

# RED DE FÍSICA DE ALTAS ENERGÍAS

## Plan de Trabajo

### Introducción

La *Red de Física de Altas Energías* es una de las redes temáticas creadas a partir de las propuestas que fueron presentadas dentro de la Convocatoria 2006 de CONACYT, para *Presentación de Ideas para la Realización de Megaproyectos*, y que resultaron seleccionadas en la segunda fase de dicha convocatoria. Esta red reúne seis grupos amplios de investigadores reunidos en torno a proyectos de física de altas energías y fuentes y sensores de radiación, planteados originalmente para un término de cinco años. Estos proyectos poseen la característica común de propugnar en México el desarrollo de una infraestructura científica de primera línea, la formación de recursos humanos de excelencia y la cooperación científica multidisciplinaria, en torno a problemas de frontera relacionados con la producción y detección de partículas y radiación.

Las redes temáticas de Conacyt tienen el propósito de promover y fortalecer en nuestro país los relación y colaboración entre grupos de investigación en temas estratégicos, procurando la vinculación con sectores sociales, en particular, los empresariales y de gobierno. El objetivo principal es el desarrollo de un plan nacional de desarrollo en investigación científica y tecnológica en el tema de cada red. El desarrollo de este objetivo conlleva otros objetivos específicos: i) diagnóstico del estado del arte a nivel nacional y situación dentro del contexto global; ii) elaboración de un catálogo de recursos humanos; iii) creación de nuevos recursos y mejora de la infraestructura existente en México; iii) elaboración y desarrollo de propuestas de proyectos de ciencia básica y ciencia aplicada, orientados a resolver problemas nacionales y susceptibles de vinculación con sectores productivos.

Existen varios experimentos de frontera en física de altas energías con una importante participación de grupos de investigación mexicanos. La creciente intervención técnico-científica, en las nuevas etapas de estos experimentos y de otros en planeación, resulta de gran importancia para nuestro país. Los pasos necesarios para hacerla efectiva están siendo dados por diversos grupos e instituciones; no obstante, es imperativo conjuntar estos esfuerzos individuales en iniciativas comunes y, a la vez, optimizar y mejorar los recursos y la infraestructura con que se cuenta en diferentes entidades nacionales. A continuación, presentamos el plan inicial de la red de física de altas energías (FAE), el cual considera acciones y presupuesto para un año, bajo la suposición de que existe la intención de financiar las actividades de la misma a cuatro años.

## Física de Altas Energías: La Última Frontera

La física de altas energías es una de las principales componentes de las ciencias físicas. Se enfoca al entendimiento de la naturaleza fundamental de la materia y la energía, y la estructura íntima del espacio-tiempo. Los descubrimientos en este campo, a menudo llamado también *física de partículas elementales*, han cambiado y sin duda cambiarán nuestra comprensión básica del mundo. Las preguntas que la física de altas energías intenta contestar son: ¿Cuáles son los bloques fundamentales de que está compuesto el universo? ¿Qué fuerzas les permiten a estos entes fundamentales conformar todo lo que vemos alrededor nuestro? ¿Qué características desconocidas de estos entes y fuerzas han impulsado la evolución del universo desde la gran explosión hasta su estado actual, con todo y sus complejas estructuras que soportan la vida, incluyendo a nosotros mismos?

Mediante experimentos con rayos cósmicos y sucesivas generaciones de aceleradores de partículas, construidos y operados alrededor del mundo, los físicos han utilizado las colisiones de alta energía como una herramienta básica en su búsqueda por responder de forma racional tales preguntas. Esto les ha permitido descubrir una gran cantidad de nuevas partículas, cuyo estudio les ha revelado numerosas características insospechadas de la naturaleza y la existencia de principios desconocidos subyacentes en los fenómenos que en ella tienen lugar. Los físicos de partículas han logrado sintetizar todo el conocimiento adquirido, dando lugar al marco teórico denominado *Modelo Estándar* (ME), el cual brinda una descripción detallada y comprensiva de los mecanismos que gobiernan el universo.

El ME es una teoría cuántica de campos relativistas que, mediante el principio de invariancia de norma, complementado con la rotura espontánea de la simetría merced a un campo escalar denominado *bosón de Higgs*, describe las interacciones fuerte y electrodébiles entre las partículas elementales (*quarks y leptones*) que componen toda la materia. Hasta la fecha, casi todas las pruebas experimentales están de acuerdo con las predicciones del ME; sin embargo, si bien es una muy buena aproximación a las energías actuales, no resulta una teoría completa, puesto que no incluye la gravedad, la cuarta interacción fundamental conocida, y el número de parámetros libres (masas y constantes de acoplamiento) que contiene es muy grande. Recientemente, descubrimientos provenientes del sector de los neutrinos han provisto las primeras evidencias experimentales de fisuras en el andamiaje del ME, dando indicios de que algún tipo de física novedosa nos aguarda en el ámbito de los Teraelectronvolts (TeV). El Gran Colisionador de Hadrones (LHC), que en poco tiempo entrará en operaciones en el CERN, echará una ojeada a este territorio inexplorado de muy altas energías, mientras que un futuro colisionador de leptones seguramente podrá examinar los nuevos fenómenos con gran precisión.

Por otro lado, en años recientes, han adquirido una importancia creciente experimentos que utilizan fuentes astrofísicas o terrestres de partículas. Estos experimentos emplean observatorios que cubren extensas áreas en la superficie, como es el caso del Observatorio Pierre Auger, en Argentina, o bien grandes detectores localizados en ambientes de bajo fondo de radiación, dentro de instalaciones subterráneas como, por ejemplo, Super-Kamiokande y SNO, en Japón y Canadá, respectivamente. Ello ha propiciado el desarrollo de un área relativamente nueva, que se ha dado en llamar *física de astropartículas*, surgida

de la confluencia entre la cosmología, la astrofísica y la física de partículas elementales. El conocimiento preciso de la física de partículas se vuelve imprescindible para el entendimiento de los fenómenos que ocurren en los diversos escenarios astrofísicos, lo cuales, de esta forma, constituyen excelentes laboratorios para la física de altas energías.

Entre los tópicos más importantes que aborda esta disciplina, caben destacarse los que tienen que ver con *neutrinos*, *rayos cósmicos de altas energías*, *rayos gamas* y *materia oscura*. El neutrino es una partícula neutra de espín 1/2 que acompaña al electrón emitido en el decaimiento beta de un núcleo radiactivo. Existen tres tipos (*sabores*) de neutrinos, uno por cada leptón ( $e$ ,  $\mu$ ,  $\tau$ ). Durante las últimas dos décadas, merced a un gran esfuerzo experimental, se han producido considerables avances en la comprensión de las propiedades de estas elusivas partículas. Un suceso notable fue el descubrimiento de que, a diferencia de lo que sucede en el ME, las masas de los neutrinos, aunque sumamente pequeñas, son no nulas y que, a consecuencias de ello, el sabor de los neutrinos cambia a lo largo de su propagación. Este fenómeno, conocido como *oscilaciones de neutrinos*, conlleva implicaciones profundas no sólo para la física de partículas, sino también para el entendimiento de la evolución del universo temprano y los procesos que tienen lugar en el interior de las estrellas y otros objetos astrofísicos.

Igualmente excitante, y hasta más inesperado, ha resultado el descubrimiento, realizado con observaciones de supernovas distantes, de una acelerada expansión del universo causada por una misteriosa clase de *energía oscura*, que abarca casi tres cuartos del contenido de energía-materia en el universo conocido y hace crecer al universo con una rapidez cada vez mayor. La energía oscura tiene características interesantes que podrían cambiar nuestra comprensión de la gravedad. Las observaciones astrofísicas también han revelado que la cuarta parte restante del universo consiste, principalmente, de algo también desconocido y que se ha dado en llamar *materia oscura*. Ninguna partícula del ME puede explicar este ingrediente extraño del universo. En la década próxima, la combinación de los resultados del LHC y de los experimentos dedicados a buscar la materia oscura nos proporcionarán información sobre su verdadero carácter.

Otro problema central dentro de la física de astropartículas es el planteado por los rayos cósmicos de muy altas energías, es decir, partículas con energías de  $10^{19}$  eV o mayores, que llegan a la Tierra desde diversas partes del cosmos. No se conoce un mecanismo convincente que pueda acelerar una partícula subatómica, digamos un protón o un núcleo atómico, a tales energías, las cuales resultan comparables a las de objetos macroscópicos. Tampoco se sabe a ciencia cierta de donde provienen ni cual es la naturaleza de tales partículas. El problema se complica en razón del llamado corte GZK, según el cual, por la pérdida de energía por su interacción con el fondo cósmico de radiación, estos rayos cósmicos ultra-energéticos no pueden provenir de objetos localizados a distancias superiores a unos 100 Mpc ( $1 \text{ Mpc} = 3.3 \times 10^6$  años-luz). EL Observatorio Auger y Hi-Res ha provisto evidencia convincente de la existencia de dicho corte.

A continuación damos una lista de preguntas abiertas relacionadas directamente con los ámbitos de estudio de la física y astrofísica de altas energías y que marcan la pauta del rumbo a seguir para progresar en este campo:

1. ¿Cómo adquieren masa las partículas? ¿Existe el Higgs o se requieren nuevas leyes físicas? ¿Hay dimensiones adicionales del espacio?
2. ¿Cuál es la naturaleza de las nuevas partículas y de los principios más allá del modelo estándar?
3. ¿De qué está compuesta la materia oscura? ¿Qué formas desconocidas de energía dominan en el universo?
4. ¿Se unifican las fuerzas de la naturaleza en una sola a más altas energías? ¿Cómo se incluye la gravedad dentro de este esquema? ¿Existe alguna teoría de la gravedad cuántica?
5. ¿Cómo surgió la preponderancia observada de la materia sobre la antimateria?
6. ¿Cuáles son las masas y otras características de los neutrinos? ¿Qué papel desempeñaron en la evolución del cosmos y cómo están conectados con la asimetría materia-antimateria?
7. ¿Es el protón, el elemento esencial del que estamos hechos, inestable?
8. ¿Cómo se formó el universo? ¿Cuál será su final?
9. ¿Qué tipo de semilla dio origen a las galaxias y demás estructuras en el universo?
10. ¿Cuál es la naturaleza y el origen de los rayos cósmicos ultra-energéticos?

En la búsqueda de respuestas a estos interrogantes, los físicos recurrirán a métodos de aceleración y detección cada vez más sofisticados, lo que propiciará el empleo y el desarrollo de tecnologías de punta. Con base al tipo de instrumentos y técnicas empleadas, dentro de esta frontera del conocimiento y la tecnología podemos, de manera un tanto esquemática, diferenciar un conjunto de tres fronteras interrelacionadas:

- *La frontera energética*, en la que se utilizan aceleradores de gran energía para generar colisiones de partículas (típicamente, electrones y protones) y de esa manera descubrir nuevas partículas y sondear directamente la arquitectura de las fuerzas fundamentales. Las preguntas más notables que nos ayudarán a responder los colisionadores presentes y futuros incluyen el origen de las masas de las partículas elementales, la posible existencia de nuevas simetrías de la naturaleza (como, por ejemplo, supersimetría), la existencia de dimensiones adicionales del espacio y la naturaleza de la materia oscura. Los experimentos en la frontera energética, en el LHC y en un futuro colisionador de leptones, permitirán que, por vez primera, directamente en el laboratorio, los físicos produzcan y estudien partículas que son mensajeras de nuevos fenómenos no descritos por el ME. Son cuatro los experimentos que se realizarán en el LHC; en los más grandes, ATLAS y CMS, se buscará al Higgs y se pondrán a prueba las interacciones más básicas. Los otros dos, LHCb y ALICE, tratarán de elucidar el origen de la asimetría materia-antimateria y la naturaleza del plasma de quark y gluones.
- *La frontera de la intensidad*, que utiliza intensos haces de partículas para determinar las propiedades de los neutrinos. Un programa de investigación internacional coordinado es necesario para develar las nuevas interrogantes que los descubrimientos en el área han generado en torno a estas peculiares partículas: ¿cuál es la jerarquía de sus masas?, ¿existe violación de CP en las oscilaciones de neutrinos?, ¿son los neutrinos sus propias antipartículas?, ¿existen

neutrinos estériles?, etcétera. Algunos experimentos de este programa requieren neutrinos de reactores o que, mediante haces intensos de protones, sean producidos en aceleradores dirigidos hacia detectores a miles de kilómetros. Dentro de esta frontera también se ubican aquellos experimentos de alta precisión que utilizando muones, kaones o mesones B para medir procesos raros, puedan sondear el régimen energético de los TeV y decirnos algo sobre la nueva física más allá del ME.

