

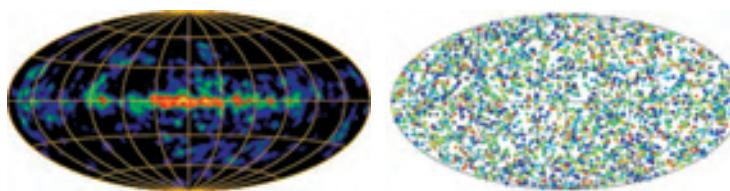
Astrofísica de partículas

Javier Berdugo, Jorge Casaus, Carlos Mañá,
Javier Rodríguez Calonge y Eusebio Sánchez

Introducimos el campo emergente de la astrofísica de partículas, que relaciona la física de partículas con la astrofísica de altas energías y la cosmología. Tras una breve descripción de la física de partículas y la cosmología y sus problemas comunes, exponemos la situación actual en el estudio de los rayos cósmicos, rayos γ , neutrinos cósmicos y otras posibles partículas exóticas que llegan a nuestro planeta.

1. Introducción

La física fundamental, cuyo objetivo es el estudio de los principios básicos de la naturaleza, tiene en la actualidad dos campos de gran interés: la cosmología, que estudia la creación y evolución del Universo y la física de partículas, que trata del estudio de sus componentes elementales y las interacciones que experimentan. Durante mucho tiempo, estos dos campos han evolucionado de manera independiente y en las últimas décadas, sobre la base de las observaciones experimentales y de los marcos teóricos subyacentes (teorías cuánticas de campos en el caso de la física de partículas y la Teoría de la Relatividad General en el caso de la cosmología), se han elaborado sendos modelos estándar que describen la mayoría de los fenómenos observados. Sin embargo, ambos modelos presentan problemas cuando se interpretan fuera de contexto. Para solucionar dichos problemas, es necesaria la unificación de ambos campos tanto desde el punto de vista teórico como desde el experimental.



Mapa de las emisiones de rayos gamma (^{26}Al) de la Vía Láctea obtenidas por el instrumento COMPTEL del CGRO concentradas a lo largo del plano galáctico y mapa de los GRB detectados distribuidos uniformemente.



experimentación. La unificación de las interacciones fuertes y electrodébiles justificaría varios de ellos al hacerlos diferentes manifestaciones de una misma causa. Sin embargo, esto sucede a unas energías para las que los efectos gravitatorios pueden no ser despreciables. Es razonable, por tanto, pensar que en la unificación de las interacciones fuertes y electrodébiles hay que considerar a la gravitación. Un segundo problema reside en el denominado bosón de Higgs. El ME contiene un campo escalar con un valor esperado no nulo en el mínimo de la energía potencial. Puesto que en la Relatividad General la gravedad se acopla a la energía, esto equivale a un valor no nulo de la constante cosmológica tal que el Universo actual tendría el tamaño aproximado de un balón de fútbol en claro desacuerdo con la evidencia. En tercer lugar, la violación de la denominada simetría CP, donde C es la conjugación de carga y P es la paridad, desempeña un papel importante en la evolución del Universo. En el ME, ésta se describe mediante una fase compleja introducida de modo *ad hoc* y no hay ninguna teoría ni extensiones del modelo que sugieran ni el origen ni el valor de dicha violación. Como comentaremos en breve, esto tendrá importantes implicaciones cosmológicas.

Física de Partículas

En la actualidad, el estudio de la física de partículas se realiza fundamentalmente analizando las colisiones entre partículas en laboratorios terrestres. Las altas energías obtenidas en los aceleradores permiten estudiar la materia y sus interacciones a distancias de $\sim 10^{-19}$ m. Estas colisiones reproducen las condiciones de los instantes iniciales del Universo. Así pues, el estudio de las interacciones entre partículas elementales desempeña un papel importante en la Cosmología.

En los últimos años se ha obtenido un acuerdo sin precedentes entre las observaciones experimentales y el denominado Modelo Estándar (ME) basado en el grupo de invariancia gauge $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$. Sin embargo, a pesar de la gran precisión con la que este modelo describe las interacciones fuertes y electrodébiles en los laboratorios terrestres, presenta varios problemas. En primer lugar, existen muchos parámetros indeterminados que han de fijarse mediante la

Cosmología

El modelo cosmológico estándar (Λ CDM) está sólidamente fundado en las observaciones realizadas en los últimos años. El marco teórico subyacente es la Teoría de la Relatividad General junto con el principio cosmológico. A partir del estudio de la radiación de fondo de microondas, de la nucleosíntesis primordial, de las supernovas lejanas de tipo Ia y de la estructura a gran escala del Universo, se deduce que éste es de geometría euclídea y que su práctica totalidad es de naturaleza desconocida. Sin embargo, las observaciones permiten distinguir dos ingredientes en la composición del Universo: el $\sim 73\%$ es una componente energética denominada energía oscura, y el $\sim 27\%$ restante es materia.

De ella, tan sólo el ~5% es materia ordinaria; el resto es conocido como materia oscura.

La consecuencia más importante de la existencia de la energía oscura es que el Universo está entrando en una fase de expansión acelerada. El principal candidato propuesto para explicar esta energía es la constante cosmológica (Λ), aunque se han sugerido otros como la quintaesencia y sus variantes.

Para explicar todas las observaciones es necesario que la materia oscura sea fría, es decir, debe estar compuesta de algún tipo de partícula no relativista. Las extensiones del ME proporcionan varios candidatos: partículas masivas que interactúan débilmente (WIMPs), y en especial la partícula supersimétrica más ligera (neutralino), axiones, etc.

Por otra parte, aunque el ME describe de manera simétrica las interacciones entre partículas y antipartículas, al menos hasta distancias de ~10 Mpc de nosotros el Universo parece estar constituido exclusivamente por materia. Para describir de manera coherente la evolución del Universo desde un estado inicial con simetría entre materia y antimateria hasta un estado como el actual (proceso denominado bariogénesis) es necesario que las interacciones entre partículas violen tanto la conservación del llamado número bariónico como la conservación de CP. Estos hechos ocurren en el ME y en sus generalizaciones pero la violación de CP es mucho menor que la que se necesita en Cosmología. Vemos pues que muchos de los problemas fundamentales que existen actualmente tanto en la Física de Partículas como en la Cosmología tienen un origen común y, por ello, es razonable pensar que las soluciones vendrán a partir de un estudio conjunto de ambas disciplinas.

