugar a modos de oscilación con propiedades mixtas.

Entre los resultados obtenidos queremos destacar que para que el acoplamiento entre modos rápidos y de Alfvén ocurra se deben cumplir una serie de requerimientos o reglas de paridad en cuanto a la simetría de sus autofunciones con respecto a la dirección del campo magnético del equilibrio. De este modo, la propagación longitudinal produce el acoplamiento de modos con la misma paridad, la cizalladura produce el acoplamiento de modos con paridad opuesta, y, cuando ambos efectos están presentes, cualquier acoplamiento es posible. Por otra parte, la interacción entre los modos puede ser resonante o no resonante dependiendo de la posición relativa de las frecuencias de los modos rápido y de Alfvén involucrados. Las reglas de paridad, junto con el espectro de frecuencias de los modos, por tanto, determinan totalmente la estructura espacial de los modos de oscilación de este tipo de estructuras en la corona solar. Un resultado que tiene consecuencias observacionales es el hecho de que, bajo ciertas circunstancias, los modos de oscilación en estas estructuras podrían ser difíciles de detectar debido a que la energía de los mismos tiende a escapar a alturas considerables en la corona solar.

Los resultados de esta tesis ponen de manifiesto la riqueza y diversidad que tienen los modos normales de oscilación cuando se consideran estructuras cizalladas y/o propagación longitudinal, y permitirán, en el futuro, el estudio de los modos normales de oscilación de otras estructuras de la corona solar, tales como bucles coronales o estructuras formadas por un sistema protuberancia-arcada coronal con cizalladura.

A theoretical perspective on galaxy clusters: Physical properties of the dark matter and baryons

Yago Ascasíbar Sequeiros yago@thphys.ox.ac.uk

Director/es: Gustavo Yepes Alonso

Centro: Universidad Autónoma de Madrid

Lectura: 20 de enero de 2003

Los cúmulos de galaxias son una pieza clave a la hora de estudiar la composición del universo y la formación de estructuras a gran escala. Un cúmulo de galaxias típico se caracteriza por una masa en torno a $10^{15} M_{\odot}$, de la que más de un 80 por ciento corresponde a la denominada *materia oscura*. La materia bariónica se halla en su mayor parte en una componente difusa en estado de plasma totalmente ionizado, que constituye el *medio intracumular*. Nuestro conocimiento de este medio ha experimentado un avance sustancial durante los últimos años gracias a los nuevos observatorios espaciales en el rango de rayos X. Las estrellas, responsables de la emisión en otras bandas del espectro, suponen un porcentaje nimio de la masa del cúmulo.

A pesar de numerosas comparaciones con resultados observacionales, la presente tesis doctoral es sin embargo un estudio eminentemente teórico. Nuestro interés se centra en la comprensión de las relaciones existentes entre diversas magnitudes observables y la identificación de los mecanismos responsables de ellas. En particular, se abordan varios problemas abiertos en relación con las distintas componentes materiales, comenzando por la materia oscura para considerar más tarde el gas del medio intracumular y finalmente los procesos asociados a la formación estelar. La mayor parte de los resultados obtenidos se basan en una serie de simulaciones numéricicas de alta resolución, y se proponen modelos analíticos que facilitan una interpretación física de la fenomenología observada.

Con respecto a la materia oscura, se verifica la existencia de *profiles universales* de densidad tanto en el espacio real como en el espacio de fases. Nuestro estudio no revela dependencia alguna con respecto a la masa del objeto, pero sí con su estado dinámico (es decir, fusiones recientes). Se muestra también que el momento angular de las partículas de materia oscura está dominado por su dispersión de velocidades y no por la rotación ordenada, presentándose un estudio de la excentricidad de las órbitas. Este último aspecto resulta crucial a la hora de construir un modelo analítico basado en el formalismo de colapso esférico. Nuestro modelo es capaz de reproducir la estructura de los objetos simulados e interpretarla en términos de las condiciones iniciales primordiales, lo cual explica de forma natural la *universalidad* de los perfiles de densidad.

En cuanto al gas del medio intracumular, nuestro estudio pone de relieve la importancia de la conserva-

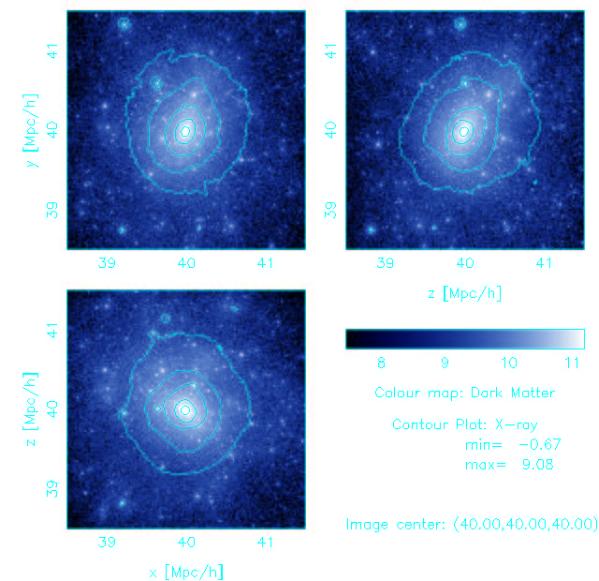


Fig. 1.: Proyección a lo largo de los tres ejes principales de uno de los cúmulos estudiados. El mapa de color representa la densidad superficial de masa (comparable a una imagen en el rango óptico), mientras que los contornos indican el perfil de luminosidad en rayos X.

ción de entropía en los métodos de integración numérica de las ecuaciones hidrodinámicas. Asimismo, se muestra cómo los cúmulos dinámicamente relajados pueden ser descritos como un gas politrópico en equilibrio hidrostático con el potencial gravitatorio creado por la materia oscura. Este modelo implica la existencia de perfiles universales para la densidad y la temperatura del gas, que se ven respaldados por los resultados de las simulaciones. Además, permite estudiar las *relaciones de escala* entre la masa, temperatura y luminosidad en rayos X del cúmulo. La concentración del halo de materia oscura, así como su dependencia con el estado dinámico, juegan un papel fundamental en estas relaciones, ayudando a explicar parte de la actual discrepancia entre teoría y observaciones.

Por último, se investiga la historia de formación estelar del universo y cómo se ve afectada por procesos reguladores. Nuestros resultados numéricos predicen una elevada tasa de formación estelar en el universo primitivo, donde la fotoionización juega un papel esencial como mecanismo inhibidor. La energía depositada por explosiones de supernova adquiere mayor relevancia conforme avanza el tiempo, y la formación de cúmulos de galaxias introduce nuevos procesos que contribuyen a la interrupción de la actividad de formación estelar.

En resumen, los cúmulos de galaxias constituyen un excelente laboratorio que nos permite estudiar diversos aspectos de la interacción entre materia oscura y bariónica. La presente tesis doctoral pretende arrojar un poco de luz sobre esta interacción y el origen físico de sus manifestaciones observables más destacadas.

Procesos de emergencia de regiones activas solares

Ricard Casas i Rodríguez

ricardcasas@astrosabadell.org

Director/es: Manuel Vázquez Abeledo (IAC)

Centro: Departamento de Astrofísica de la Universidad de la Laguna – Instituto de Astrofísica de Canarias

Lectura: 29 de abril de 2003

La presencia de manchas en la fotosfera solar es el fruto de la emergencia del campo magnético desde el interior del Sol. El estudio de estas estructuras puede llevarse a cabo a través de distintos métodos para diversos fines. Para la elaboración de esta tesis se ha procedido a la observación de la cinemática que presentan las manchas, sobre todo en los primeros momentos de su existencia, deduciendo de ello el modelo teórico que mejor se adapta al evento observado.

