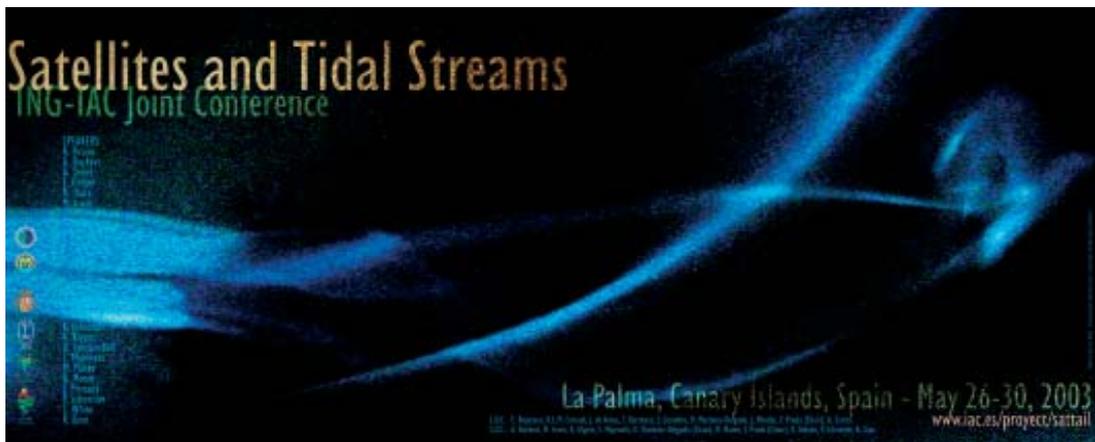




Participantes en el Congreso Internacional de Astrofísica «Satellites and Tidal Streams». Foto: Javier Méndez (ING).

**Congreso Internacional de Astrofísica:  
"Galaxias satélite y corrientes de marea galácticas"**



Cartel del congreso «Satellites and Tidal Streams». Diseño: Narciso Hernández.



Los Cancajos (La Palma). 26-30/05/03

**D**el 26 al 30 de mayo se celebró en Los Cancajos (La Palma) el congreso sobre *Satellites and Tidal Streams* (Galaxias satélite y corrientes de marea galácticas). El congreso fue organizado por el Grupo de Telescopios Isaac Newton (ING) y el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) y contó con el apoyo financiero del Ministerio de Ciencia y Tecnología, el Cabildo Insular de La Palma, el Ayuntamiento de Breña Baja y el Patronato de Turismo de La Palma.

El estudio de la formación de galaxias es uno de los temas claves de la astrofísica moderna. Los modelos cosmológicos actuales sostienen que la formación de estructuras en el Universo se realiza jerárquicamente, de tal manera que las galaxias se crean a partir de la agregación de estructuras más pequeñas. Por ejemplo, las galaxias más masivas se habrían formado a partir de la fusión de galaxias de menor tamaño, y éstas, a su vez, de otras aún más pequeñas o, incluso, de agrupaciones de estrellas.

A las galaxias que orbitan alrededor de otras de mayor masa, como la Luna gira alrededor de la Tierra, se las denomina «galaxias satélite». Cuando una galaxia satélite es engullida por la galaxia principal, proceso acuñado como «canibalismo galáctico», deja tras de sí una estela de materia llamada «corriente de marea galáctica».

El hecho de que en la actualidad se observen galaxias satélite y corrientes de marea es una demostración de que el proceso de formación jerárquica de galaxias continúa hoy día. Sin ir más lejos, en la Vía Láctea, la galaxia en la que nos encontramos, se ha detectado recientemente una corriente de



Participantes del congreso en el Telescopio «William Herschel». Foto: Javier Méndez.

marea asociada a la galaxia enana de Sagitario, la galaxia satélite más cercana a nosotros. Otro buen ejemplo de canibalismo galáctico tiene lugar en la galaxia de Andrómeda, la mayor del Grupo Local de galaxias. En ambos descubrimientos se utilizó el Telescopio Isaac Newton (INT), instalado en el Observatorio del Roque de Los Muchachos, en La Palma.

En el congreso, se presentarán los últimos resultados sobre materia oscura, ya que el estudio de la interacción gravitatoria de las galaxias con sus satélites proporciona pistas sobre las características y distribución de esta forma de materia dominante en el Universo.

Dentro de las actividades relacionadas con el congreso, el martes 27 de mayo tuvo lugar una rueda de prensa en el hotel H10 Taburiente Playa, sede del congreso. Además, el miércoles 28, Manuel Vázquez, investigador del IAC, pronunció una conferencia abierta al público en el Real Club Náutico en Santa Cruz de la Palma.

#### Más información:

Página web del congreso:

<http://www.iac.es/project/sattail/>

Nota de prensa: Canibalismo galáctico

<http://www.iac.es/gabinete/noticias/2001/mar08.htm>

Nota de prensa: *One ring to encompass them all: A giant stellar structure surrounding the Milky Way*

<http://www.ing.iac.es/PR/press/ras20030106.html>

Nota de prensa: *Our galaxy's «sister» is a cannibal*

<http://www.ing.iac.es/PR/press/aao.html>

Entrevistas realizadas por Bibiana Bonmatí (IAC). Fotografías: Bibiana Bonmatí (IAC) y Javier Méndez (ING).

## BÚSQUEDA DE MATERIA OSCURA EN LA PALMA

En el congreso *Satellites and Tidal Streams*, los investigadores Josep Flix y Manel Martínez, del Instituto de Física de Altas Energías (IFAE) de Barcelona, y Francisco Prada, del IAC, presentaron el proyecto para la búsqueda de materia oscura con el telescopio de altas energías MAGIC (*Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov*).

En los últimos años se han propuesto diversos candidatos para formar parte de la materia oscura. En la actualidad se especula con algún tipo de partícula pesada que hubiera sobrevivido a la «Gran Explosión», es decir, que fuera lo suficientemente estable como para no haberse desintegrado hasta ahora. De las partículas conocidas, no hay ninguna que cumpla estos requisitos. Sin embargo, en las últimas décadas, se han desarrollado nuevas teorías de Física de partículas, las llamadas Teorías Supersimétricas, que además de explicar de manera unificada la naturaleza y las características de todas las partículas conocidas y ajustarse a los resultados experimentales obtenidos en los grandes aceleradores de partículas, predicen la existencia de un nuevo tipo de partículas de entre las cuales hay una que podría ser una candidata muy plausible: el «neutralino» (distinta del «neutrino», partícula que también ha sido candidata a materia oscura). Por ahora, no hay ninguna evidencia experimental directa de la existencia de estas nuevas partículas pero la teoría predice que podrán detectarse en el *Large Hadron Collider* (LHC), el gran acelerador de protones que se está construyendo en el CERN, en Ginebra, y que empezará a operar en el 2007.

