

UNIVERSITAT DE BARCELONA

SOLEMNE INVESTIDURA DE
DOCTOR *HONORIS CAUSA*
al professor

Félix Mirabel



Discurs de presentació del professor
Josep M. Paredes

Febrer de 2004

Entitat editora
UNIVERSITAT DE BARCELONA

Rector
JOAN TUGORES I QUES

President del Consell Social
PEDRO FONTANA

© Universitat de Barcelona
Producció: Publicacions de la Universitat de Barcelona
Disseny de la col·lecció: Cesca Simón
Impressió: Ed. Gráficas Rey
Tiratge: 300
Dipòsit legal: B-10.472-2004

Paper: Coberta: Rives Design
Interior: Estucat ecològic
Tipografia: Times
Motiu de la coberta: Edifici Històric (detall)

Direcció i administració de la publicació
UB Publicacions
Adolf Florensa, s/n
08028 Barcelona

ÍNDIX

Protocol de l'acte	5
Discurs de presentació del professor Josep M. Paredes	11
Discurs del professor Félix Mirabel	17

PROTOCOL DE L'ACTE

*Investidura del professor Félix Mirabel
com a doctor honoris causa*

1. S'entra en processó mentre la Coral de la Facultat de Medicina de la Universitat de Barcelona interpreta el cant d'entrada.
2. El rector, Dr. Joan Tugores, explica l'objectiu de la sessió acadèmica.
3. El rector dóna la paraula a la secretària general Dra. Elena Lauroba, la qual llegeix l'Acta del nomenament de doctor *honoris causa* a favor del professor Félix Mirabel.
4. El rector invita el degà de la Facultat de Física, Dr. Blai Sanahuja, i el professor padrí, Dr. Josep M. Paredes, a anar a cercar el doctorand i acompanyar-lo fins al Paranimf.
5. Intervenció de la Coral.
6. El rector dóna la benvinguda al professor Félix Mirabel, el qual s'asseu al lloc que li ha estat reservat.

7. El professor padrí llegeix el discurs en el qual presenta els mèrits del seu patrocinat.
8. El rector demana al padrí i al degà que acompanyin el doctorand a la presidència.
9. El rector pronuncia les paraules d'investidura:

«Per la Junta de Govern de la Universitat de Barcelona, a proposta de la Facultat de Física, heu estat nomenat doctor *honoris causa* en testimoniatge i reconeixença dels vostres mèrits rellevants.»

«En virtut de l'autoritat que m'ha estat conferida, us faig lliurament d'aquest títol i –com a símbol– de la birreta llorejada, antiquíssim i venerat distintiu del magisteri. Porteu-la com a corona dels vostres mereixements i estudis.»

«Rebeu l'anell que l'antiguitat tenia el costum de lliurar, en aquesta venerada cerimònia, com a emblema del privilegi de signar i segellar els dictàmens, consultes i censure escaients a la vostra ciència i professió.»

«Rebeu també aquests guants blancs, símbol de la puresa, que han de servir les vostres mans, signes, uns i altres, de la distinció de la vostra categoria.»

«Perquè us heu incorporat en aquesta Universitat, rebeu ara, en nom del seu Claustre, l'abraçada de fraternitat dels qui s'honoren i es congratulen d'ésser els vostres germans i companys.»

10. El nou doctor s'asseu entre els seus acompanyants en el lloc reservat al Claustre de Doctors.
11. El rector dóna la paraula al nou doctor Félix Mirabel, el qual és acompanyat a l'estrada pel padrí i el degà.

12. Intervenció del doctor Félix Mirabel.
13. Acabada la intervenció, el padrí i el degà esperen el doctor Félix Mirabel al peu de l'estrada i l'acompanyen al seu lloc.
14. El rector felicita el nou doctor.
15. Cant de l'himne *Gaudeamus Igitur* per tots els assistents a l'acte.

GAUDEAMUS IGITUR

*Gaudeamus igitur
iuuenes dum sumus
post iucundam iuuentutem
post molestam senectutem
nos habebit humus (bis).*

*Vbi sunt qui ante nos
in mundo fuere
adeas ad inferos
transeas ad superos
hos si uis uidere (bis).*

*Viuat Academia
uiuant professores
uiuant membrum quodlibet
uiuant membra quaelibet
semper sint in flore (bis).*

16. El rector aixeca la sessió.

DISCURS DE PRESENTACIÓ
DEL PROFESSOR
JOSEP MARIA PAREDES

Magnífic i Excel·lentíssim
Sr. Rector de la
Universitat de Barcelona,
Doctors i Doctors,
Senyores i Senyors,

El poder presentar avui als membres d'aquest Claustre la proposta de doctor *honoris causa* del Dr. I. Félix Mirabel constitueix per a mi un gran honor com a científic i una gran satisfacció personal. Abans de parlar dels seus mèrits científics, que són molts i altament reconeguts per la comunitat científica, voldria assenyalar també la seva gran vàlua com a persona. Encara que no sigui una situació excepcional, a vegades costa trobar persones brillants, amb un gran talent, que fan contribucions científiques rellevants i de gran transcendència, i que a la vegada mantinguin envers els seus col·legues una relació d'igual a igual, sense cap aire de prepotència. El tarannà del Dr. Mirabel encaixa perfectament en aquest esquema. La seva senzillesa i naturalitat en el tracte, el fet de no marcar distàncies amb els seus interlocutors, la seva accessibilitat i la seva capacitat de treball, així com l'excepcional vàlua científica, fa que el fet de col·laborar amb ell sigui a la vegada un plaer i una font d'aprenentatge. Aviat farà vint anys que ens vam conèixer personalment i vam establir les bases de la que seria una col·laboració científica duradora, molt profitosa des del punt de vista científic i molt enriquidora des del punt de vista personal.

El Dr. Mirabel va néixer el 1944 a l'Uruguai, on va cursar els seus estudis primaris i secundaris. A l'Argentina va fer els seus estudis universitaris i va obtenir la llicenciatura en Filosofia per la Universidad de Buenos Aires; posteriorment, l'any 1974, va obtenir el doctorat en Astronomia per la Universidad de La Plata. A causa dels esdeveniments polítics de domini públic, el març de 1976 va haver d'abandonar el país amb la seva família, per anar a treballar a la Gran Bretanya, després als Estats Units i finalment a França. Naturalitzat argentí i francès, actualment és director d'Investigacions en la Comissió d'Energia Atòmica de França, president del Consell Científic i Tecnològic del Servei d'Astrofísica de dita institució, i

investigador principal de la carrera d'Investigador Científic del Consell Nacional d'Investigacions Científiques i Tècniques de la República Argentina.