Las observaciones se desarrollaron en dos frentes: Por un lado la determinación de 5.216 posiciones de 257 manchas empleando distintos telescopios del Observatorio del Teide, del Instituto de Astrofísica de Canarias. En el telescopio newton al vacío (VNT) se desarrolló, ex-profeso, *hardware* y *software* para poder realizar las observaciones, se diseño y construyó un telescopio que pudiera obtener imágenes del disco entero del Sol a través de distintos filtros interferenciales y también se empleó el telescopio Gregory-Coudé (GCT), gestionado por el Observatorio de la Universidad de Göttingen (Alemania). Con este instrumento se tomaron más de 11.000 observaciones espectroscópicas que era el segundo frente en el que se trabajó.

Con la determinación de las posiciones se quería determinar la velocidad de rotación de cada foco de las manchas observadas y ver la evolución espacio-temporal con respecto a la velocidad medida. Así, si el movimiento era de un tipo u otro podía determinarse de qué modo emergía el campo magnético del interior del Sol, de forma simétrica, asimétrica o enroscada, como predicen algunos autores. Las observaciones mostraron que un 49% de los grupos afloraban a la superficie con el movimiento propio que caracteriza este tipo de emergencia, mientras que tan sólo un 10% de los casos mostraba una subida lineal, simétrica o asimétrica.

A partir de las velocidades de rotación de todas las manchas observadas se estableció una ley de rotación diferencial y se analizó la dependencia de la velocidad en función de distintos parámetros. Se observó que el incremento de la velocidad con respecto a la ley de rotación diferencial era inversamente proporcional al área máxima alcanzada por el grupo. Así como que ese mismo incremento de velocidad dependía linealmente con la inclinación del eje del grupo.

Con los datos espectroscópicos se estableció, en primer lugar, el comportamiento de la variación centro-

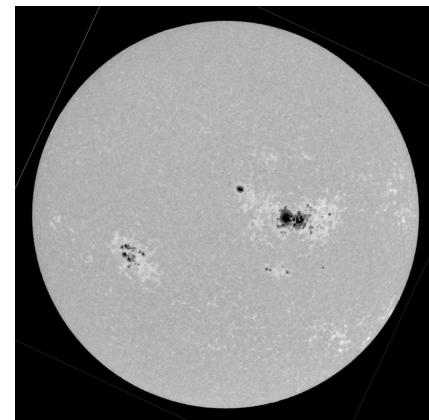


Fig. 1.: Imagen del disco solar obtenida con el telescopio simbiótico, montado en paralelo con el VNT, el 22 de septiembre de 2000 a través de un filtro de Ca II K y corregida de la variación centro-borde por J.A. Bonet (IAC). A partir de imágenes como ésta pueden determinarse las coordenadas heliográficas de las manchas.

borde de la línea de FeI centrada en 6302,5 Å. Para ello se tomaron espectros en el eje norte-sur solar, sin contribución de la componente de la velocidad de rotación, equivalente a uno con más de 50.000 puntos, obteniéndose que la variación en función del ángulo heliocéntrico θ es:

$$\Delta\lambda \text{ (m}\text{\AA}\text{)} = 3.80 (1 - \cos \theta) - 6.79 (1 - \cos \theta)^2 + \\ + 16.46 (1 - \cos \theta)^3$$

Se compararon los resultados espectroscópicos con los obtenidos por el método de trazas, apreciando que las condiciones de inestabilidad atmosférica contribuían a una menor definición de los valores obtenidos por contaminación de la fotosfera circundante, a pesar de obtener una mejor resolución temporal.

Finalmente, como colofón al trabajo, fueron analizados los dibujos de las manchas solares que Galileo Galilei publicó en su obra *Istoria e Dimostrazioni intorno alle Macchie Solari e Loro Accidenti* y que realizó entre el 2 de junio y el 8 de julio de 1611.

Las observaciones de Galileo, de las primeras que se realizaron con telescopio, son cronológicamente anteriores al mínimo de Maunder, periodo comprendido entre 1645 y 1715 en el que la actividad solar descendió acusadamente. El interés de su análisis radica, por un lado, en que la rotación diferencial parece depender del nivel de actividad solar y por otro lado en la posibilidad que encontrásemos algún rasgo anómalo precursor del descenso brusco de actividad posterior. Tras resolver los problemas que suponían unas observaciones realizadas hace casi 400 años se llegó a la conclusión que la ley de rotación diferencial imperante a principios de la primera década del siglo XVII era similar, dentro de los errores, a la que tenemos hoy en día, no detectándose señales del fenómeno que tendría lugar unos años después.

Cosmology through gravitational lensing

Rodrigo Gil-Merino y Rubio

Director/es: Joachim Wambsganss

Centro: Universität Potsdam, Alemania

Lectura: 27 de noviembre de 2003

Cuando se cumple el 25 aniversario del descubrimiento del primer sistema lente gravitatoria, el efecto de la desviación de la luz por la presencia de un potencial gravitatorio se ha revelado como una herramienta versátil y potente en astrofísica en los últimos años. El efecto lente gravitatoria se utiliza tanto en la búsqueda de materia oscura en halos galácticos y en cúmulos de galaxias, como de planetas extrasolares; para comprender la estructura de cuásares, así como de atmósferas estelares y, de manera privilegiada, se aplica en la investigación de los parámetros cosmológicos. Esta tesis está orientada a la aplicación del efecto lente gravitatoria en escenarios cosmológicos y se divide en dos grandes bloques: el primero está enfocado al estudio de la configuración lente en la que la fuente es un cuásar y el deflector una galaxia; el segundo se ocupa de sistemas en los que el potencial deflector es originado por un cúmulo de galaxias.

Cuando entre un observador y una fuente lejana (i.e. cuásar) se interpone una galaxia, esta última puede actuar de lente gravitatoria. Si tal es el caso, el observador puede contemplar varias imágenes de la misma fuente. En general, la luz proveniente de las diferentes imágenes recorre caminos ópticos diferentes y, por tanto, no llega al observador simultáneamente. El retraso temporal entre las diferentes imágenes es inversamente proporcional a la constante de Hubble y su determinación en diferentes sistemas es un importante aspecto dentro del paradigma de las lentes gravitatorias. Actualmente se ha medido este retraso temporal en 10 sistemas lente y el conocimiento de un número mayor permitiría un cálculo estadístico de este importante parámetro cosmológico. Como primer apartado en esta tesis, deducimos el valor del retraso temporal en el sistema doble HE 1104–1805 analizando una monitorización de 5 años del sistema mediante el telescopio de 3.6 m de ESO en tiempo de servicio. En este análisis investigamos el comportamiento de algunas de las técnicas disponibles en condiciones de muestreo deficiente, como con el que contamos en nuestro conjunto de datos. El retraso temporal calculado es de $\Delta t = (0.85 \pm 0.05)$ años (Gil-Merino et al., 2002, A&A, 381, 428).

