



IAC

noticias

XIV CANARY ISLANDS WINTER SCHOOL OF ASTROPHYSICS

Puerto de la Cruz, Tenerife

18-29 / XI / 2002

"Materia oscura y energía oscura en el Universo"

ESPECIAL 2002

ESCUELA DE INVIERNO

LAWRENCE KRAUSS

PHILIP MAUSKOPF

JOHN PEACOCK

BERNARD SADOULET

RENZO SANCISI

BRIAN SCHMIDT

PETER SCHNEIDER

JOSEPH SILK



Cartel anunciador de la XIV Canary Islands Winter School of Astrophysics.

El IAC ha organizado la XIV Canary Islands Winter School of Astrophysics, del 18 al 29 de noviembre, en el Centro de Congresos de Puerto de la Cruz (Tenerife), con financiación de la Unión Europea y el Ministerio de Ciencia y Tecnología, y la colaboración de la compañía Iberia, los Cabildos de Tenerife y La Palma y el Ayuntamiento del Puerto de la Cruz. En esta edición de la Escuela de Invierno, los cursos son impartidos por ocho profesores expertos en cosmología que abordan el tema de la materia y de la energía "oscuras" desde diferentes puntos de vista. Participan 61 alumnos de 20 países que actualmente preparan su tesis doctoral, o la han terminado recientemente, sobre un tema relacionado con el de esta Escuela. Los cursos se completan con las visitas al Instituto de Astrofísica, en La Laguna, y a los Observatorios del Roque de los Muchachos, en La Palma, y del Teide, en Tenerife.

IAC

Consulta
nuestra
página web

<http://www.iac.es/gabinete/iacnoticias/digital.htm>

SUMARIO

XIV CANARY ISLANDS WINTER SCHOOL OF ASTROPHYSICS
"Materia oscura y energía oscura en el Universo"

COMITÉ ORGANIZADOR:
John E. Beckman
Ramón García López
Francisco Sánchez

SECRETARÍA:
Lourdes González
Nieves Villoslada

pág. 3

Presentación

FRANCISCO SÁNCHEZ (IAC)

págs. 4 y 5

Materia oscura y energía oscura en el Universo

JOHN BECKMAN (IAC)
RAMÓN J. GARCIA LÓPEZ (ULL/ IAC)
FRANCISCO SÁNCHEZ (Director del IAC)

págs. 6 y 7

"Inflación, el Universo plano, Materia Oscura y Energía Oscura: una introducción"

Superando a la ficción

LAWRENCE M. KRAUSS
(Universidad de Case Western Reserve, Ohio, EE.EE.)

págs. 8 y 9

"Medidas recientes de las fluctuaciones del fondo cósmico de microondas y sus implicaciones para los parámetros cosmológicos"

Proyecto Boomerang

PHILIP MAUSKOPF
(Universidad de Gales, Cardiff, Reino Unido)

págs. 10 y 11

"Estructuras a gran escala del Universo obtenidas con surveys extensos"

Un mapa del Universo

JOHN PEACOCK
(Observatorio Real de Edimburgo, Reino Unido)

págs. 12 y 13

"Búsquedas en el laboratorio de materia oscura"

En busca de WIMPs

BERNARD SADOULET
(Universidad de California, Berkeley, EE.UU.)

págs. 14 y 15

"Cinémática galáctica y materia oscura"

Curvas de rotación

RENZO SANCISI
(Observatorio Astronómico de Bolonia, Italia)

págs. 16 y 17

"Supernovas como candelas estándar y el Universo acelerado"

Testigos del Universo

BRIAN SCHMIDT

(Universidad Nacional Australiana, Australia)

págs. 18 y 19

"El uso del efecto lente gravitatoria para explorar la estructura y dinámica del Universo"

Espejismos cósmicos

PETER SCHNEIDER
(Universidad de Bonn, Alemania)

págs. 20 y 21

"La formación de galaxias en cosmologías de materia oscura"

El origen de las galaxias

JOSEPH SILK
(Universidad de Oxford, Reino Unido)

págs. 22 y 23

Lo grande y lo pequeño: un feliz enlace

págs 24 y 25

Censura en Ciencia

págs 26 y 27

Ciencia y/o Religión

págs. 28 y 29

Profesores de las "Canary Islands Winter School of Astrophysics"
Actos paralelos
Ediciones

págs. 30 y 31

Instantáneas



INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

Director: Francisco Sánchez

Jefe del Gabinete de Dirección: Luis A. Martínez Sáez

Jefa de Ediciones: Carmen del Puerto

Redacción, confección y edición: Carmen del Puerto, Begoña López Betancor y Sara Gil

Traducción del inglés: Sara Gil

Directorio y distribución: Ana M. Quevedo

Diseño original: Gotzon Cañada

Diseño de cartel: Ramón Castro (SMM/IAC)

Edición digital: M.C. Anguita

Dibujos: Gotzon Cañada

Fotografías de grupo: Miguel Briganti

(SMM/IAC)

Tratamiento digital de imágenes: Gotzon Cañada

Depósito Legal: TF-335/87

ISSN: 0213/893X

PRESENTACIÓN

Prof. FRANCISCO SÁNCHEZ
(Director del IAC)

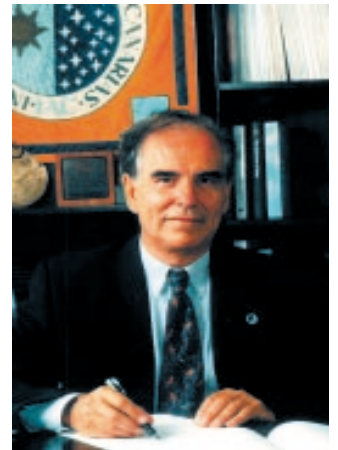
En una Europa preocupada por la escasez de vocaciones científicas, se hace evidente la importancia de alentar a aquellos estudiantes que han optado por dedicarse a la Astrofísica, y que lo hacen pese a conocer que su futuro laboral será muy incierto, como refleja el último informe de la Sociedad Española de Astronomía. Tras analizar el estado de la investigación astronómica en España durante los últimos tres años, este estudio muestra la escasez de investigadores en esta disciplina. Lo cual coincide con la denuncia hecha en las «recomendaciones» que la Comisión Nacional de Astronomía hizo a la Administración española, a la cual pedía que se duplicasen los puestos de trabajo. Otro de los resultados del estudio de la SEA es la elevada calidad de la investigación astronómica en España, con un impacto superior al de la media europea. Para mantener este nivel se hace indispensable insistir en la formación de los nuevos astrónomos, además de que se adopten las medidas financieras adecuadas.

El IAC siempre ha sido consciente de esas necesidades. Su *Canary Islands Winter School of Astrophysics* es un ejemplo. En esta Escuela de Invierno, estudiantes de distintos países se comunican de forma intensiva, durante dos semanas, con los mejores especialistas de su área.

En su decimocuarta edición, la Escuela se ocupará de uno de los temas más candentes en la Astrofísica actual: la materia y la energía “oscuras”. Todos hemos vivido la conmoción en Cosmología que está suponiendo el anuncio de la aceleración de la expansión del Universo, un hallazgo que es aceptado por parte de la comunidad científica y que está estrechamente relacionado con la existencia de la “energía oscura”. Esta invisibilidad de parte tan importante de materia y energía constituye un reto, y su estudio, una intrépida aventura. Sólo estudiando mejor la naturaleza de estos “ingredientes cósmicos” avanzaremos en el conocimiento de la estructura, composición y destino de nuestro Universo.

Como en años anteriores insistimos en el IAC en la colaboración de todos para que la relación con sus participantes no termine con el fin de la Escuela. Os animamos, por lo tanto, a permanecer en contacto, enviar sugerencias y actualizar vuestros datos, cuando sea necesario, a través del correo electrónico aqq@ll.iac.es. También podéis encontrar siempre información actualizada de las actividades del Instituto en su página web: <http://www.iac.es>.

Por último, no quiero dejar de mostrar nuestro agradecimiento a profesores y alumnos, así como a las distintas entidades que, ofreciéndonos su ayuda y patrocinio, hacen, posible un año más, la nueva edición de esta *Canary Islands Winter School of Astrophysics*.



Francisco Sánchez

AGRADECIMIENTOS A:

Cabildo Insular de Tenerife
Cabildo Insular de La Palma
Ayuntamiento del Puerto de la Cruz
Iberia
Unión Europea
Ministerio de Ciencia y Tecnología

¿Qué encontrarás en este Especial?

En este número especial de *IAC Noticias* dedicado a la XIV Escuela de Invierno se publica, como en ediciones anteriores, el resultado de entrevistas específicas realizadas con cada uno de los profesores invitados (páginas 6-21), así como las respuestas agrupadas de todos ellos a una serie de preguntas comunes que sobre diferentes temas se les ha formulado (páginas 22-27). Se incluye, además, información adicional sobre esta Escuela y las precedentes.

ALGUNOS DATOS:

Nº Profesores: 8
Nº Alumnos: 61
Nº Países: 20
Nº Solicitudes: 96

Materia Oscura y Energía Oscura en el Universo

JOHNE E. BECKMAN Y RAMÓN GARCÍA LÓPEZ
(Organizadores de la XIV Canary Islands Winter School of Astrophysics)



John E. Beckman

Vivimos en la época de la cosmología observacional. Desde el descubrimiento del Fondo de Radiación de Microondas por Arno Penzias y Bob Wilson a mediados de los años sesenta del siglo pasado y, más o menos al mismo tiempo, la constatación por Bob Wagoner, Willy Fowler y Fred Hoyle de que las abundancias de los elementos ligeros deuterio, helio y litio podrían ser usadas para estimar la densidad bariónica cósmica en el marco del modelo del "Big Bang", la cosmología —la ciencia que estudia al Universo como un todo— ha pasado de ser un ejercicio sustancialmente especulativo en el uso de la teoría de la Relatividad General a convertirse en una parte mucho más sólida de la Astronomía y la Astrofísica.

La prueba tradicional de la cosmología relativista ha consistido en intentar medir cómo cambia el ritmo de expansión del Universo. La "constante de Hubble" mide el ritmo de expansión instantánea del Universo como un todo, tal y como lo observamos en el momento presente, y ha proporcionado la mejor manera práctica de estimar la edad del Universo. Esta constante se mide combinando observaciones de velocidades radiales de un gran número de galaxias en el universo local con las mejores estimaciones disponibles para sus distancias. Edwin Hubble descubrió en los años treinta que el Universo está en constante expansión y que cuanto más alejada esté una galaxia, más rápido se mueve respecto a nosotros. Los astrónomos entendieron rápidamente que esto es justo lo que esperaríamos de un sistema expandiéndose uniformemente. El símil tradicional consiste en comparar las galaxias con puntos dibujados sobre la superficie de un globo que está siendo inflado. Si medimos la distancia entre dos puntos cualesquiera, así como la velocidad a la que se separan, encontraremos el mismo cociente entre las dos cantidades para cualquier pareja de puntos: aquéllos que estén al doble de distancia se separarán también al doble de velocidad. Los cúmulos de galaxias en el espacio tridimensional del Universo se están separando de una forma similar. El cociente entre la velocidad a la que se separan y su distancia es, precisamente, la constante de Hubble, una medida del ritmo actual de la expansión del Universo. La distancia entre dos cúmulos de galaxias dividida por la velocidad a que se separan proporciona una medida de tiempo: el tiempo que tardaron ambos cúmulos de galaxias en alcanzar su posición actual suponiendo que el ritmo de expansión del Universo haya permanecido constante. Así, este "tiempo de Hubble" (el inverso de la constante de Hubble) constituye una primera estimación de la edad del Universo. El mejor valor de la constante de Hubble, obtenido utilizando las distancias proporcionadas por estrellas variables Cefeidas en galaxias próximas con el Telescopio Espacial Hubble, es 75 km s^{-1} por Megaparsec. Esto proporciona un tiempo de Hubble de 13.000 millones de años (13 Giga-años) suponiendo un ritmo de expansión constante.

Se ha supuesto hasta hace poco que el Universo debía estar decelerando su ritmo de expansión debido a la atracción gravitatoria de la materia que forma parte del mismo. Los intentos de medir esta deceleración implicaban hacer las mejores medidas posibles de distancias y combinarlas con las de velocidad radial —más sencillas de realizar a partir del efecto Doppler—. Se esperaba que las medidas realizadas sobre distancias suficientemente grandes, que implicarían también "tiempos pasados" suficientemente grandes, nos permitirían alcanzar épocas pasadas cuando la expansión era más rápida, de tal manera que una constante de Hubble dependiente del tiempo (también llamada "parámetro de Hubble") habría sido mayor. En términos generales, un Universo decelerándose debería ser más joven que el tiempo de Hubble y esto suponía un verdadero problema, porque las edades de los cúmulos estelares más antiguos co-

nocidos son del orden de 13 Giga-años y el Universo no puede ser más joven que sus cúmulos estelares. Las medidas de distancia para grandes distancias son muy difíciles de llevar a cabo y no se obtuvo ninguna respuesta concluyente a esta paradoja hasta hace pocos años, cuando los astrónomos aprendieron a utilizar las supernovas de tipo I como "candelas estándar" para estas medidas. Este será precisamente el tema de uno de los cursos de la Escuela de Invierno, dictado por Brian Schmidt. Para sorpresa de todos, cuando fueron apareciendo las nuevas medidas se encontró que el Universo estaba acelerándose. Esta aceleración, que implica que el Universo es más viejo que los cúmulos estelares, parece resolver el problema de la edad (de ahí que no haya sido recibido con mucho escepticismo), pero pone de manifiesto otro problema fundamental: ¿qué está produciendo esta aceleración? Volveremos a referirnos a este punto un poco más adelante.

Concentrémonos ahora en las fases más tempranas del Big Bang, cuando comenzó la expansión. La Radiación del Fondo de Microondas, con su magnífico espectro de cuerpo negro y su intensidad uniforme sobre todo el cielo, es uno de los sustentos observacionales clave para esta teoría. Esta intensidad uniforme a gran escala no resultaba fácil de entender en los modelos de Big Bang originales, porque no había una manera obvia en que las diferentes partes del Universo pudiesen estar conectadas y así explicar porqué observamos la misma temperatura de radiación desde puntos opuestos del cielo. Este problema fue soslayado mediante el escenario "inflacionario" propuesto por Alan Guth, en el que el Universo empezó siendo muy pequeño, susceptible de tener interconexiones mediante señales viajando a la velocidad de la luz, y luego expandido a un ritmo enorme: el período inflacionario que tuvo lugar antes de llegar al ritmo de expansión más sosegado en el que nos encontramos hoy en día. Una consecuencia predicha por este escenario es que el Universo debe ser "plano" (la mejor manera de pensar en esto es considerar que los rayos de luz se propagan a gran escala dentro de una geometría euclídea, es decir, que la distancia más corta entre dos puntos es una línea recta) y éste es un punto muy a favor, ya que resulta fácil mostrar en cualquier modelo cosmológico relativista que si el Universo hubiese comenzado con una mínima desviación de esta "planitud" mostraría una fuerte curvatura. Todas las observaciones disponibles sobre la expansión de galaxias muestran que el Universo es plano o casi plano, por lo que la mejor solución es que debió empezar siendo completamente plano. El modelo inflacionario predice esta planitud.

Las trabajos de Wagoner y colaboradores teniendo en cuenta los elementos ligeros mostraron cómo sus "abundancias primordiales", la materia que emergió de la bola ígnea primordial en forma de helio, deuterio y el isótopo 7 del litio, pueden ser utilizadas para predecir la densidad de materia bariónica (es decir, la "materia ordinaria": protones y neutrones, esencialmente) en el Universo como un todo. Resumiendo años de trabajo de muchos observadores e investigadores teóricos, podemos decir que el resultado final del trabajo sobre las abundancias de estos elementos ligeros producidos por la nucleosíntesis primordial es que la materia bariónica puede dar cuenta tan sólo de un pequeño porcentaje (quizá un máximo del 5%) de la materia necesaria por unidad de volumen para proporcionar un Universo plano. En otras palabras, si el Universo es realmente plano debe haber algo en algún lugar que proporcione el 95% de la densidad de total de materia. Este resultado concuerda con el sorprendente descubrimiento por Vera Rubin y Kent Ford, a principios de los años setenta, hecho a partir de las curvas de rotación de galaxias espirales y que muestra que éstas son más masivas, en un factor 10 o mayor, que lo que la suma de sus componentes conocidas (estrellas, gas y

"ESTA ESCUELA DE INVIERNO TRAE A TENERIFE A INVESTIGADORES SITUADOS EN LA PUNTA DE LANZA DE SUS ESPECIALIDADES EN EL CAMPO DE LA COSMOLOGÍA TEÓRICA Y OBSERVACIONAL, PARA TRANSMITIR SUS CONOCIMIENTOS A UNA AUDIENCIA DE JÓVENES INVESTIGADORES PROCEDENTES DE 20 PAÍSES. LA MATERIA ABORDADA ES DE ENORME INTERÉS TANTO PARA ESPECIALISTAS COMO PARA EL PÚBLICO EN GENERAL Y AÑADIRÁ OTRO CAPÍTULO A LA CRECIENTE TRADICIÓN DE EXCELENCIA DE LAS ESCUELAS DE INVIERNO DE ASTROFÍSICA DEL IAC."

polvo) implicaría. Por otra parte, Jesry Ostriker y Jim Peebles mostraron que los discos de galaxias deberían ser inestables a menos que estuviesen embebidos en halos muy masivos, mucho más masivos que aquéllos conocidos a partir de las estrellas y el gas. Estas fuertes insinuaciones de "materia perdida" y sus consecuencias serán tratadas en la Escuela de Invierno en el marco del curso dictado por Renzo Sancisi. Resultados de estos estudios, así como estudios efectuados a escalas mayores, teniendo en cuenta cúmulos de galaxias y su dinámica y no sólo galaxias aisladas, han llevado a la comunidad astronómica a la convicción de que un 90% de la materia del Universo no ha sido actualmente detectada. A esto se ha dado en llamar el "problema de la materia oscura".

