



Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano

MEGAPROYECTOS 2006

CONACYT

CONTENIDO

RESUMEN	VII
DATOS GENERALES DE LA PROPUESTA	VIII
LISTA DE ACADÉMICOS E INSTITUCIONES PARTICIPANTES	IX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes	1
1.2 Objetivos	2
1.3 Aportación y justificación científica	4
1.4 Impacto social, económico y tecnológico	7
1.5 Impacto en la formación de recursos humanos	8
2. CONTRIBUCIÓN A LA FRONTERA DEL CONOCIMIENTO	9
2.1 Física de astropartículas	9
2.2 Masas y mezclas de los neutrinos.....	13
2.3 Oscilaciones de neutrinos.....	15
2.4 Violación de <i>CP</i> en las oscilaciones de neutrinos	19
2.5 El neutrino: ¿Partícula de Dirac o de Majorana?.....	19
2.6 Decaimiento beta doble	20
2.7 Física más allá del Modelo Estándar	22
2.8 El problema de la materia oscura	23
2.8.1 Evidencia de materia oscura en galaxias y cúmulos de galaxias.....	23
2.8.2 Evidencia de materia oscura a nivel cosmológico.....	25
2.9 Candidatos para materia oscura.....	27
2.9.1 Neutrinos activos.....	28
2.9.2 Axiones.....	28
2.9.3 WIMPs. Neutralinos.....	28
2.10 Detección de materia oscura.....	29
2.10.1 Detección directa.....	29
2.10.2 Detección indirecta.....	31
2.11 Neutrinos estériles	32
2.12 Bariogénesis y leptogénesis.....	34
2.13 Los neutrinos como sondas astrofísicas	36
2.13.1 Fuentes y flujos de neutrinos astrofísicos.....	36
2.13.2 Fuentes puntuales galácticas.....	37
2.13.3 Neutrinos cosmogénicos.....	40

3. ASPECTOS MULTIDISCIPLINARIOS	43
3.1 Vida en el subsuelo.....	44
3.2 Estudios hidrogeoquímicos	45
3.3 Geomecánica	46
3.4 Flujo de fluidos y depósitos minerales	47
3.5 Observatorio Sísmico Profundo	48
3.6 Imágenes geofísicas.....	48
3.7 Astrofísica nuclear.....	49
3.8 Geoneutrinos	51
4. LABORATORIO SUBTERRÁNEO	55
4.1 Detector sensible a materia oscura	58
4.2 Detector sensible a neutrinos.....	59
4.2.1 Reactores nucleares	60
4.2.2 Haces de neutrinos.....	60
4.2.3 Neutrinos solares	61
4.2.4 Geoneutrinos	61
4.3 Instalaciones subterráneas	62
4.3.1 Laboratorio y cavidades	62
4.3.2 Infraestructura.....	62
5. LABORATORIO DE SUPERFICIE	65
5.1 Beneficios.....	66
5.2 Colaboraciones internacionales	67
5.3 Objetivos	68
5.4 Laboratorio de Electrónica	69
5.5 Laboratorio de Geología.....	70
5.6 Laboratorio de Biotecnología Ambiental	72
5.7 Laboratorio de Cómputo	73
6. DETECTOR CRIOGÉNICO DE MATERIA OSCURA	75
6.1 Antecedentes	77
6.2 Tecnología de detección criogénica	79
6.3 Montaje experimental.....	83
6.4 Objetivos de la propuesta	86
6.5 Requerimientos mínimos.....	87
6.6 Prototipo de un detector criogénico de argón.....	87
7. EXPERIMENTOS HUÉSPEDES	91
7.1 Geología de yacimientos minerales.....	91
7.1.1 Objetivos	93
7.1.2 Metodología.....	94
7.2 Observatorio sismotectónico	96
7.2.1 Objetivos y justificación.....	97

7.2.2 Infraestructura.....	98
7.3 Estudio in vivo del transporte y la distribución de metales pesados en plantas	99
7.3.1 Objetivo y justificación	102
7.3.2 Descripción de los experimentos.....	105
7.3.3 Infraestructura.....	107
7.4 Estudios de diversidad microbiana de subsuelo con un enfoque metagenómico	107
7.5 Detección de rayos cósmicos.....	110
7.5.1 Experimento prototipo.....	111
7.5.2 Resultados	115
7.5.3 Reconstrucción de eventos multimuones	118
7.6 Secciones eficaces de reacciones nucleares inducidas por iones ligeros	122
8. BÚSQUEDA Y CARACTERIZACIÓN DE SITIOS	127
8.1 Objetivos	127
8.2 Criterios de selección de sitios candidatos	128
8.2.1 Requisitos físicos.....	128
8.2.2 Requerimientos logísticos	132
8.3 Contactos y acuerdos con empresas mineras.....	133
8.4 Sitios candidatos.....	133
8.5 Impacto ambiental	134
8.5.1 Impacto ambiental de la minería	134
8.5.2 Impacto ambiental causado por el LSMM	135
8.5.3 Contribuciones a la prevención y remediación de riesgos ambientales	135
8.6 Estudios para la caracterización del sitio.....	135
8.3 Conclusiones	136
REFERENCIAS.....	137
ANEXO 1	149
ANEXO 2.....	151
ANEXO 3.....	157

RESUMEN

La comunidad mexicana de física de partículas ha alcanzado a lo largo de los años un alto grado de desarrollo, tanto teórico como experimental, puesto en evidencia por su participación exitosa en grandes proyectos internacionales de física de frontera. Estos logros destacan la necesidad de establecer un plan a largo plazo, centrado alrededor de una meta común de gran envergadura, que permita a dicha comunidad aunar esfuerzos y optimizar recursos para consolidar y conservar un lugar de preponderancia en la investigación científica de avanzada a escala mundial, promoviendo el desarrollo en el país de tecnologías de punta. Para ello, se propone la construcción y operación en México de un laboratorio nacional con instalaciones subterráneas y de superficie, que posibilite la realización de experimentos de vanguardia en física y astrofísica de partículas y propicie, a la vez, investigaciones multidisciplinarias.

DATOS GENERALES DE LA PROPUESTA

TÍTULO:

LABORATORIO SUBTERRÁNEO MULTIDISCIPLINARIO MEXICANO

RESPONSABLE:

Dr. Juan Carlos D'Olivo Saez
Instituto de Ciencias Nucleares, UNAM
Circuito Exterior, C.U., A. Postal 70-543
04510 México, D.F.
Tel: 5622 4690/98 Fax: 5622 4693
Correo Electrónico: dolivo@nucleares.unam.mx

CORRESPONSABLE:

Dr. Heriberto Castilla
Departamento de Física, CINVESTAV
Av. Instituto Politécnico 2508, A. Postal 14-740
07360 México, D. F.
Tel: 5747 3800 Fax: 5747 3838
Correo Electrónico: castilla@fis.cinvestav.mx

ACADÉMICOS PARTICIPANTES: 106

INSTITUCIONES PARTICIPANTES:16

LISTA DE ACADÉMICOS E INSTITUCIONES PARTICIPANTES

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA (BUAP)

César Alvarez
Arturo Fernández
Mario Ivan Martinez
Oscar Martinez
Germán Muñoz
Cupatitzio Ramirez
Alfonso Rosado
Humberto Salazar
Ibrahim Torres
Aurora Vargas
Sergio Vergara

CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y ESTUDIOS AVANZADOS (CINVESTAV)

Juan José Alvarado Gil
Juan Barranco Monarca
Heriberto Castilla
Guillermo Contreras
Augusto García Gonzalez
Ricardo López Fernández
Omar Miranda Romagnoli
Luis Manuel Montaña Zetina
Celio Moura
Rodrigo Pelayo
Miguel Angel Pérez-Angón
Abdel Pérez-Lorenzana
Alberto Sanchez Hernandez
Arnulfo Zepeda

INSTITUTO NACIONAL DE ASTROFISICA OPTICA Y ELECTRONICA (INAOE)

Alberto Carramiñana

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES NUCLEARES

Juan Aspiazu
Elíud Moreno
Ghiraldo Murillo
Rafael Policroniades
Armando Varela

SERVICIOS INDUSTRIALES PEÑOLES S.A. DE C.V.

Carlos Villeda (Distrito Minero de Guanajuato)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA

Ildelfonso 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 DE COLIMA

Alfredo Aranda
Lorenzo Diaz Cruz

UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO

David Delepine
Julián Felix
José Luis Lucio
Victor Migenes
Gerardo Moreno
Mauro NapsucialeMendivil
Octavio Obregón
Marco A. Reyes Santos
Miguel Sabido
José Socorro
Luis A. Ureña

UNIVERSIDAD DE SAN LUIS POTOSÍ

Jurgen Engelfried
Antonio Morelos Pineda
Mariana Kirchbach

UNIVERSIDAD DE SONORA

Carlos Calcano
Maria Elena Tejeda Yeomans

UNIVERSIDAD IBEROAMERICANA

Salvador Carrillo
Fabiola Vázquez

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO (UNAM)**

INSTITUTO DE CIENCIAS NUCLEARES

Alejandro Ayala
Eleazar Cuautle
Juan Carlos D'Olivo
Gustavo Medina Tanco
Eduardo Nahmad
Rafael Navarro
Lukas Nellen
Guy Paic
Enrique Patiño
Pedro Podesta
Federico Sanchez
Luis Urrutia
Sarira Sahu
Daniel Supanitsky

INSTITUTO DE FÍSICA

Rubén Alfaro Molina
Eduardo Andrade
Efraín Chavez
Daniel Coello
Quiela Curiel
Guillermo Espinoza
Francisco Favela
Roberto Gleason
José I. Golarri
Arcadio Huerta
Daniel Marín
María E. Ortiz
Penélope Rodríguez
Corina Solís
Manuel Torres

INSTITUTO DE GEOFÍSICA

Carlos Canet Miquel
Arturo Iglesias
José ValdésGalicia
Raymundo Martínez Serrano
Sara Franco

INSTITUTO DE GEOLOGÍA

Antoni Camprubí Cano

INSTITUTO DE BIOTECNOLOGÍA

Katy Juarez

INSTITUTO DE INGENIERÍA

Neftali Rodríguez Cuevas

CENTRO DE GEOCIENCIAS

Eduardo González Partida

**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

INSTITUTO DE FÍSICA Y MATEMÁTICAS

Adnan Bashir
Alfredo Raya Montaña
Christian Schubert
Víctor Villanueva
Luis Villaseñor

INSTITUTO DE METALURGIA

Victor Garduño

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES

QUÍMICAS Y BIOLÓGICAS

Nita Schubert (Biología Celular IFM e IIQB)

VIRGINIA TECH., USA

Antonio Nieto

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La física de partículas elementales, también llamada física de altas energías, ha establecido un marco teórico, el Modelo Estándar (ME), que constituye un salto cualitativo y cuantitativo en nuestra comprensión de la estructura íntima de la materia y de la evolución del cosmos. Este avance fundamental en el conocimiento humano ha sido logrado, en gran medida, con experimentos realizados en los grandes aceleradores de partículas, como CERN y FERMILAB. No obstante, en años recientes, experimentos que utilizan fuentes astrofísicas o terrestres de partículas han adquirido una importancia creciente. Estos experimentos cubren áreas extensas en la superficie, como es el caso del Observatorio Pierre Auger, en Argentina, o utilizan 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.

Si bien su objeto de estudio pertenece al ámbito de la ciencia básica, la física de altas energías 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.

Actualmente, existen en el mundo varios experimentos de física de altas energías con una componente mexicana significativa. Tal es el caso del Observatorio Pierre Auger y las colaboraciones ALICE y CMS en el CERN, entre otras. La participación eficiente, y con una creciente intervención técnico-científica, en las nuevas etapas de desarrollo de estos experimentos, es 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 con que se cuenta en diferentes entidades nacionales.

El paso ulterior en la consolidación de la capacidad científica del país, requiere tanto de la fabricación de componentes avanzados, como de la realización de experimentos de punta dentro del territorio nacional. Esto traerá aparejada una demanda de recursos humanos, científicos, técnicos y de ingeniería, que podrán generarse únicamente con la conformación de un polo de desa-

rrollo, centrado en torno de un desafío científico y tecnológico de largo alcance, que no sólo aglutine y potencie a la comunidad mexicana de física de partículas, sino que también promueva su cooperación con otras áreas del conocimiento. La presente propuesta busca responder a estas necesidades mediante la creación de un laboratorio nacional, con instalaciones subterráneas y de superficie, único en su tipo en Latinoamérica. La implementación de este proyecto tiene el potencial de crear, alrededor del Laboratorio, un entorno de empresas pequeñas y medianas de alta tecnología con proyección internacional. El tipo de laboratorio subterráneo propuesto, conduce también de manera natural a la integración de diversas áreas del conocimiento científico en un ambiente multidisciplinario.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo central de esta propuesta es la construcción y puesta en operación de un laboratorio nacional subterráneo multidisciplinario, dedicado a la investigación científica y el desarrollo tecnológico. Este laboratorio estará orientado a la física y astrofísica experimentales de altas energías, pero también se prevé una amplia utilización en biología, ciencias de la Tierra e ingeniería. El diseño, construcción y operación de este laboratorio subterráneo será un emprendimiento científico, tecnológico e industrial de carácter nacional, si bien se promoverá en todo momento la cooperación con otros países.

El Laboratorio constará de dos sectores, uno ubicado en la superficie y otro a una profundidad de alrededor de 3000 metros equivalentes de agua (aproximadamente 1000 m de roca). El sector de superficie contendrá instalaciones administrativas, oficinas para investigadores y estudiantes, salas de conferencia, un centro de convenciones, laboratorios y talleres, centros de cómputo, planta de energía, de purificación de aire y otros servicios, depósitos, instalaciones para hospedaje y restaurantes para el personal residente y visitante, etcétera. El sector subterráneo consistirá inicialmente de una nave central de utilización general, a partir de la cual naves secundarias podrán ser creadas en función de las necesidades de experimentos específicos. Las características de acceso y servicios dependerán fuertemente del sitio escogido y serán definidas como resultado de relevamientos y estudios futuros.

Además de proveer apoyo logístico para el sector subterráneo, las instalaciones de superficie estarán abocadas al desarrollo y construcción de detectores que se emplearán tanto en experimentos in situ como en otros a realizarse en el país y el extranjero.

A fin de alcanzar el objetivo antes señalado se cubrirán las etapas siguientes:

1. Establecimiento de una base jurídica para la creación y ulterior administración del Laboratorio. Para ello, se formalizará una red interinstitucional que, además de enfrentar las necesidades específicas del proyecto, fomentará la integración de la comunidad y facilite el desarrollo experimental del área mediante el uso eficiente de los recursos disponibles, así como la creación de nuevos laboratorios y el re-equipamiento de los ya existentes. Se creará una persona jurídica en la forma de un consorcio de instituciones o de una fundación, que haga posible la coordinación de las actividades y la administración de los recursos comunes en forma óptima y eficiente.
2. Finalización de los estudios de sitio conducentes a la identificación del lugar más adecuado para el emplazamiento del laboratorio subterráneo propuesto, y que comprenderán relevamientos

geológicos, mediciones de radiación natural de fondo, impacto ambiental e integración social; estos estudios complementarán los que ya se han llevado a cabo, y en ellos se dará prioridad al aprovechamiento de las minas ya existentes. A la par se organizarán grupos interdisciplinarios a fin de determinar puntos de interés común con otras áreas y de traducirlos en iniciativas experimentales concretas. Una vez seleccionado el emplazamiento definitivo, se construirán las instalaciones de superficie con un costo aproximado de 30 millones de dólares. En esta etapa, también se dará forma definitiva al experimento cardinal que se realizará de inicio en el sector subterráneo y se abrirá una convocatoria internacional para la recepción de propuestas de otros posibles experimentos, que denominaremos experimentos huéspedes, cuya selección final estará a cargo de un comité de expertos nacionales y del extranjero. Cabe destacar que ya existen varias propuestas preliminares que se detallan a lo largo del documento.

3. Aprovechamiento de la red interinstitucional y de la infraestructura de superficie del Laboratorio a fin de impulsar e incrementar la presencia mexicana dentro de colaboraciones internacionales, en experimentos de frontera en física y astrofísica de altas energías. Esto cubrirá tanto las actualizaciones de experimentos existentes que darán inicio próximamente, como es el caso del Observatorio Auger, los experimentos en el Large Hadron Collider del CERN y el programa de neutrinos de FERMILAB, así como los experimentos de astrofísica de gran altura que se encuentran en la etapa de planeación e implementación en la Sierra Negra, en el estado de Puebla. Asimismo, se promoverá la participación activa en las etapas tempranas del diseño de la próxima generación de experimentos de física de partículas, como es el caso del International Linear Collider y los haces neutrinos. Al mismo tiempo, se dará inicio a las labores de los experimentos huéspedes que puedan realizarse en los laboratorios de la superficie y se buscará conformar un grupo teórico multidisciplinario que trabaje en estrecha relación con los grupos experimentales establecidos en el Laboratorio.
4. Construcción, acondicionamiento y puesta en operación de las instalaciones subterráneas. El costo final de la implementación de estas instalaciones depende en gran medida de las características del sitio escogido (por ejemplo, acceso vertical u horizontal), pero se estima que será necesaria una inversión de alrededor de 50 millones de dólares para un volumen útil mínimo de $80 \times 20 \times 20 \text{ m}^3$. En esta etapa se construirán e instalarán los detectores para los primeros experimentos que se realizarán en este sector del Laboratorio.
5. Instalación y puesta en operación del experimento cardinal. Si bien el laboratorio subterráneo funcionará como un prestador de infraestructura para una diversidad de experimentos, es claro que es fundamental contar, desde el comienzo, con un experimento en la frontera del conocimiento, que permita amalgamar la colaboración en torno a un esfuerzo común. Un análisis de las capacidades existentes a nivel experimental y teórico en la comunidad mexicana, y del estado del arte a nivel internacional, nos ha llevado a proponer un experimento criogénico para la detección de materia oscura, cuyas características básicas son descritas en el Cap. 6. El detector es del tipo de estado sólido, pero alternativas como el uso de líquidos nobles de gran pureza, están también bajo consideración.

Se prevé que las tres primeras etapas requerirán un tiempo de entre 3 a 4 años, dependiendo de las condiciones locales, factores logísticos y financieros. La finalización de las etapas cuarta y quinta consumirá otros 3 años.

1.3 APORTACIÓN Y JUSTIFICACIÓN CIENTÍFICA

Un laboratorio subterráneo profundo brinda una oportunidad excepcional para encontrar respuestas a preguntas fundamentales acerca del cosmos y de nuestro propio planeta, entre las cuales, a manera de ilustración, podemos enlistar las siguientes:

- ¿Cuál es la naturaleza de la materia oscura?
- ¿Qué fenómeno físico provoca la acelerada expansión del universo?
- ¿Cuál es el origen y la naturaleza de los rayos cósmicos ultra energéticos?
- ¿Cuáles son las propiedades fundamentales de los neutrinos?
- ¿Qué causa la asimetría materia-antimateria y la inestabilidad de la materia?
- ¿Cuáles son las características de los seres vivos que habitan a grandes profundidades en la roca y cómo se relaciona su química con la evolución celular primordial?
- ¿Cuál es el efecto de las partículas de alta energía en los procesos de variación genética y su influencia en la evolución de los organismos vivos y en el envejecimiento celular?
- ¿Cómo se relacionan los procesos químicos, biológicos y de transporte de calor con la tectónica de placas?

Estas preguntas corresponden a por lo menos cuatro amplios campos dentro de la ciencia y la ingeniería: (i) física y astrofísica, (ii) geo-microbiología, microbiología molecular y evolutiva, (iii) ciencias de la Tierra, y (iv) ingeniería y mecánica de rocas.

Aunque el 95 % del universo está constituido de materia y energía oscuras, es poco lo que, a ciencia cierta, sabemos de ellas. Es esta una cuestión esencial situada en la confluencia de la física de partículas y la astrofísica. La materia oscura juega un rol crucial en la evolución del universo y la formación de estructuras a diferentes escalas. Al mismo tiempo, las restricciones cosmológicas sobre la densidad bariónica implican que la mayor parte de la materia oscura es de naturaleza no bariónica, lo que conduce a la necesidad de física nueva para el entendimiento de los constituyentes fundamentales de la materia y sus interacciones. Por otra parte, el sorprendente hallazgo de que razón de expansión del universo está aumentando nos lleva a una disyuntiva: o las tres cuartas partes de la densidad de energía corresponden a una nueva forma desconocida o la relatividad general falla a distancias cosmológicas y debe ser reemplazada por una nueva teoría de la gravitación.

Una combinación de experimentos con aceleradores y experimentos con astropartículas (subterráneos y en el espacio) serán necesarios para resolver este problema central de la ciencia contemporánea. Tres son las técnicas más empleadas para la detección de candidatos a materia oscura que interactúa débilmente: ionización, centelleo y emisión de fotones. Los detectores más sensibles generalmente utilizan una combinación de dos de estas técnicas, sin que hasta la fecha haya podido caracterizarse a la mejor tecnología de detección. Las señales genuinas (retroceso de núcleos del detector por interacción con la partícula de materia oscura) deben discriminarse de aquellos debidos a otras fuentes, y condiciones de fondo bajo son esenciales. Para dar una idea de las necesidades experimentales, baste decir que checar el rango completo de las predicciones de las teorías supersimétricas requiere aislar e identificar unas diez señales por tonelada de detector por año.

El estudio de los neutrinos ha sido crucial para la construcción del ME y, a la vez, ha provisto la primera clara evidencia de sus limitaciones. Una revisión de las contribuciones realizadas por físicos mexicanos dentro de la física y astrofísica de neutrinos puede encontrarse en [D'Olivo y

Miranda 2006]. Las mediciones de las masas y otras propiedades de los neutrinos (matriz de mezcla, relación con su antipartícula, neutrinos estériles, etcétera) serán fundamentales para la identificación de física más allá del ME. Tomando en consideración el hecho de que las distancias involucradas son apropiadas para determinar la jerarquía de masa de los neutrinos y posibles efectos de violación de CP en el sector leptónico, reviste gran interés explorar la factibilidad de un experimento de oscilaciones de neutrinos de línea de base larga (“long-baseline”), con haces intensos de neutrinos producidos mediante una fuente de protones de multi-megawatts operando en alguno de los grandes aceleradores que existen en el mundo.

Los experimentos con neutrinos también tendrán un impacto creciente en astrofísica e incluso en geofísica. Entre ellos, podemos mencionar los experimentos que determinen con mayor precisión la luminosidad de los neutrinos provenientes del Sol, pongan a prueba los modelos del núcleo terrestre a través de la medición de geo-neutrinos, midan neutrinos remanentes de supernovas con el objeto de restringir la tasa de formación estelar en el universo, o detecten neutrinos emitidos en explosiones de supernovas a fin de entender la dinámica del colapso gravitacional del núcleo estelar. Conforme las observaciones astrofísicas se vuelven más precisas, se hace más urgente contar con mejores mediciones, a bajas energías, de las secciones transversales de aquellas reacciones nucleares que toman parte en la evolución estelar y las explosiones de supernovas. Un laboratorio subterráneo ofrece condiciones óptimas para la realización de este tipo de mediciones, para las cuales ya se cuenta en México con la capacidad humana y técnica para implementarlas en un plazo relativamente corto.

Microorganismos que viven debajo de la superficie terrestre (“dark life”), pueden ser las formas más abundantes de vida en la Tierra y, posiblemente, en el universo. Los experimentos subterráneos permitirán determinar en qué forma estos microorganismos alteran su medio ambiente para sobrevivir y cómo son capaces de migrar grandes distancias a través de la roca y evolucionar o adaptarse a condiciones que cambian lentamente. Es importante notar que, debido a que los procesos biogeoquímicos a estas profundidades han permanecido inmutables por miles de millones de años, la clave para entender la evolución celular arcaica puede residir en la expresión genética de estos ecosistemas microbianos subterráneos.

El entendimiento de procesos mecánicos, térmicos, hidrológicos, químicos y biológicos que ocurren a grandes profundidades, y las complejas interacciones entre ellos, son la clave para una mejor comprensión de la evolución del planeta. Las fuerzas inducidas por los movimientos de las placas tectónicas, calor y gravedad, transportados por la estructura sólida esquelética de la roca y por fluidos intersticiales, se distribuyen de manera no uniforme debido a la estructura heterogénea de la masa rocosa. Además, fluidos que circulan a través de las fracturas en la roca y procesos asociados de tipo disolución-precipitación pueden producir depósitos de minerales o transporte de contaminantes de aguas subterráneas. El laboratorio propuesto permitirá la elaboración, verificación y parametrización experimental de modelos geológicos adecuados a la descripción de estos fenómenos.

La construcción de un laboratorio subterráneo requiere excavaciones profundas, cuya estabilidad depende de la manera en que la resistencia de la roca se deteriora con el tiempo, cuando es expuesta al medio ambiente químico durante la excavación. La carencia de investigación en esta importante cuestión obliga a que el diseño de los procedimientos de soporte en las excavaciones ordinarias se base en reglas empíricas de validez cuestionable. La influencia sobre la resistencia de la masa rocosa y su deformabilidad en sistemas con juntas y otros elementos debilitantes de-

pendientes de la escala, es la principal fuente de incertidumbre. Los estudios del sitio, el proceso de excavación y la operación del laboratorio proporcionan una oportunidad única para realizar investigaciones conducentes al entendimiento de esta importante cuestión. Además, un laboratorio del tipo propuesto podrá albergar sistemas sismológicos para el monitoreo de terremotos y contribuir también al desarrollo de nuevas técnicas de imágenes geofísicas para la observación de procesos dinámicos y el mapeo de estructuras estáticas en la roca.

Por su parte, las instalaciones de superficie del Laboratorio, además de brindar el soporte imprescindible al laboratorio subterráneo, tienen por objetivo crear un polo de conocimiento tecnológico para el desarrollo de detectores y apoyo técnico y de ingeniería a otras iniciativas experimentales, en las cuales la comunidad mexicana tenga una participación activa. Actualmente, algunos ejemplos de este tipo de experimentos son el Observatorio Pierre Auger, los experimentos ALICE y ACORDE del LHC, en el CERN, el programa de neutrinos de FERMILAB y una serie de experimentos de astronomía gama y rayos cósmicos en la Sierra Negra.

El grupo mexicano ha tomado parte en la Colaboración Auger desde hace más de una década, contribuyendo al diseño, instalación y operación del Observatorio, así como al análisis de los datos que ha venido recolectando [Salazar 2006]. La construcción del Observatorio Auger Sur quedará concluida a fines de 2008 e inmediatamente darán inicio varias actualizaciones y ampliaciones al diseño original. Nuestro país ya tiene una participación relevante en, por lo menos, una de ellas, la cual ha sido denominada AMIGA (“Auger Muon Infill Ground Array”) y consistirá en la instalación de un arreglo interno con mayor densidad de detectores de superficie y en la adición de más de 60 centelladores de 30 m² de área cada uno, sobre una extensión de 20 km² [Etchegoyen 2007]. Su objetivo es el discernir la componente muónica de la electromagnética (electrones y fotones) en los chubascos de partículas producidos en la atmósfera por los rayos cósmicos ultraenergéticos. Esto tendrá un fuerte impacto en la determinación de la composición de la partícula primaria y en la distinción entre distintos modelos de interacciones hadrónicas, en un intervalo de energías crítico para la caracterización de modelos astrofísicos [Medina-Tanco 2007]. Grupos de México participan en el diseño de los detectores de muones [Sánchez 2007] y tendrán a su cargo la instalación de una fracción considerable de los mismos.

Cabe destacar también las aportaciones realizadas por grupos mexicanos dentro del experimento ALICE que se llevará a cabo en el “Large Hadron Collider” (LHC) del CERN [Herrera-Corral 2006]. Esto incluyó el desarrollo y construcción del detector V0 que forma parte del “trigger” del experimento y del detector ACORDE, 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, habiendo quedado de manifiesto la capacidad para participar en el diseño y construcción de partes complejas en un escenario de excelencia técnica. La entrada en operación del LHC en el 2008, marcará el inicio de una etapa de actualizaciones de los detectores existentes, en la cual los mismos grupos planean incrementar su nivel de participación.

Otros grupos nacionales que han mantenido, desde hace dos décadas, una colaboración de largo plazo con FERMILAB [Carrillo-Moreno 2006, Felix 2006, Engelfried 2006, Morelos 2006, Reyes 2006], 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, entre sus objetivos, Nova pretende medir uno de los ángulos de la matriz de mezcla de los

neutrinos y determinar la jerarquía de sus masas. Se tiene planeado contribuir de manera significativa a los detectores de este experimento.

Por último, iniciativas espaciales en física de astropartículas, como por ejemplo, Cosmic-Vision, EUSO y TUS, en cuyo planeamiento ya participan grupos mexicanos, se beneficiarán de las instalaciones propuestas para el desarrollo y la construcción de detectores con certificación espacial, garantizando la inserción de México en esta nueva frontera científica y tecnológica.

1.4 IMPACTO SOCIAL, ECONÓMICO Y TECNOLÓGICO

Más allá de sus objetivos científicos, la presente propuesta tendrá un impacto considerable en diversos aspectos sociales, económicos y tecnológicos. Entre ellos, podemos mencionar los siguientes:

- a) La existencia de un centro de excelencia científica con proyección internacional, contribuirá sustantivamente a la formación de recursos humanos de alto nivel, tanto en el ámbito técnico como en el científico, mediante la realización de estancias de verano para alumnos graduados, tesis 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) Multidisciplinariedad: el Laboratorio proveerá una excelente oportunidad para que las comunidades de ciencias físicas, biológicas y de la tierra exploren nuevas interfases. Como un ejemplo concreto, puede mencionarse el hecho de que el desempeño de los ecosistemas subterráneos es el resultado de la interrelación de condiciones ambientales, químicas y catalíticas, cuya comprensión requerirá de la colaboración estrecha entre científicos de diversas áreas.
- c) Se prevé una importante participación de la industria nacional, privada y estatal, tanto en la etapa inicial de construcción de las instalaciones y provisión de servicios especializados, como en la fase posterior de 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 implementan algunos grupos líderes de esta colaboración.
- 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 proyecto contribuirá al desarrollo regional en diversas formas. Por una parte, se generarán empleos durante los varios años que demande la construcción del Laboratorio, su infraestructura y la logística asociada (camino, líneas de suministro de energía eléctrica, etcétera). Asimismo, durante la operación del Laboratorio se prevé una derrama en las comunidades vecinas de recursos provenientes de diversas fuentes: prestación de servicios, empleos técnicos y de personal de apoyo, fuentes de trabajo en empresas regionales asociadas, turismo científico, etc.
- g) El carácter internacional de algunos de los experimentos que se realizarán en el laboratorio, traerá consigo una mayor 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.

En la presente propuesta están involucrados esos mismos grupos de investigación, los cuales se convertirían en usuarios regulares de las instalaciones de superficie del LSMM. Además de las aplicaciones anteriores de la instrumentación de detectores de partículas a los procesos de diagnóstico y terapia en medicina, en el LSMM será posible apoyar diferentes desarrollos que tendrán implicaciones directas a nivel regional y nacional, como por ejemplo: i) Estudios metalogenéticos de depósitos con volumen suficiente para ser explotados económicamente. ii) Biorremediación ambiental a través de plantas o de microorganismo del subsuelo. iii) Mediciones sismológicas profundas. iv) Estudios geológicos a gran profundidad, como la determinación de variaciones del campo magnético terrestre, transmisión de fluidos y geoquímica de agua en corrientes subterráneas.

1.5 IMPACTO EN LA FORMACION DE RECURSOS HUMANOS

El desarrollo de los grupos de investigación que existen en el país en el área de la física experimental y la astrofísica de altas energías 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 la formación técnica y experimental de los nuevos investigadores. Esta simbiosis ha conducido a un rápido crecimiento del número de investigadores experimentales en estas áreas (actualmente son 33 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; D0, CDF, FOCUS (Fermilab); ALICE, CMS (CERN); H1 (DESY); Observatorio Pierre Auger.

La planta total de investigadores en nuestro país en las áreas de física de altas energías (teoría, fenomenología y experimentos) y la física de astropartículas 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). Prácticamente todos estos grupos se han involucrado en la presente propuesta y su participación en las actividades de investigación que se desarrollarán en el LSMM 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.

2. CONTRIBUCIÓN A LA FRONTERA DEL CONOCIMIENTO

2.1 FÍSICA DE ASTROPARTÍCULAS

Existe un cúmulo de evidencia experimental y teórica que hace prever la inminencia de avances espectaculares en la ciencia de nuestro tiempo y, en particular, de la física contemporánea. Una parte de estos nuevos desarrollos se enmarcan 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. Las dos primeras describen el universo a gran escala, mientras la última se encarga de estudiar el mundo sub-atómico. Tales desarrollos están propiciando la convergencia de poderosas herramientas que permiten indagar y responder algunas de las preguntas más profundas que se pueden plantear sobre el origen y evolución del universo. Es posible afirmar que estamos ante el umbral de una nueva revolución científica; incluso está ya emergiendo una nueva visión de la realidad, desde la cual se considera al universo en su totalidad como un universo cuántico en expansión. La relevancia de estas actividades queda de manifiesto desde el momento mismo en que ha sido posible plantear de manera coherente preguntas sobre el origen del cosmos y la materia, tales como:

- ¿Cuál es la naturaleza de la materia que forma las galaxias?
- ¿Qué formas de energía dominan en el universo?
- ¿Cómo surgió la preponderancia observada en el universo de la materia sobre la antimateria?
- ¿Qué tipo de semilla dio origen a la formación de estructuras en el universo?
- ¿Cuál será el final del universo que observamos?

En esta sección se discuten estas y otras preguntas en el contexto de la investigación de frontera, así como los aportes que la comunidad científica mexicana puede realizar para su desarrollo.

La física del neutrino, la partícula neutra de espín $1/2$ más liviana conocida y que acompaña al electrón emitido en el decaimiento beta de un núcleo radiactivo, ha sido objeto de un gran interés, tanto teórico como experimental, durante las últimas dos décadas, a lo largo de las cuales se han producido considerables avances en la comprensión de sus propiedades. Desde diciembre de 1930, cuando W. Pauli postuló su existencia como una medida desesperada para salvaguardar el principio de conservación de la energía en el decaimiento beta, los neutrinos han jugado un papel preponderante en la construcción de la teoría de las interacciones débiles, cuyo colofón, presentado en 1967, es el celebrado Modelo Estándar de las partículas elementales (una revisión histórica puede encontrarse en la ref. [Mohapatra y Pal, 1991]).

Los neutrinos fueron detectados por vez primera en 1956 por C. L. Cowan y F. Reines. Su importancia va más allá del modelo estándar y el cabal entendimiento de sus propiedades físicas nos brindará una mejor comprensión de la evolución misma del universo. En particular, los neutrinos desempeñan un papel importante en la evolución de las estrellas y en la síntesis de bariones

en el universo, proporcionando valiosa información sobre los núcleos estelares. Más específicamente, en gran medida determinan las propiedades de nuestro Sol.

Existen tres tipos (*sabores*) de neutrinos: el neutrino del electrón, el neutrino del muón y el neutrino del tau. Dentro del ME todos se consideran partículas de masa cero; sin embargo, en años recientes, diversos experimentos realizados con neutrinos de fuentes naturales y artificiales han llevado a la conclusión de que los neutrinos son partículas masivas y de que entre ellos existe una mezcla similar a la de los quarks. El fenómeno más notable asociado con este hecho es, sin duda, el de las *oscilaciones de neutrinos* [Pontecorvo 1958], o sea, la variación periódica del contenido de sabor de un haz de neutrinos proveniente de una cierta fuente.

Las oscilaciones de neutrinos han proporcionado la solución del así llamado *enigma de los neutrinos solares*: la deficiencia observada en el flujo de neutrinos provenientes el Sol, en comparación con el valor predicho por el modelo de evolución estelar. Dado que los neutrinos producidos en el núcleo del Sol no son estados propios de masa, sino una superposición de varios de estos estados, en su viaje hacia la Tierra, un neutrino del electrón puede transformarse en otros sabores (neutrino del muón o del tau), los cuales no son detectados por los observatorios terrestres. Una superposición de estados propios de masa tiene diferentes propiedades físicas que los estados de sabor sólo si sus masas no son todas degeneradas y, por lo tanto, al menos uno de los neutrinos debe ser masivo. Este mecanismo también resuelve el problema de la asimetría arriba-abajo (“up-down”) en el flujo de los neutrinos atmosféricos, o sea, aquellos que se generan por la interacción de los rayos cósmicos con los núcleos de las moléculas del aire. La verificación de la existencia del fenómeno que hemos descrito, así como la dilucidación de la física subyacente, ha motivado la construcción de un buen número de laboratorios alrededor del mundo, entre los ue cabe mencionar Kamioka [Fukuda et al. 2003] y SNO [Boger et al. 2000], en Japón y Canadá, respectivamente.

Como se ha mencionado, en el contexto usual de la física de partículas, las oscilaciones de neutrinos requieren que sus masas no sean todas iguales a cero. Las evidencias actuales indican que el promedio de sus masas es inferior a 0.5 eV. Sin embargo, esta pequeña contribución resulta crucial en la evolución del universo. Dado que la cosmología estándar de la Gran Explosión (“Big Bang”) predice la existencia de neutrinos que permean todo el cosmos, sus masas, aunque pequeñas, contribuyen con una cantidad gigantesca a la densidad de materia del universo, formando parte de la así llamada materia oscura, y de esta manera tienen efectos significativos sobre su evolución global. Por otro lado, la masa de los neutrinos podría explicar la asimetría bariónica del universo vía leptogénesis. De acuerdo con esto, el decaimiento fuera del equilibrio de los neutrinos crearía una asimetría leptónica que, mediante procesos de tipo esfalerón, se convierte en una asimetría bariónica. Finalmente, se debe enfatizar que el sólo hecho de que los neutrinos tengan masa no nula nos lleva a considerar seriamente la existencia de física más allá del ME.

Uno de los problemas más relevantes de la física moderna es el de la materia oscura (DM de las siglas del inglés “Dark Matter”) en el universo [Sahni 2004]. Existe evidencia sustancial que sugiere que el 90% de la masa del universo se debe a materia no-luminosa, la así llamada materia oscura [Clowe et al. 2006], como se muestra en la Figura 1.

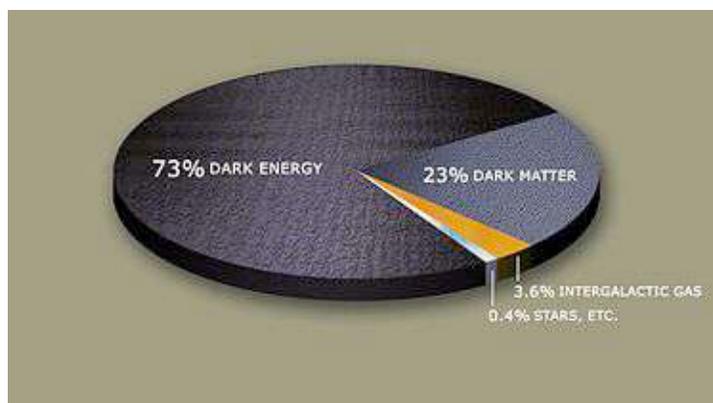


Figura 1. Distribución estimada de la materia oscura y de la energía oscura en el universo.

Aunque la existencia de dicha materia fue sugerida hace alrededor de 70 años en el estudio de grupos de galaxias Coma [Zwicky 1933], sólo alrededor de 1970 su existencia comenzó a considerarse seriamente. Actualmente, la evidencia observacional de su presencia es abrumadora. No solamente se aglomera en los cúmulos (“clusters”) de galaxias, sino que existe como una densidad de fondo que llena todo el universo, por lo que su entendimiento constituye un problema de índole muy general. Esta evidencia se ha visto reforzada por las observaciones propiamente cosmológicas de la nucleosíntesis, las anisotropías de la radiación cósmica de fondo (CMB de las siglas del inglés “Cosmic Microwave Background”) y de la relación magnitud-corrimiento al rojo de las supernovas tipo Ia, consideradas objetos luminosos de referencia (en inglés, “standard candles”).

En números, la cantidad de materia bariónica sólo representa alrededor del 4% del contenido total del universo. El restante 96% es de naturaleza desconocida y debe ser descrito por modelos más allá del actual SM. Además, es necesario considerar una clasificación adicional en lo que llamamos materia oscura. En la literatura especializada, se habla de materia oscura fría y de energía oscura. La distinción no es trivial, ya que ambos tipos de materia poseen propiedades diferentes. La materia oscura fría es la responsable de formar la estructura cosmológica, tal como galaxias, cúmulos de galaxias, etcétera, y apenas constituye alrededor del 26% del contenido material actual. Por otro lado, la energía oscura es la componente dominante, con un 70% del total, y es el agente responsable de provocar una expansión acelerada del universo [Padmanaban 1994, Peebles 1993, Peacock 2002, Dodelson 2003].

La búsqueda de la materia oscura ha promovido una importante correlación entre la física de altas energías, la astrofísica y la cosmología [Fukugita y Yanashida 2003], ya que las partículas elementales constituyen candidatos idóneos para ella. Objetos bariónicos como gases, enanas café (“brown stars”), etcétera, pueden ser parte de la materia oscura, pero son insuficientes para explicar la densidad total de materia observada en el universo, por lo que es necesario recurrir a más candidatos. Las extensiones del ME ofrecen un buen número de posibles opciones y, de este modo, la detección de materia no-bariónica en el universo proporciona, entre otras cosas, una ventana conveniente para el estudio de la física de frontera más allá del ME.

Una de las características más intrigantes de los neutrinos o, quizás, la más intrigante, es que al tener carga cero pueden ser su propia antipartícula. Por el momento no se sabe si los neutrinos son fermiones de Dirac, como los otros fermiones del ME, o si son fermiones de Majorana, en cuyo

caso deben ser su propia antipartícula. Determinar si los neutrinos son partículas de Dirac o de Majorana es de crucial importancia, no sólo por el hecho básico de saberlo, sino porque esta distinción proporcionará una guía importante en el camino de exploración de los modelos que pretenden ir más allá del ME. Los intentos teóricos por descubrir qué hay más allá del ME han generado varias rutas. En términos generales podemos hablar de teorías de Gran Unificación (GUT de las siglas del inglés “Grand Unified Theories”), teorías supersimétricas como el Modelo Estándar Supersimétrico Mínimo (MSSM de las siglas del inglés “Minimal Standard Supersymmetric Model”), física de dimensiones extras, teorías de cuerdas, y teorías fuertemente acopladas. Cabe resaltar que estas ideas pueden ser utilizadas de manera simultánea y generar, por ejemplo, teorías de unificación supersimétricas. Dentro de los marcos establecidos por cada una de ellas, existe una amplia gama de modelos y mecanismos que tratan de elucidar diferentes problemas asociados con la física de partículas. Los neutrinos desempeñan un rol fundamental en todas y cada una de esas propuestas.

Los neutrinos juegan un papel sumamente importante en los procesos físicos del universo temprano [Lesgourgues y Pastor 2006, Steigman 2005]. Estas partículas fueron copiosamente producidas durante los primeros instantes de la evolución del universo y actualmente forman un fondo que, al igual que el fondo de microondas, llena todo el cosmos y se enfría conforme el universo se expande. Este mismo fondo tuvo un papel fundamental en la formación de los supercúmulos de galaxias. La estructura observada a gran escala en el universo depende significativamente de la pequeñez de la masa del neutrino. El fondo de neutrinos es de difícil detección. En su etapa primigenia, el universo estuvo en un estado de plasma que reproducía condiciones similares a las que se encuentran hoy en día en el núcleo de las estrellas. Ocurrieron entonces esencialmente los mismos procesos físicos que son responsables de la longevidad, el calor y luminosidad de las estrellas, en los cuales la física del neutrino es crucial. Una serie de procesos nucleares, denominados procesos de nucleosíntesis, fusionan principalmente núcleos de hidrógeno, produciendo helio y, a partir de éste, núcleos más pesados, liberando además energía en forma de radiación electromagnética y neutrinos. En sus primeros instantes el universo sintetizó, a través de la cadena protón-protón, sólo núcleos ligeros. Esto se debió a que la expansión produjo un enfriamiento tan rápido que el proceso de nucleosíntesis completo tomó sólo unos tres minutos, después de lo cual la abundancia de cada especie de núcleo primordial quedó bien determinada. La predicción precisa de las abundancias depende, además de la razón de expansión, de la proporción de bariones por fotón, la cual es una medida de cuanta materia bariónica existía en exceso sobre la antimateria, relativa a la radiación (fotones) en el universo temprano. Este número es muy pequeño, a saber, una parte en diez mil millones [de Bernardis 2002, Pryke et al. 2002, Spergel et al. 2003]. Por lo demás, las leyes físicas (la física nuclear) y las constantes que gobiernan el comportamiento de la materia a las energías a las que se dió el proceso están bien entendidas, de modo que la nucleosíntesis en la teoría de la Gran Explosión está libre de las incertidumbres que típicamente rodean la física del universo temprano. La asimetría en el número de bariones con respecto a los antibariones es uno de los parámetros fundamentales de esta teoría. Las galaxias, las estrellas y nosotros mismos no existiríamos si este parámetro fuese tan sólo cien veces más pequeño o más grande. No es fácil, sin embargo, comprender el origen del valor tan pequeño de la asimetría bariónica a partir de las leyes básicas de la naturaleza y este problema nos conduce al estudio de la bariogénesis y la leptogénesis.

Cálculos de la nucleosíntesis primordial han arrojado las siguientes contribuciones a la masa total de materia: cerca del 75% en ^1H , 25% en ^4He , 0.01% en D, prácticamente todo el ^3He exis-

tente y algunas trazas de Li y Be sin ningún elemento pesado [Steigman 2006]. Las abundancias observadas en el universo son consistentes con estas predicciones. Sin embargo, la densidad de materia en el universo calculada a partir de la nucleosíntesis durante la Gran Explosión resulta mucho menor que la masa requerida para comprender la razón de expansión. Esto constituye un argumento adicional en favor de la existencia de la materia oscura.

Uno de los retos de la astrofísica moderna es la identificación de sondas que permitan complementar la información proporcionada por aquellas tradicionalmente utilizadas por la astronomía. Existen muchas dificultades para observar fotones de altas energías ya que son bloqueados por la CMB y por el fondo de radio, además de que son absorbidos por el fondo extragaláctico en el infrarrojo (IRB de las siglas del inglés “Infra Red Background”). En particular, debido al fondo de rayos γ , mediante su detección es muy difícil aislar señales específicas de nueva física [Bergstrom et al. 2001]. Por su parte, protones con energías menores que 10^{19} eV no brindan información fidedigna de su origen puesto que interactúan con los campos magnéticos galácticos e intergalácticos. La situación se torna diferente a mayor energía: recientemente la Colaboración Pierre Auger anunció la existencia de una anisotropía en las direcciones de llegada de los rayos cósmicos con energías superiores a 5.7×10^{19} eV y ha establecido una posible correlación con las posiciones de núcleos activos de galaxias (AGNs de las siglas del inglés “Active Galactic Nuclei”) [Abraham et al., The Pierre Auger Collaboration 2007]. De confirmarse, este resultado marcaría el inicio de la astronomía con partículas.

El estudio de los neutrinos como sondas es de suma relevancia por su participación en un gran número de procesos astrofísicos. La detección de neutrinos de diversos orígenes nos brinda la oportunidad de obtener información a distintos niveles, desde la composición del Sol y las estrellas vecinas, hasta el origen y naturaleza de objetos extragalácticos. Su interacción débil con el resto de la materia por un lado posibilita que nos lleguen desde fuentes opacas a la radiación y por otro causa grandes dificultades experimentales para su observación. Esto último, ha promovido el desarrollo de tecnologías avanzadas que permitan vencer tales dificultades.

Los neutrinos nos permiten “ver” lo que no podemos con otros instrumentos, incluso a distancias cosmológicas. En particular, dependiendo de su diseño, un detector de neutrinos es sensible al fondo difuso de neutrinos al cual contribuyen fuentes puntuales no resueltas, el producto de las interacciones de la CMB con rayos cósmicos ultra energéticos (UHECRs de las siglas del inglés “Ultra High Energy Cosmic Rays”) y los rayos cósmicos que interactúan con el material galáctico. Además, dicho detector es sensible a fuentes puntuales tales como las supernovas (SN de las siglas del inglés “SuperNovae”), los AGNs y las ráfagas intensas de rayos gama (GRBs de las siglas del inglés “Gamma Ray Bursts”). Un buen detector será capaz de medir el flujo total, el espectro energético, la distribución angular y la distribución temporal de los neutrinos astrofísicos, proporcionando así datos valiosos sobre el origen y las características del universo.

2.2 MASAS Y MEZCLAS DE LOS NEUTRINOS

Como ya mencionamos, el hecho de que los neutrinos sean fermiones neutros permite dos posibilidades con respecto a su antipartícula: el antineutrino puede ser distinto del neutrino (que en este caso es una partícula tipo Dirac) o puede coincidir con el neutrino (siendo entonces una partícula tipo Majorana). En el ME sólo están presentes neutrinos de Dirac de helicidad izquierda y, puesto

que en él $B-L$ es una cantidad conservada, términos de masa de Majorana no son permitidos. Consecuentemente, los neutrinos tienen momento magnético nulo, aunque poseen un radio de carga finito a través de sus interacciones con fotones inducidas al nivel de lazos.

En la búsqueda de la unificación de las interacciones fundamentales, una de las mayores metas de la física de partículas, existen modelos que predicen masas para estas partículas. Las masas de los tres neutrinos conocidos son muy pequeñas, hecho que demanda un gran esfuerzo teórico para su explicación. Por ejemplo, uno podría decir que la diferencia de masas entre el quark top y el electrón es enorme, pero esto queda resuelto cuando recordamos que estas son partículas de diferentes familias. Sin embargo, para los neutrinos las diferencias de masa son enormes con respecto a las demás partículas dentro de una misma familia. Es de esperar que una teoría más fundamental arroje luz sobre los mecanismos y las jerarquías según las cuales los neutrinos adquieren su masa. Desde el punto de vista teórico, la ausencia de masa de los neutrinos es un tanto insatisfactoria, pues no existe un principio de simetría que así lo requiera. El ME sin neutrinos derechos tiene la excelente cualidad de que la cancelación de anomalías implica la cuantización de la carga. Este argumento se usa frecuentemente en contra de asociarles un término de masa de Dirac, pero uno de Majorana escapa a este argumento.

La cuestión de las masas para los neutrinos no puede estudiarse de forma aislada. En esta frontera del conocimiento existen otros problemas íntimamente ligados como, por ejemplo, la mezcla de neutrinos. Los estados propios de sabor y de masa para los neutrinos masivos están relacionados por una matriz de mezcla análoga a la matriz de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) de los quarks. Sin embargo, las jerarquías de masas y ángulos de mezcla entre neutrinos son muy diferentes a los de los quarks. Por otro lado, cualquier extensión del ME que tome en cuenta las oscilaciones de neutrinos dándoles masa, necesariamente implica que CP puede violarse también en el sector leptónico, por la presencia de una fase en la matriz de mezcla.

Los neutrinos se producen en los decaimientos débiles con un sabor leptónico definido $|\nu_l\rangle$. Estos estados se designan como los estados propios de la interacción débil de sabor y son combinaciones lineales de los estados de masa $|\nu_i\rangle$:

$$|\nu_l\rangle = \sum_i U_{li} |\nu_i\rangle, \quad (1)$$

donde U_{li} son los elementos de la matriz de mezcla.

Los estados $|\nu_l\rangle$ se detectan típicamente mediante la interacción débil de las corrientes cargadas asociadas a un sabor leptónico específico. Las mediciones directas para las masas de los neutrinos usualmente se basan en el análisis cinemático de las partículas cargadas (leptones, piones) emitidas junto con los neutrinos (estados de sabor) en varios decaimientos débiles. Los estudios de diferentes decaimientos débiles han impuesto los siguientes límites en las masas de los estados propios de la interacción débil mediante la relación

$$m_{\nu_l}^{2(eff)} = \sum_i |U_{li}|^2 m_{\nu_i}^2. \quad (2)$$

El promedio mundial presentado en el reporte del compendio de las propiedades de las partículas elementales (Particle Data Group) [Yao et al. 2006] es:

m_ν^2 (basados en e)	m_ν^2 (basados en m)	m_ν^2 (basados en t)
$-1.1 \pm 2.4 \text{ eV}^2$	$< 0.19 \text{ MeV}^2$	$< 18.2 \text{ MeV}^2$

Tabla 1. Valores experimentales para las masas de los neutrinos.

La matriz de mezcla para los neutrinos, llamada matriz PMNS por las iniciales de sus proponentes [Pontecorvo 1958a, Pontecorvo 1958b, Maki et al. 1962], puede parametrizarse de la manera siguiente:

$$U = \begin{pmatrix} c_{13}c_{12} & c_{13}s_{12} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -c_{23}s_{12} - s_{13}s_{23}c_{12}e^{i\delta} & c_{23}c_{12} - s_{13}s_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{23}s_{12} - s_{13}c_{23}c_{12}e^{i\delta} & -s_{23}c_{12} - s_{13}c_{23}s_{12}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \times P, \quad (3)$$

donde $c_{ij} = \cos\theta_{ij}$ y $s_{ij} = \sin\theta_{ij}$, siendo θ_{ij} los ángulos que definen la mezcla entre los estados de masa y los estados de sabor y δ es la fase de violación de CP . Observemos que esta fase siempre aparece en la combinación $s_{13}e^{i\delta}$, de modo que, si este ángulo fuera nulo, entonces CP se conservaría. Si los neutrinos son de Dirac tenemos P es la identidad, mientras que si son de Majorana $P = \text{diag}(1, e^{i\Phi_2}, e^{i(\Phi_3+\delta)})$. En este último caso existen dos fases adicionales de violación de CP [Bilenki et al. 1980, Schechter et al. 1980, Doi et al. 1981]. Junto con los ángulos de mezcla, los experimentos que detectan las oscilaciones de neutrinos proveen tres parámetros adicionales correspondientes a las diferencias cuadráticas de masas $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$. Uno de los objetivos de los esfuerzos internacionales en esta área es el de realizar mediciones muy precisas de estos seis parámetros leptónicos.

2.3. OSCILACIONES DE NEUTRINOS

Este es un fenómeno puramente cuántico que tiene su origen en el hecho que la propagación de los neutrinos ocurre mediante la evolución temporal de los autoestados de masa, mientras que son producidos y detectados en estados propios de la interacción débil.

Los autoestados de masa evolucionan como ondas planas de acuerdo con

$$| \nu_i(L) \rangle = e^{-im_i^2 L/2E} | \nu_i(0) \rangle, \quad (4)$$

donde hemos puesto $t \approx L$, hemos empleado la aproximación relativista $E_i \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$ y se ha eliminado una fase global. La probabilidad de que un neutrino emitido con sabor l sea detectado con sabor l' luego de viajar una distancia L es dada por

$$P_{l \rightarrow l'} = \left| \langle \nu_{l'} | \nu_l(t) \rangle \right|^2 = \left| \sum_{i=1,2} U_{li}^* U_{l'i} e^{-im_i^2 L/2E} \right|^2, \quad (5)$$

Para aquellos casos donde es una buena aproximación considerar las oscilaciones entre sólo dos sabores de neutrinos la matriz PMNS toma la forma ortogonal

$$U = [U_{li}] = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}. \quad (6)$$

En este caso, la probabilidad de transición resulta ser

$$P_{l \rightarrow l'} = \left(\sin^2 2\theta \right) \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right), \quad (7)$$

para $l \neq l'$.

En la Figura 2 se muestra gráficamente la probabilidad de oscilación para dos neutrinos en función de la distancia. La curva azul indica la probabilidad de que el neutrino original retenga su identidad y la curva roja indica la probabilidad de conversión en el otro sabor. La probabilidad máxima de conversión es $\sin^2 2\theta$ la frecuencia de oscilación está controlada por Δm^2 .

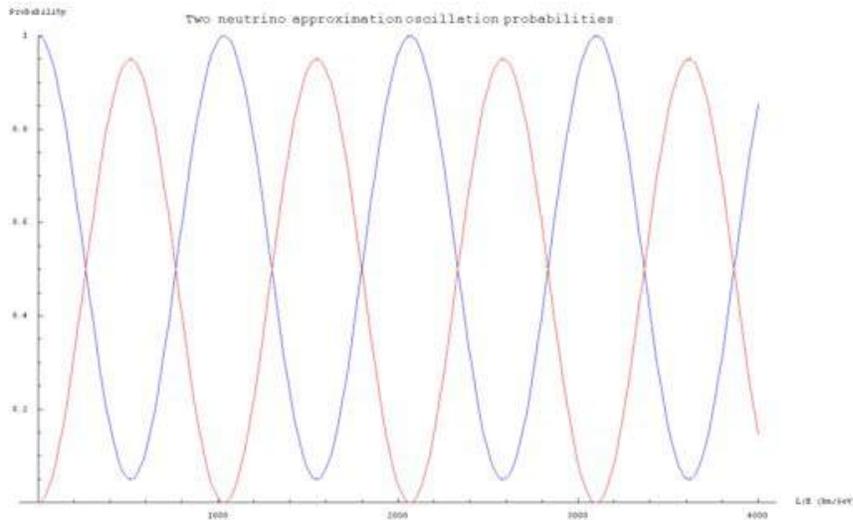


Figura 2. Oscilaciones entre dos sabores de neutrinos

En 1998, la colaboración Super-Kamiokande (SK) publicó el análisis de las mediciones realizadas con neutrinos atmosféricos [Fukuda et al. 1998, 2000, Ashie et al. 2005]. La dependencia observada con el ángulo zenital del déficit en el número de neutrinos del muón (en comparación al de neutrinos del electrón), representó la primera evidencia concluyente de la existencia de las oscilaciones de neutrinos masivos. Este resultado validó el anuncio hecho unos años antes por la colaboración Kamiokande [Hirata et al 1992, Fukuda et al.1994] y ha sido corroborado por el experimento K2K [Ahn et al. 2003], en el que un haz de neutrinos del muón, producidos en un acelerador, fue dirigido hacia el detector de SK.

El patrón de las oscilaciones puede cambiar por la presencia de la materia. La razón básica es que la relación energía-momento de los neutrinos se ve afectada por su interacción coherente con las partículas que constituyen el medio por el cual se propagan. Esta modificación es descrita en términos de una energía potencial V , la cual se relaciona con el índice de refracción de acuerdo con $n = 1 - V/p$, donde p es el momento de los neutrinos. Si, como sucede en la materia ordinaria (e, p, n), electrones pero no leptones pesados están presentes, entonces sólo los ν_e son dispersados a través de la corriente cargada, mientras que los tres sabores lo hacen a través de la corriente neutra. De aquí, el potencial efectivo o, lo que es lo mismo, el índice de refracción de los neutrinos del electrón será diferente al de los otros sabores (ν_μ, ν_τ). Por ende, adquieren una fase distinta durante la evolución en un medio, lo cual, en el caso de mezcla entre los neutrinos, tiene consecuencias dramáticas sobre las transformaciones de sabor, que pueden verse significativamente incrementadas. Esto es la esencia del efecto MSW [Wolfenstein 1978, Mikheyev y Smirnov 1985] que, en su versión de ángulo de mezcla grande, provee la solución al problema de los neutrinos solares. Ser detectados en la Tierra, se debe a las oscilaciones que sufren en razón de su masa no nula

Desde mediados de los 60's, se hicieron notables esfuerzos para la observación de los neutrinos emitidos por el Sol [Bahcall 1964, Davis 1964], pero no fue sino hasta hace unos 20 años cuando comenzaron a lograrse grandes progresos, merced a las mediciones llevados a cabo por grandes colaboraciones como Kamiokande, Ga, SK y SNO [Cleveland et al. 1998, Fukuda et al. 1996, Abdurashitov et al. 1999, Hampel et al. 1999, Altman et al. 2005, Hosaka et al. 2006]. Es así que, mediante un análisis combinado de los datos de los dos últimos experimentos, pudo finalmente probarse que el déficit en el flujo detectado de los neutrinos solares era causado por la transformación de ν_e a $\nu_{\mu\tau}$ en el interior del Sol [Ahmad et al. 2001, Fukuda et al. 2001]. El análisis fue luego refinado por la colaboración SNO [Ahmad et al. 2002, Ahmad et al. 2004] y el resultado ha sido confirmado por SK [Hosaka et al. 2006], KAMLAND [Eguchi et al. 2003, Araki et al. 2005a], K2K [Aliu et al. 2005] y MINOS [Michael et al. 2006]. En la Fig. 3 se muestran los datos de todos los experimentos que acotan las diferencias cuadráticas de masa Δm^2 , para dos neutrinos, en términos del ángulo de mezcla θ .

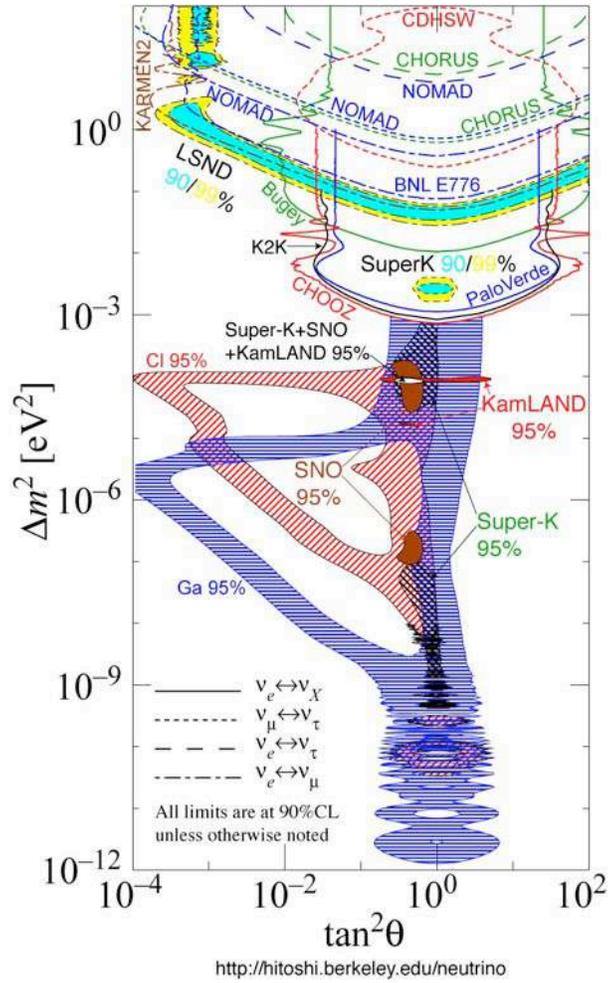


Figura 3. Resumen de las cotas experimentales para Δm^2 en función del ángulo de mezcla θ

En la Tabla 2 se presentan valores y cotas experimentales para los parámetros de mezcla y las diferencias cuadráticas de masa reportados por el Particle Data Group.