Después de un periodo de monitorización de un sistema lente, podemos obtener diferentes curvas de luz para las diferentes componentes. Estas curvas de luz han de ser idénticas una vez que el retraso temporal ha sido corregido, debido a que corresponden a la misma fuente. Sin embargo la función de correlación entre las curvas de luz para un periodo temporal determinado

puede alejarse sensiblemente de la unidad. Problemas de muestreo, errores observacionales y/o de instrumentación pueden introducir anomalías en una componente con respecto a otra. Asimismo estas anomalías pueden tener un origen físico en la subestructura de la galaxia lente: estrellas u otros objetos compactos pueden inducir un efecto de microlente en una de las componentes, haciendo que las curvas de luz sean bien distintas. Este es un método indirecto para detectar poblaciones estelares en halos galácticos y para poner límites a la masa de objetos compactos en dichos halos. En un análisis del sistema doble Q0957+561 durante una monitorización de 4 años con el telescopio IAC80, concluimos que las anomalías vistas en las curvas de luz son debidas a procesos ruidosos y/o problemas observacionales y que, por tanto, objetos compactos de masas $M_{\mu\text{len}} \leq 10^{-3} M_{\odot}$ en el halo de la galaxia lente son muy improbables (Gil-Merino et al., 2001, MNRAS, 322, 428).

Q2237+0305 es un sistema lente gravitatoria en el que el deflector es una galaxia espiral a $z_G = 0.04$ y observamos 4 imágenes de un cuásar a $z_Q = 1.7$. Diferentes equipos han detectado efecto microlente en este sistema desde su descubrimiento. Como parte de una colaboración internacional (GLITP), el sistema fue monitorizado durante 4 meses, no observándose una variabilidad intensa en las curvas de luz de las diferentes componentes. Utilizando este hecho y mediante simulaciones ponemos una cota superior a la velocidad transversal efectiva de la galaxia lente $v_t \leq 630$ km/s. La medida de velocidades transversales en astrofísica es una tarea complicada (no así las velocidades radiales) y este nuevo método podrá ser aplicado a otros sistemas (Gil-Merino et al., 2003, A&A, enviado).

Cuando el potencial deflector es originado por un cúmulo de galaxias pueden existir dos regímenes de efecto lente: por un lado pueden verse múltiples arcos de galaxias lejanas en las zonas interiores del cúmulo (efecto lente fuerte); por otro lado, y para radios más exteriores, pueden detectarse pequeñas deformaciones en galaxias lejanas que no llegan a formar arcos (efecto lente débil). Ambos efectos permiten deducir la masa del cúmulo de forma independiente.

Cl 0024+1654 ($z = 0.4$) fue observado en las bandas BVRIJK mediante el telescopio VLT. Encontramos una masa para distancias inferiores a 560 kpc de $M(\theta \leq 560 h_{65}^{-1}) = (1.7 \pm 0.4) 10^{14} h_{65}^{-1} M_{\odot}$ y un razón masa-luminosidad $M/L_R(\theta \leq 560 h_{65}^{-1}) = (190 \pm 40) M_{\odot}/L_{\odot}$.

RBS380 ($z = 0.52$) es el cúmulo de galaxias más distante del catálogo ROSAT. Observamos el sistema con el satélite de rayos X CHANDRA y con el telescopio óptico NTT. Aunque no encontramos arcos gravitatorios, observamos un cúmulo ópticamente rico. Sin embargo, la emisión X fue sensiblemente inferior a la esperada ($L_{X,bol} = 2 \cdot 10^{44} \text{ erg s}^{-1}$) indicando una correlación débil entre la emisión X y la densidad de galaxias (Gil-Merino & Schindler, 2003, A&A, 408, 51).

Astrofísica molecular en el infrarrojo lejano: nubes interestelares y circunestelares

Javier R. Goicoechea javier@damir.iem.csic.es

Director/es: José Cernicharo Quintanilla

Centro: Dpto. de Astrofísica Molecular e Infrarroja, Instituto de Estructura de la Materia, Madrid

Lectura: 30 de septiembre de 2003

Debido a la opacidad atmosférica, el dominio infrarrojo lejano del espectro electromagnético ha sido la última ventana en ser explorada por la *Astrofísica Molecular*. El potencial que supone abrir este nuevo rango de frecuencias a través de la *espectroscopía* ha comenzado a ser explotado con el *Infrared Space Observatory* (ISO). La sensibilidad de la instrumentación embarcada en dicho satélite no tiene comparación alguna con las escasas misiones espaciales, o a bordo de aviones, realizadas con anterioridad a su lanzamiento. En particular, casi todo el rango operativo de ISO en el infrarrojo lejano ($\sim 43\text{--}197\text{ }\mu\text{m}$) no había sido observado. El espectro de las fuentes más representativas de la galaxia era desconocido y los principales emisores de radiación, las moléculas, estaban por identificar.

Las observaciones en el infrarrojo lejano están especialmente indicadas para el estudio del *gas caliente* en las nubes moleculares del medio interestelar y del inte-

rior de las envolturas circunestelares alrededor de estrellas evolucionadas (Fig. 1). Algunas de estas fuentes; Sgr B2 en el Centro Galáctico y las *Proto-Nebulosas Planetarias* CRL 2688, CRL 618 y NGC 7027, constituyen algunos de los objetos más paradigmáticos para nuestro entendimiento de la *complejidad química* de la Galaxia. La comprensión profunda de los fenómenos físicos que tienen lugar en estos entornos ha requerido un tratamiento exhaustivo y coherente de la transferencia de radiación. Para ello se ha tenido en cuenta la influencia de la emisión y absorción de los granos de polvo en la población de los niveles rotacionales y vibracionales de las moléculas. Además, se ha analizado la emisión de líneas de estructura fina atómicas procedente del gas fotodisociado y del gas fotoionizado.

Muchas de las especies moleculares detectadas y analizadas en este trabajo (H_2O , OH , CH^+ , CH , CO , HCN , NH , NH_2 o H_3O^+) son esenciales para el estudio de las condiciones físicas y químicas del medio interestelar y circunestelar. La mayoría de estas moléculas sólo pueden ser detectadas desde telescopios espaciales. La abundancia del *vapor de agua*, por ejemplo, puede determinar si se formarán estrellas durante el colapso gravitatorio de una nube molecular. Otro ejemplo son las *cadenas lineales de carbono* (C_3 , C_4 , ...), detectadas por primera vez en el medio interestelar denso y que pueden ser los “*esqueletos*” a partir de los cuales se formen las grandes moléculas carbonadas responsables de buena parte de la emisión infrarroja de la Galaxia.