Algunos astrónomos se han sumado a la idea de que quizá toda la materia oscura podría estar en forma de bariones. Willy Fowler (que recibió el Premio Nobel por su trabajo sobre la síntesis de los elementos químicos), por ejemplo, fue entusiasta acerca de modelos no ortodoxos de nucleosíntesis durante el *Big Bang* en los que las abundancias de elementos ligeros podrían producirse aunque los bariones proporcionasen toda la densidad de materia necesaria para la planitud, en lugar de una pequeña fracción de la misma. Si esto fuera cierto, la masa perdida en los halos de galaxias podría, por ejemplo, adoptar la forma de planetas flotando libremente o enanas marrones. Colectivamente, estos objetos fueron llamados "MACHOs" (Iniciales en inglés de: *Massive Compact Halo Objects*). Durante los años noventa se llevaron a cabo búsquedas de estos objetos a gran escala haciendo uso de la predicción de su comportamiento como lentes gravitatorias que podrían ser detectadas en contraste con el fondo estelar en galaxias externas locales. Sin embargo, nuevos trabajos sobre la estructura a gran escala y los movimientos en el seno de cúmulos de galaxias apuntaban fuertemente al hecho de que las propiedades de estos cúmulos no podían ser explicadas cuantitativamente utilizando materia bariónica, cobrando sentido sólo si la mayoría de la masa estuviese presente a escala subnuclear en la forma de "partículas masivas que interaccionan débilmente" (*Weakly Interacting Massive Particles*, WIMPs; acrónimo que las distingue de los MACHOs). Más recientemente, los cosmólogos han comenzado a generar modelos de formación de galaxias basados en pequeñas fluctuaciones de densidad presentes en el *Big Bang* y, suponiendo el dominio de los WIMPs (conocidos colectivamente en cosmología como "materia oscura fría"), han intentado predecir la película completa de la evolución de las galaxias: sus movimientos, su distribución a gran escala y sus estructuras internas, desde las épocas más tempranas hasta nuestros días. Tres de los cursos contenidos en esta Escuela de Invierno versarán sobre este ambicioso objetivo, no satisfecho aún. Joe Silk discutirá los modelos y sus bases teóricas, John Peacock hablará sobre los estudios de galaxias a gran escala y en tres dimensiones (donde las distancias se estiman, como vimos con anterioridad, haciendo uso de las velocidades de alejamiento), mientras que Peter Schneider discutirá uno de los más novedosos y elegantes medios de discernir estructuras de masa a gran escala: el uso de campos gravitatorios como lentes ópticas a las mayores escalas. Está claro que, con mucho, la mayoría de los investigadores activos en estos campos suponen que la materia oscura fría domina la materia cósmica, pero la imposibilidad de los modelos no ortodoxos de nucleosíntesis durante el *Big Bang* para reproducir las abundancias observadas de elementos ligeros sólo ha servido para confirmar que los bariones, en cualquiera de sus formas (p. ej. objetos subestelares), no pueden constituir la materia perdida.

Entonces, ¿qué son los WIMPs? Los físicos de partículas han predicho la presencia de tipos de materia, aún no descubiertos, como elementos inherentes al espectro completo de las partículas elementales que encajarían en los esquemas de simetría o supersimetría. Durante algún tiempo se pensó que los neutrinos podrían ser capaces de proporcionar la masa perdida, pero resulta que hay dos problemas con esta suposición. En primer lugar, aunque se sabe que debería haber un conjunto de neutrinos primordiales en el Universo en número comparable al de los fotones presentes en la radiación cósmica de fondo (es decir, unas mil millones

de veces más neutrinos que bariones), éstos deberían ser dinámicamente "calientes" y sus propiedades en términos de los modelos básicos de formación de galaxias no son compatibles con las distribuciones de masa y velocidad en galaxias, ni las de cúmulos de galaxias. Más fundamental, y más reciente, las detecciones de neutrinos en experimentos situados bajo tierra han mostrado que éstos tienen, efectivamente, masa, pero los estrictos límites superiores impuestos a la misma indican que es demasiado pequeña para que los neutrinos contribuyan a una fracción significativa de la materia oscura. Los investigadores teóricos están considerando seriamente dos tipos de partículas: "axiones", que se predice que sean ligeros (demasiado ligeros para poder ser incluso calificados como WIMPs genuinos, aunque este nombre es sólo una descripción cualitativa) pero podrían ser muy numerosos; y "genuinos WIMPs", que podrían ser mucho más pesados pero menos numerosos. En esta Escuela de Invierno, Larry Krauss proporcionará los conocimientos físicos básicos, explicará dónde ajustan los diferentes tipos de partículas de materia oscura en los esquemas de la física de partículas y nos mostrará los eslabones entre ésta y la cosmología; mientras Bernard Sadoulet nos hablará acerca de las búsquedas de partículas de materia oscura en el laboratorio, en las que se encuentra fuertemente involucrado.

El descubrimiento de que el Universo se está acelerando, de tal manera que las ecuaciones relativistas de movimiento requieren un término adicional, el llamado "término lambda" (al que nos referimos popularmente en nuestros días como "energía oscura" o "quintaesencia"), además de proporcionar una solución al problema de la edad del Universo, parece ofrecer también un ajuste integral a los modelos de formación y evolución de galaxias en el contexto de los modelos cosmológicos. En los años precedentes a este descubrimiento, los cosmólogos comenzaban a estar insatisfechos con modelos en los que sólo alrededor de un 3% de la masa era bariónica y el 97% restante partículas de materia oscura. Tanto el cronometraje del comienzo de la formación de las galaxias como el ritmo de formación de sus estructuras, parecía estar mejor descrito si la materia oscura contribuyese con sólo el 30% de lo que se requiere para proporcionar un Universo plano. Algunos investigadores fueron tan lejos como para afirmar que esto mostraría que el Universo no era en realidad plano, sino "abierto", debido a que su densidad de materia no podría ser mucho mayor que ese 30% requerido para la planitud. El advenimiento de la energía oscura hizo posible la idea de la planitud fuera restaurada, ya que el 70% aún desaparecido (estos números son, por supuesto, aproximados) es ahora proporcionado por la energía oscura en sí misma. Durante los últimos dos años se ha obtenido una confirmación notable de esta distribución aparentemente arbitraria mediante medidas de la radiación cósmica de fondo: en particular del "espectro de potencias" de las fluctuaciones del fondo cósmico. El experimento BOOMERANG, a bordo de un globo y llevado a cabo cerca del Polo Sur, fue el primero en proporcionar resultados precisos que confirman la planitud integral del Universo a través de la medida de la frecuencia y amplitud angular del primer pico en estas fluctuaciones. Phil Mouskoff, miembro del equipo BOOMERANG, explicará el experimento y sus resultados. También revisará los resultados de otros trabajos en esta área, como los del experimento VSA, que opera en el Observatorio del Teide, y nos contará qué nuevos experimentos están siendo planificados. Debemos resaltar que Phil, tras participar en la Escuela de Invierno, viajará directamente a la Antártida para participar en otra campaña de observación. Desde que se produjo la detección y medida del primer pico, las mejoras graduales en el comportamiento de diversos experimentos han permitido la detección y medida de los siguientes tres picos del espectro. Estos resultados son consistentes con una distribución de materia oscura frente a energía oscura en una proporción aproximada de 1 a 2. En otras palabras, un Universo con un 3% de materia bariónica, alrededor de un 30% de materia oscura y un 65-70% de energía oscura parece emerger como el mejor ajuste a toda la evidencia observacional disponible en estos momentos. Será también fascinante contemplar cómo avanzará nuestro conocimiento una vez que entren en órbita los nuevos satélites construidos para medir la radiación del fondo cósmico, sobre todo Planck, en el que el IAC está activamente involucrado.



Ramón J. García López

Quisiéramos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos los que han contribuido a que esta décimo cuarta edición de las Escuelas de Invierno haya resultado tal y como esperábamos. Estamos especialmente agradecidos a Nieves Villoslada, Lourdes González, Jesús Burgos, Carmen del Puerto, Sara Gil y Ramón Castro. Así mismo, agradecemos la colaboración prestada por Miguel Briganti, Gotzon Cañada, Begoña López Betancor, el personal de los Servicios Informáticos del IAC, de Mantenimiento Civil y de los observatorios del Teide y del Roque de los Muchachos, así como del Museo de la Ciencia y el Cosmos y a todos los que han colaborado de una u otra manera. Por último, agradecer profundamente a los protagonistas de la Escuela, profesores y alumnos, por sus magníficas clases y su activa participación en la misma.

SUPERANDO A LA FICCIÓN



Lawrence Krauss

La Cosmología no tiene nada que envidiar a la ciencia ficción. El Universo parece más misterioso que nunca, con evidencias que indican la existencia de un enigmático ingrediente: la 'energía oscura'. Esta energía estaría acelerando la expansión del Universo y provendría del... ¡espacio vacío! Junto a la materia oscura, cuya naturaleza también desconocemos, sería la responsable de que el Universo sea plano, tal como predice la teoría inflacionaria. El Prof. Lawrence Krauss, de la Universidad de Case Western Reserve de Ohio (Estados Unidos), físico teórico con trabajos tanto en el campo del universo temprano como en el de la materia oscura, explica en su curso cómo se relacionan estos componentes del Universo con su geometría y evolución.

¿Hasta qué punto la materia oscura es una necesidad para la Física de Partículas y una casualidad para la Astrofísica?

"La Materia Oscura es de hecho algo totalmente natural en el contexto de la Física de Partículas. Después de todo, cuando se cuentan las partículas en el Universo sólo encontramos un barión por cada 10^9 fotones (aproximadamente). Por lo tanto, tan sólo contando podemos darnos cuenta de que la materia visible es bastante irrelevante en el Universo.

La mayoría de los fotones, que son las partículas más visibles de todas, permanecieron ocultos hasta 1964, año en el que fue descubierto el Fondo Cósmico de Microondas.

Entonces, si cualesquiera que fueran los procesos que produjeron los bariones y fotones crearon también otros objetos que interaccionan débilmente, estos objetos serían los candidatos más naturales para la materia oscura. El auténtico accidente se da en la Astrofísica, y es el hecho de que actualmente la densidad total de la materia oscura sea del mismo orden de magnitud que la materia visible. Es un misterio que estas dos densidades sean comparables."

¿Qué partícula elegiría usted como la principal candidata a materia oscura?

"Mi elección favorita cambia con el tiempo. Siempre me ha gustado la elegancia de la solución axiónica al problema de la simetría fuerte CP (carga-paridad) y el mecanismo concreto por el cual los axiones podrían resultar ser materia oscura no-relativista a pesar de ser muy ligeros. Sin embargo, el rango permitido para las masas de los axiones está siendo constantemente reducido por los experimentos y observaciones. Además, al mismo tiempo crecen las evidencias indirectas que sugieren que la supersimetría podría existir como una simetría en la naturaleza, así que pienso que la partícula supersimétrica más ligera, que se suele conocer como WIMP, cada vez parece mejor candidata."

¿Qué es la 'energía oscura' y en qué se diferencia de la 'materia oscura'?

"La energía oscura es completamente diferente a la materia oscura y mucho más misteriosa. Esto se debe a que la energía oscura parece estar asociada

"LA PARTÍCULA SUPERSIMÉTRICA MÁS LIGERA, QUE SE SUELE CONOCER COMO 'WIMP', CADA VEZ PARECE MEJOR CANDIDATA A MATERIA OSCURA."

al propio espacio vacío! Es difícil comprender que el espacio, completamente desprovisto de cualquier materia, pueda contener la energía dominante en el Universo; realmente no sabemos por qué las cosas podrían ser así. Es cierto que la Mecánica Cuántica combinada con la Relatividad sugiere que el vacío no está tan vacío, sino que está repleto de partículas virtuales que se crean y destruyen instantáneamente. Pero el problema viene cuando intentamos calcular la energía que estos procesos confieren al vacío, llegamos a valores que son absurdos. Así que estamos ante el mayor misterio de la Física de Partículas y la Cosmología contemporáneas."

¿Hasta qué punto es realmente útil la divulgación de la Física a través de la ciencia ficción, con unos planteamientos que a menudo vulneran los límites de la Física?

"Es verdad que normalmente la ciencia ficción rompe o manipula las leyes de la física. Sin embargo, creo que a pesar de ello uno de los aspectos más maravillosos de la ciencia ficción es que consigue que la gente piense en cuestiones cósmicas y los misterios del Universo. Como mi colega Stephen Hawking dice en el prefacio de mi libro *La física de Star Trek (The Physics of Star Trek)*: "La ciencia ficción como *Star Trek* no es sólo una buena diversión, sino que también sirve para un propósito serio, el de expandir la imaginación humana". En este sentido ayuda a motivar a la gente, especialmente a los niños, a interesarse por la ciencia. Cuando lo hacen descubren que el mundo real es mucho más extraño que el Universo de la ciencia ficción, como da prueba el descubrimiento de la Energía Oscura."

PERFIL

LAWRENCE M. KRAUSS nació en Nueva York en 1954. Es Profesor de Astronomía, Profesor Ambrose Swasey de Físicas y Director del Departamento de Física en la Universidad Case Western Reserve. Es un físico teórico conocido internacionalmente que trabaja en varios campos de investigación, entre los que destaca la relación entre la Física de partículas y la Cosmología. Sus trabajos incluyen estudios sobre el Universo temprano, la naturaleza de la materia oscura, la relatividad general y la astrofísica con neutrinos. El profesor Krauss obtuvo su doctorado en 1982 en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), tras lo cual estuvo varios años trabajando en el departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Yale. Además de más de 180 publicaciones científicas, ha escrito varios artículos y libros de divulgación, siendo el más reciente *La física de Star Trek*. Ha recibido varios premios por su trabajo científico, entre los que destacan en 1984 el Primer Premio de la Fundación para la Investigación de la Gravedad y en 1986 el Premio 'Presidential Investigator'. También los ha obtenido por su esfuerzo en comunicar la ciencia al gran público: en el 2001 el premio «Julius Edgar Lilienfeld» y el «Andrew Gemant», y este año el Premio de Escritura Científica del Instituto Americano de Físicas.

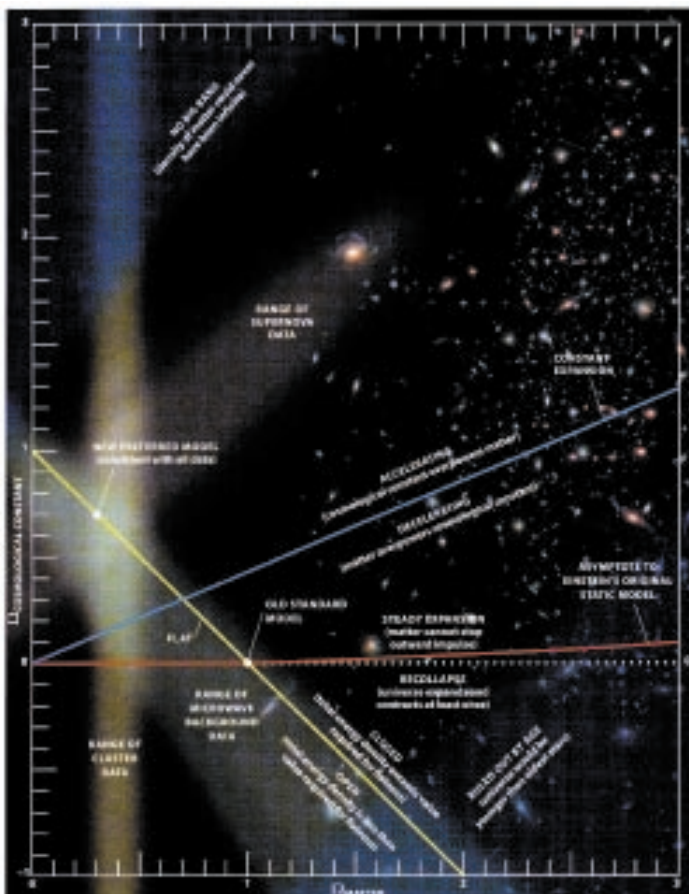


Diagrama donde se muestra una combinación de los límites para la densidad de la materia (relativa a la densidad crítica) y la densidad de energía de la constante cosmológica (relativa a la densidad crítica). También muestra la evolución del Universo en los distintos casos. El diagrama se basa en datos obtenidos con supernovas, cúmulos y radiación cósmica de fondo. (Krauss, Scientific American, Jan 1999 issue.)