Al llarg de la seva carrera científica el Dr. Mirabel ha rebut diverses distincions, entre les quals es poden citar el Premi Nacional de Ciències de la Comissió d'Energia Atòmica de França, i el Premi "Bruno Rossi" de la Societat Americana d'Astronomia. Ha publicat més de 350 articles científics i ha impartit més de 160 conferències sobre els seus treballs d'investigació. Va ser convidat a publicar dos articles de revisió (1996 i 1999) sobre àrees d'investigació diferents (Galàxies infraroges i Microquàsars) en la prestigiosa col·lecció del *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*. Segons el "Science Citation Index", en els darrers set anys els seus articles científics han rebut més de 2.500 citacions i en tota la seva carrera més de 4.500 citacions en la literatura especialitzada. Ha format part de diversos comitès de supervisió i d'avaluació científica. Entre d'altres, durant tres anys va ser membre del Comitè d'Usuaris del Telescopi Espacial Hubble, i actualment és representant de la comunitat internacional en els Observatoris de Canàries, i membre del Comitè d'assignació de temps de l'Observatori Europeu Austral (ESO).

El Dr. Mirabel és un investigador científic particularment imaginatiu, de reconegut prestigi internacional, que ha realitzat descobriments de gran rellevància en l'astrofísica contemporània. Les contribucions que ha aportat al coneixement científic es poden emmarcar en el context revolucionari que s'ha produït en astrofísica des que s'ha pogut observar el cel en tot l'espectre electromagnètic, des de les ones de ràdio fins als raigs gamma. Gràcies al treball de síntesi d'observacions astronòmiques realitzades en diferents regions de l'espectre electromagnètic, el Dr. Mirabel ha estat protagonista de contribucions importants. En l'àrea de l'astrofísica d'altres energies va descobrir els *microquàsars*, mentre que en l'àrea de l'astronomia extragalàctica va participar activament en el descobriment de dos nous tipus de galàxies: les *galàxies infraroges ultralluminoses* i les *galàxies nanes de marea*. Les galàxies infraroges ultralluminoses són reconegudes com una fase fonamental en el procés de formació dels quàsars i les galàxies més massives de l'Univers. Les galàxies nanes de marea són galàxies en procés de formació que han despertat un gran interès perquè el seu estudi permet contrastar observacionalment les teories sobre la naturalesa i la distribució de la matèria fosca a l'Univers.

Abans d'aquests descobriments, el Dr. Mirabel havia realitzat contribucions en altres àrees de l'astronomia, com són l'estructura galàctica i l'astrofísica del medi interestel·lar, mencionant a tall d'exemple els seus estudis sobre l'impacte de núvols d'alta velocitat sobre la via làctia i sobre fluxos bipolars en regions de formació estel·lar. Els descobriments dels *microquàsars* i de les *galàxies infraroges ultralluminoses* han obert nous horitzons d'investigació, raó per la que han estat objecte d'amplia difusió en la premsa a nivell internacional.

Els primers indicis clars sobre l'existència dels *microquàsars* van sorgir l'any 1990, quan es va posar en òrbita el telescopi SIGMA de màscara codificada per a raigs gamma. Les primeres observacions del centre de la nostra galàxia amb aquest telescopi van permetre la detecció d'una font compacta d'anihilació de matèria-antimatèria. Aquest objecte fou batejat per l'editorial de la revista americana *Physics Today* amb el nom de "*gran anihilador*". Les observacions en ones de ràdio, fetes per Mirabel i Rodríguez utilitzant l'interferòmetre nord-americà "Very Large Array", van revelar l'any 1992 que el *gran anihilador* produeix jets bipolars que tenen una extensió total de sis anys llum. Aquesta estructura observada en ones de ràdio és deguda a electrons ejectats a velocitats properes a la de la llum des de les rodalies d'un forat negre. Com que aquest objecte semblava una rèplica en miniatura de les estructures observades en els quàsars, en la seva primera publicació a la revista *Nature*, Mirabel i Rodríguez van proposar que el *gran anihilador* es podia considerar com un autèntic "*microquàsar*". Des d'aleshores s'han descobert altres candidats a forats negres de massa estel·lar, que produeixen ejeccions de matèria a velocitats properes a la de la llum. Aquests objectes associen dos aspectes de la física relativista: els *forats negres* d'origen estel·lar, identificats per la radiació X i gamma que provoquen, i els *jets de partícules relativistes*, posats en evidència per la seva emissió en la banda de ràdio. Més enllà de constituir una sorprenent curiositat de la natura, aquest descobriment ha posat a disposició dels astrofísics una sèrie de "laboratoris galàctics" per poder comprendre millor la física en els camps gravitatoris més intensos, així com la gènesi dels jets relativistes observats des de fa més de 30 anys en els quàsars i nuclis de galàxies actives localitzades a grans distàncies còsmiques. En els darrers anys s'havien observat en els quàsars desplaçaments de matèria amb velocitats *aparents* majors que la de la llum. Ara bé, les distàncies extremes a què es troben aquests objectes introduïen incerteses en la interpretació física i cosmològica dels fenòmens observats. Les observacions d'un microquàsar, una vegada

més realitzades en col·laboració entre I. Félix Mirabel i Luis F. Rodríguez, van conduir l'any 1994 al descobriment de la primera font *superlumínica* dins la Via Làctia. Aquest descobriment ha permès resoldre les ambigüitats en la interpretació física del fenomen superlumínic observat en els quàsars, eliminar arguments que havien estat esgrimits contra la teoria del "Big Bang", i proposar per primera vegada en astronomia un mètode per a la determinació de distàncies utilitzant la teoria de la relativitat especial.

Les descobertes dels microquàsars i de la primera font superlumínica en la galàxia van ser anunciades a la portada de la revista *Nature* el 1992 i el 1994, respectivament. El descobriment dels microquàsars ha estat de gran interès per a la física i l'astronomia modernes, i prova d'això són els quatre congressos internacionals sobre aquest tipus d'objectes celebrats en els darrers quatre anys. Ha estat en aquesta àrea d'investigació on s'han desenvolupat múltiples col·laboracions entre el grup de la Universitat de Barcelona i el Dr. Mirabel. D'ençà, s'han publicat més de vint treballs científics conjuntament, el Dr. Mirabel ha aollit per fer un postdoctorat diversos membres de la Universitat de Barcelona en el seu centre de treball i s'ha participat en tribunals de tesis doctorals, tant a França com aquí. Aquesta col·laboració ha anat en augment els darrers anys i tindrà una continuació en els propers anys.