Astrofísica de Partículas

La *Astrofísica de Partículas* estudia el origen, la propagación y las propiedades de las partículas extraterrestres. En la actualidad, es un campo de creciente actividad gracias a que los detectores de partículas, desarrollados durante décadas en los experimentos con aceleradores, han alcanzado unas precisiones que permiten abordar el estudio detallado de muchos fenómenos de interés que, hasta ahora, eran de difícil análisis. Citemos como ejemplos la naturaleza de la materia oscura, los núcleos activos de las galaxias, los agujeros negros, las explosiones de rayos gamma o algunas propiedades de las partículas elementales. En particular, recientemente se ha obtenido evidencia experimental de la diferencia de masa entre los diferentes tipos de neutrinos, analizando los de procedencia solar. Por otra parte, las nuevas plataformas espaciales permiten situar detectores cada vez más completos y precisos fuera de la atmósfera terrestre aumentando significativamente la accesibilidad a nuevas partículas y la estadística acumulada.

Es evidente que las partículas que contengan información sobre la evolución del Universo han de ser estables o tener una vida media suficientemente larga. Los neutrinos y los fotones, por ejemplo, nos permiten acceder al estudio de muchos fenómenos astrofísicos de interés y contienen gran cantidad de información sobre la evolución del Universo desde el instante en que se desacoplaron del resto de la materia. Salvo los neutrinos y los fotones, todas las demás partículas estables identificadas que existen en el Universo son

cargadas: electrones, protones, núcleos atómicos producidos en los primitivos procesos de nucleosíntesis si son ligeros o en las posteriores explosiones de supernova y, en menor medida, positrones y antiprotones producidos en interacciones con el medio interestelar. Todas ellas constituyen la denominada *Radiación Cósmica* y nos permitirán estudiar muchos procesos relevantes en la formación del Universo.

En las siguientes secciones que conforman este artículo analizaremos las propiedades básicas, los mecanismos de detección y los experimentos, tanto previstos como operativos actualmente, que se centran en el estudio de la Radiación Cósmica, los fotones de alta energía y los neutrinos. Finalmente, describiremos brevemente las técnicas y experimentos dedicados a la detección de partículas exóticas como axiones y WIMPs, de gran interés tanto para la Física de Partículas como para la Cosmología.

2. Rayos cósmicos

La medida de las partículas cargadas de procedencia extraterrestre detectadas en el entorno de la Tierra ha demostrado ser, desde su primera observación a principios del siglo XX, una valiosa herramienta para el estudio de procesos astrofísicos de alta energía y ha sido fuente de descubrimientos de gran relevancia en el campo de la física fundamental. Baste recordar que el análisis de la radiación cósmica llevó al descubrimiento en el periodo comprendido entre 1930 y 1950 de las primeras partículas elementales conocidas además del electrón. La primera evidencia de la existencia de antimateria, de la segunda familia leptónica, de los mesones o de las partículas extrañas (que contienen el quark s), fueron descubrimientos obtenidos mediante el análisis de los datos registrados en cámaras de niebla y emulsiones fotográficas expuestas a la radiación cósmica.

Aun cuando el advenimiento de la era de los aceleradores durante la segunda mitad del siglo XX desplazó el foco de la investigación en física de partículas elementales hacia los laboratorios, el estudio de los rayos cósmicos vuelve a suscitar hoy en día un interés prioritario para una amplia comunidad científica.

La Radiación Cósmica

La radiación cósmica de procedencia no solar se caracteriza por un rango energético extraordinariamente amplio de más de doce órdenes de magnitud (de 10^8 eV a 10^{20} eV) y por una gran regularidad en su espectro energético que, como puede apreciarse en la Figura 1, puede ser descrito en muy buena aproximación mediante una ley de potencias en energía con exponente negativo. En cuanto a su composición, además de una componente minoritaria en forma de electrones, el 99% de los rayos cósmicos son hadrones, siendo el 90% de ellos protones y el resto otros núcleos atómicos ionizados.

El flujo de rayos cósmicos es, a energías suficientemente altas como para que los efectos locales sean despreciables, isotropo y constante para todas las especies que lo componen. La característica más relevante del espectro es la existencia de dos cambios en el exponente de la ley de potencias que lo describe (índice espectral). El valor del índice espectral de 2,7 a energías inferiores a 10^{15} eV, pasa a ser 3 en el

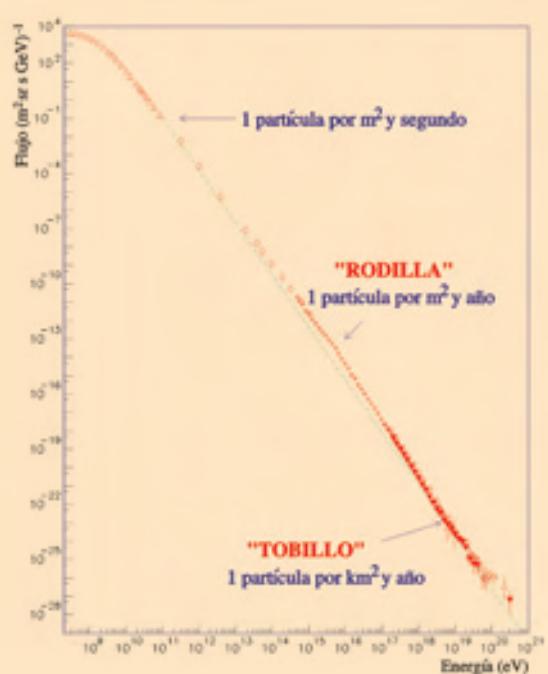


Figura 1. Recopilación de las medidas del flujo de rayos cósmicos en función de la energía. En la figura se muestran los valores indicativos de los flujos esperados a distintas energías así como los valores a los que se observan cambios en el índice espectral (la *rodilla* y el *tobillo* del espectro).

rango energético entre 10^{15} y 10^{19} eV aproximadamente y retoma el valor 2,7 para energías superiores. Las energías a las que se producen estos cambios bruscos en el índice espectral se denominan la *rodilla* y el *tobillo* del espectro respectivamente (ver Figura 1).