- La *frontera cósmica*, que utiliza telescopios, espaciales o en la superficie terrestre, y experimentos subterráneos para descubrir la naturaleza de la materia oscura y la energía oscura, saber qué son y de dónde provienen los rayos cósmicos ultraenergéticos y determinar las propiedades de los rayos gamma de más altas energías, Noventa y cinco por ciento del contenido del universo parece consistir de materia oscura y energía oscura, y en realidad es muy poco lo que sabemos sobre ellas. Descubrir la naturaleza de la materia oscura y de la energía oscura es un asunto de la mayor prioridad científica y requerirá una combinación de experimentos en los aceleradores de partículas, así como observaciones de objetos astrofísicos en el cosmos distante. Por otra parte, la existencia de los rayos cósmicos y rayos gammas de energías extremadamente altas puede darnos información sobre mecanismos físicos desconocidos que operan en el interior de los ambientes astrofísicos más violentos y cuya elucidación puede abrirnos una nueva ventana, similar a la que se abrió al entender que el motor de la producción de energía en las estrellas son las reacciones nucleares.

Aunque con enfoques diferentes, en última instancia, los desarrollos experimentales y teóricos en estas fronteras apuntan a un objetivo común y los descubrimientos dentro de década una de ellas tendrán un impacto mucho mayor al juntarlos con descubrimientos en las otras fronteras. Por ejemplo, el descubrimiento de nuevas partículas en la frontera de la energía, combinado con descubrimientos de la frontera de la intensidad sobre los neutrinos y los procesos raros, puede explicar el dominio de la materia sobre la antimateria. La síntesis de descubrimientos de las tres fronteras nos ofrece la oportunidad de lograr un entendimiento mucho más profundo de los secretos íntimos y los orígenes del universo físico.

## **Contexto Internacional y Presencia de México**

La física de altas energías ofrece un sinnúmero de oportunidades a miles de científicos de todos los rincones del planeta para trabajar juntos en experimentos y proyectos multinacionales que se llevan a cabo en los más diversos lugares. La escala técnica y de los costos, hacen que la construcción y operación de los mayores aceleradores observatorios queden fuera de la capacidad económica y tecnológica de una sola nación. En la actualidad, los proyectos de física de altas energías son esfuerzos internacionales, desde su concepción hasta llegar a su puesta en operación y mantenimiento. Estas colaboraciones científicas

adquieren un nuevo significado como faros que iluminan el libre y abierto intercambio de ideas entre hombres y mujeres de ciencia de todas las naciones, y se convierten en modelos a imitar para la cooperación internacionales entre países con distinto grado de desarrollo.

Los experimentos de colisiones han tenido desde siempre una fuerte componente internacional. Experimentos en el CERN, Fermilab, SLAC y Brookhaven, entre otros, han aglutinado los esfuerzos de grupos de físicos de distintos continentes para lograr los grandes descubrimientos que definen la física de altas energías en la actualidad. El diseño y la construcción de aceleradores es también ahora un esfuerzo común. Así por ejemplo, físicos e ingenieros americanos especialistas en aceleradores ayudaron a los europeos a construir el LHC en el CERN y colaboraron con los chinos para construir el colisionador electrón-positrón de Beijing.

Desde el 2000, personal académico de cuatro instituciones mexicanas (BUAP, CINVESTAV, UASLP y UNAM) participan en los experimento ALICE y CMS que prontamente darán inicio en el CERN. En el caso de ALICE, esto ha incluido el compromiso de desarrollar, fabricar e instalar las componentes V0 y Acorde del detector, las cuales son parte del sistema de disparo (“trigger”) del experimento, incluyendo la producción de los módulos de centelladores y las electrónicas de “front-end”, disparo, transferencia de datos y monitoreo. Esta experiencia ha sido pionera en su tipo en México, ya que es la primera ocasión que se entregan detectores completos a una colaboración internacional, quedando de manifiesto que se ha alcanzado la madurez y capacidad necesarias para contribuir directamente en el diseño y la construcción de partes de un sistema complejo, dentro de un escenario de excelencia científica y técnica. Asimismo, la entrada en operación del LHC marcará el inicio de una etapa de mejoras de los detectores existentes, en la cual los mismos grupos planean acrecentar su nivel de participación. En este sentido se consideran dos posible contribuciones: (i) mejora del potencial de identificación de protones hasta 30 GeV/c con un detector Cherenkov de gas y (ii) perfeccionamiento del dispositivo Acorde con el incremento de la superficie del detector bajo tierra y la construcción de un arreglo en la superficie.

Además de con grandes colisionadores, la física más allá del ME puede ser investigada con experimentos que emplean haces de gran intensidad y detectores subterráneos de gran volumen. En Japón actualmente se está construyendo un sincrotrón de protones a 50-GeV en el Complejo para la Investigación de Aceleradores de protones de Japón, el cual producirá un intenso haz de neutrinos que se apuntará hacia el detector de Super-Kamiokande para estudiar oscilaciones de neutrinos. En este experimento se tiene una significativa participación internacional. Otras colaboraciones también están trabajando en experimentos para el estudio similares con neutrinos de reactores nucleares en la bahía de Daya, en China, y Doble Chooz, en Francia. Experimentos de oscilaciones en distancias largas (“long baseline experimentos”) que están en etapa de planeación o desarrollo emplearán haces intensos de neutrinos producidos en Fermilab o CERN, los cuales serán dirigidos hacia detectores localizados a cientos y hasta miles de kilómetros de distancia de la fuente. El propósito principal los experimentos mencionados será la determinación de la jerarquía de masa de los neutrinos y la completa caracterización de la matriz de mezcla entre los diferentes estados, incluyendo la posible existencia de una fase que dé lugar a la violación de CP en el sector leptónico. Grupos nacionales que han mantenido, desde hace

dos décadas, una colaboración con Fermilab, están comenzando a involucrarse en el programa de neutrinos de dicho laboratorio; en particular, los experimentos Minerva y Nova. El primero de ellos estudiará la sección eficaz de los neutrinos a baja energía usando el haz de neutrinos del inyector principal de Fermilab. Por su parte, Nova pretende medir uno de los ángulos de la matriz de mezcla de los neutrinos y determinar la jerarquía de sus masas. Se planea contribuir de manera significativa a los detectores de este experimento.

Aunque, por lo común, en una escala menor, los experimentos en la frontera cósmica están también a cargo de colaboraciones multinacionales. El proyecto GLAST (acrónimo en inglés de Telescopio Espacial de Gran Área de Rayos Gamma), diseñado para medir rayos gama en el rango de 10 keV-300GeV, es una colaboración entre siete naciones: Francia, Alemania, Italia, Japón, España, Suecia y los Estados Unidos. Recientemente, se ha conformado otra colaboración internacional, llamada HAWC, que cuenta con una importante participación mexicana. El proyecto HAWC planea observar los rayos gamma provenientes del espacio exterior mediante un arreglo de detectores Cherenkov que serán instalados en la Sierra Negra de Puebla. Por otra parte, el principal observatorio de neutrinos astrofísicos en construcción es IceCube. Localizado en la Antártida, aprovecha varios kilómetros cúbicos de hielo para la generación de luz Cherenkov por las partículas secundarias cargadas originadas por los neutrinos de alta energía que atraviesan la Tierra. De esta manera, puede observar neutrinos de decenas o cientos de TeV provenientes de fuentes ubicadas en el cielo del hemisferio Norte. IceCube tendrá una gran sinergia con HAWC, al estudiar ambos de manera continua, y por varios años, una porción común de la bóveda celeste en rangos similares de energía. Las observaciones de HAWC pueden resultar cruciales en la verificación de fuentes astrofísicas de neutrinos.

El *Observatorio Auger* (OA) es el más grande y sofisticado en su género y fue concebido con el propósito de dar respuesta a los enigmas planteados por los rayos cósmicos ultra energéticos (RCUE). El OA, cuya construcción quedó concluida a mediados del 2008, está a cargo de una colaboración internacional integradas por 370 investigadores de 17 naciones, entre ellos México. Entre sus primeros resultados científicos cabe destacarse el publicado en la revista Science acerca de la primera evidencia observacional de anisotropía en la dirección de llegada de los RCUE. El grupo mexicano, integrado por investigadores, estudiantes y técnicos de cuatro instituciones (BUAP, CINVESTAV, UMSNH y UNAM), se sumó a este experimento desde hace más de una década, contribuyendo al diseño, instalación y operación del Observatorio, así como al análisis de los datos que han venido acumulándose desde 2004. A fin de aumentar el potencial del Observatorio, se implementarán dos ampliaciones principales a su diseño base. Una de ellas, el experimento AMIGA (“Auger Muon Infill Ground Array”), consistirá de un sub-arreglo con una mayor densidad de unidades del detector de superficie, complementado por más de 60 centelladores plásticos, de 30 m<sup>2</sup> de área cada uno, que se usarán para la detección de muones. De esta forma, se conseguirá disminuir el umbral de energías del OA y, a la vez, discriminar la componente muónica de la electromagnética (electrones y fotones) en los chubascos de partículas secundarias, mejorando la capacidad para la determinación de la naturaleza del rayo cósmico primario.

## Líneas de Investigación

### Desarrollo de Física de Aceleradores en México

Como se mencionó más arriba, los aceleradores han sido una de las herramientas clave para el avance de la física de altas energías, sin embargo, a pesar de que la ciencia de nuestro país ha logrado incidir importantemente en casi todas las facetas del quehacer científico de la física de altas energías, la física de aceleradores es virtualmente inexistente en México como área de investigación y desarrollo de tecnología de punta.

Si tomamos en cuenta que los aceleradores, además de producir las colisiones para estudiar los componentes más fundamentales de la naturaleza y los primeros momentos del *Big Bang*, también se utilizan en otros muchos y variados campos de la ciencia y tecnología, como Medicina, Física Atómica, Química, Biología e incluso, últimamente, en campos tan inesperados como Ciencias Forenses, nos damos cuenta de la urgencia de desarrollar esta área en México.

Recientemente, y con el objetivo de dar un impulso poderoso a esta área en nuestro país, se propuso en el marco de la convocatoria Presentación de Ideas para la Realización de Megaproyectos el proyecto 55329: *Desarrollo de la Tecnología de Aceleradores Fuente de Luz de Sincrotrón*. El objetivo principal de este proyecto es: *Establecer y consolidar un grupo interdisciplinario para el estudio de aceleradores y sus diferentes aplicaciones tecnológicas*.

Un acelerador es un instrumento muy complejo cuyo diseño y construcción requieren de habilidades, conocimientos y experiencias muy diversas. Esta problemática es muy similar a la de otros proyectos en el área de física de altas energías. Aún más, las diversas iniciativas englobadas en esta red, tienen en común muchos de los problemas, así como de las técnicas y los avances tecnológicos necesarios para resolverlos. Precisamente en este contexto, y de acuerdo al objetivo principal recién mencionado, los integrantes del proyecto 55329 (ver listado en el apéndice) se han unido a esta red de altas energías con la intención de mejorar el diálogo entre todos los actores interesados en el avance de la física de altas energías y las tecnologías que la hacen posible.

Algunos de los puntos de contacto comunes a la mayoría de los colegas de la presente red y que son de interés en el área de aceleradores son:

- Captación y formación de estudiantes tanto en áreas de ciencia básica y aplicada, así como de ingenierías; particularmente en electrónica. Para lograr la captación se hará promoción y divulgación de nuestro trabajo y nuestros planes; para lograr la formación de los estudiantes se organizarán escuelas y se les enviará a estancias para que inicien el proceso de integración a grupos de investigación.
- Vinculación con áreas de ingeniería y del sector privado para explorar en particular: (a) El desarrollo y manufactura de dispositivos electrónicos de adquisición de datos, así como de monitoreo y control. Este punto específico es de interés para todas las áreas de estudio englobadas en esta red.