PARAMETRO DE MEZCLA	VALOR/COTA
$\sin^2(2\theta_{12})$	$0.86^{+0.03}_{-0.04}$
Δm_{12}^2	$8^{+0.4}_{-0.3} \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
$\sin^2(2\theta_{23})$	>0.92
$ \Delta m_{23}^2 $	$1.9\text{-}3 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$
$\sin^2(2\theta_{13})$	<0.19
Δm_{31}^2	$1.5\text{-}3.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$

Tabla 2. Valores y cotas experimentales para los parámetros de las oscilaciones.

2.4 VIOLACIÓN DE CP EN LAS OSCILACIONES DE NEUTRINOS

La observación experimental de la violación de CP en el sector leptónico puede hacerse de manera directa o indirecta, observando la violación de T . Bien sean neutrinos masivos de Dirac o de Majorana, los efectos de violación de CP y T en las oscilaciones neutrino-neutrino o antineutrino-antineutrino se miden mediante el invariante de Jarlskog [Jarlskog 1985]

$$J = \cos\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{23} \sin(\Delta m_{32}^2 L/4E) \sin(\Delta m_{21}^2 L/4E), \quad (8)$$

donde E es la energía de los neutrinos y L es la distancia, generalmente grande, entre la fuente de neutrinos y el detector. Para que la violación de CP en el sector leptónico pueda ocurrir es necesario que el ángulo de mezcla θ_{13} no se anule. La evidencia experimental indica que θ_{12} y θ_{23} son grandes, pero θ_{13} permanece indeterminado y se tiene sólo la restricción $\theta_{13} < 10^0$ dada por el experimento CHOOZ [Appolonio et al. 1999], a partir de las mediciones hechas con neutrinos de un reactor nuclear.

La violación de CP se observa directamente de la asimetría entre la oscilación $\nu_l \rightarrow \nu_l$ y $\bar{\nu}_l \rightarrow \bar{\nu}_l$, mientras que la violación de T de la asimetría $\nu_l \rightarrow \nu_l$ y $\nu_l \rightarrow \nu_l$. Las señales de violación de CP en las oscilaciones de neutrinos son sensibles a efectos del medio, de tal forma que una gran cantidad de materia terrestre puede modificar significativamente las frecuencias de oscilaciones de neutrinos y, por lo tanto, aumentar o suprimir las señales genuinas de violación de CP . Por otro lado, las señales de violación de T son insensibles a estos efectos, aunque mucho más difíciles de medir.

Un número considerable de propuestas experimentales han sido discutidas en la literatura para mejorar significativamente la actual sensibilidad en θ_{13} y, a la vez, tener acceso a la fase δ de violación de CP : fábricas de neutrinos (haces de neutrinos a partir del decaimiento de muones acelerados), haces muy intensos de neutrinos, mejores experimentos con neutrinos de reactores y haces- β (“ β -beams”). Una variante novedosa de esta última idea ha sido formulada en términos de haces monocromáticos de neutrinos que emergen de iones acelerados que decae por captura electrónica [Bernabeu y Espinoza 2007].

2.5 EL NEUTRINO: ¿PARTÍCULA DE DIRAC O DE MAJORANA?

Nuestro entendimiento de los fermiones de espín $1/2$ está basado en el celebrado Lagrangiano de Dirac, donde el término de masa es del tipo $m_D \bar{\psi} \psi$. Aquí hemos denotado por m_D la masa que aparece en la ecuación de Dirac. Todos los fermiones cargados de espín $1/2$ son adecuadamente descritos por esta ecuación. Sin embargo, para fermiones neutros de espín $1/2$, como es el caso del neutrino, dicho término de masa no representa la única opción. La razón es que una partícula neutra puede ser igual a su antipartícula, como por ejemplo en el caso de pion neutro π^0 , para el cual tenemos $\pi^0 = \bar{\pi}^0$. El pion neutro en efecto proporciona un buen ejemplo ilustrativo de la identidad partícula-antipartícula; sin embargo, hay que tomarlo con cuidado y no aplicarlo literalmente al caso del neutrino. Esto se debe a que el neutrino, siendo un fermión, posee un grado de libertad adicional: el número leptónico L_ν . De este modo, los neutrinos tienen $L_{\nu=+1}$, mientras que los anti-neutrinos poseen $L_{\nu=-1}$. El número leptónico puede visualizarse como una “carga” que distingue a

las partículas que pertenecen a una misma familia (neutrinos y antineutrinos en nuestro caso). El ME requiere la conservación del número leptónico.

Desde la perspectiva del número leptónico, un fermión eléctricamente neutro puede o no ser idéntico a su antipartícula. En el caso de que el neutrino y el antineutrino sean partículas diferentes, estarán descritos por la ecuación de Dirac y no ocurrirá nada espectacular. En el caso de que el neutrino y el antineutrino sean la misma partícula, la ecuación de Dirac ya no es la adecuada para su descripción, como se explica a continuación. La identidad neutrino-antineutrino quiere decir que sus funciones de onda ψ_M y ψ_M^c , respectivamente, están relacionadas mediante una fase η_c de tal modo que $\psi_M^c = \eta_c \psi_M$ [Majorana 1937]. Cuando esto ocurre, el término de masa en el Lagrangiano permite adicionar, además de los términos típicos de masa de Dirac, contribuciones tales como $m_M \bar{\psi}_M^c \psi_M$ y su hermítico conjugado, que son los términos de masa de Majorana. A diferencia de los términos de masa de Dirac, los de Majorana no mezclan partículas correspondientes a distintos valores propios de quiralidad (las así llamadas partículas izquierdas y partículas derechas) [Bilenki y Petcov 1987]. Los términos de masa de Majorana mezclan una partícula izquierda con su conjugado CP , es decir con una antipartícula derecha. De este modo, los neutrinos físicos presentan varias alternativas: pueden ser solamente partículas de Dirac, solamente partículas de Majorana o combinaciones de ambas. El reto es determinar exactamente cuál es la situación. Por otro lado, si el neutrino es una partícula de Majorana se abre la nueva posibilidad de oscilaciones neutrino-antineutrino, que tendrían un impacto adicional en los procesos cosmológicos mencionados previamente. Esta posibilidad es actualmente de enorme interés científico.

2.6 DECAIMIENTO BETA DOBLE

La respuesta a la discusión sobre la naturaleza del neutrino, Dirac versus Majorana, radica en los experimentos de decaimiento beta doble sin la presencia de neutrinos en el estado final, denotados por $0\nu\beta\beta$. El proceso de decaimiento doble beta consiste en una transición nuclear $(Z,A) \rightarrow (Z+2,A)$ en la que dos neutrones ligados en un núcleo se transforman simultáneamente en dos protones más dos electrones (y posiblemente otras partículas neutrales ligeras) [Elliott y Engel 2004, Elliott y Vogel 2000, Elliott 2006]. Existen dos modos básicos para este proceso, el modo con dos antineutrinos emitidos $2\nu\beta\beta$ y el $0\nu\beta\beta$. En el modo $2\nu\beta\beta$ se producen dos antineutrinos del electrón emitidos junto con los electrones y, por lo tanto, el número leptónico es conservado [Klapdor-Kleingrothaus 2006], lo cual implica que el proceso es permitido en el ME. Este modo se ha observado repetidamente por varias colaboraciones y sucede con una vida media promedio de alrededor de 10^{20} años. En contraste, en el modo $0\nu\beta\beta$ únicamente se emiten los dos electrones, violándose la conservación del número leptónico. Al estar prohibido en el ME [Vogel 2006, Zuber 2006, Aalseth 2004], su observación representaría una clara señal de física nueva que daría un impulso adicional a las ideas que van más allá de la teoría actual.

En el proceso $0\nu\beta\beta$ lo que se mide experimentalmente es la vida media de núcleo que decae. Estas son del orden de 10^{20} años o más. La señal experimental corresponde a dos electrones en el estado final. Al sumar las energías de los dos electrones se obtiene el valor Q de la transición nuclear, que se manifiesta como un pico en el espectro de energías. En el caso del proceso $2\nu\beta\beta$ el espectro de energías de los electrones es continuo. Esto hace que sea fácil discernir cuál de los procesos ha tenido lugar. La razón de decaimiento, y por lo tanto el inverso de la vida media,

dependen fuertemente del valor de Q. Para el proceso $0\nu\beta\beta$ la razón es función de Q^5 , mientras que para el proceso $2\nu\beta\beta$ varía como Q^{11} . Como consecuencia, normalmente se consideran isótopos con valores altos de Q (arriba de 2 MeV). Los candidatos son:

Transición (A,Z) Símbolo	Valor Q (keV)	Abundancia natural (%)
(48,20)Ca → (48,22)Ti	4271	0.187
(76,32)Ge → (76,34)Se	2039	7.8
(82,34)Se → (82,36)Kr	2995	9.2
(96,40)Zr → (96,42)Mo	3350	2.8
(100,42)Mo → (100,44)Ru	3034	9.6
(110,46)Pd → (110,48)Cd	2013	11.8
(116,48)Cd → (116,50)Sn	2809	7.5
(124,50)Sn → (124,52)Te	2288	5.64
(130,52)Te → (130,54)Xe	2530	34.5
(136,54)Xe → (136,56)Ba	2479	8.9
(150,60)Nd → (150,62)S	3367	5.6

La búsqueda del decaimiento $0\nu\beta\beta$ está basada en la identificación de un pico justo por debajo de la región de 4.3 MeV. Los diferentes experimentos tratan de reducir al mínimo el ruido de fondo. Dentro de las fuentes más comunes de ruido se encuentran las cadenas de decaimiento (natural) de U, Th y Rn, neutrones, muones atmosféricos y radioisótopos producidos en materiales cuando los experimentos se realizan en la superficie. Todos los experimentos directos se enfocan en la detección de electrones y pueden ser activos o pasivos. Los detectores activos son aquellos en los que la fuente y el detector son idénticos, lo cual representa una gran ventaja experimental, sin embargo casi siempre miden únicamente la suma de energías de ambos electrones. En los experimentos pasivos la fuente y el detector son diferentes y permiten obtener más información, como la medición de energía y rastros de cada electrón de manera separada. Por lo general, tienen una fuente menos intensa.

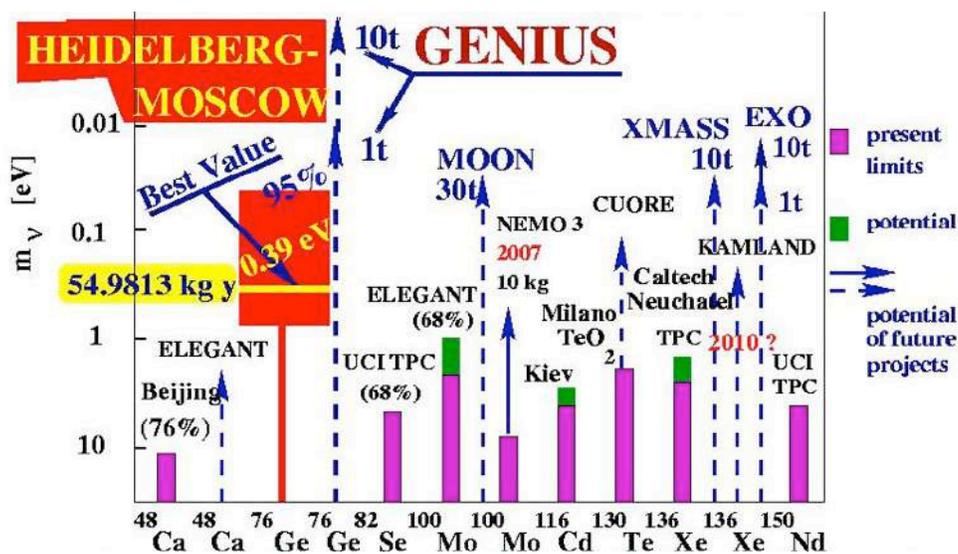


Figura 4. Estatus del experimento Heidelberg-Moscú y estatus y potencial de experimentos alternativos.

El experimento $0\nu\beta\beta$ más sofisticado hasta la fecha corresponde a la transición débil ${}^{76}\text{Ge}(0_{EB}^+ \rightarrow 0_{EB}^+)$ entre estados base (EB) del Germanio (vida media de 1.19×10^{25} años). Es interesante hacer notar que este experimento es de tipo activo, puesto que la fuente y el detector corresponden al mismo material. Un punto fundamental para nuestros propósitos es enfatizar que no puede ser realizado en laboratorios convencionales de superficie. Por el contrario, requiere de equipo localizado en minas o túneles a una profundidad de por lo menos 1,000 metros, bajo rocas suficientemente antiguas de tal modo de garantizar una drástica reducción del ruido de fondo, especialmente el provocado por los muones. Uno de estos laboratorios es el situado en el Gran Sasso, Italia, que satisface los criterios necesarios para llevar a cabo con éxito experimentos sobre la naturaleza de Majorana de los neutrinos. Recientemente, la colaboración Heidelberg-Moscú, en un experimento realizado en dicho laboratorio, ha reportado la observación del decaimiento ${}^{76}\text{Ge}(0_{EB}^+ \rightarrow 0_{EB}^+)$, correspondiente al proceso $0\nu\beta\beta$, con una precisión mayor a 6σ [Klapdor-Kleingrothaus et al. 2006a, 2006b]. La señal consiste en la aparición de un pico monocromático en el espectro de energías de los electrones finales, correspondiente al valor de Q de la reacción. La situación experimental se muestra en la Fig. 4. De este modo la existencia de neutrinos de Majorana parece haber sido probada; no obstante, todavía quedan muchas cuestiones por resolver, como la determinación de la magnitud precisa de la masa de Majorana de los neutrinos.

El valor de Q en los decaimientos nucleares corresponde a la diferencia entre la masa atómica del núcleo final y la del inicial, y se conoce con alta precisión. Existen dos mecanismos básicos responsables del efecto que estamos examinando: (i) una masa no-nula de los neutrinos y (ii) posibles corrientes derechas que aparecen en teorías supersimétricas. Este último mecanismo está caracterizado por dos parámetros, convencionalmente denotados por λ y η , que describen el acoplamiento de los leptones derechos a las corrientes bariónicas izquierdas y derechas, respectivamente. De este modo, la extracción de la magnitud de la masa de Majorana requiere información adicional. Al respecto, varias posibilidades han sido discutidas en la literatura. Una de las que ha recibido mayor atención recientemente es la relacionada con el decaimiento del ${}^{124}\text{Xe}$, cuya vida media es estimada en 10^{27} años) en el modo $0\nu\beta\beta$ y en su modo mixto de captura electrónica $0\nu\beta\beta/e$ [Hirsch et al. 1994, Klapdor-Kleingrothaus 2006c]. Estos procesos nucleares han probado ser mucho más sensibles a las corrientes derechas producidas por la supersimetría, que al efecto debido a la masa de los neutrinos. Se espera que el análisis de estos procesos, combinado con los del modo $0\nu\beta\beta$ en la reacción ${}^{76}\text{Ge}(0_{EB}^+ \rightarrow 0_{EB}^+)$, permita atacar exitosamente el problema de obtener la magnitud de la masa de Majorana del neutrino a partir de los datos experimentales.

2.7 FÍSICA MÁS ALLÁ DEL MODELO ESTÁNDAR

Como ya hemos visto, tanto el problema de la masa de los neutrinos, como su naturaleza de Dirac o Majorana motivan el estudio de posibles extensiones del Modelo Estándar. En general, en sus diferentes variantes, estas teorías dan preferencia a la existencia de neutrinos de Majorana, idea que es aplicada en los mecanismos que se han propuesto para explicar la generación de la masa de los neutrinos. El mecanismo más popular requiere neutrinos derechos con una masa muy alta, que al combinarlos con los neutrinos izquierdos generan la masa de Majorana y dan como resultado masas muy pequeñas para los neutrinos izquierdos, que son los que se han observado. Este es el mecanismo de *sube-baja* (“see-saw”). Es importante recalcar que en la mayoría de los escenarios

teóricos que utilizan esta idea, la escala de energía necesaria para producir los neutrinos derechos es demasiado alta para ser alcanzada por aceleradores de partículas tradicionales. Esto ha motivado que se contemple la posibilidad de obtener información experimental precisa utilizando otros métodos como, por ejemplo experimentos en laboratorios subterráneos. Existen varias maneras en que el proceso $0\nu\beta\beta$ puede ser entendido en términos de las teorías de extensión del modelo estándar. La observación de este modo permitiría en principio, además de determinar la naturaleza fermiónica de los neutrinos, discernir entre las diferentes posibilidades de física más allá del ME.

2.8 EL PROBLEMA DE LA MATERIA OSCURA

La descripción de la materia oscura requiere de la así llamada materia oscura fría, compuesta por partículas que tuvieron un comportamiento no relativista desde sus épocas muy tempranas en la evolución del universo, lo cual resulta posible siempre y cuando su masa en reposo sea suficientemente grande.

Esta condición es necesaria para que las inhomogeneidades primordiales detectadas en la CMB, del orden de 10^{-5} , puedan crecer con la suficiente rapidez para formar la estructura cosmológica que ahora observamos. Partículas suficientemente masivas provocan la formación de estructuras a escalas pequeñas, mientras que las estructuras a escalas mayores se forman a partir de aquellas. Esto se llama el paradigma abajo-arriba (“bottom-up”). La más impresionante demostración de que la idea de la materia oscura concuerda con lo observado en escalas cosmológicas son las simulaciones numéricas de N-cuerpos, siendo la llamada “Millenium Run” [Springel et al. 2005], la más completa realizada hasta la fecha. Junto con las evidencias obtenidas a partir de curvas de rotación, distribución de galaxias, etc., dichas simulaciones son una firme indicación en favor de la existencia de partículas de materia oscura fría.

2.8.1 EVIDENCIA DE MATERIA OSCURA EN GALAXIAS Y CÚMULOS DE GALAXIAS

La mejor evidencia de la existencia de materia oscura fría en galaxias proviene de las curvas de rotación obtenidas mediante la medición del corrimiento al rojo de la luz proveniente del gas caliente en movimiento orbital en las partes exteriores de cualquier galaxia. Bajo la suposición de que este gas caliente se encuentra orbitando alrededor del centro de la galaxia en trayectorias estables, puede establecerse una relación entre el corrimiento al rojo y la velocidad de rotación. Como se muestra en la Fig. 5, la velocidad de rotación como función del radio orbital se mantiene aproximadamente constante en las regiones exteriores al disco luminoso de las galaxias.

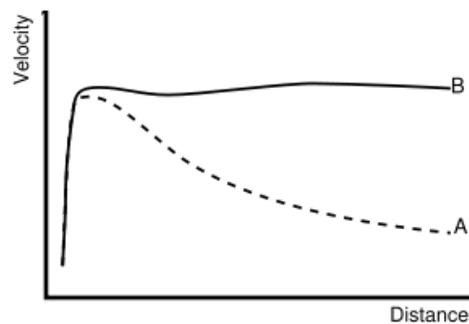


Figura 5. Curva de rotación de una galaxia espiral típica: (A) curva teórica y (B) curva observada.

Al relacionar las velocidades de rotación con el potencial gravitatorio que da sustento a las órbitas estables, es posible inferir la distribución de masa en las partes exteriores de cada galaxia. El resultado es que la mayor parte de la masa de una galaxia se encuentra fuera de su parte luminosa, y puede llegar a representar hasta 90% del contenido material total, imponiendo los límites $0.1 < \Omega_{MO} h^2 < 0.3$. Esto se muestra en la Fig. 6.



Figura 6. Imagen compuesta del cúmulo Bullet. La distribución de materia ordinaria, deducida de la emisión de rayos X, se muestra en rojo. La materia total, deducida de observaciones de lentes gravitacionales se muestra en azul.

Un fenómeno similar puede ser observado en cúmulos de galaxias. Las velocidades de las galaxias que los componen son tan altas que el equilibrio dinámico puede explicarse sólo si se supone la existencia de materia no-luminosa que produzca el pozo de potencial gravitatorio necesario para dar lugar a trayectorias estables dentro del cúmulo. Al ser los cúmulos de galaxias estructuras de mayor tamaño que una galaxia, resulta que la cantidad de materia oscura fría es aproximadamente 6 veces más que la de la materia bariónica.

Más recientemente, mediante el fenómeno de las micro-lentes gravitatorias (“microlensing”), han podido efectuarse mapeos del potencial gravitatorio en el cúmulo de galaxias IE0657-56. Este cúmulo representa la colisión de dos sub-cúmulos, y ha sido posible poner en evidencia que los pozos de potencial gravitatorio responsables de las micro-lentes gravitatorias se encuentran desfasados respecto a las concentraciones de gas caliente (materia bariónica) contenido originalmente en cada sub-cúmulo. Esto ha sido interpretado por la mayoría de los especialistas como una fuerte evidencia en favor de la existencia de una componente de materia oscura fría.

Las observaciones realizadas en galaxias y cúmulos de galaxias arriba descritas no implican por sí mismas que la materia no-luminosa presente en aquellos objetos sea de naturaleza no-bariónica. Sin embargo, esta conclusión es inevitable si se consideran las mediciones de elementos químicos primordiales en nubes de gas con baja metalicidad (es decir, con pocos elementos químicos pesados). Al ajustar los cálculos de nucleosíntesis, con base en las reacciones entre las partículas determinadas de acuerdo con el ME, en el contexto de un universo en expansión, es inevitable concluir que sólo el 4% del contenido material actual es de naturaleza bariónica. En consecuencia, se considera que la materia faltante en la dinámica de galaxias y cúmulos de galaxias es también de naturaleza no-bariónica.

2.8.2 EVIDENCIA DE MATERIA OSCURA A NIVEL COSMOLÓGICO

Aún cuando la evidencia de materia oscura al nivel de las galaxias y grupos de galaxias es contundente, ésta no permite decir algo sobre el contenido de materia oscura promedio en el universo a gran escala. Este análisis se logra mediante el estudio de la CMB, originada cuando los fotones se desacoplaron de la materia en el universo temprano y fue predicha por Gamow en 1948. Observada accidentalmente por Penzias y Wilson en 1965, luego de varias décadas de observación se sabe que la CMB sigue con extraordinaria precisión un espectro de cuerpo negro con una temperatura 2.726 °K [Spergel et al. 2006], tal y como se muestra en la Fig. 7.

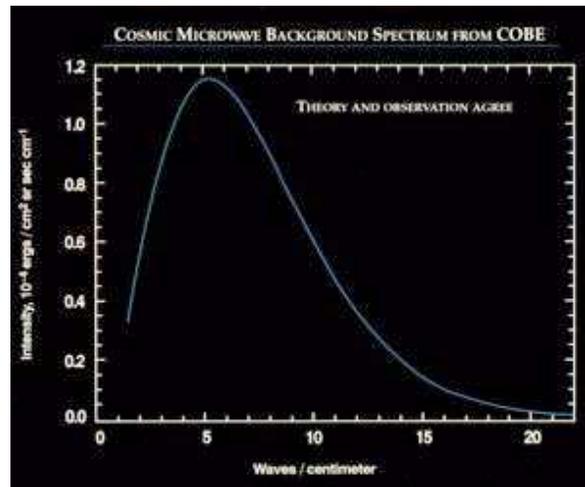


Figura 7. Espectro de la radiación cósmica de fondo (CMB).

Asimismo, a partir de los datos de la misión WMAP (“Wilkinson Microwave Anisotropy Probe”) [Hinshaw et al. 2008], ha podido determinarse que dicha radiación es isotrópica al nivel de $\Delta T(\theta, \phi)/T \approx 10^{-5}$, lo que se muestra pictóricamente en la Fig. 8.

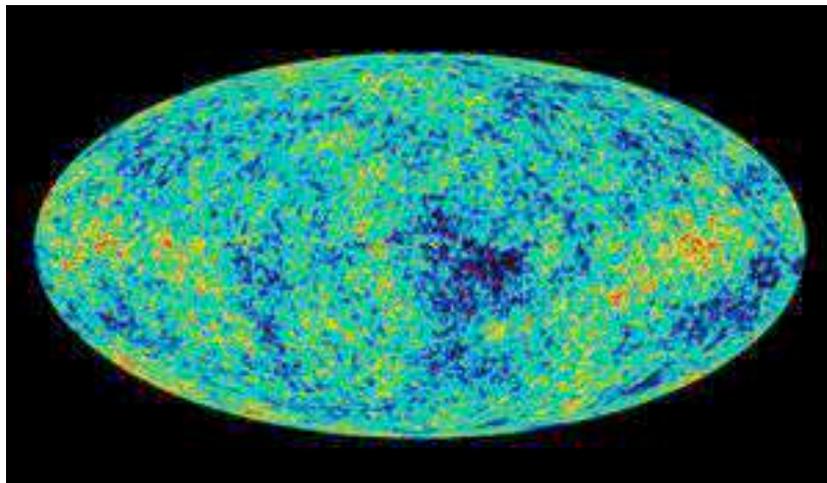


Figura 8. Anisotropía de la radiación cósmica de fondo obtenida del WMAP e indicada por los diferentes colores de la gráfica.

El estudio de estas minúsculas anisotropías de la CMB permite poner a prueba de una manera muy precisa diversos modelos cosmológicos y establecer límites muy estrictos a sus parámetros. La anisotropía en la distribución de temperatura $\delta T(\theta, \phi)$, en la dirección determinada por los ángulos (θ, ϕ) se parametriza como

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{m=-l}^{m=l} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi) , \quad (9)$$

donde $Y_{lm}(\theta, \phi)$ son los esféricos armónicos. La variancia C_l de a_{lm} se define como

$$C_l = \frac{1}{2l+1} \sum_{m=-l}^{m=l} |a_{lm}|^2 \quad (10)$$

y es la que usualmente se grafica a partir de las observaciones, como puede verse en la Fig. 9. Dado un modelo cosmológico con varios parámetros es posible encontrar el mejor ajuste que reproduce la gráfica observacional de C_l . Del análisis del WMAP [Spergel et al. 2006] se obtienen las siguientes abundancias para bariones $\Omega_b h^2$ y materia $\Omega_M h^2$ en el universo

$$\Omega_b h^2 = 0,024 \pm 0.001 , \quad \Omega_M h^2 = 0,14 \pm 0.02 \quad (11)$$

que ponen claramente en evidencia el enorme déficit de materia bariónica. Si se toman en cuenta los datos de la CMB correspondientes a escalas menores, en conjunción con mediciones astronómicas del espectro de potencias de la estructura a gran escala, junto con la contribución del “Lyman-a-forest”, (es decir, de la suma de las líneas de absorción que surgen de la transición a-Lyman de un átomo de hidrógeno neutro en el espectro de galaxias y quasares distantes,) las cotas se transforman en

$$\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0009 , \quad \Omega_M h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009} \quad (12)$$

El valor para la abundancia bariónica es consistente con las predicciones de la nucleosíntesis a partir del Big-Bang que dan $0.018 < \Omega_b h^2 < 0.023$.

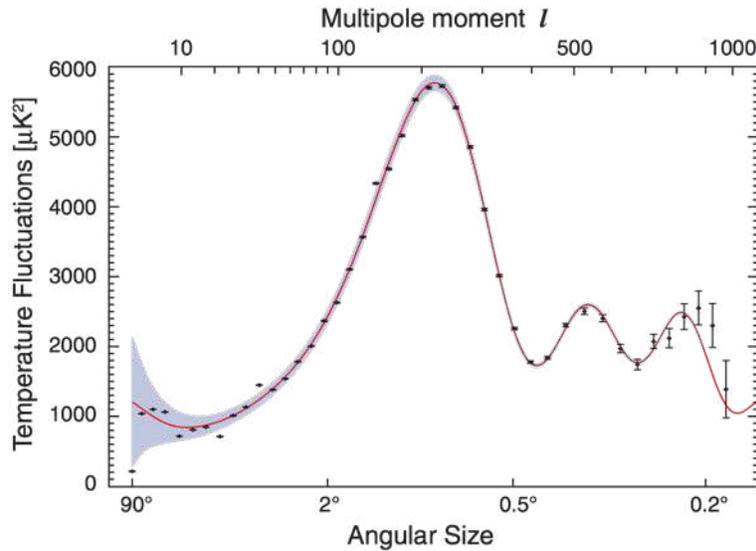


Figura 9. Espectro de la anisotropía de la temperatura de la CMB en función de la escala angular (o de los momentos multipolares).

2.9 CANDIDATOS PARA MATERIA OSCURA

Los candidatos más plausibles para la materia oscura fría se conocen como WIMPs (de sus siglas del inglés “Weakly Interacting Massive Particles”) y son partículas estables o de muy larga vida que quedaron como remanentes del Big Bang en cantidades suficientes como para explicar la densidad de materia de fondo en el universo. El modelo más favorecido para la materia oscura es el CDM (de las siglas del inglés correspondientes a “Cold Dark Matter”). Los WIMPs se aglomeran gravitacionalmente con la materia ordinaria en los halos galácticos por lo que en particular deben estar presentes en nuestra galaxia. De este modo es de esperar un flujo de ellas hacia la Tierra, lo que provee la posibilidad de una detección (directa o indirecta) de dichas partículas, especialmente en laboratorios subterráneos.

Entre los posibles candidatos a WIMP están las partículas supersimétricas más livianas, en particular, el neutralino (que forma parte de la familia de los compañeros supersimétricos del fotón, del Z^0 y de dos bosones de Higgs neutros). Se trata de una partícula de espín 1/2, neutra, sin interacciones fuertes. Aquí es conveniente comentar que con la puesta en marcha del LHC, en el CERN, la búsqueda de partículas supersimétricas también tendrá lugar en experimentos con aceleradores. Sin embargo, aún cuando los neutralinos fueran descubiertos por este medio, sólo la observación directa de ellos, debido a su presencia en nuestro halo galáctico, constituiría una evidencia de su comportamiento como materia oscura. De hecho, la existencia de experimentos presentes y proyectados para detectar WIMPs en laboratorios subterráneos origina una competencia interesante con los experimentos en aceleradores para detectar las primeras partículas supersimétricas. Los detalles fenomenológicos de la interacción del neutralino con la materia ordinaria (nucleones en particular) se obtienen estudiando al así llamado escenario de supergravedad mínimo [Nilles 1984] en cuatro dimensiones, que presenta una escala de gran unificación $M_{GU} \approx 2 \times 10^{16} GeV$ y que incluye supergravedad. Esto hace contacto con teorías recientes de unificación en dimensiones extras como las supercuerdas [Green et al 1987, Polchinski 1998] y la teoría M [Schwartz 1999], puesto que la supergravedad en cuatro dimensiones constituye el límite de bajas energías de ambas. A continuación consideramos con un poco más de detalle algunos candidatos específicos.

2.9.1 NEUTRINOS ACTIVOS

Los neutrinos fueron las primeras partículas en ser consideradas como candidatas de materia oscura, debido fundamentalmente a que su existencia es un hecho comprobado. Sin embargo, es posible demostrar que los límites experimentales para las masas de los neutrinos conducen a la condición $\Omega_{\nu} h^2 \leq 0.07$ para la densidad de neutrinos primordiales, lo que significa simplemente que los neutrinos no son lo suficientemente abundantes como para explicar todo el contenido de materia oscura del universo. Por otro lado, el hecho que los neutrinos son partículas relativistas prácticamente no interactuantes conduce a modelos cosmológicos donde la dominancia de los neutrinos implicaría que las estructuras grandes se formarían primero [Bond et al. 1980] y su subsecuente fragmentación daría lugar a las estructuras más pequeñas. Esto no es consistente con las observaciones. Por ejemplo, nuestra galaxia es más antigua que el Grupo Local. De este modo, los neutrinos quedan descartados como candidatos viables para explicar la materia oscura en su totalidad, pudiendo, eso sí, aportar una pequeña contribución a ésta.

La presencia de neutrinos a escalas cosmológicas puede ser detectada a través de observaciones en la evolución de la estructura a tales escalas, como la anisotropía de CMB, la distribución de galaxias, etc. De esta forma también pueden establecerse cotas al valor de la masa del neutrino más pesado. Las observaciones más recientes indican que $m_{\nu} < 2 eV$.

Además de la evidencia indirecta del fondo cósmico de neutrinos es necesaria una observación directa del mismo, lo cual representa un reto experimental formidable. Su consecución requeriría de tecnología nueva y tendría una importancia enorme para la Cosmología, tal vez superando la correspondiente a la CMB, ya que sería una prueba observacional más para entender las interacciones de partículas en el universo temprano mucho antes del desacoplamiento de la radiación y la materia.

2.9.2 AXIONES

Estas partículas de espín cero fueron introducidas como los pseudo-bosones de Goldstone que aparecen en la ruptura espontánea de CP en las interacciones fuertes. Su masa esperada es muy pequeña, del orden de 10^{-5} eV y se supone que tienen interacciones muy débiles con la materia ordinaria, lo que, entre otras cosas, quiere decir que no estuvieron en equilibrio térmico en el universo temprano y siempre fueron no-relativistas. El cálculo de la densidad primordial de los axiones es incierto y depende mucho de las suposiciones sobre los mecanismos de producción. Sin embargo, es posible hallar rangos aceptables donde los axiones satisfacen todas las restricciones observacionales actuales, por lo que siguen representando un candidato viable para la materia oscura [Rosenberg y van Bibber 2000]. Actualmente existen varios experimentos destinados a detectar los axiones, con base en su abundancia estimada de 10^{13} axiones por centímetro cúbico en las interacciones de la tierra.

2.9.3 WIMPs. NEUTRALINOS

Los WIMPs aún no han sido detectados e incluyen una gran variedad de partículas asociadas a extensiones del modelo estándar. En general, debieron haber estado en equilibrio térmico con la materia estándar en el universo temprano y se desacoplaron cuando se volvieron no-relativistas. De

este modo contribuyen a la materia oscura fría. Poseen sólo interacciones gravitacionales o, a lo más, interacciones del orden de las interacciones débiles, por lo que la estimación de sus secciones eficaces produce un resultado de $\sigma \approx \alpha^2 / M_W^2$, donde α es la constante de estructura fina y $M_W \approx 100 \text{ GeV}$ es la escala de la interacción débil. Esto produce secciones eficaces del orden de pico-barns y la estimación de la respectiva densidad de materia primordial, que es inversamente proporcional a la sección eficaz de aniquilación, resulta cercana al valor requerido para $\Omega_{MO} h^2$. Por otro lado, como los WIMPs en general interactúan con la materia estándar, debemos esperar su presencia a escalas galácticas, en particular en la Vía Láctea, lo que proporciona la posibilidad de su detección directa mediante la dispersión con núcleos y la medición del retroceso del núcleo correspondiente.

La supersimetría introduce nueva física precisamente a la escala de la interacción débil y predice que el neutralino es la partícula supersimétrica más liviana. Carece de carga eléctrica y de color y es estable en el contexto de modelos que conservan la paridad R, como ocurre en el Modelo Mínimo Supersimétrico Estándar Constraído (mSUGRA) [Lane et al. 1994], donde varias suposiciones teóricas se introducen en el Modelo Mínimo Supersimétrico Estándar (MSSM) con el fin de reducir sustancialmente el número de parámetros del mismo (alrededor de 100) [Battaglia et al. 2003]. El neutralino es uno de los candidatos más serios para la materia oscura. Como ya se mencionó, los cuatro neutralinos en el MSSM son espinores de Majorana y corresponden a autoestados de masa resultantes de los compañeros supersimétricos del fotón, del Z^0 y de los bosones de Higgs neutros H_1^0 y H_2^0 . El más liviano es estable debido a la conservación de la paridad R, que nos dice que una s-partícula debe decaer por lo menos en un par de s-partículas. Las interacciones más relevantes en relación con los efectos de materia oscura son la autoaniquilación (el neutralino es su propia antipartícula) y la dispersión elástica con nucleones [Jungman et al. 1996].

Otros candidatos supersimétricos son los s-neutrinos [Ibáñez 1984], los gravitinos [Pagels y Primack 1982, Weinberg 1982, Ellis et al 2003] y los axinos [Rajagopal et al. 1991, Chun et al. 1992, Covi et al 1999]. Para una descripción más detallada de éstos y de candidatos adicionales ver por ejemplo [Muñoz 2004, Bertone et al. 2005].

Para resumir, es claro que el problema de la materia oscura, de gran relevancia por sí mismo, está en estrecha relación con la gran mayoría de las teorías que se encuentran en la frontera del conocimiento de la física de altas energía, permitiendo así una exploración observacional y experimental de la física más allá del Modelo Estándar.

2.10 DETECCIÓN DE MATERIA OSCURA

La siguiente discusión sobre la búsqueda de materia oscura se concentrará en los llamados WIMPs, que es el caso más estudiado en la literatura. El objetivo final es obtener evidencia directa e indirecta de la existencia de materia oscura fría [Fiorucci 2004].

2.10.1 DETECCIÓN DIRECTA

La observación directa consiste en el estudio de la dispersión de las partículas candidatas en un detector. Está basada en la aglomeración gravitacional de los WIMPs en los halos galácticos, en particular, en nuestra galaxia. Las observaciones indican que la Vía Láctea contiene cantidades importantes de materia oscura, con una distribución aproximadamente esférica. En la posición del

Sol, a unos 8.5 kpc del centro de la Galaxia, se estima una densidad de 3×10^{-3} WIMPs por centímetro cúbico, para masas del WIMP de alrededor de 100 GeV y con velocidades de alrededor de 220 km/s (aproximadamente la velocidad del Sol). Esto produce un flujo de materia oscura de 10^5 partículas por centímetro cuadrado y por segundo. Aunque este número es aparentemente grande, el hecho de que los WIMPs interactúan débilmente con la materia ordinaria hace muy difícil su detección [Schnee 2006].

Para un tipo de WIMP determinado, se debe escoger el material adecuado con el que se construirá el detector, el cual deberá registrar un determinado espectro de energías, de acuerdo a las predicciones de un modelo en particular. Además se espera una modulación diaria y una anual en la detección de los WIMPs, debido a la velocidad relativa del Sol alrededor del centro de la Vía Láctea, de la rotación de la Tierra y del movimiento de ésta última alrededor del Sol.

Para dar una idea de lo difícil que es detectar un WIMP, la estimación teórica indica que habrá un evento por kilogramo de material del detector por semana. Las posibilidades de detección se incrementan con el tamaño del material del detector y con la disminución de la contaminación ambiental, tales como la radioactividad natural o la interacción de los WIMPs con otras partículas.

Existen cerca de 25 experimentos activos en la búsqueda de los candidatos a WIMPs, con la característica común de que todos intentan bloquear el ruido proveniente de otros fenómenos utilizando laboratorios subterráneos y eliminando señales provenientes de interacciones conocidas. Otros 8 experimentos que serán puestos en funcionamiento en el futuro cercano, pueden ser clasificados según la técnica que utilizarán: detectores criogénicos y detectores con gases nobles líquidos. Se espera que estos futuros detectores tengan una sensibilidad hasta cuatro órdenes de magnitud mayor que los experimentos actualmente en funcionamiento.

La colaboración DAMA [Bernabei et al. 2000, 2003] ha reportado recientemente datos que favorecen la existencia de una señal de WIMPs, pero el resultado es controversial y no ha sido confirmado por experimentos alternativos como CDMS, EDELWEISS y ZEPLIN [Abusaidi et al. 2000, Abrams 2002, Benoit et al. 2001, 2002, Smith et al. 2002].

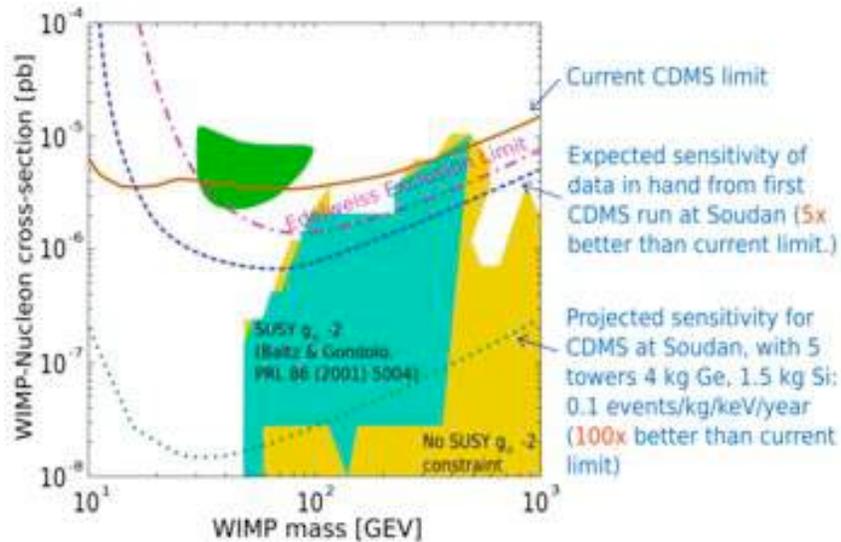


Figura 10. Espacio de parámetros proporcionados por los experimentos CDMs. El resultado de DAMA se muestra en color verde y está excluido por estas observaciones.

Aun cuando hemos descrito las bondades de la materia oscura fría, su existencia y particularidades siguen siendo ampliamente discutidas dentro de las comunidades de astrónomos, astrofísicos y cosmólogos. Entre las observaciones que no han encontrado una explicación satisfactoria tenemos las siguientes:

1. Exceso de galaxias satélites. Se han observado galaxias pequeñas que están ligadas gravitatoriamente a galaxias mayores. De acuerdo con los resultados numéricos, el número predicho de tales galaxias satélites es, al menos, 10 veces mayor al observado.
2. En las observaciones de las curvas de rotación muy cerca de los centros galácticos se encuentra que en ellos la densidad de materia no es tan alta como los modelos de materia oscura fría parecen predecir.
3. Observaciones en el halo de materia oscura de la Vía Láctea sugieren que éstos tienen simetría esférica, lo cual parece no concordar con los resultados numéricos de materia oscura fría.
4. Sobre la colisión antes mencionada de los cúmulos de galaxias IE0657-56, hay estudios que sugieren que tal evento, con las características particulares que presenta, tiene una probabilidad extremadamente pequeña ($< 10^{-7}$) en las simulaciones numéricas de materia oscura fría.

Es muy posible que varias de las objeciones arriba mencionadas al modelo de materia oscura fría puedan ser resueltas por propiedades adicionales de la partícula que finalmente constituya la materia oscura y que se manifiesten sólo en escalas pequeñas o en su interacción con ellas mismas y/o con las partículas bariónicas [The Millenium Simulation Project; Farrar, G. y Rosen, R.A. 2006, Avila-Reese, V. et al. 2001, Fellhauer, M., et al. 2006, Sánchez-Salcedo, F. J. et al. 2006].

2.10.2 DETECCIÓN INDIRECTA

La detección indirecta de WIMPs se basa en la búsqueda de evidencias de la aniquilación de las partículas candidatas en diversos estados finales, por ejemplo, en pares de fotones o en un fotón y un bosón Z^0 , que a su vez decaiga en neutrinos o pares de leptones. Dichas reacciones han sido bastante estudiadas para el caso en el cual se identifica el WIMP con el neutralino más ligero del MSSM [Jungman et al. 1996, Berstrom et al. 2001].

Aunque la densidad de materia oscura es muy baja en la vecindad de nuestro planeta, tal que la probabilidad de aniquilación resulta demasiado pequeña, se cree que existen sitios especiales donde la densidad de materia oscura puede ser más alta. Tal podría ser el caso del centro de la galaxia, o incluso el centro del Sol o de los planetas.

En la actualidad existen varios experimentos dedicados a buscar fuentes de rayos gama que pudieran provenir de la aniquilación de materia oscura. Los mismos utilizan una variedad de técnicas experimentales, con detectores ubicados en el espacio o sobre la superficie terrestre. Entre ellos podemos enumerar los siguientes:

1. HESS, Whipple y CANGAROO que emplean telescopios atmosféricos de Cherenkov. En particular, HESS ha reportado eventos como candidatos a materia oscura que, en un principio, parecían provenir del centro de nuestra galaxia. Sin embargo, finalmente se ha considerado más probable que fueran emitidos por una fuente astrofísica [Aharonian et al. 2004].

2. CACTUS que se ha enfocado a estudiar rayos gama provenientes de una galaxia enana conocida como DRACO. Se cuenta con evidencia preliminar positiva, aunque no conclusiva.
3. GLAST que es un experimento de nueva generación basado en la detección de rayos gama en el espacio, mediante un satélite. Tomando en cuenta los límites actuales para el flujo de rayos gama con energías mayores a 2 GeV se espera que puedan detectarse una decena de eventos de materia oscura.

2.11 NEUTRINOS ESTÉRILES

El descubrimiento de las masas de los neutrinos en los experimentos de oscilaciones de neutrinos sugiere la existencia de neutrinos *estériles* (o de mano derecha), que no participan directamente en ninguna de las interacciones del Modelo Estándar, pero que interactúan a través de su mezcla con los neutrinos ordinarios. El término neutrino estéril fue introducido por Bruno Pontecorvo [Pontecorvo 1967], quien fuera un precursor en el estudio de una serie de fenómenos que han dominado la física de neutrinos como, por ejemplo, las oscilaciones de neutrinos en el vacío, la violación del número leptónico, el decaimiento beta doble y procesos raros del tipo $\mu \rightarrow e\gamma$, por mencionar algunos.

Los neutrinos estériles figuran en una gran variedad de problemas contemporáneos de física de partículas, astrofísica y cosmología [Kusenko 2006] y surgen de manera natural en modelos de generación de masas. Uno de los más populares es el mecanismo de “see-saw” [Gell-Mann et al. 1979, Yanagida 1979, Mohapatra y Senjanovic 1980] mencionado anteriormente y que resumimos a continuación. En el escenario más simple, la pequeña masa de un neutrino de Majorana puede comprenderse, en el límite de baja energía, considerando el valor de expectación en el vacío electrodébil del operador no renormalizable de menor dimensión en el ME $(1/M)HHLL$. Este operador viola $B-L$, así que su origen a altas energías podría estar ligado de modo natural al origen de la asimetría bariónica como se indica más adelante. Tal operador es la base intuitiva del mecanismo “see-saw”, de acuerdo con el cual, en un modelo que sea una extensión mínima del ME, las masas de los neutrinos se deben a la existencia de neutrinos de Majorana superpesados estériles \bar{N}_i , $i = 1, 2, 3$. Dichos neutrinos son singuletes en el ME y permiten generar términos de masa para los neutrinos izquierdos vía el potencial

$$h_{ij} \bar{N}_i L_j H + \frac{1}{2} M_i N_i N_i + h.c. , \quad (13)$$

De este modo, después del rompimiento espontáneo de la simetría, se tendrá la matriz efectiva de masas $m_\nu \approx -m_D^T M^{-1} m_D$, $m_D = h\langle H \rangle$. Los parámetros en esta matriz son los observables en los diferentes experimentos con neutrinos de baja energía: tres masas, tres ángulos, y tres fases de violación CP. Para que estas últimas estén presentes es claro que los coeficientes h_{ij} deben ser cantidades complejas.

La existencia de neutrinos estériles era una de las posibles explicaciones [de Gouvea 2005, Sorel et al. 2004, Palomares-Ruíz et al 2005] para los resultados del experimento LSND (Liquid Scintillator Neutrino Detector) [Athanassopoulos et al. 1996, 1998a, 1998b], en los Álamos, el cual

indicaba la existencia de oscilaciones de neutrinos, pero para diferencias de los cuadrados de las masas distintas a las de los neutrinos solares y a las de los atmosféricos. Dicha controversia ha sido examinada por el experimento MiniBoone (Booster Neutrino Experiment), en Fermilab. Recientemente esta última colaboración ha reportado una evidencia concluyente de que los resultados de LSND no pueden ser explicados mediante la oscilación de dos tipos de neutrinos, lo que descarta que existan neutrinos estériles con masas en la región considerada por LSND [MiniBoone Collaboration 2007]. Sin embargo, la cuestión de la existencia de neutrinos estériles permanece abierta ya que los resultados de MiniBoone y LSND pueden hacerse compatibles, por ejemplo, con base a la violación de CP presente en el llamado esquema (3+2) para las masas de cinco neutrinos [Maltoni et al. 2007].

El número de neutrinos estériles no se conoce, pero si existieran y alguno de ellos tuviera una masa de unos cuantos keV [Shrock 1981], podría dar cuenta de la materia oscura del universo [Seljak et al. 2006, Viel et al., Abazajian y Koushiappas 2006, Bezrikov y Shaposnikov 2006]. Al parecer, cuanto menos 2 neutrinos estériles son necesarios para explicar el origen de la masa de los neutrinos activos, siendo posible que en un modelo con 3 neutrinos estériles, el tercero participe como materia oscura en el universo. Este neutrino puede ser lo suficientemente masivo como para ser considerado materia oscura tibia (“warm dark matter”). Las escalas a las cuales se observaría su presencia en la formación de estructura son proporcionales a su temperatura e inversamente proporcionales a su masa, por lo que una temperatura suficientemente baja o una masa suficientemente alta podrían resultar apropiadas. Sin embargo, la ausencia de rayos X provenientes del decaimiento de neutrinos estériles impone una cota superior en la masa de 5.8 keV. Por su parte, las restricciones cosmológicas establecen una cota inferior de 14 keV, por lo que un neutrino estéril parece estar descartado como la componente mayor de la materia oscura cosmológica.

Neutrinos estériles presentes en la materia oscura podrían ser también el origen de la luz estelar [Dodelson y Widrow 1994, Abazajian et al. 2001, Dolgov y Hansen 2002, Shi y Fuller 1999, Kishimoto et al 2006, Asaka et al. 2005]. Tales neutrinos habrían provocado una reionización del universo suficiente como para iluminar las estrellas entre 20 y 100 millones de años después del Big-Bang [Biermann y Kusenko 2006, Mapelli et al. 2006, Stasielak et al. 2006]. Esta teoría [Smith et al 2006] podría arrojar luz sobre diferentes interrogantes astronómicos que aún permanecen sin una explicación, considerando que los neutrinos estériles se pueden producir durante el Big-Bang en la misma cantidad que la materia oscura.

Los pulsares (o estrellas de neutrones rápidamente rotantes) son generados a partir de la explosión de una supernova tipo II y son conocidos por tener velocidades de traslación elevadas, del orden de centenares de kilómetros por segundo. El origen del impulso inicial de los pulsares permanece desconocido; un mecanismo factible se basa en la emisión asimétrica de neutrinos estériles inducida por las oscilaciones en un medio con un campo magnético intenso [Kusenko 2004, Barkovich et al. 2004]. Finalmente, los neutrinos estériles ayudarían a explicar la ausencia de antimateria siempre que, en el universo temprano, pudieran haber “robado” número leptónico del plasma de fondo y, en una época posterior, la falta de número leptónico fuera convertida en un número bariónico no nulo. La asimetría resultante entre bariones (como los protones) y antibariones (como el antiprotón) sería la razón por la cual en el universo actual no existe antimateria.

2.12 BARIOGÉNESIS Y LEPTOGÉNESIS

El origen del valor tan pequeño de la asimetría bariónica puede ser entendido a partir de las leyes de la física con base en las siguientes tres condiciones mínimas que debieron ser satisfechas en el universo temprano, y que son conocidas como las condiciones de Sakharov [Sakharov 1967]: (1) debió violarse la conservación del número bariónico B , (2) debió violarse la invariancia bajo C y CP , y (3) la generación del exceso de bariones sobre antibariones debió ocurrir fuera del equilibrio térmico con el plasma de fondo.

La violación de CP está presente en las interacciones de los quarks a través de la fase en la matriz de CKM, y se manifiesta en el decaimiento de los kaones neutros. Por su parte, C no es conservada por las interacciones débiles. Se sabe además que el número bariónico no es realmente una cantidad conservada en el Modelo Estándar. Su conservación, al igual que la del número leptónico L , es violada a nivel cuántico debido a la degeneración (infinita) de configuraciones mínimas de energía (vacíos) de las teorías de norma no abelianas, que están clasificadas mediante cargas topológicas. La transición entre estos mínimos mediante el efecto túnel corresponde al denominado proceso de *esfalerones* y produce cambios en el número bariónico y leptónico, pero conservando estrictamente la combinación $B - L$. A temperaturas por debajo de la transición de fase electrodébil, este proceso está suprimido exponencialmente por un factor del orden de $\exp(-16\pi/g^2)$. No obstante, para temperaturas más altas la supresión desaparece, proveyendo un escenario interesante para la creación de la asimetría bariónica [Cohen et al. 1993].

Desafortunadamente, el mecanismo descrito requiere que la transición de fase electrodébil sea de primer orden, lo cual sólo ocurriría si el bosón de Higgs fuese más ligero que unos 80 GeV. La cota actual se encuentra por encima de 114 GeV, lo que crea dificultades para el éxito de este mecanismo. Incluso en el caso de que la transición de fase fuese eficiente, debido a que la violación de CP en el ME es demasiado pequeña, la asimetría generada en todo el proceso tiende a ser insuficiente.

La existencia de nueva física, como supersimetría; nuevas interacciones capaces de generar procesos que violen el número bariónico a altas temperaturas, como en las teorías de unificación [Mohapatra 2003]; la existencia de nuevas partículas como materia oscura; etc., podría cambiar esta conclusión, ya que pueden afectar las condiciones para la transición de fase, además de generar número bariónico de manera independiente [Kolb 1990] y, eventualmente, introducir mayores fuentes de violación de CP . Es precisamente en esta dirección donde los resultados de los experimentos subterráneos con neutrinos podrían aportar información vital.

El potencial descubrimiento de la violación de CP en el sector leptónico podría aportar además información importante para una mejor comprensión del origen de la condición inicial que ulteriormente generó la abundancia observable de materia en el universo, vía el proceso denominado leptogénesis térmica [Fukugita y Yanashida 1986, Pascoli et al. 2006]. Este mecanismo aprovecha que los esfalerones, al conservar $B - L$, pueden transformar un exceso de número leptónico en un exceso de número bariónico. Además, como ya se mencionó, la presencia de neutrinos pesados (estériles) facilita la generación de una asimetría leptónica.

La posibilidad de conectar el mecanismo “see-saw” para la generación de masas descrito previamente, con el origen de la abundancia de bariones, surge de que los neutrinos estériles tienen dos canales de decaimiento distintivos $N \rightarrow l + \bar{N}$ y $N \rightarrow \bar{l} + N$, controlados ambos por los acopla-

mientos de Yukawa y sus complejos conjugados, respectivamente. El proceso ocurre a temperaturas en las cuales el neutrino pesado (estéril) es no relativista y sus productos son inyectados fuera de equilibrio térmico. Debido a las fases de violación CP las razones de decaimiento de ambos canales serán diferentes, generando de este modo un exceso de leptones sobre antileptones, esto es un número leptónico η_L , el cual será después procesado por los esfalerones y convertido parcialmente en número bariónico, tal que $\eta_B \approx -(28/79)\eta_L$.

La primera contribución importante a la asimetría leptónica surge de la interferencia entre los procesos a nivel árbol y a un lazo que contribuyen al decaimiento, y está dominada por la contribución del neutrino derecho (estéril) más ligero de masa M_1 . La asimetría leptónica final depende del parámetro de asimetría CP [Fukugita y Yanagida 1986, Covi et al. 1996, Buchmüller y Plümacher, 1998]

$$\begin{aligned} \varepsilon &\equiv \frac{\Gamma(N \rightarrow l + H) - \Gamma(N \rightarrow \bar{l} + \bar{H})}{\Gamma_N} \approx -\frac{3}{16\pi} \frac{M_1}{\langle H \rangle^2} m_{\nu_3} \delta_{eff} \\ &\approx -1 \times 10^{-6} \left(\frac{M_1}{10^{29} \text{ GeV}} \right) \left(\frac{m_{\nu_3}}{0.05 \text{ eV}} \right) \delta_{eff}, \end{aligned} \quad (14)$$

donde la fase efectiva de violación de CP está dada por

$$\delta_{eff} = \frac{\text{Im} \left[h_{13}^2 + \frac{m_{\nu_2}}{m_{\nu_3}} h_{12}^2 + \frac{m_{\nu_1}}{m_{\nu_3}} h_{11}^2 \right]}{|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{13}|^2}. \quad (15)$$

La asimetría leptónica está relacionada también con el número de grados de libertad efectivos g^* al tiempo de la leptogénesis ($g^* \approx 10^2$) y con la dilución producida por los procesos en equilibrio k , la cual sólo depende de las propiedades del espectro de los neutrinos ligeros. Con estas cantidades se predice la asimetría leptónica total por fotón

$$\eta_L \approx 7 \frac{\varepsilon \kappa}{g^*} \approx 10^{-9} \times \delta_{eff} \left(\frac{M_1}{10^{10} \text{ GeV}} \right), \quad (16)$$

con una dilución típica de $\kappa \approx 10^2$. La asimetría bariónica procesada por los esfalerones será entonces

$$\eta_B \approx 3 \times 10^{-10} \times \delta_{eff} \left(\frac{M_1}{10^{10} \text{ GeV}} \right). \quad (17)$$

Así, la concordancia con las observaciones depende fuertemente de qué tan grande sea la fase de violación de CP y del valor preciso del parámetro de dilución.

La condición de generación fuera de equilibrio a temperaturas $T \approx M_1$, implica que la razón de decaimiento del neutrino pesado debe ser más pequeña que la razón de expansión del universo, lo cual se cumple sólo si

$$\tilde{m}_{\nu 1} \equiv h_{1k} h_{1k}^+ \frac{|\langle H \rangle|^2}{M_1} < 2 \times 10^{-3} eV \quad (18)$$

En el caso contrario la asimetría leptónica puede ser diluida, aunque el efecto aparece sólo como una supresión en la ley de potencias que puede compensarse con el incremento en M_1 y, por tanto, en la temperatura. Sin embargo, para teorías supersimétricas, temperaturas mayores que $10^9 GeV$, pueden ser realmente problemáticas. Un universo tan caliente puede producir demasiados gravitinos, más allá de las cotas permitidas, con consecuencias catastróficas para la nucleosíntesis primordial [Kawasaki et al 2004]. Además, si la condición (18) se viola de modo importante, aparece otro efecto que puede contribuir a la dilución de la asimetría leptónica: El intercambio de neutrinos pesados (estériles) genera procesos equilibrantes en los canales de leptones y Higgs que, a su vez, violan el número leptónico, contrarrestando los excesos generados por el decaimiento de N_1 .

Este efecto produce una supresión exponencial, lo cual implica una restricción muy fuerte sobre el parámetro $\tilde{m}_{\nu 1}$, y sobre las masas de los neutrinos ligeros. Por ejemplo, si uno supone la jerarquía normal, $m_{\nu 1,2} < m_{\nu 3}$ se obtiene la condición $m_{\nu 3} \leq 0.2 eV$ que es notablemente consistente con la escala para las oscilaciones atmosféricas [Buchmüller et al. 2003]. Por otro lado, si $\tilde{m}_{\nu 1} < 10^{-5} eV$, entonces la producción de N_1 estará suprimida, generandose un exceso de leptones considerablemente pequeño. Esto implica la cota inferior $m_{\nu 3} > 10^{-5} eV$.

Una alternativa a la leptogénesis térmica, que acabamos de describir, surge si el inflatón decae preferentemente en pares de neutrinos pesados y subsecuentemente estos decaen generando un exceso de leptones. En este escenario, la entropía del baño térmico está ligada también a los neutrinos derechos y resulta

$$\eta_L \cong -\frac{3}{2} \varepsilon \frac{T_R}{m_\phi}, \quad (19)$$

lo cual permite que el mecanismo funcione bien aún a temperaturas de recalentamiento T_R tan bajas como $10^6 GeV$, siempre que $m_{\nu 3} > 0.01 eV$ en los modelos η_B supersimétricos. Por supuesto, el éxito de la leptogénesis requiere que los parámetros determinados a bajas energías sean justo los adecuados para producir la abundancia η_B observada.

2.13 LOS NEUTRINOS COMO SONDAS ASTROFÍSICAS

2.13.1 FUENTES Y FLUJOS DE NEUTRINOS ASTROFÍSICOS

La astrofísica de altas energías clásica interpreta todos los procesos astrofísicos como electromagnéticos. Los modelos electromagnéticos han sido muy exitosos en describir la producción de rayos gama (a escalas de TeV) en diferentes objetos. Sin embargo, sólo la detección de neutrinos de

altas energías puede apuntar hacia la existencia de procesos hadrónicos en objetos astrofísicos. Por neutrinos de altas energías nos referimos a aquellos que están por encima del fondo de neutrinos atmosféricos. Debido a la forma del espectro de energía de los neutrinos atmosféricos, se espera empezar a ver neutrinos astrofísicos a energías por encima de 1 TeV. Sin embargo, este umbral puede cambiar un poco al tomar en cuenta la contribución de neutrinos producto del decaimiento de sabores pesados a energías de 10-100 TeV.

Ahora bien, en vista de lo anterior nos podríamos preguntar: ¿Qué ventajas tiene la detección de neutrinos astrofísicos comparada con la detección de rayos gama con energías del orden de TeV, la cual es experimentalmente más fácil?. Como ya se mencionó, la respuesta es que el universo no es transparente a los rayos gama de altas energías. Aun en ausencia de materia y campos locales de fotones, los rayos gama son absorbidos por su interacción con la CMB y con el IRB. De este modo, pueden existir fuentes de neutrinos astrofísicos rodeadas de altas densidades de materia, de campos intensos de fotones o simplemente muy alejadas de nosotros.

Hay varios tipos de posibles fuentes puntuales de neutrinos astrofísicos en la Galaxia: el Sol, remanentes de supernovas (SN), sistemas binarios, micro-cuásares y el mismo centro de la Galaxia. Dentro de las posibles fuentes puntuales de neutrinos astrofísicos de origen extragaláctico, típicamente se consideran: los núcleos galácticos activos (AGNs) y las ráfagas de rayos gama (GRBs). Además de las fuentes puntuales antes mencionadas, existen contribuciones al flujo difuso de neutrinos astrofísicos provenientes de fuentes puntuales no resueltas y neutrinos cosmogénicos, los cuales surgen de la interacción de los rayos cósmicos ultraenergéticos (UHECRs) con la CMB y el IRB.