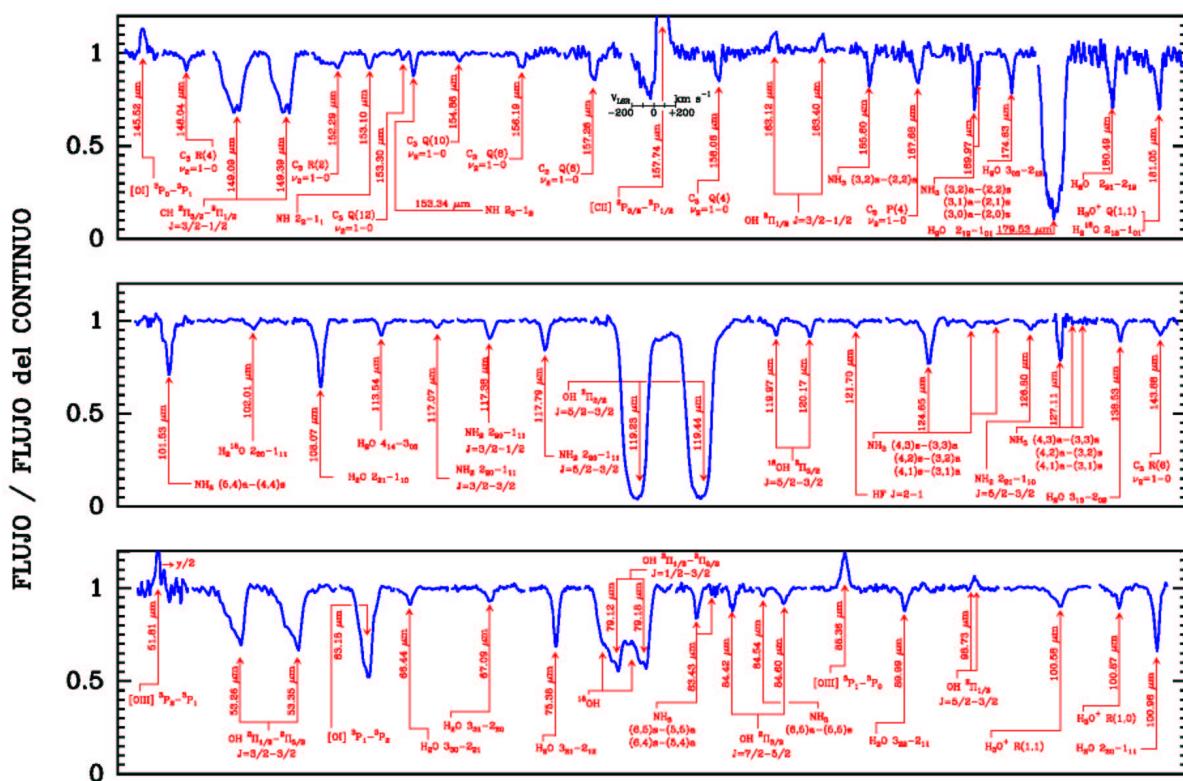


Fig. 1.: Espectro ISO/LWS Fabry-Perot de Sgr B2(M). La resolución en velocidades es $\sim 35\text{ km s}^{-1}$.

Intrinsic and Cluster Induced Temperature Anisotropies in the Cosmic Microwave Background

Carlos Hernández Monteagudo
 chm@mpa-garching.mpg.de

Director/es: Fernando Atrio Barandela y Alexander Kashlinsky

Centro: Universidad de Salamanca

Lectura: 16 de febrero de 2002

Esta tesis se centra en el estudio de las fluctuaciones de temperatura de la Radiación de Fondo Cósmico de Microondas (RFCM). La RFCM presenta un espectro de cuerpo negro con una temperatura media, medida en todo el cielo, cercana a los 3 K, y un campo de fluctuaciones con una amplitud típica de $110 \mu\text{K}$.

La primera mitad de esta tesis se ocupa del análisis de fluctuaciones *primarias* de temperatura, (generadas a $z \simeq 1090$ cuando la radiación se desacopla de la materia durante recombión). En este contexto, los métodos tradicionales de maximización de funciones de verosimilitud escalan con N_p^3 , siendo N_p el número de píxeles presentes en un mapa de RFCM. La aplicación de tales métodos fue posible con *COBE*, que contaba con ≈ 4100 píxeles útiles, pero resulta del todo inviable con los mapas de *WMAP* ($\sim 3 \times 10^6$ píxeles) y/o *Planck*, ($\sim 12 \times 10^6$ píxeles). En esta tesis proponemos un método alternativo de análisis, consistente en el estudio exclusivo de aquellas fluctuaciones de temperatura que rebasen, en valor absoluto, un umbral dado por $\nu\sigma$, donde σ es la dispersión típica del campo de fluctuaciones. Nuestro análisis se basa, por tanto, en este subconjunto de píxeles donde el cociente señal ruido es máximo, y donde esperamos que se encuentre la mayor parte de la información cosmológica. Es posible demostrar que las propiedades de correlación de estos píxeles seleccionados caracteriza *unívocamente* la función de correlación (o su transformada de Fourier, el espectro de potencias) de *todo* el campo de fluctuaciones, (que, en el caso de ser gausiano, queda así completamente caracterizado). En efecto, probamos que el exceso de probabilidad de encontrar dos píxeles del subconjunto seleccionado por un umbral ν a una distancia angular θ en el cielo viene dado por $\xi_\nu(C(\theta))$, (donde C es la función de correlación de todo el campo de temperaturas):

$$\xi_\nu(\theta) = \frac{1}{H_{-1}^2(\frac{\nu}{\sqrt{2}})} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(C(\theta)/C(0))^{2k}}{2^{2k}(2k)!} H_{2k-1}^2(\frac{\nu}{\sqrt{2}}),$$

y donde $H_i(x)$ es el polinomio de Legendre de orden i -ésimo. El cálculo de esta cantidad en un mapa requiere $1/2(f(\nu)N_p)^2$ operaciones, siendo $f(\nu) \equiv \text{erfc}(\nu/\sqrt{2})$ la fracción de píxeles seleccionados, (la inversión de $\xi_\nu(\theta)$ a $C(\theta)$ y/o el espectro de potencias se hace de forma prácticamente inmediata). Para *WMAP*, probamos que

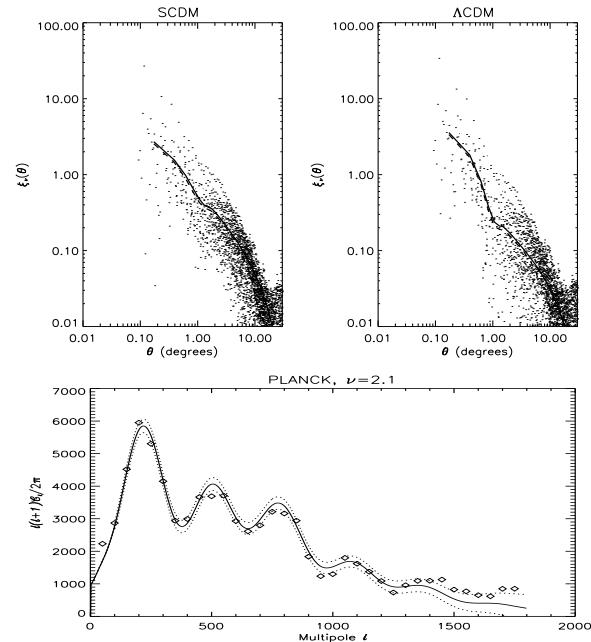


Fig. 1.: $\xi_{\nu=2}$ recuperada en dos modelos cosmológicos diferentes (SCDM, Λ CDM), y espectro de potencias recuperado para *Planck*, (Λ CDM, $\nu = 2.1$).

el método funciona óptimamente para $\nu \in [1.8, 2.5]$, mientras que para *Planck* el intervalo $\nu \in [2.3, 3]$ es el más adecuado. Por tanto, este método supone una disminución de dos a tres órdenes de magnitud del tiempo de CPU necesario para analizar mapas de RFCM si se compara con métodos que escalan con N_p^2 . El aumento de eficiencia es todavía más importante si la comparación se hace con métodos de máxima verosimilitud, ($\mathcal{O}[N_p^3]$). La inclusión de elementos realistas en las simulaciones, tales como la presencia de ruido inhomogéneo o residuos de contaminantes (claramente no gausianos) no compromete el rendimiento del método.