Las Teorías Supersimétricas predicen también que, en altas concentraciones, los neutralinos pueden interactuar entre ellos, aniquilándose y dando como resultado radiación de muy alta energía (rayos gamma), que podría llegar a detectarse de una forma indirecta en la Tierra. Las simulaciones cosmológicas predicen que estos neutralinos habrían evolucionado y formado galaxias en el Universo que no podemos ver, pero sí «notar su presencia» debido al campo gravitatorio que generan.

MAGIC es un telescopio Cherenkov, que detecta luz visible producida por la radiación gamma al penetrar en la atmósfera. Con 17 m de diámetro, es el telescopio de este tipo mayor y más sofisticado del mundo, en el momento presente, y tiene las características necesarias para poder detectar la señal procedente de la aniquilación de los neutralinos. El telescopio, instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, empezará las observaciones este verano, y la construcción de otro telescopio similar está prevista para el año próximo. MAGIC es una colaboración internacional, coliderada por el Instituto Max-Planck de Astrofísica (MPI) de Munich y el IFAE de Barcelona, en la que participan 19 institutos de distintos países: Armenia, Alemania, Italia, España, Estados Unidos, Polonia, Suiza, Rusia, Ucrania y Finlandia.



## RESULTADOS RELEVANTES SOBRE LA MATERIA OSCURA CON EL ESTUDIO DIGITAL DEL CIELO «SLOAN»

Un nuevo proyecto en el marco del llamado «Estudio Digital del Cielo SLOAN» (*Sloan Digital Sky Survey*, SDSS) ha proporcionado la prueba más directa de que las galaxias residen en el centro de gigantes concentraciones de materia oscura, las cuales pueden ser 50 veces más grandes que la galaxia misma. Este estudio da apoyo directo a las teorías astronómicas generalmente aceptadas sobre materia oscura. Francisco Prada, actualmente del IAC y del ING, junto con sus colaboradores de distintas instituciones de SLOAN, presentaron estos resultados en el congreso «Galaxias satélite y corrientes de marea galáctica». Aunque no puede ser observada directamente, se cree que la materia oscura constituye el 27% del total de la masa del Universo, comparada con sólo el 3% de la materia normal observada. El resto, de acuerdo con los modelos de estructura y evolución del Universo, consiste en energía y radiación oscuras. El estudio de la materia oscura «es importante porque es una medida directa de algunas de las propiedades predichas para este tipo de materia», explica el Prof. Anatoly Klypin, de la Universidad Estatal de Nuevo México. Prada y sus colaboradores de SLOAN observaron 250.000 galaxias de las catalogadas con el fin de encontrar buenas candidatas para un estudio de los efectos gravitatorios de la materia oscura. De los datos de este muestreo se identificaron 3.000 galaxias satélite -pequeñas galaxias orbitando a las galaxias grandes-, y se pudieron medir sus velocidades. Los investigadores determinaron la velocidad de cada galaxia satélite en relación con la galaxia a la que orbita midiendo el desplazamiento al rojo en la luz de los objetos. Teóricamente, la velocidad de una galaxia satélite debe disminuir cuando ésta se aleja del objeto que está orbitando debido a los efectos de la gravedad. En el caso de los planetas de nuestro sistema solar, donde hay demasiada poca materia oscura como para tener efecto gravitatorio, la disminución es rápida porque no hay masa entre los planetas y el Sol. Pero en las zonas exteriores de las galaxias, donde se cree que se acumula la materia oscura, la disminución de velocidad sería, si los modelos cosmológicos son correctos, mucho más gradual. «Nuestros resultados -señala Prada- implican la presencia de materia oscura. Los hallazgos proporcionan una fuerte evidencia que contradice la teoría de la gravedad alternativa *Dinámica Newtoniana Modificada* (MOND)». Controvertido desde que fuera propuesto en 1983, el modelo MOND elimina la necesidad de materia oscura en la explicación de la naturaleza del Universo, cambiando la ley de la gravedad en áreas tales como las «afueras» de las galaxias.



DAVID MARTÍNEZ DELGADO  
 Instituto Max-Planck de  
 Astronomía  
 (Heidelberg, Alemania).  
 Organizador del Congreso

Una de las preguntas fundamentales de la astrofísica moderna es cómo se formaron las galaxias que observamos hoy día. El modelo cosmológico para la formación de estructuras en el Universo es el de Materia Oscura Fría (CDM), que predice un escenario de formación jerarquizada de galaxias. Las galaxias enanas serían las primeras en formarse en el Universo para posteriormente fusionarse y formar las galaxias mayores. Las galaxias enanas satélite que observamos hoy día serían los objetos supervivientes de este proceso, y podrían ser considerados como los restos visibles de los «bloques de construcción» de las galaxias más masivas, como la nuestra.

La Vía Láctea y sus satélites nos ofrecen el laboratorio más próximo para estudiar estos satélites y poner a prueba algunas de las predicciones de este modelo cosmológico. Es interesante que el escenario de formación jerarquizada de galaxias propuesto por el CDM coincide a grandes rasgos con la teoría clásica de la formación de la Vía Láctea propuesta por Searle & Zinn en 1978. En la última década, las cámaras CCD de gran campo (como la instalada en el telescopio Isaac Newton en el Observatorio del Roque de los Muchachos) y los sondeos de gran escala (como el Sloan Digitalized Sky Survey - SDSS- o 2MASS) han proporcionado resultados sin precedentes en estudios de la

formación de nuestra Galaxia. Por primera vez se han detectado claramente subestructuras en el halo de la Vía Láctea, cuyo origen parecen ser los restos de galaxias enanas destruidas por la fuerza gravitatoria de nuestra Galaxia y que reciben el nombre de corrientes de marea galácticas (*tidal streams*).

La mayor corriente de marea conocida procede de la galaxia enana de Sagitario, descubierta en 1994. Hoy sabemos que esta galaxia forma una corriente que envuelve completamente a la Vía Láctea en una órbita polar, proporcionando un «test de partículas» natural para el estudio del halo de materia oscura de nuestra Galaxia. Sagitario no sólo contribuye a la construcción del halo con su componente estelar, sino que al menos 5 cúmulos globulares galácticos conocidos estuvieron asociados a Sagitario antes de su destrucción. A pesar de que esta corriente alcanza las regiones más remotas del halo de nuestra galaxia (situadas al menos una distancia de 50 kiloparsec del Sol, las observaciones del 2MASS...) han confirmado las predicciones teóricas de que esta corriente cruza el disco galáctico en las cercanías de la vecindad solar. Numerosos grupos se han puesto a la caza de estrellas de Sagitario en nuestras proximidades usando muestras muy extensas de estrellas con movimientos propios.