La producción y aceleración de los rayos cósmicos de origen galáctico se consideran asociadas a las explosiones de supernovas, en las que la energía liberada se transfiere al medio interestelar mediante la aceleración de partículas cargadas gracias a su difusión en el frente de choque generado en la explosión (mecanismo de Fermi). La energía efectiva liberada en cada explosión de supernova (10^{44} J)¹ junto con su frecuencia (una cada 30 años) permite mantener, a través de este mecanismo de alta eficiencia (hasta un 10%), el balance energético de los rayos cósmicos galácticos. El mecanismo de aceleración de Fermi, además de generar el espectro adecuado siguiendo una ley de potencias en energía, permite acelerar las partículas hasta energías del orden de las de la *rodilla* del espectro. Por encima de 10^{15} eV, el mecanismo de aceleración basado en supernovas deja de ser eficiente y da lugar a un aumento del índice espectral similar al observado. A energías cercanas a 10^{19} eV la contribución de una componente extragaláctica en el flujo de rayos cósmicos puede ser relevante ya que el radio de giro de una partícula cargada y con esa energía en el campo magnético galáctico ($\sim 3\mu\text{G}$) resulta ser del orden del radio galáctico (~ 20 kpc), lo que hace improbable que permanezca confinada en la Galaxia. El cambio de índice espectral a esas energías se asocia comúnmente a la transición de rayos cósmicos galácticos a extragalácticos. Finalmente, la controvertida observación

de rayos cósmicos de 10^{20} eV está en conflicto con el límite de Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK) que impide la propagación a largas distancias de rayos cósmicos de esas energías debido a su interacción con los ubicuos fotones de la radiación de fondo de microondas.

Tras su aceleración, los rayos cósmicos se propagan por la Galaxia guiados por los campos magnéticos siguiendo un recorrido errático hasta, eventualmente, alcanzar la Tierra. El estudio de las abundancias y espectros energéticos de los distintos elementos que lo constituyen permite modelizar el mecanismo de propagación y los parámetros que lo rigen.

Detección de la Radiación Cósmica

Existen dos condicionantes fundamentales que determinan las técnicas de detección utilizadas para el estudio de los rayos cósmicos en distintos rangos de energía. Por una parte, la forma peculiar de su espectro hace que el flujo a altas energías esté enormemente suprimido. Así, el flujo de rayos cósmicos con energías superiores a 10^{11} eV es de una partícula por cada metro cuadrado de superficie y por cada segundo de observación, mientras que es sólo de una partícula por kilómetro cuadrado y por año para energías mayores que 10^{18} eV (ver Figura 1). Por otra parte, la atmósfera terrestre impide la detección directa de los rayos cósmicos que, al interaccionar con ella producen cascadas extensas de partículas que originan, entre otros, el flujo de muones observado al nivel del mar. De este modo, a energías bajas y moderadas, el flujo es suficientemente elevado como para que instrumentos con una modesta área activa puedan realizar medidas directas de los rayos cósmicos. Para ello se colocan detectores precisos en globos estratosféricos o en plataformas espaciales con objeto de evitar cualquier efecto residual debido a la atmósfera terrestre. A muy altas energías solamente son viables los métodos indirectos de detección que utilizan las propiedades de las interacciones de los rayos cósmicos con la atmósfera. Con este objetivo se sitúan en la superficie terrestre detectores sensibles a las partículas producidas en dichas interacciones. El estudio de las señales registradas permite obtener información acerca de los parámetros de la cascada y estimar la energía, la dirección y el tipo de partícula que la generó. Aun cuando la precisión obtenida es considerablemente menor que mediante la detección directa, esta técnica permite alcanzar áreas efectivas de detección suficientes para el estudio de los rayos cósmicos de muy alta energía. En la actualidad, los resultados obtenidos a energías inferiores a 10^{15} eV se basan en medidas realizadas mediante técnicas de detección directa mientras que, para energías del orden de las de la *rodilla* del espectro o superiores solamente existen datos procedentes de experimentos de detección indirecta.

Las cuestiones abordables mediante el estudio preciso de los rayos cósmicos son profundas y variadas y cubren temas tan diversos como bariogénesis, materia oscura, supersimetría o teorías de gran unificación, entre otros. Para ello, se está desarrollando un intenso programa experimental a nivel mundial focalizado en superar las limitaciones actuales en dos fronteras fundamentales: la de la gran precisión y la de las más altas energías.

¹Este valor representa solamente el 1% de la energía total liberada por una supernova, ya que el 99% se radia en forma de neutrinos.

El objetivo de los nuevos experimentos de detección directa es alcanzar exposiciones suficientemente elevadas con aparatos de gran sensibilidad para detectar e identificar señales muy débiles. Los experimentos en globos estratosféricos prevén aumentar la duración de sus vuelos, mientras que los experimentos en plataformas espaciales están incorporando técnicas de detección antes inviables en el entorno espacial y aumentando su área efectiva.

Los experimentos de detección indirecta han optado por aumentar el área efectiva de detección y mejorar la medida de la cascada mediante la introducción de detectores sensibles a la fluorescencia inducida en la atmósfera por el paso de las partículas de alta energía. Existen asimismo propuestas novedosas para detectar las cascadas atmosféricas desde plataformas espaciales lo que permitiría aumentar el área efectiva en más de un orden de magnitud con respecto a los experimentos tradicionales.

Física Fundamental con rayos cósmicos

Además de resultados relevantes en el campo de la astrofísica de altas energías, el estudio preciso de los rayos cósmicos promete realizar aportaciones únicas a la astrofísica de partículas.

Experimentos de detección directa. Los experimentos de detección directa permiten detectar señales débiles cuya presencia indique inequívocamente la existencia de partículas y procesos físicos no contemplados dentro de los modelos actuales. Los canales más prometedores son las búsquedas centradas en antipartículas, cuya producción secundaria mediante los mecanismos de propagación de rayos cósmicos está enormemente suprimida. La presencia de antinúcleos (antihelio, anticarbono...) en los rayos cósmicos significaría la existencia de dominios extensos de antimateria en el Universo, lo que conllevaría la revisión del modelo aceptado para la bariogénesis y la violación de la simetría CP.

Un exceso en el flujo esperado de positrones pondría en evidencia la naturaleza de la materia oscura del halo galáctico al asociarse a uno de los productos de aniquilación de neutralinos.

Una producción adicional de antiprotones de baja energía podría provenir de la evaporación de agujeros negros primordiales.

Hasta la fecha, las medidas realizadas tanto desde globos estratosféricos como desde instrumentos espaciales no han encontrado desviaciones significativas respecto a los modelos de producción secundaria para positrones y antiprotones y han permitido obtener un límite de una parte por millón para la contribución de antinúcleos al flujo de rayos cósmicos.

El espectrómetro magnético BESS, que ha realizado varios vuelos a bordo de globos aerostáticos proporcionando las medidas más precisas del espectro de antiprotones hasta la fecha, está siendo adaptado para un vuelo antártico de larga duración en el año 2004 con objeto de estudiar en detalle una posible contribución exótica al flujo de antiprotones de baja energía. En cuanto a los futuros experimentos en plataformas espaciales, los espectrómetros magnéticos PAMELA, que será instalado durante el año 2003 en un satélite ruso en órbita semi-polar, y especialmente AMS, que empe-

zarán a operar en la Estación Espacial Internacional en 2006, permitirán mejorar las medidas actuales del flujo de antipartículas en los rayos cósmicos tanto en rango de energía como en sensibilidad en varios órdenes de magnitud gracias a su elevada área efectiva y exposición (más de 3 años).