(b) La creación de un grupo interdisciplinario interesado en las aplicaciones a la medicina de tecnologías de aceleradores, en particular la terapia con protones para tipos específicos de cánceres malignos.

- Vinculación con otras áreas de ciencia básica y aplicada para formar un catálogo de usuarios actuales y potenciales de una fuente de luz sincrotrón.
- El desarrollo de pequeños prototipos de algunos de los diferentes componentes de una fuente de luz; por ejemplo, un acelerador lineal de unos cuantos MeVs, modelos para sistemas de monitoreo y control del haz, sistemas de diseño de la *lattice* del acelerador, etcétera.

## **Desarrollo de Detectores de Neutrinos y Materia Oscura**

Situado en la confluencia de la física de partículas y la astrofísica, el enigma de la materia oscura y la energía oscura son un problema central de la ciencia contemporánea. Una combinación de experimentos con aceleradores y experimentos con astropartículas (subterráneos y en el espacio) será necesaria para resolverlo. En este contexto, la búsqueda directa de materia oscura en la forma de partículas masivas débilmente interactuantes (WIMPs), como los neutralinos, se ha convertido en un tema de intensa investigación a nivel mundial. La metodología usualmente empleada se basa en la observación de eventos de dispersión elástica de tales partículas, las cuales depositan energía en un detector de estado sólido a través del retroceso de los núcleos. Tres son las técnicas que se emplean, ya sea de forma simple o híbrida: (1) métodos de centelleo, (2) uso de detectores de ionización, (3) sistemas bolométricos. Las mejores cotas a la sección eficaz provienen de detectores híbridos criogénicos que combinan las técnicas bolométricas con las de ionización o centelleo. Uno de los más avanzados es CDMS (“Cryogenic Dark Matter Search”), ubicado en la mina de Soudan, Minnesota, E.U.A., que utiliza un arreglo de detectores de cristal semiconductor de Ge y Si a temperaturas de miliKelvin.

Como se describe en el apartado del Contexto Internacional, existen en la actualidad varios experimentos de física de altas energías con una componente mexicana significativa. El paso siguiente en la consolidación de la capacidad científica del país, requiere no sólo la fabricación de componentes avanzados, sino también la realización de experimentos de frontera dentro del territorio nacional. Con esta mira, dentro del Megaproyecto *Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano*, presentamos una propuesta cuyo objetivo central es el desarrollo, montaje, y operación de un experimento para la detección de WIMPs. Tomando en consideración el estado del arte en este campo, se propuso la construcción de un detector criogénico basado en la tecnología ZIP (“Z-dependent Ionization and Phonon”), es decir, uso de cristales de Ge o Si, crecidos en forma cilíndrica, de 1 centímetro de ancho por 3 pulgadas de diámetro con un peso de 250 g para Ge y 100 g para Si. En un plazo de cinco años el experimento podría alcanzar una masa de detección de por lo menos 25 Kg, lo que significaría un incremento por un factor de 100 respecto a la sensibilidad actual de CDMS. Durante la etapa de desarrollo se planea estudiar el uso de detectores de estaño y otros materiales cristalinos de peso atómico superior al Si, con los cuales se podría alcanzar una mayor masa en un volumen más pequeño.

Una tecnología alternativa es la de los detectores criogénicos de líquidos nobles (neón, argón o xenón) ultra puros. La idea de usar átomos nobles para detectar los retrocesos en sus núcleos provocados por WIMPs o neutrinos tiene ya un buen número de años y ha cobrado auge recientemente debido a dos hechos experimentales: su escalamiento relativamente fácil a masas sensibles de varias toneladas y su alta eficiencia para discriminar señales por medio de las dos fases (líquido-gas). Pruebas realizadas con este tipo de detectores han demostrado que la diferencia de señales en los procesos de ionización y de centelleo puede ser usada para discriminar el ruido electromagnético, lo que brinda el medio más efectivo para suprimir el ruido de fondo. Esta técnica de detección tiene un alto potencial para la observación de neutrinos solares provenientes de reacciones nucleares pertenecientes a la cadena pp. Estos neutrinos son la componente más abundante en el flujo de neutrinos del Sol y su medición en tiempo real con una alta precisión ( $\sim 1\%$ ), es la mejor opción para el conocimiento preciso del ángulo  $\theta_{12}$  en la matriz de mezcla de los neutrinos y, a la vez, poner a prueba las predicciones del modelo estelar estándar.

Hasta ahora, las investigaciones desarrolladas en diversas instituciones mexicanas en relación a la física de neutrinos se han restringido a la parte teórica y fenomenológica. Dentro de las acciones de la red se propone impulsar el desarrollo en México de la física experimental en esta importante frontera en altas energías, con miras evaluar la posibilidad de instalar, dentro de un laboratorio subterráneo, un observatorio de neutrinos solares y neutrinos de supernovas. En una primera etapa, se planean implementar simulaciones para determinar el flujo de rayos cósmicos y el nivel de radioactividad natural en posibles localizaciones del laboratorio subterráneo, así como simulaciones detalladas para el diseño de un detector de neutrinos adecuado para el rango de energías de 0.1 a 100 MeV. Los estudios se concentrarán en detectores de centelleo con medio de neón líquido, con masas entre 0.1 y 10 kton, los cuales tienen ventajas significativas en este rango de energías sobre los centelladores orgánicos usados en experimentos como Borexino y KamLAND. Entre éstas destacan la auto-transparencia a la luz de centelleo, un alto nivel de foto-producción por partículas ionizantes (en el UV extremo) y la ausencia de radioisótopos con larga vida media y de radiación proveniente del decaimiento del  $^{14}\text{C}$ , abundante en sustancias orgánicas. Como ya se indicó, el mismo experimento podría servir para la detección de materia oscura mediante el retroceso de los núcleos de Ne, causado por la dispersión de WIMPs. Paralelamente a este trabajo, se propone iniciar un estudio de la factibilidad para construir un prototipo basado en centelleo de neón o argón líquido (masas de 1 -100 kg). Esto requiere disponer de capacidad criogénica para mantener el medio detector a temperaturas del orden de 10-20 K. La purificación del neón con trampas de carbón ha sido propuesta como una alternativa de bajo costo. Entre el equipo necesario destacan tubos fotomultiplicadores de bajo ruido, a cuya ventana se debe aplicar una película fluorescente capaz de convertir la luz UV a la región sensible de los mismos (“wavelength shifter”), y un sistema de adquisición de datos con capacidad de digitalización de pulsos.

Experimentos como los mencionados deben realizarse en condiciones de bajo ruido de fondo, para lo cual se requieren instalaciones localizadas en el subsuelo. Por tal motivo, en el citado megaproyecto se plantea la puesta en operación de un laboratorio que disponga de este tipo de facilidades. Esta idea, y la contenida en la propuesta para el desarrollo de aceleradores, pueden servir de base para la elaboración de un plan a largo plazo, conducente a la creación de un Laboratorio Nacional, con instalaciones de superficie y

subterráneas, único en su tipo en Latinoamérica, el cual posibilite la realización de experimentos de vanguardia en altas energías y propicie la integración con otras disciplinas científicas, mediante la implementación de investigaciones multidisciplinarias. Una empresa de esta magnitud tiene un enorme potencial de desarrollo tecnológico y fomentaría el surgimiento, en torno al Laboratorio, de un conjunto de industrias pequeñas y medianas de alta tecnología, con el consiguiente impacto económico, social y regional.

## **Detectores de Radiación**

La detección de radiación (ionizante o no) es una disciplina muy amplia y de gran importancia en la sociedad actual. El desarrollo de detectores de radiación ha impulsado fuertemente el desarrollo científico el cual a su vez ha encausado el desarrollo de tecnologías comerciales desde biotecnología hasta diagnóstico médico. Prácticamente no existe aspecto de nuestra vida cotidiana que no haya sido impactado por detectores de radiación. Tienen aplicaciones tan diversas como la detección de radiación visible con una cámara digital, la detección de rayos gama en tomografía por emisión de positrones, la detección de rayos X en tomografía axial, monitoreo de niveles de radiación UV, la detección de rayos infrarrojos en procesos industriales, la detección de ondas milimétricas provenientes de núcleos de galaxias o fluctuaciones en el fondo cósmico de microondas, la detección de energía de ionización de partículas de alta energía, entre otras.

La gran importancia de los detectores de radiación es que nos han permitido caracterizar fenómenos ya sea por reflexión o absorción de la radiación, o por la propia radiación emitida. En todo caso, los detectores de radiación nos permiten medir de manera remota, permitiendo monitorear eventos con mínima intrusión, en ambientes peligrosos, a cualquier distancia imaginable

Con los detectores actuales podemos registrar desde altas potencias de radiación (láseres de corte, radiación solar) hasta sólo unos cuantos fotones (radiación de Cherenkov). O bien, fenómenos que involucran radiación de larga duración o eventos de unos cuantos femtosegundos. Un detector de radiación sensible en cierto intervalo de longitudes de onda puede servir para diversas áreas y disciplinas, de ahí su versatilidad. Por ejemplo, un mismo sensor de avalancha igual puede usarse en la detección de fluorescencia para secuenciar ADN, o luz proveniente de estrellas, o la radiación resultante de una partícula de alta energía interactuando con la materia.

Los avances en semiconductores han permitido perfeccionar o crear nuevos materiales fotoemisivos para fotomultiplicadores, fotodiodos de avalancha con más sensibilidad y menor ruido, dispositivos detectores de pozo cuántico o alternativas para los detectores de tira de silicio. La innovación en las técnicas de crecimiento ha incrementado grandemente el desempeño y gama de aplicación de sensores de radiación principalmente para materiales binarios y ternarios, de los cuales tenemos como ejemplos típicos el GaAs y AlGaAs respectivamente, mismo que han permitido el desarrollo de heteroestructuras de brecha de energía controlable.

Los detectores basados en QWIP (Quantum Well Infrared Photodetectors) han incrementado rápidamente su popularidad debido a los avances en su fabricación. Estos detectores usan el principio físico de los pozos cuánticos (quantum wells), el cual se provoca cuando se crean heteroestructuras de semiconductores con brechas de energía muy anchas. El resultado son estados de energía cuantizados, los cuales tienen bandas de respuesta muy estrechas y dependientes del espesor físico de las capas. De esta manera, se pueden hacer detectores que sean sensibles a una longitud de onda específica, simplemente eligiendo la “profundidad” del pozo cuántico en el diseño del detector. Los materiales como los del tipo GaAs/Al<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>As permiten un rango de variación suficientemente grande de los pozos cuánticos como para detectar longitudes de onda más largas que las 12 micras. Esta tecnología se ha vuelto popular debido a que es comparativamente barato crear un arreglo de detectores en plano focal (FPA). A pesar de que los detectores QWIP presentan corrientes de oscuridad alta, no hay ruido térmico significativo en ellos.

Otra nueva tecnología muy prometedora para aplicaciones como PET (positron emission tomography), física de altas energías, mediciones de fluorescencia de proteínas en células es la de los MPPC (multi-pixel photon counter). Los MPPC son capaces de detectar niveles de iluminación muy pequeños, pues son capaces de detectar fotones individuales. La ganancia típica que presentan es del orden de  $10^6$  y presentan una eficiencia de detección de fotones de hasta 65% en la longitud de onda de mayor sensibilidad. Una de sus principales ventajas es que no requiere enfriamiento.

Las tecnologías modernas de diodos de avalancha permiten una detección de niveles de iluminación muy bajos. A pesar de que la ganancia es muy baja comparada con otras tecnologías (alrededor de 100) como la ya mencionada MPPC (que es 4 órdenes de magnitud mayor), esto se compensa con su gran eficiencia cuántica. Una de las particularidades de este tipo de detectores es su inmunidad a los campos magnéticos, por lo que son la única opción en aplicaciones en que estos son muy intensos. Existe tecnología de diodos de avalancha fabricados con diversos semiconductores (por ejemplo, Si, Ge o InGaAs), por lo que es posible usarlos en muy diversas bandas de operación (desde el UV hasta infrarrojo lejano).