Dr. Philip Mauskopf

Universidad de Gales (Cardiff)
REINO UNIDO

PROYECTO BOOMERANG



Philip Mauskopf

El Fondo Cósmico de Microondas (CMB) es la radiación residual de la etapa caliente e ionizada del Universo temprano. Esta radiación lleva viajando sin obstáculo alguno desde que el Universo tenía 300.000 años; fue entonces cuando la temperatura media del Universo bajó hasta unos 3.000 grados Kelvin, límite por debajo del cual los electrones y protones libres pueden combinarse para formar el Hidrógeno. Al expandirse el Universo esta radiación se ha 'estirado' o desplazado hacia el rojo un factor de 1000, de modo que ahora se presenta como un resplandor uniforme que viene de todas direcciones con una temperatura media de 3 grados Kelvin. El Dr. Philip Mauskopf, de la Universidad de Cardiff, es uno de los investigadores principales del proyecto BOOMERANG para el estudio del CMB.

¿Qué es el proyecto BOOMERANG y cuáles son sus objetivos?

"BOOMERANG es una colaboración entre grupos de Cosmología Observacional de Estados Unidos, Canada, Gran Bretaña e Italia, para hacer un mapa de las variaciones en el brillo del Fondo Cósmico de Microondas (CMB). Las variaciones típicas de su temperatura de 3 grados Kelvin a lo largo del cielo corresponden sólo a unas 10-100 partes por millón del total del brillo. Para medir estas variaciones, construimos un telescopio de 1,3 m y una cámara criogénica de alta sensibilidad equipada con detectores —conocidos como bolómetros— que operan a una temperatura de 0,3K. En el rango de longitudes donde predomina el CMB la atmósfera no es completamente transparente; por ese motivo diseñamos BOOMERANG para que un gigantesco globo de helio lo llevara por encima del 99% de la atmósfera.

Los globos alcanzan una altitud de 35-40 km, más de cuatro veces la altura un vuelo convencional de avión y de un 10% de la altura de la órbita de un transbordador espacial (unos 300 km). Estos globos fueron lanzados por la NASA desde la Antártida, donde el viento los lleva en un viaje alrededor del mundo - de unas dos semanas - para traerlos después de vuelta a un punto cercano al del lanzamiento, ¡cómo si se tratase de un boomerang gigantesco!

El primer viaje en globo del BOOMERANG desde la Antártida duró desde el 29 de diciembre de 1998 hasta el 9 de enero de 1999. Durante este vuelo, el telescopio fue programado para hacer barridos del cielo; de este modo obtuvo una imagen del CMB de unos 1.000 grados cuadrados con una resolución de unos 13'. Esta resolución está limitada por el tamaño del haz del telescopio y, por nuestra habilidad para reconstruir la posición exacta del telescopio en todo momento. La sensibilidad del instrumento era suficientemente elevada como para tener una buena relación señal-ruido de las fluctuaciones del CMB hasta la escala angular del tamaño del haz. Se han visto las mismas formas y manchas a 90, 150 y 240 GHz, que son las bandas de frecuencia del BOOMERANG donde existen señales dominadas por el CMB. La cuarta banda de frecuencia, a 440 GHz, está dominada por la emisión local del polvo galáctico.

Estos mapas mostraron por primera vez estructuras precisas en el CMB con una relación muy buena de señal-ruido sobre un extenso campo de visión. Por comparación, los mapas del satélite COBE que cubren todo el cielo tienen la misma relación señal-ruido que los del BOOMERANG, pero como el haz del COBE es de 7 grados en lugar de 13', hay un total de unos 1.000 haces del COBE en todo el cielo. El espectro de potencias de las fluctuaciones del CMB obtenido con el BOOMERANG puede usarse para limitar muchos de los parámetros cosmológicos fundamentales (Ω_m , H_0 , Ω_b , etc.) y la forma global del espectro de potencias observada confirma las predicciones generales del modelo inflacionario, es decir, un universo plano ($\Omega_m=1$) y una serie de picos y hendiduras en el espectro. Actualmente todavía se están realizando análisis más detallados del espectro del BOOMERANG.

Hemos preparado un segundo vuelo en globo desde la Antártida para el próximo invierno, con un nuevo conjunto de detectores diseñados para medir la polarización del CMB. Debido a que la polarización es una propiedad vectorial, midiendo la anisotropía en la polarización debería de ser posible separar las fluctuaciones del CMB que provienen sólo de variaciones escalares del universo temprano —como la densidad— de las fluctuaciones que se originaron por variaciones tensoriales —como ondas gravitatorias—. De este modo, el CMB nos permite aún 'mirar más atrás' en el tiempo —hasta la época inflacionaria, cuando se originaron las ondas gravitatorias."

¿Cuál es la relación entre el experimento BOOMERANG, desde un globo a una altitud elevada, y experimentos con base en la superficie como el experimento de Tenerife?

"Nosotros ponemos BOOMERANG a bordo de un globo para tener una sensibilidad más alta y poder medir así el CMB en un amplio rango de longitudes de onda, lo que sería imposible desde la superficie. El entorno a la altitud del globo es lo más cercano que puedes estar en el espacio sin recurrir a un satélite. Debido a que la señal del CMB es tan débil, la emisión desde la atmósfera terrestre, incluso en las longitudes

PERFIL

PHILIP MAUSKOPF nació el 6 de diciembre de 1968 en Londres. Se doctoró en la Universidad de California en Berkeley en 1997 y actualmente forma parte del departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Wales (Cardiff, Reino Unido). Su trabajo en el campo de la investigación se centra en el estudio de las anisotropías del fondo cósmico de microondas (proyecto Boomerang), la astronomía infrarroja (proyecto Blast) y el efecto Zeldovich (proyecto Bolocam). También se interesa por el desarrollo de la tecnología que permite esta investigación: bolómetros, detectores criogénicos milimétricos, electrónica de microondas, etc. Además, es miembro del área de Consultoría Tecnológica e Industrial del PPARC y colabora frecuentemente en programas de información, tanto en radio como en televisión. Entre las distinciones que ha recibido destaca el Premio Philip Leverhulme (2001-2003).

de onda en las que es casi transparente, puede deteriorar la sensibilidad de una medida. A través de la banda de longitudes milimétricas, la atmósfera es transparente en ciertas 'ventanas' entre longitudes de onda correspondientes a las líneas de emisión dominantes de componentes atmosféricos como el oxígeno y el agua.

La claridad o transparencia de estas ventanas es mejor para las frecuencias más bajas (como 15 ó 30 GHz) y va empeorando hacia las bandas milimétricas donde el CMB es más fuerte. Las desventajas de los vuelos en globo es que son de corta duración, y no hay oportunidad durante el trayecto de reparar u optimizar ninguna parte del telescopio o del receptor. Por el contrario, los experimentos desde el suelo como el de Tenerife pueden tomar datos por un periodo mucho más prolongado de tiempo (superando su baja sensibilidad instantánea comparada con la del globo) y reparar o mejorar la configuración del sistema en cualquier momento. Este es el motivo por el cual un experimento a bordo de un globo requiere un nivel muy alto de preparación, planificación y sobre todo, de seguridad para los elementos claves del sistema. Por ejemplo, en BOOMERANG teníamos cuatro sensores distintos para medir la posición a donde apuntaba el telescopio y dos computadoras idénticas para leer esos sensores y controlar la posición."

¿Cuál es la importancia que tienen los picos en amplitud del espectro de potencias del CMB con respecto a: a) que el universo sea plano, y b) la cantidad de energía oscura y materia oscura?

"Los mapas del CMB hechos por el BOOMERANG pueden convertirse a través de un análisis similar al de Fourier –usando armónicos esféricos en lugar de ondas sinusoidales- en un espectro de potencias de las variaciones de la temperatura en el cielo. Este espectro de potencias representa la contribución a las variaciones del brillo en el cielo (separadas en diferentes escalas angulares) que corresponden a diferentes escalas físicas o tamaños en el universo temprano, etapa en la que fueron emitidos los fotones. BOOMERANG halló que el espectro de potencias tenía varios picos a escalas angulares de aproximadamente 1, 0.3 y 0.2 grados y, en general el espectro de potencias parecía mostrar oscilaciones en frecuencias armónicas espaciales. Modelos teóricos habían predicho la existencia de estas oscilaciones, siempre que las variaciones físicas entre distintos lugares del universo primitivo fueran principalmente fluctuaciones en la densidad de materia y energía, además de adiabáticas.

a) Bajo estas condiciones, en la época en que el Universo se hizo transparente se pueden calcular las longitudes características de la oscilación primaria y sus armónicos. Si se compara esta longitud con la escala angular de las oscilaciones medidas por BOOMERANG, podemos hallar la curvatura a gran escala del Universo.

¿Cómo hacemos esto? Si tomas un objeto de tamaño conocido, como la luna, sabes que se verá más y más pequeño cuanto más alejado esté. En un universo plano, este empequeñecimiento de la imagen pasará eternamente, sin importar lo lejos que sitúes el objeto. Debido a que la luz se curva en un espacio curvo, si hay una curvatura a gran escala - aunque débil - del espacio, cuanto más lejos se sitúe un objeto más diferirá su ángulo aparente del que cabría esperar en un universo plano. El espacio mismo actúa como una gigantesca lente: ¡una lente gravitatoria! Si el espacio tiene una curvatura negativa –es decir, está curvado como la superficie de un globo-, los objetos distantes parecerán mayores de lo esperado, mientras que si el espacio está curvado positivamente, parecerán meno-

res. Por lo tanto, para calcular la geometría del espacio necesitamos saber sólomente el tamaño (en metros) de un objeto, su distancia y medir su ángulo aparente (la ampliación por la lente gravitatoria). Los objetos más lejanos del Universo que podemos ver son las manchas claras y oscuras en la superficie de dispersión ¡en el CMB! La física teórica predice el tamaño característico de estas manchas en unidades de metros y que la distancia o desplazamiento al rojo a la superficie de última dispersión viene fijada por la temperatura de recombinación; de este modo, una medida del tamaño angular de estas manchas constituye a su vez una medida de la curvatura del Universo. Los resultados de varios experimentos (BOOMERANG, DASI, VSA, MAXIMA, etc.) nos ofrecen claras evidencias de que la geometría del Universo está cercana a la plana, es decir, que la curvatura a gran escala del Universo es pequeña.

b) Si la medida de la ampliación en conjunto de las fluctuaciones del CMB nos indica la curvatura del espacio y la densidad total de la energía del Universo, las alturas relativas de los picos y las oscilaciones del espectro de potencia se relacionan con la composición del Universo; en los modelos actuales, con la cantidad de materia bariónica, materia oscura y energía oscura que existe. Las señales que vemos del CMB provienen de fotones que se han dispersado de electrones y protones. Las oscilaciones en el espectro de potencias se deben a las oscilaciones del fluido de bariones y fotones en el Universo temprano. En los puntos del fluido donde hay un exceso de densidad los bariones empiezan a colapsar debido a la fuerza de la gravedad. Cuando esto ocurre los bariones se calientan y también se eleva la temperatura de los fotones circundantes, ya que están estrechamente acoplados. Los fotones ejercen una fuerza recuperadora de presión de radiación en los bariones que colapsan, hasta que ésta supera a la fuerza de la gravedad. Entonces, presión de radiación provoca que la región que se colapsaba comience a expandirse de nuevo, estableciéndose un comportamiento oscilatorio. Esta presión de la radiación es la misma que evita que el Sol colapse sobre sí mismo debido a la gravedad y que se convierta en un agujero negro.

Por lo tanto, las alturas de los picos en el espectro de potencias oscilatorio están relacionados con la proporción entre bariones y fotones del universo temprano. En concreto, la proporción entre las alturas del primer y segundo pico da una estimación bastante directa de la densidad de bariones. Los picos alternados de este espectro representan escalas de distancias donde las fluctuaciones de densidad en el fluido fotones-bariones han alcanzado el máximo de compresión o se han reexpandido hasta la máxima rarefacción. Tomemos el caso de la sobredensidad de materia: si los bariones están comprimidos al máximo, su propia gravedad contribuye a la fuerza de la atracción gravitatoria; una densidad más alta de bariones llevaría a estos picos a estar en fase (picos impares), mientras que una densidad baja de bariones provocaría picos fuera de fase (picos impares). Este incremento de picos en fase para densidades de bariones más altas es conocido como arrastre de bariones (*barion drag*).

Comparando la razón entre las alturas del primer y segundo pico (o del tercero y el cuarto) en el espectro de potencias del CMB se puede determinar la densidad total de bariones en el Universo.

Sorprendentemente, cuando se hace esto con los datos que tenemos ahora encontramos que la densidad bariónica es $\Omega_b h^2 = 0.02$, resultado muy próximo al obtenido según las predicciones de abundancias relativas para los elementos químicos en la Nucleosíntesis: ¡tenemos una forma completamente distinta de poner a prueba los modelos cosmológicos!"

Si hablamos de la ciencia como una aventura, ¿el hecho de trabajar en la Antártida hace más atractivo este campo de investigación?

"He hablado con muchísima gente que está fascinada por la Antártida y les encantaría ir por el aspecto aventurero, pero también he conocido a un mismo número de personas que no tienen ningún interés en ello. Como dice mi mujer: "¡Prefiero ir a una playa agradable y CÁLIDA antes que a una donde el mar está congelado!". Sin embargo, lo cierto es que la Antártida es una de las pocas fronteras que quedan para los exploradores de hoy en día. Creo que atrae a las personas que buscan un desafío y una experiencia única; con toda seguridad se conoce a gente muy interesante en la Antártida. Si no tienes algo que hacer, la Antártida puede ser el sitio más aburrido del planeta. Pero los que estábamos involucrados en BOOMERANG teníamos cientos de cosas por resolver; ¡de hecho, apenas hubo un momento aburrido! Casi siempre estábamos al borde del pánico por un motivo u otro: un crióstato roto, la búsqueda de un escape RF, la calibración de los sensores, el lanzamiento de pequeños globos atados, la electrónica del control de dirección, etc... Afortunadamente, la base de McMurdo está pensada justo para gente como nosotros – científicos trabajando las 24 horas del día, parando sólo para comer y dormir. Para mí, la experiencia fue una de las más memorables de mi vida (hasta ahora...)."

Prof. John A. Peacock

Observatorio Real de Edimburgo
REINO UNIDO

UN MAPA DEL UNIVERSO

El origen de los catálogos de estrellas se remonta casi a los principios mismos de la humanidad. Hace más de 5000 años en Egipto, China, América Central o Mesopotamia ya se dibujaban estos mapas en las paredes de los templos o en tablillas de piedra. Estos catálogos del cielo fueron mejorando gracias a revolucionarios inventos como el telescopio, la cámara fotográfica o el espectrógrafo. Actualmente, la combinación de las cámaras CCD con grandes telescopios y potentes ordenadores permite obtener mapas cada vez más precisos y extensos. Como indica el Prof. John Peacock, del Observatorio Real de Edimburgo (Reino Unido), con estos reconocimientos del cielo se han encontrado nuevas "especies" cósmicas y, actualmente, aún son indispensables para localizar objetos exóticos, además de ayudarnos en la elaboración de los mejores modelos cosmológicos.

¿Cuál es la importancia de los *surveys* (cartografiados) en la Astrofísica actual?

"Los *surveys* tienen gran importancia. Históricamente, han revelado la existencia de muchas clases de nuevos objetos; actualmente son aún esenciales para localizar objetos extremos poco comunes, como cuásares con un desplazamiento al rojo de siete. Para mu-

chas cuestiones cosmológicas, los *surveys* son imprescindibles, ya que lo que se busca es medir las propiedades medias del Universo. Esto implica que debemos estudiar volúmenes colosales, para lo que se requiere hacer *surveys* astronómicos."

¿Cuál es la contribución específica de un *survey* en velocidad (tridimensional) frente a un *survey* sólo de la distribución de los objetos en el cielo?

"Mediante la medida de desplazamientos al rojo se obtiene una imagen casi tridimensional del Universo. Aunque los datos en dos dimensiones pueden ser deproyectados, este método da una relación señal-ruido mucho más baja y está afectado por pequeños errores sistemáticos. Además, la distorsión de las distancias aparentes que es deducida de los desplazamientos al rojo puede ser útil ya que el campo de velocidad peculiar cósmico debería estar relacionado con el campo de densidades; esto es así puesto que ambos son generados por el colapso de estructuras bajo la fuerza de la gravedad. Por todo ello,



John Peacock

**"PARA MUCHAS
CUESTIONES
COSMOLÓGICAS,
LOS SURVEYS SON
IMPRESINDIBLES,
YA QUE LO QUE SE
BUSCA ES MEDIR
LAS PROPIEDADES
MEDIAS DEL
UNIVERSO."**

los *surveys* en velocidades ofrecen un conjunto de datos mucho más significativo del que se deduciría únicamente de las posiciones en tres dimensiones."