Experimentos de detección indirecta. Los experimentos de detección indirecta se centran en la frontera de las energías extremadamente altas. La observación proveniente del experimento AGASA de rayos cósmicos con energías superiores al límite GZK, pendiente aún de verificación por otros instrumentos, puede tener profundas implicaciones si es interpretada como resultado de la desintegración o aniquilación de partículas primordiales supermasivas ($M_X \sim 10^{20}$ eV), predichas por modelos de gran unificación, como resultado de los denominados *defectos topológicos* o, incluso, mediante la violación de la invariancia Lorentz a muy altas energías que aparece en modelos alternativos de gravitación.

En caso de que su existencia se debiera a fuentes astrofísicas no exóticas, éstas deberían poseer una enorme potencia para acelerar partículas a energías superiores a 10^{20} eV y encontrarse suficientemente cerca, a escala cosmológica, como para que el límite GZK no fuera aplicable. Estas fuentes aún no se han identificado.

Los futuros experimentos AUGER, actualmente en construcción, EUSO, propuesto para realizar observaciones de cascadas atmosféricas desde la Estación Espacial Internacional, o incluso OWL, que permitiría realizar un estudio estereográfico de las cascadas utilizando dos satélites en órbita quasi-ecuatorial a 1000 km de altura, serán capaces de verificar la existencia de rayos cósmicos de energías superiores al límite de GZK y, en caso afirmativo, realizar un estudio de sus características que redundará en una indicación más fundada acerca de su naturaleza.

3. Rayos γ

Además de los rayos cósmicos, también llegan a la Tierra partículas neutras, como fotones y neutrinos. Los fotones en el rango de energías correspondiente a la luz visible han sido el objeto de estudio de la astronomía clásica, estudio que se ha ampliado a otras longitudes de onda durante el siglo pasado. En particular, el estudio de los rayos γ ha abierto un nuevo campo de la astrofísica de altas energías.

Aunque en los años 50 ya se sabía que muchos de los procesos astrofísicos tenían que emitir radiación γ , su detección no fue posible hasta finales de los años 60. Esta detección tardía se debe a varias razones. Los fotones de alta energía provenientes del espacio exterior interactúan con la atmósfera y tienen una probabilidad prácticamente nula de llegar hasta la superficie terrestre. Hubo que esperar, pues, hasta tener la tecnología necesaria para poder colocar dispositivos detectores por encima de la atmósfera. La observación de la radiación γ ha de hacerse sobre el ruido producido por los rayos cósmicos, cuyo flujo es muy superior al de la señal buscada. Además, la radiación γ no puede focalizarse por medio de lentes o espejos.

El primer telescopio de rayos γ se lanzó con el satélite Explorer-XI en 1961 y detectó fotones γ que parecían venir de todas direcciones por igual. La primera medida de una

emisión significativa de rayos γ fue hecha por el detector a bordo del satélite OSO III, que identificó la Vía Láctea como fuente de radiación en 1967.

El descubrimiento más espectacular se hizo a principios de los años 70. Los Estados Unidos habían lanzado los satélites militares Vela con la intención de detectar las radiaciones producidas en explosiones nucleares que violaran los tratados firmados sobre armas estratégicas. Inmediatamente, empezaron a detectar explosiones de rayos γ (GRB, "Gamma Ray Bursts"), pero no venían de la Tierra, sino del espacio profundo. Estas explosiones tienen una duración que varía entre 4 ms y más de 1000 s, y se cuentan entre los sucesos más violentos del Universo.

Fue la puesta en órbita y el funcionamiento del Observatorio Compton de Rayos γ CGRO el hecho que llevó a la astronomía γ a su situación actual. Este satélite estuvo en funcionamiento entre 1991 y 2000, llevando a bordo cuatro experimentos: OSSE, BATSE, COMPTEL y EGRET, entre

cuyos resultados está el mapa del universo γ más completo realizado hasta la fecha, que puede verse en la Figura 2. CGRO ha aumentado enormemente la estadística recogida de fotones γ . Esto ha permitido estudiar la radiación difusa de nuestra galaxia (Figura 3), el fondo extragaláctico y cerca de 300 fuentes, de las cuales la mayor parte no están identificadas, es decir, no se sabe qué tipo de objeto está en el origen de la radiación observada (Figura 4).

En paralelo con el estudio de los rayos γ en el espacio se ha desarrollado un importante programa observational en tierra, iniciado por el telescopio WHIPPLE, al observar por primera vez la emisión de la Nebulosa del Cangrejo a muy altas energías. Las observaciones en tierra se han orientado fundamentalmente a los fotones de muy alta energía (Figura 3), aunque en la actualidad estas observaciones convergen con las realizadas en el espacio: Los experimentos en tierra tratan de llegar a medir fotones de energías más bajas, mientras que los telescopios espaciales aumentan su rango energético.

Fuentes de fotones de alta energía

Las primeras fuentes de rayos γ identificadas son pulsares. El campo magnético asociado a estos objetos es del orden de 10^{10} gauss, así que pueden emitir rayos γ debidos a radiación sincrotrón.

La mayor parte de las fuentes identificadas pertenecen a la clase de las galaxias activas (AGN, por "Active Galactic Nuclei"). Estos objetos son galaxias caracterizadas por una radiación intensa y muy variable proveniente del núcleo. Parece que esta radiación tiene su origen en un agujero negro supermasivo ($10^6 - 10^{10} M_\odot$) situado en el centro de estos objetos.

Los fenómenos más fascinantes del cielo γ son los GRB, descritos anteriormente. Todavía se conoce poco acerca de su origen. Se sabe que la región donde se genera la radiación tiene que ser de tamaño muy reducido, y que su distribución en el cielo es completamente isótropa. Además, la observación de GRB en otras longitudes de onda han mostrado claramente el origen extragaláctico de los mismos.