MCT son las siglas de Mercury-Cadmium-Telluride, uno de los materiales semiconductores para detectores más importantes en la actualidad, debido a que su sensibilidad espectral puede seleccionarse desde 0.8 hasta 30 micrómetros. Estos detectores alcanzan una responsividad del orden de 3 A/W, con tiempo de respuesta de microsegundos. El principal contratiempo que ha enfrentado esta tecnología, además del costo, es el estricto control militar. El MCT se crece actualmente con técnicas de crecimiento epitaxial, siendo la MBE (molecular beam epitaxy) una de las técnicas más extendidas.

En general, usando materiales binarios y ternarios se pueden crear detectores de heteroestructura con una gran variedad de curvas de sensibilidad espectral al variar las proporciones entre un elemento de la red cristalina y otro. Entre estas técnicas de crecimiento preciso de cristales tenemos las técnicas epitaxiales que incluyen el crecimiento epitaxial en fase vapor (VPE), crecimiento epitaxial en fase líquida (LPE), crecimiento epitaxial por haces moleculares (MBE), crecimiento por química metalorgánica por deposición a vapor (MOCVD). La tendencia mundial en el desarrollo e investigación

en el campo de detectores es hacia los puntos cuánticos, que utilizan principalmente técnicas de epitaxia.

Hoy este tipo de tecnologías de crecimiento requiere inversiones de varios millones de dólares, son del dominio de una decena de países, y un tercio de los laboratorios están en Estados Unidos. Desafortunadamente en México existe un rezago enorme respecto a estas técnicas. Mientras que sí existen en el país algunas contadas instituciones con equipo de crecimiento de cristales, éste tiende a ser con fines más académicos y en general, con tecnología obsoleta. El problema se agrava cuando consideramos que una buena parte de los materiales y detectores más avanzados están restringidos para su venta a otros países debido a razones de seguridad nacional (por sus aplicaciones militares), principalmente impuestas por Estados Unidos. Entonces, además de que no existe la infraestructura para fabricar detectores, para México es muy difícil y muy caro comprar ciertos tipos de detectores que tendrían un gran impacto y utilidad. Así, se hace de gran importancia el fomentar y generar colaboración nacional e internacional para lograr el acceso y asimilación de nuevas tecnologías de detectores de radiación.

### **Fuentes de Radiación y Mediciones de Alta Precisión.**

En el campo de fuentes de luz multi-usuario y multi-propósito, lamentablemente el país carece por completo de tales infraestructuras. Tomando como regla de medición el costo y el número de usuarios simultáneos tenemos en un extremo a los sincrotrones con capacidad de generar radiación desde el infrarrojo hasta los rayos x; dependiendo del diseño del acelerador, este estará optimizado para emitir de manera más eficiente en alguna porción del espectro electromagnético ya mencionado, los diseños mas modernos producen también pulsos extremadamente cortos haciendo posible la espectroscopia a tiempo resuelto. En el otro extremo podemos identificar a un tipo de fuentes que empieza a ser construido alrededor del mundo y cuya utilidad esta siendo demostrada cada vez más frecuentemente. Estas instalaciones usan como fuente de luz láseres de pulsos ultracortos (50 femtosegundos ( $10^{-14}$  s) o menos) y ultraintensos (desde cientos de Megawatts ( $10^6$  Watts) hasta Terawatts ( $10^{12}$  watts), e incluso, en las instalaciones mas grandes de este tipo, algunos Petawatts ( $10^{15}$  watts). Las amplitudes de campo eléctrico asociadas a tales intensidades son iguales o mayores a los campos eléctricos que ligan a los electrones a sus núcleos en los átomos. Por supuesto, en el tiempo que estos láseres han estado accesibles han dado lugar a toda una serie de nuevos estudios fundamentales desde interacción de átomos con campos electromagnéticos ultraintensos hasta nuevas herramientas espectroscópicas ultrarrápidas y proceso y caracterización de materiales. Estas fuente de luz, ocupan un espacio físico equivalente a algunas decenas de metros cuadrados, el costo de los láseres requeridos varia de 1 a 3 millones de dólares según las especificaciones requeridas y la instrumentación asociada para su operación y caracterización seria de aproximadamente 3 a 5 millones de dólares (otra vez, dependiendo de las especificaciones de los láseres y los usos a los cuales este dedicada la fuente).

El Reino Unido ha inaugurado recientemente su nuevo sincrotrón: Diamond, localizado en el llamado Rutherford Appleton Laboratory (RAL), no lejos de la Ciudad de Oxford. La

construcción de dicha instalación empezó en 2003 y las primeras estaciones de experimentación entraron en operación en este 2007. A una distancia de alrededor de 300 metros del Diamond se encuentran, dentro del propio Rutherford Laboratory, dos fuentes de luz basadas en láseres: Vulcan y Astra. El sistema Vulcan entrega pulsos de 100 TW en aproximadamente 700 fs ( $\lambda=1054$  nm), el sistema Astra entrega 500 mJ por pulso en aproximadamente 40 fs. Este último sistema está siendo modificado para alimentar otras dos fuentes de luz: Astra-Artemisa y Astra-Geimini. El primer sistema entregará pulsos de 0.5 PetaWatts con intensidades del orden de  $10^{22}$  Wcm<sup>-2</sup> (duración del pulso 30fs y en 1054nm), mientras que la fuente Astra-Artemisa, producirá radiación VUV (por medio de Generación de Armónicos de Orden Superior) en el intervalo de 20 a 100 eV en pulsos < 10 fs a repeticiones de 1 a 3 KHz y con la posibilidad de generar pulsos de attosegundos en el futuro cercano. Cuando el sistema Astra-Artemisa esté completamente funcional, este será el láser de mayor intensidad en el mundo. El hecho de que estas fuentes de luz se encuentren en la misma institución (RAL) nos indica claramente que más que ser técnicas que compiten entre sí, sincrotrones y fuentes de luz basadas en láseres son dispositivos complementarios. Cabe hacer notar que la fuente ASTRA-ARTEMISA está justo en la línea de la propuesta que se hizo (aproximadamente en el mismo tiempo que se hizo la propuesta para construir ARTEMISA) en la convocatoria para ideas de megaproyectos, dicha fuente ya ha sido financiada y está siendo construida en el Reino Unido.

Mediante el fenómeno de Generación de Armónicos Ópticos de Orden Superior (GAOOS) se puede convertir la radiación infrarroja del láser en radiación en el ultravioleta de vacío (o vacuum ultraviolet (VUV), cuyas longitudes de onda están en el intervalo de 100 a ~1 nm) con una eficiencia de aproximadamente  $10^{-6}$  –  $10^{-8}$  la cual parece muy pequeña, sin embargo, dadas las intensidades de la fuente de luz primaria (el láser) hay un número suficiente de fotones el VUV para realizar experimentos de espectroscopia tanto en fase gaseosa como en fases sólida. De hecho, el flujo de fotones proveniente de una línea de VUV generada por GAOOS puede rivalizar, y en términos de brillantez, superar al producido por un sincrotrón, de aquí que en varios lugares del mundo se hallen en operación (y se estén construyendo) fuentes de este tipo, tanto para investigación en ciencia básica como para aplicaciones en espectroscopia.

Para la comunidad de Ciencias de Materiales, Física, Química e incluso Biología ha sido una constante el deseo de tener acceso cómodo y relativamente barato a una fuente de luz en el ultravioleta de vacío o rayos x, típicamente esto significa tener acceso a un sincrotrón. Una alternativa muy elegante y tan flexible como un sincrotrón (en ciertos intervalos de longitud de onda) es una fuente de luz basada en láseres de pulsos ultracortos y ultraintensos. Por medio de técnicas asociadas a la óptica no lineal el haz de salida de estos láseres (que está en el infrarrojo cercano) puede ser convertida a radiación en el infrarrojo medio, en el visible y ultravioleta, tanto UV cercano como VUV, con un flujo de fotones suficiente para realizar espectroscopia ultra-rápida y también crecimiento, caracterización y tratamiento de materiales.

Además, la generación y producción de pulsos de láser muy cortos ( $< 50 \times 10^{-15}$  s), ultraintensos y ultrapotentes (potencias pico  $> 1$  PW) ha permitido la realización de experimentos que hasta hace unos cuantos años estaban reservados para aceleradores de partículas. En la actualidad es posible acelerar electrones y protones por medio de un pulso de luz corto y muy potente de láser a energías del orden de 0.5 GeV para electrones y de

alrededor de 1.5 MeV para protones. Ciertamente estos valores están muy por debajo de las energías a las cuales los mas grandes aceleradores actuales pueden impulsar a partículas, a pesar de esto la tecnología de estos sistemas ha evolucionado muy rápidamente, ciertamente solo transcurrieron 12 años entre las primeras propuestas de aceleración de partículas con láser y el llegar a aceleraciones de electrones hasta energías de cientos de MeV's, y la comunidad de dedicada a estos temas prevé la posibilidad de construir sistemas de aceleradores de partículas capaces de rivalizar con sincrotrones usados en ciencias de materiales. De hecho en la literatura ya hay diseños de aceleradores de protones, basados en láseres de pulsos cortos, para ser usados en terapias contra el cáncer. Aunque como ya se mencionó, la energías asequibles con este tipo de sistemas es muy baja comparada con los grandes aceleradores actuales, es concebible que el mediano-largo plazo estos sistemas pueden rivalizar con aceleradores gigantes a una fracción del costo de estos.

Como ya se refirió anteriormente, cuando la fuente de luz es de potencias pico mas modestas ( $\approx 1-100$  TW), y por medio de interacciones no lineales con un medio en estado gaseoso, se puede producir radiación de longitudes de onda con energías de 10 a 100 eV, justo en el intervalo de energía de muchas fuentes de luz basadas en sincrotrón y por tanto susceptibles a usarse en estudios de ciencia de materiales y/o estudios biológicos.

Otra tecnología ligada a láseres de pulsos cortos (y no necesariamente de muy alta potencia) son los llamados peines ópticos, dichos sistemas permiten el comparar rutinariamente frecuencias con precisiones del orden de  $10^{-12}$  y en casos excepcionales de  $10^{-14}$ . Si un sistema de peine óptico es usado en conjunción con un oscilador (reloj) muy estable es posible medir propiedades atómicas con precisiones extremadamente altas. Varios autores han sugerido este tipo de mediciones muy precisas para poner cotas a efectos a baja energía en predicciones del Modelo Estándar (Bezrukov et al 2007, Jungman, 2006) usando átomos o iones atrapados en conjunción con enfriamiento por láser, peines ópticos y/o COLDTRIMS, (cold target recoil ion momentum spectroscopy). De hecho hay varios reportes experimentales en donde se han hecho ya este tipo de mediciones (Liénard et al 2006, Gorelov et al 2005). Las técnicas mencionadas de atrapamiento de átomos e iones, enfriamiento por láser, peines ópticos y coldtrims fueron todas mencionadas (además de la fuente de luz basada en pulsos cortos) como temas que ya se realizan experimentalmente en México o justamente se pretendían estimular y/o consolidar con el megaproyecto de fuente de luz.

Adicionalmente a lo anterior, las fuentes de luz de pulsos cortos y/o de alta potencia ofrecen la posibilidad del tratamiento de materiales y espectroscopia ultrarrápida (que en los últimos años ha llegado a resoluciones de subfemtosegundos) que por si mismas justifican su construcción y operación.

Baste hacer notar que de 1997 a la fecha, 4 premios Nóbel (1 en química y 3 en Física) han sido otorgados a los métodos asociados y tecnologías desarrolladas por estudios de óptica cuántica básicos y aplicados, fuentes de luz de pulsos cortos y/o ultraintensos, enfriamiento por láser, atrapamiento de iones o átomos neutros y mediciones de muy alta precisión. Además, como en cualquier otro campo científico, los desarrollos técnicos asociados a estos temas pueden pasar a productos de la vida diaria, solo baste mencionar el GPS

(Global Positioning System), que requiere, entre otras tecnologías, mediciones de alta precisión y relojes muy precisos.