El estudio de la estructura de nuestra Galaxia y su sistema de satélites ha planteado también preguntas sin respuesta en el marco de la teoría del CDM. Aunque esta teoría reproduce con éxito la estructura a gran escala del Universo, sus predicciones no explican algunas de las observaciones realizadas a más pequeña escala en nuestro entorno más cercano. Por ejemplo, el número de galaxias enanas rodeando la Vía Láctea es un orden de magnitud más pequeño que el espectro de masas predicho por el CDM. Además, en el contexto del CDM, el halo Galáctico fue construido a través de la fusión de sistemas de baja masa, similares a las galaxias enanas. Sin embargo, los patrones de abundancia observados en los satélites de la Vía Láctea actuales son muy diferentes de los encontrados en las estrellas de campo del halo. Los «ladrillos» de la Vía Láctea serían entonces muy diferentes a las galaxias enanas que observamos hoy día en nuestro entorno. Otra controversia importante es el contenido en materia oscura de las galaxias satélites. Las observaciones de que algunas galaxias satélites están



Galaxia enana de Sagitario alrededor de la Vía Láctea.  
 Composición: Gabriel Pérez (SMM/IAC).

en proceso de destrucción por las fuerzas de marea de la Vía Láctea (como la galaxia Ursa Minor) sugieren que estos sistemas podrían ser más «frágiles» de lo previsto por el CDM, lo que pone restricciones a que estos sistemas estén rodeados de un halo muy masivo de materia oscura. El objetivo del congreso fue reunir a los mayores expertos en el tema (incluyendo algunos de los padres de la teoría del CDM y de las teorías de la formación de la Galaxia) para discutir todas estas discrepancias en un marco más próximo que el proporcionado por las publicaciones científicas.

Una de las conclusiones de este congreso es que la Vía Láctea y su sistema de satélites esconden todavía muchos secretos. Sólo en este año hemos asistido a grandes descubrimientos (ej. la corriente de marea en Monoceros) de los sondeos de gran campo, pero quizás lo mejor esté todavía por venir. Corrientes de marea desconocidas podrían ser descubiertas una vez que el SDSS sea completado. La búsqueda de los satélites «oscuros» (compuestos sólo por materia oscura) propuestos por el CDM sólo ha comenzado. Los telescopios de la clase 10 m permitirán estudiar la dinámica interna de los satélites de la Vía Láctea y «pesar» sus halos de materia oscura. La nueva generación de satélites astrométricos (GAIA, SIM, FAME) permitirán detectar nuevas galaxias destruyéndose en el halo y, quizás, en la vecindad solar.



RODRIGO IBATA  
Observatorio de Estrasburgo  
(Francia)

**U**na corriente de marea, ¿cómo se forma?  
“Si observáramos la evolución de una galaxia enana cercana a otra gigante, veríamos que ésta en principio tiene una forma esférica. La masa de la galaxia gigante genera una fuerza gravitatoria que «estira» la galaxia enana en una dirección, de manera que se deforma gradualmente llegando a tener una forma elipsoidal. El siguiente paso de la interacción entre las dos galaxias es que las estrellas empiezan a desprenderse de la esfera inicial y se forma una corriente de estrellas que sigue la órbita de la galaxia enana alrededor de la galaxia gigante; esto es lo que se conoce como una «corriente de marea galáctica». Finalmente la galaxia enana se deshará totalmente y pasará a formar parte de la galaxia gigante, aumentando de esta forma su masa.”

●●● ¿Qué relación existe entre las corrientes de marea y las estructuras galácticas?  
“Las estructuras de la galaxia, como el halo y

el disco, son mucho más grandes. En realidad, el halo ha podido ser formado por estas corrientes, que con el paso del tiempo se mezclan de forma que no quedan estructuras pequeñas y todo queda más bien homogéneo. De hecho, las corrientes de estrellas se pueden observar en las regiones exteriores de la galaxia más allá del final del disco, y es en esa zona donde se buscan este tipo de estructuras.

Las corrientes de marea nos permiten, entre otras cosas, deducir cómo es la forma del halo, que está formado principalmente de materia oscura. Por ejemplo en la corriente de marea de Sagitario observamos que describe un gran círculo alrededor de la Vía Láctea, por lo que podemos concluir que el halo de nuestra galaxia es esférico. Si no fuera así veríamos algo muy diferente, ya que habría una precesión de la órbita de la corriente de forma que el círculo se rompería.

En el halo hay muy pocas estrellas y la existencia de corrientes permiten medir el potencial de la masa invisible y medir el achatamiento del halo.”

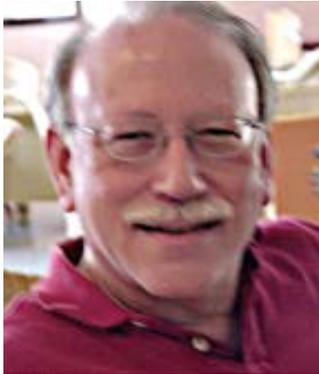
●●● Desde el descubrimiento de la corriente de marea de Sagitario en 1994, ¿Cuál ha sido el siguiente paso en el estudio de las corrientes de marea?  
“Durante tres años hemos realizado un estudio exhaustivo de la galaxia de Andrómeda, una gigante muy próxima a la Vía Láctea, aproximadamente 2 millones de años luz. Lo que se pretendía era hacer un censo de las estrellas en el exterior de la galaxia para poder evaluar la cantidad de materia oscura que hay alrededor de Andrómeda. Para ello hemos utilizado un potente instrumento en el Telescopio «Isaac Newton» (INT), instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma. Se trata de una cámara de gran campo, aproximadamente el tamaño de una Luna, con la que se han realizado 150 campos de Andrómeda, que ocupa 30° sobre el cielo –incluido el halo–, y se ha podido medir la luminosidad de estrellas individuales.

Este estudio nos ha permitido descubrir que existen unas subestructuras en el halo formadas por concentraciones de materia. Estas subestructuras se predicen en los modelos cosmológicos. Además hemos encontrado una corriente de estrellas gigantesca, que tiene una longitud de aproximadamente medio millón de años luz y que pasa por los polos de la galaxia.”



© Galaxia de Andrómeda. Richard Sword, Institute of Astronomy, Cambridge.

●●● Se sabe que la composición del halo de Andrómeda y de la Vía Láctea no son iguales ¿Cuál podría ser la causa?  
“Efectivamente, las estrellas del halo de nuestra galaxia parecen ser más viejas y pobres metálicamente que las del halo de Andrómeda que son más metálicas; la metalicidad se refiere a la abundancia cualquier elemento más pesado que el helio. Si asumimos que tanto la Vía Láctea como Andrómeda se han formado por la destrucción de galaxias satélite que han pasado a formar parte, principalmente, del halo, probablemente la respuesta es que las galaxias enanas «engullidas» por Andrómeda eran metálicamente más ricas que las satélite de la Vía Láctea.”