Las fuentes puntuales están superpuestas a un fondo difuso de rayos γ . De su observación se puede distinguir una

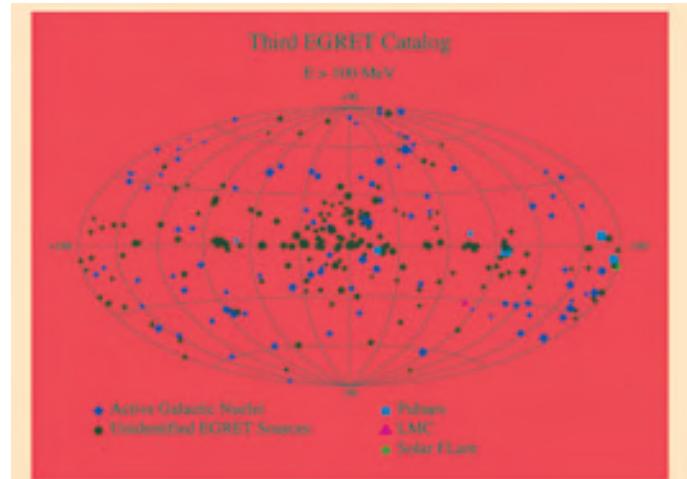


Figura 4. El catálogo de fuentes puntuales de rayos γ de EGRET en coordenadas galácticas. La mayor parte de ellas permanecen sin identificar (círculos). Tomado de <http://cossc.gsfc.nasa.gov/images/egret>.

Figura 2. Mapa del cielo en rayos γ (por encima de 10^8 eV) realizado por el telescopio EGRET, en coordenadas galácticas. La banda horizontal corresponde a las emisiones de la galaxia. Se pueden observar superpuestas al fondo difuso algunas de las fuentes puntuales más intensas. Tomado de <http://cossc.gsfc.nasa.gov/egret>.

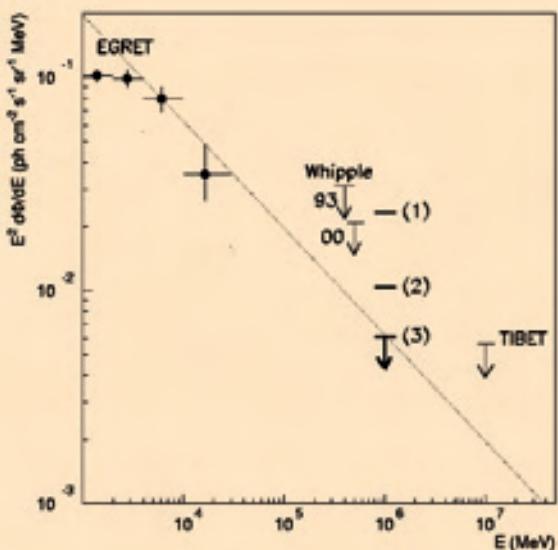


Figura 3. Espectro del fondo galáctico difuso de rayos γ medido por EGRET (puntos) y los límites establecidos por los observatorios terrestres WHIPPLE, HEGRA (nombrados (1), (2), (3)) y TIBET, comparados con el espectro teórico esperado (curva punteada). Tomado de H. Völk, Proceedings de la ICRC 2001 (o astro-ph/0202072).

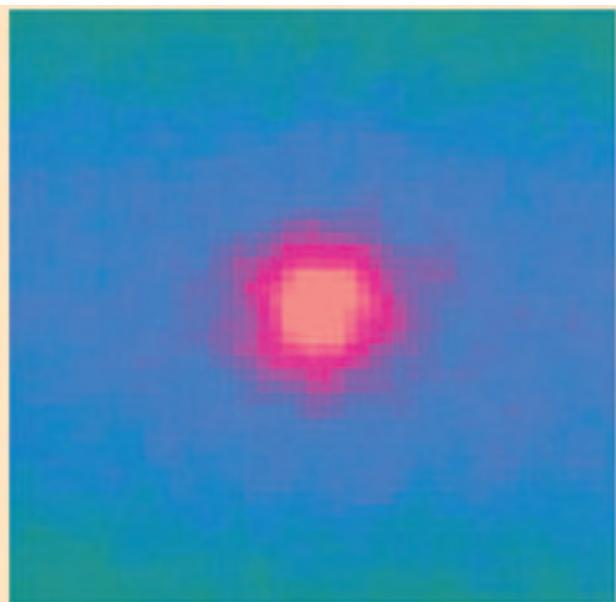


Figura 5. El Sol visto con neutrinos por Superkamiokande. Tomado de <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap980605.html>

componente galáctica y una componente isótropa. La componente galáctica se genera fundamentalmente por interacciones de los rayos cósmicos con el gas interestelar. Gracias a la observación de este fondo galáctico ha sido posible confeccionar un mapa del material interestelar en la galaxia. El origen de la componente isótropa del fondo γ no está aún del todo claro. Una hipótesis es que esté constituida por un fondo no resuelto de galaxias emisoras de rayos γ.

Además de las anteriores, que son las fuentes conocidas, hay otros candidatos hipotéticos a fuentes de rayos γ. Algunos de estos candidatos son las binarias de rayos X, las fuentes de rayos γ no identificadas, o fenómenos exóticos, como la aniquilación de neutralinos o defectos topológicos o la evaporación de agujeros negros primordiales.

Detección de rayos γ

Debido al poder de penetración de los fotones γ, éstos no se pueden focalizar utilizando lentes o espejos, que son los medios clásicos de detección en astronomía. No obstante, las herramientas de la física de altas energías están diseñadas para detectar y caracterizar este tipo de fotones, y son las que permiten observar el cosmos en estas longitudes de onda. Además, y más recientemente, se han desarrollado otras técnicas que permiten la detección de rayos γ con telescopios terrestres.

Dentro de los detectores espaciales, puede decirse que hay dos tipos fundamentales de telescopios γ. El primero de ellos está diseñado para enfocar a una región dada del cielo que contenga el objeto emisor de interés y recoger tantos fotones procedentes de ella como sea posible. Este tipo de detectores usan normalmente centelleadores o detectores de estado sólido. El segundo tipo de telescopio está pensado para producir una imagen de rayos γ. Los detectores de este tipo utilizan normalmente la producción de pares o la dispersión Compton para medir la dirección de llegada del fotón.

La detección en tierra de rayos γ es complementaria a la detección en el espacio. Los telescopios terrestres estudian fundamentalmente los rayos γ de muy alta energía y miden las cascadas electromagnéticas desarrolladas en la atmósfera por éstos utilizando la radiación Čerenkov generada, dando así una imagen de dicha cascada. La intensidad de la imagen proporciona una medida de la energía del fotón γ primario, la orientación se utiliza para determinar su dirección y la forma de la imagen permite separar las cascadas originadas por rayos γ de aquéllas originadas por rayos cósmicos.

Hay un gran número de observatorios de rayos γ planeados para el futuro, que ampliarán enormemente el espectro estudiado hasta el momento. Estas observaciones son muy importantes para entender los mecanismos de las fuentes astrofísicas más energéticas del cosmos. El experimento planeado para ser el sucesor de EGRET es GLAST, que proporcionará una sensibilidad 30 veces superior. Pero antes de que GLAST sea operativo, hay varios experimentos en el espacio que proporcionarán datos, como el recién lanzado INTEGRAL, AGILE o AMS.