La segunda mitad de la tesis se centra en un tipo particular de anisotropías *secundarias*, introducidas en cúmulos de galaxias, en donde el *scattering* Compton inverso genera una distorsión en el espectro de cuerpo negro de la RFCM, (efecto Sunyaev-Zel'dovich térmico, 1970, *Astrophys. Space Sci.* 7, 20). Nuestro análisis se centra en la caracterización de la población de cúmulos de galaxias por medio del formalismo de Press-Schechter (1974, *ApJ* 187, 425), que a su vez nos permite estimar su efecto *global* en los mapas de RFCM. Distinguendo, por un lado, la amplitud media de las fluctuaciones de temperatura introducidas por estos objetos (δT^{tSZ}), y por otro, la distorsión global que causan en el espectro de cuerpo negro (\bar{y}), es posible proponer un estimador de la densidad de cúmulos de galaxias. En efecto, demostramos que el cociente de ambas cantidades, $\eta \equiv \delta T^{tSZ}/\bar{y}$, escala como el inverso de la raíz de la densidad numérica de cúmulos, $\eta \propto 1/\sqrt{n_{cl}}$, independientemente de la cosmología o de los parámetros que describen la población de cúmulos.

Brown Dwarfs in Star Forming Regions

Belen López Martí

Belen.Lopez-Marti@uv.es

Director/es: Jochen Eislöffel

Centro: Universitat de València

Lectura: 13 de junio de 2003

Esta tesis presenta los resultados de un estudio de la población de enanas marrones en cuatro regiones de formación estelar del hemisferio sur, llevado a cabo con la cámara Wide Field Imager (WFI) instalada en el telescopio de 2.2 m del Observatorio de La Silla. Los objetos candidatos fueron seleccionados a partir de imágenes en los filtros R, I y H α . También observamos en dos filtros de banda media, M855 y M915 (centrados en las longitudes de onda de 855 y 915 nm, respectivamente), a fin de realizar una clasificación espectral. El primero de estos filtros cubre un rango de longitudes de onda que incluye varias bandas de absorción características de la clase espectral M, mientras que el segundo cubre una región carente de líneas espectrales en estos objetos. De este modo se pudo establecer una correlación entre el tipo espectral y el índice de color (M855–M915) para objetos con tipos espetrales entre M4 y M9, así como para tipos espetrales L0–L2. Con este método identificamos un buen número de nuestros objetos como pertenecientes a la clase M5 o posteriores.

Nuestro estudio ha revelado una notable población de enanas marrones en las nubes oscuras de Camaleón I y el Lobo. Los resultados muestran que no hay un fuerte descenso en el número de objetos de los últimos tipos espetrales, y que las enanas marrones pueden ser tan abundantes como las estrellas de baja masa en ambas regiones. Para la función de masa $dN/dM \sim M^{-\alpha}$ se obtiene un exponente $\alpha = 0.9 \pm 0.1$ en Camaleón I y $\alpha = 1.1 \pm 0.2$ en el Lobo, ambos muy próximos al valor 0.8 ± 0.4 derivado por Béjar et al. (2001) para el cúmulo de σ Orionis, de edad similar.

De acuerdo con nuestros resultados, enanas marrones y estrellas tienen una distribución espacial parecida, tendiendo a agruparse junto a las zonas más densas de las nubes, lo cual se interpreta como evidencia de un mismo proceso de formación. No hay indicios de que los objetos menos masivos hayan sido expulsados de los lugares donde se formaron. La escasez de binarias visuales, y particularmente de pares estrella-enana marrón, contradice la hipótesis de que las enanas marrones se forman como los planetas, en discos en torno a las estrellas. Además, algunas de las enanas marrones en estas dos regiones tienen una intensa emisión en H α , indicativa de la existencia de procesos de acreción. En Camaleón I se disponía de observaciones con ISOCAM que muestran que dicha intensa emisión está relacionada con un exceso de emisión en el infrarrojo medio, indicio de la presencia de un disco circunestelar.

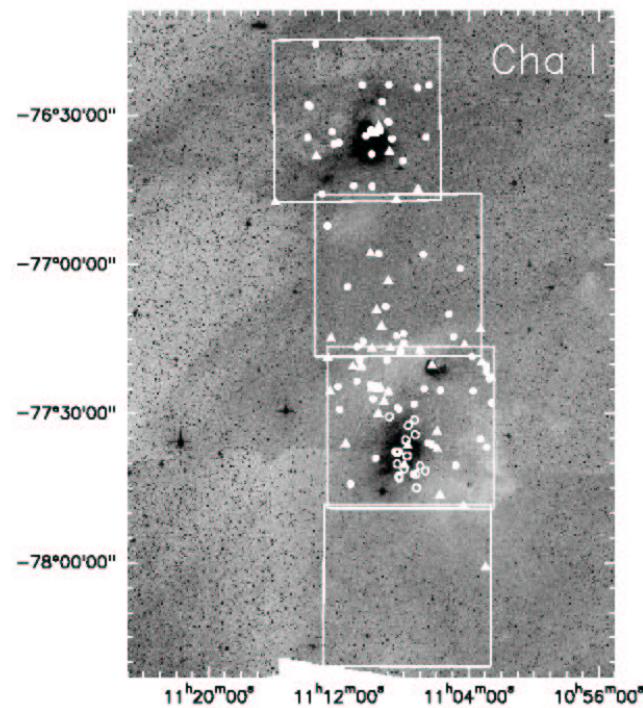


Fig. 1.: Imagen tomada del *Digital Sky Survey* donde se indica la ubicación de los campos observados con WFI en Camaleón I. Las posiciones de los objetos de baja masa con y sin emisión en H α se indican con círculos y triángulos, respectivamente. Los símbolos rellenos corresponden a los nuevos objetos encontrados en nuestro estudio.

También investigamos la actividad magnética de nuestras candidatas en Camaleón I, haciendo uso del archivo de observaciones del satélite ROSAT. No se observa ningún descenso del nivel de emisión en rayos X para tipos espetrales hasta M7.5, claramente por debajo de la frontera entre objetos estelares y subestelares. Así pues, las enanas marrones jóvenes son tan activas como las estrellas de baja masa de edad similar. No encontramos ninguna correlación significativa entre el nivel de emisión en rayos X y en H α , un nuevo indicio de que esta última está causada por la acreción y no por la actividad cromosférica.

En Camaleón II y Corona Austral encontramos un notable número de objetos de baja luminosidad que requieren confirmación de su naturaleza mediante espectroscopía. Pocos o ninguno objeto de tipo espectral entre M7 y M9 fueron identificados en estas dos regiones, lo que podría indicar un déficit real de enanas marrones. Al contrario que en Camaleón I y el Lobo, los objetos con intensa emisión en H α son escasos, y no se pudo establecer ninguna relación entre esta emisión y un exceso infrarrojo.