JOEL R. PRIMACK  
Universidad de California en  
Santa Cruz (Estados Unidos)

**L**a terminología de materia oscura fría (CDM, *Cold Dark Matter*), ¿cómo surgió?

“La terminología sobre materia oscura, fría, templada y caliente, fue utilizada por primera vez en una charla que di en Francia en 1983, y también por Dick Bond. Los dos estuvimos de acuerdo en que ésta era una terminología mucho mejor que la que se utilizaba anteriormente (materia oscura de largo recorrido libre y de corto recorrido libre). Después, todo el mundo utilizó esta terminología, pero, creo que nosotros la utilizamos por primera vez en la primavera de 1983, exactamente 20 años atrás.

El primer artículo<sup>(1)</sup> en el que se presentó una imagen de la teoría CDM fue realizado por George Blumenthal, Sandra Faber y yo, de la Universidad de Santa Cruz (California), en colaboración con Martin Rees, de Cambridge. En él aparecía lo que se considera como el primer mapa de materia oscura fría.”

••• ¿Qué características debe tener una partícula para ser una candidata a CDM?

“Lo más importante es que para que una partícula sea CDM ha de

haber tenido velocidades muy bajas durante el Universo temprano. Esta es la gran diferencia entre, por ejemplo, la materia oscura templada y la caliente.

Pero, en cualquier caso, la naturaleza de la partícula es completamente libre. Podría ser masiva, como las partículas supersimétricas WIMP (*Weakly Interacting Massive Particle*), que son mucho más pesadas que un núcleo de oro, o podría ser extremadamente ligera como el axión, que es mil millones de veces más ligero que el protón. Así pues, ya sean cientos de veces la masa del protón o millones de veces menor, todas ellas podrían ser candidatas a materia oscura.

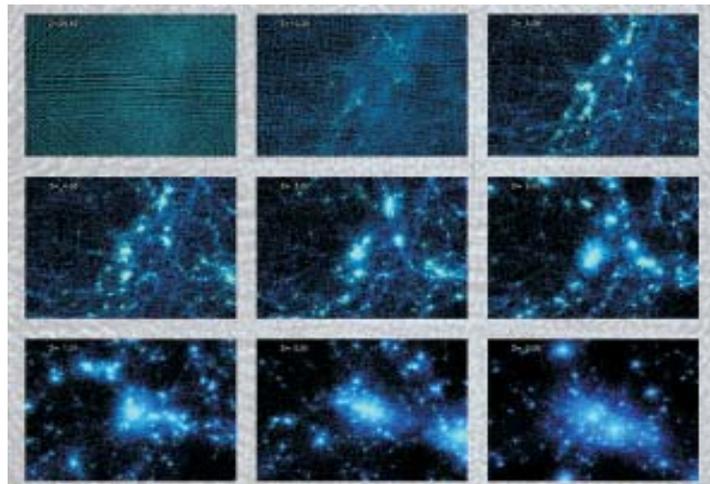
De hecho la CDM podría haber sido la componente de los agujeros negros primordiales, pero cualquiera que sea la partícula debería haber tenido una velocidad muy baja. La mayor parte de los científicos se inclinan por las WIMPs. Existe una pequeña evidencia de la supersimetría, que aunque no sea en absoluto convincente, es suficiente para que los físicos teóricos consideren que esta teoría empieza a tener sentido.

La física de partículas está poniendo mucho esfuerzo en la confirmación de estas teorías, aunque resulta muy costosa. Se está intentando comprobar en experimentos bajo tierra, en telescopios que buscan la radiación de aniquilación de las partículas, como MAGIC (instalado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma), y por supuesto en los aceleradores. Tan pronto como el LHC (*Large Hadron Collider*) se ponga en marcha, sabremos inmediatamente si estas ideas son correctas o no.

Otra de las razones por las que estas partículas supersimétricas masivas «gustan» es porque la física de partículas diseñó esta supersimetría sin relación alguna con la cosmología y la posibilidad de que éstas puedan ser el origen natural de la materia oscura, predicha por dos teorías que se han desarrollado independientemente, es una bonita posibilidad.”

••• ¿Qué papel desempeña la CDM en la formación jerárquica de galaxias?

“Antes de la teoría CDM se pensaba que la Vía Láctea se había formado por un proceso de acreción, esto fue propuesto en los 70, antes de la CDM que nació en los 80. Pero la idea de que todo en el Universo ha sido formado por



Simulación de la formación jerárquica de un grupo de galaxias, similar al Grupo Local, según el modelo de CDM. Realizada en el Centro Nacional de Aplicaciones Informáticas (EEUU) por Andrey Kravtsov (Universidad de Chicago)

acreción de materia, la idea pura de formación jerárquica es estrictamente CDM. Por tanto, CDM implica formación jerárquica y la evidencia experimental de que realmente el Universo se formó mediante este proceso favorece mucho la teoría CDM.

Por ejemplo en el caso de HDM (*Hot Dark Matter* o Materia Oscura Caliente), idea que fue popular algunos años antes del CDM, era justo lo contrario. Las primeras estructuras que se formaban eran supercúmulos que al fragmentarse creaban el resto de estructuras, como las galaxias. Esta idea de fragmentación no funcionó ya que se comprobó que los supercúmulos son muy jóvenes y se están formando ahora y las galaxias se formaron con anterioridad. Por esta razón, la CDM desplazó a la HDM.”

••• ¿Se puede decir que la detección por absorción de rayos gamma de alta energía sería una prueba de la formación galáctica?

“No exactamente una prueba, pero si un camino en el estudio de la formación galáctica. La absorción de rayos gamma de alta energía se realiza porque este tipo de rayos se forman a partir de dos fotones de baja energía que interactúan dando lugar a un par electrón-positrón. Si podemos estudiar la cantidad de absorción, que depende básicamente de la energía de los rayos gamma y también de la distancia de la fuente, podremos medir cuánta luz hay en el Universo.

Los nuevos telescopios, como MAGIC, van a poder llegar a órdenes de magnitud menores en energía, y esto nos va a permitir mirar más lejos en la distancia porque son más sensibles. Además nos permitirá llegar a la parte óptica del espectro, que es donde se produce la mayor parte de la absorción. Así será posible descifrar exactamente cuántas estrellas han producido luz e incluso de aquellas que ya no existen porque han acabado su ciclo.”

He leído que tiene algunos artículos sobre la implicación cultural de la Cosmología ¿Cuáles son estas implicaciones?