Actualment el Dr. Mirabel continua liderant investigacions de gran impacte que han permès determinar per primera vegada la velocitat espacial d'un forat negre que es troba a 6.000 anys llum del sistema solar. S'ha observat que aquest forat negre es mou a gran velocitat i en una òrbita similar a la dels objectes més antics de la galàxia. Els resultats d'aquesta investigació van ser publicats el setembre de 2001 a la revista *Nature*, i van ser motiu de comunicats de premsa del Conicet/Argentina, l'Institut del Telescopi Espacial Hubble (HST) i de l'Observatori Nacional de Radioastronomia dels Estats Units (NRAO). A més a més, ha aconseguit recentment determinar les òrbites galàctiques de quatre sistemes binaris de radiació X. Aquests resultats constitueixen per a la propera dècada l'obertura d'un nou horitzó en astrofísica d'altres energies, que permetrà comprendre millor l'origen i el procés de formació dels forats negres de massa estel·lar.

Finalment, i ja per acabar, voldria agrair a la meua universitat, la Universitat de Barcelona, el reconeixement atorgat al Dr. I. Félix Mirabel per la seva tasca científica, ja que d'alguna manera també és un reconeixement als importants avenços realitzats en Astrofísica durant les darreres dècades.

DISCURS DEL PROFESSOR
FÉLIX MIRABEL

Excelentísimo Sr. Rector de la Universidad de Barcelona,
Doctoras y Doctores,
Señoras y Señores,

Para mí es un gran honor recibir este doctorado de la Universidad de Barcelona. Esta casa de estudios ha estado estrechamente vinculada por más de 500 años a la historia de Barcelona, Cataluña y España. Actualmente es reconocida como una de las más importantes instituciones europeas en la formación de las nuevas generaciones para los desafíos del presente y del futuro. En América Hispana tenemos un especial afecto por vuestra universidad, ya que fue la cuna de ilustres pensadores, artistas y científicos que en el pasado, y en particular en las décadas de los años 30 y 40, se vieron obligados a emigrar, contribuyendo en forma sustancial al desarrollo de la cultura y de las universidades del nuevo continente. Sería muy extenso mencionar aquellas personalidades, pero por el especial afecto que guardo en mi memoria, en este momento quisiera recordar como caso ejemplar de inspiración al que fuera mi amigo en la Universidad de Puerto Rico, el Profesor de física Dr. Jesús Tharrats, quien nació en Figueras, se formó en la Universidad de Barcelona y luego en Copenhague con Niels Bohr, y que en su juventud fuera amigo y consultor científico de Salvador Dalí, y más tarde en Puerto Rico de Pau Casals.

Hoy es para mí una gran distinción recibir el mismo doctorado honorario que el Dr. Evry Schatzman, fundador de la astrofísica teórica en Francia, con quien trabajó en París el Profesor Ramon Canal, antes de volver a Barcelona para introducir en España la astrofísica moderna, y en particular, la astrofísica de altas energías. Continuando en este área de investigación, el Profesor Josep Maria Paredes se ha destacado por sus trabajos sobre fuentes cósmicas de alta energía, por los cuales recibió el premio Ciudad de Barcelona 2000 de investigación científica. Para mí ha sido y es un gran placer trabajar con investigadores doctorados en esta casa de estudios, tales como el Dr. Josep Martí (actualmente profesor en la Universidad de Jaén) y el Dr. Marc Ribó (actualmente becario Marie Curie). Más

allá de la excelente formación académica, los investigadores jóvenes formados en la Universidad de Barcelona siempre me han impresionado por su motivación profunda, carácter industrioso, y persistencia por revelar los misterios del universo.

La colaboración entre investigadores de la Universidad de Barcelona, del Consejo de Investigaciones Científicas y Técnicas de Argentina, de la Universidad Autónoma de México, de la Universidad de Río Grande del Sur en Brasil y de la Comisión de Energía Atómica de Francia ha sido particularmente productiva. Esta colaboración ha jugado un rol preponderante en astrofísica a nivel internacional por el descubrimiento y posterior estudio de los objetos cósmicos que hemos denominado “microcuásares”.

MICROCUÁSARES

Los microcuásares son sistemas estelares binarios en que el cadáver de una estrella que ha colapsado para formar un objeto oscuro y compacto (como es una estrella de neutrones o un agujero negro) se encuentra ligado gravitacionalmente a una estrella que produce luz, con la que realiza un movimiento orbital cerrado. En esta danza cósmica de una estrella muerta con una estrella viva, la primera succiona materia de la segunda, produciendo radiación y partículas de muy alta energía (Figura 1). Estos sistemas binarios de estrellas en nuestra galaxia se conocen bajo el nombre de “microcuásares” porque son versiones en miniatura de los cuásares (del inglés “quasi-stellar-radio-source”), que son los núcleos de galaxias muy lejanas dotadas de agujeros negros supermasivos, capaces de producir en una región tan compacta como el sistema solar la luminosidad de 100 galaxias como la Vía Láctea. En la actualidad, el estudio de los microcuásares es una de las motivaciones científicas principales de los observatorios espaciales que exploran el universo en rayos X y gamma.

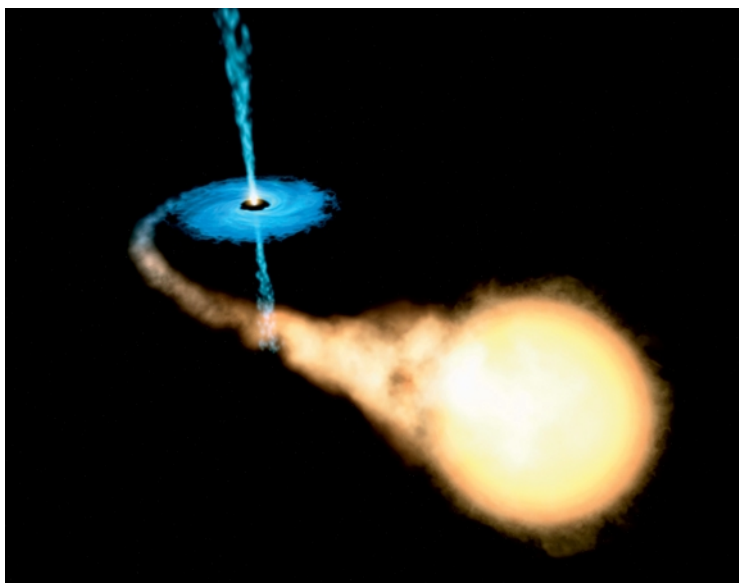


Figura 1: En nuestra galaxia existen sistemas estelares binarios en que una estrella ordinaria gravita alrededor de un agujero negro que aspira las capas exteriores de su atmósfera. Al caer hacia el astro denso, la materia se calienta emitiendo grandes cantidades de energía en rayos X y gamma. El disco de acreción que emite esta radiación también produce dos chorros (jets) de plasma relativista a lo largo del eje de rotación del agujero negro y disco de acreción. Los mecanismos físicos de la acreción y eyección de materia son similares a los que están en juego en los cuásares, aunque en escalas millones de veces más pequeñas. Estas versiones en miniatura de los cuásares son conocidas bajo el nombre de “microcuásares”.