¿Qué implicaciones tienen las medidas de las velocidades peculiares de los cúmulos galácticos en los actuales modelos cosmológicos?

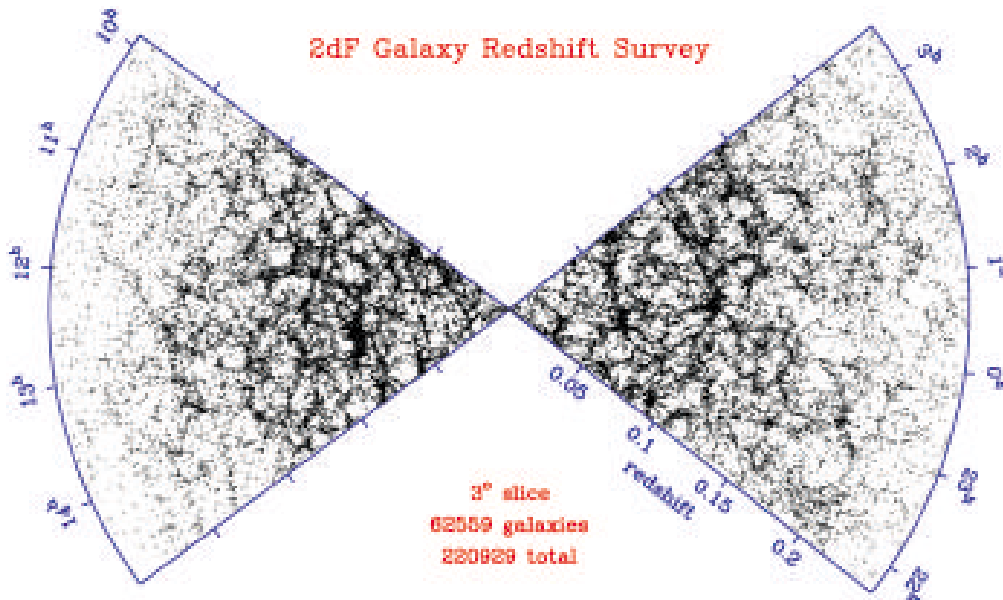
"Las velocidades peculiares pueden ser estimadas directamente usando indicadores de distancia. Los resultados más precisos provienen de los cúmulos, donde se puede promediar sobre un gran número de galaxias. Sin embargo, incluso así la precisión no es muy grande: los indicadores de distancia que se pueden aplicar a la mayoría de las galaxias sólo tienen una precisión del 20%. Las medidas más precisas, por ejemplo las de supernovas, no existen en un número suficiente. Creo que la situación actual es que podemos predecir las velocidades peculiares de los cúmulos de otros datos mejor de lo que lo podemos hacer directamente."

Cuando se generalice el uso de grandes telescopios (mayores de 8 metros) se dejará más tiempo libre a los telescopios más pequeños (la clase de 4 metros) para proyectos de cartografiado, ¿supondrá esto un salto cualitativo en este campo?

"Esto ya empieza a ocurrir. La disponibilidad de Gemini era un elemento clave en la decisión de dedicar el telescopio anglo-australiano de 4 metros a los *surveys* extensos y fue esto lo que motivó la construcción del exitoso espectrógrafo de dos grados de campo. La cámara de campo ancho que se está preparando para el telescopio infrarrojo UKIRT de Reino Unido es otro proyecto similar. Por supuesto, seguirá existiendo ciencia que no requiera un telescopio de 8 metros; consideraciones de eficiencia exigirán que se realice usando telescopios menores. Por lo tanto, continuarán en uso telescopios de 4 metros para propósitos generales."

PERFIL

JOHN ANDREW PEACOCK nació en Shaftesbury (Dorset, Reino Unido) el 27 de marzo de 1956. Actualmente trabaja como Profesor de Cosmología en el Departamento de Física y Astronomía de la Universidad de Edimburgo. Obtuvo el doctorado en 1980, en el Laboratorio de Cavendish de Cambridge. Dentro de su ámbito de investigación se incluyen la formación de las galaxias, la distribución de cuásares y galaxias activas lejanas, las lentes gravitatorias y las propiedades de las galaxias activas. Es miembro fundador del "Consortio Virgo para supercomputación en Cosmología" y Director en Reino Unido del "Consortio para el Cartografiado 2dF del desplazamiento al rojo de las galaxias". Además de sus más de 100 trabajos científicos publicados, ha escrito el libro de texto Física Cosmológica. Entre las distinciones que ha obtenido por su labor científica destacan en el 2002 una "PPARC Senior Research Fellowship" y la de "ISI Highly-Cited Researcher". Sus aficiones son escuchar música clásica e interpretar piezas con el clarinete, el senderismo y la escalada.



Cartografiado del desplazamiento al rojo de más de 60.000 galaxias, realizado con el instrumento 2dF del Telescopio AngloAustraliano.

Prof. Bernard Sadoulet

Universidad de California (Berkeley)
EE.UU.

EN BUSCA DE WIMPs



Bernard Sadoulet

WIMPs, MACHOs, ... si hemos de juzgarla por sus acrónimos, la Cosmología no parece una disciplina en absoluto aburrida. Los candidatos a materia oscura se han multiplicado durante las últimas dos décadas, aunque actualmente la comunidad científica tiene sus «favoritos». O favoritas, porque una de las posibilidades más prometedoras es la de las Partículas Masivas de Interacción Débil, conocidas por sus siglas en inglés como WIMPs (*Weakly Interacting Massive Particles*), creadas para contrastar con *Massive Compact Halo Objects* o MACHOs. Estas partículas serían los miembros más ligeros de la familia de partículas supersimétricas, pero por ahora no se ha podido demostrar su existencia; ni de ellas, ni de sus «hermanas mayores». Sin embargo, la búsqueda continúa con sofisticados experimentos, como explica el Profesor Sadoulet, director del Instituto de Cosmología y de Astrofísica Nuclear y de Partículas de la Universidad de California y portavoz del Proyecto de Búsqueda Criogénica de Materia Oscura.

¿Qué es una WIMP?

"Las Partículas Masivas de Interacción Débil (WIMPs) componen una clase genérica de candidatas para la materia oscura que impregna el Universo. Se trata de partículas masivas que se produjeron en el universo temprano y caliente; cuando la temperatura del Universo era más baja que su masa salieron del equilibrio y de algún modo consiguieron sobrevivir hasta ahora para formar la materia oscura.

Para que actualmente la densidad en el espacio de las WIMPs sea la de la materia oscura, sus tasas de interacción tienen que ser del orden de magnitud de las «interacciones débiles», tal como son definidas por los físicos de partículas. Por lo tanto, la Cosmología, con hipótesis bastante generales, apunta a una física con una escala de energías importante para los físicos, la de los bosones vectoriales W y Z. Viendo el problema desde el otro punto de vista, se sabe que el Modelo Estándar de Física de Partículas es inestable; para

estabilizarlo hemos de introducir nueva física en esas escalas, como la nueva familia de partículas supersimétricas. El miembro más ligero de esta familia tendría naturalmente la tasa apropiada de interacción para sobrevivir hasta la actualidad e integrar la materia oscura. Es esta convergencia entre Física de Partículas y Cosmología lo que constituye la justificación más importante para la búsqueda de las WIMPs."

¿Podría explicar brevemente cómo se lleva a cabo la búsqueda experimental de WIMPs y resumir los resultados obtenidos hasta el momento?

"Si las WIMPs constituyen la mayoría de la materia oscura, entonces estarán presentes en el halo de nuestra galaxia y deberían de ser detectables en la Tierra. El método más directo es buscar la dispersión que experimentan en un blanco apropiado. El desafío experimental es inmenso: las tasas de interacción esperadas son muy pequeñas (como mu-

"TAMBIÉN ES POSIBLE QUE TANTO LA MATERIA COMO ENERGÍA OSCURAS, A LAS QUE RECURRIMOS PARA EXPLICAR EL UNIVERSO DENTRO DEL MARCO ESTÁNDAR DE LA GRAVEDAD, NO EXISTAN REALMENTE Y SE TRATE DE «EPICICLOS» QUE INVENTAMOS PARA QUE UNA TEORÍA INCOMPLETA SIGA SIENDO COMPATIBLE CON OBSERVACIONES CADA VEZ MÁS PRECISAS."

cho unas pocas interacciones por kilogramo de blanco y por semana) y la deposición de energía es muy pequeña. Por lo tanto necesitamos detectores muy sofisticados, que operen a grandes profundidades bajo la superficie para estar protegidos de los rayos cósmicos y el fondo de radiación ambiental, ya que hasta en la mejor disposición experimental este fondo supera a la señal esperada. Incluso si el anuncio de un descubrimiento hecho por un grupo parece ser prematuro, los experimentos actuales están progresando rápidamente y empiezan a entrar en la región de sensibilidad que es de interés para la Cosmología."

En su opinión, ¿qué fracción de materia oscura podría tratarse de WIMPs?

"Quizás el 95%, siendo el resto neutrinos."

¿Cuáles son las otras alternativas serias?

"Otro candidato que satisface el mismo criterio de responder tanto a una pregunta de Cosmología como de Física de Partículas es el axión, que también se está buscando de forma bastante activa.

También es posible que tanto la materia como energía oscuras, a las que recurrimos para explicar el Universo dentro del marco estándar de la gravedad, no

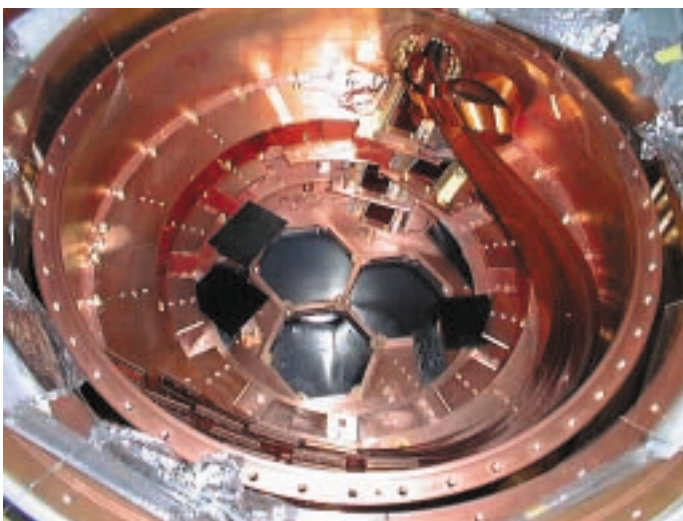
existan realmente y se trate de «epiciclos» que inventamos para que una teoría incompleta siga siendo compatible con observaciones cada vez más precisas. Esta nueva física gravitatoria podría originarse por ejemplo de dimensiones adicionales ocultas que parecen necesarias para una teoría cuántica de la gravedad (la famosa teoría de cuerdas o teoría M). Incluso bajo esa hipótesis, la búsqueda de la materia oscura sigue constituyendo un importante objetivo: su descubrimiento implicaría que no se trata de un epiciclo."

Usted fue el director de un Centro para Astrofísica de Partículas y actualmente lo es del Instituto de Cosmología y de Astrofísica Nuclear y de Partículas (INPAC) de la Universidad de California. ¿Hasta qué punto cree que la creación de específicos para la Astrofísica de partículas implica un apoyo para los físicos de partículas y cuál ha sido el impulso que le ha dado a la Astrofísica?

"No tengo ninguna duda de que los Centros son un importante complemento para los mecanismos regulares de financiación, ya que son herramientas para centrar los recursos en áreas importantes. La *National Science Foundation* ha establecido nuevos centros de Astrofísica, en particular un Centro para Cosmología Física en la Universidad de Chicago y un Centro para Óptica Adaptativa en la Universidad de Santa Cruz."

PERFIL

BERNARD SADOULET nació en Niza, Francia. Se graduó en 1963 en la «Ecole Polytechnique» y obtuvo su doctorado en la Universidad de París-Orsay. Es, por su formación, un físico de partículas elementales y como tal ha tenido la oportunidad de trabajar en dos prestigiosos proyectos que culminaron en sendos Premios Nobel. El primero fue el experimento Mark I en el acelerador estadounidense del SLAC, que descubrió el mesón J/ψ , el leptón t y el quark «encanto». El otro tuvo lugar en el UA1 del CERN, el descubrimiento de los bosones intermedios W y Z . Sin embargo, en 1984 decidió reorientar su carrera hacia la Astrofísica de partículas y la Cosmología. Primero trabajó como profesor de Física en la Universidad de California y más tarde fue el Director del Centro de Astrofísica de Partículas, uno de los primeros centros de la National Science Foundation (NSF). Actualmente es el Director del Instituto de Cosmología y de Astrofísica Nuclear y de Partículas (INPAC) de la Universidad de California. También es el portavoz del proyecto Búsqueda Criogénica de Materia Oscura (CDMS), financiado por la NSF y el Departamento de Energía de Estados Unidos.



Vista de las capas más internas del criostato utilizado en la CDMS (Cryogenic Dark Matter Search). Este criostato ha sido diseñado y construido por el LBNL (Lawrence Berkeley National Laboratory) y la UCB (Universidad de California, en Berkeley).

Prof. Renzo Sancisi

Observatorio Astronómico de Bolonia
ITALIA

CURVAS DE ROTACIÓN



Renzo Sancisi

En la década de los 30 se obtuvieron las primeras evidencias experimentales de la materia oscura, deducidas de las velocidades de dispersión de las galaxias en los cúmulos. Sin embargo, no fue hasta cuarenta años más tarde cuando la comunidad científica la comenzó a aceptar como un componente más del Universo. Este cambio se debió en gran parte a las medidas de curvas de rotación de las galaxias que hicieron astrónomos ópticos como Vera Rubin y Kent Ford y radioastrónomos como Renzo Sancisi, que utilizó la línea de 21 cm para detectar la emisión del hidrógeno atómico mucho más allá del rango óptico. Estas medidas apuntaban claramente a una explicación insólita: la existencia de grandes halos de materia oscura que formaban las partes más externas de cada galaxia. Hoy en día, estas curvas de rotación aún constituyen una de las herramientas clave para obtener información en este campo. De ello habla el Profesor Renzo Sancisi, del Observatorio Astronómico de Bolonia, en su curso sobre la cinemática interna de galaxias.

¿Qué podemos aprender de las curvas de rotación de las galaxias en hidrógeno neutro que no podamos descubrir mediante otras medidas (por ejemplo, de estrellas o de la emisión de gas ionizado)?

"La principal ventaja de usar curvas de rotación en HI proviene del hecho de que los discos de HI tienen una extensión radial mucho mayor que los discos estelares y por lo tanto sus curvas de rotación pueden ser estudiadas mucho más lejos radialmente. La forma (descendente o plana) de las curvas de rotación en las partes más externas de las galaxias espirales proporciona la prueba definitiva de la presencia de halos de materia oscura."

Normalmente, la planitud de las curvas de rotación de las galaxias se considera uno de los argumentos más importantes a favor de que la

materia oscura constituya la mayoría de la masa del disco de una galaxia. (a) ¿Hay otros argumentos que apoyen esta interpretación?, b) ¿hay hipótesis alternativas que puedan explicar razonablemente las curvas de rotación planas, sin necesidad de la materia oscura?, c) en cualquier caso, ¿son todas las curvas de rotación planas?

"a) Hay otros argumentos (por ejemplo, la estabilidad de los discos) que se usan para apoyar la hipótesis de la materia oscura, pero no son tan convincentes como la evidencia dinámica de las curvas de rotación.

b) La mejor alternativa conocida para la hipótesis de la materia oscura es la Dinámica Newtoniana Modificada (MOND) que ajusta excelentemente las curvas, pero que continúa siendo completamente «ad hoc».

"LA MEJOR ALTERNATIVA CONOCIDA PARA LA HIPÓTESIS DE LA MATERIA OSCURA ES LA DINÁMICA NEWTONIANA MODIFICADA (MOND)".

c) No todas las curvas de rotación son planas. Generalmente, las galaxias de clase tardía, de baja luminosidad, presentan curvas de rotación que suben hasta el último punto que se mide y no alcanzan la parte plana. En el otro extremo de la secuencia morfológica hay sistemas compactos y altamente luminosos que tienden a tener curvas de rotación descendientes en sus partes externas. En cualquier caso, aún necesitan de la materia oscura."

España está involucrada en el proyecto ALMA. ¿Podría darnos su opinión sobre la importancia de este proyecto y las razones? ¿Cuál podría ser su mayor impacto en nuestro conocimiento del Universo?

"Se espera que ALMA desempeñe un papel decisivo en muchos campos, en mi opinión particularmente en dos:

-el estudio de la formación planetaria (discos protoplanetarios)

-la exploración del Universo a desplazamientos al rojo intermedios y altos (formación de las estrellas y origen y evolución de las galaxias).

Como astrónomo veterano, ¿qué cree que las nuevas generaciones pueden hacer mejor y peor que la suya?