2.13.2 FUENTES PUNTUALES GALÁCTICAS

Podría pensarse que, puesto que las estrellas en general y el Sol en particular, están hechas de materia ordinaria, los procesos que las hacen brillar y liberar energía se entienden por completo y que por lo tanto estos fenómenos no constituyen misterio científico alguno. En realidad, esto no es así. Notemos que mediante la detección de la luz emitida por las estrellas, es posible estudiar solamente sus superficies. Sin embargo, mediante la detección de neutrinos es posible estudiar directamente los centros de las estrellas donde los procesos que tienen lugar contienen valiosa información respecto a la evolución estelar. De hecho, mediante el estudio de neutrinos solares ha sido posible determinar, con una precisión de alrededor del dos por ciento, que la temperatura del centro del Sol es de poco más de 15 millones de grados Kelvin [Bahcall, 1989]. No obstante, los mecanismos específicos que explican cómo es que el Sol produce su energía o cómo la intensidad en su emisión varía a lo largo de la vida del Sol no se conocen con tal precisión. Para poder contestar estas preguntas, es necesario ver directamente el centro del Sol, lo cual sólo resulta posible detectando neutrinos. Como ejemplo de mediciones factibles, mencionemos que se ha propuesto que la observación del corrimiento en la energía de emisión de los neutrinos producidos en la captura de electrones por ${}^7\text{Be}$ en el interior del Sol respecto a la energía de estos neutrinos en el vacío, puede utilizarse como una herramienta para probar teorías de evolución estelar [Bahcall, 1994].

Los neutrinos que viajan hacia arriba (“upward-going”) pueden ser usados tanto para estudiar oscilaciones de neutrinos como para hacer astronomía de neutrinos para energías por encima de los GeV. Puesto que dichos neutrinos viajan a través de la Tierra en promedio una distancia del orden de 6,000 kilómetros, pueden usarse para distinguir distintos tipos de oscilaciones cuando se toman en cuenta los efectos de la materia sobre las mismas. Por otra parte, los muones con energías por

encima de 1 GeV viajan predominantemente en la misma dirección de los neutrinos que los producen al interactuar con el medio que rodea al detector. En consecuencia, apuntan hacia la fuente astrofísica que los originó con una muy buena precisión [Abe et al., 2006].

Cada átomo en nuestro cuerpo fue procesado a través de varias generaciones de estrellas cuyos remanentes constituyeron los materiales para la formación de nuestro sistema solar. La comprensión del nacimiento y la muerte de las estrellas es una parte importante en la búsqueda por entender la evolución del universo. En una explosión de supernova, una enorme cantidad de energía es liberada en segundos, y la mayor parte de ella es transportada por neutrinos. De hecho, en el pasado reciente se han detectado un puñado de neutrinos provenientes de la supernova SN1987A, en la nube mayor de Magallanes [Alekseev et al., 1987; Dadykin et al., 1987]. Las explosiones de supernova constituyen uno de los escenarios capaces de producir elementos ligeros como Li, Be, y B mediante interacciones de núcleos de ^4He y ^{12}C con neutrinos. Al proceso de formación de elementos se le conoce como *nucleosíntesis*. Los modelos de nucleosíntesis por supernovas predicen una sobreproducción de ^{11}B por un factor de 2.5 a 5.6 lo cual es incompatible con la evolución química galáctica [Woosley, S.E. y Weaver, T.A., 1996]. Estos modelos son muy sensibles a los valores de los parámetros que caracterizan a las supernovas [Yoshida, T and Kajino, 2005]. Si pudiésemos detectar una mayor cantidad de neutrinos de las supernovas por venir, tendríamos acceso a valiosa información respecto a los parámetros que caracterizan a los neutrinos en estas explosiones, como son su distribución de energía, temperatura, potencial químico al que estaban sujetos, etc. De este modo, sería posible lograr a una mejor comprensión acerca de la evolución estelar y, por consiguiente, de las galaxias, a lo largo de los muchos miles de millones de años de historia del universo. Más aún, puesto que los neutrinos provenientes de una supernova emergen horas antes que la radiación electromagnética, la observación de neutrinos proporciona una alerta temprana que puede usarse para orientar telescopios alrededor del mundo y observar la explosión de la supernova desde su inicio a su fin en el espectro electromagnético.

En la parte central de nuestra Galaxia, el grupo de EGRET ha medido la emisión de rayos gama a escalas de GeV, los cuales pueden deberse a emisión difusa o a fuentes no resueltas [Montigny, C. von et al., 1995; 1999, Mukherjee, R. et al., 1997]. Recientemente, la colaboración HESS descubrió 14 fuentes de rayos gama en la región central de nuestra Galaxia [Aharonian, F. et al, 1996 Aharonian, F. et al, 1996]. Si estas fuentes son hadrónicas, entonces se genera una emisión de neutrinos que sería fácilmente medible en detectores con volúmenes del orden de 1km^3 . La observación de la parte central de nuestra Galaxia por HESS identificó varios sistemas binarios como fuentes de rayos gama de TeV. Estos sistemas binarios se consideran objetos en donde la aceleración de partículas y sus interacciones podrían producir neutrinos de altas energías. El estudio de estos objetos como fuentes de neutrinos astrofísicos es un campo abierto.

Neutrinos de altas energías pueden ser emitidos por varios tipos de objetos celestes además del Sol y de las supernovas [Gaisser, et al., 1995]. Entre ellos podemos mencionar los sistemas binarios emisores de rayos X. La fusión de sistemas binarios de estrellas compactas, así como la muerte de una estrella masiva para formar un agujero negro (las estrellas llamadas “collapsar/hypernova”), son los progenitores de ráfagas de rayos gama de corta y larga duración. La materia que es capturada por el agujero negro masivo produce también grandes flujos de neutrinos [Piran, T., Phys. 1999, Halzen, F. and Hooper, D., 2002].

La búsqueda de coincidencias entre la detección de neutrinos con la de GRBs es importante para entender la naturaleza de los objetos emisores de estas ráfagas. Como ejemplo, cabe mencio-

nar que esta búsqueda ha tenido lugar en laboratorios subterráneos como el de Gran Sasso, en Italia, donde no se encontró una correlación estadística significativa entre la emisión de neutrinos y la de GRBs [Ronga, F. et al., 1998]. Disponer de la capacidad para detectar un mayor número de estos eventos ayudará a determinar si tal correlación existe o no, lo cual permitirá discriminar entre modelos que predicen emisión de neutrinos junto con las ráfagas de rayos gama.

La producción de neutrinos en la región central de AGNs se discutió por primera vez al inicio de la década de los 90s (ver por ejemplo [Szabo, A.P. and Protheroe, R.J., 1994, Stecker, F.W. et al., 1991]), donde se calculó el espectro de neutrinos producidos por protones de bajas energía inyectados al acelerador en la región central de los AGNs. El problema con estas predicciones es que son muy difíciles de normalizar, ya que no hay otro tipo de radiación que pueda ser directamente observada. Solamente podemos estimar qué fracción del fondo isotrópico de MeV/GeV puede ser producido en dichos objetos [Stanev, T., 2006].

Hasta la fecha, más de 60 AGNs del tipo blazar han sido detectados como emisores de rayos gama en escalas MeV-GeV por EGRET [Montigny, C. von et al., 1995; 1999, Mukherjee, R. et al., 1997] y un número reducido de objetos BL Lacertae han sido observados como fuentes de rayos gama de TeV por telescopios terrestres Cerenkov [Catanese, M., and Weekes, T., 1999]. En estas fuentes, el bulto de la luminosidad es a menudo emitida en forma de rayos gama. La emisión típica de rayos gama de un blazar es altamente variable en la escala temporal, yendo desde los límites observacionales de días, para energías de GeV, hasta horas para energías de TeV [Mattox, J.R. et al., 1997, Gaidos J. A. et al., 1996].

Los modelos más populares para la emisión de rayos gama de los blazares están basados en la dispersión inversa de Compton de fotones blanco de bajas energías por electrones altamente relativistas en los jets de estas fuentes. Los fotones blanco pueden provenir directamente del disco de acreción, pueden ser emitidos por redispersión en dicho disco, o pueden ser también producidos en el jet mismo vía radiación de sincrotrón. Dichos modelos han sido cuestionados por el hecho de que el proceso de aceleración de electrones tendría que ser muy rápido para poder competir eficientemente con las pérdidas por radiación a energías altas del electrón y, por ello, es improbable que los electrones sean las partículas primarias. Por otro lado, los electrones que radían pueden ser también partículas secundarias, producidas en colisiones inelásticas por hadrones primarios, en cuyo caso, se emitirían neutrinos en paralelo con los rayos gama. Por lo anterior, los neutrinos pueden ser usados para distinguir entre modelos puramente leptónicos y aquellos que involucran hadrones de altas energías como partículas primarias [Schuster, C. et al, 2001]. Las señales producidas en los jets de AGNs están amplificadas por un factor de Doppler del jet que puede ser de hasta 10. Es posible que la emisión de rayos gama y la emisión de neutrinos en los jets de AGNs no sean proporcionales. Los principios básicos de aceleración de protones e interacciones son igualmente válidos para los jets de AGN, como para aquellos de las GRBs, cuya física es similar, pero en condiciones extremas [Stanev, T., 2006].

Las GRBs son erupciones cortas e intensas de rayos gama de altas energías distribuidas aleatoriamente. La distribución espacial cosmológica e isotrópica observada de las GRBs junto con sus luminosidades (que sobrepasan el límite de Eddington) y su variabilidad temporal (de alrededor de 10 ms), sugieren que las GRB pueden ser las fuentes de UHECRs. La emisión de neutrinos por estos objetos empezó a discutirse después de estudiarlos como posibles fuentes de UHECRs [Usov, V. and Milgrom, M., 1995, Viteri, M., 1995, Waxman, E., 1995]. La luminosidad extremadamente alta y el factor de Lorentz promedio de 300 de las GRBs, hace que la producción de neutrinos por

estos objetos sea muy probable. Una vez más, la emisión de fotones y la emisión de neutrinos no son proporcionales [Waxman, E. and Bahcall, J., 1997, Halzen, F. and Hooper, D.W., 1999].

La conexión entre algunas GRBs de larga duración y SNs ha sido establecida a través de asociaciones entre objetos astrofísicos, tales como GRB030329 y Sn2003dh, los cuales han apoyado el modelo del "colapsar progenitor" [MacFadyen et al., 2001]. Sin embargo, a pesar del esfuerzo realizado mediante observaciones electromagnéticas terrestres y satelitales, los eventos progenitores permanecen ocultos a nuestra observación. Esta limitación física es debida a la opacidad inicial de la bola de fuego antes de la expansión relativista. Si bien no podemos "ver" el nacimiento de una GRB, un modelo fenomenológico conocido como bola de fuego ("fireball model"), describe exitosamente las observaciones de emisión electromagnética abrupta y de luminiscencia. En el contexto de la aceleración hadrónica, se espera que la emisión electromagnética abrupta de las GRBs, venga acompañada de neutrinos de energía, sabor y tiempo de llegada variables. Dependiendo del proceso astrofísico, las energías de los neutrinos pueden ser de MeV a EeV y pueden llegar antes, durante o después de la emisión abrupta de rayos gama [Stamatikos, 2006]. Aparte de ser sensibles a la física fundamental (que se extiende hasta escalas de PeV), las mediciones de neutrinos astrofísicos proporcionarían información crucial sobre el origen y la propagación de los rayos cósmicos y serían una sonda especial para explorar la naturaleza de estas fuentes astrofísicas de alta energía. Examinarían directamente tanto el contenido hadrónico de los jets de los AGNs y las GRBs, como el proceso de aceleración de rayos cósmicos que se cree que genera el fondo difuso de rayos cósmicos, el fondo de neutrinos atmosféricos y una porción del fondo de rayos gama de MeV a multi-GeV. Por lo tanto, la eficiencia de la generación de neutrinos en GRBs y en AGNs, daría un diagnóstico directo para varios de los parámetros clave relevantes para la hipótesis de aceleración de rayos cósmicos astrofísicos, así como también proveería de información sobre las condiciones físicas en estas fuentes [APS Neutrino Study, 2004].

2.13.3 NEUTRINOS COSMOGÉNICOS

Los neutrinos cosmogénicos, son los generados por interacciones de fotoproducción de los rayos cósmicos extragalácticos, de muy alta energía, en un fondo de fotones. De este fondo de fotones, la componente universal más importante es el CMB. La existencia de tales neutrinos fue propuesta por primera vez en los 70's [Berezinsky et al., 1970, 1974, Stecker, 1973] y la relación de su flujo con la evolución cosmológica de las fuentes de rayos cósmicos se discutió en los 80's [Hill et al., 1985]. Los flujos de neutrinos cosmogénicos han sido calculados en trabajos más recientes sobre el tema [Kalashev et al. 2002, Fodor et al. 2003, Anchordoqui et al. 2007], tomando en consideración el espectro de inyección de los rayos cósmicos y las siguientes variables de las fuentes astrofísicas: emisividad (estimada a partir del flujo de los UHECRs), distribución (usualmente considerada isotrópica y homogénea) y evolución cosmológica (usualmente se considera que las fuentes coinciden con las regiones de formación estelar). La mayoría de los cálculos del flujo de neutrinos cosmogénicos, se realizan suponiendo que los UHECRs son protones, pero si los UHECRs fueran núcleos pesados también habría un flujo de neutrinos cosmogénicos [Ave et al., 2005]. El fondo infrarrojo (IRB) y óptico es otra componente universal del fondo de fotones, la cual ha sido estudiada directamente a través de la absorción de rayos gama de sistemas distantes y cuya contribución al flujo cosmogénico no puede despreciarse [Stanev 2004]. De hecho, la densidad numérica del IRB es más

pequeña que la del CMB, pero la gran cantidad de protones de energía más baja compensa, hasta cierto punto, la baja densidad de blancos del IRB.

De acuerdo con lo expuesto, el flujo total de neutrinos cosmogénicos consiste, a grosso modo, en partes iguales de neutrinos que surgen de interacciones con el IRB y el CMB. El flujo del IRB cubre un rango de energías más amplio y está desplazado hacia bajas energías. El decremento en el número de neutrinos en interacciones con el IRB puede ser explicado por el hecho de que los UHECRs interactúan principalmente con el CMB. Los diferentes flujos de neutrinos se muestran en la Figura 11.

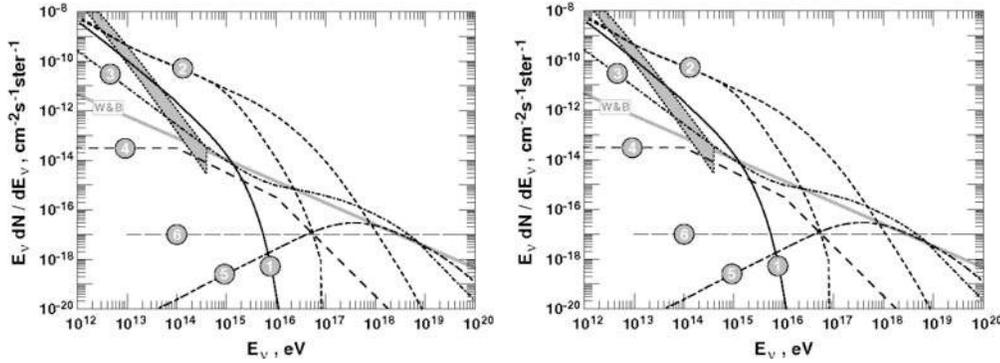


Figura 11. La figura de la izquierda muestra los flujos $\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu$ que son predichos para 5 diferentes fuentes de neutrinos: (1) neutrinos del Sol; (2) neutrinos de remanentes de SN IC443, si los rayos gama detectados por EGRET son todos de origen hadrónico; (3) neutrinos de la ráfaga de rayos gama de Mrk501, si son de origen hadrónico; (4) flujos mínimos y máximos que se esperan de la región central de 3C273; (5) flujos esperados del jet de 3C279. Los flujos de neutrinos atmosféricos están indicados con la banda sombreada (extremo superior para neutrinos horizontales y extremo inferior para neutrinos verticales). La figura de la derecha muestra diferentes flujos difusos de neutrinos astrofísicos: (1) neutrinos que se esperan de la parte central de nuestra Galaxia, suponiendo que todos los rayos gama difusos detectados por EGRET son creados por la interacción de rayos cósmicos con materia; (2) flujos difusos de núcleos de AGNs; (3) flujo isotrópico de neutrinos proveniente de jets de AGNs, donde se agregan interacciones pp a las interacciones por fotoproducción; (4) predicción de neutrinos difusos provenientes de GRBs, en la suposición de que éstas son fuentes de UHECRs; (5) flujo nominal de neutrinos cosmogénicos, calculado usando el modelo de luminosidad y evolución cosmológica a partir del límite de W&B; (6) flujo de neutrinos necesario para que el modelo de Z-burst, sea el mecanismo de producción de UHECRs. El área sombreada indica los flujos verticales y horizontales. La cota de Waxman y Bahcall se muestra con el rótulo W&B.

3. ASPECTOS MULTIDISCIPLINARIOS

El LSMM servirá como un laboratorio y observatorio del subsuelo profundo para el estudio de procesos geomecánicos, hidrológicos, geoquímicos y biológicos que modifican la Tierra desde su superficie hasta el límite de las profundidades habitables. De esta manera, se tendrá la oportunidad de observar en forma directa los principales agentes de estos cambios, incluyendo microorganismos cuyo metabolismo desencadena la precipitación de minerales y/o la emisión de gas, fenómenos de flujo de fluidos y de interacción agua-roca, y sismos de baja intensidad asociados a fallas, tensiones y compresiones de la roca. Todos estos fenómenos se acoplan de una manera compleja, por lo que un entendimiento mejor y más detallado de cada uno de ellos y de su posible interconexión es crítico para lograr avances en diversas disciplinas científicas y sus aplicaciones, que van desde la ingeniería geológica, hasta la biorremediación y las ciencias ambientales.

Un programa amplio como el mencionado requiere grandes volúmenes de roca y una variedad de ambientes estructurales, litológicos, hidrológicos, biológicos y geoquímicos. Grandes volúmenes permiten estudiar la manera en que estos fenómenos complejos escalan con la distancia, la profundidad y el tiempo. La diversidad permite verificar, por ejemplo, como los medios litológicos diferentes (p.e., formaciones sedimentarias, complejos metamórficos e intrusiones) afectan los fenómenos antes mencionados en lugares profundos y su vínculo con procesos superficiales. Un laboratorio nacional como el de esta propuesta, que pudiera coordinar tales estudios, brindaría a las comunidades internacionales en ciencias de la Tierra, ciencias biológicas e ingeniería una oportunidad única para implementar investigaciones multidisciplinarias y multi-institucionales.

Muchos procesos terrestres están acoplados en una forma compleja; por ejemplo, los esfuerzos tectónicos hacen que las rocas se plieguen y fracturen, alterando a su vez la porosidad y permeabilidad de las mismas y, por lo tanto, los parámetros del flujo de fluidos. Asimismo, los cambios en la presión de los fluidos causan variaciones en la respuesta mecánica de las rocas ante dichos esfuerzos, los cuales controlan el desplazamiento de las fallas y, en última instancia, la frecuencia y magnitud de los sismos. Los fluidos también distribuyen elementos y compuestos de la corteza que tienen importancia económica y ambiental, muchos de los cuales están disueltos y precipitan a partir de soluciones hidrotermales. Al brindar accesos tridimensionales a grandes volúmenes de roca en el subsuelo, el LSMM permitirá que los científicos aborden de manera directa procesos geológicos y biológicos interactivos, muchos de los cuales atraviesan fronteras disciplinarias.

Además de su agenda de investigación principal, el LSMM también promoverá asociaciones con proyectos de bioremediación y ciencias ambientales, biotecnología e industrias farmacéuticas, para desarrollar aplicaciones prácticas de sus investigaciones en la *biosfera del subsuelo*. Otras potenciales aplicaciones industriales incluyen el desarrollo de nuevas herramientas geofísicas y geoquímicas para caracterizar el subsuelo y para realizar mapeos geológicos y barrenado de rocas, así como tecnologías novedosas de geotecnia y de ingeniería minera. Mediante asociaciones con agencias espaciales, algunas de estas nuevas tecnologías podrían también ser adaptadas para explorar vida en el subsuelo de otros cuerpos del sistema solar.

Un cometido importante del programa multidisciplinario que involucra todas las disciplinas de investigación básica e ingeniería es la de servir de soporte a un activo programa de educación y entrenamiento asociado con las actividades del LSMM.

Debido a su completa y variada infraestructura y a la posibilidad de garantizar una logística de largo plazo, el LSMM permitirá realizar un amplio espectro de experimentos y observaciones con un uso eficiente de los recursos y una menor duplicación de esfuerzos. Esperamos que el LSMM sea uno de los centros líderes a nivel mundial en estudios multidisciplinarios, que ayude a integrar los esfuerzos nacionales con las investigaciones y desarrollos en laboratorios subterráneos de otros países. A fin de aprovechar óptimamente las capacidades tecnológicas, intelectuales, educacionales y de divulgación del LSMM, sus actividades estarán íntimamente ligadas e integradas. Así, por ejemplo, áreas de interés común para científicos de la Tierra y físicos incluyen técnicas para conteo de dos niveles: mecánica de rocas relevante para grandes excavaciones subterráneas, y la medición del flujo de antineutrinos proveniente de la radiactividad natural Terrestre. Los tópicos de mayor importancia relevantes para una propuesta con estas características incluyen los que detallamos a continuación.

3.1 VIDA EN EL SUBSUELO

Una de las grandes fronteras de las ciencias biológicas en las próximas décadas es el estudio de la vida en ambientes extremos. Recientemente, muestras recolectadas en perforaciones del lecho submarino han permitido grandes avances en el entendimiento de la microbiología en sedimentos marinos; lo mismo no ha ocurrido hasta ahora con el estudio de la biosfera en el subsuelo continental. En este sentido, uno de los principales obstáculos ha sido nuestra limitada capacidad o habilidad para tener acceso controlado y de largo plazo a medios ambientes terrestres profundos, para adquirir muestras no contaminadas y para observar *in situ* las relaciones entre ecosistemas microbianos del subsuelo y los procesos geoquímicos e hidrogeológicos que controlan su crecimiento, funcionamiento y movilidad. Sorprendentemente, conocemos muy poco acerca de estos procesos, especialmente bajo condiciones de alta presión, temperatura y tensiones ambientales, en medio ambientes geológicamente complejos. Un mejor entendimiento de la retroalimentación entre procesos clave (flujo de fluidos, nutrientes y transferencia de energía) es crítico para entender como la vida microbiana sobrevive y prolifera en las profundidades. A su vez, la actividad microbiana genera gases y precipitados minerales que afectan la permeabilidad y la resistencia de la roca y, por ende, el flujo de fluidos. La detección de estos productos colaterales de la vida y su distinción de los producidos por procesos no biológicos es clave para el desarrollo de tecnologías para la detección de exobiologías.

Hasta la fecha, los estudios de transporte microbiano y bioquímico en acuíferos continentales bien caracterizados se limitan a experimentos de corta duración, en arreglos bidimensionales de pozos poco profundos y con localizaciones geográficamente dispersas, la mayoría de los cuales están contaminados por tóxicos orgánicos o complejo metálicos. Esto ha dificultado el desarrollo de modelos exactos a gran escala para fenómenos de transporte complejo e interrelacionado, los cuales son críticos para la protección de las fuentes de agua potable, la captura de CO₂ por el subsuelo y el almacenamiento de desechos radioactivos. Un reporte reciente sobre geobiología [Nealson y Ghiorse, 2001], enfatizó la necesidad de laboratorios de campo para investigaciones en

geomicrobiología que estén disponibles para estudios de larga duración. El LSMM proporcionará las condiciones necesarias de acceso al subsuelo y de infraestructura para permitir los siguientes tipos de estudios: (a) ecología microbiana, (b) procesos bio-geoquímicos y (c) procesos geoquímicos abióticos.

Este Laboratorio tiene el potencial de realizar una aportación significativa a diversas áreas de frontera en biología, las cuales tienen un gran impacto para la comprensión de problemas evolutivos, tanto terrestres como de exobiología:

- ¿Hasta qué profundidades en la corteza terrestre y en que condiciones puede existir vida?
- ¿De qué forma la biota y el medio geológico interactúan para conformar el entorno subterráneo?
- ¿Cómo evolucionó la vida microbiana de manera aislada en el subsuelo?
- ¿Se originó la vida en la Tierra en el subsuelo?
- ¿Existe vida subterránea que no conocemos?

Para responder a estas cuestiones, los biólogos necesitan un programa específico e instalaciones para experimentos y muestreo en el subsuelo, a gran escala y de larga duración. Un requerimiento clave para la investigación de procesos microbianos, que puede ser satisfecho mediante las condiciones que brinda un laboratorio subterráneo, es el de tener acceso a ambientes rocosos libres de la contaminación predominante en la superficie. Paralelamente, este tipo de experimentación, llevará aparejado el desarrollo de tecnologías no contaminantes de perforación, las cuales serán de interés para otros ambientes, tales como lagos sub-antárticos aislados u océanos en lunas del Sistema Solar.

3.2 ESTUDIOS HIDROGEOQUÍMICOS

Los recursos acuíferos se volverán más y más valiosos con el crecimiento de la población mundial, que aumenta a razón de unos 80 millones de personas por año. Esta cifra entraña un aumento de la demanda de agua dulce de aproximadamente 64,000 millones de metros cúbicos anuales (cantidad equivalente a todo el caudal anual del Rin). Hacia el año 2025, 48 países, con un total de más de 2,800 millones de habitantes (35% de la población mundial proyectada para ese año), se verán afectados por el estrés hídrico o la escasez de agua. Tanto el agua superficial como la subterránea son utilizadas en todos los aspectos de nuestra vida, desde el consumo humano hasta la agricultura y la industria. El agua subterránea ha llegado a ser una fuente de importancia creciente debido a que tiene algunas ventajas significativas sobre la proveniente de fuentes superficiales, como, por ejemplo, la menor posibilidad de contaminación por agentes patógenos. El conocimiento de la dinámica de acuíferos profundos permite la adecuada selección de lugares seguros para el almacenamiento de desechos, sin correr el riesgo de contaminar fuentes de agua potable o para riego.

La explotación del agua subterránea está basada en muchos supuestos, como los valores de transmisividad y porosidad efectiva. Todos estos valores cambian con la profundidad y deberán ser monitoreados a diferentes profundidades. También es importante establecer el posible aprovechamiento de las aguas subterráneas en función de su localización, y conocer si la presión y temperatura favorecen que algunos elementos químicos nocivos para la salud (p.e., As, Pb, Cd) se integren al agua subterránea. El monitoreo geoquímico del agua también puede ser hipotéticamente aprove-

chado para determinar la presencia de elementos o compuestos químicos que predigan un evento sísmico.

Las reacciones químicas entre la roca y el agua alteran la composición de ambas y las consecuencias de ello son de gran importancia para la sociedad. Las reacciones químicas controlan la calidad del agua potable, la rapidez de los procesos de erosión que dan lugar a la formación de suelos, la abundancia de arsénico y otros metales pesados, la calidad del agua potable, el valor de pH en aguas de drenaje de mina y sus efectos en el medio ambiente, los procesos que forman depósitos de minerales, y el desarrollo de rocas estables indispensables para la cimentación de obras y construcciones. La velocidad y tipo de las reacciones químicas dependen directamente de la temperatura, presión y composición del agua, las cuales varían grandemente en los diversos ambientes subterráneos. Aunque los estudios realizados con muestras rocosas han proporcionado amplios conocimientos sobre estos procesos, los estudios *in situ* ciertamente darán una información más completa de las interacciones agua-roca a diferentes escalas de tiempo y espacio, permitiendo extrapolar los resultados del laboratorio a las escalas más grandes, a nivel natural.

Por otra parte, para cuantificar el ciclo hidrológico natural se necesitan medidas directas de las propiedades del subsuelo y de los procesos que controlan el flujo de los fluidos. La cuantificación de dichos parámetros conducirá a una mejor caracterización de la relación entre infiltración superficial, recarga y flujo del agua subterránea. Lamentablemente, en la actualidad, aún en los lugares sujetos a exploración más intensa y detallada, los estudios están generalmente dedicados a las aplicaciones relacionadas con explotación petrolera y mineral, y no a la de caracterización de los recursos hidrológicos.

3.3 GEOMECÁNICA

Una meta central de la investigación en geomecánica es el entendimiento de la historia de deformación y esfuerzo de las masas rocosas, y de cómo esta historia se relaciona con el flujo de agua subterránea y el transporte de solutos. La distribución de esfuerzos y deformaciones tiene impacto sobre el diseño de laboratorios subterráneos, la seguridad en minas, la explotación de depósitos minerales e hidrocarburos, el control regional de sistemas de flujo de aguas subterráneas, y la evaluación de riesgo sísmico. La adecuada caracterización de tales esfuerzos y deformaciones, así como las predicciones exactas de las propiedades físicas y estructurales de las masas rocosas, conduce inevitablemente a una explotación más eficiente de los recursos del subsuelo y a un mejor diseño y construcción de cavidades subterráneas.

Las deformaciones de las rocas en emplazamientos profundos no están bien caracterizadas, excepto en unas cuantas minas profundas, particularmente en Sudáfrica. La mayoría de las mediciones de deformación han sido realizadas en la superficie y los datos existentes están limitados a áreas adyacentes a fallas activas. Los métodos matemáticos de inversión pueden ser utilizados para estimar los desplazamientos a profundidad asociados con movimientos de fallas y, a su vez, estos desplazamientos pueden emplearse para evaluar las perturbaciones en los esfuerzos en el subsuelo vinculadas con la dinámica de fallas. Sin embargo, las mediciones superficiales por sí mismas resultan inadecuadas para determinar la distribución de esfuerzos locales profundos y esta distribución debe ser conocida para predecir el deslizamiento de las fallas y cómo, consecuentemente, las excavaciones subterráneas se deformarán.

Las mediciones de esfuerzos en perforaciones profundas dan una idea de los mismos a grandes profundidades, pero los datos disponibles son limitados, sujetos a una dispersión considerable, y están restringidos a pequeños volúmenes de roca. En consecuencia, a menudo no son apropiados para determinar el estado de esfuerzos. Las mediciones *in situ*, repetibles, a través de un volumen de roca grande, son la única manera de conocerlos de forma exacta. Como parte de esta propuesta se pretende aprovechar las facilidades subterráneas para estudiar el campo de esfuerzos en las tres componentes. Dicho estudio será realizado con y sin eventos sísmicos. Con la finalidad de establecer las diferencias del campo de esfuerzos en la superficie y a diferentes niveles de profundidad, deberá ponerse operación una red de monitoreo sísmico, con GPS de precisión en la superficie.

3.4 FLUJO DE FLUIDOS Y DEPÓSITOS MINERALES

El transporte de fluidos y compuestos móviles a través de la roca fracturada es fundamental para actividades tales como la recuperación de agua, petróleo o gas, la protección del medio ambiente, y el entendimiento de la génesis de los depósitos minerales. Las tensiones y los campos de presión del fluido controlan la deformación de las rocas y la formación de fracturas; por su parte, la compactación resultante en una disminución de la porosidad regula también el flujo de fluidos. Por ello, las fallas pueden actuar tanto como conductoras o como barreras de flujo.

El fracturamiento estudiado en superficie para conocer la potencialidad de un campo geotérmico o de hidrocarburos no resulta adecuado, ya que en ambientes profundos las fracturas y las rocas están sometidos a dos factores esenciales, la temperatura y la presión, que hacen cambiar las características reológicas de las rocas, facilitando en muchos casos la deformación dúctil. En relación a los planos de fractura o a la permeabilidad secundaria, resultará de mucha importancia conocer como aumenta o disminuye la circulación de agua. La teoría matemática que describe el acoplamiento entre el flujo de fluidos y la deformación de la roca está bien desarrollada, pero las observaciones directas están limitadas principalmente a pruebas realizadas en laboratorios de superficie. El LSMM ofrece la oportunidad de observar e investigar el acoplamiento entre el flujo de fluidos y la deformación de las rocas de manera directa, *desde dentro* de las rocas a través de los cuales los fluidos están circulando.

Los yacimientos minerales se forman a partir de procesos eficientes de segregación y concentración de determinados elementos químicos. Estos procesos pueden ser magmáticos, metamórficos, hidrotermales y/o sedimentarios. Cada contexto geotectónico favorece el enriquecimiento en determinados elementos y la génesis de ciertas tipologías de yacimientos minerales. De este modo, cada contexto geotectónico se caracteriza por una metalogénesis determinada y es de esperar que la historia metalogénica de una región se ajuste con su evolución tectónica. Por consiguiente, las diferentes tipologías de yacimientos metalíferos se asocian a ciertos tipos de rocas, a un marco tectónico y, en ocasiones, a periodos geológicos determinados. Procesos acoplados, que involucran la geoquímica de los fluidos mineralizantes y los procesos de interacción agua-roca, son la base para la formación de muchos depósitos minerales. Mediante la modelación computacional es ahora posible simular tales procesos, en la medida que las condiciones físicas y químicas puedan ser incorporadas correctamente. Estudios en laboratorios subterráneos servirán para validar las predicciones de las simulaciones y entender como los procesos acoplados y la resultante formación del yaci-

miento mineral, cambian con la profundidad. Ello ayudará a mejorar los criterios de exploración de depósitos minerales y su ulterior explotación.

3.5 OBSERVATORIO SÍSMICO PROFUNDO

Las diversas perturbaciones naturales o artificiales hacen de la superficie terrestre un lugar poco adecuado para la operación de estaciones sismográficas de precisión. En años recientes, la localización de instrumentos bajo tierra, típicamente en pozos a profundidades de 100 a 200 m, ha significado una mejora considerable en la calidad de la señal. Sin embargo, el costo y las restricciones de trabajar en estas condiciones han limitado grandemente el uso de este tipo de instalaciones. El LSMM, en caso de ser construido en una mina inactiva, o en un túnel vial en desuso, brindaría la oportunidad de instalar sismógrafos a profundidades mucho mayores, con volumen virtualmente ilimitado y fácil acceso, con la capacidad de registrar señales sísmicas con una fidelidad incomparable y un destacado potencial científico. La ubicación de sismógrafos a tales profundidades evita los efectos de los materiales altamente atenuantes cercanos a la superficie, lo que permitiría la detección de componentes de alta frecuencia de ondas sísmicas que emergen del manto terrestre. Esto mejoraría la precisión de diferentes estudios, tales como la detección de señales débiles, localización de eventos sísmicos, determinación de los procesos fuente, quiebra de degeneración en los tiempos de propagación y medición de las anomalías de polarización de las ondas S.

Dependiendo de la instrumentación seleccionada, un observatorio sismológico con estas características puede realizar también una función de monitoreo, detectando señales provenientes de pequeños eventos en el entorno del LSMM que pudieran afectar los instrumentos científicos de otros experimentos que en él operan. El observatorio también ayudará al entendimiento del papel de una falla en el caso de un sismo. Generalmente, el comportamiento geométrico de un plano falla y de su zona de influencia son desconocidos en detalle, por lo cual se examinará como cambia en su geometría y sobre todo en su zona de influencia. Todos los planos de falla sujetos a un estado de esfuerzos activos pueden convertirse en fallas geológicas activas. Debido a ello, se realizarán estudios de Geotectónica y Paleosismología en superficie, mientras que en subsuelo se estudiarán estos planos ante un evento sísmico.

3.6 IMÁGENES GEOFÍSICAS

El conocimiento de las fracturas y las redes de fracturas es importante para estudiar el flujo de aguas subterráneas, la recuperación de gas y petróleo, los riesgos inherentes al almacenamiento de desechos, captura de carbono, etc. Ellas también son importantes como hábitat para la biota subterránea, transporte químico, formación de depósitos de minerales y flujo de calor. La confección de imágenes comúnmente usadas en geofísica, se basa en técnicas electromagnéticas y sísmicas, microgravedad, resistividad y polarización inducida. Las facturas presentan tanto anomalías mecánicas como de conductividad eléctrica, especialmente si están llenas con fluidos. Cuando el volumen de la roca estudiada es grande, otros métodos que involucran la determinación de la resistividad eléctrica a través de métodos eléctricos directos o de inducción electromagnética, permiten una mayor penetración dentro de la roca para detectar y delinear sistemas de fracturas. Una de las

cuestiones más importantes en las geociencias es la comprensión de las leyes de escala que caracterizan los diferentes procesos de interés y su eventual acoplamiento. Es decir, a qué escala deben ser realizadas las mediciones específicas para poder caracterizar los procesos que dominan en un dado fenómeno. A fin de alcanzar un entendimiento más completo de las implicaciones de los datos geofísicos uno debe correlacionarlos con la geología del lugar, incluyendo la geometría de las fracturas, y con las propiedades hidrológicas y microbianas locales. El LSMM es un lugar adecuado para realizar esta conexión a diversas escalas.

3.7 ASTROFÍSICA NUCLEAR

La astrofísica nuclear experimental comprende el estudio y medición de los procesos nucleares que tienen lugar en ambientes astrofísicos, en particular, aquellos que controlan la evolución y las explosiones de los sistemas estelares. Las reacciones nucleares que generan energía y sintetizan elementos dentro de las estrellas, tienen lugar en una ventana de energía relativamente angosta: el pico de Gamow. En esta región que, en muchos casos, se localiza en valores inferiores a 100 keV, situándose bastante abajo de la energía de Coulomb, la sección transversal (“cross-section”) cae casi exponencialmente con la disminución de la energía.

Como fue descrito en el Cap. 2, las predicciones para el flujo de neutrinos del Sol han sido consistentemente inferiores a los valores observados, a lo largo de los años, en los diferentes experimentos. La solución a este problema, conocido como el enigma de los neutrinos solares, provino del lado de la física de partículas y condujo al descubrimiento del fenómeno de las oscilaciones de neutrinos. El conocimiento de las secciones transversales de las reacciones en las cadenas pp es un ingrediente esencial para las simulaciones de los modelos solares [Bahcall y Pinsonneault 1995]. Varias de ellas han sido deducidas indirectamente mediante extrapolaciones, a la región de bajas energías, de la dependencia observada a altas energías, lo cual introduce incertidumbres de bastante consideración. En particular, la presencia de una posible resonancia en la región que no ha sido medida, no es tomada en cuenta por la extrapolación y podría dominar por completo la razón de la reacción en el pico de Gamow. Por otra parte, las nubes de electrones que rodean a los núcleos producen un efecto de apantallamiento, reduciendo la altura de la barrera coulombiana y aumentando la sección transversal de la reacción nuclear. Este efecto tiene que medirse y tomarse en cuenta para obtener la sección transversal desnuda, la cual es el dato necesario para la nucleosíntesis estelar.

Los valores extremadamente chicos, de pico a femto-barn y aun menores, han impedido la medición de las secciones transversales a bajas energías en laboratorios ubicados sobre la superficie terrestre, donde la relación señal-fondo es muy pequeña, a consecuencia de las interacciones de los rayos cósmicos. Un acelerador de bajas energías operando en un laboratorio subterráneo, combinado con las técnicas típicas de física de bajo ruido de fondo, provee las condiciones idóneas para llevar a buen término las mediciones requeridas. Los primeros resultados exitosos de este tipo han sido obtenidos por el experimento LUNA [Casella, C. *et al.* 2002a, Formiccola *et al.* 2003], en el Laboratorio Nacional Gran Sasso, en Italia, el cual ha demostrado que, bajo las condiciones mencionadas, es posible medir con suficiente precisión las secciones transversales a las energías de la nucleosíntesis en el interior de las estrellas.

Este experimento se ha enfocado al estudio de ${}^3\text{He}({}^3\text{He},2p){}^4\text{He}$ [Arpesella *et al.* 1996, Bonetti *et al.* 1999] y, más recientemente, ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$ [Imbriani *et al.* 2005, Lemut *et al.* 2006] y

${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ [Gyürky et al. 2007]. La primera de estas reacciones desempeña un importante papel en la cadena pp-I y afecta la luminosidad calculada para los neutrinos emitidos por el Sol. En la Fig. 1 se muestra el factor astrofísico para esta reacción, el cual se define como $S(E) = \sigma(E) E \exp[2\pi \eta(E)]$, donde $\sigma(E)$ es la sección transversal, E es la energía en el centro de masa y $\eta(E)$ el parámetro de Sommerfeld [Rolfs 1985].

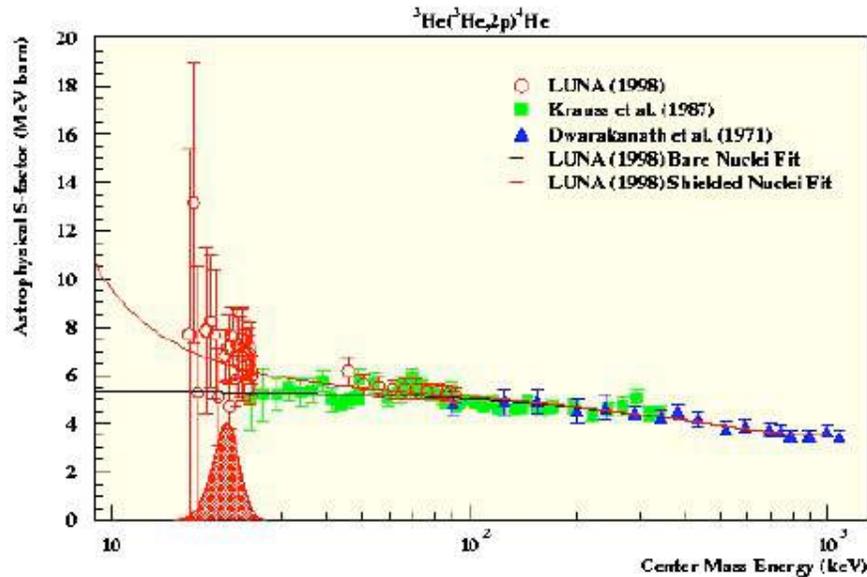


Figura 1. Factor astrofísico $S(E)$ para la reacción ${}^3\text{He}({}^3\text{He},2p){}^4\text{He}$.

La reacción ${}^{14}\text{N}(p,\gamma){}^{15}\text{O}$ es la más lenta en el ciclo CNO, el cual domina la producción de energía en las estrellas con masas mayores a la del Sol. La potencia liberada por este ciclo y la cantidad de helio que es producida, también juegan un rol relevante en la determinación de la edad de los cúmulos globulares. El resultado obtenido hasta 70 keV ha dado un valor para la sección transversal igual a 1/2 del empleado en los modelos estelares. Como consecuencia, el flujo estimado para los neutrinos solares del ciclo CNO se ha reducido a la mitad y la edad de los cúmulos globulares ha aumentado en casi mil millones de años.

El flujo de los neutrinos solares del ${}^8\text{B}$ ha sido medido por SuperKamiokande con una incertidumbre de 3.5% y la medición para los neutrinos del ${}^7\text{Be}$ se prevé para un futuro próximo. En cambio, los flujos predichos se ven todavía afectados de errores grandes. Mediciones precisas de las secciones transversales a bajas energías, para ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$ y la reacción subsiguiente ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$, son necesarias a fin de mejorar las predicciones. La mayor incertidumbre tiene su origen en el hecho de que el factor S para la reacción ${}^3\text{He}(\alpha,\gamma){}^7\text{Be}$, determinados con dos procedimientos experimentales diferentes (medición de la emisión demorada (“delayed”) de rayos γ por el ${}^7\text{Be}$ y medición de la emisión súbita (“prompt”)), discrepan entre sí. Recientemente, la situación ha mejorado significativamente merced a la medición de alta precisión realizada por LUNA, usando ambas técnicas al mismo tiempo [Confortola et al. 2007]. Una medición refinada de la pendiente del factor S , en un rango amplio de energías, sería bienvenido para reducir la incertidumbre en la extrapolación que da $S(0)$.

La reacción $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ ha sido identificada como una de las más críticas, en lo que a nucleosíntesis se refiere, ya que determina la relación carbono-oxígeno en el universo, dos de los elementos de los cuales estamos hechos y que necesitamos para sobrevivir [Wea93,Imb01]. Durante 40 años una gran variedad de técnicas experimentales han sido usadas para tratar de determinar esta relación (see [Rot99,Kun01,Plag05]and references therein). La extrapolación a las energías de las gigantes rojas depende de los parámetros de la matriz R y de la exactitud de los datos de las secciones transversales disponibles a bajas energías. Los resultados son bastante inciertos, lo que afecta la fiabilidad de la predicción para la relación carbon-oxígeno e influye en las condiciones que prevalecen en las explosiones de supernovas de tipo I y II.

Los avances en astrofísica de precisión está demandando mejoras en las mediciones de las secciones transversales de una gran cantidad de reacciones nucleares, algunas de las cuales han sido indicadas previamente. La operación, en un laboratorio subterráneo, de un acelerador que incorpore los últimos avances en la tecnología de aceleradores, detectores y manejo de datos, sería una contribución importante para la mejor comprensión de los fenómenos que ocurren en las estrellas.

3.8 GEONEUTRINOS

La tecnología desarrollada para la detección de los neutrinos de muy baja energía, que se usa para el estudio de los neutrinos de origen solar, puede tener una amplia gama de aplicaciones en otras áreas de la física, tales como la geofísica, al igual que en el monitoreo de los reactores nucleares. En esta sección expondremos el tema de los geoneutrinos y el progreso que se espera sobre sus estudios en un futuro cercano.

Es importante recordar que diversos fenómenos terrestres, tales como los terremotos, la erupción de volcanes, el magnetismo terrestre y los movimientos tectónicos, son derivados de los procesos de generación y de transporte de calor al interior del planeta. Se cree que una fracción significativa del calor que se disipa del interior de la Tierra proviene de los decaimientos de uranio (U), torio (Th) y potasio (K). Las únicas estimaciones del calor generado por los decaimientos de elementos radioactivos han sido obtenidas con modelos de la composición de la Tierra basada en meteoritos, lo cual conlleva la presencia de errores sistemáticos significativos.

Los anti-neutrinos de los decaimientos del uranio, del torio y del potasio terrestres son llamados geoneutrinos y podrían iluminarnos sobre la composición química del centro de la Tierra, inaccesible por otros medios. A través de su estudio podemos conocer la cantidad de U, Th y K presentes en la Tierra, determinar el calor producido por la radioactividad terrestre y obtener información sobre el origen de la Tierra. Hace más de 50 años, en una carta dirigida a F. Reines, George Gamow señaló la posibilidad de detectar neutrinos de origen terrestre. Eder [Eder 1966] y G. Marx [Marx 1969] fueron los primeros en proponer el uso de los geoneutrinos para hacer estudios del interior de la Tierra. A estos trabajos pioneros le siguieron otras propuestas [Avilez 1981, Krauss 1984, Kobayashi 1991, Raghavan 1998, Rotschild 1998, Fiorentini 2003, Mantovani 2004], las cuales no pudieron realizarse porque la sección eficaz de interacción de los neutrinos es extremadamente pequeña. Hoy en día, con el advenimiento de la última generación de detectores de neutrinos solares o de reactores, tales como KamLAND, Homestake, Borexino y SNO, la detección de geoneutrino resulta experimentalmente viable [Enomoto 2005, Araki 2005b, Tolich 2005, Giammarchi 2005]. De hecho, KamLAND es el primer detector de neutrinos que ha sido empleado para

identificar y medir geoneutrinos [Araki 2005b]. Localizado en la caverna de una mina en el centro de Japón, emplea una kilo-tonelada de líquido centellador ubicado dentro de una esfera de 13 m de diámetro, llena de agua (Fig. 1).

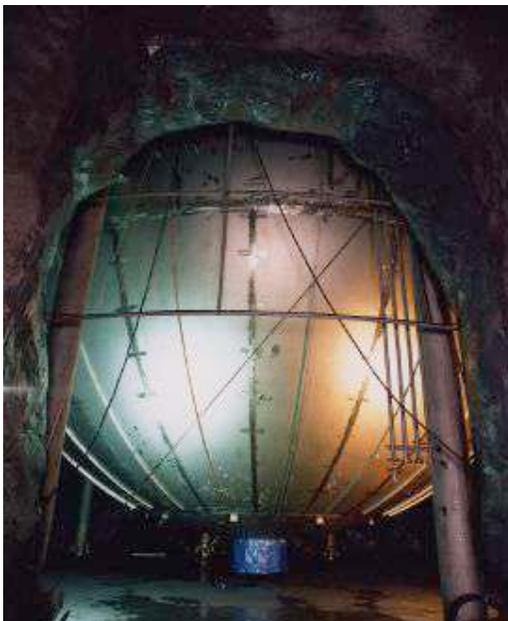
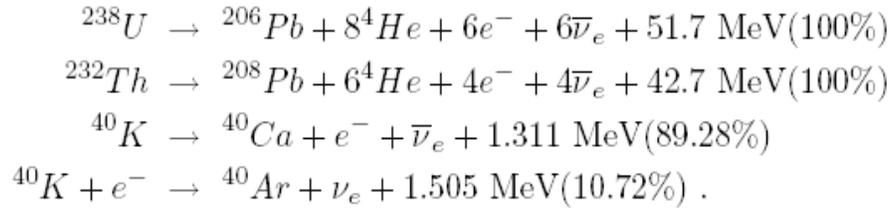


Figura 1. Detector de neutrinos en KamLAND.

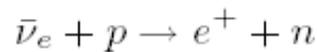
El radio terrestre es de aproximadamente 6,371 km. Una persona puede bajar a una profundidad máxima de 4 km y el pozo más profundo que se ha perforado para estudios geofísicos es de 12 km. Las muestras de algunas rocas que encuentran en la superficie terrestre provienen de una profundidad máxima de alrededor de 200 km. Entonces, podríamos decir que la Tierra es en gran parte tierra desconocida, por descubrir. A pesar de que se han realizado un sin número de estudios para determinar su estructura y composición química, no tenemos una observación directa sobre la composición química de la Tierra en su totalidad.

El calor total liberado por la superficie terrestre fue estimado en 44.2 ± 1.0 TW (terawatt) [Pollack, et al. 1993], por medio de la compilación de las observaciones realizadas en 24,774 pozos excavados en 20,201 sitios, abarcando el 62% de la superficie terrestre. La tasa de disipación del calor en la corteza terrestre oceánica y continental es igual a 31 ± 0.7 TW y 13.0 ± 0.3 TW, respectivamente. Una reciente re-evaluación de los mismos datos sugiere que la tasa de disipación de calor en la corteza oceánica es mucho menor, resultando en una estimación de la tasa total de disipación de 31 ± 1.0 TW [Hofmeister 2005]. Parte de este calor corresponde a energía proveniente del Sol, re-radiada, pero aproximadamente la mitad es producida en el interior de la Tierra.

Los análisis cosmo-químicos predicen una cantidad significativa de isótopos radioactivos terrestres, de manera que el calor generado por los decaimientos de esos isótopos podría llegar a producir cerca de 20 TW de calor. Los isótopos radioactivos más abundantes en la Tierra pueden clasificarse en tres categorías: isótopos de la serie de decaimientos del ^{238}U , isótopos de la serie de decaimientos del ^{232}Th y aquellos debidos al decaimiento del ^{40}K . Es importante notar que el calor generado por la radioactividad de estos isótopos se produce en procesos que involucran anti-neutrinos de tipo electrónico:



La medición de estos antineutrinos brinda una manera de determinar la razón de producción del calor radiogénico. El método más común para la detección de los antineutrinos electrónicos es el decaimiento beta inverso del neutrón



En este caso, una pregunta que debemos responder es cómo se distinguen los geoneutrinos de otras fuentes de antineutrinos. La detección del positrón y del neutrón separados por una pequeña distancia y dentro de una pequeña ventana de tiempo favorece la disminución del ruido de fondo. Debido al umbral de la reacción, la energía mínima de los antineutrinos detectables por este método es de 1.8 MeV, lo que imposibilita la detección de los antineutrinos provenientes del ^{40}K (ver Fig. 2).

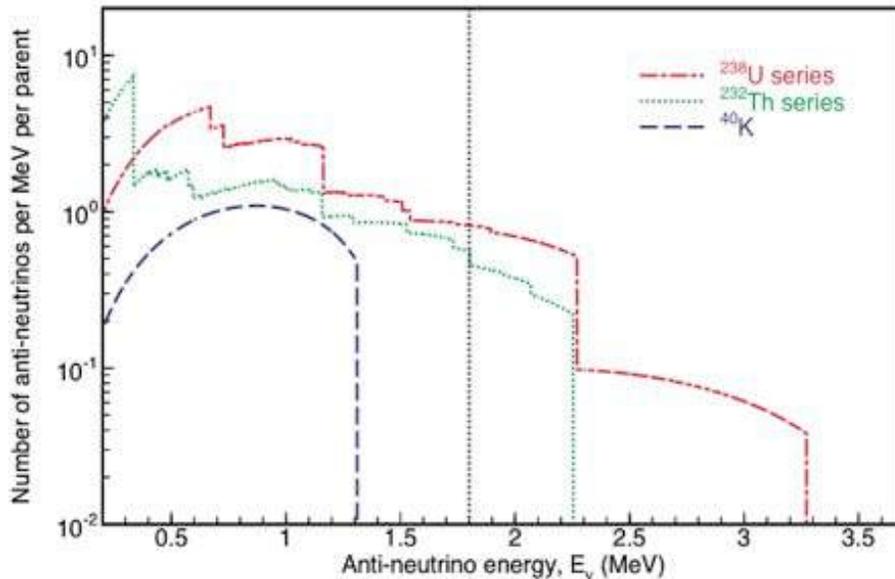


Figura 2. Espectro energético de los geoneutrinos de la series del ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K . La línea vertical punteada corresponde al umbral de la energía de detección.

El posible ruido de fondo en los experimentos descritos se puede dividir en tres clases: radioactividad natural, rayos cósmicos y otras fuentes de antineutrinos electrónicos (como pueden ser los reactores nucleares). Los muones de los rayos cósmicos producen neutrones energéticos e isótopos radioactivos que pueden simular el comportamiento del decaimiento beta inverso. Afortunadamente su efecto puede reducirse usando como veto el paso de un muón. El ruido de fondo dominante en el caso de KamLAND son los neutrinos de los reactores nucleares cercanos y la reacción $^{13}\text{C}(\alpha, n)^{12}\text{C}$, donde la partícula alfa proviene del decaimiento del ^{210}P que, a su vez, es un producto del decaimiento del radón (Rd). El neutrón puede perder energía o puede ser capturado por un protón, en cuyo caso imita a los antineutrinos.

Los primeros resultados de KamLAND arrojan siguiente valor para el flujo de geoneutrinos:

$$\Phi_{\nu} = 62.8_{-38.3}^{+44.9} \text{ TNU}$$

donde TNU es el número de eventos por 10^{32} protones, por año, que corresponde a la observación de 113 eventos potencialmente atribuibles a los geoneutrinos. El número de eventos asociados al ruido de fondo es de $91.6 \pm 9.5 \pm 9.6$. Combinando estos resultados con restricciones sobre la razón U/Th, el flujo estimado de geoneutrinos es de $\Phi_{\nu} =_{-33.8}^{+36.8} \text{ TNU}$. El resultado es consistente con el valor predicho por un modelo geológico y da un límite de 60 TW para la potencia radiogénica del U y Th terrestres.

Es importante destacar que el estudio de los geoneutrinos es un campo en el que se ha pasado de tener "experimentos pensados" a experimentos reales. Las colaboraciones KamLAND y Homesake están estudiando los neutrinos de origen terrestre, aunque sus primeros resultados se han publicando con grandes errores [Enomoto 2005, Fiorentini et al. 2006]. Esto puede mejorarse en los otros grandes experimentos que se dedican al estudio de los neutrinos solares, como Borexino y SNO, que tienen la capacidad de estudiar los geoneutrinos y, de esa forma, limitar con mayor precisión el valor de su flujo. Además, en la próxima generación de experimentos sobre geoneutrinos, se espera poder usar técnicas de detección que determinen la dirección de los neutrinos para realizar un mapa tridimensional de las fuentes de geoneutrinos y una imagen tridimensional de la distribución de las fuentes de calor provenientes del decaimiento radioactivo de elementos; tal es el caso del proyecto EARTH ("Earth AntineutRino TomographY") [de Meijer et al. 2006]. Otro proyecto de próxima generación LENA [Marrodan 2006] deberá permitir una medición precisa del flujo de geoneutrinos y determinar cuáles son los mecanismos de transferencia de calor más eficientes dentro de la Tierra.

4. LABORATORIO SUBTERRÁNEO

La búsqueda de la existencia y propiedades de la materia oscura, así como la determinación precisa de las propiedades de los neutrinos son temas que ocupan un lugar preponderante en la frontera actual del conocimiento y que ciertamente requiere de física más allá del ME. Estas partículas son difíciles de detectar debido a su interacción débil con la materia ordinaria de la que disponemos en el laboratorio y, de hecho, las partículas que componen la materia oscura aún están por ser observadas. Para estar en condiciones de hacerlo, es imperativo disminuir significativamente la intensidad de las señales producidas por otras partículas que pudieran confundirse con las producidas por las que nos interesa detectar. Esto sólo puede lograrse en un ambiente libre de ruido de fondo (“background”) que puede ser naturalmente provisto por un laboratorio subterráneo, puesto que la enorme cantidad de materia rocosa sobre los aparatos de medición proporciona un filtro natural y efectivo que permite eliminar una gran parte de ese ruido. La superficie de la tierra está constantemente expuesta al bombardeo de partículas provenientes del espacio exterior, los llamados *rayos cósmicos*, como se muestra en la Figura 1. Si se quiere discernir entre las débiles señales producidas por neutrinos o por partículas que componen la materia oscura y que pueden ser las pistas buscadas para explicar los fenómenos que se investigan, se requiere aislarlas de las producidas por el resto de las partículas, la mayoría de las cuales serán absorbidas por la roca por encima del laboratorio subterráneo, permitiendo así que sólo aquellas que se desean estudiar penetren hasta alcanzar los detectores construidos para tal efecto.

Bajo la superficie, este ruido se hace menor mientras mayor sea la profundidad. De hecho, la tasa de detección de partículas cargadas eléctricamente disminuye a razón de un factor de 10 por cada 300 metros de roca. El flujo de muones de los rayos cósmicos de altas energías decrece casi exponencialmente, de tal forma, que los rayos cósmicos no penetran mucho más de 4,000 metros. Aún a 2,000 metros de profundidad, mucho del ruido en rayos cósmicos es suficientemente atenuado como para permitir la detección de las débiles señales producidas por los neutrinos y la materia oscura. Un laboratorio construido a menor profundidad requeriría del uso de detectores con mayor capacidad de discriminación, de la acumulación de la señal por mayores períodos de tiempo y de un estudio mucho más detallado del ruido de fondo.



Figura 1. Esquema para visualizar cómo es que sólo las partículas más débilmente Interactuantes, como los neutrinos, pueden penetrar a grandes profundidades debajo de la superficie terrestre, mientras que el resto de las partículas es absorbida por la roca.

El ruido ambiental del laboratorio depende de la profundidad y de la naturaleza de las rocas presentes y como consecuencia puede ser diferente en diferentes instalaciones. El flujo de neutrones a bajas energías, se debe principalmente a la fisión y a las partículas alfas y neutrones emitidos por uranio y torio en las rocas. De tal manera que depende de la geología local y se hace independiente de la profundidad rápidamente. Los procesos de fragmentación (“spallation”) de muones son despreciables a bajas energías (MeVs) pero producen un flujo de neutrones de altas energías (GeV) que depende de la profundidad. El flujo de gamas, incluyendo radón y su progenie, depende de la geología local y es prácticamente independiente de la profundidad. Otra fuente de ruido, incluyen los materiales del detector, estructura de apoyo, conexiones eléctricas, etc. Los rayos cósmicos pueden producir trazas de núcleos radioactivos, durante la fase de construcción del detector y de sus materiales en la superficie (a menudo se requiere un periodo de varios meses antes de poder empezar a tomar datos) y durante la fase de operación subterránea. El proceso se llama *cosmogénesis*.

La importancia de las fuentes de ruido depende del experimento. Por ejemplo, la energía depositada directamente por los muones en el detector es más relevante para el decaimiento beta doble que para búsqueda de materia oscura, mientras que el ruido que viene de los neutrones y la cosmogénesis son importantes para ambos experimentos; en cualquier caso, una profundidad de mil metros es suficiente.

A manera de ilustración, podemos señalar que para diseñar un detector de neutrinos provenientes de una supernova, el requisito primario es contar con una gran cantidad de material activo,

es decir, que pueda interactuar con los neutrinos. Un cálculo simple muestra que es posible lograr unos cuantos cientos de eventos para antineutrinos del electrón (decaimiento beta inverso) por kilotonelada de materiales tales como agua o hidrocarburos. De este modo, una cantidad de material activo del orden de una kilotonelada o más es necesaria y el número de eventos aumentará mientras mayor sea ésta. Como la escala de tiempo en la que ocurre el colapso gravitacional de la supernova es del orden de 10 segundos y la mayor tasa de emisión ocurre durante el primer segundo, para supernovas en la galaxia la frecuencia de las interacciones será de al menos 10-100 Hz.

Asimismo, en el rango de energía de TeV, se espera que los detectores de Cerenkov (agua o hielo) con volumen del orden de un km^3 una resolución angular de 0.5 a 1 grado [Ahrens, J. et al., 2004]. Lo anterior permitirá que para fuentes abruptas tales como las GRB (con duración de unos cuantos segundos y hasta 100 s), o para las ráfagas en blazares (con duración de horas-días), las señales angular y temporal permitirán distinguirlas del fondo [Ave, M. et al., 2005]. En este sentido, un laboratorio subterráneo para ubicar tal detector tiene la ventaja de que, como discutimos antes, permite reducir la cantidad de radiación cósmica. Es deseable también que el laboratorio se localice en una región donde la radioactividad ambiental sea baja. Notemos que estos requisitos son menos restrictivos que en el caso de experimentos diseñados para detectar neutrinos solares o el decaimiento beta nuclear doble, puesto que el cociente de señal a ruido de fondo es bajo durante la emisión de neutrinos de la supernova. Más aún, puesto que se espera que casi todos los neutrinos tengan una energía mayor a 5 MeV, la presencia de radiactividad de fondo es menos importante que la profundidad del laboratorio para estos fines específicos. Las estimaciones respecto a la frecuencia con que una supernova galáctica ocurre, típicamente predicen una alrededor cada 30 años. Esto permite tener una esperanza razonable de que una supernova ocurra durante los próximos 10 años. Aun así, esta tasa de ocurrencia es lo suficientemente baja como para poder darnos el lujo de perder eventos, por lo que el detector debe ser muy eficiente y el experimento debe ser diseñado teniendo en mente que debe funcionar durante un largo periodo de tiempo. Detalles respecto a las ventajas de distintos materiales activos así como una amplia descripción del tipo de reacciones buscadas en el caso de que el experimento sea diseñado para ser sensible al tipo de neutrinos que se detecta, así como a su espectro, pueden ser encontrados en la Ref. [Scholberg 2007].