En el País ya existen actividades experimentales relacionadas con átomos fríos (CENAM y ICN-UNAM), mediciones de alta precisión (CENAM), tecnología de pulsos láser (fs y ns) para espectroscopia así como caracterización, crecimiento y modificación de materiales (CICESE, UAM-I, CECADET-UNAM), coldtrims (ICF-UNAM), dichos grupos se encuentra integrados (como parte de la propuesta de megaproyecto de Fuente de luz) a esta red. Aprovechando los proyectos de Ciencia Básica de CONACYT se espera que la UAM-I se empiecen actividades en relación a iones atrapados y enfriamiento por láser. En el primer año de esta red se pretende reforzar estas actividades con las siguientes acciones:

- a) La compra de un láser de femtosegundos con pulsos menores a 20 fs, para la consolidación de actividades en espectroscopia ultrarrápida y el inicio de actividades para construir localmente un amplificador multipasos aprovechando la experiencia del CICESE en esta campo. Cabe hacer notar que la construcción del amplificador multipasos requiere de presupuesto para la compra de sus elementos constituyentes, sin embargo el diseño se puede realizar a espera de conseguir recursos para la compra del equipo correspondiente. El láser será usado en este primer año primordialmente entrenar recursos humanos en el uso y medición temporal de estos pulsos así como para espectroscopia ultrarrápida no descartándose cualquier otro uso que provenga de propuestas de los miembros de la red.
- b) La construcción de una fuente de armónicos de orden superior con pulsos de nanosegundos. Los modelos de generación de armónicos de orden superior (GAOS) predicen que este fenómeno es mas eficiente al usar pulsos muy cortos 30 fs o menores, y si bien esta predicción ha sido comprobada muchas veces, los primeros estudios de GAOS se realizaron usando pulsos de ns. En la UAM-I poseemos un láser muy similar a los usados en esas primeras investigaciones y, por otra parte, el ICN-UNAM, posee un antiguo monocromador para VUV, con este equipo y una cámara de alto vacío ( $10^{-8}$  mbar) podemos construir una fuente de armónicos con las construidas hacia el final de los años 1980's. Si bien una fuente como esta no nos hará llegar en este momento al estado del arte en este tópico si nos permitiría tener fotones (según nuestras primeras estimaciones) con un intervalo de energía de 10 a 35 (tal vez 40) eV, en pulsos de nanosegundos y con luminosidad suficiente para realizar espectroscopia. Una fuente de nanosegundos nos permitiría entrenar estudiantes graduados y/o posdoctorados en esta tecnología además de usar esta fuente para experimentos espectroscópicos. NO se pretende que esta fuente sustituya a nuestra propuesta de una basada en láseres de pulsos muy cortos, simplemente es una alternativa que es posible construir en este momento, con una inversión prácticamente nula y que puede estar lista en un periodo relativamente corto (10 meses a un año). Como ya se dijo, esta fuente no nos permitiría estar en el estado del arte de este campo, no podemos, por ejemplo, pensar en seguir reacciones químicas en tiempo real, o en producir pulsos de attosegundos, sin embargo, servirá para preparar recursos humanos y realizar experimentos espectroscópicos donde tiempo resueltos de femtosegundos no sean esenciales.
- c) Se intentara integrar (en la medida de lo posible) acciones de mas largo alcance entre los diversos grupos que integran la red, para analizar las posibilidades de empezar líneas de investigación para desarrollar la tecnología y recursos humanos



con miras a implementar experimentos de alta precisión para pruebas del Modelo Standard y sus consecuencias a bajas energías.

- d) Una fuente de luz avanzada basada en láseres de pulsos cortos tendría un gran impacto inmediato en las áreas de espectroscopia de tiempo resuelto, creación y caracterización de nuevos materiales, y en el mediano-largo plazo, el realizar experimentos con resoluciones de attosegundos así como la posibilidad de realizar mediciones muy precisas de propiedades y fenómenos físicos fundamentales. Una de las primeras acciones de la sería el apoyar la construcción de la misma. Dado los niveles de financiamiento actuales, se empezaría esta construcción de una forma modular, es decir, adquiriendo poco a poco diversas partes de un sistema láser de pulsos cortos y amplificados. El costo del láser “núcleo” (oscilador) de un sistema como este es de  $\approx 1.5$  millones de pesos, de los cuales se buscará apoyo económico de las instituciones participantes en el orden de 500,000 y el millón restante sería contribución de la red. Con esta acción se pretende comenzar el entrenamiento y formación de estudiantes para la creación, medición y uso de pulsos de luz muy cortos para aplicaciones -en esta primera etapa- de espectroscopia a tiempo resuelto. Se empezará a diseñar un amplificador para este sistema (aunque en este momento se carecen de los recursos para construirlo) y se buscará financiamiento de fuentes alternas para la construcción no solo de un amplificador sino para el total de la fuente de luz.

## **Rayos Cósmicos**

El estudio observacional de los rayos cósmicos, al igual que los rayos  $\gamma$  se realiza tanto con instrumentos en órbita como con arreglos de detectores y experimentos en Tierra. Aunque la atmósfera absorbe partículas y fotones de altas energías, requiriendo, en principio, el empleo de detectores en el espacio, las partículas de mayor energías tienen un efecto en la atmósfera detectable desde la superficie de la Tierra. La división entre los dos regímenes ocurre a energías del orden de TeV, por encima de donde los flujos de partículas son demasiado bajos para observatorios espaciales, acotados en sus dimensiones por cuestiones prácticas. La observación de rayos cósmicos o rayos  $\gamma$  desde la Tierra se basa en la detección y caracterización de cascadas de partículas secundarias atmosféricas, ya sea a través de la medición de las partículas secundarias que llegan a la superficie por medio de detectores sólidos o empleando tanques Cherenkov de agua, o bien, con detectores de fluorescencia, los cuales emplean detectores ópticos de luz para medir la emisión fluorescente de moléculas de nitrógeno excitadas por el paso de una partícula muy energética.

Los experimento en el espacio detectan directamente las partículas y se enfocan generalmente a mediciones de la composición de los rayos cósmicos, de antipartículas y más recientemente a la búsqueda directa de partículas relacionadas con materia oscura. Investigadores del Instituto de Física de la UNAM han participado proporcionando instrumentación en experimentos espaciales, concretamente dentro del instrumento AMS (“Alpha Magnetic Spectrometer”) enfocado a la búsqueda de antimateria. Este mismo grupo forma parte de la colaboración CREAM que busca estudiar rayos cósmicos con

energías inferiores o hasta la "rodilla" ( $5 \times 10^{14}$  eV) empleando globos aerostáticos capaces de realizar vuelos de muy larga duración alrededor del polo Sur.

Como se ha indicado en la sección acerca del Contexto Internacional, la frontera actual en este campo está dada por el Observatorio Pierre Auger, el cual combina un gigantesco arreglo de superficie de  $3000 \text{ km}^2$  con cuatro detectores de fluorescencia ubicados en la periferia del arreglo y mirando hacia adentro de éste. México participa de manera muy activa en el OA, y entre sus contribuciones, podemos destacar la de los detectores Cherenkov de agua y el diseño novedoso para las cámaras de los detectores de fluorescencia. Asimismo, integrantes del grupo mexicano están colaborando en la implementación de AMIGA, que es una de la ampliaciones que se realizarán en el sitio Sur del OA.

Un aspecto esencial en el diseño de este experimento es la caracterización de la contaminación electromagnética de la señal registrada por los detectores de muones. Con este fin, se instalará en el sitio del Observatorio un telescopio de muones, conocido por la sigla de BATATA. Más allá de su aplicación como prototipo de AMIGA, este experimento tiene relevancia por sí mismo, ya que permitirá llevar a cabo, por lo menos, dos mediciones originales en el área: (i) determinar las funciones de distribución angulares de las componentes muónica y electromagnética de los chubascos a nivel del suelo y (ii) caracterizar de manera cuantitativa la propagación de electrones, fotones y muones relativistas en la roca y su efecto en detectores subterráneos. BATATA consta de tres planos x-y de centelladores que serán enterrados a diferentes profundidades. Los contenedores que resguardan a los detectores deben sobrevivir en condiciones extremas de humedad y salinidad por lo menos por 5 años, protegiendo adecuadamente la electrónica de "front-end", las fibras ópticas y los acoplamientos ópticos. Esto hace que deban cumplir requisitos estrictos de robustez mecánica, impermeabilidad al agua, resistencia a la sal, blindaje a la luz, estabilidad química, etc. Todo esto en un tamaño considerable (aproximadamente  $9 \text{ m}^2$ ). Un contenedor con estas características no existe en el mercado y ha debido ser desarrollado en forma específica para el telescopio. Como una de las acciones de arranque de la red estamos proponiendo que se financie, al menos parcialmente, la fabricación de estos contenedores y la instalación del telescopio en el sitio asignado dentro del arreglo de superficie del OA.

El grupo de rayos cósmicos de la BUAP ha empleado la experiencia adquirida en el desarrollo del OA en la instalación de detectores de superficie y un detector de fluorescencia en el volcán Sierra Negra y en las faldas del Citlaltepetl. Este es el primer arreglo en funcionamiento de LAGO, un observatorio Panamericano de rayos cósmicos.

Existen ejemplos de usos prácticos de mediciones de rayos cósmicos, como la caracterización de estructuras masivas, propuesto e implementado originalmente por Luis Álvarez en las pirámides de Egipto. En México el grupo del IFUNAM ha ubicado un detector de muones para la búsqueda de cámaras ocultas dentro de la pirámide del Sol en Teotihuacán. El principio reside en la medición de flujos de muones para caracterizar la cantidad de materia en diferentes direcciones. Esta técnica ha sido estudiada en Japón para investigar la estructura interna de volcanes, en lo que se podría denominar "tomografía volcánica". La propuesta original del observatorio HAWC contempla como un proyecto

anexo la instalación de un detector de muones para medir la estructura del Citlaltepctl, del cual se desconocen las propiedades de la cámara magnética.

Por último, caben mencionarse iniciativas espaciales en la física de astropartículas como, por ejemplo, JEM-EUSO y TUS, en cuyo planeamiento ya están involucrados grupos mexicanos, los cuales se verían beneficiados del equipamiento de laboratorios para desarrollo y construcción de detectores con certificación espacial, garantizando la inserción de México en esta nueva frontera científica y tecnológica. En el contexto de JEM-EUSO, se comprobará la superficie focal del detector en colaboración con el Instituto RIKEN de Japón, mediante la construcción de un simulador físico, opto-mecánico, de chubascos extensos para caracterización en laboratorio. Esta tarea contará con el apoyo del Laboratorio de Detectores del ICN-UNAM, el cual ha desempeñado un importante papel en el impulso de la física experimental de altas energías en la UNAM, contribuyendo significativamente al desarrollo de alguno de los detectores antes descritos, como es el caso de BATATA y ACORDE. Un elemento importante para el fortalecimiento de este Laboratorio es el de contar con la capacidad para producir electrónica de alto nivel. Como un primer paso en esa dirección se plantea la adquisición de un instrumento para la creación de circuitos impresos. Esto aumentaría considerablemente la velocidad de producción y disminuiría los costos, que resultan muy elevados cuando las pruebas de circuitos se hacen con un único ejemplar.

### **Astronomía de Rayos Gamma**

La astronomía de rayos gamma nos permite estudiar de manera directa el origen de los rayos cósmicos. Mientras que las partículas cargadas viajan en trayectorias erráticas y pierden la memoria de su fuente, los rayos  $\gamma$  viajan de manera rectilínea y apuntan directamente al objeto que los produce. Los rayos  $\gamma$  de energías bajas (algunos MeV) y medianas (cientos de MeV hasta decenas de GeV) se estudian con telescopios espaciales, mientras que fotones con energías superiores a 30 GeV son estudiados desde Tierra.