(crédito: <http://www.hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2002/30/>)

A pesar de las diferencias enormes en masa, y en escalas de longitud y de tiempo, los procesos físicos en los microcuásares son análogos a los cuásares. Por ello, el estudio de los microcuásares en nuestra galaxia ha permitido comprender mejor fenómenos que ocurren a grandes distancias en los cuásares y núcleos activos de galaxias. Además, recientemente se ha comenzado a obtener evidencias de que los microcuásares están relacionados con otros dos tipos de objetos en Astrofísica de Altas Energías: las fuentes no identificadas de radiación gamma en nuestra galaxia, y los destellos de radiación gamma (“Gamma-Ray-Bursts”), que son las explosiones más energéticas que se conocen en el universo, después del “Big Bang” que le diera origen.

Objetos gravitantes, compactos y “oscuros” fueron concebidos en el contexto de la física Newtoniana por John Michell y Pierre-Simon Laplace hacia fines del siglo XVIII. En la primera mitad del siglo XX, como consecuencia necesaria de la teoría de la relatividad general de Einstein, objetos compactos y “oscuros” vuelven a ser concebidos como “estrellas de neutrones” y “agujeros negros”. Estos objetos relativistas serán descubiertos como “binarias X” en la década de los años 1960. Estos objetos compactos cuando están asociados a otras estrellas, son activados por la acreción de gas muy caliente de esas estrellas compañeras, el cual emite rayos X y gamma. Por el desarrollo pionero de la Astronomía X desde el espacio que condujo al descubrimiento de la primera “binaria X”, Riccardo Giacconi¹ recibió el premio Nobel de Física en el año 2002. Bruce Margon y colaboradores² encontraron en el año 1979 que una binaria X conocida bajo el nombre de SS 433 era capaz de producir chorros (jets) de partículas. Sin embargo, por varios años se creyó que SS 433 era un objeto muy peculiar y único en la Vía Láctea, y su conexión con los cuásares parecía remota. Los chorros de materia de este objeto se mueven a solamente el 26% de la velocidad de la luz, mientras que los chorros de materia en los cuásares se mueven a velocidades cercanas a la velocidad de la luz.

En la década del 90 se comienza a obtener la evidencia de que la asociación entre chorros (jets) relativistas y binarias X es universal. A comienzos de 1990 se colocó en órbita el satélite franco-ruso Granat, llevando a bordo un telescopio construido en Francia que era capaz de producir imágenes en rayos X y gamma (en el rango de 1,000 a 1 millón de electrón-voltios). Como la emisión térmica con energías mayores que 50,000 electrón-voltios es característica de agujeros negros estelares activados por la acreción³, con este telescopio se logró detectar en la Vía Láctea numerosos agujeros negros. Además, gracias a la óptica de máscara codificada para obtener imágenes en rayos gamma, por primera vez fue posible determinar la posición en el cielo de fuentes de rayos gamma con una precisión del minuto de arco. Esto podría parecer

1. Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. & Rossi, B. 1962, *Physical Review Letters* 9, 439.

2. Margon, B., Grandi, S.A., Stone, R.P. & Ford, H.C. 1979, *Astrophysical Journal Letters* 223, L63.

3. Shakura, N.I. & Sunyaev, R.A. 1976, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 175, 613.

una precisión pobre para los astrónomos que usan técnicas tradicionales, pero en astrofísica de altas energías representó una mejora en un factor de por lo menos un orden de magnitud, lo que permitió comenzar con éxito la identificación sistemática de las fuentes compactas de rayos gamma en longitudes de onda de radio, infrarrojo y luz visible.

Granat fue puesto en órbita la misma semana en que, proveniente del Instituto de Tecnología de California, llegué a la Comisión de Energía Atómica de Francia con el fin de preparar proyectos de investigación sobre galaxias luminosas en el infrarrojo con el Observatorio Espacial Infrarrojo de la Agencia Espacial Europea. Entonces comencé a saber de mis colegas franceses Jacques Paul y Bertrand Cordier sobre unas fuentes de rayos X y gamma que Granat lograba localizar en el cielo con una precisión sin precedentes. Para desentrañar la naturaleza de esas binarias X era necesario conocer con una precisión aún mayor (del orden de décimas de segundo de arco) la posición de estas fuentes de alta energía. Fuentes capaces de producir fotones de alta energía también deben producir partículas de alta energía, que al ser aceleradas en campos magnéticos producen radiación sincrotrón. Entonces, en colaboración con el Dr. Luis Felipe Rodríguez, uno de los más destacados especialistas en técnicas de interferometría que en aquel momento era director del Instituto de Astronomía de la Universidad Autónoma de México, propusimos realizar una búsqueda sistemática de emisión sincrotrón de binarias X con la Gran Red de Radiotelescopios del Observatorio Nacional de Radioastronomía de los Estados Unidos (Very Large Array, VLA).

Utilizando el VLA, en 1992 logramos detectar con una precisión de décimas de segundo de arco la posición en el cielo del objeto conocido bajo el nombre de 1E1740.7-2942 (las cifras corresponden a las coordenadas en el sistema ecuatorial). El satélite Granat había identificado este objeto como la fuente más intensa de radiación X y gamma en la región del centro galáctico. Además, la luminosidad, variabilidad y espectro en rayos X eran consistentes con las de un disco de acreción gravitando alrededor de un agujero negro de masa estelar. El resultado más sorprendente que obtuvimos con el VLA fue que de la contraparte compacta en ondas de radio emanaban chorros bipolares altamente colimados. Estos chorros de plasma magnetizado tenían una gran similitud morfológica con los chorros que se observan en cuásares

y radiogalaxias. En la publicación de estos resultados⁴ propusimos la palabra “microcuásar” para referir a esta nueva clase de fuentes de rayos X con chorros relativistas en nuestra galaxia. Este término apareció en la tapa de la revista británica *Nature* (Figura 2), lo que en aquel momento provocó intensos debates y cuestionamientos. Actualmente, este término ha sido universalmente aceptado y es corrientemente utilizado en las publicaciones científicas. La actitud poética en ciencia consiste en la búsqueda de palabras que sirvan para estimular la imaginación y abrir nuevos horizontes de investigación.