La comunidad internacional dedicada al estudio de física de altas energías ya ha emprendido una búsqueda para determinar de manera precisa los parámetros de la mezcla de neutrinos y sus masas [Usov y Milgrom 1995, Vietri 1995, Waxman 1995]. También ha reconocido que la mejor manera de observar estos parámetros se logra yendo bajo tierra, como en el Super Kamiokande [Mohapatra, R.N. and Smirnov, A.Y., 2006, Minakata, H., 2007], que es el prototipo de un laboratorio subterráneo de investigación. Super Kamiokande consta de un enorme tanque de 50,000 toneladas con agua ultrapurificada localizado a unos 1,000 metros de profundidad en la mina de Kamioka, Japón. Este laboratorio ha inspirado a las grandes potencias mundiales, que han reparado en la gran ventaja que provee realizar investigación multidisciplinaria en un laboratorio de esta especie [DUSEL, EarthLab].

De manera similar existen actualmente cerca de 25 experimentos activos en la búsqueda de los candidatos correspondientes a WIMP para la materia oscura, con la característica común de que todos intentan bloquear el ruido proveniente de otros fenómenos utilizando laboratorios subterráneos y eliminando señales provenientes de interacciones conocidas. Existen otros 8 experimentos que serán puestos en funcionamiento en el futuro cercano, que pueden ser clasificados según la técnica que utilizarán: detectores criogénicos y detectores con gases nobles líquidos. Se espera que

estos futuros detectores tengan una sensibilidad hasta cuatro órdenes de magnitud mayor que los experimentos actualmente en funcionamiento. Recordemos también que el experimento $0\nu b\bar{b}$ más sofisticado hasta la fecha para dilucidar la posible naturaleza de Majorana de los neutrinos no puede ser realizado en laboratorios convencionales de superficie.

Por el contrario, requiere de equipo localizado en minas o túneles a una profundidad de por lo menos 1,000 metros bajo rocas suficientemente antiguas de tal modo de garantizar la necesaria drástica reducción del ruido de fondo, especialmente el provocado por los muones. Es indudable que un laboratorio subterráneo de este estilo construido en México puede proyectar a la comunidad científica nacional a un lugar de vanguardia internacional, brindando además la posibilidad a científicos de otros países de diseñar y participar en experimentos de frontera en las áreas mencionadas.

La propuesta de construir un laboratorio subterráneo en México está centrada inicialmente en la instalación de un detector de materia oscura. A continuación se mencionan las principales características de esta propuesta; los detalles específicos, en particular las ventajas y mejoras con respecto a otros experimentos en funcionamiento o recientemente propuestos, se encuentran discutidas en la sección respectiva de este documento. También se bosquejan algunas posibilidades acerca de experimentos con neutrinos que en un futuro pudieran implementarse en las instalaciones subterráneas del laboratorio.

4.1 DETECTOR SENSIBLE A MATERIA OSCURA

En este caso podemos destacar la posibilidad de una búsqueda directa de WIMPs. Las partículas que integran la materia oscura son, muy probablemente, reliquias masivas generadas durante el universo temprano, con el cuál alguna vez estuvieron en equilibrio térmico, pero que se enfriaron a niveles no relativistas para la época de la formación de estructura. La búsqueda directa de materia oscura en la forma de WIMPs, como los neutralinos por ejemplo, se ha convertido en un campo de investigación intenso. Actualmente existen en funcionamiento, en construcción o propuestos, alrededor de una veintena de experimentos. El principio técnico comúnmente empleado en la detección directa se basa en la observación de eventos de dispersión elástica de WIMPs con los núcleos de los átomos del material detector. La sección eficaz correspondiente se estima entre los 10^{-7} y los 10^{-11} pb. Considerando que la velocidad media estimada para WIMPs en el halo local es del orden de una milésima de la velocidad de la luz, la región cinemática energética de interés para los experimentos resulta ser tan baja como unos 100 keV. Con una densidad esperada en el halo local entre 0.3 y 0.7 GeV/cm² las anteriores secciones eficaces equivalen a una razón de detección menor a 0.1 eventos por kilogramo de detector por día. El principal reto para cualquier experimento de detección directa es la reducción del ruido de fondo inducido principalmente por los rayos cósmicos, las impurezas radioactivas en el entorno o por neutrones.

Para cubrir el espacio de parámetros, el experimento requiere ser optimizado considerando que los detectores usados sean de una escala relativamente grande, con la mayor masa posible, que su umbral de energía de detección para el retroceso nuclear sea bajo y que el ruido de fondo sea también bajo, lo que implica un sistema de detección con una apropiada discriminación de eventos.

La propuesta de un Detector Criogénico de Materia Oscura Mexicano tiene como objetivo central el desarrollo, montaje, y operación de un detector de estado sólido (criogénico) para la detección de materia oscura tipo WIMP. Dado el estado del arte de las técnicas de detección criogénicas,

se propone la construcción de un detector basado en una versión mexicana de la tecnología ZIP (de sus siglas del inglés “Z-dependent Ionization and Phonon”), es decir, del 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.

Se propone que en un plazo de cinco años el experimento alcance una masa de detección de por lo menos 25 Kg. y que se desarrolle en tres etapas:

- a) Durante la primera etapa, se desarrollará la tecnología del detector y el arreglo experimental en un tiempo estimado de año y medio, incluyendo el desarrollo de un detector prototipo. Se propone explorar el uso de detectores de estaño (Sn, peso atómico 118.69) y Ge (peso atómico 72.59) cristalinos, los cuales permitirán alcanzar mayor masa en menor volumen. Otros materiales cristalinos de masa mayor al Si, pueden ser también una alternativa viable. Durante esta etapa deberán adecuarse también las instalaciones subterráneas necesarias para la instalación y operación del detector.
- b) Durante la segunda etapa de montaje del experimento en el sitio subterráneo, con una duración estimada de tres años, se desarrollarán pruebas *in situ* del prototipo para calibrar y analizar su comportamiento y mejorar la comprensión del ruido de fondo. Se construirán los primeros módulos de detección, montaje y toma de datos con el objetivo de alcanzar entre 5 y 10 Kg. de masa, lo cual incrementaría por un factor de 20 la sensibilidad respecto al estado del arte del detector de materia oscura con mayor capacidad hoy en día, el llamado CDMS (“Cryogenic Dark Matter Search”), localizado en la mina de Soudan, Minnesota, E.U.A. Durante esta etapa deberá continuarse con la construcción y calibración de los módulos de detección restantes.
- c) Durante una última etapa, la de escalamiento del detector, con una duración mínima de un año, se deberán colocar los módulos restantes, para alcanzar un mínimo de 25 Kg. de masa, y realizar la toma de datos con el detector final. La sensibilidad esperada podría mejorar en un factor de 100.

Las posibilidades de desarrollo tecnológico que abre una empresa de este tipo son extremadamente atractivas para campos multidisciplinarios como la ciencia de materiales, el estado sólido y la electrónica de alta velocidad, uniendo esfuerzos con la física de altas energías en la búsqueda de respuestas a uno de los misterios de mayor interés en la ciencia de frontera de la actualidad.

4.2 DETECTOR SENSIBLE A NEUTRINOS

Un programa de investigación coordinado es necesario para resolver el gran número de cuestiones pendientes dentro de la física de los neutrinos. A continuación, damos una lista de la clase de experimentos que, con neutrinos de diferentes fuentes, podrían realizarse en las instalaciones subterráneas del LSMM. Su factibilidad estará sujeta tanto a limitaciones de tipo técnico como financiero y, llegado el caso, la selección será competencia de un comité científico integrado por expertos nacionales y del extranjero.

4.2.1 Reactores nucleares

Los experimentos de desaparición de antineutrinos del electrón producidos en reactores ofrecen la opción más factible (y económica) para determinar $\sin^2 2\theta_{13}$ [Minakata et al., 2003, Kozlov et al., 2003, Anderson, K. et al. 2004], La idea básica de los nuevos experimentos es la de usar dos detectores, uno situado a pocos cientos de metros del núcleo del reactor y el otro, más lejos, a $\sim 1-2$ km de distancia, con lo cual se reduce la incertidumbre en el flujo de los neutrinos. Las oscilaciones se investigan buscando una desviación de la dependencia en $1/r^2$ en la razón de interacción de los neutrinos. Construyendo ambos detectores lo más idénticos que sea posible, las incertidumbres sistemáticas en la aceptación son suprimidas. Los errores estadísticos pueden reducirse incrementando el tiempo de exposición y el volumen fiducial del detector. Tres experimentos de este tipo están siendo construidos, Double Chooz, en Francia, Daya Bay, en China, y Reno, en Corea, y otro ha sido propuesto para llevarse a cabo en Brasil [Anjos et al. 2006]. En la actualidad, la única planta nuclear eléctrica de México es la Central Laguna Verde, que se ubica en el Estado de Veracruz, sobre la costa del Golfo de México y cuenta con 2 unidades generadoras de 682.5 MW eléctricas cada una. Por lo tanto, un experimento con neutrinos de reactores no se ve, por ahora, factible en nuestro país, a menos que en, el futuro próximo, un reactor de alta potencia fuese puesto en operación en las cercanías de alguno de los sitios que sean seleccionados para la construcción del LSMM.

4.2.2 HACES DE NEUTRINOS

Debido a sus mayores energías, los haces de neutrinos de aceleradores requieren distancias más larga que en los reactores para exhibir el patrón de oscilaciones. Mediciones del modo de aparición $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ y del modo de supervivencia (o desaparición) $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$, para oscilaciones de muy larga línea de base (“long baseline”), han sido propuestas con el fin de probar θ_{13} y la fase δ y determinar de forma precisa los parámetros “atmosféricos” Δm_{32}^2 y θ_{23} [Diwan et al. 2003]. Esto permitirá saber el octante al que pertenece θ_{23} y hasta que punto se aparta del valor máximo de 45° .

Los efectos de la materia en las oscilaciones de antineutrinos aparecen con el signo cambiado con respecto a los neutrinos y, por ende, las probabilidades de aparición, se verán afectadas de manera diferente según sea el signo de Δm_{32}^2 . Si la distancia es lo suficientemente grande mejora la sensibilidad a la jerarquía de masas de los neutrinos y a la violación de CP. Estas dos cuestiones, sin duda, son las más importante que se buscará resolver con los experimentos de larga línea de base. Para extraer la información física relevante a partir de las cantidades medidas será preciso aislar los efectos de la materia y encontrar la forma de resolver las degeneraciones y correlaciones introducidas por los parámetros de las oscilaciones [Barger 2002].

Un detallado estudio fenomenológico y de optimización es necesario para determinar las especificaciones de las fuentes y las localizaciones de los detectores. Un haz de neutrinos producidos por una fuente intensa de protones (~ 2 MW) en Fermilab o Brookhaven podría dirigirse a un gran detector (>100 kton) instalado en el LSMM. La combinación de una alta intensidad en el haz de neutrinos con una gran distancia ($>3,000$ km) le darían a este experimento un alto potencial físico. Una interesante posibilidad para resolver la correlación entre θ_{13} y δ es usando la llamada “línea base mágica” (“magic base line”), la cual coincide con la longitud de refracción y para la cual los efectos de violación de CP se cancelan, permitiendo una medición limpia de $\sin^2 2\theta_{13}$ y la jerarquía de masas. Para la densidad promedio de la Tierra esta distancia es de alrededor de 8,000 km y sería próxima a la distancia entre CERN y el sitio del LSMM.

4.2.3 NEUTRINOS SOLARES

Las mediciones de los flujos de neutrinos producidos en las cadenas de reacciones que ocurren dentro del Sol serán piezas claves para la completa verificación del modelo solar estándar y el cabal entendimiento del problema de los neutrinos solares. Una carencia importante es la ausencia de mediciones, en tiempo real, del espectro de los neutrinos solares para energías menores a 5 MeV. Dos nuevos experimentos, KamLAND (fase solar) y Borexino, están optimizados para observar los neutrinos del ${}^7\text{Be}$. Medidas en tiempo real de los neutrinos pp con una incertidumbre del 1% representan la mejor oportunidad de mejorar el conocimiento de θ_{12} . Es esta una empresa complicada y requerirá de métodos y aparatos con una gran supresión del ruido de fondo, el cual crece enormemente cuando el umbral baja a energías del orden de 100 keV. Una idea que ha sido revivida es el empleo de centellador líquido dopado con indio (In), con una sofisticada técnica de segmentación [Grieb et al. 2007]. Otra posibilidad es medir la dispersión elástica de los neutrinos por los electrones en neón líquido [McKinsey y Coakley 2005]. Entre sus ventajas se cuentan la ausencia de radioisótopos de larga vida, el bajo costo y una elevada producción de centelleo. Además, el mismo experimento serviría para la detección de materia oscura mediante el retroceso de los núcleos de Ne, causado por la dispersión de WIMPs.

Por otro lado, las mediciones de secciones transversales nucleares a las energías estelares, descritas en el capítulo anterior, representan una contribución significativa para la predicción teórica de los flujos de los neutrinos solares. Mediciones similares, a un costo relativamente bajo y en un tiempo bastante corto, podrían ser implementadas en el LSMM, tal y como se detalla en el Cap. 7.

4.2.4 GEONEUTRINOS

Una de las posibles aplicaciones de detectores de centelleo de gran masa, y con un buen blindaje, es la medición de los antineutrinos producidos por el decaimiento de los elementos radiactivos que se encuentran en el interior de la Tierra. La reacción de detección es el decaimiento β inverso y las fuentes de ruido más importantes son la contaminación radiactiva interna del centellador y los $\bar{\nu}_e$ de reactores nucleares. Por tal motivo, conviene que los futuros detectores de geoneutrinos se instalen lejos de reactores nucleares, lo cual, en México, por lo indicado en el primer inciso de esta sección, no representa una seria dificultad.

Mediciones recientes en meteoritos y rocas terrestres han llevado a una revisión del modelo tradicional de la Tierra y a la hipótesis de que elementos radiactivos como uranio y torio se acumulan en la interfase núcleo-manto a 2,700 km [Boyet y Carlson 2005]. Una resolución angular de $\sim 3^\circ$ permitiría observar procesos en esta interfase con una resolución espacial de unos 200 km. Aparte de la tomografía sísmica, las observaciones de los antineutrinos parecen ser el único método para explorar el interior de nuestro planeta. La mejor opción incluye una red global de observatorios con detectores sensibles a las direcciones de los geoneutrinos. Las mediciones como las realizadas hasta ahora carecen de esa sensibilidad y no pueden distinguir las contribuciones del núcleo de las del manto. Centelladores líquidos cargados (por ejemplo, con litio) tienen el potencial de detectar las direcciones de los geoneutrinos [Shimizu 2007]. Otras de sus posibles aplicaciones son la determinación de las direcciones de las supernovas.

4.3 INSTALACIONES SUBTERRÁNEAS

En el mundo existen diferentes tipos de instalaciones subterráneas, túneles, minas. Cada tipo tiene sus ventajas. Las instalaciones de túnel son de fácil acceso, ya sea por rieles de ferrocarril o por carreteras, mientras que las minas son de difícil acceso pero es un ambiente de bajo ruido. En México no existen túneles disponibles mientras que existen varios candidatos tipo mina para el laboratorio subterráneo mexicano. Como ya se mencionó anteriormente, el hecho de que sea subterráneo es para tener un ruido muy bajo. Laboratorios subterráneos en otras partes del mundo tienen flujos de muones del orden $2.5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-2} \text{ seg}^{-1}$. Este flujo depende de la profundidad de la cavidad. Análogamente al flujo de muones, un flujo de neutrones aceptable para muchos experimentos viables es del orden de 10^{-2} neutrones/ $\text{m}^2 \text{ seg}$. Este flujo depende del material de la cavidad (radioactividad de las rocas).

4.3.1 LABORATORIOS Y CAVIDADES

Se estima que la dimensión de la cavidad necesaria para el laboratorio subterráneo será del orden de 400 m^2 . Se contempla que esta cavidad provea espacio suficiente para albergar los laboratorios, depósitos para almacenamiento, sistema de bombeo, etc. Prevemos tener cuatro laboratorios, dos de tipo cuarto limpio y dos normales. Los cuartos limpios requerirán de aire filtrado y comprimido que se ajusten a las especificaciones deseadas. Uno de ellos se destinará para experimentos de física de partículas y el otro para experimentos huéspedes. Las dimensiones de los laboratorios serán de unos 40 m^2 de superficie por 4 m de altura, con un requerimiento de tipo 1,000 ó 2,000, en el caso de los cuartos limpios.

4.3.2 INFRAESTRUCTURA

Fuente de electricidad. La forma tradicional para proporcionar energía eléctrica a las instalaciones subterránea es teniendo una subestación en la superficie y líneas de alimentación que lleguen hasta la cavidad; se requieren aproximadamente 13 kV. Además de esta alimentación estándar, la instalación requiere tener una planta de emergencia que tenga una potencia de 150 kW, la cual debe ser suficiente para alimentar la instalación por 48 horas.

Alimentación de aire. La instalación subterránea debe contar con una alimentación de aire. Las cantidades exactas del flujo y el volumen dependerán del tamaño de la cavidad. Volúmenes y flujos típicos para cavidades estándar son: un flujo de 16,000 pies cúbicos por minuto para una cavidad de 220,000 pies cúbicos. La experiencia de otras instalaciones subterráneas nos dice que la mejor manera de proporcionar aire es aislando regiones de la cavidad donde cada región se alimenta por una unidad independiente (“Air Handling Unit”).

Agua. El agua necesaria para la instalación subterránea será proporcionada desde la superficie, el flujo hacia la cavidad lo proporciona la gravedad y el flujo fuera de la cavidad requerirá de bombas de agua. Un flujo típico para una cavidad es del orden de 50 galones por minuto. Aparte de usarse el agua para las necesidades de laboratorio y demás, se usará también para enfriar el aire.

Temperatura. La temperatura típica en una cavidad puede ser de 42°C, la idea es llevar esta temperatura a algo más soportable por el ser humano (alrededor de 20°C) y a una humedad también tolerable aproximadamente menos de 46%.

Presión de aire. La presión del aire dentro de la cavidad debe ser positiva para evitar que entre polvo, típicamente se requiere una presión 20% más alta que en la superficie.

Iluminación. Se propone que la luz en la cavidad sea tipo fluorescente por su bajo consumo de energía, para los laboratorios se requiere luz normal y debe existir un sistema de lámparas de emergencia alimentadas por baterías.

5. LABORATORIO DE SUPERFICIE

El Laboratorio de Superficie (LS) tendrá tareas importantes, tanto en relación con el Laboratorio Subterráneo (LSU), como con la comunidad de físicos de altas energías en el país y una fracción de los científicos en ciencias de la tierra, biología e ingeniería, dentro de un contexto en el que se fomenten las investigaciones de carácter multidisciplinario. El LS podrá convertirse en un centro de excelencia tecnológica, que sirva de nexo entre los resultados de las investigaciones desarrolladas por académicos del país y sus implementaciones por el sector productivo en artículos competitivos dentro del mercado global, lo cual presupondrá importantes avances en la transferencia de tecnología y los desarrollos propios. Un objetivo básico del LS será el de constituirse en un verdadero laboratorio nacional, que catalice el desarrollo de la ciencia en México en las áreas siguientes:

- Física de Altas Energías
- Física de Astropartículas
- Astrofísica nuclear
- Geofísica e Ingeniería de rocas
- Microbiología
- Química y Biotecnología

Se espera que este laboratorio concentre actividades de excelencia y contribuya a la integración y consolidación de grupos mexicanos que participen en colaboraciones internacionales con un alto impacto científico dentro de las áreas mencionadas.

Los laboratorios nacionales en otros países como EUA y la Unión Europea han demostrado ser una herramienta decisiva para el desarrollo científico de los mismos. Igualmente, los centros de investigación multidisciplinarios han demostrado atacar los problemas científicos que se encuentran en la frontera de sus disciplinas en una forma mucho más efectiva que los centros de investigación especializados solamente en una u otra disciplina científica. El LS junto con el LSU constituirán los primeros laboratorios de tipo verdaderamente nacional en México, con la ventaja adicional de que, por su carácter multidisciplinario, contribuirán al avance científico de nuestro país a través de un esquema de colaboración que ya ha sido probado con éxito en otros países.

Una de las metas del laboratorio es la de contribuir a la formación de científicos y técnicos en nuestro país con una calidad de primer nivel internacional y que además contarán con una sólida formación en aspectos multidisciplinarios de la investigación científica y tecnológica. Los físicos de altas energías y de astropartículas han desarrollado métodos para resolver el reto de la cantidad inmensa de datos que se deben adquirir y procesar en los experimentos de esta área. Por ejemplo, la WEB y el GRID surgieron en esta comunidad. Además, sus métodos de detección de partículas y de procesamiento de datos se exportaron con éxito a otras áreas de la ciencia, como la medicina nuclear para tratar enfermedades con haces de partículas y la medicina de diagnóstico, a través de imágenes PET, de rayos X computarizadas y de resonancia magnética nuclear. También la biología se ha beneficiado de estas técnicas que cada vez más se han cristalizado en artículos producidos en

serie por el sector industrial. En el futuro inmediato pueden surgir aplicaciones multidisciplinarias derivadas de la investigación en física de altas energías y astropartículas. Para dar un ejemplo en este sentido, baste mencionar que, en 1983, un grupo de connotados científicos consideraron la posibilidad de usar neutrinos para exploraciones geológicas, así como el llamado GEOSCAN para medir el perfil de densidad de nuestro planeta [De Rújula 1983]. Esta idea, que en ese momento se antojaba remota, ha empezado ya a cobrar

Ya que es imposible imaginar avances científicos sin una tecnología de punta en computación, el LS contará con una infraestructura de cómputo de primer nivel realidad, como se discute en el apartado de Geoneutrinos de esta propuesta., con amplia capacidad, que impulsará el uso de la computación avanzada en diversos campos de la ciencia y de la sociedad en general.

5.1 BENEFICIOS

Para el progreso tecnológico de nuestro país será muy útil contar con un laboratorio dotado de equipos básicos para el desarrollo de diferentes tecnologías y que, a la vez, tenga personal especializado capaz de dar servicios de alta calidad. Los beneficios más inmediatos de los experimentos en física de altas energías y de astropartículas son:

Recursos Humanos

Con la participación en experimentos en la frontera del conocimiento se formará gente altamente capacitada, con una mente analítica y un enfoque sistemático acerca de nuevos problemas. Estos recursos humanos 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. Asimismo, para el montaje y operación de los experimentos que se llevarán a cabo en el LSMM resultará imprescindible contar con diversos talleres (mecánico, de electrónica y óptica, microscopía, vacío, máquinas y herramientas...) a cargo de especialistas que puedan brindar servicios y realizar tareas de apoyo de alta calidad. Por tal motivo, a partir de la aprobación de esta propuesta, además de estudiantes graduados, será preciso que personal técnico de distintas disciplinas perfeccione su preparación académica y entrenamiento, capacitándose en el manejo de instrumental y técnicas avanzadas. Con este propósito, deberá brindárseles el apoyo necesario para que puedan realizar estancias en laboratorios extranjeros de primer nivel, como es el caso del CERN, en Ginebra, Suiza. Una estadística de seguimiento de los estudiantes que han obtenido sus doctorados en física experimental de altas energías, realizada por dicho laboratorio, muestra que aproximadamente la mitad de los estudiantes de doctorado se quedan en la investigación después de graduarse, mientras que la mitad restante se cambian a otras áreas donde aplican sus conocimientos sobre manejo de detectores de alta tecnología, electrónica rápida y de bajo ruido y computación y análisis de datos de frontera.

Tecnología

El listado de tecnologías usadas en la física de altas energías es larga: ingeniería mecánica, ingeniería electromecánica, ciencias de materiales, radiofrecuencia, microondas, geodesia, criogénica, técnicas de ultra vacío, electrónica, sistemas de computadoras y redes. Cabe decir que, por ejemplo, los métodos de control de la construcción del túnel del acelerador del CERN se usaron después

para la construcción del túnel bajo el Canal de la Mancha. También los detectores de radiación desarrollados para la física de altas energías ahora son usados para la inspecciones de camiones de carga en aduanas. El listado de aplicaciones de las tecnologías novedosas desarrolladas en experimentos de física básica son numerosas. Parece entonces deseable de construir en México, donde ya existe una comunidad relativamente amplia, un centro que podría concentrar en un lugar muchos elementos de tecnología de punta no accesible de otra manera en el país. El alto costo de tales tecnologías justifica ampliamente promover una concentración de los recursos humanos y de los aparatos.

5.2 COLABORACIONES INTERNACIONALES

El grupo de investigadores que presentan esta propuesta cuenta con la experiencia y los conocimientos para desarrollar una gran variedad de los sistemas y detectores requeridos en los experimentos de física de altas energías. Esta experiencia se ha adquirido a través de muchos años gracias a la participación en diversas colaboraciones internacionales como las que se describen a continuación:

Observatorio Pierre Auger

El grupo mexicano que forma parte de la Colaboración Pierre Auger está conformado por investigadores, estudiantes y técnicos de cuatro instituciones: BUAP, CINVESTAV, UMSNH y UNAM. Sus integrantes han participado desde el inicio, hace más de una década, en el diseño, construcción y operación del Observatorio Pierre Auger, cuya instalación será concluida a mediados de 2008. Asimismo, los miembros del grupo se han involucrado de manera importante en el análisis de los datos que desde el 2004 ha venido acumulando el Observatorio, enfocando sus esfuerzos y recursos en la caracterización de la composición del flujo primario, que es uno de los problemas centrales asociados con los rayos cósmicos de energía más alta. Paralelamente, a fin de incrementar el potencial del Observatorio, en esta etapa se implementarán dos ampliaciones principales a su diseño base. En el aspecto experimental, el interés se enfocará en el desarrollo y construcción de una de tales ampliaciones: el experimento AMIGA (“Auger Muon Infill Ground Array”). Surgido de una propuesta realizada conjuntamente con el grupo argentino de Auger, la cual ha sido recientemente aprobada por el pleno de la Colaboración Internacional, dicho experimento consistirá en un sub-arreglo con una mayor densidad de detectores de superficie (Cherenkov en agua), complementado con un arreglo de más de 60 centelladores plásticos, de 30 m² de área cada uno, para la detección de muones. De esta forma, se conseguirá disminuir el umbral de energías de Auger y, a la vez, obtener información por separado sobre la componente muónica de las cascadas, aumentando en gran medida la capacidad actual para la determinación de la naturaleza de las partículas que constituyen el haz primario. Además de su originalidad y relevancia científica, AMIGA, ofrece la oportunidad de contribuir al desarrollo en México en nuevas tecnologías para la medición de fotones, la fabricación de materiales plásticos avanzados y el perfeccionamiento de técnicas avanzadas de adquisición de datos. Un aspecto esencial en el diseño del experimento es la caracterización de la contaminación electromagnética (electrones y fotones) de la señal registrada por los detectores de muones. Con este fin, se llevará a cabo un experimento que será concebido y desarrollado en su totalidad por los grupos mexicanos. 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 nunca antes realizadas en el área: determinar las funciones de distribución angulares de las componentes muónica y electromagnética de chubascos atmosféricos a nivel del suelo, y caracterizar detallada y cuantitativamente la propagación de electrones, fotones y muones relativistas en la roca y su efecto en detectores subterráneos. La participación eficiente en estos proyectos requiere la existencia de una infraestructura avanzada para la concepción, diseño y construcción de nuevos detectores, tanto desde el punto de vista de la producción y prueba de nuevos materiales como de componentes electrónicos complejos. El laboratorio de superficie, con sus instalaciones y personal técnico-científico, tendrá la capacidad de llevar a cabo estas labores por sí mismo ya que no existe un laboratorio en México capaz de enfrentar todos los retos científicos y tecnológicos que implica este proyecto, siendo de fundamental importancia para que el grupo tenga condiciones reales de enfrentar con éxito los desafíos propuestos.

Colaboraciones Alice y CMS en el LHC

Desde el 2000, personal académico de cuatro instituciones mexicanas (BUAP, CINVESTAV, UASLP y UNAM) participan en los experimento ALICE y CMS del CERN, Ginebra, Suiza con la responsabilidad de entregar dos de los detectores que componen el experimento ALICE (ACORDE y V0A) y de hacer contribuciones al detector de silicio para CMS. Una vez que la construcción haya concluido, estos grupos están interesados en continuar construyendo mejoras a los dispositivos de detección mencionados y de enfrentar retos similares en el futuro con una eficiencia mucho mayor. En este sentido se consideran dos posible contribuciones en el caso de ALICE: (i) la mejora del potencial de identificación de protones hasta 30 GeV/c con un detector Cherenkov de gas y (ii) la mejora del dispositivo ACORDE con la extensión de la superficie del detector bajo tierra y la construcción de un arreglo en la superficie. Para llevar adelante estos proyectos será crucial contar con el LMS ya que brindará la oportunidad de producir centelladores y otras piezas complejas como los detectores de gases.

Otras colaboraciones internacionales en Física de Altas Energías

Otros experimentos en los cuales participan grupos mexicanos y que se beneficiarían de la infraestructura provista por el laboratorio de superficie propuesto son: FNAL-687, FNAL-690, D0 (FNAL-740), FNAL-781, FNAL-791, FNAL-823 (D0 Run II), FNAL-831 (FOCUS), FNAL-871, FNAL-921 (CKM), NIMROD, SHADES, AMS, CREAM, Q-weak, PV DIS, P326-NA48/3. Mayores detalles pueden ser encontrados en la siguiente página web: <http://www.ifm.umich.mx/~villasen/PartExp/Exp.html>.

5.3 OBJETIVOS

Los principales objetivos del Laboratorio Multidisciplinario de Superficie son:

- Brindar soporte académico y técnico al Laboratorio Subterráneo.
- Apoyar los experimentos ya existentes en el país o planeados para el futuro próximo en las áreas respectivas que podrían aprovechar este laboratorio para ampliar sus posibilidades de participación activa, de transferencia de tecnología así como de desarrollo de nuevas tecnologías en el país.

- Servir de soporte académico y técnico a las colaboraciones internacionales que se tienen en marcha o se establezcan en los próximos años.
- Realizar investigación de frontera altamente competitiva de nivel internacional.
- Formar recursos humanos altamente calificados para llevar a cabo investigación científica y tecnológica de avanzada en el campo de las telecomunicaciones, electrónica, sistemas de adquisición de datos, control, procesamiento digital de procesos automatización y mecatrónica.
- Formar recursos humanos para el diseño y construcción de los detectores, sistemas electrónicos de control, adquisición de datos, y en el desarrollo de instrumentos, etc.
- Crear desarrollos tecnológicos adecuados a las necesidades del laboratorio.
- Generar desarrollos tecnológicos patentables.
- Servir de centro de excelencia tecnológica capaz de transferir las últimas tecnologías de electrónica y de construcción de aparatos complejos de alta precisión. Se podría esperar que una fracción de la gente capacitada en el Laboratorio con el tiempo forme sus propias empresas para el mercado en áreas tales como electrónica rápida, electrónica de bajo ruido, telecomunicaciones, imágenes médicas e industriales, computación, etc. Tales empresas se podrían establecer en la vecindad del LMS, de tal manera que tengan acceso a las instalaciones del Laboratorio y a sus miembros. Esto es también un modelo que funciona muy bien alrededor de los grandes centros de investigación que se rodean de corredores industriales, como el Laboratorio Nacional Fermi cerca de Chicago, en EUA, o el Laboratorio CERN.

5.4 LABORATORIO DE ELECTRÓNICA

La experiencia de otras instalaciones como las que aquí se proponen ha demostrado la necesidad de contar con un laboratorio de electrónica que respalde el desarrollo de todos los experimentos que se lleven a cabo. Esto produce un beneficio económico y fomenta el desarrollo de la tecnología de punta usada en este tipo de experimentos; otro beneficio es la generación de recursos humanos altamente calificados, además de que estos retos científicos atraen a valiosos jóvenes investigadores nacionales y extranjeros que buscan proyectos de vanguardia.



Figura 1. Fotografía de uno de los numerosos tipos de tarjetas que han sido diseñadas y producidas (ver ítem 4).

En un laboratorio de esta clase se desarrollarán de manera natural áreas como: telecomunicaciones por radiofrecuencia y fibra óptica, control, robótica, automatización, instrumentación, mecánica, procesamiento digital de señales, electrónica digital de altas frecuencias, electrónica de potencia, bioelectrónica, etc. Los especialistas que se formen en estas instalaciones tendrán una calidad de reconocimiento internacional y podrán incorporarse a la industria nacional, formar sus propias empresas o ser contratados en instituciones de educación superior.

A continuación damos un listado corto de técnicas bien establecidas en el conjunto de las instituciones proponentes de este proyecto. Esto es nada más una parte de las posibilidades actuales y establecen sin dudas que el laboratorio propuesto podría ser un verdadero centro de creación de nuevos sistemas electrónicos y de instrumentación complejos que serán competitivos a nivel mundial:

1. Sistemas de caracterización automáticos para parámetros experimentales de detectores y accesorios.
2. Sistemas de disparo que necesiten el uso de tratamientos de señales en tiempos muy cortos con transmisión a través del enlace óptico de 2 Gbps del sistema de adquisición con fibras ópticas y que estén en sincronía con el sistema de adquisición a altas frecuencias (400 MHz).
3. Técnicas de monitoreo y controles de procesos con software específico.
4. Sistemas de control de robots antropomórficos de tres grados de libertad en un ambiente de cómputo a tiempo real.
5. Diseño de medidores digitales de tiempos con una resolución de 1 ns para realizar experimentos de óptica cuántica.

5.5 LABORATORIO DE GEOLOGÍA

La disciplina científica que se encarga del estudio de la formación de los yacimientos metalíferos como un aspecto de la historia de la corteza terrestre recibe el nombre de metalogenia. Debido a la complejidad y variedad de los procesos y factores geológicos que determinan la formación de los depósitos minerales, para realizar investigaciones en metalogenia es necesario integrar numerosos aspectos de la geología y de la ciencia en general. Por lo tanto, en el estudio de los yacimientos minerales se interrelacionan disciplinas extremadamente diversas en sus objetivos y en su escala de trabajo, como son la geoquímica, la mineralogía, la petrología y la petrogénesis, y la tectónica. En todos los casos esta interrelación tiene lugar en ambos sentidos, de forma que los estudios metalogenéticos aportan información invaluable a muchas áreas del conocimiento de las Ciencias de la Tierra. Además, los resultados obtenidos a partir de la labor de búsqueda de sitios adecuados para albergar el LSMM señalan claramente que, en México, una mina subterránea sería el emplazamiento más factible para albergar la infraestructura bajo tierra. En consecuencia, el desarrollo del Laboratorio precisará, necesariamente, la estrecha colaboración con una empresa minera, la cual, a su vez, podría sacar provecho de las instalaciones de aquél.

Por tales motivos, como parte de las instalaciones de superficie del LSMM, consideramos necesaria la construcción y equipamiento de un Laboratorio de Geología, el cual ocuparía un área unos 100 m² y estaría dotados de la siguiente infraestructura:

- Bodega para almacenar muestras de rocas y núcleos.
- Taller de laminación y separación de minerales.

- Laboratorio de petrografía para el estudio microscópico y microtermométrico de preparaciones de rocas.

Un laboratorio de esta naturaleza, enmarcado dentro de una institución nacional de envergadura como la que se planea en este proyecto, fomentaría y dinamizaría el desarrollo de investigaciones en las diversas áreas de las Ciencias de la Tierra, especialmente en metalogenia.

El Laboratorio de Geología se beneficiaría de toda la logística del LSMM y, por su parte, facilitaría enormemente la realización de estudios de caracterización del sitio, los cuales serían de interés tanto para el LSU, como para una gestión y explotación sostenible de los recursos minerales en la región. Un laboratorio de esta naturaleza, emplazado en las inmediaciones de la mina, podría funcionar como una Estación Regional de Geología para cualquier institución de educación superior de México.

El Laboratorio de Geología agilizaría enormemente los trabajos de procesado previo y caracterización básica de muestras (clasificación y descripción de muestra de mano, molienda, corte, laminación, caracterización petrográfica, etc.), que ineludiblemente preceden casi cualquier investigación formal en Ciencias de la Tierra. En concreto, este laboratorio supondría un apoyo directo para los siguientes cometidos:

1. Estudios complementarios de caracterización del sitio. Entre los estudios de caracterización de rocas que se beneficiarían del Laboratorio de Geología cabe mencionar:
 - a) estudios de radiactividad natural,
 - b) caracterización estructural y litológica,
 - c) caracterización petrológica y mineralógica,
 - d) caracterización geoquímica elemental e isotópica,
 - e) mecánica de rocas.
2. Desarrollo de proyectos en colaboración con las empresas mineras. El laboratorio podría brindar servicios de interés para la minería, como por ejemplo estudios de
 - a) petrografía,
 - b) geoquímica elemental e isotópica,
 - c) microtermometría de inclusiones fluidas
3. Impulso de estudios regionales de geología, especialmente de metalogenia, geoquímica y petrogenesis.

El uso de los minerales como materias primas o para la obtención de metales tiene una importancia enorme en nuestra sociedad. No sobra puntualizar que, a pesar de su innegable interés científico, lo que realmente ha suscitado el estudio de los yacimientos minerales es el valor económico de los metales y, en general, de las materias primas minerales. En general, los recursos minerales se extraen de los yacimientos mediante operaciones mineras de complejidad y envergadura muy variables. Los estudios de yacimientos minerales, y de la metalogenia en particular, proporcionan pautas y criterios que facilitan la detección, evaluación y explotación de los recursos minerales.

Esta explotación acarrea importantes alteraciones al medio ambiente; la investigación de los yacimientos minerales ayuda a detectar y pronosticar peligros de este tipo y proporciona criterios

que, si se tienen en cuenta, ayudan a establecer medidas preventivas, correctoras y de remediación del impacto ambiental. Esto último guarda una relación directa con el siguiente apartado e ilustra claramente las posibilidades de colaboraciones multidisciplinarias en el contexto del LSMM.

5.6 LABORATORIO DE BIOTECNOLOGÍA AMBIENTAL

El aumento de la contaminación del medio ambiente ha alcanzado niveles sin precedentes en años recientes y su impacto en la biosfera de nuestro planeta es evidente. Sus efectos negativos tienen repercusiones tanto a nivel de la salud humana, como del cambio climático global [Agrawal 1999]. México, al igual que muchos países, sufre una significativa contaminación del medio ambiente que afecta a sus poblaciones humanas y reduce la productividad agrícola [Cifuentes 2004]. Entre los contaminantes más dañinos se encuentran los metales pesados, de los cuales el Pb, el Hg y el Cd constituyen los más tóxicos [McIntyre 2003]. La mayor parte de la contaminación metálica pesada en México resulta de su minería e industrias de trabajos con metales.

Los métodos convencionales de remediación de agua y suelo como remoción mecánica y tratamientos químicos son costosos y, a menudo, tienen efectos secundarios sobre el ambiente; por ello, hoy en día, existe mucho interés en recurrir a tecnologías sostenibles y ambientalmente amigables, o *verdes*, dondequiera que sea posible. Dos procedimientos que ofrecen ventajas substanciales sobre los usuales son la *fitorremediación* (y su tecnología asociada, la *fitominería*) y la *biorremediación microbiana*.

La fitorremediación consiste en el empleo de plantas verdes para limpiar ambientes contaminados por toxinas, mientras que la fitominería es el uso de las mismas para extraer metales preciosos de suelos que contienen concentraciones metálicas demasiado bajas para ser explotadas económicamente por técnicas convencionales de minería [Salt 1998]. Esta tecnología es muy atractiva porque permite incrementar la cubierta foliar y la recuperación del metal mediante la cosecha de los brotes. Por otro lado, el interés en la biodegradación microbiana se ha intensificado notablemente en los últimos años. Los esfuerzos en esta dirección están orientados a aprovechar la capacidad natural que poseen los microbios para degradar, transformar o acumular una gran cantidad de compuestos, incluyendo hidrocarburos, sustancias radiactivas y metales.

Dos experimentos huéspedes que han sido propuestos para llevarse a cabo en el LSMM, se relacionan directamente con las tecnologías emergentes antes mencionadas. Uno de ellos es el estudio, en las plantas vivas, de los procesos bio-físicoquímico implicados en el fenómeno de acumulación de metales y el otro se refiere al estudio y caracterización de organismos del subsuelo profundo, con miras a determinar potenciales capacidades para la generación de energía, biorremediación o síntesis de nuevos compuestos con aplicaciones biotecnológicas. Si bien una parte substancial de las investigaciones mencionadas se desarrollarán en laboratorios subterráneos, también requerirán de mediciones y labores de apoyo en la superficie, para lo cual se propone la instalación de un Laboratorio de Biotecnología Ambiental compuesto por un Laboratorio de Química y otro de Microbiología. Parte del equipo del cual estarán dotados dichos laboratorios se indica en el Cap. 7, dentro de las respectivas propuestas. Además, para los estudios con plantas será preciso contar con un invernadero construido a un costado del Laboratorio de Química, en un terreno de unos 200 m² de superficie.

5.7 LABORATORIO DE CÓMPUTO

El cómputo de alto rendimiento se aplica en todas las áreas de la ciencia. Los problemas teóricos requieren de métodos analíticos, realizados en paquetes como Mathematica, Maple o Form. La fenomenología requiere de métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales, para analizar sistemas con acoplamientos fuertes y para comparaciones de modelos con observaciones experimentales. Por último, trabajos experimentales dependen de cómputo para su desarrollo, operación y análisis.

El diseño de un experimento moderno inicia con simulaciones de todos los aspectos del sistema propuesto. Paquetes como Geant 4 permiten seguir la propagación de las partículas dentro de la materia, en particular, por un detector con sus componentes activos y pasivos. En combinación con códigos para la simulación de las interacciones que ocurren en colisiones de partículas o núcleos de átomos es posible simular todos los procesos esperados en un detector real. De esta manera, es posible verificar y optimizar el diseño antes de la construcción de un prototipo. En el caso de experimentos subterráneos, se puede además predecir la eficiencia del blindaje por la roca y la tasa de eventos de fondo esperada.

El análisis de los datos de un experimento consiste de dos pasos principales: la reconstrucción del evento y el análisis de eventos reconstruidos. La complejidad del detector y la cantidad de partículas producidas determinan el tiempo que requiere la reconstrucción de un evento. La parte del análisis puede, con facilidad, durar desde horas hasta días.

Una parte importante para el análisis de datos es la comparación con simulaciones. La simulación de un evento consume un tiempo de entre 4 y 48 horas. Un estudio completo, sea para el diseño de un experimento o para el análisis, requiere entre 10^2 a 10^5 eventos. Con estos números es claro que una campaña de simulaciones necesita de meses a años de tiempo de máquina para realizarse. Para poder proporcionar este tiempo de máquina en un tiempo real razonable es necesario contar con unos cientos de CPUs. Los archivos de salida miden entre 100 y 1500 MB. Multiplicando el tamaño por el número de corridas, llegamos a la necesidad de un espacio de almacenamiento de 20 a 1000 TB.

El Laboratorio de Cómputo se instalará en dos etapas. De esta forma será posible entrenar a los usuarios y optimizar el uso del equipo conforme las facilidades asignadas a este efecto vayan siendo acondicionadas. En la primera etapa, que se realizará al inicio del proyecto, se instalarán los recursos de cómputo requeridos por los experimentos que, en de inicio, se llevarán a cabo en el LSMM. Para tal efecto, se contará con un centro provisto de 50 nodos de trabajo, con cuatro procesadores dual core y 8 GB de memoria, y una capacidad de almacenamiento de 50TB. Además se instalará un equipo con 4 nodos y 500GB de almacenamiento para desarrollo y realización de pruebas antes de implementar cambios al sistema de producción. La segunda etapa y en ella se aprovecharán los avances en la tecnología de cómputo. La etapa 2 se implementará unos 18 a 24 meses después. La capacidad instalada se ampliará a 100 nodos de dos procesadores cuádruples y 32 GB de memoria y se contará con 200 a 500TB de almacenamiento.

Aparte del cómputo de alto rendimiento es necesario contar con una infraestructura de red local y equipos de cómputo para los laboratorios. Además es necesario contar con algunas máquinas para controlar los experimentos y para la toma de datos. A fin de guardar los datos con respaldo, hay que instalar un sistema de almacenamiento con redundancia, que además cuente con la posibilidad de respaldar los datos en cinta o en discos separados.

El centro de cómputo debe contar con una buena conexión a Internet 2 que brinde acceso remoto a todos los usuarios y permita a los científicos participantes tener acceso remoto a los bancos de datos de los experimentos que se realicen en el LSMM. Hoy en día, se aplican tecnologías de “grid” para organizar a los grupos de usuarios y para facilitar y controlar el acceso a los recursos de cómputo. Esto permite un acceso abierto a todos los usuarios sin tener que configurar cuentas individuales para cada uno de ellos. El centro de cómputo se configurará para tener acceso mediante esta tecnología, lo que posiblemente lo integre a una infraestructura de grid más grande, para el beneficio tanto de los grupos mexicanos como de posibles colaboradores internacionales.

Varios de los grupos en la física de altas energías en México tienen experiencia con la operación de cúmulos (“clusters”) de computadoras pequeñas y medianas. En algunos de los centros de cómputo de alto rendimiento, en particular en el departamento de supercómputo de la UNAM, existe experiencia con equipos más grandes, con más de 350 nodos de trabajo. Los participantes en los experimentos en el LHC tienen experiencia con la tecnología grid. En particular, el grupo de ALICE está operando un nodo de producción que forma parte de la infraestructura internacional de cómputo para la colaboración ALICE. Asociado a esta actividad, se integró un equipo de físicos expertos en computación y expertos en redes. Así, contamos con la experiencia y con los expertos para configurar y operar instalaciones de cómputo ambiciosas como las que pudiera requerir el LSMM.

Cabe, por último, señalar que la existencia de un centro de cómputo avanzado también haría posible la participación en el desarrollo del llamado “middleware”, que se dará de manera intensa en los años próximos y constituirá una parte importante de la tecnología computacional. No tener tal experiencia pondría al país en una situación de subordinación a centros localizados en el extranjero.

6. DETECTOR CRIOGÉNICO DE MATERIA OSCURA

Las partículas que componen la materia oscura son, muy probablemente, reliquias masivas generadas durante el universo temprano, con el cual alguna vez estuvieron en equilibrio térmico, pero que se enfriaron a niveles no relativistas para la época de la formación de estructura. La búsqueda directa de materia oscura en la forma de partículas masivas débilmente interactuantes (WIMPs), como los neutralinos, se ha convertido en un campo de investigación intenso. Actualmente existen en funcionamiento, en construcción o propuestos, alrededor de una veintena de experimentos para la búsqueda de WIMPs. El principio técnico usualmente empleado para la detección directa se basa en la observación de eventos de dispersión elástica de estas partículas, las cuales depositan energía en el detector a través del retroceso de los núcleos.

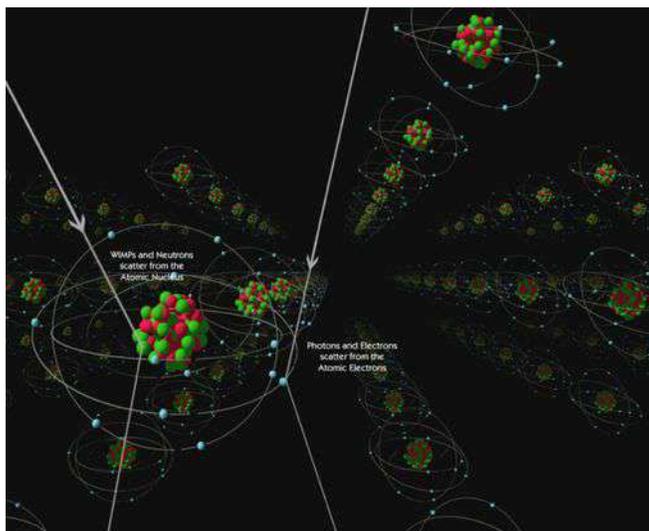


Figura 1. Sólo WIMPs y neutrones pueden atravesar la nube de electrones del átomo y hacer que el núcleo retroceda (Figura adaptada de [Gugliotta, 2007]).

La sección eficaz correspondiente en el modelo mínimo de supergravedad, por ejemplo, se encuentra entre 10^{-7} y 10^{-11} pb, donde la cota superior se establece para el menor valor posible de la masa del neutralino, la cual deberá exceder unos cuantos GeV. Considerando que la velocidad media estimada para los WIMPs en el halo local es del orden de una milésima de la velocidad de la luz, la región cinemática energética de interés para los experimentos resulta ser tan baja como unos 100 keV. Con una densidad esperada en el halo local entre 0.3 y 0.7 GeV/cm³, las secciones eficaces anteriores equivalen a una razón de detección menor a 0.1 eventos por kilogramo, por día. Además, el principal reto para cualquier experimento de detección directa es la reducción del ruido de fondo inducido principalmente por los rayos cósmicos, las impurezas radioactivas en el entorno y por neutrones, que pueden remedar la señal de los neutralinos en el detector.

Para cubrir el espacio de parámetros, un experimento requiere ser optimizado considerando los siguientes puntos:

- a) Detectores de una escala relativamente grande, con la mayor masa posible.
- b) Una energía umbral (“threshold”) baja para el retroceso nuclear.
- c) Un bajo ruido de fondo, lo que implica un sistema de detección con una apropiada discriminación de eventos.

La necesaria reducción del ruido de fondo generado por los rayos cósmicos sólo puede lograrse colocando el detector bajo tierra, a las mayores profundidades posibles. Por esta razón, los experimentos de búsqueda de materia oscura son uno de los candidatos ideales para un laboratorio subterráneo.

Existen actualmente tres técnicas experimentales de detección que se usan tanto de forma simple como híbrida: (1) métodos de centelleo; (2) uso de detectores de ionización; y (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. La Tabla 1 presenta un resumen comparativo de las técnicas de detección y los experimentos donde éstas se emplean, así como algunas de sus ventajas. Dado el estado del arte de las técnicas mencionadas, la construcción de un detector mexicano de materia oscura podría basarse inicialmente en una versión aumentada de alguno de estos experimentos.

Técnicas de Detección Directa de Materia Oscura			
Tipo de Detector	Técnica de Detección	Experimento Prototípico	Ventajas y Observaciones
Ionización (Ge, Si, CdTe)	Conteo	MAJORANA GERDA IGEX GENIUS	Experimentos para búsqueda de $\beta\beta 0\nu$. Búsqueda adicional de materia oscura
Centellador sólido	Discriminación de la forma del pulso	DAMA/NAI NAIAD	Corte energético bajo, gran masa de detección. Discriminación pobre de eventos
Criogénico (Ge, Si, Al_2O_3 , TeO_2)	Bolométrica Detección híbrida carga/fonones, ó luz/fonones.	CRESST CUORE CDMS EDELWEISS EURECA	Excelente discriminación del fondo, bajo corte energético. Escalable. Han provisto las mejores cotas. Pequeña masa y gran costo.
Gases nobles líquidos (Xe, Ar, Ne)	Híbrido carga/luz	XENON ZEPLIN XMASS WARP ARDM DEAP CLEAN	Gran masa, buena discriminación del fondo, gran volumen. En desarrollo.
Cámara de burbujas	Gotas super calentadas	COUPP PICASSO	Gran masa, buena discriminación del fondo. En desarrollo.
Detector de Gas	Trayectoria de ionización	DRIFT	Sensibilidad direccional, buena discriminación del fondo. En desarrollo.

Tabla 1. Resumen comparativo de las técnicas de detección de WIMPs.

6.1 ANTECEDENTES

Los mejores límites impuestos a la interacción de materia oscura hasta hoy provienen del experimento CDMS (CryogenicDarkMatterSearch), cuyo sistema de refrigeración y el contenedor del detector (“Icebox”) se muestran en la Figura 2. CDMS usa un arreglo de detectores de cristal semiconductor de Germanio (Ge) y Silicio (Si) a temperaturas de miliKelvin. En su primera etapa, CDMS estuvo funcionando en el Stanford UndergroundFacility, en el campus de la Universidad de Stanford en California, de 1996 a 2002. El sitio era un túnel hueco y el experimento estuvo limitado por el ruido de fondo proveniente de los rayos cósmicos. Por esta razón se decidió construir CDMS-II en el SoudanUndergroundLaboratory en Minnesota, Estados Unidos, a una profundidad muy útil de 2090 metros equivalentes de agua.



Figura 2. Sistema de refrigeración y contenedor del detector (*Icebox*) del experimento CDMS.

En su segunda fase, la cual realizó toma de datos entre marzo y octubre de 2004 (denominada Run 119) con dos torres de detectores, funcionó con una masa de detección de 1.5 Kg de Ge y 600g de Si, con una sensibilidad un factor de 4 mejor que los demás experimentos de detección directa [Akerib, 2005 y 2006a]. La profundidad a la que se localiza el detector en la mina de Soudan, ayuda a eliminar los neutrones que remedan a los WIMPs. Los neutrones se pueden distinguir de otras partículas por la cantidad de carga que desplazan en un cristal. Esto es exactamente lo que se muestra en la Figura 3, donde la profundidad P_d en el detector a la que ocurre el evento se grafica como función de la cantidad de carga eléctrica desplazada. A una profundidad subterránea considerable, casi no debería haber neutrones. Por lo tanto, cualquier cosa que luzca como un neutrón es casi seguramente un WIMP.

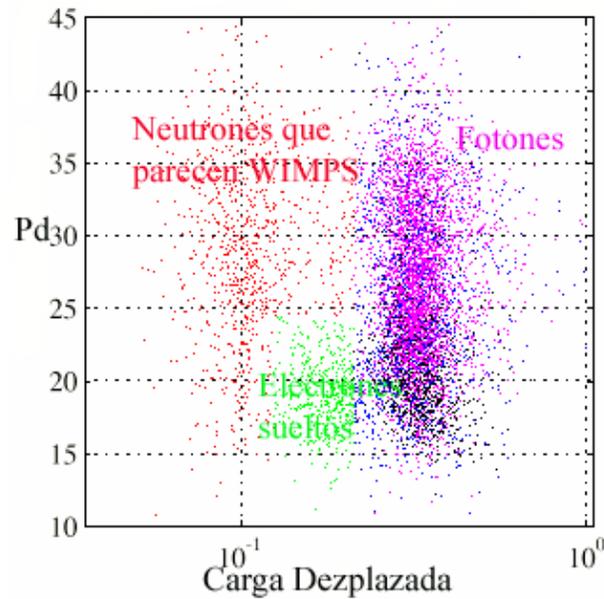


Figura 3. Profundidad del evento en el detector contra la carga eléctrica desplazada.

A la profundidad del experimento CDMS, el flujo de muones cósmicos se reduce por un factor de $(5 \times 10^4)^{-1}$ relativo a la superficie. El detector está rodeado por una capa moderadora de neutrones hecha de polietileno, dentro de la cual se encuentra una capa de 9 cm. de plomo (Pb) y 4.5 cm. de plomo antiguo (con una muy baja proporción de ²¹⁰Pb), y otros 10 cm de polietileno en la capa interna. El polietileno sirve como reductor adicional del flujo de neutrones de alta energía. Debido a que la mayor parte del flujo adicional de neutrones es producido por los muones cósmicos, un veto activo de muones rodea al experimento. Un sistema de veto consistente en una cubierta de centelladores que se emplea para detectar los pocos rayos cósmicos que logren penetrar hasta el sitio del detector, discriminando así los eventos producidos por neutrones generados por estos rayos cósmicos. Este diseño reduce el número de eventos de neutrón en el sitio de Soudan a aproximadamente 0.6 eventos por Kg por año en Ge, y 1.5 en Si.

En su fase tres, CDMS funciona actualmente con 4.75 Kg de Ge y 1.5 Kg de Si, y está planeada para tomar datos hasta diciembre del 2007. Este experimento proyecta incrementar la masa de sus detectores hasta, posiblemente superar los 5 y los 2 Kg, respectivamente. Su tecnología ha podido lograr una buena reducción y discriminación del ruido de fondo con bajo umbral energético. El escalamiento a mayor masa de esta tecnología ya probada es una vía clara para la siguiente generación de experimentos de búsqueda de materia oscura. Esta ruta es, por tanto, una de las alternativas que se puede adoptar para el diseño y la construcción de un *Detector Criogénico de Materia Oscura Mexicano*.

Es importante mencionar que una versión extendida de CDMS, llamada SuperCDMS [Akerib 2006b, Bruch 2007], se encuentra en planeación, con la propuesta de iniciar con un detector de 25 Kg, y eventualmente escalarlo a una tonelada, colocado a mucha mayor profundidad en el laboratorio subterráneo de SNO en Canadá, a una profundidad de unos 6060 metros equivalentes de agua. Este experimento está aún en su fase de desarrollo y búsqueda de financiamiento. Aunque todavía

no existen fechas definitivas para las diversas fases de este experimento, es muy probable que su construcción pueda iniciarse recién hasta el 2011, y no alcance su segunda fase con una masa intermedia de 150 Kg antes de 2014-2015. Mientras tanto, el grupo de CDMS planea iniciar con un detector prototipo para SuperCDMS en el sitio de Soudan, con una masa de 5 Kg a finales de 2008.

Esta calendarización y el hecho de que CDMS esta aun en funcionamiento, sugiere que la construcción en México de un detector con tecnología similar, de mayor masa que CDMS pero menor que la segunda fase del SuperCDMS, y cuya construcción y operación tengan lugar en un periodo corto de tiempo (cinco años), es un proyecto viable que puede aportar resultados que mejoren los límites actuales o, eventualmente, contribuyan al descubrimiento de la materia oscura. En las secciones siguientes presentamos un resumen detallado de la tecnología criogénica empleada por CDMS, y las propuestas concretas que sugerimos para un *Detector Criogénico de Materia Oscura Mexicano*, así como el arreglo experimental básico y sus requerimientos generales.

6.2 TECNOLOGÍA DE DETECCIÓN CRIOGÉNICA

Cuando una partícula incidente se dispersa en el cristal del detector, causa dos fenómenos físicamente distintos. Primero, ioniza los electrones en el semiconductor. Se aplica entonces un campo eléctrico constante a través del detector ZIP (que describiremos a continuación) para coleccionar estos electrones. Segundo, cualquier dispersión que tenga lugar en el cristal sacude a la red, produciendo vibraciones locales o fonones que se propagan por la red. Sensores de fonones colocados en la cara de los detectores ZIP pueden convertir esas vibraciones en señales eléctricas. Después de ser convertidas a voltajes, esas señales se envían por cables flexibles de señal a sistemas electrónicos a temperatura ambiente para una amplificación adicional y conversión a señales digitales, que son registradas por computadora y almacenadas en discos duros y cintas magnéticas. Las dos mediciones, ionización y fonones, forman el núcleo de datos de CDMS. A continuación detallamos como funciona este sistema de detección.

Detector

Los detectores ZIP (Z-dependent Ionization and Phonon) usados por CDMS son cristales de Ge o Si, crecidos en forma cilíndrica, de 1 cm de ancho por 3 pulgadas de diámetro (Figura 4). Su peso es de 250 g para Ge y 100 g para Si.

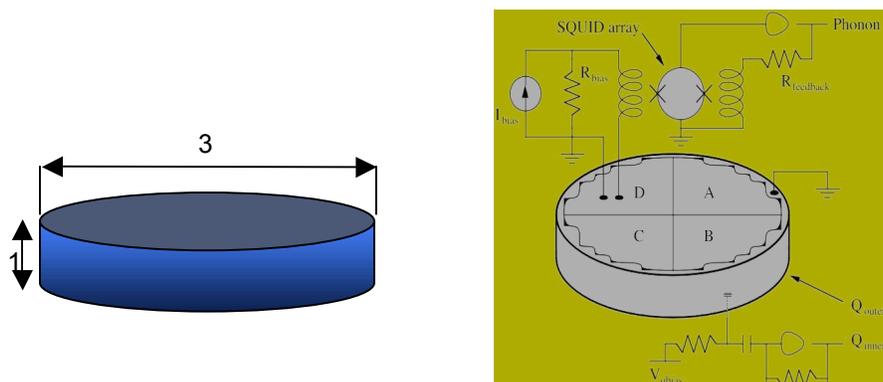


Figura 4. Esquema de un detector ZIP y su sistema de lectura.

Los detectores de estado sólido (cristales semiconductores) emplean la detección híbrida de las señales debidas a la dispersión elástica WIMP-nucleón, mediante la medición simultánea de la ionización y los fonones producidos por el retroceso del núcleo y de los electrones. El retroceso de electrones es generado por la mayoría de las interacciones con partículas del fondo.

Cuando el cristal es sometido a una diferencia de potencial, debido a su naturaleza semiconductor, el retroceso de un electrón dentro del mismo resulta en la creación de pares electrón-hueco en proporción directa a la energía depositada. Sin embargo, no toda la energía depositada se emplea en la creación de pares. Una parte será traducida en un espectro no térmico de fonones de alta energía creado en el punto de interacción, con un espectro de frecuencias de Debye a 3 THz para Ge y 6 THz para Si, aproximadamente. Estos fonones viajan a través del cristal sufriendo decaimiento anarmónico, mediante el cual un fonón se divide espontáneamente en dos de menor energía. Subsecuentemente, los fonones sufrirán dispersión isotrópica producida por la dispersión elástica con los isótopos de Ge o Si, lo que resulta en un cambio de dirección sin pérdida de energía. En consecuencia, la frecuencia de los fonones caerá rápidamente a unos 0.6 THz en Ge y 1 THz en Si, cuando su camino libre medio pasa a ser mayor que las dimensiones del cristal. En este punto, los fonones viajarán en línea recta hasta encontrar alguna superficie (por lo cual son llamados fonones balísticos). Si la superficie está libre de cualquier contacto, los fonones simplemente serán reflejados. En otro caso, existe una probabilidad finita de que estos puedan ser absorbidos, lo cual establece las bases del mecanismo de detección. La propagación casi difusa inicial de los fonones determina una escala de tiempo de unos 10 a 15 μ s durante la cual la energía del fonón es recolectada por el sistema de detección que describiremos más adelante.

Tras la eventual recombinación de los portadores de carga, la energía acumulada por los pares es liberada también como fonones de alta frecuencia en la superficie, los cuales son rápidamente convertidos en fonones balísticos. La energía inyectada en esta población de fonones en una escala de tiempo de unos 2 a 4 μ s será simplemente $E = QV$, donde V es el voltaje a lo largo del cristal y Q es la cantidad de carga creada por el retroceso. La fracción de energía en ambas poblaciones de fonones dependerá por tanto de la diferencia de potencial establecida a lo largo del detector y en la naturaleza del retroceso. El retroceso del núcleo, aunque se comporta de forma similar es más ineficiente en la creación de pares. En promedio genera sólo una tercera parte del número de portadores de carga que un retroceso de electrón a la misma energía. Debido a que la pérdida de energía por unidad de trayecto es mucho más alta para el retroceso del núcleo que para el de electrones, la razón de señales de ionización y de fonón difiere para el retroceso nuclear y electrónico. La medición de ambos tipos de productos, la ionización y los fonones, permite la reconstrucción del tipo y la energía de un determinado retroceso, haciendo posible la discriminación evento por evento. Esto permite la caracterización de la vasta mayoría de los eventos y la consecuente identificación de la dispersión producida por partículas de materia oscura. Los detectores de CDMS también proveen datos sobre el perfil del pulso del fonón, lo cual es crucial en la discriminación de eventos del ruido de fondo que ocurren cerca de la superficie.

