

La física de altas energías en el FERMILAB

Arturo Fernández Téllez

Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas
Universidad Autónoma de Puebla

El Fermi National Accelerator Laboratory (FERMILAB), localizado en Batavia, Illinois, Estados Unidos, es un centro de investigación dedicado al estudio de la física de altas energías. Esta área de la física tiene como objetivo principal conocer la naturaleza y el comportamiento de los constituyentes básicos de la materia. Las partículas elementales componen todo lo que podemos ver a nuestro alrededor y cualquier objeto que forme parte del universo. Estudiar sus características nos permite plantear preguntas tales como: ¿Por qué el universo tiene su actual estructura? ¿Por qué el micromundo tiene un comportamiento tan especial? ¿Conocemos todas las partículas elementales de la naturaleza? La respuesta a estos y otros cuestionamientos nos acerca a un conocimiento más profundo de la naturaleza. Sin embargo, encontrar estas respuestas no es una tarea fácil; se requiere del esfuerzo de una gran cantidad de científicos especializados en todas las áreas de las ciencias exactas y de una infraestructura adecuada que permita usar al máximo la capacidad de sus investigadores.

El FERMILAB es uno de los pocos lugares en el mundo que tiene la capacidad para llevar a cabo tan ambicioso proyecto; sus instalaciones permiten que trabajen al mismo tiempo alrededor de dos mil quinientos investigadores, provenientes de distintas partes del mundo, especializados en diversas áreas de la física experimental y teórica, cosmología, matemáticas, ciencias de la computación, etcétera. En la actualidad, la principal meta del FERMILAB es la comprobación de las predicciones cruciales del Modelo Estándar de Interacciones Electrodébiles. Este modelo es considerado como el “estado del arte” en la física.

Además de los avances científicos, está el no menos importante desarrollo de la tecnología de frontera, la cual, como se puede ver en el curso de la historia, siempre acompaña a la actividad científica de punta.

Adicionalmente, el FERMILAB es sede de un programa de enseñanza y difusión de la ciencia. Esta labor ha permitido que el FERMILAB interactúe con instituciones educativas de diferentes partes del mundo mediante programas dirigidos principalmente a profesores de educación media superior y a estudiantes de ingeniería y licenciatura en Física y Ciencias Exactas. Las metas a alcanzar en este programa son:

1. Dar a conocer de forma directa los últimos avances científicos y tecnológicos en algunas áreas de las ciencias exactas.
2. Captar la atención de jóvenes estudiantes y motivar su deseo de conocer con profundidad la física de altas energías y, en general, despertar su interés por la ciencia.

La física de altas energías

La noción de que una simplicidad elemental es la base de la diversidad observada en el universo ha llevado a la física a niveles insospechados. Históricamente, la lista de partículas y fuerzas consideradas fundamentales ha cambiado de manera constante; el escrutinio de la materia y sus interacciones nos ha revelado microcosmos dentro de microcosmos: átomos que constituyen moléculas; núcleos y electrones formando los átomos y niveles más profundos de estructura en el núcleo. Sin embargo, la convergencia de resultados obtenidos en años recientes ha dado una nueva coherencia a la física de las partículas elementales. Es factible que antes de que finalice el presente milenio se hagan

CARGA ELÉCTRICA PROTÓN + 1 UNIDAD		M = MASA EN UNIDADES DE ENERGÍA		
Q U A R K S	$+\frac{2}{3}$	M=5 MeV u	M=1500 MeV c	M≈200 GeV t
	$-\frac{1}{3}$	M=10 MeV d	M=150 MeV s	M=5000 MeV b
L E P T O N E S	0 (NEUTRO)	o MUY PEQUEÑO M=0 V _e	o MUY PEQUEÑO M=0 V _μ	o MUY PEQUEÑO M=0 V _τ
	-1	M=0.511 MeV e	M=105 MeV μ	M=1764 MeV τ
LAS ANTIPARTÍCULAS SE INDICAN POR: $\bar{p}$ $\bar{e}$ ANTIPROTÓN				

Tabla 1. Partículas y fuerzas en el Modelo Estándar.

descubrimientos que permitan entender las leyes que rigen la naturaleza elemental de la materia casi en su totalidad.