Durante la década de los 1990s el Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) mapeo la bóveda celeste empleando dos de sus cuatro telescopios: COMPTEL en rayos  $\gamma$  de baja energía, 0.7-30 MeV, y EGRET, de 30 MeV a 30 GeV, detectando incluso algunos fotones hasta 100 GeV. EGRET caracterizó en detalle la emisión difusa de la Vía Láctea, el fondo de radiación  $\gamma$  extragaláctico, y catalogó 271 fuentes celestes emisoras de fotones con energías por encima de 100 MeV. Dos tipos de fuentes, uno en la Galaxia y otro extragaláctico, fueron claramente identificados: cuasares con fuerte emisión en radio, frecuentemente llamados "blazares", fueron observados hasta corrimientos al rojo  $z \geq 3$ ; por otro lado, pulsares de nuestra galaxia fueron identificados inequívocamente gracias a la presencia de pulsaciones rápidas y coherentes. A estos objetos se pueden agregar las detecciones de una galaxia normal, la Nube Mayor de Magallanes, una ráfaga solar y alrededor de seis destellos de rayos  $\gamma$  (GRBs, por Gamma Ray Burst). Sin embargo, la mayoría de las fuentes del catálogo de EGRET son objetos sin una identificación convincente, a pesar de esfuerzos por encontrar a sus contrapartes en distintas bandas del espectro electromagnético, trabajo observacional en el que han participado astrónomos

mexicanos. Las bases de datos del CGRO son públicas y han sido empleadas por científicos de la comunidad mexicana.

En la actualidad las observaciones en órbita han retomado una actividad vigorosa gracias al lanzamiento de GLAST el 11 de junio de 2008, recientemente rebautizado Fermi  $\gamma$ -Ray Space Telescope durante la presentación de su primera luz. Fermi tiene una área de detección 10 veces superior a la de EGRET y hace una observación completa de la bóveda celeste cada 3 horas. Grupos de astrónomos mexicanos participan ya en el monitoreo de fuentes prioritarias de Fermi desde los observatorios de San Pedro Mártir y Cananea, con la perspectiva de aportar en un futuro cercano observaciones del Gran Telescopio Milimétrico y más adelante del observatorio HAWC. Los datos de Fermi se harán públicos a partir de su segundo año de operaciones, siendo esta una oportunidad para el estudio compartido de un mayor número de poblaciones de objetos emisores de fotones de altas energías.

La astronomía de rayos gamma tiene una importante vertiente en el estudio de fuentes de muy alta energía mediante observatorios en Tierra, tanto de tipo Cherenkov atmosférico, como mediante arreglos de superficie con la capacidad de separar cascadas atmosféricas originadas por fotones o hadrones. Los telescopios Cherenkov atmosféricos pueden observar objetos celestes individuales detectando la luz Cherenkov que emiten partículas cargadas secundarias en el aire. Estos telescopios logran una mejor discriminación de hadrones y resolución angular trabajando en pares o pequeños arreglos, de manera a tener una visión estereoscópica de las cascadas atmosféricas. Los principales observatorios de este tipo son HESS, operado en Sudáfrica por un consorcio de instituciones Europeas, MAGIC, un arreglo de dos antenas de 17 metros de diámetro en las Islas Canarias operado por una segunda colaboración Europea, y VERITAS, un arreglo de cuatro telescopios de 11 metros instalado en Arizona por una colaboración estadounidense. Estos arreglos han realizado estudios de blazares cercanos, en particular objetos tipo Bl Lac, mapear fuentes difusas en nuestra galaxia e incluso realizar censos de porciones limitadas del cielo. Estudiando las perspectivas a futuro, tanto los grupos Europeos como el Estadounidense han llegado a la conclusión de que para lograr una mejora significativa en las capacidades de estos observatorios es necesario crear arreglos de telescopios Cherenkov ocupando dimensiones mucho mayores, dado lugar a la iniciativa Europea del observatorio CTA (Cherenkov Telescope Array), incluida en el documento de ASPERA. Existe una propuesta similar Norteamericana llamada AGIS (por Advanced Gamma-ray Imaging System), el cual podría empezar a ser construido alrededor de 2012. Astrofísicos mexicanos han participado en el grupo de trabajo de AGIS y uno de los sitios propuestos para su instalación es San Pedro Mártir.

En años recientes, se ha demostrado la utilidad de los detectores Cherenkov de agua para construir un observatorio capaz de monitorear y mapear en cielo en rayos  $\gamma$  de alta energía. El observatorio Milagro fue construido y operado en Nuevo México entre 1999 y 2008 por una colaboración de una docena de instituciones estadounidenses. Milagro consistía de un estanque de 50  $\times$  80 metros por 8 metros de profundidad conteniendo agua e instrumentado con mas de 700 tubos fotomultiplicadores, rodeado de 175 tanques Cherenkov periféricos, situado a unos 2600 metros sobre el nivel del mar. El estanque central permitía muestrear detalladamente la distribución espacial del frente de la cascada midiendo la emisión

Cherenkov de las partículas incidentes en el agua. Los tanques periféricos servían para un muestreo más extendido y estimar la curvatura del frente de partículas, necesario para una resolución angular óptima. Milagro observaba el cielo con un campo de visión instantáneo dado por un cono de 40° de apertura, sin interrupciones debidas al ciclo diurno o a mal clima. Al transitar diariamente el cielo sobre su cenit Milagro tenía una exposición ligera de poco más de la mitad de cielo, la cual se fue profundizando con los años. Como resultado Milagro logró un mapa de la mitad de la bóveda celeste con una exposición homogénea ideal para el estudio de fuentes extensas. Estos datos han mostrado la presencia de varias fuentes Galácticas, en particular una sobre-emisión en la región del Cisne y MGRO 1908+06. Milagro también demostró el potencial de los observatorios Cherenkov de agua para el monitoreo de fuentes activas, al proporcionar mediciones diarias de Mrk 421 a lo largo de ocho años.

Los resultados y la experiencia de Milagro condujeron a la propuesta de HAWC, el High Altitude Water Cherenkov, capaz de lograr una sensibilidad quince veces más profunda que su antecesor. Para ello HAWC debía constar de un detector de agua de 150 metros de lado y 4 metros de profundidad dispuesto en 900 celdas ópticamente aisladas situado a más de 4000 metros de altura. Se buscaron sitios potenciales en China, Bolivia y México, concretamente en Sierra Negra cerca del sitio del Gran Telescopio Milimétrico (GTM). A pesar de contar con excelentes sitios, incluso a 4800 metros de altitud, la instalación de HAWC en Bolivia fue descartada por la falta de un grupo científico suficientemente grande y la decisión del sitio quedó entre el Tibet en China y Sierra Negra en México. Si bien nos favorecieron aspectos como la mejor ubicación del sitio mexicano y la cercanía con los Estados Unidos, la existencia de un grupo interesado y de competencia demostrada fue determinante para lograr en julio de 2007 la sede de HAWC y la conformación de la colaboración entre México y Estados Unidos. HAWC, presentado dentro de la convocatoria de Ideas de Megaproyectos, será capaz de mapear dos tercios del cielo y detectar flujos equivalentes al del Cangrejo en un solo tránsito. Situado a 19° de latitud tendrá incluso acceso restringido al centro de la Galaxia. La sinergia con observatorios como Fermi y IceCube es inmediata, y su repercusión en el ámbito científico de nuestro país deberá cubrir desde la instrumentación hasta la física fundamental.

Existe de manera conceptual una tercera generación de detectores Cherenkov de agua, como el "super-HAWC" (sHAWC), que cubre 90 000 m<sup>2</sup>, un área cuatro veces superior a la de HAWC. El grupo del Tibet está estudiando la posibilidad de solicitar 100 millones de dólares a la Academia China de Ciencias para el desarrollo de un detector de estas dimensiones en el Tibet.

## **Líneas de Acción**

Las líneas de acción tienen por objeto impulsar las relaciones de colaboración de los diversos grupos científicos y tecnológicos, fomentar los mecanismos de comunicación e intercambio de información, diagnosticar necesidades y oportunidades, promover la consolidación de la infraestructura de investigación y apoyar la formación de nuevos

recursos humanos. Todas estas acciones están enfocadas a articular los esfuerzos nacionales para lograr sinergia y aumentar la eficiencia en el aprovechamiento de los recursos humanos y materiales, así como potenciar su desarrollo y fortalecimiento.

### **Líneas de Acción Generales**

En términos generales, las actividades de la red estarán enfocada a la ejecución de las acciones siguientes:

- 1) Fomentar el intercambio académico entre los integrantes de la red, promoviendo el desarrollo de investigaciones multidisciplinarias y el uso más eficiente de los recursos materiales de las distintas instituciones participantes.
- 2) Apoya la difusión de los resultados de los diversos grupos que integran la red a través de publicaciones y otros medios escritos y electrónicos de comunicación.
- 3) Colaborar con la SMF, la AMC y otras organizaciones en la promoción de las actividades científicas y educativas.
- 4) Acrecentar y mejorar la difusión, intercambio y actualización de la información.
- 5) Promover la organización de simposios, escuelas, talleres y otros tipos de reuniones académicas.
- 6) Organizar actividades que conserven activa la red y la vigoricen.
- 7) Brindar apoyo con pasajes y viáticos para movilidad, por ejemplo, para trabajo de campo, asistencia a congresos, visitas de trabajo, entre otros.
- 8) Identificar la capacidad instalada nacional y determinar sus necesidades.
- 9) Dar difusión amplia de las opciones de financiamiento para proyectos y de las distintas convocatorias.
- 10) Ayudar en el registro de propiedad intelectual.
- 11) Establecer programas de becas para estudiantes y otros mecanismos de fomento de formación de recursos humanos.
- 12) Fomentar actividades de divulgación y difusión.

### **Acciones específicas**

En el marco de las líneas de acción generales planteadas por la red, se han determinado las siguientes acciones específicas para el primer año de funcionamiento de la misma, las cuales resultan de interés para el Comité Técnico-Académico:

- 1) Editar y publicar un documento acerca del estado del arte, retos y perspectivas que sirva como base para la elaboración del proyecto nacional. Con tal propósito, el Comité

Técnico-Académico conformará un grupo de trabajo, el cual estará integrado por expertos en la temática, quienes lo auxiliarán en la preparación de dicho documento.

2) Con base al catálogo de la SMF y otras fuentes de información, elaborar y mantener actualizado un padrón de investigadores y estudiantes activos en el campo.

3) Establecer un programa de becas, que incluya el apoyo a posdocs y estudiantes de posgrado.

4) Establecer un programa de intercambio académico de investigadores y estudiantes miembros de la red, promoviendo estancias cortas.

5) Organizar un congreso nacional de la red.

6) Apoyar la realización de eventos más pequeños. En los casos, que así corresponda se procurará coordinar esfuerzo con las respectivas divisiones de la SMF y otras organizaciones académicas, como la AMC.

5) Identificar los laboratorios del país, relacionados con la temática de la red, que se encuentre en funcionamiento o en proceso de instalación. Hacer un diagnóstico de las necesidades comunes y de cada uno en particular, a fin de mejorar la infraestructura con que se cuenta para la realización de los experimentos.

6) Apoyar gastos de pasajes y viáticos de sus integrantes, para reuniones, congresos, visitas de trabajo nacionales o internacionales.

7) Realizar reuniones bimestrales del comité y dos reuniones anuales de los miembros de la red (la primera se llevaría a cabo junto con el congreso nacional).

8) Promover que los desarrollos tecnológicos asociados a la red den lugar a registros de propiedad intelectual.

9) Crear un portal de Internet que contenga la información siguiente: directorio, estructura, miembros y grupos de la red; infraestructura; documentos (plan, manual de operación, lineamientos); ligas a páginas nacionales e internacionales de relevancia en el tema; información de congresos, convocatorias, noticias; foro de discusión. Este portal deberá disponer tanto de una parte pública y otra de acceso restringido.

10) Determinar y cubrir las necesidades de apoyo administrativo para el buen funcionamiento de la red. Apoyar los servicios de consultorías en áreas técnicas y de ingeniería.

11) Apoyar el trabajo de campo en lo relativo, por ejemplo, a la instalación, tomas de datos, diagnósticos, etcétera, de experimentos asociados a la red e investigaciones relacionadas.

12) Elaborar el manual interno de operación.