Sistema TES

La detección de fonones se logra con los sensores TES (“Transition Edge Sensor”), leída por amplificadores SQUID (“Superconducting Quantum Interferente Devices”) como el mostrado esquemáticamente en la Figura 4. El TES se compone de pequeñas películas de Tungsteno (W) y Aluminio (Al) depositadas en una de las caras del cristal mediante fotolitografía, formando una

estructura bidimensional denominada QET (“QuasiparticleAssistedElectrothermal Feedback TES”). El QET consiste de películas de Al de 300 nm de espesor, que cubren áreas macroscópicas, conectadas a películas de W de 35 nm de espesor, depositadas sobre una superficie de Si amorfo de 40 nm. El Al es el material primario usado para la colección de fonones. El depósito se realiza de modo que la superficie del detector se divide en cuatro cuadrantes (canales), cada uno con 37 celdas con estructuras idénticas, de $5 \times 5 \text{ mm}^2$, conectadas eléctricamente. En total se tienen 1036 TES en el detector. Una imagen esquemática del arreglo QET se muestra en la Figura 5.

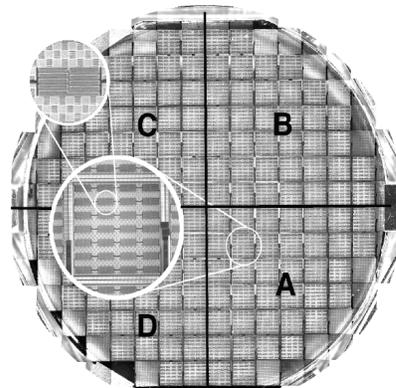


Figura 5. Esquema de un arreglo QET.

A unos cuantos milikevin, el sistema forma un arreglo superconductor con un ancho de energía de $340 \mu\text{eV}$. Cuando fonones de una frecuencia superior a 84 GHz interactúan en la superficie de Al, rompen los pares de Cooper y crean cuasipartículas de larga vida, las cuales difunden en la película de Al hasta encontrar una región con W. Debido a que los fonones se comportan balísticamente a frecuencias de 0.6 a 1THz, la energía promedio que transmitirán a las cuasipartículas es de unos 2 a 4 meV. Ya que el W tiene una menor temperatura crítica que el Al, el traslape forma una región con una temperatura crítica y ancho de banda intermedios. Una vez que las cuasipartículas se dispersan en esta región, quedan atrapadas y eventualmente transfieren su energía al sistema de electrones del W. Así, la medida del canal de fonones se reduce a determinar la cantidad de calor depositada en el sistema de electrones del W. Una fracción de la energía inicial es, sin embargo, indetectable por encontrarse en fonones con energías menores al ancho de banda en el Al. Estos corresponden a aproximadamente una ineficiencia del 10% para Ge y 5% para Si.

Sistema de Medición de Ionización

Con el fin de medir la ionización, la cara inferior (opuesta al QET) del cristal se cubre con dos electrodos concéntricos a base de Al y W colocados, como se muestra en la siguiente figura



Figura 6. Colocación de los electrodos en el sistema de ionización.

El electrodo interior es un disco que cubre el 85% de la superficie del cristal. El externo es un anillo que cubre el restante 15%, con un ancho de 1.9 mm. Este último sirve como veto para cualquier evento que deposite energía cerca del borde del detector, donde el campo eléctrico no está bien definido, de modo que la mayor parte de la energía de una señal típica de ionización estará en el electrodo interior. A temperaturas de unos 50 mK se requieren aproximadamente 3 eV para romper los pares de Cooper en Ge y 3.8 eV en Si. Los campos eléctricos a través del detector son, por tanto, colocados a -3 eV para Ge y -4 eV para Si, con la superficie opuesta aterrizada a fin de arrastrar electrones y huecos a los respectivos electrodos. La carga inducida en los electrodos es colectada usando un amplificador de carga (FET) como el mostrado en la Figura 7.

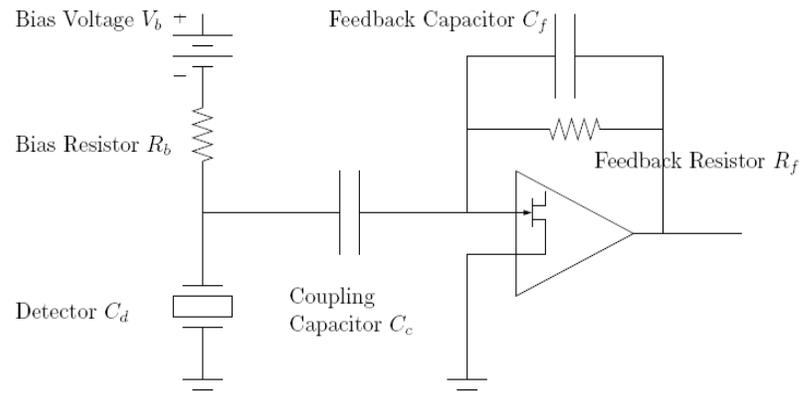


Figura 7. Amplificador de carga FET.

Una señal típica en un detector de CDMS constará de unos 2048 bins de 0.8 ms, con un pulso correspondiente a la señal, el cual desarrolla su pico en un par de microsegundos, y tiene un decaimiento máximo de unos 40 ms.

El TES, debido a su configuración reticulada, introduce efectos de borde en el electrodo anular que deben ser tomadas en cuenta. Los detectores de CDMS presentan algunas limitaciones en el aterrizado del detector, debido a la capa de Si amorfo usada como sustrato para el TES. Esto produce que estas áreas de borde tengan una baja eficiencia de colección de carga. Los eventos superficiales, como los producidos por los contaminantes superficiales que producen fotones o b's, también parecen ser difíciles de discriminar. En parte debido a que en la superficie de los detectores se encuentra una capa de 30 nm, en la cual los portadores de carga pueden moverse en sentido contrario hacia el electrodo erróneo, dada la forma del campo eléctrico en esa región. Por otro lado, la presencia de impurezas en el cristal puede producir excesos localizados de carga. Cuando los detectores son enfriados, estas impurezas se ionizan, e interfieren con la recolección de carga. Antes de la toma de datos, el detector debe ser sometido a un proceso de "neutralización", consistente en la iluminación pulsada con fotones, cuya finalidad es llenar los sitios asociados a las impurezas. Cuando los detectores han funcionado continuamente por largos periodos, el fenómeno vuelve a aparecer, de modo que la toma de datos debe detenerse a periodos fijos de tiempo para neutralizar los detectores. Estos son aspectos que esperamos puedan perfeccionarse en futuros detectores.

Como lo mencionamos anteriormente una ruta directa para mejorar los resultados del experimento CDMS es emplear una tecnología similar, con posibles mejoras en los sistemas de detección, pero incrementando la masa del detector, lo cual puede seguir las siguientes líneas:

Aumentar las dimensiones de los cristales, incrementando tanto el diámetro como su espesor. Esta es la alternativa planteada para SuperCDMS, el cual proyecta emplear cristales de una pulgada de espesor. Un mayor diámetro ha sido considerado como una opción posiblemente viable.

Emplear materiales más densos que el Si, para los cuales existan en mayor abundancia isótopos estables y presenten fases cristalinas. Particularmente puede explorarse la posibilidad de emplear cristales de Galio (Ga), Estaño (Sn), o Indio (In). Esto redundaría en una mayor masa sin que se requiera un incremento sustancial del volumen.

6.3 MONTAJE EXPERIMENTAL

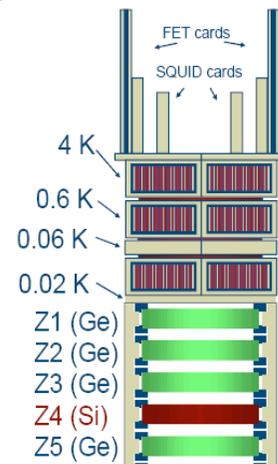
Para su óptimo funcionamiento, los detectores deben ser enfriados y operados por debajo de los 50 mK en un laboratorio subterráneo. CDMS opera en una locación a 2090 metros equivalentes de agua, bajo tierra. Su sistema criogénico es un claro ejemplo de la tecnología que se esperaría emplear también en un detector escalado a mayor masa y servirá de punto de partida para el diseño del Detector Criogénico de Materia Oscura Mexicano.

Sistema de Montaje de los Detectores

Para su colocación dentro del sistema criogénico, los detectores ZIP son engarzados en estuches hexagonales de cobre (Figura 8(a)), y montados en torres con seis detectores cada una. Cada torre consiste de cuatro secciones, cada una a diferente temperatura, las cuales son montadas en el contenedor (denominado “Icebox”). La Figura 8(b) muestra esquemáticamente la disposición de los diferentes elementos de la torre usada en el sitio de Soudan. Los detectores son colocados al fondo de la torre, en la sección diseñada para operar a 20mK, con una separación espacial de 3 mm, y un mínimo de material intermedio para incrementar la probabilidad de dispersión múltiple entre detectores. El arreglo intercala detectores de Ge y Si, en un orden más o menos arbitrario.



(a)



(b)

Figura 8. (a) Un detector ZIP. (b) Una torre de detectores.

Como se muestra en la figura, las tarjetas de lectura SQUID y FET son colocadas en la parte superior de la torre. Los SQUIDS para la lectura de las señales de fonones son operables a 4 K, pero enfriados a 600 mK tienen un mejor desempeño al reducir su ruido. Las tarjetas de circuito FET tienen una disipación de potencia de unos 4.5 mW, lo cual puede ser tolerado en la caja a 4 K. Am-

bas tarjetas son usualmente fabricadas en un sólo modulo. Cables flexibles de señal de 1 pulgada de ancho y 10 pies de largo transmiten las señales desde las tarjetas de lectura a través del sistema de aislamiento, y hasta el sistema de adquisición de datos.

A cada lado de la torre se monta una placa de cobre que lleva los cables coaxiales que conectan la electrónica con cada uno de los detectores. Esto es lo que determina la configuración hexagonal. Los cables de grafito usados en la conexión son los que generan la mayor carga térmica al ser sumergidos a través de todas las secciones de la torre.

Sistema Criogénico

Seis contenedores concéntricos de cobre de baja radioactividad forman el Icebox de CDMS en Soudan, y están acoplados térmicamente a cada sección correspondiente de la torre. Esto provee el soporte mecánico y el necesario ambiente térmico para la torre. El contenedor externo se encuentra a temperatura ambiente, mientras que los contenedores internos se mantienen a temperaturas menores. El contenedor inmediato interior se mantiene a 77 K (Nitrógeno líquido). Los demás a las temperaturas requeridas según el diseño de la torre, 4 K (Helio líquido), 600, 50 y 10 mK respectivamente. Debido a la carga térmica de las torres, cada uno de los contenedores opera ligeramente por arriba de la temperatura en el diseño. El contenedor más interior en Soudan tiene un volumen aproximado de 21 lt. Un detector de mayor masa puede requerir de un mayor volumen. El contenedor externo tiene un radio de 28.3 cm y el más interno de 15.5 cm.

Para mantener la temperatura, se emplea un refrigerador de dilución capaz de proveer suficiente potencia de enfriamiento. CDMS emplea un Oxford Kelvinox 400-S, diseñado para proveer 400 μ W a 100 mK. El sistema refrigerante se coloca en la misma habitación que el contenedor del detector. Debido a que sus materiales de construcción no satisfacen requerimientos de baja radioactividad, deben mantenerse a cierta distancia del contenedor cada una de las capas del Icebox conectadas con las correspondientes etapas térmicas del refrigerador mediante tuberías concéntricas de cobre de baja actividad. Adicionalmente, el uso de un sistema de crio-enfriamiento que sirva para reducir los costos de consumo de He líquido, y que está siendo explorado en Soudan, puede ser una mejora deseable del sistema. El diseño completo del sistema es mostrado en la Figura 9.

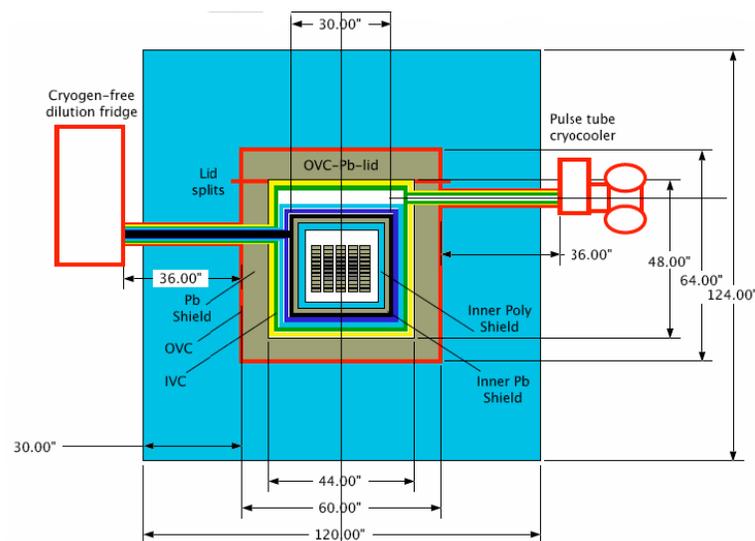


Figura 9. Esquema del sistema criogénico.

Sistema de Aislamiento

El experimento CDMS está colocado en un cuarto limpio clase 1000. Todos los materiales del sistema de aislamiento deben ser verificados para cumplir con una baja radioactividad. Un diseño adecuado podría seguir un esquema como el usado en Soudan (Figura 10). Los elementos esenciales del sistema de aislamiento, de afuera hacia adentro son:

1. Veto activo de muones, consistente en paneles de plástico centellador, con regiones de traslape y tamaño tales que cubran todo el contorno (cilíndrico) del experimento. Las señales producidas en los paneles serán leídas empleando tubos fotomultiplicadores.
2. Aislamiento de polietileno. Aproximadamente 50 cm de ladrillos de polietileno justo dentro del veto de muones. Estos sirven para moderar neutrones producidos en las paredes de la mina.
3. Ladrillos de plomo, justo en el interior del aislamiento de polietileno, de unos 17cm de espesor. Estos sirven para reducir los rayos gama producidos tanto fuera del arreglo experimental como en el polietileno.

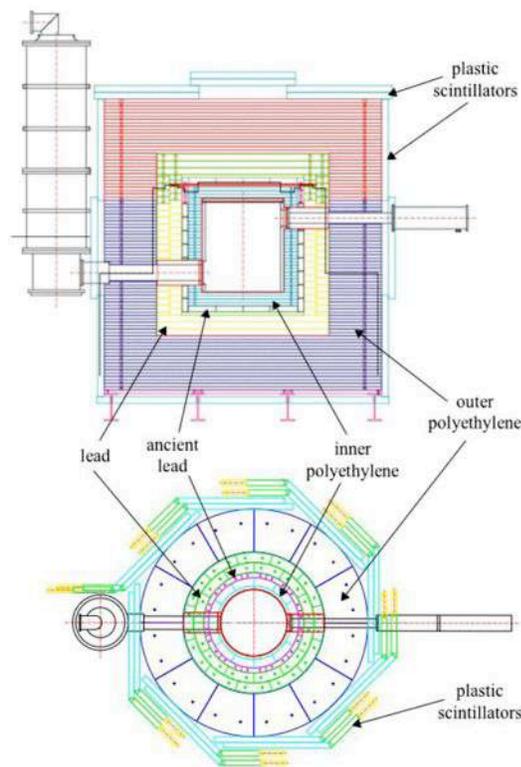


Figura 10. Esquema del sistema de aislamiento.

4. Cubierta interior de ladrillos de plomo antiguo, de muy bajo contenido de ^{210}Pb , de unos 5 cm de espesor para reducir cualquier fondo de rayos gama producido por la pared previa de plomo.
5. Aislamiento interno de polietileno delgado, de unos 8 cm de ancho, colocado cerca de la cámara criogénica sirve como moderador adicional para neutrones producidos en las capas de plomo.
6. Capas de cobre del Icebox que proveen un aislamiento extra de unos 0.5 cm de cobre cada uno.

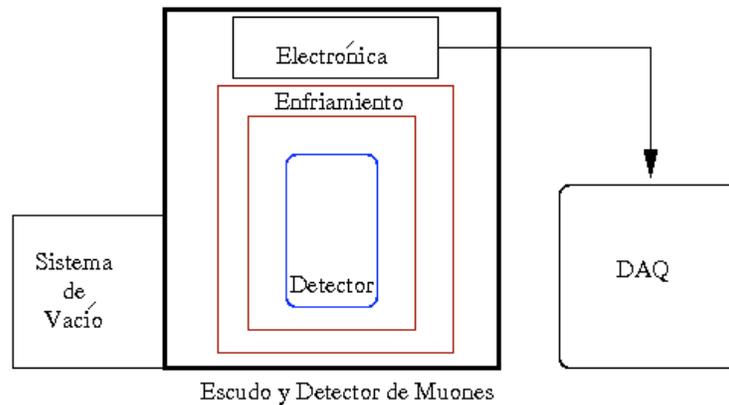


Figura 11. Diagrama simplificado con los sistemas principales

6.4 OBJETIVOS DE LA PROPUESTA

La propuesta de un *Detector Criogénico de Materia Oscura Mexicano* tiene como objetivo central el desarrollo, montaje, y operación de un detector de estado sólido (criogénico) para la detección de materia oscura tipo WIMP, con las siguientes características:

- Dado el estado del arte de las técnicas de detección criogénicas, se propone la construcción de un detector basado en una versión mejorada de la tecnología híbrida ZIP usada por CDMS.
- Se propone que el experimento alcance en un plazo de cinco años una masa de detección de por lo menos unos 25Kgs.

El experimento se podría desarrollar en tres etapas:

Fase I. Diseño y desarrollo tecnológico del detector y del arreglo experimental en un tiempo estimado de año y medio, incluyendo la construcción de un detector prototipo. Se propone explorar el uso de detectores de estaño (Sn, peso atómico 118.69) y Ge (peso atómico 72.59) cristalinos, los cuales permitirán alcanzar mayor masa en menor volumen. Otros materiales cristalinos de masa mayor al Si pueden ser una alternativa viable. Durante esta etapa también deberán adecuarse las instalaciones subterráneas necesarias para la instalación y operación del detector.

Fase II. Montaje del experimento en el sitio subterráneo. Pruebas *in situ* del prototipo para calibrar y analizar su comportamiento, así como para mejorar la comprensión del ruido de fondo. Construcción de los primeros módulos de detección, montaje y toma de datos. Objetivo de esta fase: 5 a 10 Kgs de masa, lo cual puede llegar a duplicar la sensibilidad correspondiente a la fase II de CDMS-2007. Tiempo estimado 3 años. Durante esta etapa deberá continuarse con la construcción y calibración de los módulos de detección restantes.

Fase III. Escalamiento del detector. En esta etapa deberán colocarse los módulos restantes, con un mínimo de 25 Kgs de masa, y realizar la toma de datos con el detector final. Tiempo mínimo estimado: un año. La sensibilidad esperada podría mejorar en un factor de 100.

6.5 REQUERIMIENTOS MÍNIMOS

Además de los elementos propios del arreglo experimental, los cuales han sido descritos previamente, y que deben ser rediseñados adecuadamente para el detector mexicano de acuerdo al tamaño, y eficiencia de los detectores, etc., los siguientes elementos estructurales deben ser considerados para el sitio de instalación, tanto en el laboratorio subterráneo, como en el de superficie:

Sitio

Se requiere colocar el detector a la mayor profundidad disponible. Para que resulte competitivo con otros experimentos, en particular con CDMS en su tercera fase, una profundidad de 2000 metros equivalentes de agua es el mínimo requerido. Posibles sitios en el territorio nacional han sido explorados como se reporta en el Cap. 8 de este documento.

Laboratorios Subterráneos

- Habitación limpia de clase 1,000 con las dimensiones necesarias para la colocación del detector. Dimensiones: 40 a 50 m² de superficie por 4 a 5 m de alto.
- Habitación contigua para el sistema de bombeo del crióstato, con unos 20 a 25 m² de superficie, la cual puede ser también usada para el almacenamiento de unos 100 lt de N y He líquidos.
- Cuarto para la adquisición de datos (unos 40 m²).
- Espacio limpio, libre de Radón para almacenamiento de los elementos del detector, los cuales deben permanecer en aislamiento para descontaminación de la activación cosmogénica, inducida por la radiación cósmica durante las etapas de construcción y transporte, especialmente de los cristales usados para el detector.

Instalaciones de Superficie

Dos habitaciones sencillas, de unos 30 m² cada una, servirán en la superficie como cuartos de cómputo para control y análisis de datos y como laboratorio, respectivamente. Además se requerirá de un área limpia clase 1,000 a 10,000, de unos 25 m², para la preparación y ensamblaje de los detectores.

Adicionalmente, las condiciones en la mina y la estabilidad requerida durante la toma prolongada de datos, requerirán del uso de aire acondicionado en las habitaciones que alojen al experimento y el sistema de adquisición. La energía eléctrica requerida se estima que esté por debajo de los 50 kW.

6.6 PROTOTIPO DE UN DETECTOR CRIOGÉNICO DE ARGÓN

No obstante los éxitos recientes de CDMS, invariablemente surge la pregunta de cuánto costaría escalar a toneladas el volumen activo y siempre la respuesta es que resulta tecnológicamente imposible. Una tecnología alternativa prometedora es la de los detectores criogénicos de líquidos nobles (argón o xenón) ultrapuros. La idea de usar átomos nobles para detectar retrocesos en sus núcleos provocados por partículas que sólo interactúan débilmente (WIMPs o neutrinos) es una idea que ya tiene un buen número de años y que 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). Ya se han realizado expe-

rimentos de este tipo y la información más valiosa que se ha obtenido de ellos es la demostración de que la diferencia de señales en los procesos de ionización y de centelleo puede ser usada para discriminar el ruido electromagnético. Este hecho constituye el medio más valioso para obtener así un experimento de “cero background”. Tal experiencia fue ganada en el experimento ICARUS que usó Xenón como volumen activo [Benetti, P. et al. 1993] . En la Fig. 12 (a) se muestra de forma esquemática el principio de operación de este tipo de detectores.

El experimento WARP (“WimpARgonProgramme”) [Brunetti, R. et al. 2004] ha retomado esta idea, enfocándose en argón, para el cual el costo es bajo y existe en adecuado soporte industrial. De acuerdo con esta propuesta un detector de 100 lt será instalado dentro del Laboratorio Nacional de Gran Sasso, en Italia y de su éxito dependerá el escalamiento a toneladas (para alcanzar secciones eficaces del orden de 10^{-15} barn para un neutralino MSSM). Una ventaja adicional de los detectores de gases nobles líquidos y, en particular, los basados en argón, es que la energía umbral del retroceso nuclear es relativamente alta (entre 15 y 20 keV), evitando con esto el flujo de neutrinos solares y sólo permitiendo los neutrinos cósmicos con un flujo conocido y controlable, aunque irreducible.

El experimento WARP se encuentran en una etapa de caracterización de un prototipo de 2.3 lt. En la Fig. 12 (b) se presenta un dibujo del prototipo con su contenedor y los fotomultiplicadores en la parte superior. A fin de ganar experiencia en esta novedosa tecnología de detección, planteamos la conveniencia de instalar en el LSMM un prototipo similar. Además de la caracterización misma del prototipo y de probar la separación del ruido de fondo, se podrían hacer estudios de la radioactividad ambiental (se pueden obtener espectros de neutrones y electromagnéticos) y mediciones flujos de neutrinos de alta energía.

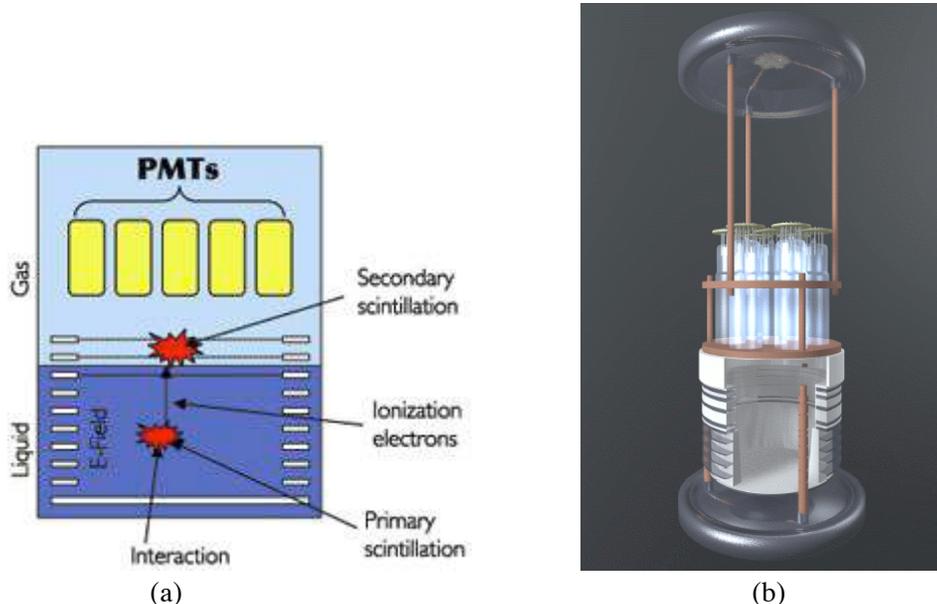


Figura 12. (a) Principio de operación de un detector de argón de dos fases. (b) Dibujo esquemático del prototipo de 2.3 lt.

La parte más delicada y costosa de la construcción y operación del prototipo sería la purificación del argón, ya que requiere sistemas sofisticados de control y monitoreo, además de un continuo reabastecimiento. Sin embargo, existen empresas que manejan comercialmente esta tecnología.

En cuanto a la electrónica, consta de alto voltaje para siete fotomultiplicadores, mientras que el sistema de lectura se hace a través de un equipo estándar de física nuclear. Un asunto complicado será la caracterización minuciosa de los tubos fotomultiplicadores: respuesta a la frecuencia, atenuación de las ventanas, etc. Cabe señalar que uno de los ruidos de fondo más complicados en este tipo de experimentos lo constituyen los neutrones lentos (se comportan como WIPMs, pero con interacción fuerte). Afortunadamente, desde hace ya bastante tiempo, gracias a experimentos en física nuclear se conoce que el poliestireno es un material perfecto para blindar estos neutrones.

Este prototipo servirá como banco de trabajo, cumpliendo también una valiosa función de demostración y entrenamiento. Su construcción y puesta en marcha requerirán de una estrecha colaboración entre ingenieros, físicos y expertos en geología, con un costo total que estimamos no superaría los 500 mil dólares, incluyendo el sistema de purificación del argón.

7. EXPERIMENTOS HUÉSPEDES

7.1 GEOLOGÍA DE YACIMIENTOS MINERALES

Se entiende por *depósito mineral* cualquier concentración anómala natural de una sustancia mineral útil en la corteza terrestre, y la disciplina de las Ciencias de la Tierra que se dedica a su estudio se denomina *Metalogenia*, *Metalogénesis*, o *Geología de Depósitos Minerales*, siendo éstas parte de la Mineralogía. A pesar de que el término Metalogenia incluye etimológicamente sólo aquellos depósitos minerales constituidos por minerales metálicos, a la práctica engloba todos los depósitos minerales, independientemente de si están constituidos por minerales metálicos o por minerales no metálicos (o ambos).

Los yacimientos minerales son aquellos depósitos cuya explotación puede producir un beneficio económico en un momento determinado. Si observamos sobre un mapa la distribución de yacimientos minerales es fácil advertir que, normalmente, los enriquecimientos en ciertos elementos suelen estar restringidos a regiones concretas: las provincias metalogenéticas. Incluso dentro de las provincias metalogenéticas los yacimientos minerales son muy escasos en relación a las otras rocas. Esto es debido a que su formación implica necesariamente procesos geológicos muy locales y raros en el tiempo. México es uno de los países más importantes a escala mundial en lo que a riqueza mineral se refiere, tanto por cantidad y calidad de especies minerales, como por su riqueza minera y por la diversidad de tipologías de depósitos minerales a lo largo de su territorio.

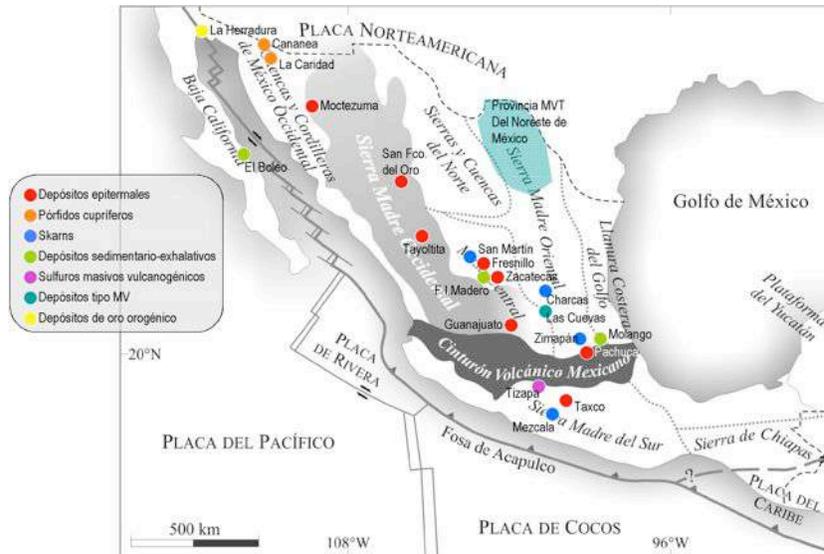


Figura 1. Ubicación de algunos de los depósitos minerales en México de importancia económica mayor y/o representativos de tipologías económicamente significativas, en el contexto de las provincias fisiográficas del país y de la tectónica de placas de la región.

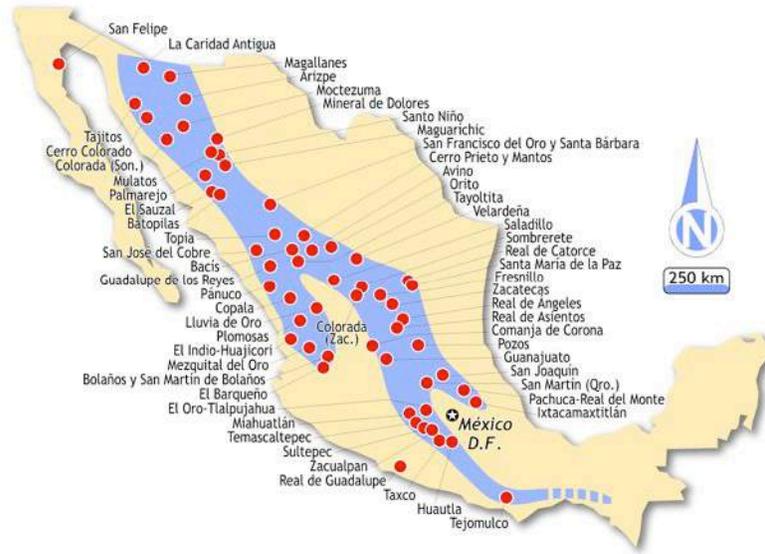


Figura 2. Ubicación de los principales depósitos de tipo epitermal en México, tipología por la cual el país tiene renombre mundial.

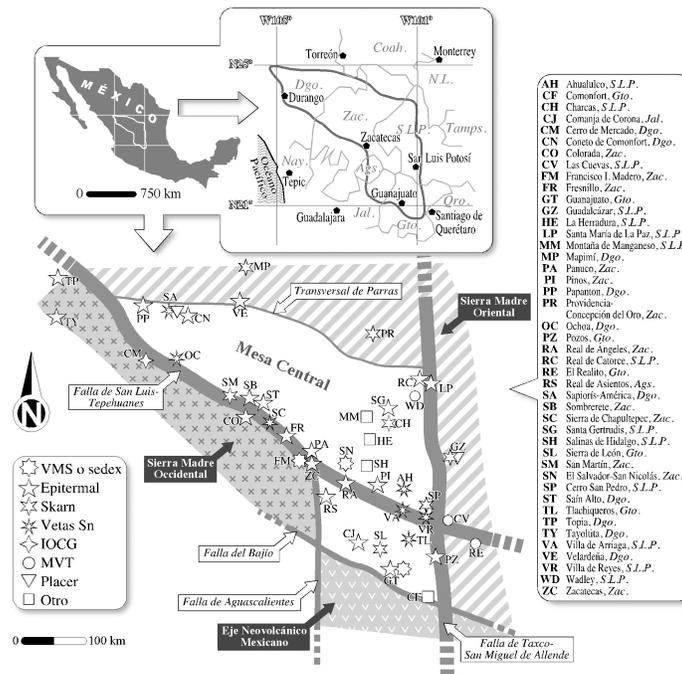


Figura 3. Altiplano, mostrando la ubicación de los principales depósitos minerales de la zona y áreas adyacentes, en relación con las principales zonas de fractura.

7.1.1 OBJETIVOS

El objetivo final de todo estudio metalogenético es determinar en qué condiciones se ha producido la formación de depósitos minerales de forma integral, esto es, comprendiendo no sólo las asociaciones minerales portadoras de minerales económicos, sino también aquellas acarentes de tales minerales. En lo concerniente a la formación de un depósito mineral es tan valiosa la información obtenida en secciones económicamente productivas del depósito como en secciones estériles e, igualmente, tanto en los cuerpos minerales propiamente dichos como en las alteraciones asociadas sobre las rocas encajonantes de la región. Las condiciones de formación de cualquier depósito mineral comprenden:

1. Edad.
2. Temperatura y presión.
3. Régimen de presión (hidrostático o litostático) y profundidad de formación.
4. Eh y Ph.
5. Composición química de los fluidos mineralizantes (salmueras acuosas, compuestos volátiles, fluidos carbonáticos, aceites, y fundidos silicatados) y su evolución temporal.
6. Modelización de la interacción agua/roca.
7. Origen u orígenes de los fluidos mineralizantes.
8. Origen de los metales y de otros componentes químicos.
9. Mecanismos de transporte de los componentes químicos del sistema.
10. Mecanismos físico-químicos de precipitación mineral.
11. Régimen tectónico local y contexto tectónico regional.
12. Evolución de cuencas sedimentarias, de los procesos diagenéticos asociados y/o de los sistemas magmáticos y/o metamórficos involucrados, etc.

Estos y otros aspectos, en su conjunto, mediante la aplicación de las técnicas analíticas pertinentes y de una secuencia metodológica adecuada, proveen de criterios potencialmente poderosos para la exploración y la explotación a diferentes escalas, progresivamente de menor a mayor alcance espacial:

1. Escala de depósito, del orden de hectáreas o pocos km².
2. Escala de distrito minero, del orden de decenas de km².
3. Escala de provincia metalogenética, del orden de centenares de km².
4. Escala de época metalogenética, del orden de centenares a miles de km².
5. Escala de tipo de depósito, o escala global.

A partir de ello, es fácil derivar las consecuencias económicas y sociales que puede tener la implementación de estudios metalogenéticos, bien canalizados hacia la obtención de datos relevantes sobre el funcionamiento de los diversos sistemas geológicos que confluyen en la formación de un depósito mineral o de un grupo de ellos. El reconocimiento, estudio y tipificación de un depósito mineral contribuye directamente a las estrategias de exploración y explotación a desarrollar en el propio yacimiento. El conocimiento sobre un depósito clave dentro de un distrito minero contribuye a conocer qué es esperable o no en depósitos tipológicamente análogos de la

misma área. Mediante el estudio sistemático de dichos depósitos, y de otros depósitos de origen similar o potencialmente relacionables, puede caracterizarse una provincia o una época metalogénica y, en último término, las condiciones generales que prevalecieron o que se precisan para la formación de cualquier depósito de una tipología determinada.

Asimismo, la simple caracterización mineralógica y petrográfica de las asociaciones minerales de un depósito, especialmente si se trata de asociaciones de minerales metálicos, constituye una herramienta básica para determinar estrategias (1) de tratamiento mecánico y la metalurgia de las menas durante el proceso de beneficio de las mismas, y (2) de prevención y/o remediación ambiental que hay que atender en toda explotación minera.

7.1.2 METODOLOGÍA

Trabajo de campo

Como cualquier tipo de trabajo, el estudio de los yacimientos minerales se realiza de forma secuencial. Los trabajos de este tipo relacionan, en primer lugar, un trabajo de campo (que incluye un reconocimiento estratégico, incluyendo una cartografía geológica completa en la mayoría de casos, seguido de la toma de muestras) y, en segundo lugar, un conjunto de trabajos de laboratorio con las muestras seleccionadas.

Antes de iniciar el estudio es preciso definir los objetivos del mismo, pues esos objetivos van a determinar la pauta de los trabajos a realizar. Tanto los objetivos como las técnicas a aplicar varían según el tipo de yacimiento mineral que se quiera estudiar. En ningún caso se debe olvidar que todo trabajo geológico empieza en el campo, y que todo análisis ulterior estará condicionado no sólo por las muestras recogidas sino también, de alguna forma, por las que no se recogieron. Efectivamente, las ausencias pueden llegar a ser más significativas que lo que se ha reconocido, aunque no llegemos a conocer su alcance. Es por ello que durante el trabajo de campo debe de aplicarse el rigor y la exhaustividad máxima en las observaciones que preceden al muestreo. Como es imposible muestrear todo un cuerpo geológico, es preciso hacer un reconocimiento de los mismos que podamos juzgar como representativo. La representatividad de un cuerpo geológico en nuestro reconocimiento y muestreo es, muchas veces, muy difícil de ponderar, y pocas veces puede determinarse de forma objetiva.

Técnicas analíticas básicas

En las técnicas básicas recae la mayor parte del trabajo a realizar a partir del momento que se haya concluido una primera fase de trabajos de campo, y con ellas se pretende establecer las bases para la descripción e interpretación de los depósitos a estudiar.

1. Petrografía mineral mediante microscopía de luz transmitida y reflejada: identificación de los minerales metálicos y no metálicos mediante sus características ópticas; determinación de relaciones texturales y de la paragénesis mineral; posible uso de paragénesis como geotermómetros; determinación de algunos mecanismos de precipitación mineral por medio de ciertos minerales y/o texturas en determinados ambientes geológicos.
2. Petrografía de inclusiones fluidas mediante microscopía de luz transmitida: determinación del carácter primario, pseudosecundario o secundario de las inclusiones; tipologías de inclusiones;

grado de relleno; presencia e identificación de cristales atrapados e hijos; fenómenos de recristalización debido a descompresión, deformación, calentamiento, etc., que den idea de procesos post-atrapamiento.

3. Catodoluminiscencia: determinación de las bandas de crecimiento en minerales, determinando brechificaciones, corrosiones, paros en el crecimiento, sobrecrecimientos y recristalizaciones; determinación de familias de fracturas y su sucesión en minerales con inclusiones fluidas para determinar la evolución de los fluidos post-formación del mineral que las engloba.
4. Microtermometría de inclusiones fluidas: ensayos a baja temperatura para determinar la composición química de las soluciones; ensayos a alta temperatura para determinar las temperaturas mínimas de atrapamiento; cálculo de salinidades e isocoras; hipótesis sobre la evolución de los fluidos y relación con la mineralización: mezcla, ebullición, enfriamiento, etc.

Técnicas analíticas complementarias

La aplicación de las técnicas complementarias va a depender tanto de que se considere que puedan aportar información adicional a las técnicas anteriores.

1. Difracción de Rayos X: determinación de las fases minerales presentes en una muestra y de su abundancia.
2. Fluorescencia de Rayos X: determinación de la composición química en elementos mayores tanto de minerales como de rocas.
3. Microscopía electrónica de barrido: determinación de zonaciones en diferentes minerales; inicio de determinación de especies minerales no identificadas mediante petrografía; coadyuvante en estudios petrográficos convencionales.
4. Microsonda electrónica: análisis puntual e identificación de cualesquiera fases minerales; mapeo composicional de minerales; posible uso de la composición química de algunos minerales como geotermómetros.
5. Isótopos estables de C, O, S y D: trazado de soluciones hidrotermales; cálculo de temperaturas mediante pares isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$); origen del C ($\delta^{13}\text{C}$) en carbonatos; origen del S ($\delta^{34}\text{S}$) y mecanismos de precipitación de sulfuros y sulfatos; δD como trazador del origen de las soluciones (en combinación con $\delta^{18}\text{O}$); mecanismos de precipitación (mezcla de fluidos, ebullición, materia orgánica, etc.).

Técnicas analíticas específicas

Las técnicas específicas de análisis mencionadas a continuación pueden potencialmente aportar una información valiosísima sobre la geoquímica de los fluidos mineralizantes y de las interacciones agua/roca. Pueden utilizarse tanto como trazadores de las soluciones, como para la modelización geoquímica de estos depósitos. No obstante son técnicas complejas y que requieren laboratorios específicamente dedicados a ellas. Estas técnicas son:

1. Análisis completo de las inclusiones fluidas mediante métodos de trituración-lixiviado: composición catiónica (Na, K, Ca, Mg, Mn, Fe, Al, Sr, Ba, Cu, Zn, Ag, B) y aniónica (Cl, Br, I, S, SO_4^{2-} , F); origen de las soluciones mediante las relaciones de halógenos; utilización de la salinidad reconstruida en la modelización de los procesos de transporte y precipitación de minerales.

2. Modelización termodinámica mediante algoritmos específicos: determinación de presiones parciales en sistemas multivolátiles; determinación de condiciones de equilibrio/desequilibrio químico entre especies volátiles; coadyuvante en la determinación de condiciones de formación y del origen de las soluciones mineralizantes y de otros componentes.
3. Espectrometría de masas cuadrupolar: análisis de gases en inclusiones fluidas (N_2 , Ar, He, CH_4 , H_2S , SO_2 , H_2 , O_2 , CO_2 , H_2O , etc.); trazado del origen y evolución de los fluidos; esta información, junto con la que pueden aportar los isótopos estables de C, O y D y el análisis de halógenos, puede permitir conocer en profundidad los mecanismos de circulación y origen de los paleofluidos relacionados con el origen de la mineralización.
4. Espectrometría de masas de campo sectorial para gases nobles: análisis de los isótopos de He, Ne y Ar como trazadores del origen y evolución de los fluidos mineralizantes.
5. Microsonda de efecto Raman: determinación de la composición en gases de las inclusiones y de sus relaciones molares, así como de sólidos en su interior.
6. Microespectroscopía de infrarrojo con Transformada de Fourier: identificación de tipologías de hidrocarburos.
7. Fechamientos absolutos mediante $^{40}Ar/^{39}Ar$, K-Ar, Rb-Sr, Sm-Nd, U/Pb, o U/Th-He: fechamientos absolutos en diferentes rangos de precisión sobre minerales y rocas mediante diversos métodos.
8. Espectrometría de masas por plasma inducido acoplado con o sin láser (ICP-MS o Laser-ICP-MS): análisis multielementales de rocas, minerales, e inclusiones fluidas.
9. Isótopos estables no convencionales (Cl, Se, Fe, Mg, etc.): trazado de soluciones hidrotermales; mecanismos de precipitación; origen de los fluidos mineralizantes y de los metales.
10. Análisis de biomarcadores: determinación de especies orgánicas en minerales o rocas que son indicativas de ambientes de formación, especialmente en cuanto a la participación de agentes biológicos y la formación de hidrocarburos.

Para implementar las investigaciones propuestas en esta apartado será preciso contar con el apoyo de un Laboratorio de Geología, como el que se describe en el Cap. 5.

7.2 OBSERVATORIO SISMOTECTÓNICO

Se propone la instrumentación sismotectónica del Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano (LSMM). Esta propuesta incluye equipo localizado en la superficie así como en las instalaciones subterráneas. Para las instalaciones superficiales proponemos una estación equipada con un instrumento sismológico de banda ancha y un equipo de posicionamiento por satélite (GPS, por sus siglas en inglés "Global Position System"). Además proponemos la instalación de cuatro receptores distribuidos en el perímetro que limita la superficie del laboratorio subterráneo. Para las instalaciones subterráneas proponemos la instalación de un instrumento sismológico de banda ancha.

Recientes desarrollos tecnológicos permiten contar en la actualidad con instrumentación sísmica cuyos registros abarcan frecuencias entre los 0.004 Hz y los 50 Hz. Este ancho de banda permite llevar a cabo gran cantidad de estudios sismológicos que van desde el análisis de los procesos de la fuente sísmica hasta detalles de la propagación de las ondas en altas frecuencias. Estas

mismas características permiten contar con registros de sismos localizados a grandes distancias, además de temblores que se ubiquen a distancias locales y regionales.

Por otro lado, el sistema GPS es la técnica geodésica más utilizada para determinar la posición de un punto sobre la superficie terrestre. La precisión con la que un GPS de alta calidad registra la posición de un punto en la superficie es del orden de milímetros.

Por lo tanto, la combinación de ambos equipos (estación sismológica de banda ancha + GPS de alta precisión) es muy adecuada para monitorear detalladamente el régimen sismotectónico de una región.

7.2.1. OBJETIVOS Y JUSTIFICACIÓN

El proyecto LSMM representa una oportunidad única en el país para contar con una estación sismológica de banda ancha a gran profundidad. Los registros obtenidos por dicha estación, junto con los registros obtenidos por su par instalada en la superficie permitirán, entre otras cosas, validar modelos numéricos de propagación, análisis de ondas superficiales, calibrar métodos para determinar efectos de sitio y de estructura de velocidades a nivel local, etc. Un beneficio adicional, tanto para la mina como para el LSMM, es el análisis de la sismicidad inducida por los propios trabajos de la mina.

Con los receptores GPS se tendría la capacidad de detectar variaciones significativas en la posición de las estaciones asociadas a deformaciones locales que a largo plazo pudieran afectar a los laboratorios subterráneos y de superficie. Desde el punto de vista sismotectónico, el objetivo de establecer estas estaciones permanentes es poder contar con más información acerca de la deformación que ocurre en la parte estable de la placa de Norte América (libre de la influencia de la deformación asociada a la zona de subducción), lo cual sirve como referencia para determinar la deformación neta asociada al proceso de subducción, además de contribuir para establecer un marco geodinámico que pudiera servir para estudios futuros de la neotectónica de México.

La instrumentación geodésica del laboratorio de superficie trae consigo un beneficio directo para la mina, ya que se contaría con una estación de referencia a la cual podrían ligar todos los trabajos topográficos que se llevan a cabo en cualquier mina.

Por lo tanto, el observatorio supondría un apoyo directo para los siguientes cometidos:

1. Investigación relacionada con los procesos de la fuente sísmica y de la propagación de ondas de cuerpo y ondas superficiales.
2. Análisis de la sismicidad inducida.
3. Estación de referencia en estudios sismotectónicos: Se podrían establecer patrones de deformación a lo largo del territorio nacional.
4. Monitoreo de la deformación local: Permitiría revisar constantemente la estabilidad de la zona.
5. Estación de referencia para levantamientos topográficos propios de la mina.

Cabe mencionar que los datos obtenidos por el observatorio propuesto podrían ser administrados por el Servicio Sismológico Nacional (SSN) perteneciente al Instituto de Geofísica de la UNAM, el cual opera la red de estaciones de banda ancha más importante del país además de una amplia red de instrumentos GPS.

7.2.2 INFRAESTRUCTURA

Se proponen dos tipos de instalaciones diferentes, una para la superficie y otra para las instalaciones dentro de la mina:

Instalación superficial

Se propone que la instalación del observatorio sismotectónico en superficie conste de una caseta de ladrillo y de 4 pilares distribuidos en el perímetro que limita la superficie del laboratorio subterráneo. Estas obras servirán para resguardar el equipo de las inclemencias del tiempo y del vandalismo.

En la caseta se colocarían los equipos sismológicos (sensor, digitalizador), y un equipo GPS (receptor, antena, PC), así como el equipo de comunicación, el cual funcionaría para transmitir los datos sismológicos y geodésicos.

Las características generales de la caseta, son:

1. Estará dotada de doble muro para minimizar la influencia del cambio de temperatura y del ruido ambiental. Siguiendo los estándares de construcción de los observatorios de banda ancha del SSN la caseta deberá contar con dos cuartos separados. En uno de los cuartos, donde se colocará el sensor sísmico, debe de cimentarse un pilar de concreto separado del suelo, en dicho pilar se instalará el sensor que a su vez será aislado térmicamente con una caja de *unicel* de alta densidad recubierta de aluminio. En el cuarto contiguo, separado por un muro con puerta, serán colocados los equipos de registro sísmico y geodésico además, de los equipos de transmisión. La caseta debe colocarse, de preferencia, donde exista un afloramiento rocoso estable y sin fracturas, lo que permitirá niveles muy bajos de ruido.
2. Se deberá colocar en un lugar donde exista visibilidad de cielo, esto es que no haya obstrucciones por arriba de un ángulo de inclinación de 10-15°, esto incluye cerros, vegetación, grandes edificaciones, etc.
3. Contará con electricidad y respaldos de larga duración, además de, al menos, tres nodos de *Internet* y sistema de comunicación satelital.

Los pilares de concreto tendrán las propiedades siguientes: (i) Cada pilar deberá estar cimentado directamente sobre el afloramiento, o en su defecto se deberá de cimentar a 1 ó 2 metros de profundidad, dependiendo del tipo de suelo que se tenga. (ii) La altura del pilar a partir del nivel del piso deberá de ser de un metro rematado por una placa metálica con un centrado forzado por un tornillo sobre el que se coloca directamente la de antena. El punto de referencia de la estación será esta placa. (iii) A un costado del pilar se deberá colocar un poste en el cual se fije un panel solar. (iv) Deberá haber una caja dimensiones tales que se pueda guardar una batería (para garantizar suministro eléctrico), el receptor GPS y que disponga de un nodo de *Internet*.

Instalación subterránea

Se propone que la estación localizada en la mina sea dentro de un cuarto en las instalaciones profundas (no necesariamente en laboratorios ultralimpios), donde se cimentaría un pilar de concreto de $\sim 1 \text{ m}^2$ aislado del suelo, sobre el cual se colocaría el sensor sísmico. El equipo de registro podría estar localizado en el mismo cuarto en un módulo diseñado para el propósito. Uno de los

principales problemas logísticos de esta estación, será que la señal de ajuste del reloj, que tradicionalmente se lleva a cabo a través de un GPS con una pequeña antena, tendrá que enviarse a través de una conexión de red de alta velocidad a la caseta superficial. Deberá de contarse con al menos dos nodos de red, uno de los cuales enviará a la estación la señal de ajuste del reloj y el otro se utilizará para enviar la información registrada por la estación.

7.3 ESTUDIO *IN VIVO* DEL TRANSPORTE Y LA DISTRIBUCIÓN DE METALES PESADOS EN PLANTAS

El uso de tecnologías sostenibles de remediación ambiental a base de plantas (*fitorremediación*) ofrece reducciones significativas de los costos y además ayuda a reducir el cambio climático local y la destrucción del suelo causada por la deforestación. Mientras los microorganismos del suelo también pueden degradar compuestos tóxicos a productos finales inocuos, sólo las plantas pueden extraer contaminantes del suelo/agua y enviarlos a los retoños donde los contaminantes pueden ser completamente eliminados por la cosecha de la biomasa de la planta. Una representación esquemática se muestra en la Fig. 1.

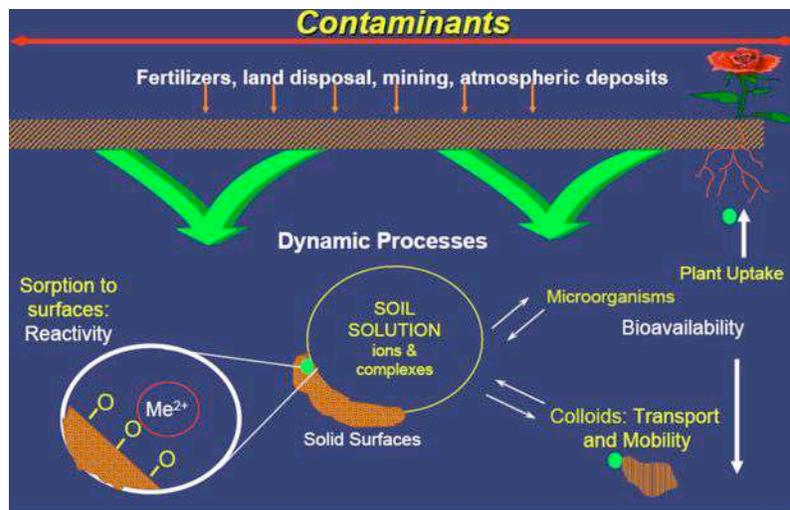


Figura 1. Representación esquemática de la especiación (“speciation”) de metal en el suelo y su remoción por plantas.

La optimización de la fitorremediación requiere un mayor conocimiento del que existe hasta ahora sobre el mecanismo de absorción del metal, retención y “destoxificación” por las plantas, tanto a nivel molecular, como de la planta entera. La eficiencia de esta tecnología viene dada por la masa total de metal M_{metal} extraído por la planta durante su período de crecimiento y se expresa como:

$$M_{\text{metal}} = M \cdot C_p, \quad (1)$$

donde M denota la biomasa de la planta y C_p la concentración de metal dentro del tejido de la planta [Dasgupta-Schubert 2007]. La maximización de M_{metal} requiere el conocimiento de como la planta divide la energía obtenida fotosintéticamente en el desarrollo de M y en la absorción del metal y destoxificación (C_p). Tales investigaciones implican el estudio detallado de la dinámica

de transportes de metal y de nutriente en la planta, conjuntamente con la termodinámica de la disposición de energía (“energy budget”) pertinente al fenómeno de la acumulación metálica. Además, la capacidad de la planta para destoxificar el metal requiere un conocimiento de las características de las proteínas transportadoras del ión metálico y un conocimiento de la distribución anatómica y celular del ión metálico dentro de la planta.

La *Brassica juncea* (nombre común, mostaza índica) es una planta que tiene la propensión de absorber varios metales pesados tales como Ni, Zn y Mn en cantidades más altas de las normales. En fitorremediación se dice que es un acumulador metálico. Recientemente, Dasgupta-Schubert y col. [Dasgupta-Schubert 2007a, Dasgupta-Schubert 2007b] han investigado la disposición de energía dinámica (“dynamic energy budget”) implicada en la acumulación metálica y el crecimiento metabólico. Su investigación fue realizada mediante observaciones de las respuestas fisiológicas de la planta cuando estaba sujeta a estrés por metal a concentraciones graduadas, variando simultáneamente la energía disponible para el crecimiento, modulando el cuanto de luz fotosintético. Observaron que la respuesta de la planta a la absorción de metal se da de acuerdo al principio termodinámico de Le Chatelier, con un comportamiento no lineal en la saturación del metal dado por

$$C_p = a \ln(C_s) + C_0, \quad (2)$$

y que la división de energía entre el crecimiento y la absorción y retención del metal en la planta ocasiona una reducción en la producción de biomasa, la cual depende cuantitativamente sobre la concentración del metal en la planta:

$$M_{Ni} = (1/\alpha)^{1/\beta} \cdot M^{(1/\beta + 1)} \quad (3)$$

En las ecuaciones anteriores, M y C_p tienen el mismo significado que en la Ec. (1), mientras que C_s es la concentración de metal en el suelo, M_{Ni} es la masa de Ni extraída por la planta, y a , C_0 , α y β son constantes que dependen del cuanto de luz disponible para la fotosíntesis. La planta que fue capaz de extraer la mayor cantidad de metal durante el período de crecimiento establecido fue la *Brassica juncea* que presentó una tasa de crecimiento metabólico moderado y una moderada concentración de metal absorbido (Fig. 2).

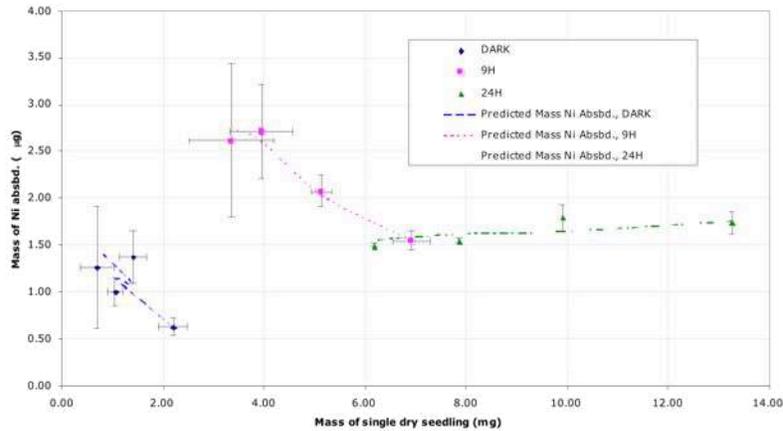


Figura 2. Variación de la masa de Ni absorbida por el planton de *B. juncea*, M_{Ni} , con M a tres diferentes cuantos de luz diurnos. Las líneas cortadas son los valores calculados por la Ec. (4).

Estas conclusiones tienen relevancia en el contexto de maximizar la eficiencia de la fitoextracción en tecnologías de fitorremediación. En estos estudios, se usaron algunas técnicas espectroscópicas sensibles como Espectrometría de Absorción Atómica de Flama (FAAS), “Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry” (ICPMS) y “Epithermal Neutron Activation Analysis” (ENAA).

La distribución anatómica del metal en la planta es importante ya que esto ayuda a contestar preguntas relacionadas con la bioquímica del órgano específico en la retención del ión metálico por la planta, y las estrategias de la planta para la eliminación de toxinas. Hasta ahora, la mayoría de las investigaciones anatómicas y celulares acerca de la acumulación de metal por las plantas son *in vitro*, los cuales producen información valiosa, pero tienen la desventaja de que la bioquímica de la planta muerta es considerablemente distinta y puede no representar el cuadro verdadero; por lo tanto, toda la información dinámica en tiempo real se pierde. Recientemente Dasgupta-Schubert y col., construyeron el primer Espectrómetro de Emisión de rayos X inducida por las partículas, desplegable en laboratorio (PIXE-L) [Tarawneh 2006], que permite la espectrometría de rayos X de la planta viva en el laboratorio. Este novedoso sistema es importante también desde el punto de vista de que ahora los científicos de las ciencias de la vida pueden analizar sistemas vivos por espectrometría PIXE en sus laboratorios, sin la necesidad de emplear aceleradores de partículas. Esto reduce los gastos considerablemente así como también permite realizar diagnósticos sobre materia viva. La Fig. 3 muestra el espectro PIXE de hojas de *Thlaspi Montanum*, una planta hiperacumuladora de Ni. La correlación del alto contenido Ni con Ca se ha visto que indica que el Ni está probablemente ligado a las paredes de las células de la hoja.

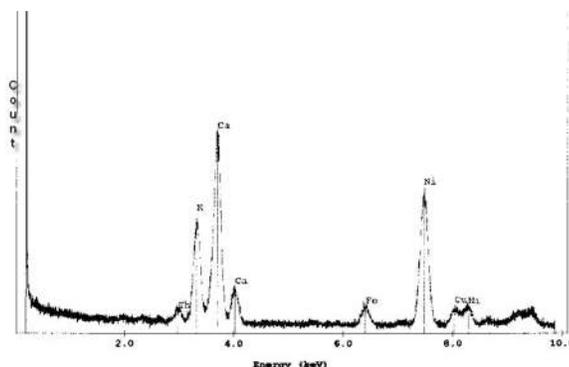


Figura 3. Espectro PIXE de las hojas de la planta hiperacumuladora de Ni, *Thlaspi Montanum*, sobre un área de apertura de 1.6 cm empleando el PIXE-L construido por Dasgupta-Schubert y col. [Tarawneh 2006]. El espectro demuestra la identificación simultánea de elementos múltiples.

En esta propuesta planeamos estudiar los procesos bio-fisicoquímicos implicados en el fenómeno de acumulación de metales pesados por plantas (por ejemplo, plomo Pb). Los experimentos se harán en la planta viva intacta (*in vivo*). Las observaciones específicas serán sobre la dinámica del transporte de ión metálico, la división de energía metabólica entre acumulación metálica y crecimiento fotosintético, la distribución anatómica del metal y otros elementos del tejido de planta, la correlación de la concentración metálica con otros elementos (por ejemplo, azufre S) en

las proteínas transportadoras aisladas de la planta y la influencia de condiciones eco-fisiológicas (micorriza, bacterias y nutrientes de suelo) en estas observaciones.

El método experimental consistirá de espectrometría de rayos X y γ de alta resolución en tiempo real, combinado con las imágenes de la distribución de ión metálico. La parte de espectrometría γ , incorporará Germanio de alta pureza (HPGe) como sistema de detección. La imagen se obtendrá mediante un conjunto de colimadores alineados que será diseñado y construido por nosotros. El diseño experimental será optimizado por el código de transporte GEANT4 [Agostinelli 2003], el cual también será usado para analizar cuantitativamente los datos experimentales. La necesidad de reducir el ruido de fondo espectral y la interferencia electromagnética (EM) es esencial en estos experimentos a fin de conseguir las sensibilidades extraordinariamente altas que se requieren. Por tal motivo, los experimentos serán realizados en las instalaciones subterráneas del LSMM. Los componentes complementarios del experimento en el estado *in vitro* de la planta es decir identificación de multielementos, la separación de compuestos órgano-metálicos etc., así como el componente eco-fisiológico de la investigación, será realizado mediante técnicas convencionales usando espectrometría de fluorescencia de rayos X, cromatografía de líquidos y técnicas biológicas del crecimiento controlado de plantas. Los datos experimentales serán interpretados en base a las teorías termodinámicas y de transporte.