Aceleradores de muy altas energías han hecho posible hacer chocar partículas con gran violencia, revelando la estructura atómica con bastante detalle. El límite de resolución que se ha alcanzado con estos trabajos es de 10^{-6} cm, cerca de una milésima del radio del protón. En la década de los sesenta los físicos reconocían cientos de partículas fundamentales. Resultados recientes muestran que tal diversidad no es más que una combinación de un número mucho más pequeño de entidades. El estudio de las fuerzas de interacción entre estas entidades ha tenido un desarrollo similar. Una profunda conexión entre dos de estas fuerzas, la electromagnética y la fuerza débil, ha sido establecida, y se ha intentado incorporar las fuerzas fuertes a las teorías de unificación de las cuatro interacciones fundamentales: la gravedad, el electromagnetismo, las interacciones débiles y las fuertes. La gravedad es la fuerza que nos une a la Tierra y que mantiene a los planetas en órbita; la fuerza que mantiene a los átomos juntos es la fuerza electromagnética; la fuerza fuerte reúne protones y neutrones para formar núcleos y la fuerza débil participa en el decaimiento de partículas inestables.

En la actualidad, físicos teóricos y experimentales están estudiando los detalles de una descripción de la materia llamada Modelo Estándar de las Interacciones Funda-

mentales o, más brevemente, el Modelo Estándar. Éste trata de explicar la dinámica del mundo subnuclear; cómo se comportan las partículas elementales en presencia de los distintos tipos de interacciones que se dan entre ellas. Como su nombre lo indica éste es, hasta hoy, un modelo y no una teoría científica de la naturaleza. Se le llama estándar porque es el modelo que la mayoría de los científicos que estudian la física de las partículas elementales aceptan como válido y toman como principal referencia para comprobar o predecir propiedades de estas entidades. Se considera a los físicos Sheldow Glashow, S. Weinberg (ambos norteamericanos) y Abdul Salam (pakistani), como los científicos que realizaron las principales aportaciones teóricas que le dieron al Modelo Estándar, a finales de la década de los sesenta, su forma actual. Debido a ese trabajo, Glashow, Weinberg y Salam recibieron, en 1979, el Premio Nobel de Física.

El Modelo Estándar propone que existen cuatro tipos de fuerzas fundamentales: electromagnética, nuclear fuerte, nuclear débil y gravitacional. Las fuerzas fuerte, electromagnética y débil producen las interacciones que se observan a nivel microscópico y se transmiten a través del intercambio de partículas. Por ejemplo, la fuerza electromagnética es transmitida por intercambio de fotones (partículas sin masa que viajan a la velocidad de la luz). La fuerza débil es transmitida por el intercambio de partículas W^+ , W^- y Z^0 , que tienen una masa cercana a cien veces la masa del protón. La fuerza nuclear fuerte es producida por el intercambio de partículas sin masa llamadas gluones. Finalmente, existe la hipótesis de que la fuerza de gravedad es transmitida por partículas, aún no descubiertas, llamadas gravitones. Se predice que estas últimas, al igual que los fotones, no tienen masa y viajan a la velocidad de la luz.

En el contexto del Modelo Estándar las partículas elementales se dividen en dos familias: aquéllas que no son afectadas por la fuerza fuerte llamadas leptones y los quarks que sí son afectados por la fuerza fuerte. Los leptones son las partículas más ligeras; el electrón es el mejor conocido de esta familia. Los leptones llamados *muón* y *tau* son

más pesados que el electrón, pero llevan la misma carga negativa. Los tres neutrinos son eléctricamente neutros. Los neutrinos son los objetos más comunes en el universo, aunque experimentalmente son difíciles de observar debido a que la única interacción que tienen con la materia es vía la fuerza débil.

Los quarks, partículas que son afectadas por la fuerza fuerte, llevan una carga eléctrica de $2/3$ y $-1/3$ de la carga del protón. Los más ligeros son el *up* (arriba) y *down* (abajo), seguidos por los quarks *strange* (extraño) y el *charm* (encanto) mientras que los más pesados son el *bottom* (fondo) y finalmente el *top* (cima). Es conveniente mencionar que los nombres de los quarks están relacionados con sus propiedades matemáticas y físicas; una explicación detallada sale de los objetivos de este artículo.

En la tabla 1 se presentan las principales características de las partículas y fuerzas en el contexto del Modelo Estándar.

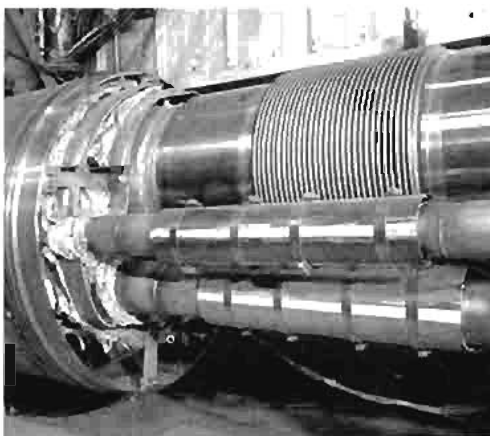
El estudio de las partículas elementales