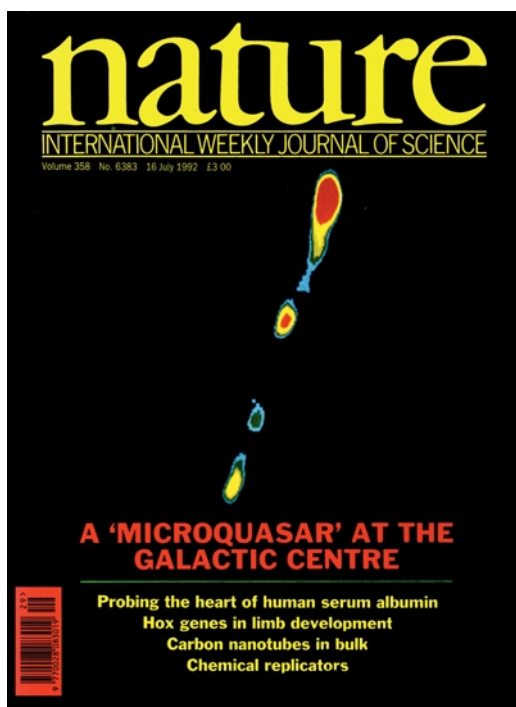


Figura 2: La revista británica *Nature* anuncia el 16 de julio de 1992 el descubrimiento de un microcuásar en la región del centro galáctico⁴. La imagen en la tapa es de la emisión sincrotrón en ondas de radio producida por chorros de partículas relativistas eyectadas desde algunas decenas de kilómetros hasta años luz de distancia del agujero negro.

4. Mirabel, I.F., Rodríguez, L.F., Cordier, B., Paul, J. & Lebrun, F. 1992, *Nature* 358, 215.

Hasta la fecha se han descubierto en nuestra galaxia unos 20 microcuásares. Si la hipótesis de la analogía entre microcuásares y cuásares es correcta, en algún microcuásar se debería poder observar movimientos superlumínicos aparentes. Hasta aquel momento, los movimientos superlumínicos aparentes habían sido observados solamente en las cercanías de los agujeros negros supermasivos que albergan los cuásares. La ilusión de movimientos superlumínicos se debe a la aberración relativista de la radiación producida por partículas que se desplazan a velocidades cercanas a la velocidad de la luz. En 1E 1740.7-2942 no los habíamos podido discernir, ya que en esta fuente persistente de rayos gamma el flujo de partículas es semi-continuo. La única posibilidad de saber si existen movimientos superlumínicos aparentes en los microcuásares era por la observación de una eyección discreta y muy intensa en una binaria X. Esto nos permitiría seguir el desplazamiento en el firmamento de nubes de plasma discretas. Justamente, en 1992 Alberto Castro-Tirado, del Instituto de Astrofísica de Andalucía descubre⁵ con el satélite Granat una nueva fuente de rayos X con tales características denominada GRS 1915+105. Entonces, con el Dr. Rodríguez comenzamos con el VLA una campaña de observación sistemática de este nuevo objeto en ondas de radio. En colaboración con los jóvenes franceses Pierre-Alain Duc (CNRS-Francia) y Sylvain Chaty (Universidad de París) realizamos el seguimiento de esta fuente en longitudes de ondas infrarrojas con telescopios del Observatorio Europeo del Sur y a 4.200 metros en Mauna Kea, Hawaii.

Desde el comienzo GRS 1915+105 manifestó propiedades inusuales. Las observaciones en ondas ópticas e infrarrojas mostraron que esta binaria X se encontraba muy absorbida por el polvo interestelar de la Vía Láctea, y que la contraparte infrarroja manifestaba variaciones rápidas en función del tiempo. Además, en ondas de radio parecía cambiar de posición en el cielo de tal forma que al principio no sabíamos si estos cambios de posición eran debidos a la reflexión o refracción de la radiación en un medio circumestelar inhomogéneo, o más bien debidos al movimiento a muy altas velocidades de chorros de materia. Por dos años nos mantuvimos al acecho de esta binaria X sin comprender cabalmente su comportamiento. Pero en marzo de 1994, GRS 1915+105 produjo

5. Castro-Tirado, A.J., et al. 1994. *Astrophysical Journal Supp.* Ser. 92, 469.

una violenta erupción en rayos X y gamma que fue acompañada por una eyección bipolar de nubes de plasma inusualmente brillantes, cuyo desplazamiento en el cielo pudimos seguir durante 2 meses. A partir de la cantidad de hidrógeno atómico impreso en la fuerte radiación pudimos inferir que la binaria X se encuentra a unos 40.000 años luz de la Tierra. Esto nos permitió saber que el movimiento en el cielo de las nubes eyectadas implicaba velocidades aparentes superiores a la velocidad de la luz.

El descubrimiento de estos movimientos superlumínicos aparentes en la Vía Láctea fue nuevamente anunciado⁶ en la revista *Nature* (Figura 3). Esto constituyó una confirmación rotunda de la hipótesis que habíamos propuesto dos años antes sobre la analogía entre los microcuásares y los cuásares⁷. Con Rodríguez nos insumió una semana llegar a formular y resolver el sistema de ecuaciones que describen el fenómeno observado. Las asimetrías aparentes en el brillo y el desplazamiento de las dos nubes de plasma pudieron ser naturalmente explicadas en términos de la aberración relativista de la radiación de dos nubes gemelas de plasma eyectadas en forma antisimétrica al 95 % de la velocidad de la luz. La resolución de este sistema de ecuaciones fue el primer problema planteado a los estudiantes más brillantes del mundo en las Olimpiadas Internacionales de Física del año 2000.

El astrofísico alemán Jochen Greiner y colaboradores⁸ han logrado determinar los parámetros orbitales de GRS 1915+105, concluyendo que se trata de un sistema binario constituido por un agujero negro de 14 masas solares acompañado por una estrella de 1 masa solar. Esta última se ha transformado en una gigante roja de la que el agujero negro succiona materia bajo la forma de un disco de acreción (ver Figura 1).