“Existen muchas. Una de las más importantes está relacionada con la edad y el tamaño del Universo. La imagen bíblica, interpretada literalmente, da a la gente la idea de que todo el Universo tiene unos pocos miles de años y que el ser humano se creó en el sexto día, entonces ¡las personas son solamente seis días más jóvenes que todo el Universo! Creo que es importante para todos darnos cuenta de que el Universo tienen alrededor de 14 mil millones de años y que nosotros estamos aquí desde hace apenas 100.000 años.

Por otro lado, actualmente estamos en la mitad de la vida del Universo, y va a estar ahí durante otros muchos miles de millones de años, y el sistema solar también, ya que el Sol se encuentra en la mitad de su vida y todavía le restan otros 5 o 6 miles de millones de años. Por tanto, queda mucho futuro por delante, y si cuidamos la Tierra la humanidad podrá seguir avanzando en el conocimiento y disfrutando de la vida, ya que nuestro pasado es mucho más corto que el futuro.

Existen muchas historias que podría contar acerca de las implicaciones culturales de la Cosmología. Solamente voy a explicar una que creo es emocionante, interesante y sorprendente. Escribí un artículo con mi mujer, Nancy Abrams, llamado «La gravedad, el último principio del capitalismo»<sup>(2)</sup>. La idea es que la gravedad siempre genera regiones en las que la densidad crece en comparación con otras regiones. Es lo que los astrónomos llaman «regiones ricas». También existen otras regiones llamadas «pobres», en las que apenas existen galaxias, y que cada vez son más pobres. La razón es que las regiones ricas se expanden más lentamente y las pobres más rápidamente, en promedio. Así, las ricas siempre son más ricas y las pobres más pobres, y éste sería el último principio del capitalismo.

Sin embargo, en Astronomía lo que ocurre es que no todas las regiones muy densas llegan a ser un agujero negro, porque si colapsan, las velocidades aumentan y el colapso finalmente se detiene. Existen mecanismos del movimiento circular o, por ejemplo, con la materia oscura en galaxias, que hacen que finalmente lleguen a ser estables y mantenerse durante miles de millones de años. Esta estabilidad en los planetas es necesaria para la vida y para nosotros.

Esta analogía con el capitalismo es interesante porque todo parece ser igual, los ricos más ricos y los pobres más pobres y, ciertamente, es lo que ocurre en el mundo. Ahora el problema es que si no tenemos algo que se oponga, de la misma forma que el movimiento a la gravedad, llegaremos a un agujero negro económico y todo se concentrará provocando un colapso.

La cuestión es saber cuál es en Economía el equivalente al movimiento en la gravedad.”

••• ¿Y cuál es ese elemento de equilibrio en Economía?

“No lo sé, ¡no soy economista, soy cosmólogo! La lección es que las cosas pueden ir mejor si nos preguntamos este tipo de cuestiones que mucha gente nunca se pregunta.”

(1) *Formation of Galaxies and Large-Scale Structure with Cold Dark Matter*, by G.R. Blumenthal, S.M. Faber, J.R. Primack, and M.J. Rees, *Nature* 311, 517 (1984).

(2) «Gravity, the Ultimate Capitalist Principle,» by Joel R. Primack and Nancy Ellen Abrams *Invited article for 15<sup>th</sup> anniversary issue of Tikkun magazine, Tikkun* 16 (5), 59-61 (Sept/Oct 2001).



EVA K. GREBEL  
Instituto Max-Planck de  
Astronomía  
(Heidelberg, Alemania)

**U**sted participa en el proyecto SLOAN ¿En qué consiste? “Este proyecto tiene principalmente el objetivo de obtener imágenes y datos espectroscópicos de una superficie de 10.000 grados del cielo, lo que equivale a un cuarto aproximadamente, es decir un área enorme. La idea es profundizar en la investigación, limitando la luminosidad, y observar concretamente los objetos que se encuentran en este rango. Esta colaboración empezó hacia los años 90. Inicialmente sólo fueron universidades americanas e instituciones de investigación de este país. Pero actualmente el proyecto ha aumentado considerablemente el número de colaboradores y se han añadido instituciones de otros países. En la actualidad, aparte de las instituciones de Estados Unidos, participan dos centros en Alemania, entre ellos el mío, y también un instituto japonés.”

••• ¿Qué método de trabajo se utiliza? “En primer lugar, SLOAN toma imágenes del cielo simultáneamente en 5 bandas de longitudes de onda distintas. Posteriormente se reducen y se tratan mediante un software que determina qué tipo de objetos se ven en las imágenes, estrellas, galaxias, etc. Tras realizar una clasificación automática, se seleccionan los objetivos para realizar espectroscopía, que es el siguiente paso. El objetivo principal es realizarla en tantas galaxias o cúasares como sea posible. Esto es debido a que

inicialmente el programa científico estaba centrado en estudios extragalácticos para el estudio del Universo a gran escala, por ejemplo, para encontrar cúasares con alto desplazamiento al rojo. Pero tras descubrir las posibilidades de este sondeo, en la actualidad hay muchos proyectos que no estaban previstos inicialmente en los objetivos de SLOAN. Uno de ellos es el proyecto en el que participa David Martínez sobre estructura galáctica y, concretamente, sobre la estructura de la Vía Láctea, ya que obtenemos todos los datos de las estrellas. Uno de los aspectos especiales del sondeo de SLOAN es que aparte de las imágenes se pueden obtener espectros a partir de los cuales se pueden medir las velocidades de las galaxias, y estas velocidades ayudan a determinar la distancia a la que se encuentran. Así pues, lo que se obtiene finalmente es un mapa tridimensional del Universo.”

••• ¿Cuáles son los proyectos y los resultados obtenidos por SLOAN relacionados con este congreso?

“En mi opinión existen varios resultados, y uno de ellos ha sido el descubrimiento de corrientes de marea en la Vía Láctea. La primera fue la de la galaxia de Sagitario que aparentemente se está uniendo a la Vía Láctea y que fue descubierta en 1994. Esta corriente se pudo observar en el área del cielo cartografiada por SLOAN. Otro resultado es la nueva corriente de Monoceros en la Vía Láctea que ha sido descubierta con los datos de SLOAN. Las imágenes que se obtienen permiten ver de cerca galaxias enanas que orbitan alrededor de la Vía Láctea, estudiar cómo son perturbadas y destruidas por la Vía Láctea en la actualidad y observar las corrientes de marea que emergen debidas a esta interacción. Hasta ahora, sólo hemos encontrado unas pocas galaxias satélite, pero existen otras, las cuales aun no han sido encontrados por SLOAN, que podrían tener corrientes importantes. Uno de los proyectos en los que estamos trabajando, conjuntamente con David Martínez, es la búsqueda de corrientes en el halo de la Vía Láctea. De carácter más extragaláctico, ha sido la ponencia de Francisco Prada, en la que habló de las órbitas que realizan las galaxias satélite alrededor de otras gigantes. Estas órbitas vienen determinadas principalmente por la masa de la galaxia masiva, por tanto, si podemos tener información de estas órbitas o, de hecho, de las velocidades de las galaxias, podemos tener información de la masa de la galaxia gigante. Éstos son los que considero como resultados principales en conexión directa con el congreso. También se ha hablado sobre el efecto de microlente gravitatoria; en este caso se utilizan las galaxias como indicadores de la perturbación de la luz por efectos gravitatorios. Haciendo ciertas suposiciones acerca de la distribución de los objetos para las desviaciones mayores, que se pueden medir básicamente mirando galaxias distantes, y suponiendo que pueden ser perturbadas por las galaxias más cercanas, podemos tener una idea de la distribución de la masa del Universo. Para ello es necesario un amplio sondeo a gran escala del Universo, y éste es de hecho el principal trabajo realizado en SLOAN.”