"Los jóvenes astrónomos parecen superiores en cuanto a su conocimiento del funcionamiento de la tecnología y en su velocidad de adaptación frente a las nuevas tecnologías de la información. Esto puede al mismo tiempo convertirse en un inconveniente, si se compara con las generaciones anteriores para las que había, probablemente, más tiempo y oportunidades para pensar."

PERFIL

RENZO SANCISI nació en Santarcangelo (Italia), el 12 de mayo de 1940. Estudió físicas en la Universidad de Bolonia, donde también obtuvo su doctorado en 1965. Tras ello, estuvo tres años en el Observatorio de Leiden y más tarde como investigador y profesor en el Instituto Kapteyn (Universidad de Groningen). Actualmente es profesor de Astronomía en el Observatorio Astronómico de Bolonia y profesor visitante del Instituto Kapteyn. Su principal interés en el campo de la investigación es la estructura y dinámica de las galaxias espirales: curvas de rotación, interacción entre galaxias, conexión entre el halo y el disco, etc.



Galaxia NGC1300. Composición de las imágenes en los filtros B, V e I de la galaxia espiral barrada NGC 1300 observada desde el «Isaac Newton Telescope» en el Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma) por J. Cepa y A. M. Varela. En ella se pueden observar las estructuras típicas de este tipo de galaxias: bulbo, disco, barra y brazos espirales. © José Alfonso López Aguerrí, Mercedes Prieto, Casiana Muñoz-Tuñón y Antonia M. Varela (IAC).

Prof. Brian Schmidt

Universidad Nacional Australiana
AUSTRALIA

TESTIGOS DEL UNIVERSO



Brian Schmidt

Las estrellas más masivas acaban sus días en una violenta explosión, conocida como 'supernova'. Estas explosiones, que alcanzan un brillo muy intenso, nos sirven para determinar las distancias a objetos lejanos. Así, observando supernovas distantes podemos saber cómo era el Universo en el pasado. De ahí que en 1998 se convirtieran en las protagonistas de una auténtica conmoción en Cosmología: la expansión del Universo parecía estar acelerándose. El Prof. Brian Schmidt, de la Universidad Nacional Australiana, es el científico líder del "High-Z SN Search", uno de los dos equipos que descubrió las evidencias de esta aceleración. En su curso presenta los resultados que muestran la aceleración de la expansión del Universo.

¿Qué margen de confianza ofrecen las medidas de grandes distancias en el Universo mediante el uso de las Supernovas como candelas estándar y cuáles son las principales fuentes de error en tales medidas?

"Las Supernovas han sido presentadas desde hace tiempo como la mejor elección para medir distancias cosmológicas, pero esto se basaba más en algo parecido a una creencia religiosa que en una observación realmente científica. Esto no quiere decir que no haya estudios sobre la función de las Supernovas Ia como candelas estándar, sino que la información recogida no era de la suficiente calidad como para saber qué es lo que ocurre realmente.

A comienzos de los 80, la precisión de los datos obtenidos con las CCDs comenzó a ser lo suficientemente alta como para utilizar las Supernovas Ia eficientemente. Usando esta tecnología, Mario Hamuy, Jose Maza, Nick Suntzeff, Mark Phillips y sus colaboradores reunieron en Chile una gran cantidad de información. Estos datos mostraron que las Supernovas Ia no son candelas estándar perfectas, pero indicaron que existe una correlación directa entre el brillo y la forma de la curva de luz; sin embargo, la dispersión de esta relación parece que es del 14% en luminosidad, permitiendo que las distancias sean medidas con errores en torno al 7%. Además, el conjunto de datos mostró que las propiedades medias del tipo Ia de supernovas variaba en función de cuál fuera el tipo de galaxia que las alberga-

ba. Podría parecer que esto asesta un golpe mortal a cualquier intento de medir distancias correspondientes al pasado del Universo, ya que el tipo principal de supernovas cambiará según retrocedamos, al igual que ocurre en el Universo Local con los tipos de galaxias (que tienen edades estelares medias muy diferentes). Sin embargo, lo que salva al experimento es el hecho de que la relación de distancias basada en la forma de la curva de luz se aplica igual de bien a todas las supernovas, independientemente del tipo de galaxia. Es decir, que aunque las propiedades medias de las supernovas cambien con el tiempo, seríamos capaces de medir sus distancias.

Para medir distancias con las supernovas hay una variedad de problemas fotométricos sobre los que nos hemos de preocupar, tales como las K-correcciones (que nos permiten transferir las observaciones de objetos lejanos y cercanos en el mismo sistema). Estos aspectos son fastidiosos y es difícil de conseguir que estén perfectos, pero al final lo concerniente a la fotometría no es nuestra principal preocupación. La limitación está en nuestro conocimiento de las supernovas tipo Ia.

Aunque antes haya argumentado que podemos usar las SN Ia para mirar hacia atrás en el tiempo con total impunidad, sus propiedades podrían estar cambiando de un modo sutil que no sea evidente deducir de nuestras observaciones de las supernovas cercanas. Podría haber cambiado la naturaleza del polvo que las oscurece, o las mismas explosiones supernova. Sin embargo, debido a que

"EN 1998, DE REPENTE, LA INESPERADA EVIDENCIA DE UN UNIVERSO ACELERADO (QUE PUEDE DEBERSE A UNA CONSTANTE COSMOLÓGICA) PERMITÍA A LA GENTE ACEPTAR LA CONSTANTE COSMOLÓGICA COMO UNA POSIBILIDAD REAL; PUESTO QUE TODO ENCAJABA DE UNA FORMA SENCILLA, FUE ACEPTADA RÁPIDAMENTE POR UNA GRAN PARTE DE LA COMUNIDAD. (...) SIN EMBARGO, A MÍ TODAVÍA ME PREOCUPA QUE FALTE UNA PIEZA IMPORTANTE DEL PUZZLE."

nuestros conocimientos teóricos son pobres, no tenemos aún un buen modo de estimar cuánto podría estar variando la población de SN Ia al no poder darnos cuenta del cambio basándonos sólo en nuestras medidas. Esta incertidumbre, que lo más probable es que no esté afectando a nuestro experimento en absoluto, aún es lo que domina nuestro trabajo sobre todo lo demás, al ser tan difícil de cuantificar."

Hasta muy recientemente la mayoría de los astrofísicos pensaban que el Universo se estaba decelerando. ¿Por qué de repente se ha aceptado que en realidad está acelerándose?

"Hasta 1998, creía que el Universo se estaba decelerando -¿por qué iba a ser de otra forma?-. En ese año, cuando los equipos de investigadores "High-Z" (Alto Z) y "Supernova Cosmology" (Cosmología vía Supernovas) anunciaron independientemente (sin conocimiento del trabajo del otro grupo) las pruebas de un universo en aceleración, la Cosmología ya se encontraba con un problema. Los físicos teóricos estaban absolutamente convencidos de la inflación y los observacionales se mostraban igualmente seguros de que la Constante de Hubble (H_0) era mayor que 60 km/s/Mpc y la densidad total de materia del Universo menor que 1, de modo que ambas posturas no eran fácilmente reconciliables. Alguna gente decía "oh, seguro, si tuviéramos una constante cosmológica para incrementar la densidad total del Universo hasta 1, entonces todo estaría bien", pero inventarse el 80% del Universo para 'arreglar' la Cosmología no era algo que la gente estuviera dispuesta a hacer en 1997. En 1998, de repente, la inesperada evidencia de un Universo acelerado (que puede deberse a una constante cosmológica) permitía a la gente aceptar la constante cosmológica como una posibilidad real; puesto que todo encajaba de una forma sencilla, fue aceptada rápidamente por una gran parte de la comunidad.

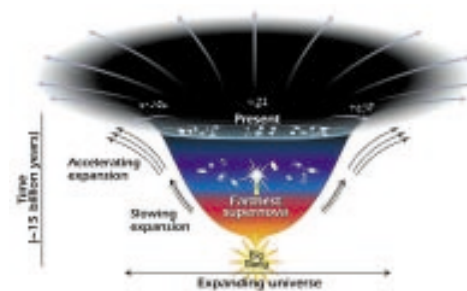
Esta aceptación ha continuado aumentando debido a las medidas del Fondo Cósmico de Microondas, que muestran un Universo casi plano. Además, también ha contribuido a ello las evidencias de que la materia de partículas sólo constituye un 30% de la densidad crítica del Universo, obtenidas a partir de los mapas de desplazamiento al rojo 2dF [sistema de fibra óptica con un campo de 2 grados]. Todo parece señalar a una Constante Cosmológica. Sin embargo, a mí todavía me preocupa que podría faltar una pieza importante del puzzle."

¿Cuál es la causa de la aceleración? ¿Qué implicaciones tiene para el destino último del Universo?

"Como observador, sólo mido la aceleración e intento no tener ninguna idea preconcebida sobre lo que la está causando. Actualmente, desde mi punto de vista, la Constante Cosmológica es la solución más sencilla pero ciertamente no la única para un Universo en aceleración. Si se trata realmente de la Constante Cosmológica, el Universo seguirá expandiéndose para siempre; si se trata de alguna variante - incluso de alguna que no tenemos actualmente ninguna oportunidad de medir- el futuro del Universo está por determinar. Los físicos teóricos pueden idear casi cualquier cosa."

¿Cuál es el papel de los grandes telescopios, como el GTC, de 10 m, que pronto estará operativo en Canarias, en nuestra habilidad de determinar distancias cosmológicas mediante las supernovas, y cuáles son las implicaciones cosmológicas predecibles?

"Estamos entrando en una nueva era de la cosmología con supernovas, con extensos programas para observar cientos o incluso miles de ellas. El GTC desempeñará un papel crucial en ello porque puede obtener 20 ó 30 espectros de supernovas cada noche y, cuando tenemos que mirar a cientos de objetos, simplemente no hay tiempo nocturno suficiente para usar un telescopio lento (de la clase de 4 m) para obtener los datos. Si alguien quiere observar nuestras supernovas, ¡las estaremos poniendo en la Web en tiempo real! Nos encantaría trabajar con ustedes."



En el diagrama se muestra la evolución de la expansión del Universo, en el que se observa una primera etapa de expansión desacelerada y una segunda en la que el Cosmos se expande aceleradamente. Los datos han sido obtenidos mediante el estudio de supernovas, en concreto de la SN 1997ff, la supernova más lejana que se ha detectado hasta el momento.

PERFIL

BRIAN P. SCHMIDT nació en Montana (EE.UU.) el 24 de febrero de 1967. Obtuvo el doctorado en Astronomía en la Universidad de Harvard en 1993. Sus intereses en el campo de la investigación comprenden la Cosmología Observacional, las Supernovas, los Estallidos de Rayos Gamma, la fotometría y los cartografiados extensos del cielo. Actualmente es director científico de "ESSENCE", una colaboración internacional para descubrir y hacer un seguimiento de las Supernovas de tipo Ia, cuyo objetivo es medir las propiedades de la Energía Oscura. Además, es miembro de los proyectos del Telescopio Espacial Hubble "Supernova Intensive Survey" (Búsqueda intensiva de Supernovas) y "REACT Gamma Ray Burst Follow up" (Seguimiento de los Estallidos de Rayos Gamma REACT). Por su trabajo académico ha ganado diversos premios y distinciones, entre los que destacan la distinción de "Descubrimiento del año" de Science en 1998, el Premio "Bok" de la Universidad de Harvard a la tesis astronómica más destacada en el 2000 y la medalla "Pawsey" de la Academia Australiana de Ciencias en el 2001. Actualmente es miembro de la Escuela de Investigación de Astronomía y Astrofísica (MSSSO).

Prof. Peter Schneider

Universidad de Bonn
ALEMANIA

ESPEJISMOS CÓSMICOS



Peter Schneider

PERFIL

PETER SCHNEIDER nació en 1958 en Alemania. En 1984 obtuvo su doctorado en Físicas en la Universidad de Bonn. Ha trabajado como investigador en el Instituto de Astrofísica Max Planck y en el Laboratorio de Astrofísica de la Universidad de Colorado. Fue profesor de la Universidad de Munich y, desde el año 2000, es profesor de Astrofísica de la Universidad de Bonn. Ha obtenido varios premios por sus investigaciones, entre los que destacan el premio "Geffrub" de la Universidad de Bonn, el "Dieter-Rampacher" y la medalla "Otto-Hahn", los tres en 1985, y el Premio de Física de la Academia de las Ciencias de Göttingen en 1986.

Además de su trabajo como investigador, desde 1998 es Editor de la Sección de Cartas de Astronomy and Astrophysics. También forma parte desde este año del Comité de la "Escuela de Investigación Internacional Max Planck para astronomía infrarroja y radio astronomía" de la Universidad de Bonn y del Comité "Grupos de Galaxias como laboratorios para la materia oscura y bariónica" de la Escuela para Graduados de Bochum-Bonn.

La luz no escapa a la influencia de la gravedad. La teoría de la Relatividad General de Einstein predice que el espacio se curva por la presencia de objetos muy masivos, y también la trayectoria de los rayos de luz. Esta curvatura de la trayectoria da lugar a fenómenos muy curiosos: desde ver la misma imagen en distintas posiciones del cielo a observar formas distorsionadas o magnificadas. Se trata de un curioso efecto que se puede aprovechar para acotar los valores de las constantes cosmológicas y revelar la distribución de materia en el Universo. Uno de los especialistas en este campo es el Prof. Peter Schneider, de la Universidad de Bonn, que apunta las ventajas que presentan las lentes gravitatorias para localizar la materia oscura.

¿Qué es una lente gravitatoria?

"El fenómeno de las lentes gravitatorias describe los efectos observables de la deflexión de la luz en un campo gravitatorio; por lo tanto, una lente gravitatoria es una concentración de materia. Dependiendo de lo compacta y masiva que sea la lente pueden ocurrir varios efectos: las imágenes de fuentes lejanas como cuásares son multiplicadas por una galaxia intermedia, la luz de galaxias distantes es fuertemente distorsionada (dando lugar a imágenes muy alargadas) o la orientación de la imagen de una población de galaxias lejanas puede ser alineada coherentemente debido a efectos de marea del campo gravitacional de la lente. Ya que la curvatura gravitatoria de la luz puede actuar parcialmente como una lente focal, el flujo observable de fuentes lejanas se puede incrementar; de hecho, algunas de las fuentes lejanas más luminosas resultan estar magnificadas por una concentración de materia intermedia. Investigando el efecto de lente, se puede estudiar la distribución de masa en la fuente, averiguar sus propiedades y conocer la geometría del Universo."

¿Cómo se utiliza el fenómeno de lentes gravitatorias en el estudio de

la estructura del Universo a gran escala?

"Por un lado, un sistema de lentes gravitatorias está caracterizado por relaciones de naturaleza geométrica que contienen longitudes y ángulos. Por otro, la relación entre los ángulos y las escalas longitudinales en el Universo se desvía de la de un universo plano y euclidiano, debido a la curvatura del espacio-tiempo.

Como describen las ecuaciones de campo de Einstein, la geometría del Universo está relacionada con los parámetros cosmológicos tales como energía, densidad de energía en el vacío y la constante de Hubble. Ya que en los sistemas de lentes se pueden medir separadamente longitudes y ángulos, es posible determinar la constante de Hubble mediante la observación de la diferencia de tiempos que tarda la luz en recorrer distintos caminos desde la fuente al observador (que corresponden a distintas imágenes de la fuente). Más aún, la eficiencia de una lente para producir múltiples imágenes también depende de la distribución de toda la masa del Universo a gran escala; por ello se pueden poner límites en la constante de Hubble usando algunos de los cuásares leja-

nos cuyas imágenes se multiplican. Además, la deflexión de la luz en un campo gravitatorio depende de la distribución de toda la masa en el Universo, en particular de la de la Materia Oscura. Como la Materia Oscura no es observable directamente, los métodos estándar para deducir su distribución se basan en hacer suposiciones sobre la relación entre la materia luminosa y la oscura. Sin embargo, con el efecto de lente, la distribución de la materia oscura se obtiene directamente."

¿Qué implicaciones tienen estos estudios sobre la Materia Oscura? ¿En qué medida influye el uso de grandes telescopios como el GTC en la capacidad de descifrar la estructura a gran escala mediante el efecto lente débil?

"El efecto de lente confirma la existencia de Materia Oscura en estructuras cósmicas como galaxias, grupos de galaxias y cúmulos de galaxias. Comparándolo con otros métodos, presenta la ventaja de que no se necesita ninguna suposición sobre el estado dinámico de la materia para llegar a estas conclusiones. El efecto de lente gravitatoria débil ha medido recientemente las propiedades estadísticas de la distribución a gran escala de la materia en el Universo y futuras observaciones convertirán este método en una herramienta precisa para estudiar la evolución cosmológica.