La asociación entre los chorros bipolares y los discos de acreción parece ser un fenómeno universal en los cuásares y microcuásares. La idea predominante es que los chorros de materia son propulsados por la enorme energía de rotación de los objetos compactos y discos de acreción que los circundan. Por mecanismos magneto-hidrodinámicos, la energía de rotación es evacuada por los polos en forma

6. Mirabel, I.F. & Rodríguez, L.F. 1994, *Nature* 371, 46.

7. Mirabel, I.F. & Rodríguez, L.F. 1998, *Nature* 392, 673.

8. Greiner, J., Cuby, J.G. & McCaughrean, M.J. 2001, *Nature* 414, 522.



Figura 3: La revista *Nature* anuncia el 1 de septiembre de 1994 el descubrimiento de la primera fuente galáctica de movimientos superlumínicos aparentes⁶. La secuencia de imágenes en la tapa muestra la evolución temporal en ondas de radio de un par de nubes de plasma eyectadas desde las inmediaciones de un agujero negro a una velocidad del 95 % de la velocidad de la luz.

de chorros, mientras que el resto puede caer hacia el centro de atracción gravitacional. A pesar de la aparente universalidad de esta relación entre discos de acreción y chorros bipolares altamente colimados, la relación entre los discos de acreción y los chorros de gas eyectados nunca había sido confrontada por observaciones directas.

Por la proximidad, frecuencia y variabilidad rápida de erupciones energéticas, GRS 1915+105 se convirtió en el laboratorio más adecuado para estudiar la conexión entre las inestabilidades en los discos de acreción y la génesis de chorros bipolares.

En 1997 observamos⁹ en un intervalo de tiempo menor que una hora una caída repentina de la luminosidad en rayos X y gamma, seguida por una eyección de chorros observados primero en el infrarrojo, y luego en ondas de radio (ver Figura 4). La caída brusca en la luminosidad de los rayos X es interpretada como la desaparición silenciosa de la parte interior más caliente del disco de acreción más allá del horizonte del agujero negro. Unos minutos más tarde, nuevas cantidades de materia provenientes de la estrella compañera vienen a realimentar el disco de acreción, que debe evacuar una parte de su energía cinética bajo la forma de chorros bipolares. Al alejarse, las nubes de plasma se diluyen volviéndose transparentes a su propia radiación, primero en infrarrojo y luego en el dominio de las ondas de radio. Recientemente, un equipo internacional liderado por Alan Marscher de la Universidad de Boston y José-Luis Gómez del Instituto de Astrofísica de Andalucía¹⁰ observaron un fenómeno análogo en el cuásar 3C 120, pero en escalas de tiempo de varios años. Como era de esperar en el contexto de la analogía entre cuásares y microcuásares⁷, las escalas de tiempo de los procesos físicos en las inmediaciones de los agujeros negros son proporcionales a sus masas.

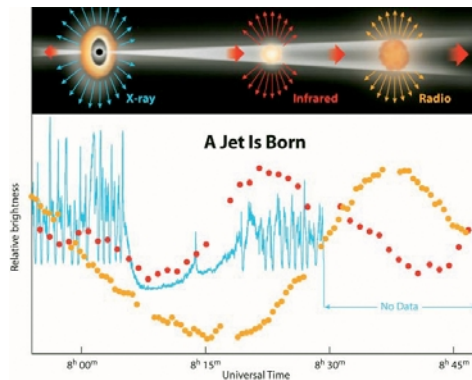


Figura 4: Conexión entre las inestabilidades en el disco de acreción y génesis de chorros relativistas puesta en evidencia en un microcuásar por la observación simultánea en rayos X, ondas infrarrojas y de radio (9). La eyección de chorros relativistas se produce luego de la evacuación y posterior reconstitución de la parte interior del disco de acreción. Una secuencia similar a la observada en este microcuásar fue observada en un cuásar, pero en escalas de varios años.

9. Mirabel, I.F., Dhawan, V., Chaty, S., Martí, J., Rodríguez, L.F., Robinson, C.R., Swank, J. & Geballe, T. 1998, *Astronomy & Astrophysics* 330, L9.
 10. Marscher, A.P., Jorstad, S.G., Gómez, J.L., *et al.* 2002, *Nature* 417, 625.

El concepto de horizonte es el que define al agujero negro. Este es un objeto con masa, que ejerce atracción gravitacional, pero que no tiene un límite material, sino que está circundado por una frontera inmaterial del espacio-tiempo impuesta por la relatividad general. Entonces, tal como hemos observado, la materia puede atravesar esa frontera sin rebotar, sin que una parte de su energía cinética sea reflejada en la superficie en una explosión termonuclear, como ocurre cuando el objeto compacto es una estrella de neutrones en vez de un agujero negro. En otros términos, la materia que acreta el agujero negro desaparece como por arte de magia, el gas caliente que emitió rayos X desaparece de nuestro universo observable sin compensación en el mundo real.

Entonces, ¿con tales observaciones hemos demostrado que los agujeros negros existen? Estrictamente hablando, en estas observaciones no encontramos evidencia alguna de una frontera material en un objeto oscuro que ejerce atracción gravitacional. Sin embargo, la ausencia de evidencia de la existencia de una frontera material no implica la evidencia de su inexistencia. Entonces, por la propia definición de agujero negro en términos de horizonte, no es posible demostrar la existencia de un agujero negro. Según San Pablo “la fe es la evidencia de lo invisible” (lo inmaterial). Por ello, para ciertos astrofísicos los agujeros negros son objetos de fe. Más allá del interés en contrastar ideas de frontera en la física actual, quizás la atracción intelectual por estos objetos provenga de aquella atracción innata por conocer lo que llamamos “el más allá de los límites del universo”. En este contexto, estudiar los fenómenos en las cercanías de los agujeros negros es una forma de acercarse a los límites del universo, en este caso del universo observable.

Para un observador exterior los agujeros negros astrofísicos son los objetos más simples de la física, ya que están caracterizados solamente por tres parámetros: la masa, la rotación o spin, y la carga eléctrica. La masa de los agujeros negros gravitando en sistemas binarios se puede llegar a determinar a partir del movimiento orbital con la física de Newton. Pero la rotación de los agujeros negros es más difícil de conocer, a pesar de que puede ser el motor principal en la expulsión de los chorros relativistas. El descubrimiento de los microcuásares ha generado la esperanza de poder medir la rotación de los agujeros negros por medio de las oscilaciones cuasi-periódicas de frecuencia máxima fija que se observan en rayos X. Las zonas más

internas del disco de acreción, las más calientes que emiten cantidades enormes de rayos X y gamma, están afectadas por las condiciones extrañas que reinan en el espacio-tiempo de la vecindad del horizonte de un agujero negro. Allí el espacio-tiempo es curvado por la masa del agujero negro y arrastrado por su rotación, lo que provoca vibraciones que modulan la emisión de los rayos X. El estudio de estas modulaciones en rayos X ha permitido saber que aquellos microcuásares que producen las eyecciones relativistas más potentes son los que rotan a las velocidades más extremas, cercanas al máximo físicamente posible. Estas oscilaciones cuasi-periódicas en los microcuásares constituyen en este momento uno de los mejores fenómenos de que se dispone en física para contrastar observacionalmente la teoría de la relatividad general en el límite de los campos gravitatorios más intensos.