La tesis puede descargarse en formato PS en la siguiente dirección web: <http://www.tls-tautenburg.de/research/belen/homepage/index.html>

Solar irradiance variations induced by faculae and small magnetic elements in the photosphere

Ada Ortiz Carbonell

aortiz@am.ub.es

Director/es: Blai Sanahuja Parera y Vicente Domingo Codoñer

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

Lectura: 10 de octubre de 2003

El objetivo de la tesis es el estudio de la variabilidad de la irradiancia solar, tanto total como espectral, producida por los pequeños elementos magnéticos que emergen a la fotosfera solar. El estudio de estas variaciones es importante por sus implicaciones en un mejor conocimiento del ciclo solar, así como en el clima terrestre. En el trabajo se han empleado íntegramente datos aportados por el observatorio solar espacial SOHO (en particular de los instrumentos VIRGO y MDI), el cual puede observar el Sol de forma ininterrumpida.

Las variaciones producidas en la escala temporal de una rotación solar son debidas al paso de regiones activas por el disco solar, mientras que el origen de las variaciones observadas en la irradiancia en la escala del ciclo solar es incierto. La contribución de los pequeños elementos magnéticos brillantes que componen las fáculas y el retículo magnético (*network*) a las variaciones a largo plazo es objeto de controversia. El problema radica en que tanto su identificación como la medida de su contraste son difíciles, sin embargo, son imprescindibles para conocer la variación centro-limbo de su contraste. Es necesario conocer la dependencia del contraste con la posición de la estructura sobre el disco para estimar su contribución a las variaciones de la irradiancia solar.

En esta tesis se ha estudiado la contribución de las pequeñas estructuras magnéticas (aquellas que tienen una contribución positiva a la variabilidad), tanto a corto como a largo plazo. Analizando la evolución de una región activa aislada (NOAA AR 7978) durante varias rotaciones Carrington, se ha determinado la variación producida en la luminosidad solar debido a la presencia de dicha región durante el mínimo de actividad de 1996. También se han combinado simultáneamente datos fotométricos y magnéticos para analizar el contraste de las pequeñas estructuras y su dependencia con la posición, el campo magnético y su evolución a lo largo del ciclo solar 23.

El estudio de la variabilidad solar ha requerido la reducción y el análisis de los datos empleados de VIRGO y de MDI, para su conversión desde el nivel 0 (datos no tratados) al nivel 2 (datos útiles). Se han desarrollado para ello diversos algoritmos originales para la corrección de los defectos instrumentales de los datos, tales como la degradación de los filtros y la variación

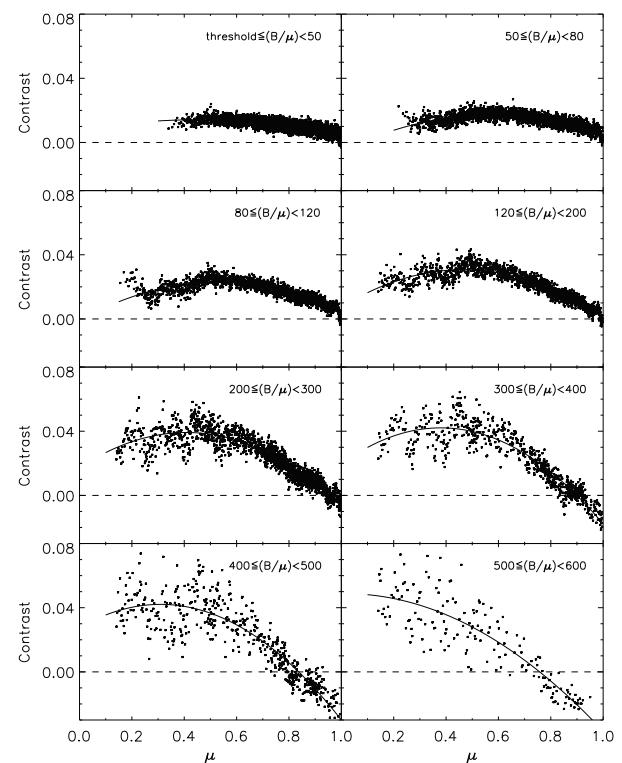


Fig. 1.: Contraste de los pequeños elementos magnéticos en función de $\mu = \cos \theta$ (θ es el ángulo heliocéntrico) para ocho intervalos de campo magnético que abarcان desde el retículo (panel superior izquierdo) hasta las fáculas (panel inferior derecho). Las curvas representan ajustes cuadráticos. $\mu = 1$ representa el centro del disco y $\mu = 0$ el limbo.

del oscurecimiento hacia el limbo con la distancia. Así mismo, se ha desarrollado un algoritmo de identificación de las pequeñas estructuras magnéticas presentes en la superficie solar.

Analizando las variaciones producidas por los pequeños elementos magnéticos que pueblan la fotosfera solar se ha concluido que:

- las fáculas y el retículo magnético presentan variaciones centro-limbo del contraste muy diferentes (véase la Figura), y por tanto presentan distintas contribuciones a la variabilidad; en consecuencia, ambas contribuciones deben ser tenidas en cuenta por separado por los modelos de reproducción de las variaciones a largo plazo.
- los contrastes de estos elementos no varían con el ciclo solar, lo cual sugiere que las propiedades de los tubos de flujo subyacentes no varían con el tiempo.
- el retículo magnético presenta contrastes positivos en todo el disco solar y ha resultado ser la población dominante a lo largo del ciclo solar 23, lo cual implica que su contribución a las variaciones de la irradiancia solar a largo plazo es significativa y debe ser tenida en cuenta.

Poblaciones estelares en galaxias con formación estelar activa en el universo local

Pablo G. Pérez-González pgperez@as.arizona.edu

Director/es: Jaime Zamorano y Jesús Gallego

Centro: Universidad Complutense de Madrid

Lectura: 23 de junio de 2003

Una de los temas más importantes de la investigación en Astrofísica es el estudio de cómo se formaron las unidades estructurales básicas del Universo, las galaxias, y cómo éstas han evolucionado a través del tiempo hasta llegar a formar los objetos que vemos a nuestro alrededor: galaxias espirales, elípticas, etc. El estudio de la evolución de las galaxias tiene como pilar principal la caracterización de los procesos de formación estelar. Este hecho, unido a que muchos de los objetos que se detectan a grandes distancias cosmológicas son galaxias con una formación estelar muy intensa, sugiere que la caracterización de galaxias con formación estelar activa (tanto cercanas como lejanas) es una de las claves para entender cómo se forman y evolucionan las estructuras en el Universo.

En el Universo Local, la formación estelar activa es un fenómeno poco frecuente en las galaxias “normales”, existiendo un gran número de sistemas muy masivos, como galaxias elípticas o espirales de gran diseño, que han formado una gran cantidad de estrellas en el pasado y que pueden haber agotado todo el gas que tenían, viendo actualmente en un estado relajado o quiescente. Sin embargo, también existen ejemplos puntuales de galaxias locales con brotes intensos, incluso muy violentos como, por ejemplo, los casos de las galaxias *starburst* o las galaxias HII. Estos objetos (y otros de naturaleza análoga, aunque no tienen que ser tan extremos) pueden mostrar características muy parecidas a las galaxias observadas a alto desplazamiento al rojo.

Frente al caso de las galaxias a $z \gg 0$, la observación de objetos cercanos cuenta con la ventaja de que podemos obtener datos de mayor calidad, en lo que se refiere a aspectos como la profundidad o la resolución espacial, para un mayor número de galaxias y con unos requerimientos de tiempo de observación y de tamaño de telescopio razonables. El estudio detallado de estas galaxias cercanas puede conllevar un gran avance en el conocimiento acerca de los procesos que regulan la formación estelar y, por extensión, acerca de la formación y evolución de las galaxias a lo largo de la vida del Universo.