7.3.1 OBJETIVO Y JUSTIFICACIÓN

El objetivo primario de este trabajo es realizar *in vivo* estudios de: (i) la dinámica del transporte de ión metálico en una planta que acumula metales, (ii) la termodinámica de la disposición de energía (“energy budget”) asociado con este fenómeno y (iii) para observar la distribución anatómica a niveles macro y micro del ión metálico y su proteína transportadora asociada en la planta. La técnica que proponemos usar es espectrometría de alta resolución de rayos X y γ del ión metálico etiquetado (“labelled metal ion”), así como obtención de imágenes que nos den una idea de la distribución anatómica del ión metálico. El ión metálico será ^{210}Pb , porque el Pb es uno de los contaminantes metálicos pesados más tóxicos y es importante en el contexto de la remediación ambiental en México. Con los progresos de proyecto, podrían ser investigados otros iones metálicos de importancia en fitorremediación, como Cu usando ^{64}Cu . Ya que en las plantas existe una relación simbiótica íntima entre la flora de suelo y la fauna, en particular hongos (micorriza) y bacterias y debido a que la presencia de nutrientes esenciales como fosfatos, es vital a la salud de la planta, será importante entender el papel de la eco-fisiología del suelo en la capacidad de la planta para absorber metales pesados. El impacto de la eco-fisiología del suelo en C_p o en M , o ambos, afectará considerablemente M_{metal} . Hay evidencia para sugerir que ambos, las micorrizas y los nutrientes de la planta que contienen P y N, aumentan la capacidad de extracción metálica de la planta incrementando el factor de la biomasa M [Khan 2000, Ebbs 1997]. Así, nuestras investigaciones también incluirán la observación del papel de factores eco-fisiológicos (micorrizas, bacterias, nutrientes de la planta) en los estudios (i) - (iii) explicados anteriormente.

Uno de los principales factores que regulan la entrada del ión metálico positivamente cargado en la célula de la planta, es el potencial de la membrana celular que es gobernado por las cargas de la bi-capa de lípido de la membrana. La introducción de una cantidad relativamente grande de ^{210}Pb probablemente causaría disturbios en el campo eléctrico en la membrana por la producción local de fotoelectrones por los rayos γ y las partículas α que causan que la planta cambie su res-

puesta natural. Por lo tanto, nuestra intención es usar dosis extremadamente bajas de ^{210}Pb , a nivel de radiactividad ambiental, para así minimizar los disturbios de la fisiología celular normal de la planta. La línea característica del ^{210}Pb es un rayo γ de baja energía 46 keV y es muy débil (intensidad absoluta = 4.24 %) (ver Fig. 4). Además, nuestro proyecto implica un estudio dinámico que limita el número de iones metálicos observados en virtud de la densidad de flujo, el cual será reducido subsecuentemente por el campo de visión del colimador de la cámara de imagen. Nuestro sistema de detección deberá ser por lo tanto extremadamente sensible -esencialmente capaz de contar un solo fotón.

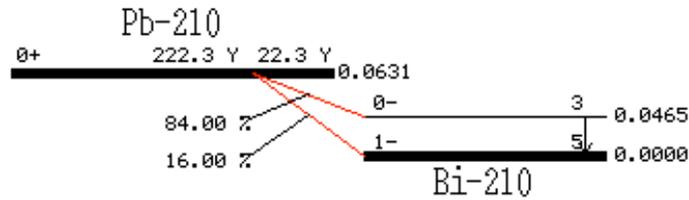


Figura 4. Esquema relevante del decaimiento beta y gama de ^{210}Pb .

Intentamos emplear un diodo de un sólo cristal de Ge (HPGe) criogénico de gran volumen y alta pureza acoplado a un preamplificador sensible a la carga, controlado por un FET, y asociado a electrónicos espectrométricos. Los sistemas modernos de detección de rayos γ de este tipo son capaces de contar un sólo fotón. Con el fin de coleccionar el mayor número de fotones, la geometría del detector será cercana a 4π , este es llamado “well-detector”. La eficiencia de este tipo de detector es cercana a 100% a ~ 100 keV (Fig. 5), es decir en el extremo inferior del rango de rayos γ que es importante para nosotros (los rayos γ para ^{210}Pb son de 46 keV).

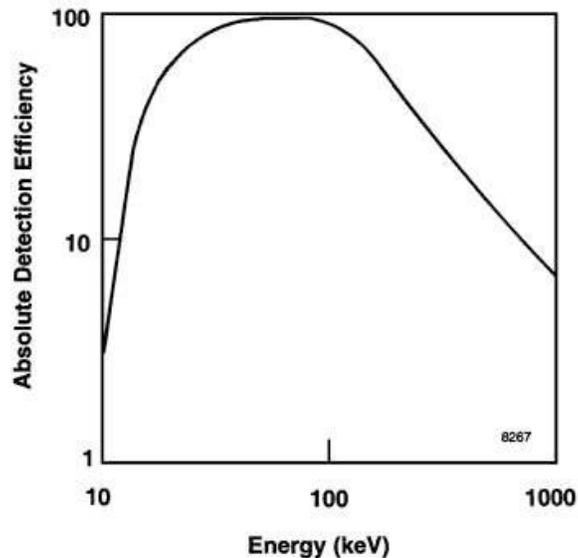


Figura 5. Dependencia en la energía de la eficiencia absoluta de detección de un típico “well-type” HPGe.

La relación señal a ruido (SNR) es un indicador de la sensibilidad del instrumento y es definida por

$$\text{SNR} = (T - B) / (T + B)^{1/2}, \quad (4)$$

donde T es el número total cuentas en el pico γ y B el número de cuentas en el background del pico. Un gran ruido de fondo reduce la sensibilidad y resolución del sistema por la reducción del SNR. El background está constituido por el fondo espectral de Compton (“Compton background”) y el ruido electrónico del detector.

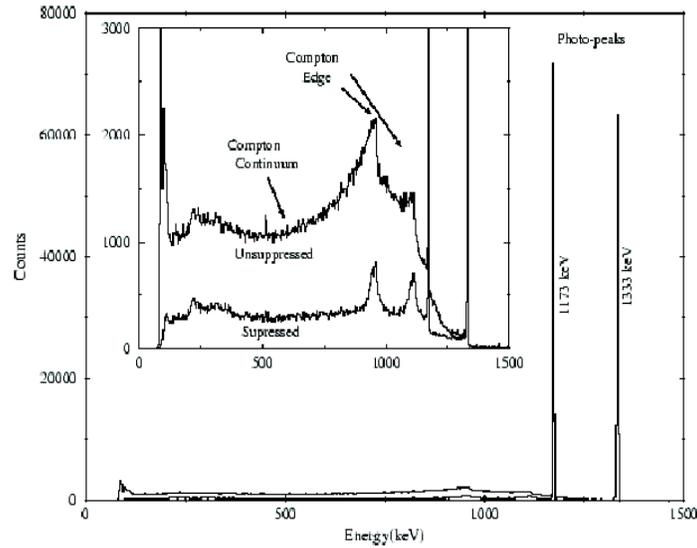


Figura 6. Espectro típico de rayos γ obtenidos con y sin supresión activa de Compton. La intensidad de la línea gamma débil en ~ 500 keV ha desaparecido prácticamente en el espectro suprimido.

En instrumentos modernos el ruido electrónico es sustancialmente bajo. El ruido residual lo constituyen las interferencias EM y microfónicas. El ruido microfónico puede ser eliminado de manera efectiva por el montaje libre de vibración del sistema espectrométrico. El ruido de fondo espectral puede ser reducida por el conteo de la anti-coincidencia Compton [Haskins 1998] (Fig. 6). Sin embargo, como lo muestra la Fig. 6, esto reduce la estadística del fotón considerablemente, ya que para rayos γ de 46 keV dicha estadística es muy baja al comienzo. Por lo tanto, este método está excluido en el presente proyecto. La mejor opción para reducir el ruido de fondo es dotar de una placa pasiva bastante gruesa al sistema de detección. Ya que el espesor de las capas de suelo superiores proporcionan la mas amplia protección pasiva posible. Los laboratorios subterráneos poseen el menor fondo en rayos X y γ , en un rango importante para los análisis elementales espectrométricos. Además las interferencias EM también son reducidas en laboratorios subterráneos. La Fig. 7 demuestra que, comparado con la superficie, en el rango de energía de nuestro interés (<1000 keV), el fondo de gammas es reducido unas 1000 veces en laboratorios subterráneos.

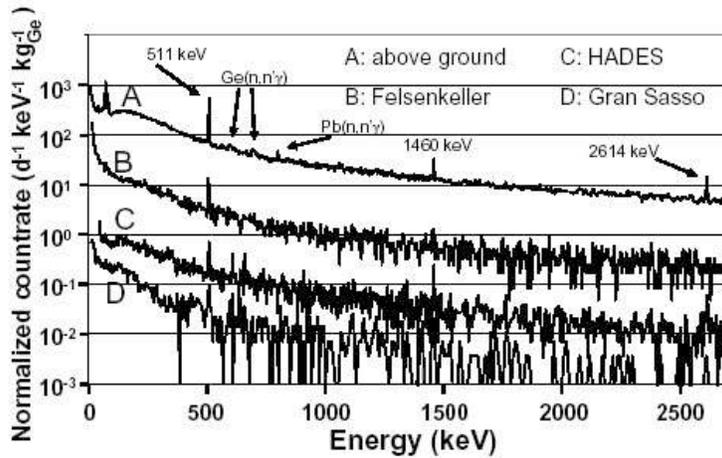


Figura 7. Comparación del fondo de rayos γ en el laboratorio de superficie y en tres laboratorios subterráneos de renombre.

7.3.2 DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS

Las plantas serán cultivadas en condiciones ambientales controladas en la cámara de crecimiento o en condiciones naturales simuladas en invernadero. Las concentraciones graduadas de Pb contienen dosis muy bajas de ^{210}Pb (*traza radioactiva*) y se aplicarán al medio de crecimiento en etapas seleccionadas del crecimiento de la planta. La planta será colocada entonces dentro de un sostenedor de muestra herméticamente sellado que permita la definición de la imagen por medio de un juego de colimadores alineados.

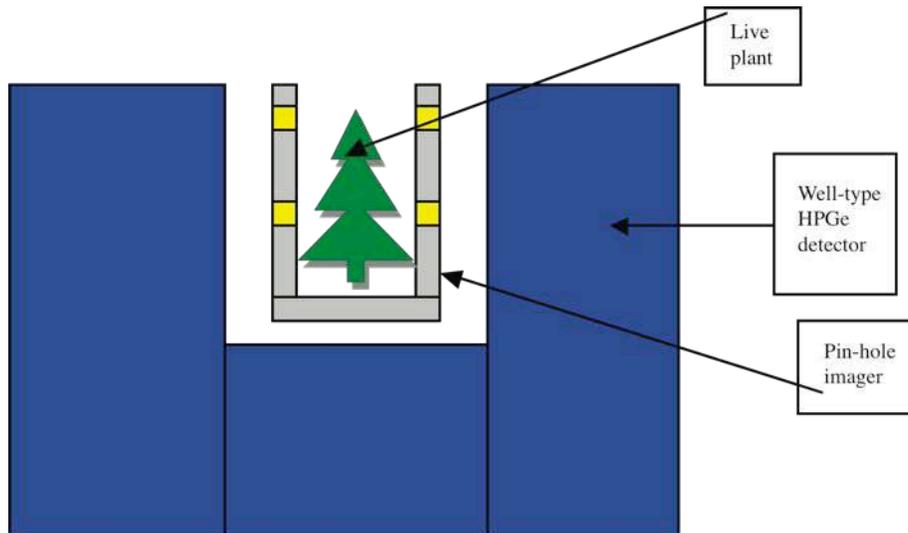


Figura 8. Geometría del detector propuesto y la espectrometría γ con imagen de la planta.

Esta componente será diseñada y fabricada por el equipo participante en el proyecto. En la Fig. 8 se muestra un arreglo esquemático. El transporte temporal de los iones de Pb y su distribu-

ción anatómica se determinarán por el espectrómetro con imagen. Sin embargo, dicho aparato no será capaz de resolver la distribución de Pb y otros elementos nutritivos a la escala de grupos de células como, por ejemplo, la capa de células mesófilas esponjosas en la hoja. Tal estudio será hecho mediante fluorescencia de rayos X a nivel microscópico (micro-XRF), lo cual permitirá alcanzar una resolución espacial del orden de algunas decenas de micrones. Para ello se empleará tejido de planta muerto, después de la preparación conveniente, ya que el sistema micro-XRF no permite en determinaciones *in vivo*. Esto complementa muy bien la determinación espectrométrica γ porque con ello seremos capaces de determinar no sólo la distribución microscópica de Pb, sino también su asociación con otros elementos como S y P que están implicados en las proteínas transportadoras metálicas.

La cuestión de la disposición de energía dinámica involucrada en la acumulación de metal por la planta será investigada mediante la variación de luz fotosintética durante el crecimiento de la planta. Se emplearán lámparas de Xe de corriente directa de longitud de onda e intensidad ajustable para investigar los dominios de la luz pertinente a las energéticas de la planta (fotosíntesis), es decir, del cercano visible al infrarrojo.

El ión metálico es transportado lejos de las raíces a los brotes por proteínas transportadoras específicas. A lo largo del camino ocurren varias reacciones bioquímicas lo que causa el almacenamiento del ión metálico en las vacuolas de las hojas con un estado de oxidación específico unido a ciertos ligandos orgánicos. La información en la naturaleza de estos compuestos organometálicos y posiblemente el estado de oxidación del Pb será reunida por la separación de los componentes de la savia de xilema por cromatografía de líquidos y el uso de un electrómetro sensible para medir la conductancia eléctrica.

La eco-fisiología de la rizosfera desempeña un papel muy importante en la disponibilidad de nutrientes a las raíces de planta y en la calidad alimenticia del suelo. Éstos por su parte afectan la capacidad de las raíces para absorber metales pesados. La naturaleza simbiótica de las micorrizas y bacterias en el suelo, el papel de nutrientes específicos, como fosfatos, en el contexto de la absorción de Pb por la planta será investigado mediante estrategias convenientes de crecimiento de la planta. Éstos incluirán el uso de ambientes de crecimiento controlados en una cámara de crecimiento, el uso de un invernadero para simular condiciones de campo de una manera controlada y el crecimiento de la planta en presencia de bacterias específicas naturales del suelo, micorrizas y nutrientes. Además de los instrumentos mencionados hasta ahora, estos estudios necesitarán el uso de un microscopio de campo oscuro/óptico para examinar los especímenes rizosféricos.

El diseño del contenedor de la muestra y la cámara con colimador tiene que ser optimizado mediante cálculos de transporte de radiación de tipo Monte Carlo, antes de que éste sea fabricado. Además, la distribución del ^{210}Pb dentro del tejido de planta que es geoméricamente y materialmente no homogéneo, y su movimiento durante el tiempo de la adquisición de espectro, representa una matriz compleja a través de la cual los rayos γ viajan antes de que sean finalmente colectados en el detector. El análisis cuantitativo de los datos para la información cinética y espacial requiere que el espectro experimental sea cuantitativamente simulado y, para ello, otra vez planeamos usar el poderoso código de transporte de radiación GEANT4, el cual tiene la ventaja de poseer una de las mejores bibliotecas de transporte de baja energía gama. La interpretación teórica final de los datos para la dinámica y disposición de energía requiere cálculos exhaustivos de fenómenos termodinámicos y de transporte, basados en los preceptos de la física teórica.

7.3.3 INFRAESTRUCTURA

Laboratorio Químico de Superficie

El laboratorio tendrá un área aproximada de 100 m² y estará provisto de mesas de trabajo de laboratorio, con conexiones de gas y conectores eléctricos, lavabos con tuberías para agua y campanas para gases. El equipo requerido para los estudios de bio-fisicoquímica de plantas es el siguiente: cromatógrafo de líquidos, centrifugadora, horno, refrigerador, incubadora, microscopios (de campo oscuro y campo óptico), balanzas, pH-metro para medioambiente, sistema de agua ultrapura millipore para Investigación bioquímica, analizador de gases carbono-nitrógeno y procesador ultrasonico con controlador de temperatura. Afuera del edificio se reservará un espacio de tierra de unos 200 m² de superficie donde se construirá un invernadero.

Laboratorio Subterráneo de Espectrometría e Imagen de Rayos γ y X

Ocupará una superficie de unos 160 m², debiendo contar con bancos de trabajo de laboratorio, fregaderos con fontanería para el agua y abastecimiento de agua las 24 horas. En él se instalará y operará el siguiente equipo: Espectrómetro criogénico de rayos γ , analizador de micro fluorescencia de rayos X de tipo dispersión de energía, fuente de luz ajustable de UV cercano a IR cercano, electrómetro para mediciones de conductancia electroquímica y corrientes en la materia de la planta, cámara de crecimiento de 7 m².

Los resultados de las investigaciones propuestas y la nueva estrategia en espectrometría con imagen que está siendo planeada para este experimento en biofísica y bio-fisicoquímica de la planta, será una contribución significativa al entendimiento del mecanismo de la homeóstasis de metal en plantas, desarrollada a partir de la experiencia previa del grupo. El uso de GEANT4 no sólo significa un desarrollo en la frontera de la biofísica de la planta, sino también una prueba de su aplicabilidad en análisis de baja energía. Asimismo, el análisis de los resultados en términos de preceptos de la física teórica, sin duda, contribuirá a la profundidad y rigurosidad en el estudio de los fenómenos en las ciencias de la vida. Por último, desde el punto de vista socioeconómico, un mejor entendimiento de la acumulación de metal en plantas beneficiará a la biotecnología ambiental sostenible de fitorremediación y los micro-nutrientes de plantas agrícolas.

7.4 ESTUDIOS DE DIVERSIDAD MICROBIANA DE SUBSUELO CON UN ENFOQUE METAGENÓMICO

En las pasadas dos décadas un número creciente de microbiólogos, biólogos moleculares y geoquímicos, entre otros, han analizado los ecosistemas microbianos del subsuelo para tratar de entender su biodiversidad, orígenes, impacto en los ciclos bio-geoquímicos y, además, para analizar su potencial en la biorremediación de mantos freáticos contaminados con metales pesados [Anderson 2003].

Entender que mecanismos emplean estos microorganismos para contender con ambientes extremos, tales como alta salinidad, alta presión y temperaturas elevadas, e identificar los genes que son críticos para la supervivencia en el subsuelo profundo, así como nuevas formas de generación de energía que potencialmente pudieran ser empleadas como fuentes alternas de energía, representa un campo interesante de estudio [Vargas 1998, Lovley 2002].

Sin embargo, el número de estudios en los que se ha analizado la biomasa microbiana, la biodiversidad y los procesos metabólicos que intervienen en la supervivencia en estos ambientes ha sido limitado, debido a la dificultad de accesibilidad a grandes profundidades, además de los riesgos de una posible contaminación durante las perforaciones para obtener las muestras a estudiar. Entre los ejemplos que existen de estudios de la diversidad microbiana en el subsuelo profundo, algunos se han concretado a identificar los grupos de bacterias que se encuentran representados en estos ambientes, otros a tratar de aislar microorganismos metabólicamente activos y cultivables. Hacen falta estudios *in situ* que permitan integrar los conocimientos, complementándolos con estudios geoquímicos y la relación con estos ambientes extremos. Se ha estimado que el 99% de la biota del subsuelo no es cultivable, por lo que se requiere de estrategias que permitan entender, identificar y manipular la información contenida en los genomas de los organismos no cultivables.

Por otro lado, el conocimiento que se tiene de estos ambientes ha sido limitado, en parte por el alto costo que implica realizar perforaciones profundas, y no se ha implementado ninguna que esté específicamente orientada a la investigación microbiológica, además de que existe cierto riesgo de que, en el proceso de extracción, se contaminen con organismos de capas más superficiales.

Como se mencionó anteriormente uno de los problemas más graves a los que se han enfrentado los microbiólogos es el de lograr cultivar en el laboratorio especies microbianas pertenecientes a ambientes extremos. Una alternativa ha sido trabajar con organismos cercanos filogenéticamente que sí sean cultivables lo cual ha permitido inferir los procesos metabólicos relevantes mediante un análisis genómico de los organismos involucrados. Ejemplos de esto es el estudio de *Geobacter sulfurreducens*, *Shewanella oneidensis* y *Desulfovibrio spp*, de los cuales se tiene un amplio conocimiento tanto fisiológico, bioquímico y genómico [Methé 2003, Serres 2006].

Numerosos estudios de ecología molecular han demostrado que los Geobacteraceae son uno de los grupos de microorganismos predominantes en el subsuelo y que juegan un papel importante en los procesos biogeoquímicos, además de que representan un raro ejemplo en la microbiología ambiental en la cual microorganismos que predominan en el ambiente pueden ser realmente cultivables en laboratorio. Los miembros de esta familia ofrecen una alternativa para la generación de electricidad a partir del catabolismo de compuestos orgánicos de desecho, gracias a la capacidad que tienen de acoplar la respiración anaeróbica a la reducción microbiana de metales [Bond 2002, Lovley 2006]. Esta característica los convierte en microorganismos muy útiles en procesos de biorremediación de acuíferos subterráneos contaminados por metales pesados, tales como uranio, tecnecio, vanadio y cromo [Anderson 2003].

Actualmente se cuenta con la secuencia del genoma de *G. sulfurreducens* y 10 miembros más de la familia Geobacteracea, lo cual, no sólo ha proporcionado datos acerca de su extraordinario metabolismo y estrategias de supervivencia, sino que ha significado un avance importante en la comprensión de mecanismos que estas bacterias emplea en los procesos metabólicos que participan en la reducción de metales y en la generación de electricidad.

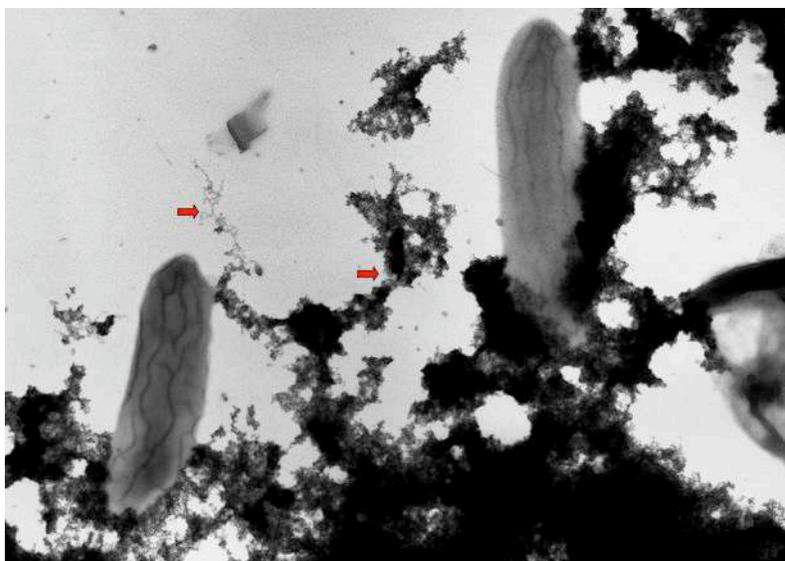


Figura 1. Células de *Geobacter sulfurreducens* crecidas con óxidos de Fe(III). Las flechas señalan los pili, los cuales, a menudo, se asocian con partículas de óxido de Fe(III) (precipitados negros)

Recientemente, se demostró que los pili de *G. sulfurreducens* tienen la capacidad de transferir electrones fuera de la célula a óxidos de Fe(III), Mn(IV) y a electrodos (Fig. 1). La producción de estos nanocables microbianos, así como la formación de una biopelícula podría tener aplicaciones en nanotecnología [Reguera 2005]. Esta característica que presentan de generar electricidad, ha sido explotada en celdas microbianas de combustible, las cuales son una alternativa de generación de energía sustentable en lugares remotos [Lovley 2006].

Por otro lado, también se han encontrado células metabólicamente activas en ambientes profundos y estos estudios revelaron que miembros de grupos como proteobacterias (de las familias delta y gamma, principalmente), así como firmicutes, actinobacterias y arqueas habitan en estos ambientes [Teske 2005, Webster 2006]. Muchos de los microorganismos descritos no tienen representantes cultivables en el laboratorio, por lo que actualmente se están desarrollando nuevas técnicas de cultivo e incluso técnicas como la hibridización fluorescente *in situ* o FISH por sus siglas en inglés, que permite localizar y estudiar organismos y sus interacciones. Además, mediante técnicas de RT-PCR (Reverse Transcriptase and Polymerase Chain Reaction) se puede saber que genes de los encontrados realmente se están expresando.

Cabe mencionar, que aunque se han logrado avances en el cultivo de organismos extremófilos, aun faltan de estudiarse la mayor parte de los organismos no cultivables. Es por esto que el desarrollo de técnicas que permiten la extracción del material genético (ADN y ARN) directamente de los ambientes donde habitan dichos microorganismos (metagenoma), sin necesidad de cultivarlos y la capacidad de expresar este material genético en huéspedes heterólogos cultivables, ha llamado la atención en el mundo y actualmente se destinan enormes cantidades de recursos al estudio de metagenomas de dichos ambientes [Liolios 2006, Abulencia 2006, Tyson 2004].

Por todo lo anteriormente descrito, resulta muy interesante el estudio de organismos del subsuelo profundo con capacidades posiblemente aun no descritas ni explotadas, que pudieran tener aplicaciones en energía, biorremediación, síntesis de nuevos compuestos con aplicaciones biotec-

nológicas, por citar sólo algunas. A fin de desarrollar esta línea de investigación planteamos la siguiente estrategia experimental:

- Aislamiento de microorganismos y clasificación, probando diferentes medios de cultivo, así como diferentes donadores y aceptores de electrones que permitan su estudio y caracterización en el laboratorio.
- Estudios *in situ* mediante la técnica de FISH (hibridización fluorescente *in situ*) para examinar comunidades bacterianas y sus interacciones.
- Recolección de muestras de sedimento y de roca para la extracción del material genético, el cual se empleará para la generación del metagenoma del subsuelo profundo, así como para identificar los organismos presentes mediante la amplificación del 16s DNA ribosomal, lo que permitirá saber que grupos de organismos habitan en el subsuelo y correlacionarlo con las capacidades metabólicas que muestren.
- Procesamiento y generación de bibliotecas genómicas mediante la inserción del material genético en vectores que permitan la expresión de los genes heterológamente y la selección de actividades enzimáticas relevantes y con potencial biotecnológico.
- Estudios de impacto ambiental y biorremediación de sitios de subsuelo.

Los organismos del subsuelo profundo generalmente son anaeróbicos estrictos, por lo cual será necesario dotar al Laboratorio de Microbiología con una cámara anaeróbica. Para el desarrollo de las investigaciones descritas, como parte del equipamiento de este laboratorio, también será necesario contar con: incubadoras de temperatura controlada, centrifugas, autoclave, cámaras de electroforesis, termocicladores para amplificar DNA y nucleadores para la toma de muestras.

Con los resultados obtenidos se espera contribuir al conocimiento básico de los organismos del subsuelo profundo así como evaluar su potencial en la resolución de problemas que impacten en la sociedad como podrían ser fuentes alternativas de energía renovable, biorremediación, nuevos compuestos derivados de microorganismos, entre otros.

7.5 DETECCIÓN DE RAYOS CÓSMICOS

En años pasados se han usado detectores subterráneos para estudios de rayos cósmicos, por ejemplo UA1 [Allkofer et al. 1981], ALEPH [Taylor et al. 1999, Grupen et al. 2003], L3 [Adriani et al. 2002, Coulter 2005], DELPHI [Abreu et al. 1996, Ridky y Travnicek 2005], CORAL [Avati et al. 2001] y, más recientemente, por el experimento ALICE [Carminati et al. 2004, Fernandez T., 2006], del LHC. En esta propuesta se discuten las principales ideas de un experimento que podría realizarse en las instalaciones del LSMM. Además se presentan los resultados de un prototipo del experimento propuesto, construido en 2002. Se propone instalar dos sistemas de detección de rayos cósmicos en la zona donde se construirá el LSMM. Uno de estos sistemas consiste de un conjunto de 48 cámaras de muones (*drift chambers*) colocadas en la caverna del LSMM. Dentro de la caverna, las cámaras se colocarán a diferentes alturas con la intención de reconstruir trazas tridimensionales. La posición final en la que se colocará cada una de las cámaras dependerá de la infraestructura en la caverna del LSMM. El segundo sistema de detectores será un conjunto de contadores de centelleo, localizados en la zona superficial del Laboratorio. Los centelladores cu-

brirán un área de 250 m², formando una malla rectangular, con una distancia de separación entre centelladores de 10m. Cada centellador tendrá un área efectiva de detección de 1m². Las mediciones simultáneas y complementarias de las componentes electromagnéticas (registrada por el conjunto de centelladores superficial) y muónica (detectada por las cámaras de alambre) del chubasco de partículas generado por rayos cósmicos con energías del orden de 10¹⁴ a poco más de 10¹⁶ eV, nos dará información sobre la localización del núcleo del chubasco y la energía primaria por dos métodos independientes. Este sistema de detección será un instrumento sensible a las fluctuaciones en la distribución "a carga neutra" de rayos cósmicos, tal como propone los modelos teóricos de condensados quirales desorientados (*disoriented chiral condensates*) y por observaciones de eventos Centauro y Anticentauro. También será capaz de determinar las especies de partículas primarias con una alta precisión en la región de la rodilla del espectro de rayos cósmicos.

Las cámaras de muones y los detectores de centelleo podrán construirse en los laboratorios y talleres existentes en las distintas instituciones mexicanas participantes en este proyecto, mientras que la caracterización y pruebas finales de funcionamiento se realizarían en los laboratorios del LSMM. Un aspecto importante dentro del programa en el experimento es la continuación del estudio de eventos de alta multiplicidad de muones previamente observados con los detectores ALEPH, DELPHI y ALICE, en el CERN. Los detectores subterráneos con muy buena resolución de trazas pueden proporcionar información sobre el tamaño, estructura y perfil radial en eventos de alta multiplicidad en muones. Además, podrá discriminar muones inducidos por chubascos originados en el tramo de roca entre la superficie y la caverna.

7.5.1 EXPERIMENTO PROTOTIPO

La propuesta científica CORAL planteó previamente un experimento similar a realizarse en las instalaciones del CERN. Con el fin de probar las ideas de CORAL, se llevó a cabo un experimento prototipo, en el que participó un grupo mexicano [Carminati et al. 2004], que se encargó del diseño y puesta en marcha del sistema de adquisición de los datos, así como de las pruebas de calibración de las cámaras de muones empleadas. A continuación se describen las principales actividades realizadas en esta prueba.

Cámaras tipo UA1

Las cámaras del tipo UA1 están compuestas de tubos de aluminio soldadas, denominadas celdas. La forma de cada celda es optimizada para obtener una longitud de arrastre máxima con una relación casi lineal entre la coordenada temporal y espacial. El diagrama del tubo esta dado en la Fig. 1, donde también se muestra una gráfica de las líneas de campo eléctrico y la fuerza de éste. La fuerza varía de 0.5 a 3 kV cm⁻¹ sobre todo el espacio de arrastre. Con tan sólo tres electrodos en cada lado, a -5 kV y -7 kV se puede lograr la correspondencia casi lineal en la relación espacio-tiempo a una distancia de 70 mm. Cerca del ánodo el campo eléctrico es radial a una distancia de 13-20 mm.

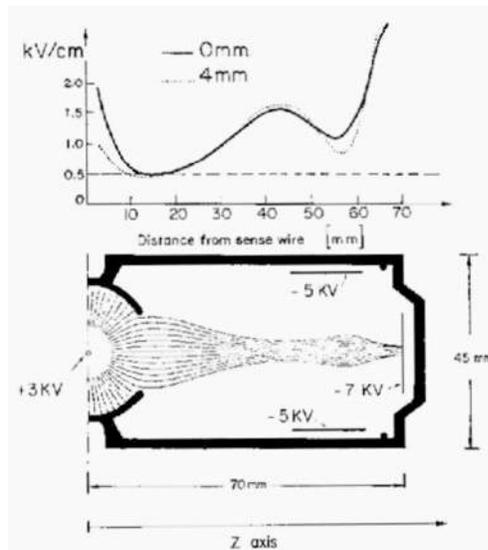


Figura 1. Flujo de líneas de campo eléctrico al ánodo y la fuerza del campo en 0 y 4 mm de distancia. Con solo tres electrodos en cada lado son suficientes para obtener un campo arriba de 0.5 kV cm^{-1} .

Cámaras Tipo DELPHI

El módulo de la cámara tipo DELPHI está conformada por siete celdas, formando dos planos, uno de tres y otro de cuatro celdas. Cada celda está formada por un tubo de aluminio soldado de 20.8 cm de ancho por 2.6 cm de alto, con un solo alambre como ánodo en el centro. Tiene dos hojas de plástico pegadas en la parte interna del lado ancho donde están colocados varios alambres de cobre, los que producen el campo eléctrico en la cámara. También tienen otro alambre que se emplea como línea de retraso temporal (delay line) abajo del ánodo, el cual proporciona mediciones de longitud con un retraso de 1.8 ns/cm . De acuerdo con la Fig. 2 se ve que la sección de arrastre es de 20 cm por 1.6 cm.

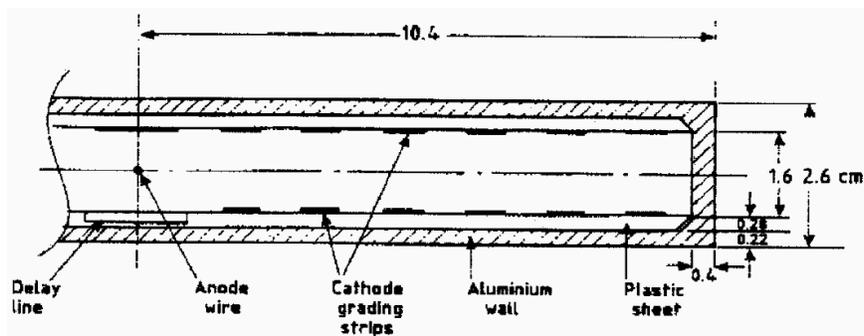


Figura 2. Sección transversal de un tubo de arrastre de la cámara tipo DELPHI.

Prototipo del detector CORAL

Se instaló un prototipo del detector CORAL en la parte subterránea del área de UA2 (BA4) en CERN, a una profundidad de 50 m, utilizando cámaras de muones empleados en los experimentos de UA1 y DELPHI, ambos detectores son cámaras de arrastre multiplacas con “espacio de arrastre” de 7.5cm (UA1) y 10cm (DELPHI).

Como se dijo anteriormente, se hizo énfasis en los siguientes puntos:

- Operatividad con gas no inflamable, las cámaras usaron un gas inflamable en los experimentos anteriores, Hoy en día, esta prohibido emplear este tipo de gas en áreas subterráneas, por lo que habría que encontrar una mezcla tal forma que obtuviese una buena eficiencia en las cámaras y esta mezcla sea no inflamable.
- Conocer la densidad máxima del muón que puedan ser reconstruidas en las cámaras.
- Eliminar cascadas electromagnéticas producidas en el sitio de detección, por lo que podría ser necesario colocar un medio absorbente entre las cámaras para poder distinguir mechones de muones de chubascos electromagnéticos producidos en el tramo de aire entre techo de la caverna y nuestro detector.

La figura 3 muestra una fotografía del prototipo en el área de UA2. Cuatro cámaras de muones (4m \times 6m) están localizadas una encima de la otra con una precisión de 0.5 mm. Estas cámaras están compuestas de tubos de aluminio individuales los cuales son pegados para formar una cámara rígida y robusta conformada con cuatro planchas, dos por proyección. Dos planos adyacentes de tubos ayudan a resolver la ambigüedad inherente de izquierda-derecha en las cámaras.



Figura 3. La última versión del diseño experimental en el área de UA2.

Además de las cámaras que se mencionó anteriormente, se utilizaron dos módulos de cámaras tipo "doble plano" usados en el experimento DELPHI, éstas fueron montados arriba del arreglo

anterior. La información que nos proporcionan estas cámaras es la posición de los registros, en dirección transversal, que se obtiene por medio del tiempo de arrastre y a lo largo del ánodo, por medio de la diferencia de tiempos entre los dos extremos del alambre (ánodo).

Para tener suficiente información acerca del absorbente, se hicieron dos tipos de arreglos experimentales, la diferencia consistió en, la colocación del absorbente y la distribución de los contadores, que en este caso fueron plásticos centelladores.

Todo el arreglo en su conjunto, fue disparado por contadores localizados entre las cámaras. Estos contadores consisten en plásticos centelladores de dos medidas, tres de 4 m x 0.3 m (PC1) y tres de 1 m x 0.52 m (PC2).

Para el primer arreglo experimental, los PC1 fueron colocados de la siguiente manera: uno en la parte superior, encima de la cámara, otro en medio de las cuatro y el último en el suelo, abajo del arreglo de cámaras; los otros tres, los PC2 se colocaron dos en la parte superior, paralelos a PC1 y el tercero arriba de la primera cámara contando de abajo hacia arriba.

Para el segundo arreglo, una vez que fue colocado el absorbente (10 cm de acero), quedaron de la siguiente manera, los PC1: uno junto al arreglo de las cámaras, paralelo al lado de 4 m de UA1 y otros en otro plano, en la parte del techo del detector (ver Figura 4), y los últimos tres, PC2 quedaron dentro del arreglo de las cámaras UA1, uno en la parte superior otro encima de la tercer cámara y el último encima de la primer cámara.

Además de las cámaras que se mencionó anteriormente, se utilizaron dos módulos de cámaras tipo "doble plano" usados en el experimento DELPHI, éstas fueron montados arriba del arreglo anterior. La información que nos proporcionan estas cámaras es la posición de los registros, en dirección transversal, que se obtiene por medio del tiempo de arrastre y a lo largo del ánodo, por medio de la diferencia de tiempos entre los dos extremos del alambre (ánodo).

Para tener suficiente información acerca del absorbente, se hicieron dos tipos de arreglos experimentales, la diferencia consistió en, la colocación del absorbente y la distribución de los contadores, que en este caso fueron plásticos centelladores.

Todo el arreglo en su conjunto, fue disparado por contadores localizados entre las cámaras. Estos contadores consisten en plásticos centelladores de dos medidas, tres de 4 m x 0.3 m (PC1) y tres de 1 m x 0.52 m (PC2).

Para el primer arreglo experimental, los PC1 fueron colocados de la siguiente manera: uno en la parte superior, encima de la cámara, otro en medio de las cuatro y el último en el suelo, abajo del arreglo de cámaras; los otros tres, los PC2 se colocaron dos en la parte superior, paralelos a PC1 y el tercero arriba de la primera cámara contando de abajo hacia arriba.

Para el segundo arreglo, una vez que fue colocado el absorbente (10 cm de acero), quedaron de la siguiente manera, los PC1: uno junto al arreglo de las cámaras, paralelo al lado de 4 m de UA1 y otros en otro plano, en la parte del techo del detector (ver Figura 4), y los últimos tres, PC2 quedaron dentro del arreglo de las cámaras UA1, uno en la parte superior otro encima de la tercer cámara y el último encima de la primer cámara.



Figura 4. Los contadores están localizados en los rectángulos, el contador indicado con el rectángulo de arriba se localiza en el interior del cuarto, paralelo a los demás.

El absorbente fue colocado entre las cuatro cámaras, en la mitad del arreglo, usando el disparo con los contadores tal como se indicó en el segundo arreglo. El tiempo de arrastre fue grabado y digitalizado con una jaula Fastbus junto con módulos TDC's (Time-to-Digital Converter) Lecroy modelo 1877, este es un módulo de alta resolución multi-registro diseñado para experimentos con elevado número de canales, también proporciona mediciones precisas de tiempo para espectrómetros y demás. Esto es, que tienen una capacidad múltiple de registro, 16 registros por alambre o canal. Posteriormente los datos registrados por el Fastbus eran almacenados y visualizados (Event Display) en una computadora con un software de adquisición de datos denominado MIDAS (Maximum Integrated Data Acquisition System). De esta forma se registraron y se grabaron datos conteniendo eventos con una alta multiplicidad de muones, así como también chubascos electromagnéticos inducidos en la caverna.

7.5.2 RESULTADOS

De acuerdo al diseño experimental, se realizaron corridas para obtener una mezcla de las óptima y de esta forma lograr la mayor eficiencia posible de las cámaras, por lo que se realizaron tomas de datos con varios porcentajes en la mezcla. Las mezclas conteniendo únicamente argón y CO_2 no fueron buenas. Cualquier zona de saturación (plateau) de eficiencia con esta mezcla fue bajo ($95\% \text{ Ar} - 5\% \text{ CO}_2$) o en su defecto la conversión tiempo de arrastre-distancia no fue lineal ($80\% \text{ Ar} 20\% \text{ CO}_2$). Conforme se siguió corriendo el experimento, se pensó en agregar CH_4 y entonces se pudo conseguir una eficiencia muy buena. Así, la mezcla quedó de la siguiente forma $90\% \text{ Ar}$, $5\% \text{ CO}_2$ y $5\% \text{ CH}_4$. Para esta mezcla de gas, la zona de saturación de la eficiencia está dada en la Fig. 5a y la eficiencia dependiente de la distancia de arrastre en 5b. Los registros residuales como función del tiempo de arrastre son mostrados en 5c y la resolución final del registro de las cámaras UA1 después de la calibración están en 5d.

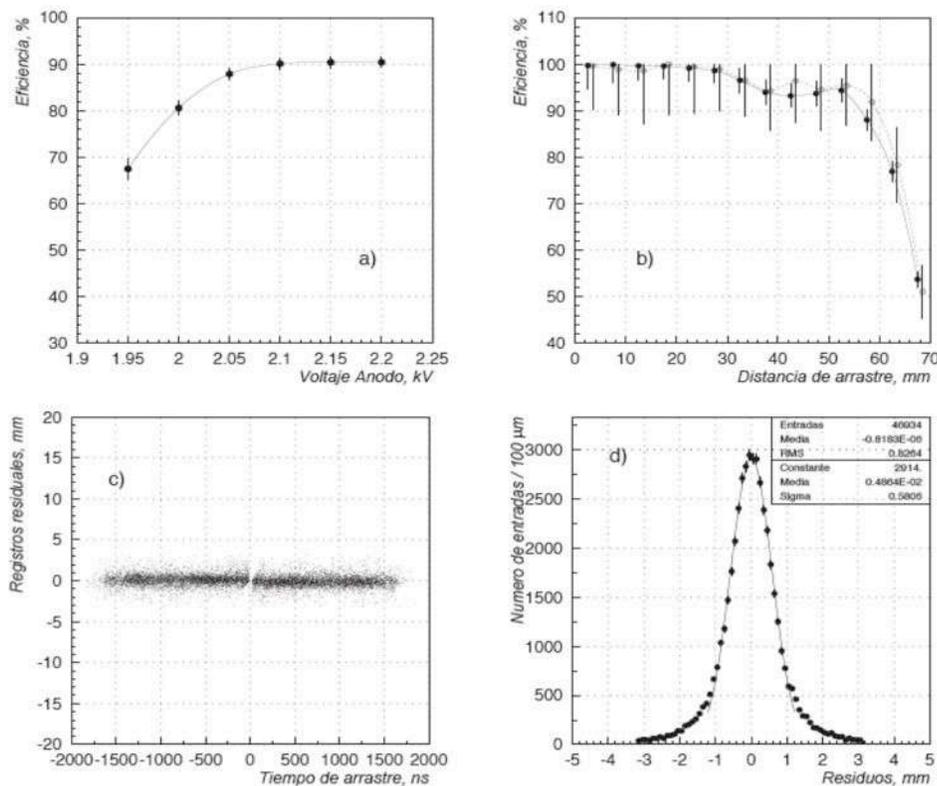


Figura 5. Calibración de las cámaras UA1: a) eficiencia de la cámara como función del voltaje en el ánodo para la mezcla de gas Ar:CO₂:CH₄ 90:5:5; b) eficiencia de la cámara como función de la distancia de arrastre para la misma mezcla de gas y con voltaje del ánodo de 2.1 kV. Los círculos negros son para trazas con ángulos incidentes de $-15^\circ < \alpha < 15^\circ$, los círculos para $15^\circ < |\alpha| < 30^\circ$; c) residuos de registros contra tiempo de arrastre de la señal; d) distribución de residuos de registro.

Las gráficas correspondientes para las cámaras DELPHI son mostradas en Fig. 6, junto con la distribución adicional residual a través del alambre lineal de retraso temporal. La resolución espacial de UA1 y DELPHI están dadas en la tabla 1. Al principio se tomaron datos de un solo muón, es decir, como se tenía el disparo dentro de las cámaras. El mismo disparo eran parte de lo que se registraba, esto se usó para encontrar condiciones óptimas para la corrida de las cámaras. Sin embargo, en los últimos meses de operación se instaló un disparo multimuón, es decir, se colocaron algunos centelladores fuera del arreglo de las cámaras. Con este disparo se grabaron cerca de 2.4×10^6 eventos durante un tiempo efectivo de 3.7×10^6 seg. Además de los eventos multimuones, también tenemos los chubascos inducidos por la parte con aire entre el techo de la caverna y las cámaras los cuales pueden verse como eventos de muones con alta multiplicidad. Sin embargo, estos eventos serían fácilmente eliminados durante la revisión debido a su topología. En contraste a los eventos de multimuones en los cuales los registros están casi isotrópicamente distribuidos sobre la cámara entera, los chubascos están más concentrados sobre un área pequeña.

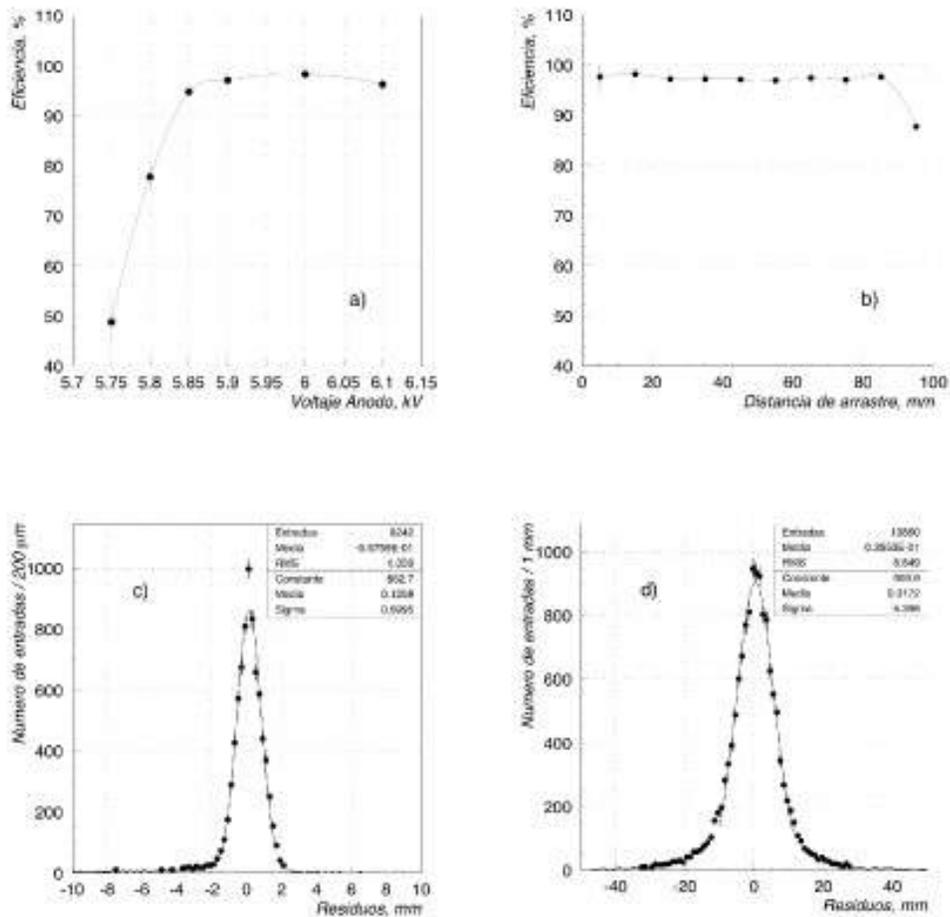


Figura 6. Calibración de las cámaras DELPHI: a) eficiencia de la cámara como función del voltaje en el ánodo para la mezcla de gas Ar:CO₂:CH₄ 90:5:5; b) eficiencia de la cámara como función de la distancia de arrastre para la misma mezcla de gas y con voltaje del ánodo de 6 kV; c) distribución de residuos de registros a través de la dirección de arrastre; d) distribución de residuos de registros para la lectura longitudinal con línea de retraso temporal.

La Fig. 7 ilustra la topología del registro de un evento multimuón. La inambigüedad y la topología del evento independiente del criterio puede ser aplicado si las cámaras de arriba son desacopladas con las de abajo por un absorbente (acero). Para llevar a cabo este estudio, se colocó planchas de acero, hasta completar un espesor de 10 cm. Para muones inducidos del chubasco electromagnético el absorbente redujo la densidad de registros por un factor de 3 sobre el promedio, dejando sin influencia la densidad de registros para multimuones. También nuevos chubascos fueron creados por interacciones de muones con el absorbente con una probabilidad de 1% (Fig. 6). Los resultados experimentales mencionados fueron confirmados con detalle con simulaciones de GEANT. Los chubascos inducidos pueden ser identificados comparando la densidad de registros arriba y abajo del absorbente.

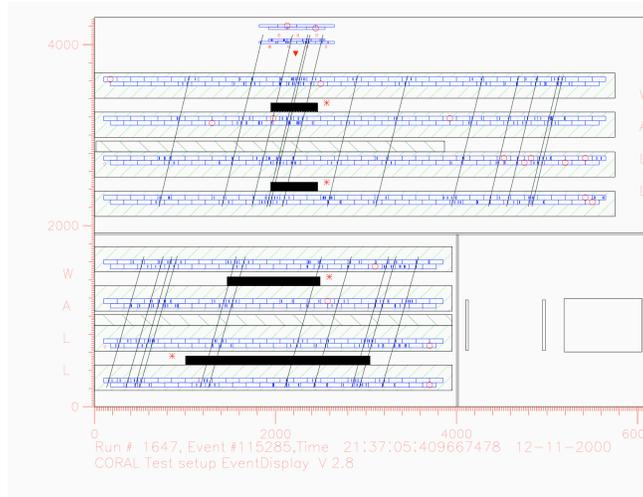


Figura7. Un evento multimujón mostrado en las dos proyecciones de las cámaras de 6m x 4m.

Detector				
Condición	$ \alpha < 15^\circ$	$15^\circ < \alpha < 30^\circ$	anodos	Línea de retraso
RMS de distribución residual	0.81 mm	0.84 mm	0.79 mm	8.4 mm

Tabla 1. Resolución de las cámaras de arrastre (α es el ángulo de la traza con respecto a la dirección vertical)

7.5.3 RECONSTRUCCIÓN DE EVENTOS MULTIMUONES

Localizar o reconstruir las trazas en eventos de mul-timujones fue todo un reto, para lograrlo se ha desarrollado un algoritmo basado en el método de filtro Kalman. Todas las posibles trazas candidatas con $\pm 50^\circ$ de la vertical son agrupadas usando algunos de los dos registros de los diferentes planos. Las trazas candidatas son entonces prolongadas a través de los otros planos y los registros son rechazados si $\chi^2 > 10$ considerando un error de medición de 1 mm. Las trazas candidatas son aceptadas si tienen al menos 5 registros de las posibles 8 y al menos un registro en cada cámara. Esto produce una eficiencia en la reconstrucción de las trazas de $\sim 95\%$ para una eficiencia de la cámara de 90%.

Después de que todas las trazas candidatas han sido encontradas, ellas son usadas para encontrar la dirección más probable para el "mechón" de muones. Un factor de calidad en la traza es entonces calculado basado en el número de registro en la traza candidata, el ajuste de χ^2 de la traza y su desviación de la dirección más probable. Las trazas candidatas son entonces ordenadas de acuerdo a la calidad, la mejor traza es aceptada y sus registros son substraídos de aquellos de las otras candidatas. La calidad de las otras trazas son entonces recalculadas y el procedimiento es repetido hasta que todas las trazas candidatas han sido examinadas. Las trazas aceptadas son usadas para refinar la estimación de la dirección más probable del "mechón" y el procedimiento es repetido, con el requisito adicional de que los candidatos estén dentro de 0.5° de la dirección más probable. Este corte remueve una significativa fracción de trazas falsas como está indicado en

las Figs. 8 y 9; la habilidad para encontrar el ángulo es también ilustrado en la Fig. 9, donde las multiplicidades de las trazas son mostradas para diferentes ángulos.

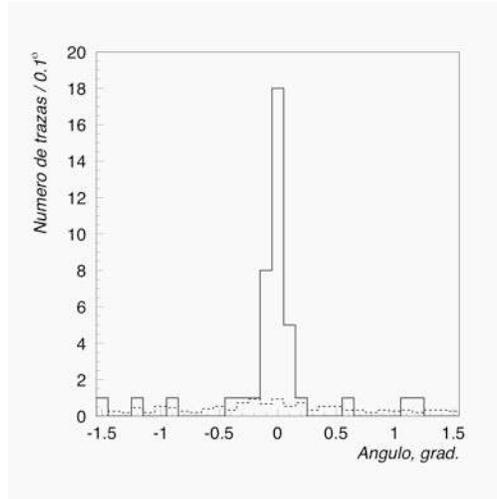


Figura 8. Distribución de ángulos de trazas reconstruidas centradas en cero para un evento con multiplicidad de aproximadamente 35. línea-ángulo correcto, línea punteada-promedio de varios ángulos incorrectos.

La resolución limitada de doble registro puede también reducir la eficiencia de la traza, particularmente en eventos de alta multiplicidad. Esto puede ser estudiado alterando el error de medición considerado en el código de traza y puede ser direccionado a alguna magnitud por "relajación juiciosa" del criterio de la aceptación de la traza. En particular, después de la primera iteración el criterio de aceptación fue reducido, permitiendo algunas cámaras ausentes y entonces repetir los algoritmos de las trazas sobre los registros restantes, usando la dirección de la traza de la primera iteración. El impacto de la segunda iteración es ilustrada en la Fig. 10. La Fig. 11 ilustra el número medio de registros por traza después de la primera y segunda iteración y el número medio de registros por traza no asociada con unade ella.

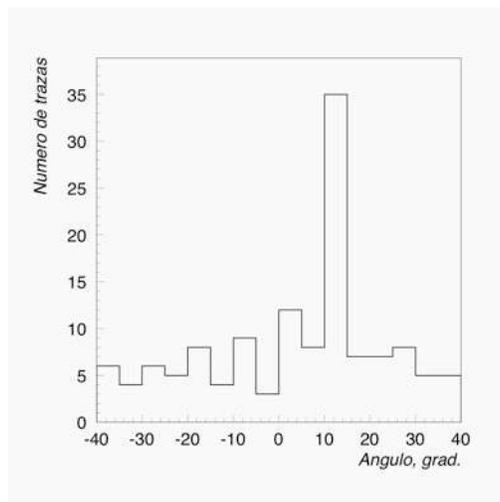


Figura 9. Multiplicidad de trazas vs. ángulo después de un corte angular de $\pm 0.5^\circ$.

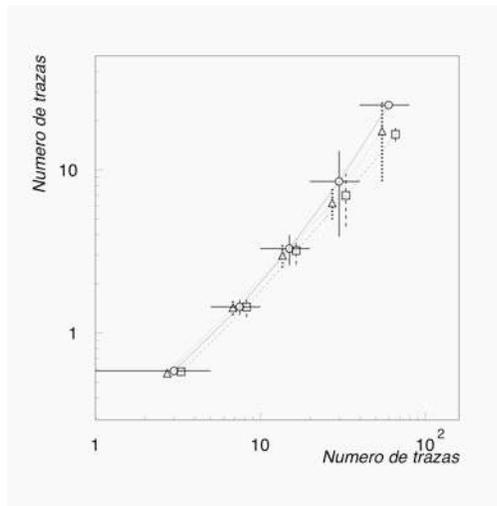


Figura 10. Número de trazas reconstruidas en la segunda iteración contra la primera. Los círculos son para mediciones con error de 1 mm, los cuadrados para 1.5 mm y los triángulos para 2 mm.

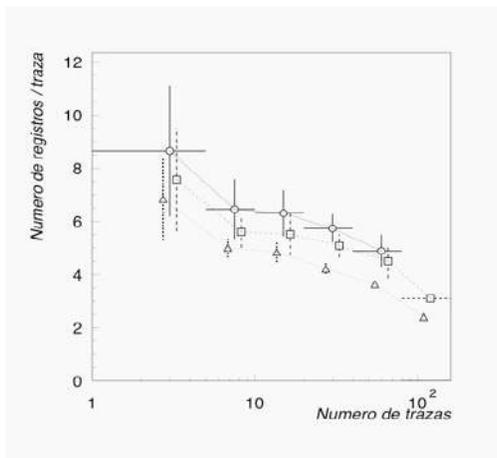
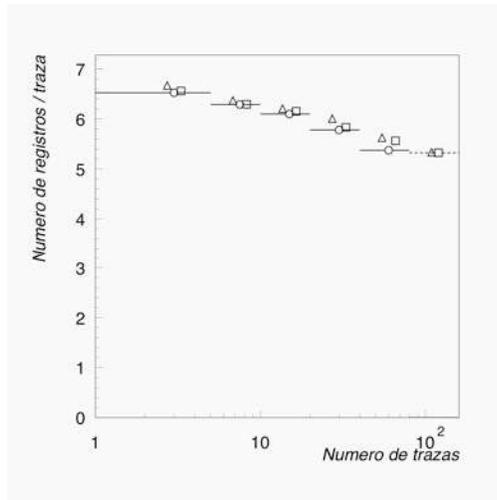


Figura 11. Número de registros usados (izquierda) y sin usar (derecha) por traza después de la primera y segunda iteración. La notación es igual al de la Fig. 10.

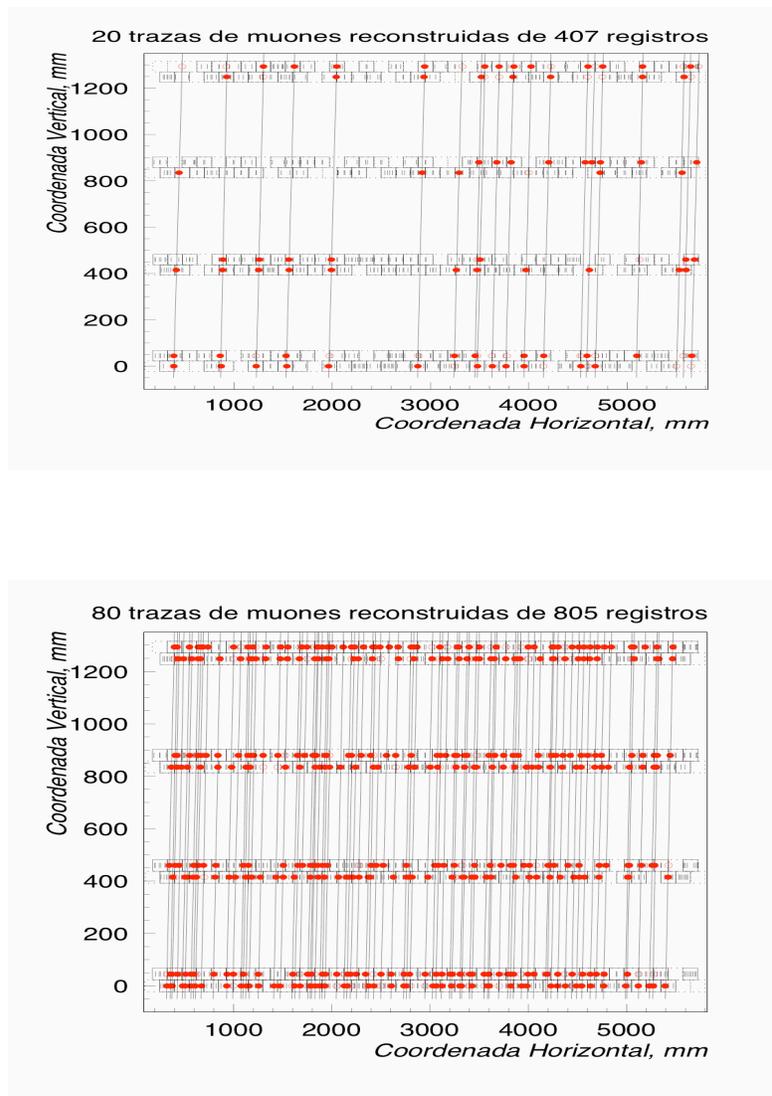


Figura 12. El evento con la más alta multiplicidad registrado con una multiplicidad total de 100 trazas. Arriba: trazas reconstruidas después de la primera iteración. Abajo: trazas adicionales después de la segunda iteración.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se pudo encontrar una mezcla de gas no inflamable que dió muy buena eficiencia en las cámaras, tal como lo muestra la figura 12. Durante la operación del primer prototipo, sin el absorbente, teníamos datos con chubascos electromagnéticos inducidos dentro de las cámaras, los cuales dificultaban la reconstrucción de trazas. Estos eventos pudieron ser filtrados colocando como absorbente una plancha de acero de 10 cm de espesor. Al eliminar los eventos con chubascos inducidos y sólo considerando los eventos producidos por mechones de muones, se pudo conocer las trazas de éstos. Por último, se pudo conocer la densidad de los mechones de muones a la distancia en que se operó el prototipo (50 m), donde se pudo reconstruir hasta 100 trazas en algunos eventos. Con esta información se puede saber cuantos módulos de cámaras de arrastre se podrían emplear a una profundidad igual o mayor que 1,000 m. Se debe de considerar que con un arreglo de este tipo, conociendo el momento del muón con que llega a cierta profundidad y la densidad de trazas de mechones de muones, se puede conocer la

naturaleza de la partícula primaria dentro del intervalo de energías que se propone investigar en este proyecto, correspondiente a $\sim 10^{14}$ - 10^{17} eV

7.6 SECCIONES EFICACES DE REACCIONES NUCLEARES INDUCIDAS POR IONES LIGEROS

El objetivo científico de esta propuesta es la de medir secciones eficaces de reacción inducidas por iones ligeros a muy bajas energías, comparables a la ventana de Gamow dado su interés astrofísico, ya que corresponden a las energías a las que ocurren en estrellas masivas de segunda generación, en procesos tanto de equilibrio como explosivos [Rolfs 1985].

Nuestro grupo tiene experiencia en este tipo de medidas, en laboratorios de superficie. Notablemente hemos medido el sistema $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ extendiendo las medidas existentes previamente a energías relativas tan bajas que las secciones eficaces medidas eran de decenas de picobarns, estableciendo un récord mundial [Barrón Palos 2006].

Las condiciones experimentales requeridas son muy especiales y aquí mencionaremos las 4 más importantes:

1. Muy bajos niveles de conteo de fondo.

En la Fig. 1 se muestra, como ejemplo, la comparación entre, a la izquierda, el fondo de gamas medido a nivel de superficie con un detector de Germanio hiper-puro blindado con 10 cm de Plomo y, a la derecha, el mismo detector dentro del pozo sísmico de la UNAM, sin blindar. Ambos espectros tomados durante el mismo tiempo. El espectro de la izquierda tiene una forma monótona como función de la energía, reminiscente de la dependencia exponencial con la energía de los rayos cósmicos, mientras que el de la derecha muestra los picos característicos de las líneas de emisión de los elementos radioactivos naturalmente presentes en el ambiente. Es fácil resaltar que la contribución de los rayos cósmicos no se elimina con blindaje a nivel de superficie, pero se suprime significativamente bajo algo más de 20 m de roca volcánica (unos 50 m de agua equivalente), mientras que la radiación de origen terrestre si es suprimida por blindaje común.