Por otra parte, como ya se ha comentado antes, los fotones con energías de 10^{11} eV o superiores, generan cascadas electromagnéticas en la atmósfera terrestre. Las partículas secundarias así producidas generan luz Čerenkov que puede medirse con telescopios adecuados. Algunos telescopios de este tipo están actualmente operativos, como WHIPPLE, CAT, CANGAROO, etc. y muchos otros están en preparación, como MAGIC, VERITAS, etc. Estos telescopios tienen muy buena sensibilidad a fuentes puntuales y son complementarios a los telescopios espaciales.

4. Neutrinos

El estudio de los neutrinos extraterrestres representa una excelente oportunidad tanto para el análisis de fenómenos astrofísicos y cosmológicos como para la búsqueda de nueva física más allá del ME. La razón de tal hecho radica tanto en sus propiedades singulares que los convierten en excelentes sondas como en su presencia habitual en las reacciones termonucleares y desintegración de partículas.

Hay un tipo de neutrino asociado a cada lepton cargado: neutrino asociado al electrón (ν_e), al muón (ν_μ) y al tau (ν_τ). La única responsable de su interacción con la materia es la fuerza débil, cuya intensidad es mucho menor que las fuerzas electromagnética y fuerte, de manera que un haz de neutrinos es capaz de atravesar grandes cantidades de materia sin verse apenas afectado. No poseen carga eléctrica y se sabe ya que su masa es muy pequeña y que los neutrinos no son inmutables: oscilan entre los distintos tipos.

Mientras que fotones y partículas cargadas no pueden atravesar zonas muy densas de materia o radiación, los neutrinos no se ven apenas afectados proporcionando información directa de la zona de producción. Sin embargo, su detección implica el uso de enormes cantidades de materia, entornos con una contaminación baja y detectores de sensibilidad alta. Los neutrinos no son influidos por campos magnéticos (galácticos e intergalácticos) lo que permite asociarlos a la fuente que los produjo. Tanto los rayos cósmicos como los fotones interactúan con el fondo primordial de radiación electromagnética. ésto produce un corte en su espectro de energías (corte GZK). Debido a este efecto la

astronomía de muy alta energía con rayos cósmicos y fuentes queda recluida al ámbito local (~ 50 Mpc). No ocurre así con los neutrinos².

Fuentes de neutrinos

Se conocen varias fuentes de neutrinos: los procesos astrofísicos que son capaces de generar neutrinos en un gran rango de energías (desde 10^6 eV hasta 10^{19} eV) lo que los convierte en una herramienta útil para afrontar una gran variedad de problemas de la física fundamental y la cosmología; los rayos cósmicos que en su interacción con la parte superior de la atmósfera producen neutrinos de varias energías (atmosféricos); los reactores nucleares que producen neutrinos de baja energía utilizados en experimentos donde el detector se sitúa a cierta distancia de la fuente (corta y larga base) y aceleradores de partículas que pueden crear haces de neutrinos de alta energía para experimentos de larga base. Hasta la fecha se tiene constancia observational de dos fuentes de neutrinos extraterrestres: el Sol (Figura 5) y la supernova 1987A.

Neutrinos solares. La fuente de energía estelar son reacciones termonucleares, conocidas desde los años 40. Para el Sol se espera que alrededor del 2% de la energía total generada se emita en forma de neutrinos electrónicos de baja energía (por debajo de 2×10^7 eV). Desde finales de los años sesenta, diferentes experimentos han medido el flujo de neutrinos solares. Asombrosamente, los resultados obtenidos arrojaban un déficit en el número de neutrinos detectados. La posterior confirmación de la validez del modelo solar por las medidas heliosismológicas sólo dejaba una salida para el puzzle: los neutrinos poseen masa y oscilan entre los distintos tipos. Cada uno de ellos está compuesto por una mezcla de autoestados de masa. La mecánica cuántica dice entonces que la proporción cambiará con el tiempo (es decir en la propagación): un neutrino que inicialmente era del tipo electrón podrá interactuar posteriormente como uno del tipo muón o tau. Posteriores experimentos han confirmado este resultado. Pueden citarse entre ellos los de SuperKamiokande (con neutrinos atmosféricos y solares), SNO (con capacidad para discernir entre los diferentes tipos de interacción de los neutrinos con la materia) y KamLAND (experimento de larga base con reactores nucleares como fuente).

Supernovas. Los modelos de evolución estelar predicen que para masas por encima del límite de Chandrasekhar las estrellas son inestables y terminan en una explosión que libera al espacio una inmensa cantidad de energía en forma de fuentes y neutrinos. éstos son emitidos antes de la explosión visible y se llevan aproximadamente el 99% del total de la energía. El número total de neutrinos emitidos es de unos 10^{58} con energías típicas de $\sim 10^7$ eV. Hasta el momento la única supernova registrada en el canal de neutrinos ha sido la 1987A, cuando parte de los experimentos de desintegración de protones operativos en ese momento (Kamiokande,

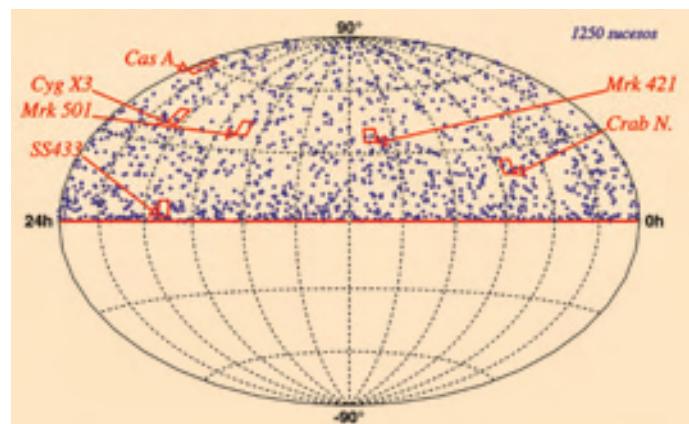


Figura 6. Mapa del cielo obtenido por el experimento AMANDA. Las coordenadas horizontales son ascensiones rectas y las verticales declinaciones. Se incluyen potenciales fuentes de neutrinos. Tomado de S. Barwick, Proceedings de la SPIE 2002 (o astro-ph/0111269).

IMB y Baksan) detectaron un exceso de señales consistentes con la explosión de supernova de tipo II.

Aceleración relativista de partículas cargadas. Se consideran aquí fuentes que se espera generen neutrinos, de energías superiores a los 10^{12} eV, mediante la interacción de protones con el medio circundante. Entre los diversos progenitores que se han considerado cabe destacar la aceleración de protones por supernovas, agujeros negros en nucleos galácticos activos y GRB (*Gamma Ray Bursts*).