Los componentes principales en un experimento de altas energías son el acelerador y los detectores de las partículas. Los aceleradores pueden ser de tipo lineal o circular. Los lineales logran proporcionar energía de movimiento (energía cinética) a las partículas a lo largo de una línea recta. Fueron los primeros que se usaron y produjeron los resultados que inspiraron a los físicos de mediados del presente siglo. Los aceleradores circulares o sincrotrones basan su funcionamiento en el hecho de que cualquier partícula que viaja en forma circular es acelerada por una fuerza llamada fuerza centrípeta. Éstos mueven el haz de partículas mediante un arreglo de imanes que ejerce una fuerza electromagnética sobre el mismo. Mientras más grande es el círculo del sincrotrón, más energía de movimiento logran alcanzar las partículas. Actualmente, el FERMILAB cuenta con un arreglo de aceleradores lineales y circulares comunicados entre sí, de tal manera, que el haz de partículas que se mueve a través de este complejo alcanza la más alta energía que pueda lograr cualquier otro acelerador en el mundo. Una

vez que el haz adquiere la energía necesaria, se hace chocar con algún objeto (blanco) o con otro haz que viaja en dirección opuesta. En el primer caso se dice que se realiza una colisión de blanco fijo; en el segundo, se realiza una colisión de haces. Los detectores de partículas se colocan justo en el lugar donde se lleva a cabo el choque.

Cuando se realiza una colisión de haces, las partículas resultantes salen en cualquier dirección. Por esta razón, los detectores son de forma aproximadamente esférica. En el FERMILAB se realizan dos tipos de experimentos que analizan colisiones de haces: el CDF (*Central Detector Facility*) y el denominado D0. Cuando ocurre una colisión de blanco fijo, los detectores tienen una forma similar a la de un cono, ya que las partículas que se producen salen preferencialmente en la dirección del haz. Un ejemplo de este tipo de detectores es el usado en el experimento E791. Como es fácil imaginar, los detectores de partículas deben ser dispositivos muy sofisticados y precisos, pues tienen como función proporcionar información sobre el paso de objetos extremadamente pequeños (del orden de 10^{-13} cm) que se mueven con una alta velocidad (cercana al noventa y cinco por ciento de la velocidad de la luz). El diseño y construcción de los aceleradores y detectores de partículas implica el uso de dispositivos electrónicos y recursos computacionales de la más avanzada tecnología. En muchos casos, los mismos investigadores crean nuevos dispositivos que se han convertido en innovaciones tecnológicas de frontera.

Uno de los principales objetivos de los





experimentos de colisión de haces, que actualmente se realizan, es comprobar la existencia del único de los quarks que no ha sido “visto”, el quark *top*. Aunque desde el punto de vista teórico existen argumentos que conducen a que el quark *top* debe existir, no se han generado evidencias claras al respecto. Hay, sin embargo, grandes avances: en abril de 1994, el CDF anunció que había llegado a detectar algunos procesos en los que, sin ninguna duda, el quark *top* tenía participación. Se ha mencionado, inclusive, que el quark *top* tendría una masa de ciento setenta veces la masa que tiene un protón. Es bastante probable que durante este año se anuncie tan ansiado descubrimiento.*

En un experimento de blanco fijo, se extraen partículas del acelerador y se dirigen a áreas donde se hacen colisionar con planos hechos con materiales de alta densidad. Un excelente ejemplo de este tipo de experimentos es el mencionado anteriormente, el E791. Durante el mismo se hacen incidir piones negativos (partículas formadas por un quark *u* y un antiquark *d*) a 500 GeV de energía en blancos de diamante y platino, con la finalidad de producir y analizar las propiedades físicas de mesones (partículas formadas por un quark y un antiquark) y bariones (partículas con tres quarks) que contengan en su composición interna un quark de tipo *c* (*charm* o encantado). Se dice entonces, que en el E791 se hace física de mesones y bariones “encantados”. A diferencia de los trabajos de colisión de haces, en los que no se cuenta con una energía suficientemente alta como para producir

partículas “muy pesadas”, los experimentos de blanco fijo sirven para analizar fenómenos poco frecuentes y difíciles de medir. Estos trabajos producen resultados que se están confrontando con algunas de las predicciones más sutiles del Modelo Estándar, tales como los fenómenos de polarización de bariones encantados. Cabe en este punto mencionar que la Universidad Autónoma de Puebla (UAP), a través de su grupo de Física de

Altas Energías de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas (FCFM-UAP), es una de las dieciséis instituciones académicas que colaboran en el experimento E791. De estos centros de investigación, once son universidades norteamericanas, dos son brasileñas, una es de Israel y dos instituciones son mexicanas.