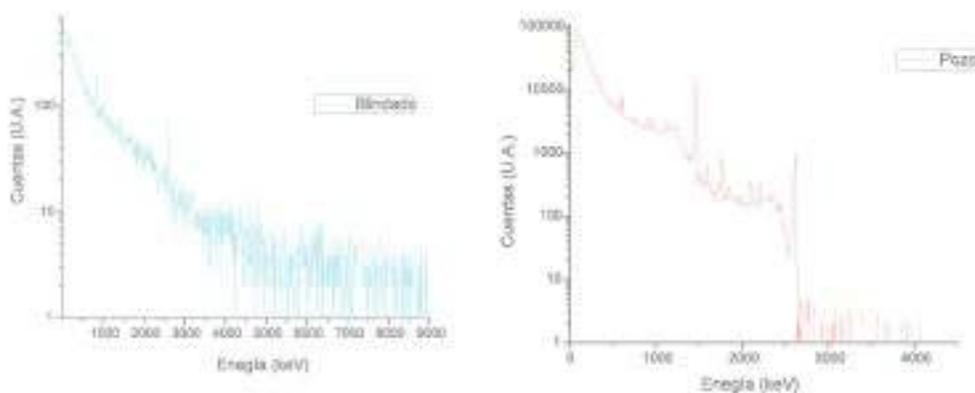


Figura 1. Fondo de gamas medido con un detector de Germanio hiper-puro: i) a nivel de la superficie y blindado con 10 cm de Pb (izquierda), ii) dentro del pozo sísmico de la UNAM y sin blindar (derecha).

Este tipo de efecto ya ha sido reportado anteriormente y en [Heusser 1995] se ofrece una revisión completa acerca de experimentos con bajas tasas de conteo. Allise muestra la siguiente figura, cualitativamente similar a nuestra medida, en la que se reportan reducciones de fondo, combinando un grueso blindaje con la detección bajo 500 m de agua equivalente, de hasta 6 órdenes de magnitud.

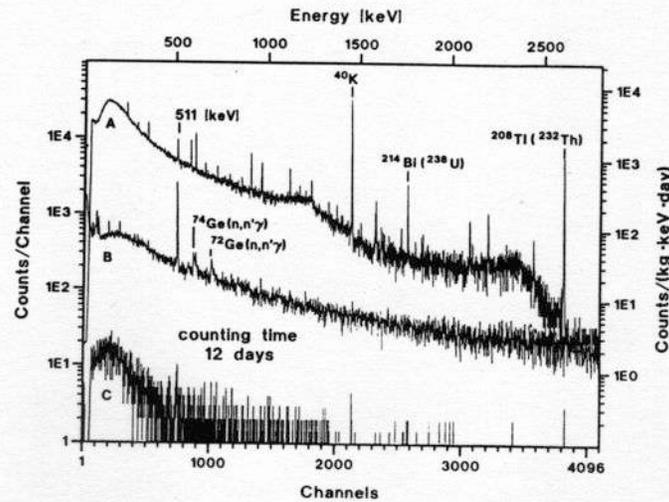


Figura. 2. Espectro de fondo de un detector de Ge (0.5 kg. de volumen activo) sin blindaje (arriba), con 15 cm de blindaje de Pb (medio) y con el mismo blindaje, a aproximadamente 500 m.w.e (abajo).

2. Haces intensos de partículas.

Experimentos en donde las tasas de conteo caen por debajo de 1 cuenta por minuto, requieren importantes medidas de seguridad y robustez. Nada debe fallar durante largo tiempo y la identificación de los eventos indeseados (tasa de rechazo) debe ser muy redundante. Además, la estadística necesaria para reducir las barras de error estadístico al orden del uno por ciento, toman una semana por punto. La medida de secciones eficaces del orden e inferiores al nanobarn, como se plantea aquí, es un ejemplo típico. En nuestros experimentos de $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$, con intensidades de haz del orden de $10 \mu\text{A}$ (unos 10^{13} núcleos de ^{12}C por segundo), obtuvimos unas cuantas decenas de cuentas válidas por hora en los puntos de menor sección, con barras de error mucho mayores. La tasa de conteo puede incrementarse simplemente aumentando en número de proyectiles por segundo (son proporcionales) y existe la tecnología para producir haces al menos dos órdenes de magnitud mayor.

3. Sustancias puras para los blancos.

En la Fig. 3 se muestra, de manera dramática, hasta que punto la presencia de partes por millón de hidrógeno (agua) en el blanco de grafito (*carbón puro*) que utilizamos en [Barrón Palos 2006], puede afectar tan decididamente un experimento como para convertirse en el factor limitante. En la parte baja de la figura se señalan los dos picos de la derecha como los fotopicos correspondientes a los gamas procedentes de reacciones de ^{12}C en isótopos de hidrógeno. Como consecuencia, el espectro íntegro, a la izquierda de dichos picos, queda inundado con el Compton correspondiente, haciendo la identificación de los eventos válidos, prácticamente imposible. Es

indispensable entonces trabajar con sustancias de alta pureza, incluso isotópicamente enriquecidas, lo que incrementa su costo. A título de ejemplo: 250 g de plomo isotópicamente enriquecido (mejor que el 95%) en el isótopo 208, valen 250,000 dólares.

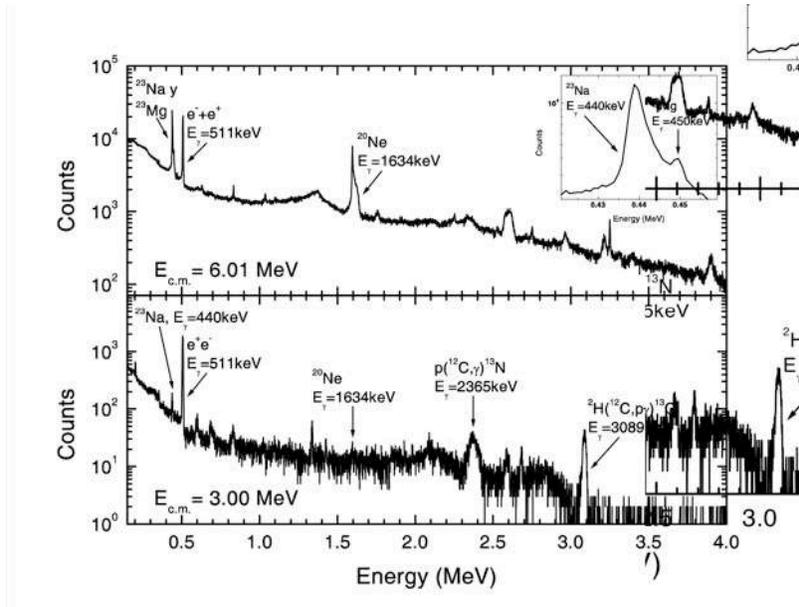


Figura 3. Espectros de los rayos gama producidos en la reacción $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ a dos energías diferentes. Arriba, a 6 MeV (c.m.) la sección de fusión es grande (milibarns) y la presencia del contaminante de agua es prácticamente indistinguible. Abajo, a 3 MeV (c.m.) la sección de fusión ha caído 6 órdenes de magnitud y la contribución de los gamas provenientes de las reacciones $^{12}\text{C} + ^1\text{H}$ y $^{12}\text{C} + ^2\text{H}$ es ahora dominante.

4. Sistemas de detección.

Estos experimentos sólo son practicables si se cuenta con los sistemas de detección, electrónica, cómputo, adquisición de datos, etcétera, adecuados. En un laboratorio típico, la inversión en equipos periféricos es varias veces mayor que la asociada al acelerador, el corazón del laboratorio.

Como se describe en la sección de astrofísica nuclear del Cap. 3, el antecedente más notable de este tipo de laboratorios es LUNA, en funcionamiento en las instalaciones subterráneas del laboratorio italiano de Gran Sasso. En dicha sección se hace referencia a varias mediciones de secciones transversales de interés astrofísico que han sido llevadas a cabo, más de las veces de manera única, en ese laboratorio. En particular, la correspondiente a la reacción $^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$ [Arpella et al. 1996, Bonetti et al. 1999] es una medida ya clásica, de hace más de 12 años, que aún no ha podido repetirse, ni mucho menos mejorar. Incidentalmente, debido a su unicidad, la verificación de tales mediciones, es una de las preocupaciones de la comunidad, así como la realización de otras que son de gran interés para el entendimiento de los procesos estelares. Por dar un ejemplo, podemos mencionar el estudio de las reacciones que toman parte en la quema de He, incluyendo $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ que es crucial en la evolución de progenitores de supernovas tipo II, y para lo cual se requieren energías más altas que las disponibles en LUNA (400 kV). Además, nuevos aceleradores, disponibles comercialmente, proporcionarán haces con intensidades uno o dos órdenes más

elevadas. El campo ofrece amplias posibilidades y, debido a las dificultades inherentes a las mediciones, se ha mantenido relativamente virgen.

Para llevar adelante la idea aquí planteada, proponemos montar, en las instalaciones subterráneas del LSMM, un acelerador electrostático de 500-700 MV, con una fuente de iones, sistema de inyección, imán selector y una línea de vacío con cámara de reacción. Dicho acelerador producirá partículas ligeras (Hidrógeno y Helio principalmente) de bajas energías (hasta aproximadamente 0.5 MeV para protones), pero de alta corriente (haces de intensidad del orden del miliampere). Comercialmente, se puede adquirir el acelerador por aproximadamente 800 mil dólares y el aparato completo, con todo el equipo periférico (cámaras de reacción, detectores de gamas con supresión Compton, blindajes, sistemas de adquisición, etcétera), se puede instalar en un tiempo relativamente corto (un año), con una inversión total de alrededor de dos millones de dólares. Si se opta por diseñar y construir el acelerador, lo que reviste un interés tecnológico adicional, el proyecto tomaría más tiempo en arrancar, pero su costo se reduciría y se obtendrían mayores beneficios.

8. BÚSQUEDA Y CARACTERIZACIÓN DE SITIOS

Realización de estudios de sitio conducentes a la identificación del lugar más adecuado para el emplazamiento del laboratorio subterráneo propuesto, y que comprenderán relevamientos geológicos, mediciones de radiación natural de fondo, impacto ambiental e integración social; estos estudios darán prioridad al aprovechamiento de las minas ya existentes. Una de las tareas fundamentales en la planeación del Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano (LSMM) consiste en la búsqueda y caracterización de sitios potenciales que puedan emplazar adecuadamente el complejo de dispositivos, experimentos, laboratorios e instalaciones previstas para dicho laboratorio. A fin de alcanzar este cometido, ha sido necesario considerar, además de los requisitos físicos esenciales para un exitoso desarrollo de los experimentos medulares de este proyecto, un conjunto de características en el plano logístico que garanticen la factibilidad del desarrollo y mantenimiento de un complejo de instalaciones científicas de gran magnitud.

En el presente apartado se despliegan las diferentes etapas que, de acuerdo con una secuencia lógica de proceder, se han seguido para seleccionar los emplazamientos potenciales para el LSMM, los cuales, ulteriormente, se describen en detalle. De este modo se busca presentar los criterios seguidos para establecer los sitios candidato y así justificar su selección. Adicionalmente, se examina el posible impacto ambiental que implicaría la implementación del LSMM, bajo una perspectiva del impacto propio de la minería subterránea.

8.1 OBJETIVOS

El *objetivo general* del cometido de la búsqueda de sitios es seleccionar varios lugares en los que se factible, con un elevado grado de confiabilidad y concurrentemente: (a) que se instalen y desarrollen con éxito los experimentos científicos (físicos, biológicos y de ciencias de la Tierra, principalmente) propios de un laboratorio subterráneo de gran profundidad, (b) que aloje un complejo de superficie con capacidad para albergar científicos visitantes, para ser sede de convenciones y reuniones, para desarrollar experimentos complementarios respecto a los de profundidad, así como detectores, equipos analíticos, laboratorios y talleres de apoyo para éstos, y (c) que permita mantener todas las instalaciones mencionadas y proporcionarles los servicios básicos, al menos durante el tiempo mínimo necesario para que el LSMM produzca resultados científicos de impacto internacional.

Por otra parte, los *objetivos particulares* de la búsqueda de sitios son los que se señalan a continuación:

- a) Definir los requerimientos físicos y logísticos necesarios para el emplazamiento exitoso del LSMM.
- b) Contactar con empresas mineras y definir una estrategia de cooperación con las mismas para el desarrollo del LSMM, que eventualmente permita obtener apoyos adicionales (especial-

- mente de tipo logístico) así como desarrollar investigaciones (p.e, en yacimientos minerales, geoquímica ambiental e ingeniería de minas) atractivas también para dichas empresas.
- c) Establecer un listado de sitios candidatos.
 - d) Proponer estudios para la caracterización de sitio, basados principalmente en métodos y conocimientos propios de la geología, la geofísica y las ingenierías.
 - e) Proponer una infraestructura específica para el Laboratorio de Superficie cuya finalidad principal sea servir de apoyo para los estudios de sitio propuestos.
 - f) Fortalecer el carácter multidisciplinario del proyecto, con la concurrencia de investigaciones en diversas disciplinas Ciencias de la Tierra (p.e., metalogenia, geología estructural, petrología, geoquímica, geotecnia, ingeniería de minas) que sean de utilidad para la implementación y desarrollo del LSMM, y que a su vez se enriquezcan con esta actividad.

8.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN DE SITIOS CANDIDATOS

Los criterios que se han seguido para seleccionar sitios candidatos para el LSMM se basan en un conjunto de requisitos mínimos que, a efectos prácticos, se ha dividido en dos categorías: (a) requisitos físicos, y (b) requisitos logísticos.

8.2.1 REQUISITOS FÍSICOS

Dentro de esta categoría se han considerado aquellos requerimientos a ser satisfechos por el emplazamiento del LSMM que dependen fundamentalmente de la naturaleza del lugar y que condicionan la factibilidad de los experimentos proyectados.

Profundidad

La profundidad en la que debería emplazarse el LSMM es el más importante criterio a tener en cuenta para la selección de sitio. Así, la profundidad del emplazamiento condiciona la factibilidad del LSMM, el conjunto de experimentos que se pueden desarrollar exitosamente en él, así como la competitividad a nivel internacional del LSMM respecto a otras instalaciones subterráneas de su misma naturaleza.

Las rocas de la corteza terrestre actúan a modo de barrera para buena parte de las partículas que se generan en la atmósfera por interacción entre los gases de ésta y la radiación solar y cósmica. Dichas partículas son esencialmente muones. Precisamente, para evitar el efecto de éstos sobre los experimentos planeados en laboratorios como el LSMM, es necesario el blindaje proporcionado por una espesa columna de rocas.

A estos efectos, la profundidad se suele expresar en metros equivalentes de agua (m.w.e., por sus siglas en inglés). Las mediciones realizadas en diversos dispositivos subterráneos de todo el mundo señalan que a partir de unos 1,000 mwe disminuye bruscamente la intensidad de muones. Es por ello que los laboratorios subterráneos actualmente activos se emplazan a profundidades mayores a ~1,000 (Fig. 1). La mayor profundidad a la que se emplaza un laboratorio subterráneo es de ~7,000, y corresponde a las minas de Kolar (India). Obviamente, el límite de profundidad está condicionado por la dificultad tecnológica del desarrollo de minas subterráneas muy profundas.

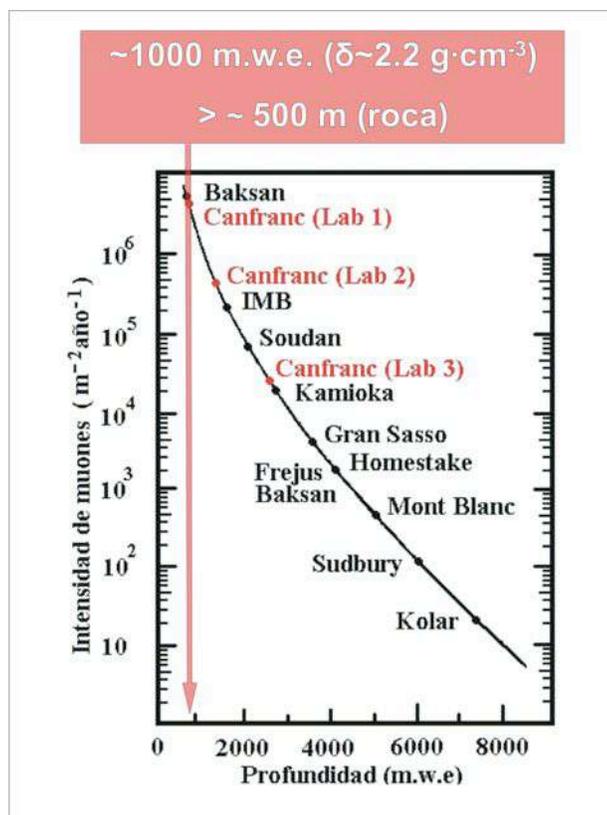


Figura 1. Distribución de los principales laboratorios subterráneos respecto a la profundidad expresada en m.w.e. Modificado de <http://www.unizar.es/lfnae/>. El punto azul corresponde a la posible ubicación del LSMM.

La densidad de las rocas más abundantes de la corteza terrestre suele oscilar entre 2.2 y 3.0 $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ (Tab. 1). Por ello, considerando una densidad mínima de $\sim 2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, la profundidad mínima para garantizar la conveniencia y efectividad de un laboratorio subterráneo es de alrededor de 500 m (Fig. 1). Sin embargo, con el objetivo de que el LSMM sea competitivo en relación a otras instalaciones de la misma naturaleza, se ha priorizado la búsqueda de emplazamientos con profundidades cercanas a los 1000 m.

Roca	Densidad ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
Andesita	2.5 - 2.8
Basalto	2.8 - 3.0
Riolita	2.4 - 2.6
Granito	2.6 - 2.7
Dolomita	2.8 - 2.9
Caliza	2.3 - 2.7
Esquisto	2.5 - 2.9
Pizarra	2.4 - 2.8
Cuarcita	2.6 - 2.8
Halita	2.5 - 2.6
Arenisca	2.2 - 2.8
Mínimo	2.2
Máximo	3.0

Tabla 1. Densidad (en $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$) de algunas de las rocas más comunes de la corteza terrestre.

Para determinar la profundidad efectiva para un hipotético emplazamiento del LSMM debe ser considerado el relieve situado por encima del mismo. Así, la profundidad efectiva se estimará como una suma entre la profundidad desde la bocamina más la elevación topográfica del relieve situado sobre la vertical del emplazamiento respecto a la bocamina (Fig. 1.2). El hecho de considerar profundidades efectivas teniendo en cuenta el relieve, amplía significativamente el abanico de posibles emplazamientos para el LSMM. Con todo, los posibles emplazamientos en México se restringen a minas subterráneas, al no haber en el país infraestructuras como túneles ferroviarios o carreteros suficientemente profundos.

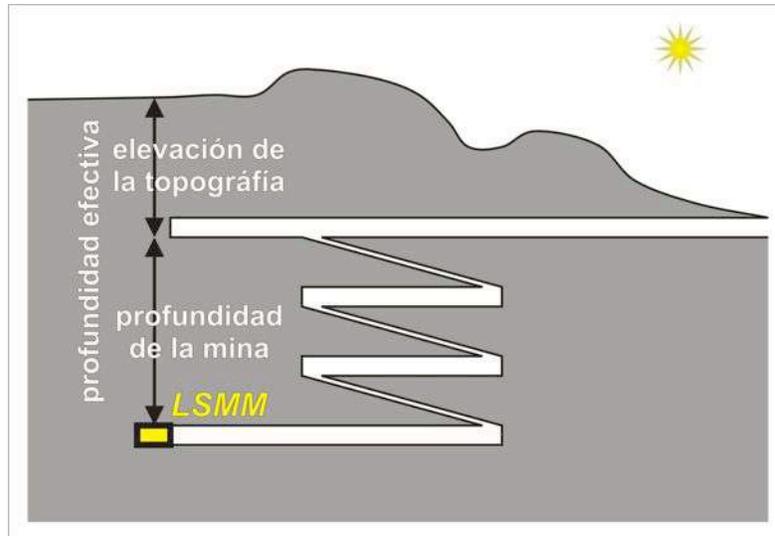


Figura. 2 Profundidad efectiva para un hipotético emplazamiento del LSMM.

Radiactividad Natural

La radiactividad natural de las rocas que encierren un laboratorio subterráneo puede ser un factor perjudicial para los experimentos que en él se desarrollen, especialmente cuando ésta sea anómalamente elevada. Por ello, antes de decidir el emplazamiento definitivo del LSMM se deberá realizar un minucioso estudio de la radiactividad natural.

Existen diferentes métodos y técnicas para medir la dosis ambiental en un determinado lugar. Uno de ellos es la espectroscopía gama que consiste en medir directamente la cantidad de esta radiación que incide sobre un detector produciendo ionización y con ello determinar la concentración de los radioisótopos presentes en el medio. La medición se lleva a cabo, en un tiempo breve (1 hora) colocando *in situ* un equipo de espectrometría gama portátil, el cual cuenta con un detector de NaI. El equipo detecta la cantidad de las emisiones gamas y sus energías, permitiendo identificar el radioisótopo emisor (^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K) y su concentración. A partir de esta última, se podrá calcular su contribución en dosis en un intervalo de tiempo. Otro método, en este caso indirecto, es la dosimetría termoluminiscente, que se basa en el principio de la interacción de las radiaciones sobre la estructura de un sólido, produciendo cierto tipo de efectos en la estructura. La cantidad de dichos efectos es proporcional a la cantidad de dosis recibida. Los dosímetros termoluminiscentes se dejan en el sitio por un periodo de 4 meses, al cabo de los cuales, son llevados a un equipo lector de termoluminiscencia donde se evalúa la dosis de radiación recibida.

La radiactividad en las rocas de la corteza terrestre se debe, en buen parte, a los isótopos radiogénicos ^{238}U , ^{232}Th y ^{40}K . Por ello, la variación en las concentraciones de potasio, uranio y torio en las rocas es la causa de que éstas muestren una amplia variabilidad en valores de radiactividad (Tab. 2).

	Uranio		Torio		Potasio	
	ppm	mBq/g (pCi/g)	ppm	mBq/g (pCi/g)	ppm	mBq/g (pCi/g)
Granito	4.7	63 (1.7)	2	8 (0.22)	4.0	1184 (32)
Arenisca	0.45	6 (0.2)	1.7	7 (0.19)	1.4	414 (11.2)

Tabla 2. Radiactividad de un granito y una arenisca en relación con el contenido en U, Th y K (<http://www.physics.isu.edu/radinf/natural.htm>).

La concentración en uranio y torio en las rocas varía enormemente. En el caso de las rocas magmáticas, esta variación responde al hecho de que ambos elementos se comportan como incompatibles, lo que ocasiona que se concentren en los magmas más evolucionados y/o residuales. Por ello, las rocas como granitos, pegmatitas graníticas y riolitas, deben ser evitadas para el emplazamiento del LSM (Tab. 1.3).

En rocas sedimentarias, la concentración en uranio depende fundamentalmente de las condiciones Eh que prevalecieron en el ambiente de sedimentación. Así, en ambientes euxínicos las condiciones reductoras hacen que el U^{VI} (soluble) se reduzca a la forma U^{IV} , la cual es altamente insoluble y se deposita en los sedimentos como uraninita (UO_2). En consecuencia, las pizarras negras y su protolito, las biopelitas, también deben ser evitadas.

Asimismo, algunos yacimientos minerales están muy enriquecidos en uranio, hasta el punto que éste puede ser motivo de explotación, por ejemplo, en las vetas de uranio “intragraníticas” o clásicas, en los depósitos de uranio en lechos rojos (*red beds*), y en las brechas de P-Cu-Au-Ag-U o depósitos tipo “Olympic Dam”. En otras tipologías, el uranio está enriquecido pero no lo suficiente como para ser considerado un mineral de mena, por ejemplo, en las vetas de cinco elementos (Ag-Ni-Co-As \pm Bi,U), o en los depósitos de fluorita, en los que el U es un penalizante para el aprovechamiento de ésta como mineral industrial.

Roca	U (ppm)
Granito alterado	63
Pizarra negra	48.8
Granito	11.3
Riolita	8.88
Granodiorita	4.69
Esquisto	3.1
Pelita	2.63
Arenisca	2.1
Caliza	1.75
Andesita	1.18
Dolomía	0.858
Basalto	0.18
Yeso	0.1

Tabla 3. Variación en el contenido en uranio (en partes por millón) en diferentes rocas comercializadas como estándares de laboratorio (<http://www-naweb.iaea.org>).

Humedad y temperatura

La humedad y la temperatura representan serios problemas técnicos para las minas subterráneas, al punto de que, en algunos casos, limitan la viabilidad de las explotaciones más profundas. Hay que considerar, además, que las condiciones de temperatura y humedad podrían influir negativamente en la ejecución de algunos experimentos, y que estas no deben sobrepasar un límite tolerable para el trabajo de operarios y científicos.

Las minas subterráneas se desarrollan normalmente por debajo del nivel freático, por lo que tienden a inundarse naturalmente. Para evitar el anegamiento de pozos y galerías, las minas cuentan con sistemas de bombeo que, en ocasiones, suponen un enorme gasto energético. Por ejemplo, en las minas de Pachuca-Real del Monte (Hidalgo), el drenaje de agua ocasiona un gasto de alrededor de 150 pesos por minuto, y el agua bombeada se utiliza para el abastecimiento público de la ciudad de Pachuca. Para mantener operativa la mina de Naica (Chihuahua), es necesario bombear unos 50,000 l de agua por minuto. Sin embargo, algunas minas son relativamente secas, normalmente debido que se sitúan en regiones áridas, o en zonas con relieves abruptos (con fuertes pendientes), en las que el agua discurre preferentemente como escorrentía superficial.

La temperatura que alcance de manera natural un emplazamiento subterráneo dependerá del gradiente geotérmico local. En zonas continentales sin actividad magmática reciente, el gradiente promedio es de $\sim 30 \text{ }^\circ\text{CKm}^{-1}$ (normalmente, varía entre 10 y $60 \text{ }^\circ\text{CKm}^{-1}$). El valor promedio es suficientemente alto como para imposibilitar la actividad humana a profundidades de 1000 m.

La ventilación, consecuentemente, es esencial en toda operación minera subterránea, tanto para refrigerar, en el caso de minas con un elevado gradiente geotérmico, como para oxigenar el ambiente y diluir con aire limpio los gases tóxicos (*grisú*, en las minas de carbón).

En conclusión, una mina “seca y fría” podría ser aprovechada óptimamente por el LSMM, incluso después de su eventual abandono.

8.2.2 REQUERIMIENTOS LOGÍSTICOS

Actividad de la Mina

El mantenimiento de las instalaciones subterráneas del LSMM y de las condiciones ambientales adecuadas para su operatividad, requerirá un conjunto de servicios que incluye, entre otros: ventilación, drenaje, electricidad, obras subterráneas, seguridad y transporte. En el caso de que el LSMM se instalara en una mina activa o no abandonada, dichos servicios podrían ser prestados, en parte o en su totalidad, por la empresa minera, a cambio de una contraprestación correspondiente que se establecería con el proyecto (Anexo 2). Así, se abaratarían enormemente los costos de arranque y mantenimiento del LSMM.

Las desventajas de instalar el LSMM en una mina en operaciones son, básicamente, las vibraciones, el ruido y el polvo, y, eventualmente, las huelgas y motines. Los problemas físicos derivados de la actividad extractiva (vibraciones, ruido y polvo) son tolerables si se toman las precauciones adecuadas para la construcción del LSMM. De esta suerte, algunos de los laboratorios subterráneos de mayor relevancia a nivel mundial se ubican en minas activas, por ejemplo, el Sudbury Neutrino Observatory, en Ontario, Canadá.

Tipo de Acceso

En la construcción del LSMM se requerirá desplazar hasta el emplazamiento subterráneo equipos y componentes voluminosos y muy pesados. Consecuentemente, es necesario que la mina disponga de accesos “horizontales” (rampas de acceso en espiral), por los que puedan acceder vehículos pesados, por lo que se descarta instalar el LSMM en minas cuyo acceso se efectúe exclusivamente a través de malacates y tiros verticales.

Cavidades Disponibles

El sitio que físicamente aloje las instalaciones subterráneas del LSMM deberá ser suficientemente grande como para contener varios laboratorios y experimentos que implican un gran volumen. Es poco probable que el emplazamiento ideal en una mina subterránea cumpla con este requisito. Sin embargo, como se ha mencionado anteriormente, en el caso de que el LSMM se ubicara en una mina activa, la empresa concesionaria podría fácilmente adecuar el lugar, a cambio de una contraprestación, mediante el uso de maquinaria especializada.

8.3 CONTACTOS Y ACUERDOS CON EMPRESAS MINERAS

Teniendo en cuenta lo expuesto en el anterior apartado, y admitiendo que el emplazamiento más factible para el LSMM sería una mina activa, se ha establecido contacto con diversas empresas mineras que operan en México. Tres empresas respondieron favorablemente a la propuesta del LSMM: (a) Real del Monte y Pachuca, S.A. de C.V., (b) Grupo México, S.A. de C.V., y (c) Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V. Ésta última ha proporcionado una carta de intenciones que se adjunta en el Anexo 2. Anteriormente, el 8 de febrero del 2007, el Ing. Jaimé Lomelín Guillén, Director General de Peñoles, ya expresó en público su interés en participar con el proyecto.

8.4 SITIOS CANDIDATOS

Varios sitios dentro del territorio nacional ya han sido reconocidos como potenciales emplazamientos del LSMM, debido a que reúnen los requisitos expuestos en apartados anteriores. Esta tarea ha sido emprendida por equipos de trabajo compuestos por los participantes en esta propuesta, los cuales han contado con el apoyo y asesoría del personal local. Hasta la fecha se han reconocido un total de seis minas: San Martín y Sabinas (Sombrerete, Zacatecas), Proaño (Fresnillo, Zacatecas), Pachuca-Real del Monte (Hidalgo), y La Sirena y Las Torres (Guanajuato, Gto.).

Considerando el apoyo logístico brindado por la empresa Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V., el Nivel 490 de las minas La Sirena-Las Torres (Guanajuato) es el sitio candidato que presenta mayores posibilidades y ventajas para albergar con éxito el LSMM.

El yacimiento es de tipo epitermal (p.e. [Gemmell 1988, Simmons 1991, Camprubí 2006]), y las rocas encajonantes consisten en un basamento mayoritariamente sedimentario a metasedimentario (conglomerados y, más escasos, depósitos de lutitas y areniscas) y una cobertera de rocas volcánicas continentales intermedias a ácidas vinculadas a la formación de la Sierra madre Occidental (De Cserna, 1976). En relación a la formación de estas últimas se originaron los procesos hidrotermales que generaron las vetas epitermales (p.e. [Camprubí 2006]).

Debido a la presencia de rocas ígneas básicas (riolitas) en el techo de la mineralización, habrá que ser especialmente cauto en la selección del emplazamiento del LSMM y, para ello, deberá realizarse *a priori* un estudio detallado de radiactividad natural.

Cabe destacar, asimismo, que la Ciudad de Guanajuato reúne condiciones logísticas y de servicios óptimos para alojar un complejo de investigación de la envergadura, impacto y resonancia internacional como el LSMM. Además, la tradición universitaria y minera del lugar son idóneas para la proyección social del LSMM. Así, éste podría recibir y, eventualmente contratar, estudiantes, técnicos e investigadores de la zona.

8.5 IMPACTO AMBIENTAL

Debido a que el emplazamiento más factible para el LSMM una mina subterránea, es necesario considerar cuál es el impacto derivado de la actividad extractiva sobre el entorno, para estimar el impacto propio originado por la instalación de dicho laboratorio.

8.5.1 IMPACTO AMBIENTAL DE LA MINERÍA

La extracción de materias primas minerales conlleva efectos negativos sobre el medio ambiente. Las operaciones mineras pueden alterar el paisaje, cambiar la estructura del subsuelo y dispersar contaminantes –incluyendo sustancias tóxicas– hacia el aire, el agua y el suelo.

El proceso utilizado para producir concentrados de minerales metálicos puede contribuir a la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas. Algunas sustancias químicas como el mercurio, el cianuro de sodio, ácidos y otras soluciones, son utilizadas para separar el mineral concentrado de los minerales metálicos. Los jales, residuos generados como resultado de la concentración de mineral y depositados como detritos, a menudo pueden contener estos químicos y de esta manera contribuir a la contaminación de los acuíferos cercanos y aguas superficiales. Además, los sulfuros no aprovechados (principalmente pirita) pueden generar acidez y liberar elementos potencialmente contaminantes (p.e., As, Sb, Cd, Pb), alterando la calidad de las aguas. Asimismo, los terreros, que acumulan las rocas que por su baja ley no son procesadas, pueden presentar una problemática similar a la de los jales.

Los jales quedan expuestos a los efectos del intemperismo y de la alteración por contacto con aguas superficiales y subterráneas. Como consecuencia de la interacción con el oxígeno atmosférico, se forman minerales secundarios supergénicos a partir de las menas primarias [Jambor 1994]. La formación de dichos minerales secundarios implica una oxidación sulfuros, y suele tener como consecuencia la generación de aguas ácidas, caracterizadas por valores de pH muy bajos y por contenidos muy elevados en metales pesados disueltos.

La formación de aguas ácidas de drenaje supone uno de los mayores riesgos ambientales asociados a la minería. La dispersión de metales tóxicos hacia las aguas subterráneas y superficiales, producida por aguas ácidas de drenaje no controladas, puede tener consecuencias indeseables sobre el medio ambiente y la salud humana.

La composición mineralógica “primaria”, propia de cada yacimiento, condiciona los procesos de oxidación [Rimstidt 1994]. En este sentido, existen minerales generadores de acidez, cuya oxidación libera H^+ , como la pirita y la marcasita, la pirrotita, la calcopirita y la arsenopirita, y minerales que no producen acidez, como la esfalerita y la galena [Dold 2002]. Además, existen

minerales que favorecen la neutralización de la acidez, principalmente los carbonatos de calcio, la siderita y los feldespatos.

8.5.2 IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO POR EL LSMM

La instalación del LSMM implica una mínima parte de las actividades que se realizan de forma rutinaria durante el funcionamiento de una mina subterránea. Además, es muy probable que el LSMM se emplace en una mina activa y, por lo tanto, en un entorno previa e intensamente alterado, que distará mucho de ser un ambiente natural que pudiera ser vulnerable a la operación del LSMM. Por ello, es de esperar que el impacto que se derive de la adecuación e implementación del LSMM no resulte significativo.

8.5.3 CONTRIBUCIONES A LA PREVENCIÓN Y REMEDIACIÓN DE RIESGOS AMBIENTALES

Dado su carácter multidisciplinario, el LSMM será un marco ideal para desarrollar investigaciones relacionadas con el impacto ambiental de la minería. Así, las instalaciones del Laboratorio de Superficie podrían brindar un valioso apoyo a estudios geoquímicos de residuos mineros, tanto en el distrito minero hospedane del LSMM como en otras zonas de la región.

El estudio mineralógico y geoquímico de los desechos mineros es una herramienta que permite detectar y evaluar el riesgo ambiental asociado a la formación de aguas ácidas de drenaje. Además, puede proporcionar criterios para establecer tratamientos de remediación del impacto ambiental, y para implantar medidas correctivas para minimizar efectos contaminantes predecibles.

8.6 ESTUDIOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SITIO

En la tabla 1.4 se presentan de manera esquemática algunos estudios propuestos para una adecuada caracterización del contexto del LSMM. Los resultados de dichos estudios deberán ser tenidos en cuenta para decidir el emplazamiento exacto del LSMM en la mina subterránea.

Estudio	Objeto de estudio	Metodología	Dependencia
Estructura del yacimiento	morfología, litología encajonante, estructuras	trabajo de campo, muestreo y cartografía	IGeof, CGeo, UNAM
Mineralogía del yacimiento	cuerpo mineralizado y alteraciones	petrografía, MEB, MSE, DRX, EIR	IGeof, CGeo, IGeol, UNAM
Modelo de depósito	cuerpo mineralizado, alteraciones y encajonante	inclusiones fluidas, geoquímica elemental e isotópica	IGeof, CGeo, UNAM
Radiactividad natural	encajonante y mineralización, minerales radiactivos	ICP-MS, termoluminiscencia, contador Geiger	IGeof, UNAM
Geoquímica ambiental	jales, terreros, cuerpo mineralizado, drenaje ácido y metales pesados	balance ácido-base, extracción, titulación, FRX, mediciones <i>in situ</i>	IGeof, IGeol, UNAM
	Mecánica de rocas	geotecnia, pruebas de laboratorio	IIng, UNAM

Tabla 1.4. Propuesta de estudios de caracterización de sitio para el emplazamiento del LSMM. *Técnicas*: DRX, difracción de rayos X; EIR, espectroscopia de infrarrojos; FRX, fluorescencia de rayos X; ICP-MS, espectrometría de masas con fuente de plasma acoplada inductivamente; MEB, microscopio electrónico de barrido; MSE, microsonda electrónica. *Dependencias*: CGeo, Centro de Geociencias; IGeof, Instituto de Geofísica; IGeol, Instituto de Geología; IIng, Instituto de Ingeniería.

Para facilitar el desarrollo de los estudios previos a la selección del emplazamiento y de otras investigaciones en Ciencias de la Tierra que pudieran desarrollarse *a posteriori*, se propone la creación de un Laboratorio de Geología en las instalaciones del Laboratorio de Superficie. La justificación, equipos y especificaciones de dicho laboratorio se detallan en el capítulo correspondiente al Laboratorio de Superficie.

8.7 CONCLUSIONES

El emplazamiento óptimo del LSMM es una mina activa con accesos horizontales (rampas), que alcance profundidades efectivas de ~1000 m, y en la que no abunden mineralizaciones de U.

Es de suma importancia contactar con empresas mineras y establecer una estrategia de cooperación con las mismas para el desarrollo del LSMM.

El Nivel 490 de las minas La Sirena - Las Torres (Guanajuato) reúne características físicas y logísticas que la hacen adecuada para emplazar al LSMM. La concesión de dicha mina la tiene la empresa Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V., la cual ha declarado su interés en apoyar el proyecto.

No se descartan otros posibles emplazamientos para el LSMM, principalmente, las minas de Fresnillo, Sabinas y San Martín (Zacatecas), y Pachuca-Real del Monte (Hidalgo).

Para determinar el emplazamiento óptimo del LSMM en una mina subterránea habrá que realizar estudios detallados de sitio, que incluyen mediciones de radiactividad natural, estudios geotécnicos y la caracterización del yacimiento mineral.

El impacto derivado de la adecuación e implementación del LSMM no es significativo y, dado el carácter multidisciplinario del LSMM, éste será un marco ideal para desarrollar investigaciones que contribuirán a la prevención y remediación de riesgos ambientales.

REFERENCIAS

- Aalseth, C. et al. 2004, Neutrinoless double beta decay and direct searches for neutrino mass, arXiv: hep-ph/0412300.
- Abe, K et al. (The Super-Kamiokande Collaboration) 2006, *Astrophys. J.* **652**, 198.
- Abazajian, K. et al. 2001, *Phys. Rev.* **D64**, 023501.
- Abazajian, K. y Kouhiappas, S. M. 2006, *Constraint on sterile neutrino dark matter*, arXiv:astro-ph/0605271.
- Abdurashitov, J. N. et al. 1999, *Phys. Rev.* **C60**, 055801.
- Abraham, J. et al. (The Pierre Auger Collaboration) 2007, *Science* **318**, 938.
- Abrams, D. 2002, *Phys. Rev.* **D66**, 122003.
- Abreu, P. et al. 1996, *Nucl. Instrum. Meth.* **A378**, 57.
- Abulencia, C. B. et al. 2006, *Environmental whole-genome amplification to access microbial populations in contaminated sediments*, *Appl. Environ. Microbiol.* **72**, 3291.
- Abusiadi, R. et al. (Colaboración CDMS) 2000, *Phys. Rev. Lett.* **84**, 5699.
- Adriani, O. et al. (Colaboración L3+C) 2002, *Nucl. Instr. Meth.* **A488**, 209.
- Agrawal, S. B. y M. Agrawal, Eds. 1999, *Environmental pollution and plant responses* (CRC Press).
- Agostinelli, S. et al. 2003, *GEANT4, A simulation toolkit*, *Nucl. Inst. Meth.* **A 506**, 250.
- Aharonian, F. et al. (Colaboración HESS) 2004, arXiv: astro-ph/0408145.
- Aharonian, F. et al. (Colaboración HESS) 2006, *Astrophys. J.* **636**, 777.
- Ahmad, Q.R et al. 2001, *Phys. Rev. Lett.* **87**, 071301.
- Ahmad, Q.R. et al. 2002, *Phys. Rev. Lett.* **89**, 011301.
- Ahmed, S. N. et al. 2004, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 181301.
- Ahn, M. H. et al. 2003, *Phys. Rev. Lett.* **90**, 041801.
- Ahrens, J. et al., *Astropart. Phys.* **20**, 507 (2004).
- Akerib, D.S. et al. 2005 (Colaboración CDMS), *Phys. Rev.* **D72**, 052009.
- Akerib, D.S. et al. 2006a (Colaboración CDMS), *Phys. Rev.* **D73**, 011102.
- Akerib, D. S. et al. 2006b (Colaboración CDMS), *The SuperCDMS proposal for dark matter detection*, *Nucl. Inst. Meth.* **A559**, 411
- Alekseev, E. N., Alekseeva, L. N., Volchenko y Krivosheina, I. V. 1987, *JETP Lett.* **45**, 589.
- Allkofer, O. C. et al. 1981, *The UAI detector as a possible cosmic ray device*, *Proc. 17th ICRC*, Vol. **10**, 401.

- Altman, M et al. 2005, Phys. Lett. **B616**, 414.
- Aliu, E. et al. 2005, Phys. Rev. Lett. **94**, 081802.
- Anchordoqui, L. A., Goldberg, H., Hooper, D., Sarkar, S. y Taylor, A. M. 2007, Phys.Rev.**D76**, 123008.
- Anderson, K. et al. 2004, *White paper report on using nuclear reactors to search for a value of theta(13)*, FERMILAB-PUB-04-180. e-Print: hep-ex/0402041
- Anderson, R., et al. 2003, *Stimulating the in situ activity of geobacter species to remove Uranium from the groundwater of a Uranium-contaminated aquifer*, Applied and Environmental Microbiology **69**, 5884.
- Angulo, C. y Descouvemont, P. 2001, Nucl. Phys. **A690**, 755.
- Anjos, J. C. 2006, *Angra Neutrino Project: status and plans*, Nucl. Phys. Proc. Supp. **B155**, 231.
- Appolonio, M. et al. 1999, Phys. Letts. **B466**, 415. (Colaboración CHOOZ).
- APS Neutrino Study: Report of the neutrino astrophysics and cosmology working group*, FERMILAB-PUB-04-443-A, astro-ph/0412544.
- Araki, T et al. 2005a, Phys. Rev. Lett. **94**, 081801.
- Araki, T. et al. 2005b, Nature **436**, 499.
- Arpesella, C. et al. 1996, *Measurements of the $^3\text{He}(^3\text{He},2p)^4\text{He}$ cross section within the solar gamow peak*, Phys. Lett. **B389**, 452.
- Asaka, T. et al. 2005, Phys. Lett. **B631**, 151.
- Ashie, Y. et al. 2005, Phys. Rev. **D71**, 112005. (Colaboración Superkamiokande)
- Athanassopoulos, C et al. 1996, Phys. Rev. Lett. **77**, 3082. (Colaboración LSND).
- Athanassopoulos, C. et al. 1998a, Phys. Rev. Lett. **81**, 1774. (Colaboración LSND).
- Athanassopoulos, C. et al. 1998b, Phys. Rev. **C58**, 2489. (Colaboración LSND).
- Avati, V. et al. 2001 (Colaboración CORAL), *CORAL: A Cosmic Ray experiment in and above the LHC tunnel*, CERN/2001-003 SPSC/P.
- Ave, M. et al. 2005, Astropart. Phys. **23**, 19.
- Avila-Reese, V. et al. 2001, Astrophys. J. **559**, 516.
- Avilez, C. et al.1981, *Earth as a source of antineutrino*, Physical Review **D23**, 1116.
- Bahcall, J. N. 1964, Phys. Rev. Lett. **12**, 300.
- Bahcall, J. N. 1989, *Neutrino Astrophysics* (Cambridge University Press, Cambridge, England,1989).
- Bahcall, J.N. 1994, Phys. Rev. D **49**, 3923.
- Bahcall, J. N. y Pinsonneault, M. H. 1995, Rev. Mod. Phys. **67**, 781.
- Barger, V., Marfatia, D. y Whisnant, K. 2002, Phys. Rev. **D65** 073023.
- Barkovich, M., D'Olivo, J. C. y Montemayor, R.2004, Phys.Rev.**D70**, 043005.

- Barrón Palos, L., Aguilera, E. F., Aspiazu, J., Huerta, A., Martínez Quiroz, E., Monroy, R., Moreno, E., Murillo, G., Ortiz, M. E., Policroniades, R., Varela, A. y Chávez, E. 2006, *Absolute cross sections measurement for the $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ system at the center of mass energy interval of 2.25 - 6.0 MeV*, Nucl. Phys. **A779**, 318.
- Battaglia, M. et al. 2003, arXiv: hep-ph/0306219.
- Bemmerer, D. et al. 2006, *Low energy measurement of the $^{14}\text{N}(p,g)^{15}\text{O}$ total cross section at the LUNA underground facility*, Nucl. Phys. **A779**, 297.
- Benetti, P. et al. 1993, Nucl. Instrum. Meth. **A327**, 203.
- Benoit, A. et al. 2001, Phys. Lett. **B513**, 15. (Colaboración EDELWEISS).
- Benoit, A. et al. 2001, Phys. Lett. **B545**, 43. (Colaboración EDELWEISS).
- Berezinsky, V.S. et al., Yad.Fiz. **11**, 200-205 (1970), Phys. Lett. **B48**, 269-272 (1974).
- Bergstrom, L. et al. 2001, Phys. Rev. **D63**, 083515.
- Bernabei, R. et al. 2000, Phys. Lett. **B480**, 23. (Colaboración DAMA).
- Bernabei, R. et al. 2003, Riv. N. Cim. **26**, 1. (Colaboración DAMA).
- Bernabeu, J. y Espinoza, C. 2007, *Physics potential of beta/EC beams in regard to CP violation in neutrino oscillations*, Proceedings of VI-Silfae/XII-MSPF, Puerto Vallarta, Mexico, Nov 2006. AIP Conf. Proc. **917**, 24.
- Bertone, G. et al. 2005, Phys. Rep. **405**, 279.
- Bezrukov, F. y Shaposhnikov, M. 2006, *Searching for dark matter sterile neutrino in laboratory*, arXiv: hep-ph/0611352.
- Biermann, P. L. y Kusenko, A. 2006, Phys. Rev. Lett. **96**, 091301.
- Bilenki, S. M et al. 1980, Phys. Lett. **B94**, 495.
- Bilenki, S. M. y Petcov, S.T. 1987, Rev. Mod. Phys. **59**, 671.
- Boger, J. et al. 2000, The Sudbury Neutrino Observatory, Nuc. Instrum. Meth. **A449**, 172. (Colaboración SNO)
- Bond, D. R., Holmes, D. E., Tender, L. M. y Lovley, D. R. 2002, *Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments*, Science **295**, 483.
- Bond, J. R. et al. 1980, Phys. Rev. Lett. **45**, 1980.
- Bonetti, R. et al. 1999, First measurement of the $^3\text{He}(^3\text{He},2p)^3\text{He}$ cross section down to the lower edge of the solar Gamow peak, Phys. Rev. Lett. **82**, 5205.
- Boyet, M. y Carlson, R. W 2005, Science, **309**, 576.
- Bruch et al. (Colaboración CDMS) 2007, *Status and future of the CDMS experiment: CDMS-II to SuperCDMS*, 13th International Symposium on Particles, Strings and Cosmology (PASCOS 07), London, England, Jul 2007. AIP Conf. Proc. **957**,193.

- Brunetti, R. et al. 2004, *WARP: A WIMP double phase argon detector*. Proceedings of the 5th International Workshop on the Identification of Dark Matter, Edinburgh, Scotland, United Kingdom, Sep. 2004. Publicado en Edinburgh 2004, The identification of dark matter, 348.
- Buchmüller, W. y Plümacher, M. 1998, Phys. Lett. **B431**,354.
- Buchmüller, W. et al. 2003, Nucl. Phys. **B665**, 445.
- Camprubí, A. y Albinson, T. 2006, *Depósitos epidermales en México: actualización de su conocimiento y reclasificación empírica*. Volumen Conmemorativo del Centenario, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana **58**, 27.
- Catanese, M., y Weekes, T., Astropart.Phys. **11**, 1-285 (1999).
- Carrillo-Moreno, S. y Vazquez-Valencia, E. F. 2006, AIP Conf. Proc. **857B**, 311.
- Carminati, F. et al. 2004, *ALICE Physics Performance Report, Vol I*, J. Phys. **G30**, 1517.
- Casella, C. et al. 2002a, *A new setup for the underground study of capture reactions*, Nuc. Instrum. Meth. **A489**, 160.
- Casella, C. et al. 2002b, *First measurement of the $d(p,g)^3\text{He}$ cross section down to the solar Gamow Peak*, Nucl. Phys. **A706**, 203.
- Chun, E. J. et al. 1992, Phys. Lett. **B287**, 123.
- Cifuentes, E., Blumenthal, U. J., Ruiz-Palacios, G., Bennett, S. y Peasey, A. 1994, *Escenario epidemiológico del uso agrícola del agua residual: el Valle del Mezquital*, México. SaludPúbl. Méx. **36**, 3.
- Cleveland, B. T. et al. 1998, Astrophys. J. **496**, 505.
- Clowe, D. et al, 2006, *A direct empirical proof of the existence of dark matter*, astro-ph/0608407.
- Cohen, A. G. et al. 1993, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **43**, 27.
- Confortola, F. et al. 2007, Astrophysical S-factor of the reaction $^3\text{He}(\alpha,\gamma)^7\text{Be}$ measured at low energy via prompt and delayed detection, Phys. Rev. **C75**, 065803.
- Covi, L. et al. 1998, Phys. Lett. **B384**, 169.
- Covi, L. et al. 1999, Phys. Rev. Lett. **82**, 4180.
- Dadykin, V.L. et al. 1987, JETP Lett. **45**, 593.
- Dasgupta-Schubert, N., Alexander, S., Sommer, L., Whelan, T., Alfaro, R., Mendez Lopez, M. E., Persans, M. W. 2007a, *The light quanta modulated physiological response of Brassicajuncea seedlings subjected to Ni(II) stress*, Eng. Life Sciences **7**, 259.
- Dasgupta-Schubert, N., Whelan, T., Reyes, M. A., Lloren, C., Brandt, T. T. y Persans, M. W. 2007b, *The light quanta modulated characteristics of Ni uptake by Brassicajuncea seedlings: the interdependence of plant metal concentration and biomass*, Int. J. Phytoremediation **9**. En prensa.
- Davis, R. 1964, Phys. Rev. Lett. **12**, 300.
- de Bernardis, P. et al. 2002, Astrophys. J. **564**, 559.

- de Gouvea, A. 2005, Phys. Rev. **D72**, 033005.
- de Meijer, R. J. et al. 2006, *Towards Earth antineutrino tomography (EARTH)*, Earth, Moon and Planets **99**, 193.
- De Cserna, Z. 1976, *Geology of the Fresnillo area, Zacatecas, Mexico*. Geological Society of America Bulletin **87**, 1191.
- De Rújula, A., Glashow, S. L., Wilson, R. R. y Charpak, G. 1983, Phys. Rept. **99**, 341.
- Diwan et al. 2003, Phys. Rev. **D68**, 012002.
- Dodelson, S. y Widrow, L. M. 1994, Phys. Rev. Lett. **72**, 17.
- Dodelson, S. 2003, *Modern Cosmology*, (Academic Press).
- Doi, M et al. 1981, Phys. Lett. **B102**, 323.
- Dold, B. 2002, *Basic concepts of environmental geochemistry of sulfide mine-waste*. XXI Curso Internacional de Postgrado en Metalogenia, Quito, Ecuador, p. 39.
- Dolgov, A. D. y Hansen, S. H. 2002, Astropart. Phys. **16**, 339.
- D'Olivo, J. C. y Miranda, O. 2006, *Neutrinos*, AIP Conf. Proc. **857B**, 37.
- DUSEL, <http://www.int.washington.edu/DUSEL>.
- EarthLab, http://www.geo-prose.com/projects/earthlab_rpt.html.
- Ebbs, S. D., Lasat, M. M., Brady, D. J., Cornish, J., Gordon, R., Kochian, L. V. 1997, *Heavy metals in the environment: phytoextraction of Cd and Zn from contaminated soil*, J. Env. Qual. **26**, 1424.
- Eder, G. 1966, *Terrestrial neutrinos*, Nuclear Physics **78**, 657
- Eguchi, K. et al. 2003, Phys. Rev. Lett. **90**, 1562. (KAMLAND Collaboration).
- Elliott, S. R. y Vogel, P. 2002; *Double beta decay*, Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. **52**, 115.
- Elliott, S. R. y Jonathan Engel, J. 2004, *Double beta decay*, J. Phys. **G30**, R183.
- Elliott, S. R. 2006, *Introduction to the double-beta decay experimental program*, Invited talk at 22nd International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Santa Fe, New Mexico, arXiv: nucl-ex/0609024.
- Ellis, J. et al. 2003, arXiv: hep-ph/0312262.
- Engelfried, J. 2006, AIP Conf. Proc. **857B**, 340.
- Enomoto, S. 2005, *Experimental study of geoneutrinos with KamLAND*, Neutrino Sciences 2005: Neutrino Geophysics, Honolulu, diciembre 2005. Publicado en Honolulu 2005, Neutrino geophysics 131.
- Etchegoyen, A. 2007 (Pierre Auger Collaboration), *AMIGA, Auger muons and infill for the ground array*, Proceedings of 30th ICRC, Mérida, México. En prensa.
- Farrar, G y Rosen, R. A. 2006, *A new force in the dark sector?*, astro-ph/0610298.
- Felix, J. 2006, AIP Conf. Proc. **857B**, 320.
- Fellhauer, M. et al. 2006, astro-ph/0605026.
- Fernandez T., A. 2006, *Cosmic ray studies at CERN*, AIP Conf. Proc. **857B**, 407.

- Fiorentini, G. et al. 2003, *Neutrinos and energetics of the Earth*, Physics Letters **B557**, 139, *KamLAND, terrestrial heat sources and neutrino oscillations*, Physics Letters **B558**, 15.
- Fiorentini, G., Lissia, M., Mantovani, F. y Ricci, B. 2006, *Perspectives for geo-neutrinos after KamLAND*, J. Phys. Conf. Ser. **39**, 257.
- Fiorucci, S. 2004, *Direct non-baryonic dark matter search -an experimental review-*, arXiv: astro-ph/0406285.
- Fodor, Z., Katz, S. D., Ringwald, A. y Tu, H. 2003, Phys. Lett. B561, 191.
- Formicola, A. et al. 2003, *The LUNA II 400 kV accelerator*, Nucl. Instrum. Meth. **A507**, 609.
- Fukuda, Y. et al. 1994, Phys. Lett. **B335**, 237.(Colaboración Kamiokande)
- Fukuda, Y et al. 1996, Phys. Rev. Lett. **77**, 1683.(Colaboración Kamiokande)
- Fukuda, Y. et al. 1998, Phys. Rev. Lett. **81**, 1562. (Colaboración Superkamiokande)
- Fukuda, Y. et al. 2000, Phys. Rev. Lett. **85**, 3999. (Colaboración Superkamiokande)
- Fukuda, S. et al. 2001, Phys. Rev. Lett. **86**, 5651. (Colaboración Superkamiokande)
- Fukuda, S. et al. 2003, *The Super-Kamiokande Detector*, Nucl. Instrum. Meth. **A501**, 418. (Colaboración Superkamiokande)
- Fukugita, M. y Yanagida, T. 1986, Phys. Lett. **B174**, 45.
- Fukugita, M. y Yanagida, T. 2003; *Physics of Neutrinos and Applications to Astrophysics* (Springer-Verlag).
- Gaidos, J.A. et al. 1996, Nature **383**, 319.
- Gaisser, T.K., Halzen, F. y Stanev, T. 1995, Phys. Rep. **258**, 173.
- Gell-Mann, M et al. 1979, en *Supergravity*, editado por P. van Nieuwenhuizen and D. Z. Freedman (Nort Holland).
- Gemmell, J.B., Simmons, S. F., Zantop, H. 1988, *The Santo Niño silver-lead-zinc vein, Fresnillo District, Zacatecas, Mexico: part I. Structure, vein stratigraphy, and mineralogy*. Economic Geology **83**, 1597.
- Giammarchi, M. G. y Miramonti, L. 2005, *Geoneutrinos in Borexino*, Neutrino Sciences 2005: Neutrino Geophysics, Honolulu, Hawaii, Dec 2005. Publicado en Honolulu 2005, Neutrino Geophysics, 207.
- Green, M, et al. 1987, *Superstring Theory* (Cambridge University Press).
- Grieb, C. et al. (Colaboración LENS), *Low energy neutrinos, neutrino luminosity of the Sun & LENS.NOW 2006*, Otranto, Lecce, Italia, Sep. 2006.Nucl.Phys.Proc.Suppl.**B168**:122.
- Grupen, C. et al. 2003, Nucl. Instrum. Meth. **A 510**. 190.
- Gugliotta, G. 2007, *Mining for dark matter*, revista Discover, May 15.
- Gyurky, Gy. et al. 2007, ${}^3\text{He}(a,g){}^7\text{Be}$ cross section at low energies, Phys. Rev. **C75**, 035805.
- Hagelin, J. S. et al. 1984, Nucl. Phys. **B241**, 638.
- Halzen, F. y Hooper, D.W., Astrophys. J. **527**, L93 (1999).

- Halzen, F. y Hooper, D.W., Rep. Prog. Phys. **65**, 1025 (2002).
- Hampel, W. et al. 1999, Phys. Lett. **B447**, 127.
- Haskins, P. S., McKisson, J. E., Chakravarty, N.(ahora Dasgupta-Schubert) y Patterson, J. I. H. 1998, *Background suppression with the PGT duode detector*, Proceedings 6th Nondestructive Assay Waste Characterization Conference, Salt Lake City, nov. 1998, CONF-981105, pág. 229-242P.
- Herrera-Corral G. y Paic, G. 2006, *The Mexican participation in the ALICE experiment*, AIP Conf. Proc. **857B**, 300.
- Heusser, G. 1995, *Low-Radioactivity background Techniques*, Ann Rev. Nucl. Part. Sci., **45**, 543.
- Hill, C. T. y Schramm, D. N. 1985, Phys. Rev. **D31**, 564.
- Hinshaw, G. et al 2008, *Five-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Data Processing, Sky Maps, and Basic Results*, arXiv:0803.0732 [astro-ph] (Colaboración WMAP). <http://map.gsfc.nasa.gov>.
- Hirata, K. S. et al. 1992, Phys. Lett. **B280**, 146. (Colaboración Kamiokande).
- Hirsch, M. et al. 1994, Z. Phys. **A347**, 151.
- Hofmeister, A. M. et al. 2005, *Earth's heat flux revised and linked to chemistry*, Tectonophysics **395**, 159.
- Hosaka, J. et al. 2006, Phys. Rev. **D73**, 112001. (Colaboración Superkamiokande)
- Ibañez, L. E. 1984, Phys. Lett. **B137**, 160.
- Imbriani, G. et al. 2001, Astrophys. J. **558**, 903.
- Imbriani, G. et al. 2005, Eur. Phys. J. A **25**, 455.
- Jambor, J. L. 1994, *Mineralogy of sulfide-rich tailings and their oxidation products*. En: Jambor, J.L., Blowes, D.W. (Eds.), Short course handbook on environmental geochemistry of sulfide mine waste. Mineralogical Association of Canada **22**, 59.
- Jarlskog, C. 1985, Phys. Rev. Lett. **55**, 1039.
- Jungman, G. et al. 1996, Phys. Rep. **267**, 195.
- Kalashov, O. E., Kuzmin, V. A., Semikoz, D. V. Y Sigl 2002, G., Phys. Rev. **D66**, 063004.
- Kawasaki, M. et al. 2004, Phys. Rev. **D71**, 083502.
- Khan, A. G., Kuek, C., Chaudhry, T. M., Khoo, C. S., Hayes, W. J. 2000, *Role of plants, mycorrhizae and phytochelators in heavy metal contaminated and remediation*, Chemosphere **41**,197.
- Kishimoto, C. T. et al. 2006, arXiv: astro-ph/0607403.
- Klapdor-Kleingrothaus , H. V. 2000, Springer Tracts in Modern Physics, Vol 163 (Springer Verlag).Klapdor-Kleingrothaus , H. V. et al. 2006a, Phys. Lett. **B632**, 623.
- Klapdor-Kleingrothaus , H. V. et al. 2006b, Phys. Rev. **D73**, 013010.
- Klapdor-Kleingrothaus , H. V. 2006c, Phys. Scripta **T127**, 40.
- Kobayashi, M. et al.1991, *The earth as an antineutrino star*, Geophysical Research Letters 18, 633.
- Kolb, E. W. y Turner, M. S. 1990, *The Early Universe*, (Addison-Wesley, New York).
- Kozlov, Y., Mikaelyan, L. y Sinev, V., Phys. Atom. Nucl. **66**, 469 (2003).