Materia oscura. En algunas teorías que estudian la posible extensión del ME se predice la existencia de partículas masivas cuya aniquilación es capaz de producir neutrinos. En concreto el candidato a ser la partícula supersimétrica más ligera, denominado neutralino, podría contribuir mediante su aniquilación en el halo galáctico, el núcleo galáctico, el interior del Sol o de la Tierra.

Detección de neutrinos extraterrestres

Las mismas características que avalan a los neutrinos como valiosos portadores de información de los fenómenos astrofísicos dificultan de manera notable su detección y estudio. El diseño de los detectores está guiado por su interacción extremadamente débil lo que ha conducido al uso de enormes cantidades de materia (incluso grandes extensiones del océano o la atmósfera) y a diferentes técnicas de detección para obtener una alta discriminación de la señal frente a la contaminación.

Detectores con reacciones radioquímicas. Los primeros detectores de neutrinos aprovechaban reacciones de captura de neutrinos por nucleos con umbrales de energía dependientes del tipo de reacción. Se escoge un compuesto líquido a temperatura ambiente y con una alta sección eficaz de

² Existe un fondo primordial de neutrinos (con una temperatura de 1.9 K) que tendría un efecto similar al fondo de radiación electromagnética, pero con el corte a energías superiores a 10^{21} eV. Esto se traduce en un recorrido libre medio superior al radio de Hubble del universo, por lo que no tiene consecuencias efectivas.

captura. Para apantallar el detector de los rayos cósmicos se utilizan localizaciones bajo tierra. Tras un periodo de exposición el líquido se recicla para proceder al recuento de núcleos transmutados. Por lo tanto este tipo de detectores sólo da información sobre el número de neutrinos y no sobre su dirección y energía. El primero de estos detectores se construyó en 1968 en la mina de oro Homestake utilizando C_2Cl_4 como líquido detector. El umbral de producción lo hacía sensible a neutrinos con energías por encima de 10^7 eV mediante la reacción de producción $^{37}\text{Cl} + \nu_e \rightarrow ^{37}\text{Ar} + e^-$. Este experimento estuvo activo durante más de 25 años. Otros experimentos posteriores (SAGE, GALLEX/GNO) han utilizado galio como elemento activo mediante la reacción $^{71}\text{Ga} + \nu_e \rightarrow ^{71}\text{Ge} + e^-$ cuyo umbral de detección es menor.

Detectores de tiempo real. Este tipo de detectores pretende la determinación de la dirección y energía del neutrino incidente en tiempo real. Para ello se intenta la identificación de las partículas cargadas producidas en la interacción mediante diferentes técnicas: líquidos centelleadores, cámaras de deriva, radiación Čerenkov emitida en su paso por medios dieléctricos transparentes (agua, hielo, aire) y fluorescencia de moléculas en la atmósfera.

Los detectores con líquidos centelleadores sitúan bajo tierra, para limitar la contaminación de muones cósmicos, una cierta cantidad de líquido centelleador y la cavidad donde reside esta sustancia se rodea de fotomultiplicadores para la detección de la luz emitida. Entre los que utilizan esta técnica están BOREXINO, BAKSAN, KAMLAND...

En los detectores con cámaras de deriva, al paso de las partículas cargadas producto de la interacción de los neutrinos, los átomos de ciertas sustancias se ionizan. Sometidos a un campo eléctrico (500 V/cm) los electrones e iones derivan hacia hilos que los recogen midiendo la carga depositada. A partir de ella se puede determinar la trayectoria y propiedades de la partícula. De esta clase ya está funcionando ICARUS (con futura ampliación para obtener un detector de 3×10^6 kg).

Los detectores de radiación Čerenkov utilizan un gran volumen de agua pura en la que se detecta la luz Čerenkov emitida por muones producidos en la interacción del neutrino o electrones que han sufrido una colisión elástica con un neutrino. Entre los que utilizan esta técnica destacan SuperKamiokande y SNO (*Sudbury Neutrino Observatory*).

Para aumentar el volumen de detección se puede emplear la atmósfera, el océano o enormes extensiones de hielo. En localizaciones bajo agua o hielo se usan enormes mallas de detectores en volúmenes del orden del km³ únicamente hay dos experimentos operativos de este tipo: AMANDA bajo el hielo antártico (Figura 6) y BAIKAL en el lago del mismo nombre. Asimismo existen varias propuestas para futuros detectores: en el océano (ANTARES, NEMO y NESTOR) y en hielo (ICECUBE).

5. Axiones y WIMPs

Además del estudio de neutrinos, rayos cósmicos y fotones³, la detección directa de la materia oscura no bariónica,

fundamentalmente proveniente del halo galáctico, proporcionaría información muy relevante acerca de las propiedades del Universo. Por ello hay experimentos dedicados a la detección directa de estas partículas. Estos experimentos buscan básicamente dos tipos de materia oscura: axiones y partículas masivas débilmente interactuantes (WIMPs).

En caso de existir, ambos tipos interactuarían muy débilmente con la materia ordinaria, por ello hay que diseñar detectores específicos para su medición. Hay muchos experimentos de este tipo en todo el mundo, por lo que sería excesivamente prolífico dar una lista de todos ellos. Sin embargo, comparten una filosofía común para la detección, lo que permite dar una descripción general de este tipo de búsquedas.

Axiones

Los axiones son partículas propuestas para resolver problemas relacionados con las interacciones fuertes, pero inmediatamente se convirtieron en un candidato natural a materia oscura. Se producen fuera del equilibrio térmico, de forma que a pesar de ser partículas muy ligeras, tendrían velocidades muy pequeñas. Las predicciones relativas a su abundancia son completamente dependientes del modelo utilizado para describir su comportamiento. Sin embargo, argumentos cosmológicos y el análisis de la supernova 1987A permiten acotar su masa: 10^{-6} eV $< m_{\text{axión}} < 10^{-3}$ eV. Los experimentos de detección de axiones utilizan la interacción de éstos con un campo magnético. En esta interacción se producen fotones que se pueden detectar.

Los experimentos actuales están divididos en dos grupos. Los que buscan axiones del halo galáctico, como ADMX o los CARRACK, y los que buscan axiones solares, como SOLAX, COSME o CAST. No se ha detectado ningún axión hasta la fecha, y la región en la que se puede excluir su existencia corresponde al rango de masas más bajo de la ventana. En el futuro están previstos nuevos experimentos que mejorarán la sensibilidad, explorando rangos de masas más amplios.