••• ¿Por qué SLOAN tiene un impacto tan grande en este campo de la Astrofísica, más que otros proyectos?

“Básicamente porque en realidad el área cubierta es muy grande, y no tiene precedentes. Otro punto importante es que se realizan imágenes en distintas bandas de longitudes de onda, lo cual también es inusual comparado con otros proyectos existentes. Existen mapas celestes, de los años 50 y 60, realizados en placas fotográficas que cubren todo el cielo, y son buenos mapas, pero de resolución muy pobre y no llegan a tanta profundidad como en el caso de SLOAN. En nuestro sondeo, la magnitud límite es de 20, dependiendo de la banda de longitud de onda que se utiliza. En una banda como por ejemplo el rojo llega a 22,3. Actualmente es el proyecto con mayor sensibilidad. Otra ventaja es la combinación de imagen y espectroscopía; la mayoría de los sondeos tienen solamente espectroscopía o solo imagen, pero no combinan los dos.”



**SIMON WHITE**  
Instituto Max-Planck de  
Astrofísica de Garching,  
Munich (Alemania)

**S**obre el halo masivo predicho en la teoría CDM. ¿Cómo podemos saber qué galaxias lo tienen?

“Para poder detectar un halo galáctico debemos encontrar una observación suficientemente sensible que nos permita detectar masas muy distantes de los centros galácticos. Uno de los métodos que permite realizar este tipo de observaciones es mediante la deflexión de la luz descrita en la teoría gravitatoria. Para ello, se utilizan los efectos de lente gravitatoria. Otra manera es utilizando los movimientos de pequeñas galaxias o galaxias satélite, situadas cerca de las más masivas. Estos son los dos métodos que tenemos para medir las masas a larga distancia del centro de las galaxias.”

••• Según la teoría CDM, ¿deberían existir más galaxias satélite?

“La teoría CDM predice que debería haber más objetos «oscuros» dentro de esta parte de los halos alrededor de las galaxias, la cuestión es que el número de objetos visibles alrededor de la Vía Láctea o de las galaxias cercanas es demasiado pequeño y esto, en el fondo, significa que la teoría CDM es correcta. La mayoría de las galaxias satélite deberían no tener estrellas y es difícil entender por qué éste debería ser el caso.”

••• ¿La consecuencia de ello es que podrían existir algunas «galaxias oscuras», sin estrellas?

“De hecho, el término galaxia significa lo mismo que Vía Láctea, y la Vía Láctea tiene estrellas, entonces si no hay estrellas no se podría considerar una galaxia, es una cuestión de definición. Aunque dado que se cree que la mayoría de nuestra propia galaxia está compuesta de materia oscura, podríamos pensar que no necesitamos estrellas para que sea una galaxia. En cualquier caso, la teoría predice que deberían existir «grupos» de materia oscura y esto supondría en definitiva tener inicialmente otro material asociado con éste, y nosotros no sabemos todavía qué tipo de material es. Quizás hay material que está sólo en forma de gas y en tal caso se tendría que poder medir mediante radiotelescopios. Pero no aparece, la mayoría de estas acumulaciones no tienen ninguna estrella.”

••• Existe materia oscura en el exterior de la galaxia pero, ¿también podemos encontrarla en nuestro sistema solar?

“Ciertamente la materia oscura también existe en nuestro sistema solar, pero solamente en pequeñas cantidades. Por ejemplo, los científicos que quieren intentar detectar materia oscura directamente utilizan experimentos bajo tierra, debajo de montañas, donde esperan detectar la colisión de las partículas de materia oscura, con su aparato experimental. Por otro lado, el volumen total de partículas de materia oscura esperado en el Sistema Solar es muy pequeño y por tanto no tiene efectos en el movimiento de los planetas.”

••• Existen otras teorías que no se basan en la idea del CDM, por ejemplo la teoría MOND (*MODified Newtonian Dynamics*), ¿están completamente desechadas?

“El problema es que por el momento no existen teorías alternativas consistentes con la mayoría de los datos que se han obtenido. En cualquier caso, aunque no tengamos por seguro que la teoría CDM es correcta, tampoco tenemos una teoría alternativa para compararla. Concretamente, MOND es una teoría incompleta, ya que por ejemplo no puede ofrecer un modelo del Universo temprano, o tampoco puede describir cómo debería ser el Fondo Cósmico de Microondas.”

••• ¿Actualmente existe buen acuerdo entre las simulaciones de evolución galáctica y los datos experimentales?

“En algunos casos hay acuerdo y en otros no, los investigadores siempre tratan de orientarse hacia aquellos desacuerdos para entender por qué. Existen muchos temas de discusión acerca de qué datos observacionales están en desacuerdo con la teoría. Éste es un signo del problema fundamental que es que no se entiende completamente cómo se deben analizar los datos observacionales debidamente, o, quizás, existan efectos físicos adicionales relacionados con la materia oscura que hace que las observaciones sean diferentes de las esperadas.”

••• ¿Qué resultados de los que se han presentado en este congreso le han parecido más interesantes?

“Ha habido algunas observaciones nuevas interesantes. Yo estoy muy interesado en las observaciones en las que se han visto grandes nubes de gas alrededor de la galaxia de Andrómeda (resultados de Roberto Braun). Los datos se han obtenido mediante un amplio sondeo de un radiotelescopio, y muestran por primera vez grandes nubes de hidrógeno en la parte principal de esta galaxia de la misma forma que vemos nubes de hidrógeno en los alrededores de la Vía Láctea. La diferencia es que en nuestra galaxia no tenemos manera de estimar cuán lejos están estas nubes de hidrógeno, y en este caso, como están ligadas a la galaxia de Andrómeda, podemos determinar mejor la distancia y así entender mejor nuestra propia galaxia.”