El objetivo de estudiar el efecto de lente débil gravitatoria es detectar una gran densidad numérica de galaxias muy débiles y pequeñas. La utilización de grandes telescopios en lugares excelentes, como el GTC en La Palma, será de gran valor siempre que los telescopios estén equipados con una cámara de campo ancho. Esto ya se ha demostrado con el uso del VLT para la realización de un mapa de la distorsión diferencial cósmica (*cosmic shear*). Combinado con técnicas de medidas de desplazamiento al rojo fotométricas (calibradas espectroscópicamente), el efecto de lente débil gravitatoria se usará en 'modo tomográfico' para estudiar la dependencia con el desplazamiento al rojo de la distribución a gran escala de la materia del Universo y, por lo tanto su evolución."

¿Hasta qué punto es compatible ser el Editor de una revista tan importante como A&A con ser investigador en activo? ¿Tiene una influencia positiva o negativa en su trabajo de investigación?

"Afortunadamente, soy el responsable de la Sección de Cartas de A&A. El trabajo que esto conlleva no ocupa una fracción importante de mis horas de trabajo, por lo que considero que es compatible con ser un investigador en activo. La principal implicación de esta actividad editorial, en cuanto a tiempo, es que no existen los descansos: después de volver de un viaje sé que el trabajo de A&A se ha acumulado. Además, las cartas se han de llevar al día, así que marcharme para una reunión de una semana no está exento de problemas y, los viajes de larga duración son muy difíciles. En conjunto el trabajo es estimulante, especialmente porque a la mayoría de los colegas que se les pide que actúen como árbitros desempeñan esta labor de un modo muy responsable y considerado. Además, consigues una visión muy amplia de la investigación que se lleva a cabo, y entras en contacto con muchos investigadores activos. Finalmente, está bien formar parte de una iniciativa con tanto éxito como la que representa A&A."

"ALGUNAS DE LAS FUENTES LEJANAS MÁS LUMINOSAS RESULTAN ESTAR MAGNIFICADAS POR UNA CONCENTRACIÓN DE MATERIA INTERMEDIA. INVESTIGANDO EL EFECTO DE LENTE, SE PUEDE ESTUDIAR LA DISTRIBUCIÓN DE MASA EN LA FUENTE, AVERIGUAR SUS PROPIEDADES Y CONOCER LA GEOMETRÍA DEL UNIVERSO."

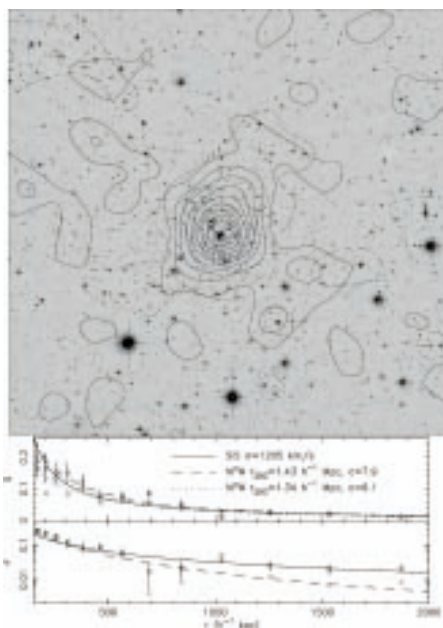


Imagen del cúmulo de galaxias A1689, obtenida con la Cámara de Campo Ancho del MPG, un telescopio de 2.2 metros de la ESO emplazado en La Silla. El seeing es de 0.72 arcosegundos y el tiempo total de integración de 10.8000 segundos. En ella se observa el efecto de lente gravitatoria débil, en forma de distorsión causada por los efectos de marea del campo gravitatorio. (D. Clowe & P. Schneider, A&A 379, 384).

Prof. Joseph Silk
Universidad de Oxford
REINO UNIDO

EL ORIGEN DE LAS GALAXIAS



Joseph Silk

¿Cómo se formaron las estructuras a gran escala del Universo? Durante años la respuesta ha sido controvertida: algunos modelos sugerían que las galaxias se formaban al fragmentarse los cúmulos y supercúmulos, mientras que otros describían el proceso opuesto, en el que las "pequeñas" estructuras se agrupaban para dar lugar a las "mayores". Actualmente el modelo que prevalece es el segundo, aunque aún faltan muchos detalles por aclarar; en este escenario, unos mil millones de años después del Big Bang, materia oscura e hidrógeno empezaron a acumularse en torno a pequeñas inhomogeneidades cósmicas. Poco a poco, el gas colapsó originando el núcleo de la protogalaxia y en torno a él permaneció el halo de materia oscura. De esta teoría habla el Prof. Joseph Silk, de la Universidad de Oxford, en su curso «La formación de las galaxias en cosmologías de materia oscura».

¿Hasta qué punto las suposiciones cosmológicas nos permiten inferir una teoría válida para la formación galáctica?

«Tenemos una teoría aproximada que es capaz de predecir algunos fenómenos correctamente, pero con otros no funciona tan bien. Sin embargo, no hay ninguna observación que indique que el modelo no es válido. Para cada objeción se puede encontrar una explicación. Quizá el éxito más notable de la teoría sea haber recuperado las condiciones iniciales, en la base de tres conjuntos de datos independientes pertenecientes a épocas muy diferentes en el pasado que, pese a ello, concuerdan muy bien entre sí. Estas tres fuentes son las fluctuaciones de la temperatura del fondo cósmico de microondas, las variaciones del número de nubes absorbentes intergalácticas de hidrógeno a lo largo de diferentes direcciones de observación de varios cuásares lejanos y las fluctuaciones en el recuento de

las galaxias de los mapas tridimensionales reconstruidos del Universo cercano. En su conjunto ofrecen un espectro consistente de las fluctuaciones primordiales de densidad.

Este espectro corresponde a una de las predicciones más sencillas y antiguas de la cosmología moderna: un universo inicialmente homogéneo, pero con fluctuaciones infinitesimales de la densidad distribuidas estocásticamente. Estas inhomogeneidades vienen caracterizadas por un número, la amplitud de las ondulaciones en la curvatura del espacio. La teoría de la inestabilidad gravitatoria nos ha permitido desarrollar una teoría que describe la estructura a gran escala del Universo.

Las galaxias se forman cuando el gas se disipa en el interior de halos de materia oscura que se han formado por agregación jerárquica, de menores a mayores estructuras, mientras el Universo se expande»

"LAS GALAXIAS SE FORMAN CUANDO EL GAS SE DISIPA EN EL INTERIOR DE HALOS DE MATERIA OSCURA QUE SE HAN FORMADO POR AGREGACIÓN JERÁRQUICA, DE MENORES A MAYORES ESTRUCTURAS, MIENTRAS EL UNIVERSO SE EXPANDE."

Si no tenemos tal teoría, ¿cuáles son los elementos que faltan?

«La dificultad surge en que, tanto inicial como actualmente, se sabe muy poco de los detalles de cómo el gas forma las estrellas. Las simulaciones numéricas carecen de la resolución adecuada para enfrentarse a este tema, por lo que se recurre a modelos semianálíticos que emplean reglas de formación estelar plausibles, pero toscas. No es sorprendente, por lo tanto, que según disponemos de nuevas observaciones, éstas desafían el marco actual. Sin embargo, hay tanta libertad en refinar las reglas de cómo se forman las galaxias luminosas que, incorporando procesos tales como retroalimentación de la formación de estrellas masivas, la teoría de formación galáctica ha conseguido sobrevivir hasta el momento.»

¿Cree que las enanas marrones constituyen la mayor parte de la materia oscura del Universo?

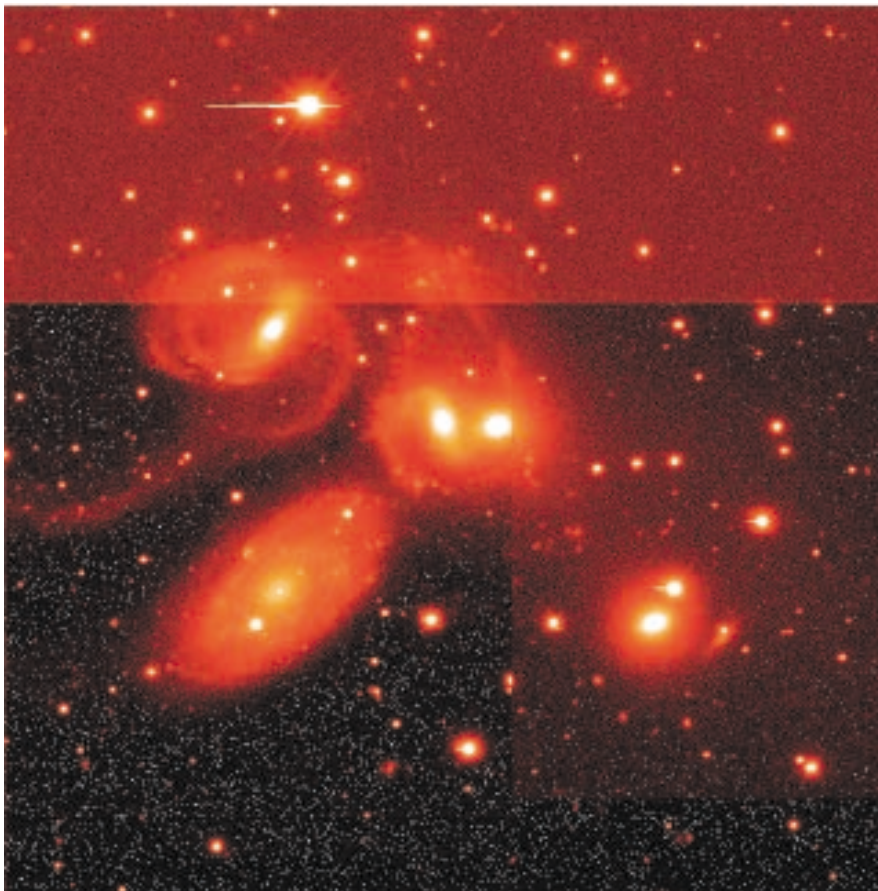
«No.»

Su vida profesional ha estado dividida entre Europa y Estados Unidos. ¿ Es distinto el modo en que se practica la ciencia en estos dos continentes? ¿Cree que hay tanto apoyo de la ciencia básica en Europa como en Estados Unidos?

«Actualmente, la ciencia es bastante internacional. Hay tantos proyectos de colaboración entre Estados Unidos y Europa que las motivaciones científicas, las justificaciones y las peticiones de fondos están totalmente intercalados. La complementariedad es una parte esencial tanto de la ciencia como de la financiación.»

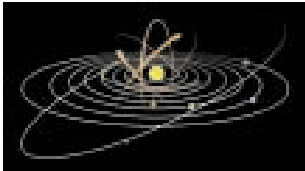
PERFIL

JOSEPH SILK nació en Londres, el 3 de diciembre de 1942. Estudió matemáticas en la Universidad de Cambridge, donde se licenció en 1963. Su doctorado en Astronomía lo obtuvo 5 años después, en la Universidad de Harvard. En la actualidad es profesor Savilian de Astronomía en la Universidad de Oxford. Anteriormente trabajó en la Universidad de California (Berkeley) como profesor de Astronomía y Física. También ha sido miembro del Instituto de Estudios Avanzados de la Universidad de Princeton e investigador asociado de dicha universidad y del Instituto de Astrofísica de París. Es autor de más de 300 artículos científicos y ha formado parte del comité organizador de más de 50 congresos científicos. Además, ha escrito varios artículos y libros de divulgación científica, entre los que destacan El Big Bang, Formación estelar y Una breve historia del Universo, La mano izquierda de la creación.



*Grupo de galaxias en interacción, conocido como el "Quinteto de Stefan". Imagen tomada con el mosaico de detectores desarrollado por la Universidad de Tokio en el foco primario del telescopio WHT (4,2m) del Observatorio del Roque de los Muchachos.
© H. Deeg,
G. Tenorio-Tagle,
C. Muñoz-Tuñón,
M. Sekiguchi,
S. Okamura,
M. Yagi.*

En el año 585 a. C., el filósofo griego Demócrito de Abdera sugirió la posibilidad de que la materia estuviese constituida por pequeñas partículas indivisibles (en griego, *átomos*), y el químico inglés John Dalton, en 1808, así lo creyó cuando adoptó el término griego en la formulación de su teoría atómica de la materia. Pero si algo no tienen los átomos es la propiedad que su nombre indica, ya que no son irrompibles ni indivisibles. El hecho de que los electrones puedan ser extraídos del átomo se conocía desde finales del siglo XIX, y el núcleo fue dividido por primera vez por el físico neozelandés Ernest Rutherford en 1912. Hasta donde hoy sabemos, la materia está formada por unas sesenta partículas elementales diferentes, que en su mayoría han ido descubriéndose y caracterizándose a lo largo de todo el siglo XX. La Astrofísica, considerada Astronomía, no fue materia de elección para el Premio Nobel en la modalidad de Física hasta mediados del siglo pasado. Incluso después del cambio de esta norma, los físicos de partículas se han llevado muchos premios que, según algunos, les corresponde por la naturaleza fundamental del tema. En el 2002, la Fundación Nobel ha encontrado un modo de dar este premio a ambas ramas de la Física simultáneamente, otorgando el galardón a trabajos clave en la astronomía de rayos X y en la de neutrinos. ¿Coincide este reconocimiento con un "feliz enlace" entre Física de Partículas y Astrofísica? Ambas disciplinas se unen ahora para conocer la historia del universo primitivo, donde la temperatura era tan alta, que la materia estaba dissociada en sus componentes fundamentales. De ahí la necesidad de estudiar las características de las partículas que constituyen la materia y sus interacciones. La comunidad científica celebra con júbilo esta reconciliación, porque uno de los mayores desafíos de la ciencia será identificar y medir la materia que compone nuestro universo.



Lo grande y lo pequeño: UN FELIZ ENLACE

¿Hasta qué punto se ha superado la supuesta relación amor-odio existente entre los físicos de partículas y los astrofísicos?

LAWRENCE KRAUSS:

"Veamos, creo que el descubrimiento de la Energía Oscura demuestra a los físicos de partículas que la Astrofísica puede aportar evidencias sólidas que sirvan para orientarles. Aún más, como la Astrofísica es un campo muy rico en datos ahora mismo, mientras que la Física de Partículas está en un periodo entre grandes aceleradores, muchos físicos de partículas se han dado cuenta de que en Astrofísica hay una gran oportunidad de hacer nuevos descubrimientos que podrían arrojar luz en Física Básica."

PHILIP MAUSKOPF:

"Tenemos que ser muy cuidadosos en este punto: ¡los astrofísicos han recibido mu-

cha atención en los últimos tiempos pero nosotros también hemos tenido éxitos! El actual modelo cosmológico parece funcionar muy bien para explicar la historia del Universo hasta un momento muy temprano. Hemos consolidado el modelo de expansión del Universo, midiendo parámetros fundamentales como la velocidad de la expansión (la constante de Hubble) con una precisión mejor del 20% cuando hace tan sólo una década los astrónomos discutían sobre valores que diferían en un factor dos. Creemos que conocemos la edad del Universo, e incluso su geometría. Hemos medido su curvatura y hallado que es euclídea, al menos con la precisión que podemos medir. Hemos hecho increíbles descubrimientos,

"LOS ÉXITOS DE LA COSMOLOGÍA HAN GENERADO MÁS PREGUNTAS FUNDAMENTALES QUE SÓLO LOS FÍSICOS DE PARTÍCULAS PUEDEN RESPONDER."

como la época en que comenzó la formación de las galaxias y cuando liberaron la energía suficiente para reionizar el medio intergaláctico.

Sin embargo, los éxitos de la Cosmología han generado más preguntas fundamentales que sólo los físicos de partículas pueden responder. Si el Universo es llano y el valor de Omega es uno, pero Omega bariónico es sólo 0.05, entonces todas las partículas que conocen los físicos de partículas sólo constituyen un 5% de la energía total del Universo. Los modelos cosmológicos más simples dividen el restante 95% en dos partes: un 30% de Materia Oscura Fría, que consiste en una primitiva partícula neutral pesada que interactúa muy débilmente con la materia, y un 65% de Energía Oscura o Constante Cosmológica, que podría ser alguna forma de energía del vacío o campo escalar. Evidentemente, estamos en una época en la que las medidas en astronomía tienen implicaciones directas en física de partículas y viceversa. Siempre hay una tendencia a sospechar y competir entre grupos de gente diferentes que se mueven en distintos círculos y tienen diferentes culturas y costumbres, como los físicos de partículas y los astrónomos. Uno de los modos en que esto ha sido superado recientemente es la creación de un área de investigación aparte que se conoce como 'Astrofísica de partículas' que combina las dos áreas y fomenta la intercomunicación. Otro factor en la aceptación de los datos astronómicos por parte de los físicos de partículas es la medida del CMB [*Cosmic Microwave Background*, Fondo Cósmico de Microondas], ya que es una de las áreas que se encuentra en el límite entre las dos disciplinas, y ha sido liderada principalmente por físicos con un amplia base que necesitan comunicarse tanto con los astrónomos tradicionales como con los físicos de partículas."

JOHN PEACOCK:

"Creo que la barrera ha disminuido mucho, pero puede que la veamos crecer de nuevo en el futuro de la Cosmología. La pregunta es si los datos astronómicos podrán llevar a avances teóricos en el futuro."