Partículas masivas débilmente interactuantes

El método para detectar WIMPs es su dispersión elástica con los núcleos de un blanco destinado a tal efecto. En este caso se espera que los WIMPs produzcan un espectro energético aproximadamente exponencial en su deposición de energía en el blanco, cuyo valor medio depende de las masas del WIMP y del núcleo. El objetivo es entonces identificar esta contribución en el espectro de energía medido con un detector de ruido de fondo ultrabajo. Típicamente se esperan interacciones que produzcan del orden de unos pocos sucesos por kilogramo y por semana para blancos formados por núcleos pesados como el germanio. Sin embargo, estos números pueden ser muy diferentes para diferentes valores de los parámetros del modelo.

Por lo tanto, es muy importante construir detectores en los cuales el fondo debido a radiactividad natural sea muy bajo. Para conseguir ésto es necesario identificar el retroce-

³No nos ocupamos aquí de las ondas gravitacionales, que se sabe que existen pero que aún no han sido detectadas directamente. Hay varios experimentos en funcionamiento que intentan su detección.

so de los núcleos, que es diferente al fondo radiactivo. Además, la deposición de energía debida a las interacciones de WIMPs es muy pequeña, por lo que su detección es complicada. Por último, se debe tener también una firma convincente de que el suceso detectado proviene de la interacción con una partícula del halo galáctico. Lo mejor sería medir la dirección del núcleo dispersado, pero ésta es una tarea muy complicada, por lo que normalmente se opta por medir el cambio en la tasa de interacciones y en el espectro de la energía depositada a lo largo del año. Se espera que estas señales estén moduladas tanto en el número de sucesos como en la cantidad de energía depositada debido al movimiento relativo de la Tierra respecto a la rotación de la galaxia. A pesar de estas dificultades técnicas, hay experimentos activos buscando WIMPs. Esos experimentos se pueden clasificar en tres grupos:

El primer grupo tiene como meta bajar el fondo radiactivo tanto como sea posible. Para ello utilizan detectores de germanio de gran pureza. Los resultados más destacados en este tipo de técnicas han sido obtenidos por los grupos Heidelberg-Moscú, IGEX y Baksan-USC-PNL. GENIUS es el experimento propuesto para conseguir llevar esta estrategia a sus límites de sensibilidad.

Una segunda aproximación ha sido utilizar centelleadores para distinguir entre los retrocesos de núcleos y de electrones mediante la forma del pulso de energía generado en cada caso al atravesar el detector. En este caso los mejores resultados los han conseguido los grupos DAMA y NaIAD. En particular, DAMA anunció hace algún tiempo la detección de una señal de materia oscura a través de la modulación anual de la señal, a un nivel de significación de aproximadamente 3 desviaciones estándar⁴. Sin embargo, estos resultados aún tienen que ser confirmados en otros experimentos y la situación actual al respecto dista mucho de ser clara, pues ya hay resultados recientes que excluyen la zona de parámetros donde DAMA encuentra la señal.

Por último, hay un tercer método que consiste en el uso de detectores criogénicos basados en la medida de fonones producidos por la interacción de las partículas dentro del cristal que sirve de blanco activo. A pesar de la dificultad tecnológica de esta aproximación hay actualmente varios detectores de este tipo en operación, como CDMS, CRESST o EDELWEISS. Este tipo de detectores se encuentra en plena etapa de desarrollo. Actualmente se muestran como la vía más prometedora para explorar una gran parte del espacio de parámetros de las teorías supersimétricas en los próximos años.

6. Conclusiones

El campo de la astrofísica de partículas ha emergido recientemente en la frontera entre física de partículas y cosmología, estudiando las radiaciones que llegan a la Tierra

procedentes del espacio exterior. Los descubrimientos recientes y los avances tecnológicos en la capacidad de detección permiten que en la actualidad se esté desarrollando un programa científico muy amplio con el objetivo de estudiar los problemas fundamentales de la física de forma exhaustiva y complementaria con otro tipo de estudios realizados en el laboratorio.

La medida de los rayos cósmicos tanto a energías intermedias como muy altas y con una precisión muy superior a la que se ha obtenido hasta la fecha, permitirá conocer su origen y propagación, así como realizar búsquedas de nuevos fenómenos.

Estas búsquedas se verán complementadas con el desarrollo de la astrofísica de rayos γ , que ha abierto una nueva ventana a los fenómenos más energéticos del Universo. Además, la astronomía γ permitirá el estudio de los objetos astrofísicos más exóticos.

La astrofísica de neutrinos está en plena fase de expansión y desarrollo. Es una herramienta muy poderosa para extender los estudios que se han realizado utilizando rayos cósmicos o fotones, así como en la física de partículas, como demuestra el descubrimiento de las oscilaciones en el análisis de los neutrinos solares.

Además, la búsqueda directa de materia oscura alcanzará en las próximas fechas niveles de sensibilidad muy superiores a los actuales, permitiendo bien el descubrimiento, bien la exclusión de una gran parte del espacio de parámetros.

La astrofísica de partículas está en un momento de gran desarrollo. Los estudios que se realizan actualmente tanto en tierra como en el espacio son complementarios entre sí y con el programa de aceleradores de la física de partículas, por lo que se espera que tengan un impacto importante en los problemas que actualmente permanecen abiertos.

Lecturas recomendadas

- [1] N. MAGNUSEN, "Astroparticle Physics", proceedings de la EPS-HEP 99, Tampere (Finlandia), astro-ph/9911236.
- [2] F. HALZEN, "Multimessenger Astronomy: Cosmic Rays, Gamma Rays and Neutrinos", astro-ph/0302489 .
- [3] "Cosmic ray / Gamma ray / Neutrino and similar experiments": <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/CosmicRay/CosmicRaySites.html>.
- [4] The Ultimate Neutrino Page, <http://cupp.oulu.fi/neutrino/>, Neutrino Unbound, <http://www.to.infn.it/~giunti/NU>.
- [5] M. S. TURNER, "The New Cosmology", *Int. J. Mod. Phys. A* **17** (2002) 3446; (astro-ph/0202007).
- [6] C. QUIGG, "Visions: The Coming Revolutions in Particle Physics", *Eur. Phys. J. C* **41** (2002) 40; (hep-ph/0204075).

**Javier Berdugo, Jorge Casaus, Carlos Mañá,
Javier Rodríguez y Eusebio Sánchez**

están en el Dpto. de Fusión y Física de Partículas
Elementales. CIEMAT

⁴Durante el período de corrección de pruebas de este artículo, la colaboración DAMA ha publicado (Rev. N. Cim. 26 nº 1 (2003) 1, o astro-ph/0307403) nuevos resultados que aumentan la significación estadística de su señal a más de 6 desviaciones estándar.