JOSEP FLIX MOLINA  
Instituto de Física de Altas  
Energías (UAB-Barcelona)

Un telescopio como MAGIC, ¿cómo funciona a nivel técnico? ¿Y qué distingue a MAGIC de los otros telescopios de este tipo?

“Con la ayuda de satélites especializados, en las últimas décadas se ha podido detectar radiación que no podía ser medida directamente con instrumentos instalados en la superficie terrestre, ya que dicha radiación es absorbida en nuestra atmósfera. Además de las ventanas de energías ya exploradas en el visible y en radio, el Universo se ha hecho transparente para la mayor parte del espectro electromagnético. Desafortunadamente, en el rango de altas energías (*radiación gamma*) los satélites no gozan de un rendimiento óptimo, ya que su pequeña superficie de detección ( $\sim 1 m^2$ ) junto a los espectros de los objetos emisores que son muy débiles para estas energías, los hace tener una limitación superior en la energía de detección de unos 10 GeV.

MAGIC es un telescopio diseñado para explorar la radiación gamma que proviene del Universo pero, en este caso, desde la superficie terrestre, detectando la radiación gamma por un método indirecto. Cuando la radiación gamma penetra en la atmósfera genera una “cascada” electromagnética, donde se crean miles de pares de

electrones y positrones que emiten luz Cherenkov (en el visible), ya que viajan a una velocidad superior a la velocidad de la luz en la atmósfera. Éste flash Cherenkov tiene una duración de unos pocos *nanosegundos* y se emite a unos 10 km. de la superficie de la tierra con una apertura angular de  $\sim 1^\circ$ . Así, en la superficie se obtiene una iluminación en una gran área que es del orden de  $10^4 m^2$ , lo que convierte a los telescopios Cherenkov en instrumentos muy sensibles a altas energías debido a esta gran área de colección. Una cámara con una matriz de fotomultiplicadores se coloca en el plano focal de un reflector parabólico proporcionando una resolución temporal capaz de detectar estos *flashes* de luz visible. Grandes telescopios Cherenkov son necesarios para conseguir minimizar la energía umbral de detección, ya que éste flash de luz es muy tenue. MAGIC es hoy por hoy el mayor telescopio Cherenkov, con un diámetro de 17 m, donde se han implementado innovaciones tecnológicas que lo llevarán a ser el telescopio Cherenkov con menor energía umbral de detección gamma (de 30 GeV hasta decenas de TeV), y por ello un instrumento único en su campo (hasta ahora, con esta técnica el umbral de detección con los telescopios actuales ronda los 300 GeV). La colaboración MAGIC está formada por un gran número de instituciones en todo el mundo, con una fuerte representación de España, Alemania e Italia. El telescopio está situado en el observatorio del Observatorio del Roque de los Muchachos y ha empezado a operar este mismo verano (2003).”

••• ¿En que consiste el proyecto que se quiere llevar a cabo con MAGIC en relación a la búsqueda de materia oscura?

“En los últimos años se han propuesto diversos candidatos para formar parte de esta materia. En la actualidad se especula con algún tipo de partícula pesada que hubiera sobrevivido a la «Gran Explosión», es decir, que fuera lo suficientemente estable como para no haberse desintegrado hasta ahora. De las partículas conocidas no hay ninguna que cumpla estos requisitos. Sin embargo, en las últimas décadas, se han desarrollado nuevas teorías de Física de partículas, las llamadas “Teorías Supersimétricas”, que además de explicar de manera unificada la naturaleza y las características de todas las partículas conocidas y ajustarse a los resultados experimentales obtenidos en los grandes aceleradores de partículas, predicen la existencia de un nuevo tipo de partículas de entre las cuales hay una que podría ser una candidata muy plausible: el «neutralino». Por ahora, no hay ninguna evidencia experimental directa de la existencia de estas nuevas partículas. Las Teorías Supersimétricas predicen también que, en altas concentraciones, los neutralinos pueden interactuar entre ellos, aniquilándose y dando como resultado radiación gamma, que podría llegar a detectarse con telescopios Cherenkov. Los espectros que se predicen para estas aniquilaciones se extienden hasta una decenas de GeV. Otros telescopios Cherenkov ya han observado a regiones del espacio donde se presume que existan altas concentraciones de materia oscura, como el centro de nuestra propia galaxia, galaxias cercanas (como *Andrómeda*), cúmulos estelares (como *Pal 13*) o incluso galaxias enanas que orbitan a nuestra galaxia y que se encuentran relativamente cerca de nosotros (como *Draco*, que se encuentra a una distancia 10 veces mayor que el centro de nuestra galaxia, pero 10 veces menor que *Andrómeda*). En todos estos casos no ha habido una detección positiva aún que se pueda atribuir a radiación procedente de neutralinos, ya que los instrumentos no son tan sensibles ni tienen un umbral tan bajo en la energía de detección como para explorar todo el rango de posibilidades predichas, pero sí que se han podido fijar límites experimentales tanto en la masa de estas partículas como en su densidad. Con MAGIC, el estudio de este tipo de radiación gamma procedente de las aniquilaciones de neutralinos, se va a llevar a cabo estas medidas con una precisión sin precedentes hasta el momento, ya que, de los telescopios Cherenkov actuales, es el más sensible y el que tiene un

umbral en la energía de detección más bajo, lo que lo convierte en el telescopio idóneo para este tipo de búsquedas de materia oscura supersimétrica. Para poder seleccionar los mejores objetos para este tipo de observaciones se tiene que estudiar la cantidad de radiación que se espera de estos objetos. El más «brillante» se tomará como candidato plausible para la primera observación. Los estudios previos, el análisis y los resultados de la observación conformarán la base de los estudios en materia oscura que estoy realizando conjuntamente con Francisco Prada (ING-IAC) y Manel Martínez (IFAE).”

••• Si se detecta el tipo de radiación predicha para el neutralino, ¿Existe la posibilidad de que sea debida a otro tipo de fenómeno?

“La búsqueda de éste tipo de señal ha de hacerse en zonas donde se predicen altas concentraciones de materia oscura (como nuestro propio centro galáctico o galaxias cercanas). Para poder determinar la naturaleza de la señal detectada hay que estudiar en detalle el fondo de radiación gamma en el campo de visión y así desacoplar la señal que se quiere estudiar. Es cierto que la forma del espectro predicha para la aniquilación de neutralinos tiene una forma específica y similar a la que se observa para otros objetos celestes. Hay que descartar, comparando con otras longitudes de onda, que la detección no procede de alguna fuente emisora gamma (como por ejemplo un púlsar). La acumulación de detecciones positivas con estas características en lugares donde se prevé que existan altas concentraciones de materia oscura, como en galaxias cercanas a la Vía Láctea, podrían respaldar la existencia de los neutralinos como soporte para la materia oscura.”