BERNARD SADOULET:

"Considero que la diferencia de cultura y lenguaje constituyen cada vez un obstáculo más pequeño. Actualmente se está produciendo un diálogo muy útil, en particular para entender la ciencia básica implicada en el universo temprano o en torno a objetos muy masivos."

RENZO SANCISI:

"No estoy seguro de la existencia de tal relación de "amor-odio". Me parece que en los últimos años ha habido un aumento en los intereses comunes sobre las preguntas fundamentales relacionadas, por ejemplo, con el origen del Universo y la naturaleza de la materia oscura."

BRIAN SCHMIDT:

"No estoy tan seguro de que alguna vez haya habido una relación amor-odio entre nosotros, simplemente ignorábamos lo que los otros estaban haciendo. Ciertamente la Astronomía está demostrando ser un campo fantástico para probar la física de partículas, como es el caso de las supernovas. Es agradable ver cómo se acercan los dos campos, aunque no espero que esta situación se prolongue por más de una década o dos, cuando ambos nos dediquemos a cosas más nuevas e interesantes."

PETER SCHNEIDER:

"Considero que la expresión 'relación amor-odio' ha dejado de ser apropiada para describir la relación entre los astrofísicos y los físicos de partículas. El hecho de que actualmente todas las indicaciones de la incompletitud del Modelo Estándar de la Física de Partículas provengan de la Astrofísica (por ejemplo, los neutrinos solares, la materia oscura, la energía del vacío distinta de cero) implica una relación estrecha entre estas dos disciplinas. Este hecho está también documentado en el panorama de las publicaciones: un número cada vez mayor de científicos de ambos campos están publicando en las revistas del campo del otro, y existen revistas especialmente centradas en la Astrofísica de Partículas. Sin embargo, existe un problema potencial respecto a la creciente sofisticación de ambas disciplinas; hay una barrera lingüística (conceptual tanto como técnica) entre estas áreas de investigación que no es siempre fácil de superar."

JOSEPH SILK:

"Las dos comunidades se llevan bien. La emergente ciencia interdisciplinaria de la Astrofísica de Partículas ofrece varios ejemplos de cómo la experiencia de ambas comunidades se unen en un empeño común. Podría citar el satélite de rayos gamma GLAST, el Observatorio de neutrinos en Sudbury, el telescopio de rayos gamma VERITAS, etc."

"UNO DE LOS MODOS EN QUE ESTO HA SIDO SUPERADO RECIENTEMENTE ES LA CREACIÓN DE UN ÁREA DE INVESTIGACIÓN APARTE QUE SE CONOCE COMO 'ASTROFÍSICA DE PARTÍCULAS' QUE COMBINA LAS DOS ÁREAS Y FOMENTA LA INTERCOMUNICACIÓN."

"EXISTE UN PROBLEMA POTENCIAL RESPECTO A LA CRECIENTE SOFISTICACIÓN DE AMBAS DISCIPLINAS; HAY UNA BARRERA LINGÜÍSTICA (CONCEPTUAL TANTO COMO TÉCNICA) ENTRE ESTAS ÁREAS DE INVESTIGACIÓN QUE NO ES SIEMPRE FÁCIL DE SUPERAR."

Los frenos a la transmisión del saber han sido constantes a lo largo de la Historia: pitagóricos en la Antigüedad, alquimistas en la Edad Media,... Sin embargo, también es cierto que siempre ha existido una preocupación por la difusión social de los conocimientos científicos, especialmente a través de la enseñanza y la divulgación, aunque “ambas bastante condicionadas por los valores socioeconómicos de cada momento y relacionadas con los patrones de conducta propios de unas determinadas clases sociales”*, señala Bertha M. Gutiérrez Rodilla en un libro sobre el lenguaje de la ciencia. Esta autora cita como primera gran divulgación científica la aparición de la imprenta, que “propicia la secularización del conocimiento” y, ya en el Renacimiento, el número de personas que saben leer y escribir. La democratización del saber, a veces interesada, se potencia en el siglo XVII con la Ilustración, lo que coincide, además, con el auge y desarrollo del periodismo, que, a partir de entonces, se convierte en un órgano fundamental de difusión de la cultura en las sociedades civilizadas. Y se incentiva a finales del XIX con la reducción gracias a los avances tecnológicos de los costes de edición que abaratan las publicaciones y permiten la aparición de los medios de difusión de masas. En la actualidad, a la proliferación de medios para la divulgación (revistas, museos, etc.) se añade el acceso a la información a través del ordenador y las navegaciones por Internet. “De esta manera -señala Gutiérrez Rodilla- se ha superado la motivación dieciochesca de la mera instrucción del gran público, pues en la actualidad la divulgación cumple, además, otras funciones de integración: profesional, social, etc.” Pero el 17 de febrero de este año el *New York Times* anunció la decisión del Gobierno de los Estados Unidos de restringir la divulgación científica.

CENSURA EN CIENCIA

¿Qué piensa del plan de George Bush de limitar la divulgación científica para evitar el uso de armamentos de destrucción masiva?

**"AUNQUE
OBVIAMENTE SE
TENGAN QUE
ADOPTAR CIERTAS
PRECAUCIONES, EL
LIBRE INTERCAMBIO
DE IDEAS ES LA
MEJOR HERRAMIENTA
PARA PROMOVER LA
PAZ."**

LAWRENCE KRAUSS:

"George Bush ha dejado claro en muchas ocasiones que, entre las muchas cosas que no entiende sobre el mundo, la ciencia es una de las que están primeras en la lista. Su Administración aún tiene pendiente tomar alguna medida que, desde un punto de vista científico, me parezca sensata."

PHILIP MAUSKOPF:

"¿Qué plan? No he oído nada sobre él, pero tampoco me sorprendería del todo que fuera verdad..."

Estaría en contra de cualquier plan para censurar el discurso científico, técnico o popular. La ciencia básica que hay detrás de las armas de destrucción masiva es bastante conocida, y accesible a través de Internet. El genio ha salido de la botella y no sólo en cuanto a las armas, sino en general. El rápido avance de la tecnología constituye un dilema moral y social cada vez mayor: para sobrevivir en un mundo que es capaz de autodestruirse debemos desarrollar simultáneamente la sabiduría y el sentido de responsabilidad para no hacerlo. Los científicos tienen el deber y el derecho a expresar sus opiniones

* GUTIÉRREZ RODILLA, Bertha M.
La ciencia empieza en la palabra. Análisis e historia del lenguaje científico.
Ediciones Península. Barcelona, octubre de 1998, 1ª edición. Págs. 315-316.

morales y ser juzgados por ello tanto como cualquier otro que ostente una posición de respeto y de importancia. Como los grupos de presión pro-armas en Washington dicen: si haces ilegal un arma, sólo los criminales las tendrán. Del mismo modo, si haces ilegal el intercambio de información científica, sólo la gente que quiere esa información para fines ilegales será la que aprenda."

JOHN PEACOCK:

"Los principios del armamento nuclear han sido ya reinventados muchas veces de forma independiente; no se puede evitar que ocurra de nuevo. Es evidente que la gente que trabaja en ese tipo de armamentos no necesita consultar la divulgación científica."

BERNARD SADOULET:

"Creo que esto es ser corto de vista. Aunque obviamente se tengan que adoptar ciertas precauciones, el libre intercambio de ideas es la mejor herramienta para promover la paz."

RENZO SANCISI:

"No puedo creer que exista tal plan, o que sea serio. Me parece completamente absurdo. En primer lugar, no veo cómo puede la divulgación científica ayudar al uso de armamentos y, por lo tanto, cómo limitarla podría evitar el desarrollo de armas de destrucción masiva. En segundo lugar, un plan como ese pondría en peligro el desarrollo de la existencia misma de una sociedad democrática."

BRIAN SCHMIDT:

"Por aquí no hemos oído mucho de eso... pero como la mayoría de las ideas que conllevan censura, está probablemente equivocada. Me parece que los armamentos de destrucción masiva no son un problema causado por un libro de Tom Clancy, sino debido a la existencia de cabezas nucleares que pueden ser robadas de los arsenales existentes de las superpotencias o a los programas de las naciones que quieren ser potencias nucleares."

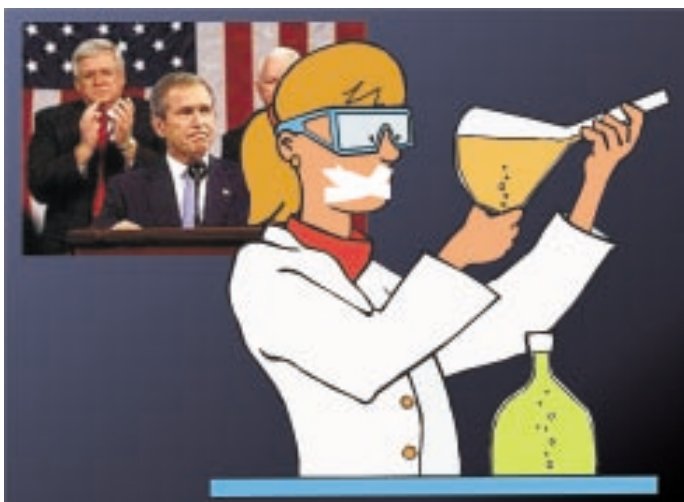
PETER SCHNEIDER:

"Los resultados científicos son logros de las sociedades, muy similares al arte: forman parte de nuestra cultura. Hemos comprobado en el pasado que la censura no funciona, que es contraria a la filosofía de un país democrático. Desde mi punto de vista es contraproducente no apoyar la divulgación de la ciencia, lleva a una educación pública peor, a una influencia del fundamentalismo aún mayor –consecuencias en absoluto deseables. Esto por supuesto no implica que no deba de haber resultados que por motivos de seguridad deban de continuar siendo clasificados: no es necesario que la información de cómo construir una bomba esté en Internet. Desafortunadamente, lo está de todos modos."

JOSEPH SILK:

"No he oído nada sobre este tema."

"ES CONTRAPRODUENTE NO APOYAR LA DIVULGACIÓN DE LA CIENCIA, LLEVA A UNA EDUCACIÓN PÚBLICA PEOR, A UNA INFLUENCIA DEL FUNDAMENTALISMO AÚN MAYOR – CONSECUENCIAS EN ABSOLUTO DESEABLES. ESTO POR SUPUESTO NO IMPLICA QUE NO DEBA DE HABER RESULTADOS QUE POR MOTIVOS DE SEGURIDAD DEBAN DE CONTINUAR SIENDO CLASIFICADOS".



"UN PLAN COMO ESE PONDRÍA EN PELIGRO EL DESARROLLO DE LA EXISTENCIA MISMA DE UNA SOCIEDAD DEMOCRÁTICA".

"CIENCIA Y RELIGIÓN
SON EN GRAN PARTE
COMPLEMENTARIAS."



* DÍEZ DE VELASCO, Francisco.
Las Nuevas Religiones.
Ediciones del Orto. Colección "Religiones y
textos". Madrid, 2000, 1ª edición.
Págs. 32, 27-28.

Desde que la «Enciclopedia» de 1751 propusiera por primera vez una visión no religiosa del mundo, en los países industrializados la religión fue progresivamente transferida del marco institucional al personal y su final anunciado a menudo, al medirse con la ciencia o el «ateísmo científico». Dado que la función de la religión no es describir el Universo, sino satisfacer necesidades humanas profundas que están fuera del alcance de la ciencia, no debería haber enfrentamientos. Sin embargo, los ha habido a veces debido a que la religión adoptaba modelos del mundo que no eran fundamentales para su finalidad (el ejemplo más importante es la cosmología aristotélica) y que acabaron siendo superados por los descubrimientos científicos. Actualmente científicos y teólogos están de acuerdo en su mayor parte sobre los límites y limitaciones de sus propias disciplinas. En tiempos recientes, sin embargo, «la ciencia ha sido uno de los revulsivos mayores en la gestación y conformación de nuevas religiones», según Francisco Díez Velasco, un experto en estos temas y profesor de la Universidad de la Laguna. Entre éstas se encuentran la «Iglesia de Cristo de la Ciencia» y la «Iglesia de la Cienciología». Dentro de la comunidad científica de Estados Unidos surgieron durante los 70 los «Gnósticos de Princeton», una discreta elite de astrofísicos «insatisfechos», que atrajeron a científicos de otras disciplinas, entre los que se encuentran varios Premios Nobel. Estos intelectuales - explica Díez de Velasco* - se muestran descontentos por el hecho de que la ciencia deje sin respuestas cuestiones relativas al origen del Universo o a los últimos componentes de la vida. Desarrollan por lo tanto una búsqueda personal del principio suprahumano que ordena el cosmos, una explicación última o conocimiento que se transforma en una gnosis salvadora. Las creencias religiosas de los científicos han influido en sus teorías en ocasiones. A Hoyle le gustaba la teoría del estado estacionario porque, como ateo, prefería un universo sin principio, mientras que muchos cosmólogos católicos han preferido el Big Bang. Los modelos cosmológicos de Hawking, en los que el Universo puede atravesar sin dificultades la singularidad aparente del Big Bang, también satisfacen su necesidad de evitar a un dios. Actualmente, el tan pregonado «principio antrópico» postula que el Universo es como es debido a que nosotros estamos aquí para observarlo, lo que algunos científicos ven como un principio teleológico capaz de unificar ciencia y religión. Los límites de la ciencia teórica son sólo los de la imaginación humana, una cualidad compartida tanto por la religión como por la expresión artística. La diferencia es que la imaginación científica, para ser de valor, tiene que presentarse a una confrontación con la observación y el experimento.

CIENCIA Y/O RELIGIÓN

La ciencia parece competir con la religión para dar respuestas a las preguntas planteadas por la humanidad. ¿Hasta qué punto ha reemplazado la ciencia a la religión en este aspecto?

LAWRENCE KRAUSS:

"Desafortunadamente, para la gente la ciencia no ha reemplazado a la religión. Creo que las personas sienten la necesidad de creer en Dios y dudo mucho de que, sea lo que sea lo que descubra la ciencia, la gente abandone sus creencias religiosas."

PHILIP MAUSKOPF:

"Realmente me parece que quizás por primera vez en la historia, la religión no considera a la ciencia como su principal competidor. En lugar de ello, la veneración a la cultura ha asumido su lugar como el principal sustituto de la religión. Las personas religiosas temen más a la música,

a la literatura, a la comida rápida y, especialmente, a otras religiones que a la astronomía.

Creo que la ciencia nunca reemplazará a la religión porque existen distintas razones para su existencia. La ciencia es un sistema para entender los fenómenos físicos que lleva a su manipulación para que sean útiles para la gente, es decir, la tecnología. La religión concierne a tener una identidad cultural, a enfrentarse a preguntas sin respuesta y ofrecer un sistema para vivir y relacionarse con el mundo y con los demás, especialmente en el nivel moral. O al menos así es como yo las veo."

JOHN PEACOCK:

"Personalmente no veo conflicto alguno entre ciencia y religión. Por un lado, la deducción de las leyes fundamentales de la naturaleza tiene un aspecto casi religioso: creemos que existen tales leyes simples y nuestro placer en descubrirlas es una forma refinada de culto hacia un creador. Por el otro, muchos de los aspectos prácticos de la religión tratan temas de la moral humana. Necesitarías ser un reduccionista radical para afirmar que estos temas pueden ser abordados por las leyes físicas. Esto es sólo un ejemplo extremo de cómo fenómenos complejos emergen de un contexto sencillo y a menudo requieren un modo de discusión y análisis que tiene poco o nada que ver con el contexto inicial. No espero que la ciencia tenga nada que decir sobre el amor en mucho, mucho tiempo."

BERNARD SADOULET:

Al nivel más básico, ciencia y religión se ocupan de preguntas muy distintas. La ciencia intenta responder el "¿cómo funciona la naturaleza?" y utiliza todo el potencial del método científico para ir tan lejos como sea posible hacia ese objetivo. Sin embargo no puede (ni quiere) responder el "¿Por qué?". Por el contrario, la finalidad de la religión (o de la filosofía o de la poesía) es descifrar el significado más profundo de las cosas. En mi caso, mi práctica científica fomenta más que contradice esta profunda aspiración de significado. Como François Jacob (prestigioso biólogo francés) solía decir cuando yo era un joven científico "tienes que aprender a ser tanto un buen científico como poeta". Creo que el conflicto entre ciencia y religión ha sido más entre poder político y control de las mentes que sobre su respectiva misión. Los principales problemas han sido excesos imperialistas por ambas partes."

RENZO SANCISI:

"No veo la competición. Ésta tiene que estar basada en un malentendido. Si las preguntas fueran verdaderamente de una naturaleza religiosa o, más generalmente, metafísicas, no podrían ser asumidas por

la ciencia. Pero hay aspectos en la religión que a menudo se han desarrollado por la ignorancia y han prosperado debido a la superstición. "

BRIAN SCHMIDT:

"Realmente creo que ciencia y religión, cuando se aplican a las preguntas que se plantea la humanidad, pueden no ser tan distintas como se podría pensar."