El trabajo de tesis doctoral descrito en esta reseña¹ aborda el estudio detallado de una muestra estadísticamente representativa de galaxias con formación estelar activa en el Universo Local, la conocida como mues-

tra de galaxias con líneas de emisión de la Universidad Complutense de Madrid (UCM). Estas galaxias fueron seleccionadas por medio de una técnica de prisma-objetivo que sirve para detectar objetos con un exceso de emisión, en nuestro caso el correspondiente a la línea de emisión nebulosa H α , comúnmente usada como trazador de la formación estelar. La muestra UCM está constituida por 191 galaxias, todas ellas con una formación estelar más intensa de lo que es típico para una galaxia espiral quiescente.

En este trabajo de tesis se ha compilado un extenso conjunto de datos multibanda, tanto espectroscópicos como fotométricos, abarcando desde el óptico hasta el infrarrojo. El análisis de estos datos se ha centrado en la caracterización de la morfología de los objetos, en la comparación de las propiedades globales de estas galaxias con las de otras muestras a distintos desplazamientos al rojo y, especialmente, en el estudio del contenido estelar de los objetos de la Exploración UCM (o, desde otro punto de vista, en la caracterización de su historia de la formación estelar). En este sentido, se prestó especial interés a las poblaciones integrantes de los brotes de formación estelar recientes, que son característicos de nuestros objetos. Asimismo, se ha desarrollado (y probado con los datos de las galaxias UCM) un potente paquete de software que incluye una técnica para la síntesis de poblaciones estelares en galaxias con formación estelar (que también es capaz de estimar de manera consistente y robusta parámetros de gran interés en el estudio de la evolución de galaxias como la masa estelar), y una técnica para calcular funciones de luminosidad y masa. Estas técnicas son fácilmente extrapolables para el uso con otras muestras de galaxias a distintos desplazamientos al rojo.

Los principales resultados en este trabajo de tesis doctoral apuntan a que el conjunto de galaxias con formación estelar activa en el Universo Local está dominado por objetos de características (como, por ejemplo, la masa estelar o la tasa de formación estelar por unidad de masa estelar) intermedias entre las espirales normales quiescentes de gran diseño y galaxias completamente dominadas por la formación estelar reciente (por ejemplo, galaxias enanas HII). Las galaxias UCM serían galaxias espirales normales de tipos de Hubble intermedio-tardío que habrían experimentado hace aproximadamente 5 millones de años un brote de formación estelar de metalicidad subsolar e involucrando un 5% de la masa estelar total de la galaxia. Una galaxia UCM típica tendría una masa estelar de 10^{10} masas solares, es decir, un factor 7-10 menos que una galaxia espiral estándar en el Universo Local. Finalmente, en esta tesis hemos estimado que un $13 \pm 3\%$ de la densidad total de masa bariónica del Universo Local se encuentra en las galaxias con formación estelar activa.

¹El texto original se puede encontrar en
<http://t-rex.fis.ucm.es/Publications/tesis.html>

Estudio Interferométrico de las Anisotropías de la Radiación Cósmica de Microondas

José Alberto Rubiño Martín
 jalberto@mpa-garching.mpg.de

Director/es: Rafael Rebolo y Carlos M. Gutiérrez de la Cruz

Centro: Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC)

Lectura: 25 de noviembre de 2002

Esta tesis está dedicada al estudio de las anisotropías de la Radiación Cósmica de Microondas (RCM) en escalas angulares intermedias, entre 2° y $30'$. Para ello, se usan dos experimentos interferométricos situados en el Observatorio del Teide²: el interferómetro *JB-IAC*, y el *Very Small Array* (VSA). Ambos instrumentos operan a una frecuencia próxima a los 30 GHz.

Para ambos experimentos, se han estudiado y determinado las estrategias observacionales posteriormente utilizadas. Además, se ha realizado la calibración de los mismos, y se han desarrollado (en su totalidad para el JBO-IAC, y en parte para el VSA) los códigos de procesado y las herramientas de análisis de los datos. Con el JB-IAC, se han elaborado y analizado dos mapas. El primero de ellos cubre unos 900 grados cuadrados de cielo, y tiene una resolución de 2° , mientras que el segundo cubre unos 300 grados cuadrados, y con 1° de resolución. Con el VSA, se han observado ocho regiones durante el período Octubre 2000-Octubre 2001, que cubren en total unos 101 grados cuadrados, y que tienen una resolución angular entre 2° y $30'$. De estas ocho regiones, cinco (unos 72 grados cuadrados) han sido analizadas para esta tesis.

A los mapas finales se les han sustraído todas las radiofuentes con un flujo superior a 2 Jy para JB-IAC, y 80 mJy para VSA, valores que garantizan que la contribución residual de fuentes es muy inferior a la señal de RCM. Además, se ha realizado un estudio de la emisión difusa de la galaxia a 30 GHz (síncrotrón, libre-libre y emisiones térmica y rotacional del polvo), así como de la incidencia de cúmulos de galaxias a través del efecto Sunyaev-Zel'dovich en los mapas, concluyéndose que las estructuras observadas son debidas principalmente a anisotropías primarias de la RCM.

Finalmente, se ha obtenido el espectro de potencias de la RCM para cada uno de los instrumentos. Del JB-IAC se tienen dos medidas, en los multipoles angulares $\ell \approx 100$ y $\ell \approx 200$, respectivamente, mientras que las medidas del VSA cubren el rango entre $\ell \approx 150$ y $\ell \approx 900$. Ambos experimentos obtienen valores consistentes en $\ell \approx 200$, mostrando una clara detección del primer pico acústico. El espectro de potencias del VSA también proporciona una detección del segundo

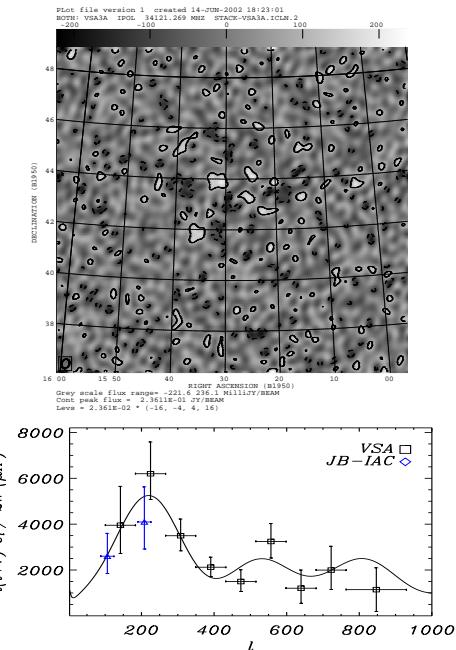


Fig. 1.: Arriba: Uno de los mapas del VSA analizados en esta tesis, correspondiente a unas 60 horas efectivas de observación. Abajo: Espectro de potencias final de los dos instrumentos, y el modelo cosmológico de WMAP.