La contribución del grupo de investigadores de la UAP ha consistido en el análisis de los datos recolectados por el E791. Usando el equipo de cómputo de la FCFM-UAP y mediante estancias de trabajo en el FERMILAB, nuestros investigadores han logrado elaborar una serie de programas de cómputo que permiten medir la masa y la vida media de los bariones Λ_c . Ade-

más, el grupo poblano formado por los doctores Eduardo Cantoral U. y Arturo Fernández T. y los estudiantes de maestría Eleazar Cuautle y Germán Muñoz, junto con físicos de la Universidad de Mississippi, E.U., están analizando algunos decaimientos del barión Λ_c para medir la polarización de esta partícula “encantada”.

Recursos computacionales del FERMILAB

La física de altas energías depende en gran medida de los avances tecnológicos en el área de la computación. En otras palabras,



* El día 2 de marzo de 1995, científicos del FERMILAB anunciaron el descubrimiento del quark *top*.

la cantidad de física que se puede hacer depende directamente de la cantidad de datos que puedan ser procesados.

El desarrollo de la física de altas energías siempre ha ido acompañado de los últimos avances en la computación. El deseo de captar y analizar el mayor número de eventos en corto tiempo ha hecho que en el FERMILAB se implementen avances tecnológicos de vanguardia en esta área. Por ejemplo, en 1989 se creó el Programa de Cómputo Avanzado que tuvo como finalidad crear los programas y el equipo necesarios para instalar "redes" de computadoras. Una red de computadoras es un conjunto de microprocesadores interconectados mediante una gran computadora que distribuye tareas que son ejecutadas de manera independiente por los demás dispositivos. Este tipo de arquitectura computacional es llamada "computación en paralelo", e incrementa la velocidad de operación y capacidad de almacenamiento de los datos recolectados en un experimento. En la actualidad, existen en el FERMILAB tres redes trabajando ininterrumpidamente desde 1989. El trabajo que realizan es equivalente al que podrían hacer mil cuatrocientas computadoras VAX 11/780.

Además de estos "monstruos", en el FERMILAB existen otros sistemas de cómputo cuyo uso depende de las necesidades de los distintos grupos de trabajo. Por ejemplo, el experimento CDF cuenta con un complejo de computadoras Silicon Graphics conectadas en serie, que analiza los datos generados en el colisionador de haces.

Como cualquier trabajo en física de partículas, el E791 cuenta con dos tipos de sistemas de cómputo: el sistema de adquisición de datos y el sistema de análisis de los datos almacenados. En la recolección de datos se usa un equipo basado en procesadores tipo RISC, que trabaja en paralelo; esto permite leer y digitalizar eventos en décimas de microsegundos. Ese equipo fue desarrollado por el grupo de investigación. Los dispositivos que se usaron para almacenar datos fueron cintas magnéticas de 8 milímetros que son capaces de guardar 2.2×10^9 bites de información. El resultado fue que se pudieron recolectar veinte mil millones de eventos

físicos, almacenados en veinticuatro mil cintas magnéticas.

Actualmente, el E791 se encuentra en la etapa de análisis de esta gran cantidad de datos almacenados. Para ello se emplean cuatro redes localizadas en algunas de las instituciones participantes en esta investigación. Cabe aclarar que una de las redes se encuentra operando en Brasil, un país latinoamericano que ya tiene una presencia significativa en esta área de la física. Además de estos equipos, existen "pequeñas" unidades de trabajo que se usan para desarrollar y poner a prueba los programas creados por los miembros del experimento.

El grado de complejidad que han alcanzado los experimentos que se realizan en la física de altas energías es asombroso. La necesidad de trabajar de manera interdisciplinaria en las diferentes áreas de las ciencias exactas se hace patente cuando se revisa la forma en que se realiza la investigación en esta área de la física. Con la ayuda de la alta tecnología y los avanzados sistemas de cómputo que existen en la actualidad, es seguro que en el FERMILAB se descubran algunas de las partículas elementales predichas por el Modelo Estándar y se hagan las contribuciones más importantes en la Física hasta el término del presente siglo.

Agradecimientos

Deseo agradecer a los miembros del Grupo de Física de Altas Energías de la Facultad de Ciencias Físico Matemáticas de la UAP, el apoyo otorgado para mi estancia posdoctoral en el FERMILAB; y al Dr. Jeffrey Appel, Jefe del Departamento de Física del FERMILAB, por su hospitalidad y apoyo. Este artículo fue realizado con el apoyo parcial de CONACYT mediante el proyecto 1178-E9202.

Bibliografía

- "FERMILAB Status Report", 1990, 1991 y 1992.
- Stoughton, C. y Summers, D.J., "Using multiple RISC CPUs in parallel to study charm quarks", *Computers in Physics*, July-August 1992.
- Fernández, A., "Hadroproduction of charm at FERMILAB E791", *E791 Colaboration, Proceedings of the FERMILAB Meeting of the DPF* (10-15 November 1992).