- Krauss, L. M. et al. 1984, *Antineutrino astronomy and geophysics*, Nature 310, 191.
- Kusenko, A. 2004, Int. J. Mod. Phys. **D13**, 2065.
- Kusenko, A. 2006, Proc. Neutrino 2006, arXiv: hep-ph/0609158.
- Lane, G. et al. 1994, Phys. Rev. **D49**, 6173.
- Lasat, M. 2002, *Phytoextraction of toxic metals – a review of biological mechanisms*, J. Environ. Qual. **31**, 109.
- Le Coultre, P. 2005, Proceedings of the 29th ICRC, Pune, 1001.
- Lemut, A. et al. 2006, *First measurement of the $^{14}\text{N}(p,g)^{15}\text{O}$ cross section down to 70 keV*, Phys. Lett. **B634**, 483.
- Lesgourgues, J. y Pastor, S. 2006, Phys. Rept. **429**, 307.
- Liolios, K., Tavernarakis, N., Hugenholtz, P. y Kyrpides, N. C. 2006, *The Genomes on Line Database (GOLD) v2: a monitor of genome projects worldwide*, Nucleic Acids Res. **1**, 34.
- Lovley, D. R. 2002, *Dissimilatory metal reduction: from early life to bioremediation*, ASM News. **68**, 231.
- Lovley, D. R. 2006, *Bug juice: harvesting electricity with microorganisms*, Nature Reviews Microbiology **4**, 497.
- MacFadyen, A.I., et al. 2001, Astrophys. J. **550**, 410.
- McIntyre, T. 2003, *Phytoremediation of heavy metals from soils*, Adv. Biochem. Eng. Biotech. **78**, 97.
- Majorana, E. 1937, Nuovo Cimento **14**, 171.
- Maki, Z. et al. 1962, Prog. Theor. Phys. **28**, 870.
- Maltoni, M. y Schwetz, T. 2007, *Sterile neutrino oscillations after first Miniboone results*, arXiv: 0705.0107 [hep-ph].
- Mantovani, F. et al. 2004, *Antineutrinos from Earth: a reference model and its uncertainties*, Physical Review **D69**, 013001.
- Mapelli, M. et al. 2006, Mon. Not. Roy. Astron. Soc. **369**, 1719.
- Marrodan Undagoitia, T. et al., 2006, *Low energy neutrino astronomy with the large liquid scintillation detector LENA*, Prog. Part. Nucl. Phys. **57**, 283.
- Marx, G. 1969, *Geophysics by neutrinos*, Czechoslovak Journal of Physics **B19**, 1471.
- Mattox, J.R. et al. 1997, Astropart. Phys. **472**, 692.
- McKinsey, D. N. y Coakley, K. J. 2005, *Neutrino detection with CLEAN*, Astropart. Phys. **22**, 355.
- Medina-Tanco, G. 2007 (Pierre Auger Collaboration), *Astrophysics motivation behind the Pierre Auger Southern Observatory enhancements*, Proceedings of 30th ICRC, Mérida, México. En prensa.
- Methé, B. A. et al., 2003, *Genome of geobacter sulfurreducens: Metal reduction in subsurface environments*, Science **302**, 1967.
- Michael, D.G. et al. 2006, arXiv: hep-exp/0607088
- Minakata, H., Sugiyama, H., Yasuda, O., Inoue, K. y Suekane, F. 2003, Phys. Rev. **D68**, 033017.[Erratum-ibid. **D70**, 059901 (2004)].
- Minakata, H. 2007, e-Print hep-ph/0701070.

- MiniBoone Collaboration 2007, arXiv:0704.1500 [hep-ex].
- Mohapatra, R. N. y Senjanovic, G. 1980, Phys. Rev. Lett. **44**, 912.
- Mohapatra, R. N. y Pal, P. B. 1991, *Massive Neutrinos in Physics and Astrophysics*, World Scientific Lecture Notes in Physics 41.
- Mohapatra, R. N. 2003, *Unification and Supersymmetry*, 3rd edition, (Springer Verlag, New York).
- Mohapatra, R.N. y Smirnov, A.Y. 2006, J. Phys. Conf. Ser. **53**, 44.
- Montigny, C. von et al 1995, *EGRET Collaboration*, Astrophys. J. **440**, 525; Astrophys. J. Suppl. **101**, 259, (1995); Astrophys. J. Suppl. **123**, 79, (1999).
- Morelos, A. 2006, AIP Conf. Proc. **857B**, 347.
- Muñoz, C. 2004, Int. J. Mod. Phys. **A19**, 3093.
- Mukherjee, R. et al 1997, Astrophys. J. **490**, 116-135.
- Nilles, H. P. 1984, *Supersymmetry, supergravity and particle physics*, Phys. Rep. **110**, 1.
- Padmanabhan, T. 1994, *Structure Formation in the Universe* (Cambridge Univ. Press).
- Pagels, H. y Primack, J. R. 1982, Phys. Rev. Lett. **48**, 223.
- Palomares-Ruiz, S., Pascoli, S. y Schwetz, T. 2005, JHEP **0509**, 048.
- Pascoli, S., Petcov, T. y Riotto, A. 2006, arXiv: hep-ph/0611338.
- Peacock, J. 2002, *Cosmological Physics* (Cambridge University Press).
- Peebles, P. J. E. 1993, *Principles of Physical Cosmology* (Princeton University Press).
- Piran, T. 1999, Phys. Rep. **314**, 575.
- Polchinski, J. 1998, *String Theory* (Cambridge University Press).
- Pollack, H. N. et al. 1993, *Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set*, Review of Geophysics **31**, 267.
- Pontecorvo, B. 1958a, Sov. Phys. JETP **7**, 712.
- Pontecorvo, B. 1958b, Zh. Eksp. Teor. Fiz. **34**, 247.
- Pontecorvo, B. 1967, JETP **53**, 1717.
- Pryke, C. et al. 2002, Astrophys. J. **568**, 46.
- Rajagopal, K. et al. 1991, Nucl. Phys. **B358**, 447.
- Raghavan R. S. et al. 1998, Measuring the global radioactivity in the earth by multidetector antineutrino spectroscopy, Physical Review Letters **80**, 635.
- Reguera, G., McCarthy, K. D., Mehta, T., Nicoll, J. S., Tuominen, M. T. y Lovley, D. R. 2005. *Extracellular electron transfer via microbial nanowires*, Nature **435**, 1098.
- Reisetter, A. J. 2005, Ph. D. Thesis, U. of Minnesota.
- Reyes, M. A. y Moreno, G., AIP Conf. Proc. **857B**, 419.
- Ridky, J. y Travnicsek P. 2005, (DELPHI Collab.), Nucl. Phys. (Proc. Suppl.) **B138**, 295.

- Rimstidt, J.D., Chermak, J.A. y Gagen, P. M. 1990, Rates of reaction of galena, sphalerite, chalcopyrite and arsenopyrite with Fe(III) in acidic solutions. En: Alpers, C.N., Blowes, D.W. (Eds.), *Environmental geochemistry of sulfide oxidation*. ACS Symposium Series, Washington D.C. USA **550**, 2.
- Rolfs, C. E. y Rodney, W. S. 1985, *Cauldrons in the cosmos* (The University of Chicago Press). 1985.
- Rosenberg, L. J. y van Bibber, K. A. 2000, *Phys. Rep.* **325**, 1.
- Rotschild, C. G. et al. 1998, *Antineutrino geophysics with liquid scintillators detectors*, *Geophysical Research Letters* **80**, 1083.
- Ronga, F. et al., *MACRO Collaboration*, *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)* **B66**, 231 (1998).
- Saab, T. 2002, Ph.D Thesis, Stanford University.
- Sánchez, F. et al. 2007, *Buried plastic scintillator muon telescope*, *Proceedings of 30th ICRC*, Mérida, México. En prensa.
- Sahni, V. 2004, *Dark matter and dark energy*, *Lect. Notes Phys.* **653**, 141.
- Sakharov, A.D. 1967, *ZhEFT Pis'ma* **5**, 32.
- Salazar, H. y Villaseñor, L. M. 2006, *Astroparticle physics: detectors for cosmic rays*, *AIP Conf. Proc.* **857B**, 382.
- Salt, D. E., Smith, R. D. y Raskin, I. 1998, *Phytoremediation*, *Ann. Rev. Plant Phys. and Plant Mol. Biology* **49**, 643.
- Sánchez-Salcedo, F. J. et al. 2006, arXiv: astro-ph/0601490.
- Schechter, J y Valle, J.W.F. 1980, *Phys. Rev.* **D22**, 2227.
- Schnee, R. W. 2006, *Status of direct searches for WIMP dark matter*, arXiv: astro-ph/0612565.
- Schwartz, J. H. 1999, *From superstrings to M theory*, *Phys. Rep.* **315**, 107.
- Scholberg, K., *Supernova neutrino detection*, astro-ph/0701081.
- Schuster, C. *et al.*, astro-ph/0111545.
- Seljak, U. *et al.* 2006, *Can sterile neutrinos be the dark matter?*, arXiv:astro-ph/0602430.
- Serres, M. H. y Riley, M. 2006, *Genomic analysis of carbon source metabolism of Shewanella oneidensis MR-1: Predictions versus experiments*, *J. Bacteriol.* **188**, 46.
- Shi, X. D. y Fuller, G. M. 1999, *Phys. Rev. Lett.* **82**, 2832.
- Shrock, R.E. 1981, *Phys. Rev.* **D24**, 1232.
- Shimizu, I., 2007, *Directional measurement of anti-neutrinos*, *Workshop on Neutrino Oscillation Physics (NOW 2006)*, Otranto, Lecce, Italy, Sep. 2006. Publicado en *Nucl. Phys. Proc. Suppl.* **B168**, 147.
- Simmons, S. F. 1991, *Hydrologic implications of alteration and fluid inclusion studies in the Fresnillo District, Mexico. Evidence for a brine reservoir and a descending water table during the formation of hydrothermal Ag-Pb-Zn orebodies*. *Economic Geology* **86**, 1579.
- Smith, N. J. T. et al. 2002, http://www.shef.ac.uk/~phys/idm/2002/talks/smith_n.pdf. (Colaboración ZEPLIN)
- Smith, C. J. et al. 2006, arXiv: astro-ph/0608377.
- Sorel, M. et al. 2004, *Phys. Rev.* **D70**, 073004.

- Spergel, D.N. et al. 2003, *Astrophys. J.Suppl.* **148**, 175.
- Spergel, D. N. et al. 2006, arXiv: astro-ph/0603449.
- Springel, V. et al. 2005, *Nature* **435**, 629.
- Stamatikos, M. 2006, Ph. D. UMI-32-03981.
- Stanev, T. 2004, *Phys. Lett.* **B595**, 50.
- Stanev, T. 2006, *J. Phys. Conf. Ser.* **39**, 386-392.
- Stasielak, J. et al. 2006, arXiv: astro-ph/0606435.
- Steigman, G. 2006, *Int. J. Mod. Phys.* **E15**, 1.
- Steigman, G. 2005, *Neutrinos and big-bang nucleosynthesis*, arXiv: hep-ph/0501100.
- Stecker, F.W., *Nature* **241**, 74-77 (1973).
- Stecker, F.W. et al., *Phys. Rev. Lett.* **66**, 2697-2700 (1991).
- Szabo, A.P., Protheroe, R.J., *Astropart. Phys.* **2**, 375-392 (1994).
- Tarawneh, C., Dasgupta-Schubert, N. y Persans, M. W. 2006, *Methods and systems for analysing samples using particle irradiation*, Patente Internacional, University of Texas, Patent pending number 60/778,865 / UTSR:004USP1 / 10600122, March 2006.
- Taylor, C. et al. 1999, CERN-LEPC-99-5, LEPC-P9, CosmoLEP Proposal.
- Teske, A. P. 2005. *The deep subsurface biosphere is alive and well*. *Trends Microbiol.* **13**, 402. Review.
- TheMilleniumSimulationProject,
<http://www.mpagarching.mpg.de/galform/virgo/millennium/>
- Tolich, N. et al. 2006, *A geoneutrino experiment at Homestake*, Neutrino Sciences 2005: Neutrino Geophysics, Honolulu, Hawaii, Dec. 2005. Publicado en Honolulu 2005, Neutrino Geophysics, 229. e-Print: physics/0607230.
- Tyson, G. W. et al. 2004, *Community structure and metabolism through reconstruction of microbial genomes from the environment*, *Nature*, **428**, 25.
- Usov, V. y Milgrom, M. 1995, *Astropart. Phys.* **4**, 365.
- Vargas, M., Kashefi, K., Blunt-Harris, E. L., Lovley, D. R. 1998, *Microbiological evidence for Fe(III) reduction on early Earth*, *Nature* **39**, 65.
- Viel, M. et al. 2006, *Can sterile neutrinos be ruled out as warm dark matter candidates?*, arXiv: astro-ph/0605706.
- Vietri, M. 1995, *Astrophys. J.* **453**, 583.
- Vogel, P. 2006, *Neutrinoless double beta decay*, arXiv: hep-ph/0611243.
- Waxman, E. 1995, *Phys. Rev. Lett.* **75**, 386 .
- Waxman, E. y Bahcall, J. 1997, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2292.
- Webster, G. et al. 2006, *Prokariotic community composition and biogeochemical processes in deep seafloor sediments from Peru margin*, *FEMS Microbiol. Ecol.* **58**, 65.
- Weinberg, S. 1982, *Phys. Rev. Lett.* **48**, 1303.

- Woosley, S.E. y Weaver, T.A. 1995, ApJS **101**, 181.
- Xinheng Guo *et al.* 2007 (Colaboración Daya Bay), *A Precision measurement of the neutrino mixing angle θ_{13} using reactor antineutrinos at Daya Bay*. e-Print: hep-ex/0701029.
- Yanagida, T. 1979, *Proceedings of Workshop on Unified Theory and Baryon Number in the Universe*, editado por O. Sawada and y A. Sugamoto (KEK).
- Yao, W. M. *et al.* 2006, J. Phys. **G33**, 1.
- Yoshida, T. y Kajino, T. 2005, Nucl. Phys. **A758**, 35.
- Zuber, K. 2006, *Neutrinoless double beta decay experiments*, Acta Phys. Polon. **B37**, 1905.
- Zwicky, F. 1933, Helv. Phys. Acta **6**, 110.

ANEXO 1

PRESUPUESTO EN MILLONES DE PESOS (1 US DÓLAR = 11 PESOS)

Detalle	Sub-total	Inversión total
Capacitación de personal técnico especializado		8.0
Infraestructura general		84.5
Acondicionamiento accesos y salas subterráneas	30.0	
Espacios físicos en superficie	28.0	
Mobiliario	2.5	
Tendido red eléctrica	5.0	
Planta eléctrica	5.0	
Planta tratamiento agua	5.0	
Planta de gases	5.0	
Bomberos	1.0	
Comunicaciones / Internet (alámbrica e inalámbrica)	3.0	
Laboratorio de superficie		35.7
Taller mecánico	2.6	
Taller de vacío	0.5	
Taller de microscopía	2.0	
Laboratorio de electrónica	22.0	
Laboratorio de geología	1.0	
Laboratorio de biotecnología	3.8	
Laboratorio de cómputo	3.0	
Cuarto limpio	0.8	
Detector criogénico de Materia Oscura		540.0
Detector	420.0	
Operación	120.0	
Geología de yacimientos minerales		2.5
Observatorio sismotectónico		2.5
Transporte y distribución de metales pesados en plantas		0.8
Diversidad microbiana de subsuelo		3.0
Detección de rayos cósmicos R&D / prototipo		5.0
Secciones eficaces de reacciones nucleares		30.0
Total		712.0

DESGLOSE FINANCIERO POR AÑO

Detalle	año 1	año 2	año 3	año 4	año 5	Total
Capacitación de personal técnico especializado	1.00	3.00	2.00	1.00	1.00	8.00
Infraestructura general	48.00	31.50	5.00			84.50
Laboratorio de superficie	5.00	20.00	10.70			35.70
Detector Criogénico de Materia Oscura	32.10	95.80	141.00	204.00	67.10	540.00
Geología de Yacimientos Minerales		1.00	1.50			2.50
Observatorio sismotectónico		2.50				2.50
Dinámica de transporte y metales pesados en plantas		0.80				0.80
Diversidad microbiana de subsuelo		2.00	1.00			3.00
Detección de rayos cósmicos R&D / prototipo		1.00	2.00	2.00		5.00
Sección eficaz para reacciones nucleares	10.00	10.00	5.00	5.00		30.00
Total (M\$MN)						712.00

ANEXO 2

CARTAS DE INTENCION

México, D.F., a 13 de marzo del 2007.

DR. CARLOS CANET MIQUEL
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE GEOFISICA
COORDINADOR DEL GRUPO “Búsqueda y Caracterización
de Sitios Posibles e Impacto Ambiental”
P r e s e n t e .

Estimado Dr. Carlos Canet Miquel:

Mi representada **Minera Fresnillo, S.A. de C.V.**, empresa que forma parte del Grupo Peñoles, manifiesta su interés de participar en el Megaproyecto consistente en la creación de un **“Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano”**, con la participación de las instituciones educativas que en su propuesta señala (se anexa copia de la misma a la presente), y que ha sido aprobada en su primera etapa por el Consejo nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), siendo el apoyo de la siguiente forma:

- 1) Facilitar un espacio subterráneo para la instalación del **“Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano”**, en la Unidad Fresnillo, ubicada en Fresnillo Zacatecas.
- 2) Prestar el servicio, a cambio de la contraprestación que establezcan las partes, utilizando equipo pesado para bajar instrumentos; equipo de excavación para adecuar el espacio facilitado por **Minera Fresnillo, S.A. de C.V.**, en caso de ser necesario, y prestar el servicio de electricidad, drenaje y ventilación, con la contraprestación correspondiente.
- 3) Proporcionar una superficie de terreno, para la construcción del Laboratorio de Superficie, ya sea en compraventa, arrendamiento o comodato, según la disponibilidad de **Minera Fresnillo, S.A. de C.V.**

Lo señalado en los incisos 1), 2) y 3) anteriores, en el entendido que será siempre y cuando la realización del Megaproyecto, no entorpezca en forma alguna la operación normal de la Unidad Fresnillo de **Minera Fresnillo, S.A. de C.V.** y debiendo asumir la Universidad Nacional Autónoma de México y/o las demás Instituciones Educativas señaladas en la propuesta mencionada en el primer párrafo de esta carta de intención y/o la entidad que en su momento constituyeran, todas las obligaciones, fiscales, ambientales, laborales y de cualquier otra índole que surgiera con motivo de la operación de los

laboratorios, tanto el **“Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano”**, como el **Laboratorio de Superficie**, obligándose a sacar en paz y a salvo de **Minera Fresnillo, S.A. de C.V.**

La **Universidad Nacional Autónoma de México** y/o las demás Instituciones Educativas mencionadas en la propuesta y/o la entidad que en su caso llegaren a constituir y **Minera Fresnillo, S.A. de C.V.**, en lo sucesivo **“LAS PARTES”**, elaborarán el convenio o convenios necesarios que contendrán, además de lo señalado en la presente carta e incisos que a continuación se relacionan, el clausulado necesario y cualquier derecho que en su momento pudiera adquirir **Minera Fresnillo, S.A. de C.V.** por su participación en el Megaproyecto señalado, siempre y cuando la **Universidad Nacional Autónoma de México** y/o las demás Instituciones Educativas señaladas en la propuesta, obtengan del **CONACYT** y o de cualquier otra Institución, el financiamiento correspondiente para llevar a cabo el Megaproyecto mencionado a lo largo de la presente carta de intención, dentro del término señalado en el inciso b) siguiente.

a) Si durante la vigencia de esta carta de intención ocurrieren acontecimientos que impidan a **“LAS PARTES”** llevar a cabo el objeto de la misma, tales como huelgas, paros, motines, revoluciones, disturbios, terremotos, incendios, actos de terceros, intervención o incautación de las propiedades por cualquier autoridad legítima o de facto, o por cualquier otra causa fuera del control o dominio de **“LAS PARTES”**, éstas convienen en que se suspenderán los efectos de la carta únicamente por lo que hace a los actos afectados para reanudarse en la fecha en que cese dicho evento y el plazo fijado en el inciso b) siguiente, se prorrogará por un tiempo igual al que haya durado la interrupción. En todo caso las partes se obligan a hacer los esfuerzos razonables para reducir la interrupción o resolver los problemas.

La parte afectada deberá dar aviso a la otra parte dentro de un término de 5 (cinco) días naturales contados a partir de la fecha en que se presente el evento de fuerza mayor. De no dar el aviso en el plazo señalado la notificación tendrá efectos a partir de que se dé el aviso mencionado.

Una vez que hayan cesado las causas de la suspensión la parte afectada deberá notificarlo a la otra a efecto de reanudar las obligaciones materia de la presente carta.

En caso de no superarse la causa de la suspensión dentro de un período de 15 (quince) días hábiles, las partes acordarán lo conducente.

b) Esta carta tendrá una vigencia de ____ meses contados a partir de su firma, por lo que vencerá precisamente el día __ de _____ del 2007, durante este período la Universidad Nacional Autónoma de México y/o las Instituciones Educativas señaladas en la propuesta, realizarán todos los trámites necesarios para obtener el financiamiento de el **CONACYT**.

c) **“LAS PARTES”** se obligan a tratar como confidencial cualquier información verbal o escrita a la que tenga acceso o sea de su conocimiento con motivo de la presente carta. Asimismo se obligan a no revelarla, divulgarla o transmitirla, a mantenerla en secreto y a no reproducirla, copiarla o duplicarla sin consentimiento previo expreso por escrito de cualquiera de las partes y adoptar las medidas necesarias a fin de salvaguardar la confidencialidad de dicha información.

Se entiende por información confidencial: toda aquella información escrita, gráfica o contenida en documentos, medios electromagnéticos, discos ópticos, microfilmes u otros instrumentos similares, incluyendo de manera enunciativa más no limitativa la información técnica, de ingeniería, administrativa, financiera y de negocios, reportes, planes, proyecciones, secretos industriales (toda información de aplicación industrial o comercial que guarde cualquiera de **“LAS PARTES”** con carácter confidencial que le signifique a cualquiera de **“LAS PARTES”** obtener o mantener una ventaja competitiva o económica frente a terceros en la realización de actividades económicas), fórmulas, tecnologías, datos y cualquier otra información propiedad de cualquiera de **“LAS PARTES”**, resultados obtenidos con motivo de los acuerdos convenidos en la presente carta-acuerdo, investigaciones, así como el análisis de documentos de trabajo, compilaciones, comparaciones, estudios u otros documentos que contengan o reflejen dicha información.

No se considerará como información confidencial: (i) La que sea del dominio público; (ii) La que alguna de **“LAS PARTES”** tenga que proporcionar en cumplimiento de una orden judicial o mandato de autoridad competente; y (iii) aquella que cualquiera de **“LAS PARTES”** consienta que se comuniquen a terceros o se haga pública.

“LAS PARTES”, se obligan a hacer del conocimiento de la parte afectada, respecto de cualquier circunstancia que pudiera afectar la confidencialidad de la información a efecto de que pueda tomar las medidas que considere pertinentes.

“LAS PARTES” reconocen que infringir lo señalado en párrafos anteriores constituye un delito en los términos de la Legislación Mexicana aplicable, obligándose a pagar a la parte afectada los daños y perjuicios que le ocasione su incumplimiento en forma inmediata y sin necesidad de resolución judicial.

“LAS PARTES” reconocen y aceptan que la violación a lo contenido en el presente inciso será causal de rescisión de la presente carta sin responsabilidad alguna para la parte que no haya dado motivo a ello.

No obstante lo anterior, **“LAS PARTES”** convienen en que cualquiera de ellas podrá realizar anuncios públicos, siempre y cuando el texto de cualquier aviso público o declaración, incluyendo comunicados de prensa que cualquiera de **“LAS PARTES”** pretenda llevar a cabo, sea puesto a disposición de la otra parte con anterioridad a dicha publicación y obtener su aprobación, la cual no podrá ser denegada sin causa justificada y deberá otorgarse dentro de un

término de 5 (cinco) días hábiles contados a partir de que reciba el texto de la comunicación que se pretenda realizar.

d) En caso de reclamación, controversia o disputa en cuanto a, resultante de o relativa a la validez, interpretación, construcción, infracción o ejecución de esta carta acuerdo, las partes harán su mejor esfuerzo para solucionar a la brevedad posible, amigablemente y de buena fe tal controversia y si fallaran en hacerlo dentro de treinta días calendario a partir de la fecha en que haya surgido la reclamación, controversia o disputa, tal reclamación, controversia o disputa deberá solucionarse por arbitraje.

El arbitraje será resuelto definitivamente conforme a las Reglas de Arbitraje del Centro de Arbitraje de México, por un comité arbitral compuesto por tres árbitros nombrados de acuerdo con dichas reglas. El arbitraje tendrá verificativo en la Ciudad de México, Distrito Federal y en las actuaciones arbitrales se utilizará el idioma español, y serán aplicables el Código de Comercio, el Código Civil Federal, y o cualquier ordenamiento aplicable. El laudo arbitral se dictará por escrito y deberá estar debidamente motivado. El laudo arbitral obligará a las partes y será final y definitivo.

e) La **Universidad Nacional Autónoma de México**, y **Minera Fresnillo, S.A. de C.V.**, señalan como sus domicilios para oír y recibir todo tipo de notificaciones los siguientes:

MINERA FRESNILLO, S.A. DE C.V.

Moliere 222 Torre de Oficinas Piso 1
Col. Los Morales Sección Palmas
C.P. 11540 México, D.F.

Atn: Ing. Manuel Francisco Luévanos Sánchez

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

9º. Piso de la Torre de Rectoría
Ciudad Universitaria, Delegación Coyoacán
Código Postal 04510.
México, D. F.

Atn: Dr. Carlos Canet Miquel

Todas las notificaciones deberán ser hechas: (i) personalmente, o (ii) mediante medios electrónicos, con confirmación subsiguiente por correo certificado o registrado, solicitando la confirmación de recepción correspondiente, o (iii) mediante correo certificado o registrado solicitando la confirmación de recepción correspondiente o mediante servicio de paquetería comercial. Toda notificación será válida y se considerará que ha sido recibida (i) si fue hecha personalmente, en la fecha en la que fue hecha si es que fue hecha durante

horario normal de trabajo, y si no fue hecha en horario normal de trabajo, en el día hábil siguiente a la fecha de la notificación, (ii) si fue hecha mediante medios electrónicos, en el día hábil siguiente al recibo de la confirmación enviada por correo certificado o registrado, y (iii) si solamente fue hecha mediante correo o paquetería comercial, en el día hábil siguiente a su recepción.

Agradeceré recabar la firma de conformidad de su apoderado el **DR. RENÉ RAÚL DRUCKER COLÍN**.

Las partes declaran que han leído la presente carta acuerdo y que la comprenden en toda su extensión y la firman en señal de conformidad el ___ de marzo del 2007, en la ciudad de México, Distrito Federal.

Conforme

MINERA FRESNILLO, S.A. DE C.V.,

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

ING. JAIME LOMELÍN GUILLÉN
APODERADO

DR. RENÉ RAÚL DRUCKER COLÍN,
APODERADO



Pachuca, Hgo., a 22 de Marzo de 2007.

Dr. Carlos Canet Miquel
Departamento de Recursos Naturales
Instituto de Geofísica
Universidad Nacional Autónoma de México

Estimado Carlos Canet,

Respecto a su solicitud de apoyo logístico para el desarrollo del *Laboratorio Subterráneo Mexicano*, que actualmente se encuentra en su fase de propuesta por parte de varias instituciones del país, me es grato informarle que la Compañía de Real del Monte y Pachuca S.A. de C.V. , ha decidido brindar el apoyo solicitado.

Existe además interés por parte de la Compañía que represento, para que dicho laboratorio sea instalado en alguna de las minas que operamos, que usted menciona en su solicitud. Nuestros ingenieros le apoyarán en la búsqueda del sitio que cumpla con las características deseadas de profundidad, humedad, dimensiones, etc. Por ultimo debo mencionar algunas condiciones que, de llevarse a cabo el proyecto, deben ser cumplidas para salvaguardar nuestros intereses:

- a).- Que en el futuro la zona en donde se instale el , o los laboratorios , pueda entrar en actividad minera.
- b).- Que exista publicaciones en el que se haga referencia al nombre de la Compañía de Real del Monte y Pachuca S.A. de C.V.
- c).-Que exista un convenio entre las instituciones participantes (UNAM, UAEH, y otras) y la Compañía de Real del Monte y Pachuca S.A. de C.V. que de certeza a la operación de la zona.

ATENTAMENTE
Ing. José Antonio Torres Bañuelos
Compañía de Real del Monte y Pachuca S.A. de C.V.
Director General

c.c.p.- Ing. José Luis Solís Flores.-
Expediente

ANEXO 3

RECONOCIMIENTO DE EMPLAZAMIENTOS POTENCIALES PARA EL LSMM

Convocatoria de CONACyT para Megaproyectos de Investigación 2006:
**LABORATORIO SUBTERRÁNEO MULTIDISCIPLINARIO MEXICANO
(LSMM)**

Reconocimiento de emplazamientos potenciales para el Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano en Guanajuato

REPORTE del trabajo de campo
(10 DE MAYO DE 2007)



Carlos Canet Miquel^{a1}, Antoni Camprubí Cano^b, Gustavo Medina Tanco^c,
Juan Carlos D'Olivo^c, Carlos Villeda^d

^a*Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad
Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D.F.*

^b*Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla,
Crta. 57 km. 15.5, 76230 Santiago de Querétaro, Qro.*

^c*Instituto de Ciencias Nucleares, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad
Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D.F.*

^d*Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V.*

¹ ccanet@geofisica.unam.mx

Tel.: (+52 55) 56224133, Fax: (+52 55) 55502486

1. INTRODUCCIÓN

El día 10 de Mayo de 2007 se inspeccionaron algunas minas e instalaciones pertenecientes a la empresa minera Servicios Industriales Peñoles, SA de CV, en el Distrito Minero de Guanajuato (Municipio de Guanajuato, Gto.). Esta visita se realizó atendiendo una invitación expresa por parte de la empresa Peñoles, por lo que los lugares examinados como ubicaciones potenciales del Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano (LSMM) fueron los sugeridos por dicha empresa.

Se visitaron dos minas: (a) La Sirena, y (b) Las Torres, ambas situadas al E de la ciudad de Guanajuato (Fig. 1). Estas minas distan entre sí ~2.5 Km y se disponen sobre una misma estructura mineralizada de dirección NE-SO, La

Veta Madre. Ésta constituye un ejemplo clásico de veta epitermal de baja sulfuración, y se distingue por su descomunal tamaño alcanzando más de 20 Km de longitud.

En ambos sitios se visitaron las instalaciones subterráneas y de superficie, y se valoró objetivamente la factibilidad de desarrollo del LSMM.

2. MINAS EXAMINADAS

1. INTRODUCCIÓN

El día 10 de Mayo de 2007 se inspeccionaron algunas minas e instalaciones pertenecientes a la empresa minera Servicios Industriales Peñoles, SA de CV, en el Distrito Minero de Guanajuato (Municipio de



Fig. 1. Mapa con la localización de las minas subterráneas de Guanajuato que potencialmente podrían alojar las instalaciones del LSMM.

Guanajuato, Gto.). Esta visita se realizó atendiendo una invitación expresa por parte de la empresa Peñoles, por lo que los lugares examinados como ubicaciones potenciales del Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano (LSMM) fueron los sugeridos por dicha empresa.

Se visitaron dos minas: (a) La Sirena, y (b) Las Torres, ambas situadas al E de la ciudad de Guanajuato (Fig. 1). Estas minas distan entre sí ~2.5 Km y se disponen sobre una misma estructura mineralizada de dirección NE-SO, La Veta Madre. Ésta constituye un ejemplo clásico de veta epitermal de baja sulfuración, y se distingue por su descomunal tamaño, alcanzando más de 20 Km de longitud.

En ambos sitios se visitaron las instalaciones subterráneas y de superficie, y se valoró objetivamente la factibilidad del desarrollo del LSMM.

2. MINAS EXAMINADAS

2.1. Mina La Sirena

La actividad extractiva de la Mina La Sirena cesó en 2004. Sin embargo, la empresa minera Peñoles ha seguido dando mantenimiento a buena parte de las instalaciones de superficie, las cuales incluyen varios edificios (Fig. 2), aunque los malacates están visiblemente deteriorados por el abandono (Fig. 3).

El acceso a los niveles más profundos de la mina se realizaba por el Tiro San Miguel, (N 21° 00.977' – W 101° 13.930') mediante una pequeña calesa de 1.1 x 1.1 m de base, en la que únicamente cabían cuatro mineros. A través de este tiro se alcanzaba el nivel más profundo de la mina, el Nivel 590. Existe además un acceso horizontal, el Socavón



Fig. 2. Edificios en la Mina La Sirena, que potencialmente podrían ser utilizados como instalaciones de superficie del LSMM.

Purísima, cuya boca se encuentra en las inmediaciones de los edificios principales de la mina (N 21° 00.725' – W 101° 14.174'). Esta galería tiene 3.7 m de ancho por 2.5 m de alto, y a través de ella se alcanza, después de recorrer una distancia de unos 700 m, el Tiro San Miguel, cuya boca se encuentra 140 m por encima de ella. El Nivel 590 se encuentra a 590 m por debajo del Socavón Purísima, y 730 m por debajo de la boca del Tiro San Miguel, pero los 100 m más profundos se encuentran actualmente inundados.

En esta visita se recorrió el Socavón Purísima hasta el Tiro San Miguel. La roca encajonante que predomina en toda la mina son conglomerados mesozoicos. Por ello, los valores de radiactividad medidos *in situ* con un contador Geiger son muy bajos: de 7 a 19 miliroentgens. Las condiciones de temperatura y humedad se mantienen bastante constantes en el Socavón Purísima, con valores medidos de 20.8° a 22.0° C, y de 49 a 55% de humedad.

2.2. Mina Las Torres

La mina Las Torres se encuentra a 2.5 Km al E de La Sirena. Ambas minas están conectadas por una galería subterránea, el Nivel 490. La mina Las Torres se encuentra actualmente en actividad, pero su futuro a medio plazo no está garantizado, por lo que se debe considerar el riesgo de que termine abandonada como La Sirena.

El acceso a la mina se realiza mayoritariamente por el Tiro Guanajuato (N 20° 59.738' – W 101° 13.243', 2200 m), mediante una calesa de gran capacidad, aunque además existe un acceso horizontal; la Rampa Siglo XX.

El Nivel 490 es fácilmente alcanzado por ambos accesos, y se encuentra a 490 m de profundidad respecto a la boca del Tiro Guanajuato. Este nivel se desagua por gravedad, mediante un canal que dirige la escorrentía hasta una estación de bombeo situada cerca del Tiro Guanajuato. Tiene raíles por los que circulan locomotoras de pequeño tamaño que transportan el mineral, y su sección es de 3.5 m de base por 3 m de altura. En muchos tramos hay anclajes para garantizar la estabilidad de la galería.

Dicha galería se dirige hacia el NO hasta llegar a la Mina La Sirena. Aproximadamente a medio camino, el Nivel 490 pasa justo por debajo de la cima del Cerro Chichíndaro (~2,500 m). En este lugar, conocido como la Zona La Querida, la columna de roca alcanza los 790 m de espesor y, además, existe una rampa, actualmente inundada, que penetra unos 100 m más bajo tierra (Fig. 4 y 5). Las rocas de esta zona son esencialmente conglomerados mesozoicos, de modo que las lecturas de Geiger son muy bajas: de 8 a 10 miliroentgens. Se midió un valor de temperatura de 26.1°C, con un 72% de humedad.



Fig. 3. Malacate de Tiro San Miguel, en la Mina La Sirena, el cual podría ser utilizado como acceso al LSMM.

2. EMPLAZAMIENTO POSIBLE PARA EL LSMM

El mejor emplazamiento para el LSMM es la Zona La Querida, localizada en el Nivel 490, a medio camino entre el Tiro Guanajuato (Mina Las Torres), y el Tiro San Miguel (Mina La Sirena). La columna de roca por encima de esta zona alcanza 790 m, debido a que se sitúa exactamente debajo de la cima del Cerro Chichíndaro (~2,500 m). El acceso actual más fácil es por la Mina Las Torres, ya que el abandono de la Mina La Sirena hace impracticable el uso de los malacates.

Algunas ventajas de esta zona son:

- 1) Se encuentra alejada de los frentes de explotación actuales y futuros de la mina.
- 2) La rampa de La Querida se podría desaguar fácilmente (en aproximadamente una semana, puesto que el caudal infiltrado es relativamente bajo), para alcanzar mayores profundidades y, eventualmente, se podría ampliarse.
- 3) El acceso por la Mina Las Torres es rápido y fácil, y permitiría introducir equipos pesados (por medio de la rampa Siglo XX).
- 4) Eventualmente, se podría acondicionar el acceso por la Mina La Sirena, para evitar toda interferencia y/o dependencia con la actividad minera de Las Torres. Eso implicaría poner a punto el malacate del Tiro San Miguel y restaurar el sector occidental del Nivel 490.
- 5) La roca genera niveles muy bajos de radiactividad natural.
- 6) Las instalaciones en desuso de la Mina La Sirena podrían ser aprovechadas por el Laboratorio de Superficie. Éstas se encuentran en buen estado, y han sido ofrecidas por la compañía minera para tal fin (Fig. 2).
- 7) La empresa minera concesionaria de las minas se muestra favorable a ocupar la Zona La Querida como emplazamiento para el LSMM.



Fig. 4. Rampa de La Querida, visiblemente inundada. Mina Las Torres.

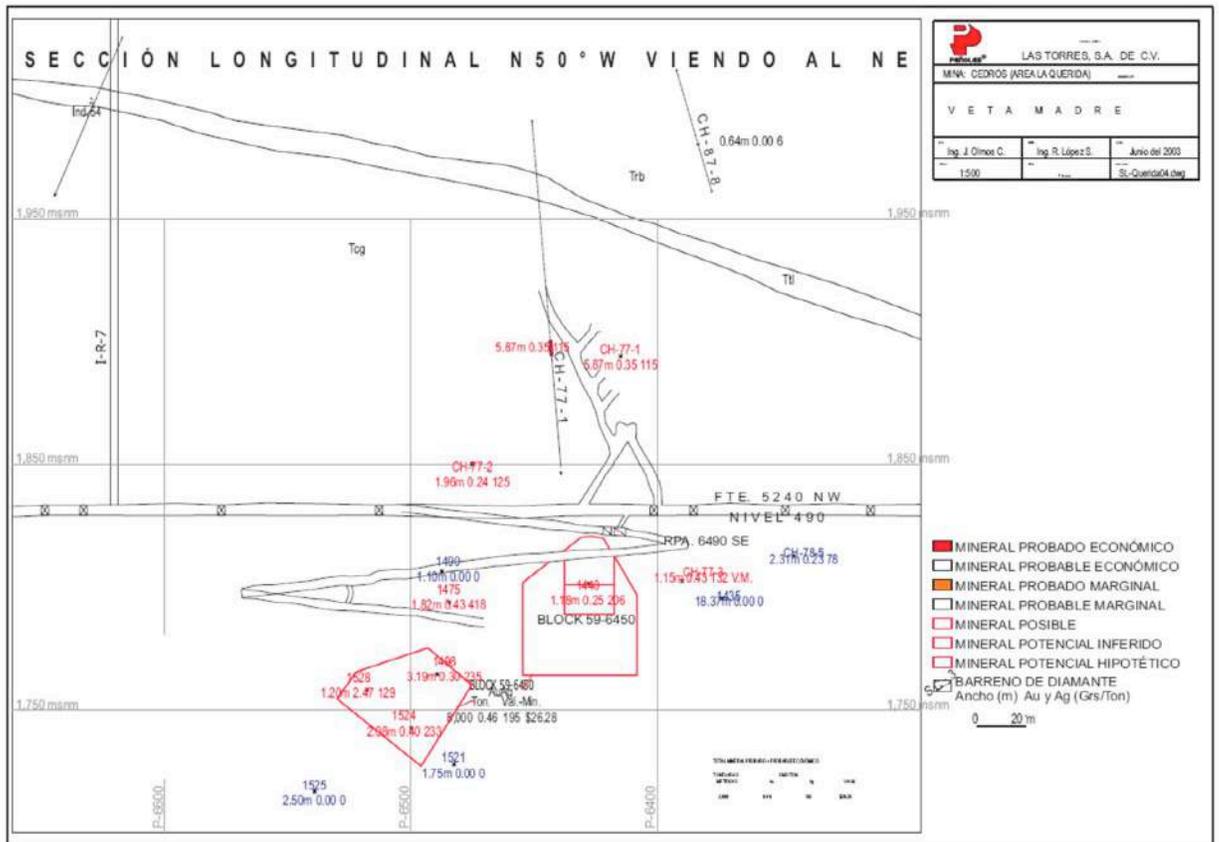


Fig. 5. Sección de la Zona de La Querida, en el Nivel 490 de la Mina Las Torres.

Convocatoria de CONACyT para Megaproyectos de Investigación 2006:
**LABORATORIO SUBTERRÁNEO MULTIDISCIPLINARIO MEXICANO
(LSMM)**

Reconocimiento de emplazamientos potenciales para el Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano en Zacatecas

REPORTE del trabajo de campo
(18 A 25 DE ABRIL DE 2007)



Carlos Canet Miquel^{a1}, Eduardo González Partida^b,
Antoni Camprubí Cano^b

*^aInstituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad
Universitaria, Coyoacán, 04510, México, D.F.*

*^bCentro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla,
Ctra. 57 km. 15.5, 76230 Santiago de Querétaro, Qro.*

¹ ccanet@geofisica.unam.mx

Tel.: (+52 55) 56224133, Fax: (+52 55) 55502486

1. INTRODUCCIÓN

Durante los días 18 a 25 de Abril de 2007 se realizó un viaje de campo por el estado de Zacatecas, con el fin de reconocer las principales minas subterráneas de la zona y, de este modo, valorar sobre el terreno las perspectivas que ofrecen como emplazamiento para el Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano (LSMM). Para tal fin, se visitaron las minas más profundas del estado: (a) San Martín, (b) Sabinas, y (c) Proaño (Fig. 1).

En cada uno de los sitios recorridos se realizó una junta con personal de la mina, se visitaron las instalaciones subterráneas y de superficie, se reconocieron posibles

emplazamientos profundos, y, finalmente, se valoró objetivamente, junto con personal de la empresa minera, la factibilidad del desarrollo del LSMM.

2. MINAS EXAMINADAS

2.1. Distrito de San Martín-Sabinas

Las minas de San Martín y de Sabinas se localizan en el municipio de Sombrerete, al NO del estado de Zacatecas, a una distancia de aproximadamente 180 Km de la capital del estado.

Ambas unidades mineras explotan el mismo yacimiento, que fue descubierto en



Fig. 1. Mapa con la localización de las minas subterráneas de Zacatecas que potencialmente podrían alojar las instalaciones del LSMM.

1548. Éste consiste en un skarn, cuya mineralización se desarrolla en el contacto entre un cuerpo intrusivo granítico de edad terciaria (46 Ma), y calizas cretácicas de la Formación Cuesta del Cura (Fig. 2). Es el mayor skarn polimetálico que se conoce en México, y la mineralización metálica está asociada principalmente a cuerpos de andradita que aumentan su volumen en cambios de flexiones del contacto granito-caliza. Además, hay sistemas de vetas ricas en Au y Ag, de dirección NO y NE, cercanas al cuerpo intrusivo o cortando al mismo.

Las enormes reservas del yacimiento garantizan la duración de la actividad extractiva por décadas.

2.1. Mina de San Martín

La mina está operada por el grupo Industrial Minera México (IMMSA), y produce esencialmente plomo, zinc, cobre y plata. Las actuales reservas de la unidad son de 14.5 Mton con 95 g/t Ag, 0.25 % Pb, 2.50 % Zn y 0.90 % Cu.

La mina de San Martín dispone de emplazamientos adecuados para el LSMM, tanto por la profundidad como por el tipo de acceso y los servicios. Uno de los emplazamientos más adecuados es el “Periferico Nivel 2000, sección 56.00 Sur”. Considerando la profundidad del nivel (2000 m) y la cota altimétrica por encima de éste

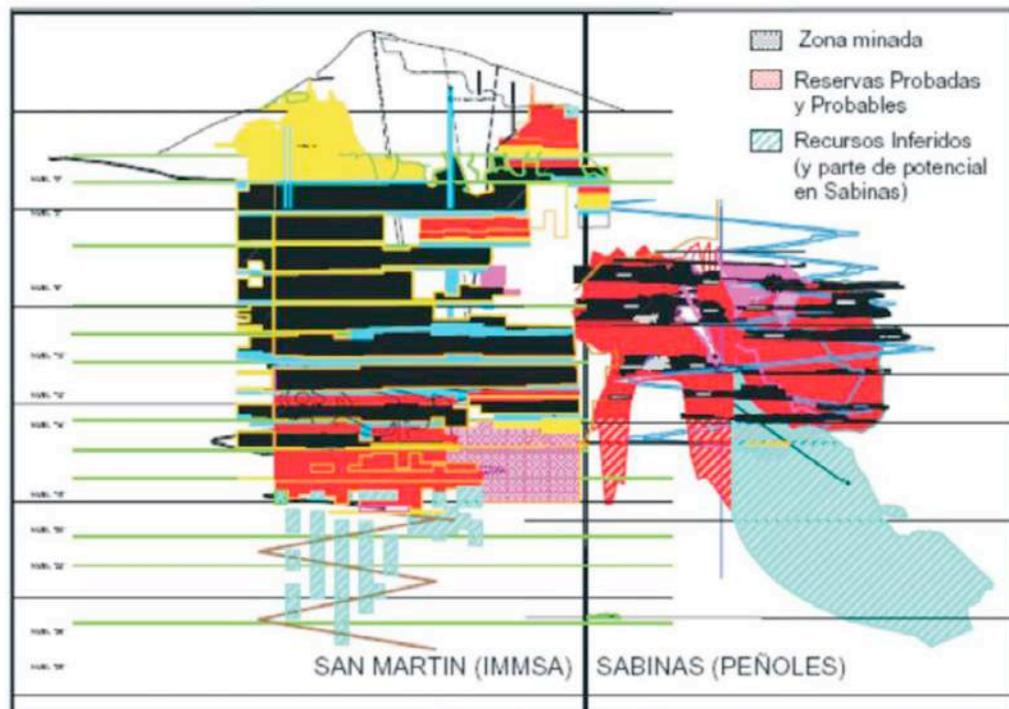


Fig. 2. Sección del cuerpo mineralizado de San Martín-Sabinas, Sombrerete, Zacatecas. Cortesía de Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V.



Fig. 3. Mina San Martín, galería “Periférico nivel 20, sección 56.00 Sur”.

(~2600 m), el espesor de roca que reviste el emplazamiento es de aproximadamente 600 m.

El llamado *Periférico* es una galería de servicios, retirada respecto a los frentes de explotación, que se ha usado, entre otros fines, para emplazar estaciones de barrenación (para exploración). Está excavada en las formaciones calcáreas y tiene acceso por rampa. La longitud de esta galería es de aproximadamente 800 m, el ancho es de 4.9 m, y la altura de 3.4 m (Fig. 3). Está bien ventilada, lo que permite que el ambiente se mantenga relativamente seco y a una temperatura de ~25°C, y dispone de suministro eléctrico.

Desde el punto de vista geotécnico, la roca es muy estable y, además, no hay grandes cavidades en las cercanías del *Periférico*. El emplazamiento podría comunicarse fácilmente con la superficie mediante un barreno de tres pulgadas de diámetro. Debido a la cercanía respecto a un cuerpo intrusivo ácido, es recomendable realizar estudios de radiactividad natural para seleccionar el emplazamiento óptimo del LSMM en la cavidad.

2.2. Mina de Sabinas

Los denuncios de Sabinas pertenecen a Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V., y se distribuyen al sur de los de San Martín. Las reservas con que cuenta la unidad actualmente suman 14.3 Mton con 120 g/t Ag, 0.78% Pb, 3.20% Zn y 0.96% Cu.

La mina dispone de diversos emplazamientos profundos que podrían alojar el LSMM. Sin embargo, la mayoría de los lugares disponibles que cuentan con servicios (electricidad, ventilación) y acceso fácil, están excavados directamente en el granito, lo cual supone niveles altos de radiactividad natural, o bien en la mineralización activamente explotada.

2.2. Distrito de Fresnillo (Mina Proaño)

El distrito minero de Fresnillo se localiza en el municipio del mismo nombre, a 60 Km de la capital del estado de Zacatecas, a una altitud de 2,200 m (Fig. 4). Fue descubierto en 1554 por el Capitán Diego Fernández de Proaño y, desde entonces, la actividad minera solo se vio interrumpida en 1910, durante la Revolución Mexicana.

El yacimiento que se explota es de tipo epitermal de baja sulfuración, se considera un ejemplo de yacimiento de clase mundial, y contiene vetas altamente productivas en Ag-Au-Zn-Pb, como la Santo Niño y la San Carlos.

Las reservas actuales del distrito son de casi 12 Mton, con 507 g/t Ag, 0.56 g/t Au, 0.41% Pb, y 0.77% Zn, por lo que es una de las minas de plata más importantes del mundo.

Las vetas están encajonadas en grauvacas, conglomerados y calcoesquistos, y en rocas volcánicas ácidas a intermedias (riolitas y andesitas) del Terciario (Fig. 5).

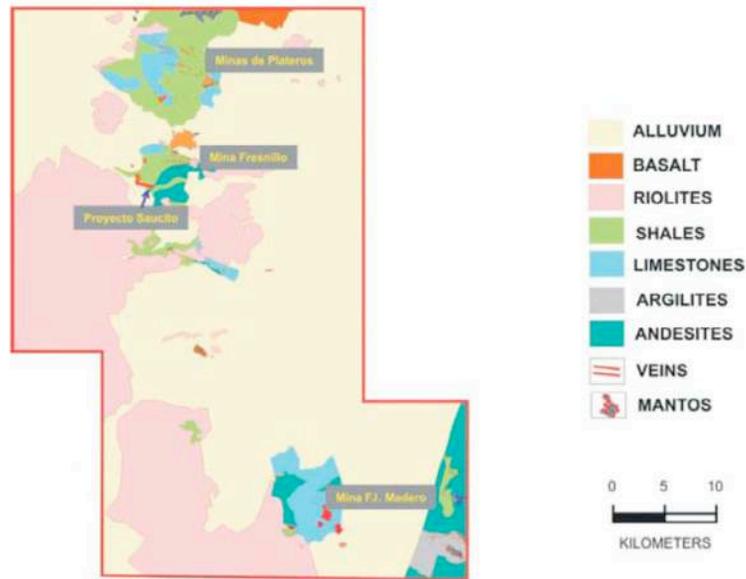


Fig. 4. Mapa geológico del Distrito minero de Fresnillo, Zacatecas. Cortesía de Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V.

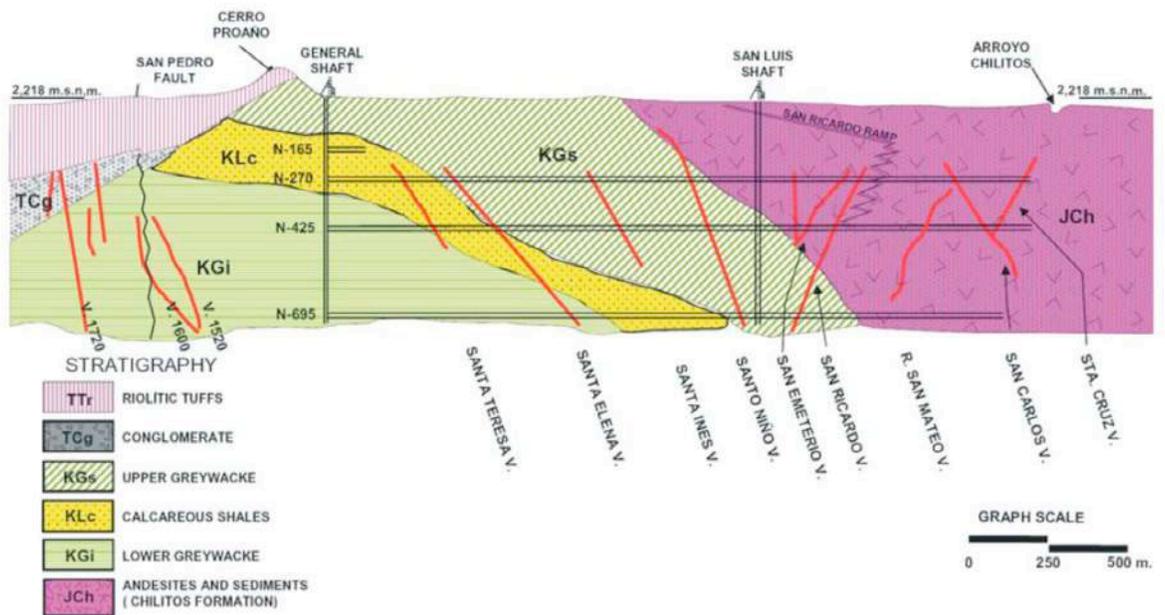


Fig. 5. Corte geológico del Distrito minero de Fresnillo, Zacatecas. Cortesía de Servicios Industriales Peñoles, S.A. de C.V.

El desarrollo subterráneo de la mina ofrece varias ubicaciones propicias para el LSMM. Concretamente, el nivel 695, que es el de mayor profundidad (695 m), en la zona de la veta San Carlos, fue sugerido por personal de la mina como el más adecuado. El acceso al emplazamiento es por una rampa de 6 m de ancho por 3 de alto, y por medio de dos calesas (malacates) con capacidad de 30 personas. La temperatura ambiental es de 22°C y no hay humedad ni polvo. En este nivel hay una quebradora que tritura el mineral antes de ser subido a la superficie por medio de los malacates. Además, existen en el emplazamiento talleres y diversas instalaciones de servicios (Fig. 6).



Fig. 6. Nivel 695, veta San Carlos, mina de Proaño, Distrito de Fresnillo (Zacatecas).

Convocatoria de CONACYT para Megaproyectos de Investigación 2006:
**LABORATORIO SUBTERRÁNEO MULTIDISCIPLINARIO MEXICANO
(LSMM)**

Reconocimiento de emplazamientos potenciales para el Laboratorio Subterráneo Multidisciplinario Mexicano en Pachuca- Real del Monte (Hidalgo)

REPORTE del trabajo de campo
(23 de Enero y 13 de Abril de 2007)



Pedro A. Miranda Romagnoli ^{a1}, Omar G. Miranda Romagnoli ^b

*^aCentro de Investigación en Matemáticas, Universidad Autónoma del
Estado de Hidalgo, CU 42184, Pachuca México*

*^bDepto de Física, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN
A. P. 14-740 México 07000, D F México*

¹pmiranda@uaeh.edu.mx
Tel.: +52 (771) 7172000 Ext. 6162 y 6168

galena, calcopirita, calcocita, novelita, y sulfuros argentíferos y plata y oro nativos.

Las principales formaciones geológicas de la zona son la Vizcaina, Santa Gertrudis que datan del ioceno y Real del Monte que data del Oligoceno (Fig. 2). Estas formaciones encajonan a las vetas Falla Vizcaina, Dios te guíe, Santa Gertrudis, Pinta, Regla y la Rica.

Este distrito ha sido explotado por la compañía Real del Monte y Pachuca S.A. de C.V. (CRM), que desde mediados del año 2005 detuvo la extracción minera en la zona por no ser rentable. Sin embargo, se ha mantenido el beneficio de los minerales. La reserva del distrito está estimada en 5 Mton de mineral.

La planta de beneficio Loreto, ubicada en el municipio de Pachuca, tiene una capacidad de 2500 ton/día, y beneficia los minerales Au, Ag, Pb y Zn. El método utilizado por esta planta es conocido como de flotación y cianuración.

Debido a la suspensión de la explotación

de la zona minera de Pachuca - Real del Monte, los niveles inferiores de las minas se han inundando. Actualmente existe un convenio entre CRM y la Compañía de Agua del Municipio de Pachuca (CASIM) para abastecer de agua, de la mina San Juan, a Pachuca y se están instalando los equipos necesarios para abastecer de este líquido a Real del monte. También existe un convenio con una compañía embotelladora de agua.

2.1. Mina Dificultad

La mina Dificultad se encuentra ubicada a las afueras de Real del Monte y a solo 20 minutos de Ciudad Universitaria de la UAE, en la ciudad de Pachuca, y actualmente no registra actividad minera. En la superficie cuenta con instalaciones tales como galerones y casonas de valor histórico (ver Fig. 3) que podrían ser acondicionadas para albergar el laboratorio de geología y un taller de electrónica para el LSM.

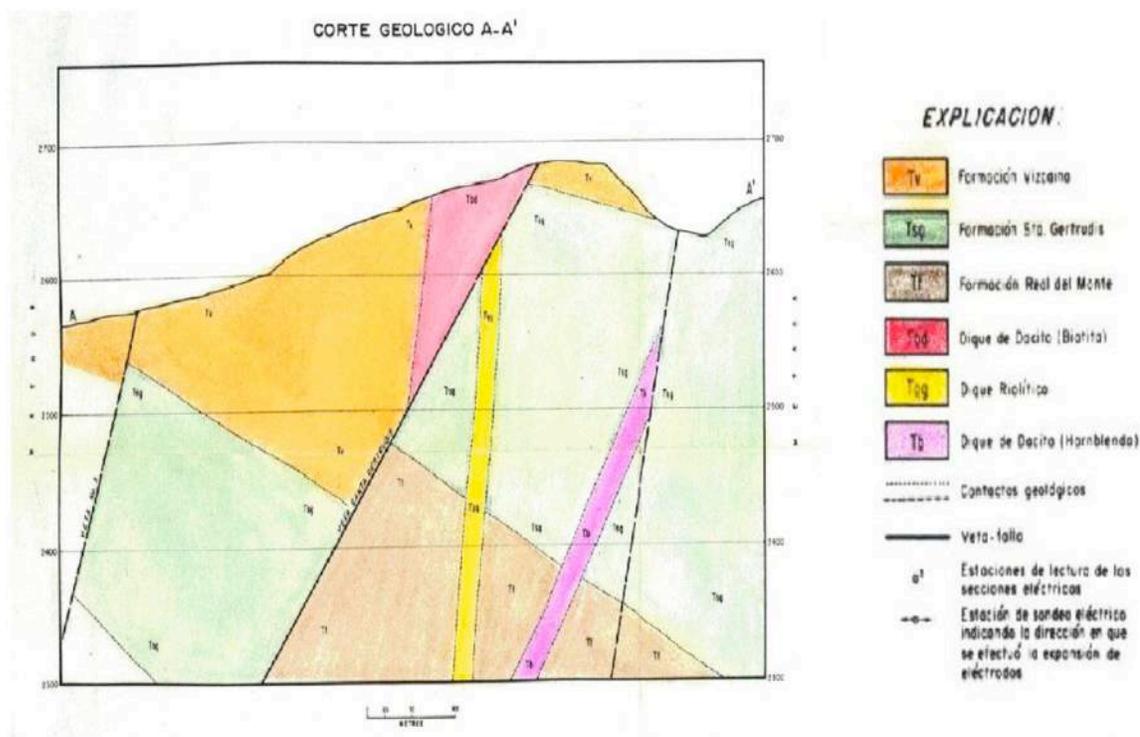


Fig. 2. Corte geológico del distrito Real del Monte. Fuente: Archivo del Sistema Geológico Mexicano.

Una cavidad de esta mina, que podría ser apropiada para albergar algún laboratorio del LSMM, se encuentra en el nivel 200, tiene una longitud aproximada de 25 m por 15 m de ancho y una altura máxima de 3.5 m (Fig. 4). El acceso a este nivel es mediante una jaula de 1.2 m x 0.7 m x 1.9 m.

Descendiendo al nivel 410 y avanzando hacia la mina La Rica (Fig. 5) se encuentra una tolva de 5 x 5 m que desciende en forma de rampa hacia niveles inferiores unos 60 m. Según los ingenieros de CRM ésta podría ser rebajada para obtener un volumen de 10 m³. La cantidad de roca estimada por encima de esta cavidad es de un máximo de 500 m. Ésta parece ser la mejor opción en la zona, en cuanto a profundidad se refiere, para colocar el laboratorio principal del LSMM.

2.2. Mina La Rica

La mina La Rica se encuentra a 2.5 Km de la mina Dificultad, a la entrada de Real del Monte (Fig. 5), siendo ésta de fácil acceso. Fue la última de las minas del distrito en dejar de operar, a finales del año 2005.

En su superficie existe espacio para construir instalaciones para el SLMM previa firma del convenio correspondiente con CRM para formalizar las operaciones en la zona.



Fig. 3. Casona de la mina Dificultad.



Fig. 4. Cavidad del nivel 200 de la mina Dificultad.

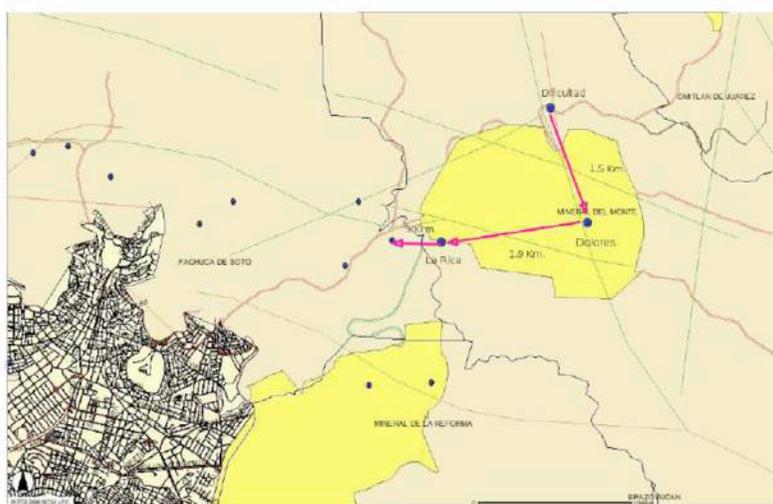


Fig. 5. Distrito minero de Pachuca – Real del Monte. Fuente: Servicio en línea del INEGI.

En el interior de la mina, en el nivel 500, existe una cavidad a nuestra disposición de aproximadamente 10 m de largo por 7 m de ancho y una altura máxima de 2.5 m, que podría ser utilizada para un laboratorio de microbiología. Es aquí donde se encuentra cercana el agua que inunda los niveles inferiores de la mina, 50 m abajo.

Las mayores profundidades de esta mina se alcanzan en el nivel 700, que constituye la reserva de mineral de CRM, por lo que es factible de entrar en operación en el futuro.



Fig. 6. Miembros del grupo de búsqueda del sitio, LSMM.

2.3. Vida subterránea

Durante el recorrido de varios kilómetros de los túneles del distrito de Real del Monte, se observaron varias colonias de hongos que crecen, en completa oscuridad, entre las vías de carros que transportaban mineral rico en plata. La poca actividad humana en los túneles de la zona ha permitido, en poco tiempo, el desarrollo de vida que puede ser detectada a simple vista. También en esta zona existen aglomerados, de los cuales es difícil determinar si trata de cristales agrupados o algún tipo de hongo (Fig. 7).

Sin duda éste es un lugar interesante para emplazar un laboratorio que estudie y aproveche los organismos vivientes de las profundidades.



Fig. 7. Aglomerado, aparentemente de hongos.