Los científicos a menudo olvidan que nada de lo que hacemos está basado en una prueba absoluta; nuestro trabajo se fundamenta enteramente en la observación y en la habilidad de predecir hechos en nuestro universo. En el fondo, la mayoría de los científicos (incluyéndome a mí mismo) aceptan ciertas ideas como artículo de fe. Aunque las bases de estos principios sean continuamente investigados y desafiados, la mayoría de la gente simplemente tiene que seguir con sus investigaciones científicas dentro del marco existente del paradigma científico actual. Si todo el mundo empleara su tiempo en estudiar las asunciones subyacentes de su ciencia, nunca progresaríamos. Cuando digo que el Universo está acelerando, esto es sólo cierto si el paradigma científico actual para la cosmología es correcto y, nos guste o no, el paradigma hace algunas suposiciones que hemos de creerlos y que no han sido completamente probadas.

La religión tiene su propio paradigma y, es que éste no está basado en predecir y probar, sino que se trata de un marco en el que mucha gente puede trabajar cómodamente y permite a las personas entender el Universo, salvo por algunas barreras. Debido a su misma naturaleza los fundamentos de la religión no están abiertos a mucho escrutinio, pero para la gran mayoría de la gente el paradigma de la ciencia y el de la religión parecen muy similares. El marco de ambos se da como algo hecho, ha sido inventado por otra gente y no ha sido desafiado. Además, las creencias de cómo funciona el mundo giran en torno a esta estructura subyacente.

Personalmente prefiero el enfoque científico. Creo que es más flexible y me permite tener más control sobre mis conocimientos del paradigma. Es por esa razón por la que creo que la ciencia se ha convertido en una herramienta importante para que la gente entienda el mundo que les rodea. Estoy dispuesto a aceptar que la ciencia no puede responderlo todo y, por lo tanto, a vivir con ese vacío en mi vida."

PETER SCHNEIDER:

"Esta es una pregunta muy personal, y cada uno la tiene que responder por sí mismo."

JOSEPH SILK:

"Ciencia y religión son en gran parte complementarias."

"POR UN LADO, LA DEDUCCIÓN DE LAS LEYES FUNDAMENTALES DE LA NATURALEZA TIENE UN ASPECTO CASI RELIGIOSO: CREEMOS QUE EXISTEN TALES LEYES SIMPLES Y NUESTRO PLACER EN DESCUBRIRLAS ES UNA FORMA REFINADA DE CULTO HACIA UN CREADOR. POR EL OTRO, MUCHOS DE LOS ASPECTOS PRÁCTICOS DE LA RELIGIÓN TRATAN TEMAS DE LA MORAL HUMANA. NECESITARÍAS SER UN REDUCCIONISTA RADICAL PARA AFIRMAR QUE ESTOS TEMAS PUEDEN SER ABORDADOS POR LAS LEYES FÍSICAS."

"DESASFORTUNADAMENTE, PARA LA GENTE LA CIENCIA NO HA REEMPLAZADO A LA RELIGIÓN. CREO QUE LAS PERSONAS SIENTEN LA NECESIDAD DE CREER EN DIOS Y DUDO MUCHO DE QUE, SEA LO QUE SEA LO QUE DESCUBRA LA CIENCIA, LA GENTE ABANDONE SUS CREENCIAS RELIGIOSAS."

I. Física Solar (1989)

- OSCAR VON DER LÜHE (Instituto de Astronomía, Zürich, Suiza)
- EGIDIO LANDI (Instituto de Astronomía, Florencia, Italia)
- DOUGLAS O. GOUGH (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)
- GÖRAM SCHARMER (Observatorio de Estocolmo, Suecia)
- HUBERTUS WÖHL (Instituto Kiepenheuer, Freiburg, Alemania)
- PIERRE MEIN (Observatorio de Meudon, Francia)

II. Coamología Física y Observacional (1990)

- VALODIO N. LUKASH (Instituto de Investigación espacial, Moscú, Rusia)
- HUBERT REEVES (CEN Saclay, Francia)
- BERNARD E. PAGEL (NORDITA, Copenague, Dinamarca)
- ANTHONY N. LASENBY (Laboratorio Cavendish, Cambridge, Reino Unido)
- JOSE LUIS SANZ (Universidad de Cantabria, España)
- BERNARD JONES (Universidad de Sussex, Reino Unido)
- JAAN EINASTO (Observatorio Astrofísico de Tartu, Estonia)
- ANDREAS G. TAMMANN (Universidad de Basilea, Suiza)

III. Formación de Estrellas en Sistemas estelares (1991)

- PETER BODENHEIMER (Observatorio de Lick, California, EEUU)
- RICHARD B. LARSON (Universidad de Yale, EEUU)
- I. FELIX MIRABEL (CEN Saclay, Francia)
- DEIDRE HUNTER (Observatorio Lowell, Arizona, EEUU)
- ROBERT KENNICUT (Observatorio Steward, Arizona, EEUU)
- JORGE MELNICK (ESO, Chile)
- BRUCE ELMEGREEN (IBM, EEUU)
- JOSE FRANCO (UNAM, México)

IV. Astronomía Infrarroja (1992)

- ROBERT D. JOSEPH (Universidad de Hawai, EEUU)
- CHARLES M. TELESCO (NASA-MSFC, Alabama, EEUU)
- ERIC E. BECKLIN (Universidad de California, Los Angeles, EEUU)
- GERARD F. GILMORE (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)
- FRANCESCO PALLA (Observatorio Astrofísico de Arcetri, Italia)
- STUART R. POTTASCH (Universidad de Groningen, Países Bajos)
- IAN S. McLEAN (Universidad de California, Los Angeles, EEUU)
- THIJS DE GRAAUW (Universidad de Groningen, Países Bajos)
- N. CHANDRA WICKRAMASINGHE (Universidad de Gales, Cardiff, Reino Unido)

V. Formación de Galaxias (1993)

- SIMON D. M. WHITE (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)
- DONALD LYNDEN-BELL (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)
- PAUL W. HODGE (Universidad de Washington, EEUU)
- BERNARD E. J. PAGEL (NORDITA, Copenague, Dinamarca)
- TIM DE ZEEUW (Universidad de Leiden, Países Bajos)
- FRANÇOISE COMBES (DEMIRM, Observatorio de Meudon, Francia)
- JOSHUA E. BARNES (Universidad de Hawai, EEUU)
- MARTIN J. REES (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)

VI. La estructura del Sol (1994)

- JOHN N. BAHCALL (Instituto de Estudios Avanzados, Princeton, Nueva Jersey, EEUU)
- TIMOTHY M. BROWN (High Altitude Observatory, NCAR, Boulder, Colorado, EEUU)

- JORGEN CHRISTENSEN-DALSGAARD (Instituto de Física y Astronomía, Universidad de Århus, Dinamarca)
- DOUGLAS O. GOUGH (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)
- JEFFREY R. KUHN (National Solar Observatory, Sacramento Peak, Nuevo México, EEUU)
- JOHN W. LEIBACHER (National Solar Observatory, Tucson, Arizona, EEUU)
- EUGENE N. PARKER (Instituto Enrico Fermi, Universidad de Chicago, Illinois, EEUU)
- YUTAKA UCHIDA (Universidad de Tokio, Japón)

VII. Instrumentación para grandes telescopios: un curso para astrónomos (1995)

- JACQUES M. BECKERS (National Solar Observatory, NOAO, EEUU)
- DAVID GRAY (Universidad de Ontario Occidental, Canadá)
- MICHAEL IRWIN (Royal Greenwich Observatory, Cambridge, Reino Unido)
- BARBARA JONES (Centro de Astrofísica y Ciencia Espacial, Universidad de California en San Diego, EEUU)
- IAN S. McLEAN (Universidad de California en Los Angeles, EEUU)
- RICHARD PUETTER (Centro de Astrofísica y Ciencia Espacial, Universidad de California en San Diego, EEUU)
- SPERELLO DI SEREGO ALIGHIERI (Observatorio Astrofísico de Arcetri, Florencia, Italia)
- KEITH TAYLOR (Observatorio Anglo-Australiano, Epping, Australia)

VIII. Astrofísica estelar para el Grupo Local: un primer paso hacia el Universo (1996)

- ROLF-PETER KUDRITZKI (Observatorio de la Universidad de Munich, Alemania)
- CLAUS LEITHERER (Instituto Científico del Telescopio Espacial, Baltimore, EEUU)
- PHILLIP MASSEY (Observatorio Nacional de Kitt Peak, NOAO, Tucson, EEUU)
- BARRY F. MADORE (Centro de Análisis y Procesamiento Infrarrojo, NASA/JPL y Caltech, Pasadena, EEUU)
- GARY S. DA COSTA (Universidad Nacional de Australia, Cambera, Australia)
- CESARE CHIOSI (Universidad de Padua, Italia)
- MARIO L. MATEO (Universidad de Michigan, EEUU)
- EVAN SKILLMAN (Universidad de Minnesota, EEUU)

IX. Astrofísica con grandes bases de datos en la era Internet (1997)

- GEORGE K. MILEY (Observatorio de Leiden, Países Bajos)
- HEINZ ANDERNACH (Universidad de Guanajuato, México)
- CHARLES TELESCO (Universidad de Florida, EEUU)
- DEBORAH LEVINE (ESA, Villafranca del Castillo, Madrid, España)
- PIERO BENVENUTI (ST-SCF, Munich, Alemania)
- DANIEL GOLOMBEK (Instituto del Telescopio Espacial, Baltimore, EEUU)
- ANDREW C. FABIAN (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)
- HERMANN BRÜNNER (Instituto de Astrofísica de Postdam, Alemania)

X. Cúmulos globulares (1998)

- IVAN R. KING (Universidad de California, EEUU)
- STEVEN R. MAJEWSKY (Universidad de Virginia, EEUU)
- VITTORIO CASTELLANI (Observatorio Astronómico de

Capodimonte, Italia)
 - RAFFAELE GRATTON (Observatorio Astronómico de Padua, Italia)
 - REBECCA A. W. ELSON (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)
 - MICHAEL W. FEAST (Universidad de Ciudad del Cabo, Sudáfrica)
 - RAMÓN CANAL (Universidad de Barcelona, España)
 - WILLIAM E. HARRIS (Universidad Macmaster, Canadá)

XI. Galaxias a alto corrimiento al rojo (1999)

- JILL BECHTOLD (Universidad de Arizona, EEUU)
 - GUSTAVO BRUZUAL (CIDA, Venezuela)
 - MARK E. DICKINSON (Instituto del Telescopio Espacial, Baltimore, EEUU)
 - RICHARD S. ELLIS (Instituto Tecnológico de California, EEUU)
 - ALBERTO FRANCESCHINI (Universidad de Padua, Italia)
 - KEN FREEMAN (Observatorio de Monte Stromlo, Australia)
 - STEVE G. RAWLINGS (Universidad de Oxford, Reino Unido)

XII. Espectropolarimetría en Astrofísica (2000)

- ROBERT R.J. ANTONUCCI (Universidad de Santa Bárbara, EEUU)

- ROGER D. BLANDFORD (National Solar Observatory, EEUU)
 - MOSHE ELITZUR (Universidad de Kentucky, EEUU)
 - ROGER H. HILDEBRAND (Instituto Enrico Fermi. Universidad de Chicago, EEUU)
 - CHRISTOPH U. KELLER (National Solar Observatory, EEUU)
 - EGIDIO LANDI DEGL'INNOCENTI (Universidad de Florencia, Italia)
 - GAUTHIER MATHYS (Observatorio Europeo Austral, Chile)
 - JAN OLAF STENFLO (Instituto Helvético de Tecnología, Zurich, Suiza)

XIII. Cosmoquímica: el crisol de los elementos (2001)

- JOSÉ CERNICCHARO (Instituto de Estructura de la Materia, CSIC, España)
 - DONALD R. GARNETT (Observatorio Steward, Universidad de Arizona, EEUU)
 - DAVID L. LAMBERT (Universidad de Texas en Austin, EEUU)
 - NORBERT LANGER (Universidad de Utrecht, Países Bajos)
 - FRANCESCA MATTEUCCI (Universidad de Trieste, Italia)
 - MAX PETTINI (Instituto de Astronomía, Cambridge, Reino Unido)
 - GRAZYNA STASINSKA (Observatorio de París-Meudon, Francia)
 - GARY STEIGMAN (Universidad Estatal de Ohio, EEUU)

ACTOS PARALELOS

Domingo 17: Cóctel de bienvenida.

Miércoles 20: Visita al Instituto de Astrofísica de Canarias, en La Laguna.
 Conferencia de divulgación a cargo del Prof. Lawrence Krauss sobre "La física de Star Trek", en el Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife
 Cena en el Instituto de Astrofísica, en La Laguna.

Jueves 21: Visita de trabajo al Observatorio del Roque de los Muchachos (La Palma).

Sábado 23 Visita de trabajo al Observatorio del Teide (Tenerife).

Martes 26: Visita a las bodegas Monje.

Jueves 28: Cena oficial de clausura.

EDICIONES

VOLÚMENES PUBLICADOS

CANARY ISLANDS WINTER SCHOOLS OF ASTROPHYSICS

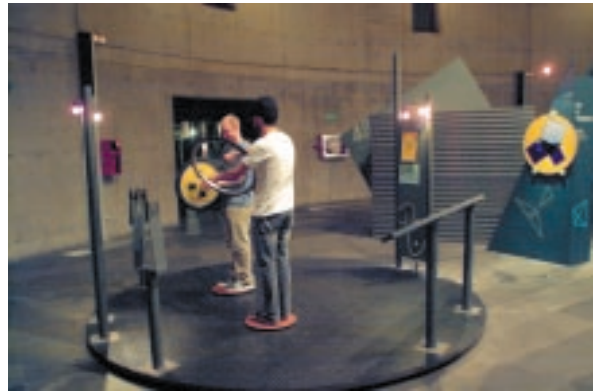
La editorial científica *Cambridge University Press* ha publicado los siguientes volúmenes sobre las Escuelas de Invierno que han precedido a la actual.

1. Solar Observations: Techniques and interpretation. F. SÁNCHEZ, M. COLLADOS y M. VÁZQUEZ.
2. Observational and Physical Cosmology. F. SÁNCHEZ, M. COLLADOS y R. REBOLO.
3. Star Formation in Stellar Systems. G. TENORIO-TAGLE, M. PRIETO y F. SÁNCHEZ.
4. Infrared Astronomy. A. MAMPASO, M. PRIETO y F. SÁNCHEZ.
5. The Formation and Evolution of Galaxies. C. MUÑOZ-TUÑÓN y F. SÁNCHEZ.
6. The Structure of the Sun. T. ROCA-CORTÉS y F. SÁNCHEZ.
7. Instrumentation for Large Telescopes. J.M. RODRÍGUEZ-ESPINOSA, A. HERRERO y F. SÁNCHEZ.
8. Stellar Astrophysics for the Local Group. A. APARICIO, A. HERRERO y F. SÁNCHEZ.
9. Astrophysics with Large Databases in the Internet Age. M. KIDGER, I. PÉREZ-FOURNON y F. SÁNCHEZ.
10. Globular Clusters. I. PEREZ-FOURNON, C. MARTÍNEZ ROGER y F. SÁNCHEZ.
11. Galaxies at High Redshift. F. MORENO-INSERTIS, I. PEREZ-FOURNON, M. BALCELLS y F. SÁNCHEZ.
12. Astrophysical Spectropolarimetry. J. TRUJILLO BUENO, F. MORENO-INSERTIS & F. SÁNCHEZ.

XIV CANARY ISLANDS WINTER SCHOOL OF ASTROPHYSICS

"MATERIA OSCURA Y ENERGÍA OSCURA EN EL UNIVERSO"

INSTANTÁNEAS





PARTICIPANTES EN LA XIV CANARY ISLANDS WINTER SCHOOL OF ASTROPHYSICS



INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS (IAC)

INSTITUTO DE ASTROFÍSICA (La Laguna, TENERIFE)

C/ Vía Láctea, s/n
E38200 LA LAGUNA (TENERIFE). ESPAÑA
Teléfono: 34 - 922 605200
Fax: 34 - 922 605210
E-mail: cpv@ll.iac.es
<http://www.iac.es>

Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI)

Teléfono: 34 - 922 605186
Fax: 34 - 922 605192
E-mail: otri@ll.iac.es
<http://www.iac.es/otri>

Oficina Técnica para la Protección de la Calidad del Cielo (OTPC)

Teléfono: 34 - 922 605365
Fax: 34 - 922 605210
E-mail: fdc@ll.iac.es
<http://www.iac.es/proyect/optc>

OBSERVATORIO DEL TEIDE (TENERIFE)

Teléfono: 34 - 922 329100
Fax: 34 - 922 329117
E-mail: teide@ot.iac.es
<http://www.iac.es/ot>

OBSERVATORIO DEL ROQUE DE LOS MUCHACHOS (LA PALMA)

Apartado de Correos 303
E38700 SANTA CRUZ DE LA PALMA
Teléfono: 34 - 922 405500
Fax: 34 - 922 405501
E-mail: adminorm@orm.iac.es
<http://www.iac.es/gabinete/orm/orm.htm>