••• ¿Aparte de la búsqueda de materia oscura, a qué otro tipo de proyectos está destinado?

“Además de las posibilidades que MAGIC ofrece en el campo de la materia oscura, es competitivo en un amplio abanico de temas, como por ejemplo poder determinar el origen de los rayos cósmicos (protones, núcleos de helio, oxígeno, nitrógeno...) observando a los remanentes de supernovas. También es necesaria la caracterización del máximo número de Galaxias de Núcleo Activo a altas energías con mucho detalle para entender los procesos de emisión en la inmediata cercanía del agujero negro central, muy intensa y variable. MAGIC espera detectar del orden de un centenar de estas fuentes. Los púlsares son emisores gamma pero aún no se ha podido



Telescopio MAGIC, en el Observatorio del Roque de los Muchachos.  
Foto: Miguel Briganti (SMM/IAC).

detectar emisión pulsada a alta energía, que es esencial para discernir entre los diferentes modelos de emisión. Otra característica de MAGIC única en éste tipo de telescopios es que se puede orientar a cualquier posición en menos de 30 segundos, lo que lo convierte en el mejor instrumento para estudiar las explosiones de rayos gamma (GRBs) a altas energías. Otros campos de interés serían identificar la naturaleza de las fuentes no identificadas de EGRET (Energetic Gamma-Ray Experimental Telescope), medidas del horizonte de rayos gamma, determinación de parámetros cosmológicos, efectos de gravedad cuántica en medidas de invariancia de la velocidad de la luz y un largo etcétera.”

••• ¿Cuál es el futuro de la investigación de la física de altas energías en el Observatorio del Roque de los Muchachos?

“La colaboración MAGIC ha iniciado los trámites para la construcción de un segundo telescopio con características similares para el año próximo, ya que la observación conjunta mejorará la resolución espacial de detección. Existen otras grandes instalaciones Cherenkov en construcción tanto en el hemisferio Norte (VERITAS) como en el hemisferio Sur (CANGAROO y HESS), aunque con energías umbrales ligeramente superiores. Al ser un campo tan atractivo y abierto, construir una gran instalación muy sensible y con bajo umbral de detección gamma es de gran importancia para llegar a entender qué procesos son los responsables de los fenómenos violentos en esta parte del espectro electromagnético. No cabe duda de que el Observatorio del Roque de los Muchachos es un lugar ideal para la observación y podría llegar a albergar en un futuro próximo una gran instalación de grandes telescopios Cherenkov para la exploración del universo en radiación gamma.”



FRANCISCO PRADA  
IAC/ING.  
Organizador del Congreso

No hay alternativa. La materia oscura será identificada. Ésta es mi apuesta personal: la naturaleza de la materia oscura se determinará en los próximos 10 años. Tenemos ya un precedente, el neutrino. Esta partícula fue la primera que se propuso para materia oscura y que se pudo detectar. Debido a que su masa era del orden del electrón-voltio (eV) y que en el tiempo del desacople del plasma cósmico tenía velocidades relativistas, se la llamó «materia oscura caliente» (HDM). Pero la aplicación del HDM junto con el espectro de fluctuaciones de densidad primordial Zel'dovich era claramente inconsistente con la estructura a gran escala observada en el Universo.

Tras este primer intento, hace unos 20 años, se propuso la teoría de la «materia oscura fría» (CDM) para la formación de estructuras en el Universo. Este modelo sostiene que las partículas que forman la materia oscura deberían tener velocidades casi despreciables en el Universo temprano, en consecuencia debería tratarse de partículas masivas, con masas superiores a 10 GeV, de interacción débil (WIMPs). El actual paradigma de la teoría CDM y su variante  $\Lambda$ CDM (sugerida a partir de la observación del fondo cósmico de microondas y de las supernovas con alto desplazamiento al rojo) con baja densidad de masa ( $\Omega_m = 0,27$ ) y densidad bariónica ( $\Omega_b = 0,05$ ) dada por WMAP han sido

bastante satisfactorias en sus predicciones a gran escala, como la distribución de galaxias, las masas de los cúmulos y la evolución de la abundancia en los cúmulos, las abundancias y evolución de los bosques de Ly $\alpha$  y la normalización y forma del espectro de potencias en las anisotropías del fondo cósmico de microondas. Este modelo también explica satisfactoriamente los valores observacionales de la constante de Hubble y la edad del Universo. La formación jerárquica de estructuras es inherente a la teoría CDM: los objetos más pequeños colapsan primero, y después se unen formando galaxias gigantes, como la Vía Láctea.

En los años recientes, el modelo de CDM ha sufrido ciertas crisis debido a los serios inconvenientes que presenta a pequeña escala, como es la falta de galaxias satélite, el ajuste de las curvas de rotación, o la llamada «catástrofe» del momento angular. A pesar de todo ello la teoría CDM es de lejos el mejor modelo (si no el único), pues explica satisfactoriamente la formación de estructuras en el Universo tal y como hemos tenido oportunidad de comprobar en las presentaciones que fueron expuestas en el congreso «Galaxias Satélite y Corrientes de Marea Galácticas», en mayo, en La Palma. No obstante, la mayor crítica a la teoría CDM es que la naturaleza de esta «materia» continúa siendo desconocida. Me gustaría ver esto no como un problema, si no como una cuestión de tiempo. El tiempo es el principal parámetro que gobierna los descubrimientos científicos. Hay que ser pacientes. No hay duda de que la naturaleza de la materia oscura representa un reto para la Cosmología y la Física de Partículas.

Desde el punto de vista de la Física de Partículas, no hay una preferencia especial por ninguna de las candidatas no-bariónicas a materia oscura, conocidas como WIMPs. En el marco de la extensión supersimétrica (SUSY) del Modelo Standard, la partícula supersimétrica más ligera (LSP) es una candidata posible a materia oscura. Se espera que la LSP sea el neutralino ( $\chi$ ). Se tiene una creciente esperanza de que la materia oscura SUSY se encuentre mediante experimentos directos e indirectos, como la detección de rayos gamma que provienen de la aniquilación de neutralinos. Existe una posibilidad real de que la nueva generación de telescopios atmosféricos Cherenkov, como el caso del telescopio MAGIC, situado en el Observatorio del Roque de los Muchachos, encuentren la partícula que compone mayormente la materia oscura. Ésta es mi apuesta. El descubrimiento de materia oscura supersimétrica se dará antes de 10 años por medio de la detección directa o indirecta. No hay alternativa.

PD: Si pierdo esta apuesta, pagaré la comida de Navidad del 2013.



Participantes del Congreso en el Observatorio del Roque de los Muchachos.  
Foto: Javier Méndez (ING).