## **Congreso Nacional**

En una primera instancia hemos contemplado un congreso con una asistencia de alrededor de 100 a 150 personas y una duración de tres días, a realizarse fines de enero o principios de febrero, preferentemente de miércoles a viernes. Como sedes posibles estamos considerando los siguientes lugares: Cancún, Oaxaca, Guanajuato y Cocoyoc. Se hará un anuncio del congreso entre los miembros que se hayan registrado en la red y los participantes listados en este documento. En este congreso se hará una presentación formal de la red a la comunidad y se propiciará un amplio intercambio de ideas a fin de formular las vías de acción más idóneas para la consecución de los objetivos de la red. Con este propósito se establecerán mesas de trabajo relacionadas con las principales líneas de investigación, procurándose que las mismas estén coordinadas por investigadores con un reconocido liderazgo. A fin de garantizar la participación de dichos investigadores el Comité Técnico Académico se encargará de hacerles llegar la invitación correspondiente. En el transcurso del congreso se constituirá un grupo de trabajo que estará integrado por expertos en la temática correspondiente, el cual prestará su ayuda y asesoría al Comité en la elaboración de un diagnóstico del estado del arte en el área. El grupo de trabajo podría integrarse por algunos de los invitados, entre los cuales no excluimos a miembros de la comunidad internacional. Existe la propuesta, todavía bajo consideración, de que las presentaciones se organicen en sesiones plenarias matutinas, complementadas por sesiones paralelas vespertinas. Si el presupuesto lo permite, habrá apoyos parciales para los asistentes a fin de garantizar una adecuada participación.

## **Impacto Social, Económico y Tecnológico**

Si bien su objeto de estudio pertenece al ámbito de la ciencia básica, aparte de su importancia científica intrínseca y de la largo plazo, la física de altas energías ha generado innovaciones tecnológicas que han significado un gran beneficio para otras disciplinas científicas y para la sociedad en su conjunto. De esta manera ha probado ser un motor para el desarrollo tecnológico de los países involucrados en los experimentos que en ella se realizan. A fin de resaltar la importancia del área en este contexto, podemos enumerar algunas de sus características: (i) las investigaciones se ubican en la frontera del conocimiento, (ii) los recursos humanos y financieros requeridos implican un esfuerzo nacional de largo plazo, junto con el establecimiento de colaboraciones multinacionales y (iii) los complejos instrumentos empleados no pueden adquirirse en el mercado y deben ser diseñados y fabricados de manera específica, lo cual es un detonante para la creación de nuevas tecnologías. Esta última característica abre la puerta a empresas nacionales para su cooperación con científicos en la constitución de equipos especializados. La subsiguiente derrama tecnológica fomenta la creación de grupos de trabajo multidisciplinarios y de pequeñas empresas de alta tecnología que pueden alcanzar proyección internacional. Así, la física de altas energías combina muchos elementos que son conducentes al desarrollo del país y su visibilidad en el concierto internacional.

Para ilustrar la creciente y extensa lista de aplicaciones prácticas en medicina, industria, computación, que han tenido su origen en la física de altas energías, presentamos a continuación un conjunto de ejemplos de notoria importancia



*Terapia del cáncer.* Hoy en día, un gran número de centros médicos usan aceleradores que producen rayos X, protones, neutrones o iones pesados para el diagnóstico y tratamiento de esta enfermedad. Se estima que existen unos 7000 aceleradores lineales de partículas con fines médicos operando alrededor del mundo, los cuales han dado tratamiento a más de 30 millones de pacientes.

*Instrumentación para diagnóstico.* Detectores inicialmente diseñados para experimentos de física de partículas, han encontrado una generalizada aplicación en medicina, como es el caso de la tomografía de emisión de positrones (PET).

*Fuentes de Luz Sincrotrón.* La dispersión por cristales de proteínas de la luz provenientes de aceleradores de sincrotrón es una técnica empleadas en las ciencias biomédicas para descifrar la estructura de las moléculas de tales sustancias, lo cual posibilita el desarrollo de medicamentos más efectivos. Estas poderosas fuentes de luz, las más intensas en la Tierra, también son empleadas para la visualización en tiempo real de reacciones químicas y procesos bioquímicos, en las ciencias de materiales, la investigación histórica y la restauración de obras de arte.

*World Wide Web.* La www fue desarrollada en CERN a fin de que equipos numerosos de físicos de altas energías, dispersos en universidades y laboratorios en diversas partes del planeta, tuvieran una herramienta para comunicarse rápida y eficazmente. Hoy en día, existen más de 150 millones de sitios registrados en la red. En la historia, son pocos los avances tecnológicos que han tenido una influencia tan marcada en la economía global y las interacciones sociales.

*Grid.* Los experimentos actuales en física de altas energías están empujando el aumento en la capacidad de esta nueva herramienta de cómputo, que permite manejar y procesar una enorme cantidad de datos combinando las capacidades de cientos de miles de computadoras individuales. Medicina y finanzas son otros campos que también generan enormes cantidades de datos y se beneficiarán de esta tecnología computacional de punta.

*Superconductores.* El tamaño de los grandes aceleradores de Fermilab y CERN ha vuelto a la producción de magnetos superconductores un proceso industrial efectivo. Para el diagnóstico médico, el campo magnético super intenso utilizado en Imagen por Resonancia Magnética (MRI) es generado con un superconductor. Líneas de transmisión basados en esta tecnología son una alternativa tecnológica en desarrollo a fin de satisfacer las necesidades de consumo eléctrico en grandes urbes.

En adición a sus contribuciones científicas, la red de FAE tendrá un impacto considerable en diversos aspectos sociales, económicos y tecnológicos. Entre ellos, podemos mencionar los siguientes:

- a. Se contribuirá substantivamente a la formación de recursos humanos de alto nivel, tanto en el ámbito técnico como en el científico, mediante estancias de estudiantes de posgrado y técnicos académicos en laboratorios doctorales, estancias posdoctorales, etc. En este sentido, cabe destacar que la realización de escuelas y otros eventos académicos se verá facilitada al contar el Laboratorio con un centro de convenciones.

- b. Multidisciplinaria: la red proveerá una excelente oportunidad para que la colaboración con investigadores de otras áreas de la física y las ingeniería.
- c. Se promoverá la participación de la industria nacional, privada y estatal, tanto en la etapa inicial de mejora de las capacidades e instalaciones de los diversos laboratorios participantes, así como en la provisión de servicios especializados y la eventual producción de componentes de alta tecnología.
- d. Ampliación a escala Nacional de la infraestructura de cómputo y redes basada en la tecnología GRID, que ya viene siendo implementada por algunos de los grupos involucrados en esta red.
- e. La demanda de servicios y productos tecnológicos, en un ambiente científico y de ingeniería de alto desempeño, favorecerá no sólo la transferencia de tecnología a la sociedad civil, vía patentes e intervención de las industrias nacionales, sino también el desarrollo de pequeñas empresas altamente especializadas, como resultado de la iniciativa de científicos y técnicos con espíritu emprendedor.
- f. El carácter internacional de algunos de los experimentos que se realizarán por grupos ligados a la red, traerá consigo un aumento de la notoriedad del país y la inversión de recursos del extranjero a nivel regional y nacional.

Cabe señalar, que existe un antecedente en nuestro país donde el impacto social de un proyecto de ciencia básica se manifestó de manera clara: se trata del proyecto "High Energy Physics in Mexico: Searching for new physics at the LHC-CERN", el cual fue apoyado por el Conacyt/Banco Mundial con la cantidad de \$1.5 millones de dólares, dentro de la Iniciativa Científica del Milenio. En este caso, las metas científicas comprendían el desarrollo de instrumentación y detectores a ser utilizados por las colaboraciones internacionales ALICE y CMS. Como un aspecto adicional, se consideró la posibilidad de aplicar varias técnicas y desarrollos de instrumentación de la física de altas energías en el área de la física médica. Esta iniciativa ha resultado exitosa en nuestro medio y actualmente varios grupos nacionales (Cinvestav, BUAP, IFUG, UNAM) desarrollan proyectos de investigación en física médica de manera paralela a sus investigaciones en física de altas energías. Las técnicas y aplicaciones que están en proceso de desarrollo son: imagenología y detectores en medicina, procesamiento de señales magnéticas del corazón y del cerebro, física de radiaciones y dosimetría, radiografía por contraste de fase, aplicaciones de detectores de silicio en radiografía.

El Observatorio Auger es otro claro ejemplo de que la ciencia básica no está reñida con el desarrollo tecnológico y uno de los pocos casos en que la industria nacional ha sido capaz de producir en gran escala componentes esenciales para un instrumento que es lo más avanzado en su tipo a nivel mundial y está realizando descubrimientos científicos en la frontera del conocimiento. Las 1600 unidades que componen el detector de superficie del Observatorio están basadas en tanques de polietileno rotomoldeado. Estos tanques, de 3.6 m de diámetro y 1.6 m de altura, no son simples contenedores de agua: su tamaño es mayor que el usual, tienen una estructura de doble capa, son de una forma compleja que les da rigidez y resistencia y deben satisfacer severos requerimientos de calidad que garanticen una durabilidad superior a 20 años, en condiciones ambientales rigurosas. Después de un

cuidadoso estudio de factibilidad, el grupo mexicano concluyó que una de las compañías mexicanas líderes en la fabricación de este tipo de productos, Rotoplas, no sólo podía afrontar con éxito la manufactura de los tanques, sino que, al poseer una subsidiaria en Argentina, los costos de transportación al sitio del Observatorio se reducían enormemente. Los tanques han sido fabricados a partir de una resina de polietileno de alta densidad, de la mejor calidad que, al fundirse, es sumamente viscosa y no fluye de manera fácil y suave, requiriéndose un control cuidadoso en el proceso de moldeo y en la distribución de la temperatura para obtener un buen tanque. En estrecha colaboración con científicos e ingenieros del Observatorio, dicha compañía logró ajustar los parámetros de su método de fabricación (moldeo a flama abierta) a fin de satisfacer tales requerimientos. Paralelamente, la empresa mexicana desarrolló la habilidad para medir, mediante un calibre ultrasónico, el espesor de las paredes de cada tanque en 120 posiciones, mientras que, para comprobar la ausencia de defectos, emplea un preciso sistema de nivel electrónico con un láser rotatorio. De esta manera, Rotoplas fue seleccionada como la principal proveedora de tanques del Observatorio y fabricó 2/3 del total de 1600 unidades que ya han sido instaladas en el sitio. Tales tanques fueron financiados con apoyos provenientes, no sólo de México, sino también de otras naciones que integran la Colaboración Internacional. Además del beneficio económico que pueda haberle reportado, la compañía mejoró su capacidad en procesos de control y mediciones de control de calidad, así como su habilidad técnica para el moldeo de las resinas más avanzadas. Estas habilidades puede emplearlas para fabricar tanques industriales especiales y para moldear objetos con formas complejas, otorgándole una ventaja competitiva en el mercado.

## **Impacto en la Formación de Recursos Humanos**

En los países altamente desarrollados la física de partículas ha desempeñado un rol relevante en relación a la preparación de fuerza laboral altamente calificada. Así, por ejemplo, en Estados Unidos, sólo alrededor de la sexta parte de quienes realizan doctorados en el área continúan sus carreras a través de la investigación básica en física de partículas. El resto son ocupados en diversos sectores de la economía nacional, como informática, electrónica, comunicación, industria, defensa, instrumentación médica, biofísica, finanzas y otras actividades donde se requieran destrezas analíticas y técnicas, habilidad para trabajar en equipo en proyectos complejos, y capacidad para razonar creativamente para solucionar problemas específicos.

En México, el desarrollo de los grupos de investigación que existen en el país en el área de la física de partículas elementales y astropartículas se ha dado gracias a una intensa colaboración entre los grupos teóricos y experimentales. Mientras los grupos teóricos contribuyen al entrenamiento formal de los nuevos investigadores, los grupos experimentales se concentran en su capacitación técnica y experimental. Esta simbiosis ha conducido a un rápido crecimiento del número de físicos experimentales en estas áreas (actualmente son más de 30 investigadores activos, todos ellos con doctorado) y cuya competencia profesional en el medio internacional se pone en evidencia revisando las colaboraciones científicas en las que están involucrados y que se detallan en el apartado correspondiente.