pico, en $\ell \sim 550$, y mide potencia hasta $\ell \approx 900$. Estas medidas se han usado para obtener restricciones sobre los parámetros cosmológicos más relevantes. Para ello, se ha desarrollado un código que realiza un análisis de máxima verosimilitud de los datos en un espacio de 7 parámetros. Combinando los datos de esta tesis con los obtenidos por el satélite COBE, y usando un prior débil sobre el valor de la constante de Hubble (H_0), se encuentran los valores

$$\Omega_b h^2 = 0.028^{+0.008}_{-0.008}, \quad n_s = 1.03^{+0.11}_{-0.08}, \\ \Omega_{tot} = 1.02^{+0.11}_{-0.12}, \quad \Omega_{cdm} h^2 = 0.13^{+0.08}_{-0.05},$$

donde las barras de error representan el nivel de confianza del 68%. Tanto el espectro de potencias como las restricciones obtenidas son consistentes con los valores de otros experimentos recientes (Boomerang, MAXIMA, DASI y CBI), a pesar de utilizar instrumentos que operan a distintas frecuencias, con distintas técnicas, en distintas regiones del cielo, y sujetos a diferentes efectos sistemáticos. Combinando todos ellos, y usando el mismo prior en H_0 , se obtiene

$$\Omega_b h^2 = 0.023^{+0.002}_{-0.002}, \quad n_s = 1.04^{+0.03}_{-0.03}, \\ \Omega_{tot} = 1.03^{+0.04}_{-0.04}, \quad \Omega_{cdm} h^2 = 0.12^{+0.02}_{-0.02}.$$

Si además se usa un prior fuerte sobre H_0 (obtenido con el telescopio espacial HST), se encuentra que la RCM, por sí sola, es capaz de romper la llamada degeneración geométrica, obteniéndose

$$\Omega_m = 0.30^{+0.06}_{-0.06}, \quad \Omega_\Lambda = 0.71^{+0.06}_{-0.05},$$

valores que son consistentes con (pero independientes de) los obtenidos usando los datos de supernovas Ia.

²<http://www.iac.es/project/cmb>

The structure and dynamics of clusters and the H_I content of spiral galaxies

Teresa Sanchis Estruch tsanchis@am.ub.es

Director/es: Eduard Salvador-Solé y José María Solanes

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

Lectura: 1 de diciembre de 2003

En esta tesis hemos estudiado la influencia de la dinámica de los cúmulos en el contenido de H_I de sus galaxias. Nos hemos centrado principalmente en el cúmulo de Virgo aprovechando la gran cantidad de datos existentes debido a su proximidad y riqueza.

La primera parte se ha dedicado a caracterizar la distribución tridimensional de galaxias espirales del cúmulo de Virgo, a partir de catálogos de galaxias con distancias Tully-Fisher (independientes del corrimiento al rojo) de la literatura. A estos datos hemos añadido medidas de deficiencia de H_I obtenidas mayormente del Catálogo General de Arecibo, mantenido por R. Giovanelli y M. P. Haynes. Los datos recopilados indican que tanto la distribución de galaxias como la de deficiencia de hidrógeno neutro presentan una gran elongación a lo largo de la línea de visión. Además, la deficiencia de H_I no decrece monótonamente al alejarnos del centro del cúmulo, tal y como indican estudios en otros cúmulos, sino que se observan tres picos claros de deficiencia de H_I: uno relacionado con el centro del cúmulo, que engloba la mayor parte de galaxias deficientes, y otros dos a distancias del centro superiores a 5 Mpc, uno en la parte anterior y otro en la parte posterior.

La presencia de galaxias en la periferia con deficiencias tan importantes como las presentes en las galaxias centrales de Virgo nos ha llevado a investigar la posibilidad de que estas galaxias periféricas hubieran atravesado el centro del cúmulo en el pasado y perdido su gas por interacciones con el denso medio intracumular (MIC). Para ello hemos utilizado un modelo dinámico que sigue el colapso y primer rebote de capas esféricas de materia. Los resultados del ajuste de los parámetros obtenidos mediante el diagrama distancia-velocidad de las galaxias que presumiblemente están cayendo por primera vez hacia el cúmulo no han permitido descartar la posibilidad de que gran parte de las galaxias deficientes observadas hubieran atravesado ya el centro de Virgo, dados valores razonables de los parámetros del modelo (edad del universo de 13.5 Gyr, distancia al centro de 21 Mpc y masa del cúmulo de $2.8 \times 10^{15} M_{\odot}$).

Pese a que el modelo dinámico desarrollado nos ha permitido explicar la posición en el diagrama distancia-velocidad de la mayoría de las galaxias espirales de Virgo, hemos hallado también un número no despreciable de galaxias que no encajan en las predicciones del modelo. Para tratar de explicar la presencia de estas ga-

laxias y probar a la vez la validez del modelo dinámico hemos utilizado simulaciones de *N*-cuerpos de halos de materia oscura y estimaciones analíticas de la distancia máxima que un objeto puede alcanzar después de haber atravesado el centro del cúmulo. Ambos métodos indican que dicha distancia máxima es inferior a unas 2.5 veces el radio del virial del cúmulo. Este resultado está de acuerdo con el hecho que en otros cúmulos la presencia de galaxias deficientes se extiende hasta ~ 2 radios del virial del centro, mientras que la extensión del MIC revelada por los mapas de rayos X es mucho menor. Por otro lado, para el caso de Virgo implicaría que las galaxias a más de 5 Mpc del centro no pueden haberlo atravesado. Si además situamos el centro del cúmulo a ~ 17 Mpc, tal y como sugieren las galaxias elípticas, resulta difícil explicar la deficiencia de las galaxias en la parte posterior del mismo a partir del barrido por presión cinética del MIC, a no ser que existan errores importantes en la estimación de las distancias.

Los halos de materia oscura de las simulaciones se han usado para poner de relevancia el papel que los errores de distancia juegan en el análisis del campo de velocidades en las zonas externas de los cúmulos. De nuestro análisis se desprende que las estimaciones actuales de distancia podrían presentar globalmente errores superiores al 20%, los cuales pueden afectar significativamente los ajustes de los parámetros de los modelos dinámicos de caída, produciendo importantes errores en la distancia al centro y especialmente en la masa estimada de los cúmulos. Sin embargo, hemos mostrado también que si se tienen en cuenta correctamente dichos errores, los modelos de caída pueden resultar muy útiles para estimar masas y distancias a cúmulos de galaxias.

La posibilidad de que existan grandes errores en distancia sugiere que muchas de las galaxias deficientes en la periferia de Virgo podrían encontrarse en realidad a menos de 2.5 veces el radio del virial, pudiendo haber atravesado la región central del cúmulo y haber perdido su gas neutro por presión cinética del MIC.

Después de haber analizado los efectos de la dinámica de los cúmulos en el contenido de H_I de sus zonas periféricas, nos hemos centrado en las zonas internas. Para determinar la cinemática interna, esencial en la investigación de los mecanismos causantes de la deficiencia de H_I de sus galaxias, es común utilizar el método de Jeans. Hemos utilizado las simulaciones de *N*-cuerpos para estudiar los efectos de las desviaciones de esfericidad, subestructura y movimientos de caída en la determinación de la estructura y cinemática de las regiones internas de los cúmulos de galaxias. Concluimos que en general la masa del virial, el parámetro de concentración y la anisotropía de velocidades de los cúmulos pueden ser reproducidos satisfactoriamente mediante el método de Jeans, aunque se obtienen valores de la masa del virial menores a los reales, mientras que el parámetro de concentración resulta sobreestimado y la anisotropía obtenida es más tangencial que la real.