Recientemente, un equipo internacional liderado por Reinhard Genzel del Instituto Max Planck en Baviera descubrió oscilaciones periódicas análogas pero en el infrarrojo, provenientes de las inmediaciones del agujero negro de 4 millones de masas solares ubicado en el centro dinámico de nuestra galaxia¹¹. Los períodos de las oscilaciones de algunas decenas de mili-segundos en rayos X que son observados en los microcuásares, y el período de algunas decenas de minutos de las oscilaciones en el infrarrojo observado en el agujero negro supermasivo del centro galáctico, son proporcionales a las masas de los agujeros negros respectivos, con diferencias de escala de 1 millón, tal como sería de esperar en el contexto de la analogía cuásar-microcuásar.

Desde su descubrimiento en 1963, se había encontrado un tipo particular de cuásares que pueden llegar a ser extremadamente brillantes y que manifiestan destellos de gran intensidad en tiempos muy cortos. Se los llama blázares y se piensa que no son más que cuásares en que los chorros están orientados casi exactamente hacia la Tierra. Por efecto Doppler se produce una gran amplificación y corrimiento de la radiación hacia frecuencias más altas. Con Rodríguez propusimos en 1999 que en forma análoga podrían existir microblázares¹², o sea, binarias X en que los chorros emitidos por el astro colapsado están prácticamente alineados con nuestra visual. Se

11. Genzel, R., *et al.* 2003, *Nature* 425, 934.

12. Mirabel, I.F. & Rodríguez, L.F. 1999, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics* 37, 409.

han encontrado candidatos a microblázares en la Vía Láctea, pero por la variabilidad tan rápida causada por la contracción de la escala de tiempo en los chorros relativistas, han sido difíciles de estudiar en nuestra Galaxia. Actualmente se cree que estos microblázares podrían ser estudiados mejor observando las llamadas “fuentes X ultra-luminosas”.

Las “fuentes X ultra-luminosas” se encuentran fuera de los núcleos de galaxias que tienen una natalidad estelar intensa, por lo que se cree que la mayoría deben ser sistemas binarios de agujeros negros estelares ligados a estrellas jóvenes de alta masa. Gustavo Romero y colaboradores del Conicet de Argentina habían propuesto¹³ que algunas de estas binarias X de alta masa pueden ser fuentes de rayos gamma con energías de hasta cientos de millones de electrón-voltios, como los blázares. En las binarias X de alta masa los chorros relativistas generados en las cercanías de los agujeros negros deben atravesar el campo de radiación ultravioleta de la estrella compañera, produciendo por dispersión Compton inversa de los fotones ultravioletas, radiación gamma de hasta cientos de millones de electrón-voltios.

El descubrimiento por Josep Maria Paredes, Josep Martí y Marc Ribó del microcuásar galáctico LS 5039, y su posible asociación con una fuente de rayos gamma de alta energía (cientos de millones de electrón voltios) publicado en la revista *Science*¹⁴ en el año 2000, constituyó la primera evidencia observacional de que los microcuásares pueden ser responsables de algunas de los centenares de fuentes de radiación gamma de alta energía que pueblan nuestra galaxia y que aún no han sido identificadas. Además, en los últimos tres años estos investigadores han estado asociados a dos proyectos, uno liderado por Maria Massi del Instituto Max Planck de Bonn¹⁵, el otro por Jorge Combi del Conicet de Argentina¹⁶, que han conducido al descubrimiento de la posible asociación de dos microcuásares adicionales con tales fuentes de radiación gamma no identificadas.

Las fuentes de destellos gamma (“Gamma-Ray-Bursts”) con duraciones de algunos segundos a minutos son las explosiones más

13. Romero, G.E., Torres, D.F., Kaufman Bernadó, M.M. & Mirabel, I.F. 2003, *Astronomy & Astrophysics* 410, L1.

14. Paredes, J.M., Martí, J., Ribó, M. & Massi, M. 2000, *Science* 288, 2340.

15. Massi, M., Ribó, M., Paredes, J.M., Garrington, S.T., Peracaula, M. & Martí, J. 2004, *Astronomy & Astrophysics* 414, L1.

16. Combi, J.A., Ribó, M., Mirabel, I.F. & Sugizaki, M. 2004, enviado para publicación en *Astronomy & Astrophysics*.

energéticas que se pueden observar de un extremo al otro del universo. Estos destellos gamma también podrían resultar de la dispersión Compton sobre fotones ultravioletas, de chorros ultra-relativistas generados en el núcleo de una estrella masiva cuando colapsa catastróficamente para formar un agujero negro. Probablemente los sistemas binarios de estrellas masivas muy próximas son progenitores de las fuentes de destellos gamma. En primer lugar, por acción de marea, la binariedad facilita la aceleración angular necesaria para potenciar los chorros ultra-relativistas. En segundo lugar, las supernovas que se han encontrado asociadas a destellos gamma son de tipo Ic, donde la estrella que explota debe previamente haber expulsado las capas exteriores de hidrógeno y helio. La pérdida de las capas exteriores de la estrella que colapsa se produce más fácilmente en la fase de envoltura común en los sistemas binarios de estrellas masivas. En tercer lugar, si los destellos gamma son jets altamente colimados, su tasa de ocurrencia en el universo es comparable a la de las supernovas de tipo Ic. En este contexto, los destellos gamma marcarían el nacimiento de los microcuásares en galaxias distantes con intensa natalidad estelar. Recientemente, con el Dr. Rodríguez propusimos¹⁷ la existencia de un mecanismo universal único para producir los chorros relativistas que se observan en el universo, sugiriendo la extensión de la analogía entre microcuásares y cuásares a las fuentes de destellos gamma, tal como se ilustra en el diagrama de la Figura 5.