Con la participación en experimentos en la frontera del conocimiento, a través de la red, en todo momento se promoverá la formación de recursos humanos altamente capacitados, con conocimientos sobre manejo de detectores de alta tecnología, electrónica rápida y de bajo ruido, computación y análisis de datos. Este personal obtendrán experiencia para el diseño y manejo de proyectos complejos y el trabajo dentro de grupos internacionales, así como conocimientos específicos sobre ciencia fundamental y tecnología. Será preciso que, no sólo estudiantes graduados, sino también personal técnico de distintas disciplinas perfeccionen su preparación académica y entrenamiento, capacitándose en el manejo de instrumental y técnicas avanzadas. Con este propósito, se asignarán apoyos económicos para la realización de estancias en laboratorios extranjeros de primer nivel, como es el caso del CERN y SuperKamiokande, entre otros.

La planta total de investigadores en nuestro país en las áreas de física de partículas y astropartículas (teoría, fenomenología y experimentación) incluye a 112 investigadores con doctorado, que participan en 10 programas de posgrado y atienden a un número aproximado de 150 estudiantes de posgrado (maestría y doctorado). La gran mayoría de ellos se han involucrado en la presente red, y su participación en las actividades de investigación que se desarrollarán en ella redundará de manera positiva en la formación de nuevos cuadros de investigadores, sobre todo en las universidades de aquellos Estados que tiene grupos incipientes de investigación en estas áreas. Esperamos que, mediante la participación creciente de la industria nacional en proyectos y actividades de la red, una buena parte de los recursos humanos que se capaciten en el área encuentren cabida en sector productivo y social.

## **Participantes**

La lista inicial de participantes de la Red de FAE ha sido determinada en base a los participantes registrados en los megaproyectos que le dieron origen. Hacemos notar que seguramente a esta lista se sumarán otros investigadores de los grupos consolidados en física altas energías que existen en el país.

*-- Benemérita Universidad Autónoma de Puebla --*

Humberto Salazar, Oscar Martínez, Arturo Fernández, Lorenzo Díaz, Alfonso Rosado, Cupatitzio Ramírez, José Barradas, Javier M. Hernández, Jaime Hernández, Mario Maya, Fernando Ramírez, Gilberto Tavares, Ibrahim Torres, Aurora Vargas, Sergio Vergara, César Alvarez, Mario Ivan Martinez

*-- Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico-UNAM --*

Mayo Villagrán Muñiz

*-- Centro de Investigación Científica y Educación Superior de Ensenada --*

Santiago Camacho López, Dr. Raul Rangel Rojo

-- *Centro de Investigaciones en Óptica* --

Marija Strojnik, Gonzalo Paez, Iouri Barmenkov

-- *Centro de Investigación y Estudios Avanzados, Unidad Zacatenco* --

Heriberto Castilla, Eduardo de la Cruz, Augusto García, Juan José Godina, Piotr Kielanowski, Gabriel López Castro, Ricardo López, Omar Miranda, Luís M. Montaña, Abdel Pérez, Miguel A. Pérez, Alberto Sánchez, Arnulfo Zepeda, Gerardo Herrera Juan José Alvarado Gil, Juan Barranco Monarca, L. G. Briebe, M. Carbajal, F. Castro, J. L. Leyva, H. Mercado, L. F. Rojas, R. E. Sanmiguel, L.A. Torres

-- *Centro de Investigación y Estudios Avanzados, Unidad Mérida* --

Antonio Bouzas, Guillermo Contreras, Francisco Larios, Virendra Gupta, Gabriel Sánchez, J. Mustre

-- *Centro Nacional de Metrología* --

José Mauricio López Romero

-- *ESFM - Instituto Politécnico Nacional* --

Albino Hernández, Rebeca Juárez, Alfonso Martínez, Alfonso Queijeiro, Juan M. Rivera

-- *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica* --

Alberto Carramiñana, Eduardo Mendoza, Guillermo Tenorio Tagle, Luís Carrasco, Sergey Silich, Daniel Rosa, Francisco Soto, Manuel Corona

-- *Instituto de Astronomía, Universidad Nacional Autónoma de México* --

María Magdalena González, Dany Page, William Lee, Déborah Dultzin, Érika Benítez, Vladimir Avila Reese, Sergio Mendoza, Marco Martos, Héctor Hernández Toledo, Octavio Valenzuela

-- *Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares* --

Juan Aspiazu, Eliud Moreno, Ghirardo Murillo, Rafael Policroniades, Armando Varela

-- *Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México* --

Gustavo Medina Tanco, Lukas Nellen, Juan Carlos D'Olivo, Alejandro Ayala, Roelof Bijker, Peter Hess, Guy Paic, Sarira Sahu, Miguel Socolovsky, Luís F. Urrutia, David Vergara, Federico Sanchez, Daniel Supanitsky, José I. Jiménez Mier, Eduardo Nahmad, Rafael Navarro, Enrique Patiño,

-- *Instituto de Ciencias Físicas-UNAM*--

Guillermo Hinojosa Aguirre, Santiago Camacho López, Antonio M. Juárez Reyes

-- *Instituto de Física, Universidad Nacional Autónoma de México* --

Axel de la Macorra, Jens Erler, Shahen Hacyan, Alfonso Mondragon, Myriam Mondragon, Matias Moreno, Rubén Alfaro, Arturo Menchaca, Ernesto Belmont, Andrés Sandoval, Arnulfo Martínez, Varlen Grabski, Genaro Toledo, Manuel Torres, Eduardo Andrade, Efraín Chavez Daniel Coello Quiela Curiel, Guillermo Espinoza, Francisco Favela, Roberto

Gleason, José I. Golzarri, Arcadio Huerta, Daniel Marín, María E. Ortiz, Penélope Rodríguez, Corina Solís

-- *Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México* --

José Valdés Galicia, Alejandro Lara, Rogelio Caballero, Carlos Canet Miquel, Arturo Iglesias Raymundo Martínez Serrano, Sara Franco

-- *Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México* --

Antoni Camprubí Cano

-- *Instituto de Física, Universidad de Guanajuato* --

David Delepine, Gerardo Moreno, Mauro Napsuciale, Luís Ureña, Marco Reyes, Edgar Casimiro, Julián Félix, José Luís Lucio, José Socorro, Victor Migenes. Luis A. Ureña, Miguel Sabido, Octavio Obregón

-- *Instituto de Física, Universidad Autónoma de San Luis Potosí* --

Jurgen Eigenfried, Ruben Flores, Mariana Kirchbach, Antonio Morelos, J. L. Arauz

-- *Instituto Mexicano del Petróleo* --

G. Domínguez Zacarias

-- *Servicios Industriales Peñoles S.A. de C.V.* --

Carlos Villeda (Distrito Minero de Guanajuato)

-- *Universidad Autónoma de Chiapas* --

César Álvarez Ochoa

-- *Universidad Autónoma de Sinaloa* --

Ildefonso León Monzón

-- *Universidad Autónoma de Zacatecas* --

Alejandro Gutiérrez Rodríguez, María de los Ángeles Hernández Ruiz, Fernando Mireles García. Leopoldo Leonardo Quirino Torres, Francisco Ramírez Sánchez

-- *Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo* --

Pedro Miranda, Kinardo Flores Castro

-- *Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa* --

José Luis Hernández Pozos, Roberto Alexander Katz, Nikola Batina, Ulises Caldiño García, Manuel Fernández Guasti, Emanuel Haro Poniatowski

-- *Universidad de Colima* --

Alfredo Aranda

-- *Universidad de la Ciudad de México* --  
E. Álvarez

-- *Universidad de Guadalajara* --

J. Campa Molina, J.C. Ibarra, J. J. Raygoza Panduro, S. Ortega Cisneros

-- *Universidad Iberoamericana* --

Salvador Carrillo, Fabiola Vázquez

-- *Universidad Juárez Autónoma de Tabasco* --

J. Bernal, A. Carbajal

-- *Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo* --

Luís Villaseñor, Francisco Siddhartha Guzmán, Umberto Cotti, Juan Carlos Arteaga, Hugo Márquez, Francisco Astorga, Adnan Bashir, Christian Schubert, Axel Weber, Victor Garduño, Nita Schubert

-- *Universidad Nacional Autónoma de México* --

A. Antillón, A. Hernández, E. Horjales, , A. Moreno, J. Miranda, A. Rodríguez,  
E. Rudino, M. Soriano García, A. Torres Larios, Katy Juarez, Eduardo González Partida

-- *Universidad de Guadalajara* --

Eduardo de la Fuente J. Campa Molina, J.C. Ibarra, J. J. Raygoza Panduro, S. Ortega Cisneros

-- *Universidad de Sonora* --

Carlos Calcano, Maria Elena Tejeda Yeomans

## Presupuesto General de la Red de FAE, Año 2009

Rubro presupuestal	Porcentaje	Notas
Programa de becarios	10%	2 posdoc + 5 doctorado
Programa intercambio académico	14%	
Eventos y talleres	7%	Incluye 4% del congreso
Acciones de interés del comité	30%	Ver detalle en la tabla siguiente
Acciones de arranque	10%	Ver detalle en el texto
Pasajes y viáticos	15%	
Reuniones de la red	2%	Comité y toda la red
Servicios profesionales y apoyo consultivo	5%	
Trabajo de campo	5%	
Edición de publicaciones	1%	
Registro de propiedad intelectual	0.5%	
Portal internet	0.5%	
<b>Total</b>	<b>100.0%</b>	

### Acciones de Interés del Comité Técnico-Académico

Entre las acciones que contemplamos dentro de este rubro están las reuniones del Comité Técnico Académico; la adquisición de equipo para el fortalecimiento de laboratorios que forman parte de la red y que posibiliten el avance de las propuestas descritas en las Líneas de Investigación; becas para posdocs y estudiantes de posgrado; viáticos para miembros del Comité Técnico Académico que posibiliten su participación en reuniones académicas nacionales o internacionales, garantizando así la representación de la red en dichas reuniones.

Rubro presupuestal	Porcentaje	Notas
Programa de becarios	9%	3 posdocs + 1 doctorado
Equipo de laboratorio	20%	
Reuniones del Comité	1%	Coordinación y planeación
<b>Total</b>	<b>30.0%</b>	



## **Acciones de Arranque de la Red de FAE**

### *1. Estudio Comparativo de Detectores*

Las instalaciones del CIO ofrecen la posibilidad de llevar a cabo un estudio comparativo de distintos tipos de detectores, como PMTs, fotodiodos de avalancha y MMPC, tanto solos como en arreglos. Los sistemas intensificadores de luz cuentan con amplias aplicaciones, como son la instrumentación de biodiagnóstico, inspección de obleas de semiconductor, criptografía cuántica, conteo de partículas, medicina nuclear, detección de radiación de ionización de partículas de alta energía, entre otras. Este estudio tendría el objetivo de determinar la viabilidad de que nuevas tecnologías de estado sólido pudieran sustituir a los PMTs, específicamente para detección de partículas y convertirse en una importante referencia para el futuro trabajo instrumental de todos los grupos que estén dentro de la red o, incluso, fuera de ella. El costo de esta acción será de unos 500,000 pesos.

### *2. Instalación del Primer Detector Cherenkov del Observatorio HAWC*

El observatorio HAWC es un proyecto conjunto entre México y Estados Unidos, y la instalación del primer detector sería un evento que tendría visibilidad incluso a nivel internacional. El costo estimado de esta acción es de 150,000 pesos.

### *3. Fabricación e Instalación de BATATA en el Observatorio Auger*

BATATA es un telescopio de muones que, entre otras funciones, servirá como prototipo de una ampliación del Observatorio Auger. Se trata del primer detector fuera del diseño original del OA cuya instalación en el sitio sur del Observatorio ha sido autorizada por la Colaboración Auger. Tanto la idea, como el diseño y la construcción de BATATA son de factura mexicana y en su ejecución toman parte tres instituciones: BUAP, UMSNH y UNAM. El apoyo requerido es para cubrir parte del costo de fabricación, así como los gastos que demande su instalación. El costo estimado de esta acción es de 350,000 pesos.