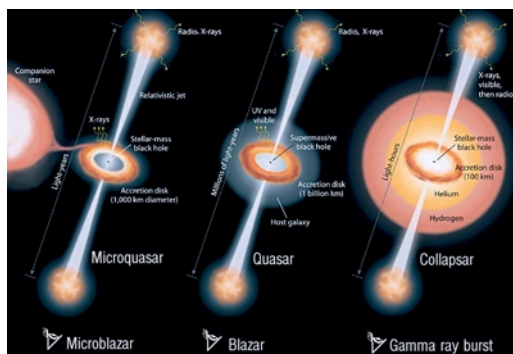


Figura 5: El mismo mecanismo físico puede ser responsable de tres tipos diferentes de objetos: microcuásares, cuásares y estrellas masivas que colapsan (colapsares) para formar un agujero negro produciendo destellos de radiación gamma¹⁷. Cada uno de estos objetos contiene un agujero negro, un disco de acreción, y chorros relativistas de partículas. Los cuásares y microcuásares pueden eyectar materia en forma repetida, mientras que los colapsares forman chorros una sola vez. Cuando los chorros están alineados con la visual del observador estos objetos se manifiestan como microblázares, blázares y destellos gamma, respectivamente.

17. Mirabel, I.F. & Rodríguez, L.F. 2002 May, *Sky & Telescope*, páginas 33-40.

Los destellos gamma ocurren en forma repentina y a grandes distancias cósmicas, por lo que ha sido difícil obtener observaciones que sirvan para contrastar observacionalmente los modelos teóricos sobre la formación de los agujeros negros estelares. Interesa saber por qué algunas estrellas masivas terminan su vida como estrella de neutrones mientras que otras forman agujeros negros. También es de interés saber si las estrellas masivas que forman agujeros negros siempre mueren en forma violenta, explotando como supernovas. Para responder a estas cuestiones, la cinemática de los microcuásares es una aproximación complementaria al estudio de los destellos gamma. Cuando un sistema binario de estrellas masivas permanece ligado gravitacionalmente después de la explosión de una de sus componentes, el centro de masa del sistema adquiere un impulso, sea la eyección de materia simétrica o asimétrica. Entonces por el movimiento del microcuásar se puede saber cuál fue el origen y mecanismo de formación del objeto compacto.

Utilizando datos obtenidos con nuevas técnicas observacionales, Marc Ribó, Josep Maria Paredes y Josep Martí¹⁸ encontraron que el microcuásar LS 5039 ha sido catapultado fuera de la Vía Láctea a gran velocidad, por lo que la formación del objeto compacto debe haberse producido por la explosión de una supernova muy energética. Los estudios de la cinemática de los microcuásares llevados a cabo en este momento, son el inicio de lo que se podría llamar “Arqueología Galáctica”. En forma análoga a los arqueólogos, estudiando los fósiles de las generaciones anteriores de estrellas en nuestra galaxia, los astrofísicos pueden conocer el nacimiento, vida y muerte de aquellas generaciones pasadas de estrellas. De esta forma, en colaboración con Irapuan Rodrigues de la Universidad de Río Grande del Sur en Brasil, hemos encontrado la primera evidencia de una población de millones de agujeros negros en ese cementerio de estrellas que es el halo de nuestra galaxia^{19,20}. Estos agujeros negros y estrellas de neutrones del halo galáctico se desplazan a gran velocidad, en forma similar a los cúmulos globulares de estrellas, que se formaron hace más de 7 mil millones de años, antes de que se formara el disco espiral de estrellas, gas y polvo de la Vía Láctea.

18. Ribó, M., Paredes, J.M., Romero, G.E., *et al.* 2002, *Astronomy & Astrophysics* 384, 954.

19. Mirabel, I.F., Dhawan, V., Mignani, R.P., Rodrigues, I. & Guglielmetti, F. 2001, *Nature* 413, 139.

20. Mirabel, I.F. & Rodrigues, I. 2003, *Astronomy & Astrophysics* 398, L25.

Los resultados preliminares de la cinemática de binarias X sugieren que los agujeros negros de baja masa se forman por colapso retardado de una estrella de neutrones²¹, mientras que los agujeros negros estelares con masas iguales o mayores que 10 soles resultan del colapso tranquilo y silencioso de estrellas masivas. Cygnus X-1, que es el primer objeto “oscuro” descubierto, se formó en la oscuridad²².

En síntesis, este área de investigación que hemos iniciado hace una década con el descubrimiento de los microcuásares, se ha convertido rápidamente en una de las áreas más importantes de confluencia entre la física y la astronomía moderna. Sobre los microcuásares se realizan congresos internacionales en Europa, América y Asia, con la fuerte participación de jóvenes científicos que con mucho éxito están contribuyendo a abrir nuevos horizontes del conocimiento.

21. Mirabel, I.F., Mignani, R., Rodrigues, I., Combi, J.A., Rodríguez, L.F. & Guglielmetti, F. 2002, *Astronomy & Astrophysics* 395, 595.

22. Mirabel, I.F. & Rodrigues, I. 2003, *Science* 300, 1119.

Agradecimientos: Quiero destacar muy especialmente el trabajo de mi colega y amigo Luis Felipe Rodríguez, con quien tuve la suerte de realizar mis primeros pasos en este área de investigación. Por sus valiosas ideas, experiencia y esfuerzos que han contribuido al desarrollo de este área de investigación quiero también agradecer a los colegas S. Chaty, J.A. Combi, B. Cordier, V. Dhawan, P.A. Duc, F. Lebrun, Q.Z. Liu, J. Martí, R. Mignani, J.M. Paredes, J. Paul, M. Ribó, I. Rodrigues y G.E. Romero.

A MODO DE EPÍLOGO

El universo está plagado de misterios. Identificar y desentrañar esos misterios por medio del trabajo científico es una de las profesiones más placenteras. Los descubrimientos y aportes científicos provocan emociones profundas, especialmente cuando se abren caminos hacia nuevas realidades y nuevas síntesis conceptuales.

La ciencia es una actividad social, pero también requiere el recogimiento individual. En la soledad se experimenta el asombro, del que nace la motivación para formular las preguntas y la fuerza para sostener con persistencia los esfuerzos por encontrar respuestas. De nada sirve una formación académica excelente sin curiosidad, sin la motivación genuina por saber.

Más allá de la transformación del mundo material, el valor social más importante de la ciencia es la práctica de la libertad y la formación del espíritu crítico. La historia de la ciencia nos enseña que nadie es depositario de “La Verdad”, y que como dice el lema de vuestra universidad “Libertas perfundet omnia luce”, o sea, “La libertad lo llena todo de luz”.

