

La búsqueda afanosa de la violación CP

LOS SUTILES EFECTOS DE LA VIOLACIÓN CP TIENEN ENORMES IMPLICACIONES PARA NUESTRA COMPRENSIÓN DEL UNIVERSO. SIN EMBARGO, EN SU ENCUADRE TRADICIONAL, ES DÍFICIL DE MEDIR. GERRY BAUER EXPLICA LOS ANTECEDENTES DE TAL VIOLACIÓN Y MUESTRA CÓMO UNA SERIE DE NUEVOS EXPERIMENTOS PARA EXPLORAR EL FENÓMENO EN UN NUEVO MARCO NOS PROPORCIONARÁ RESULTADOS MUCHO MÁS AMPLIOS.

(De CERN Courier)

Hace mucho, mucho tiempo, en un Universo muy diferente, había cantidades iguales de materia y antimateria. Al menos, ésta es la idea más popular. Por qué sólo la materia permanece ha sido durante décadas una cuestión desconcertante.

Normalmente pensamos de la antimateria como una especie de materia invertida, que se comporta de la misma forma que la materia pero con propiedades invertidas, como le ocurre a la carga eléctrica. El cómo la naturaleza pudo elegir la materia en vez de la antimateria es un enigma. Una violación, aparentemente confusa, del **Principio de simetría**, llamada CP, puede tener parte de la clave. Al acercarnos al próximo milenio, varios laboratorios es-

Las partículas B vistas por el detector BaBar en el colisionador electrón-positrón PEP-II en SLAC, Stanford. Pronto se abrirá una nueva ventana sobre la violación CP.

tán empeñados en presentar una nueva Era estudiando este fenómeno en un nuevo campo, los *mesones -B-*, partículas que contienen el quinto *quark*, denominado también “belleza”, “bajo”, o simplemente “b”.

El Principio de simetría

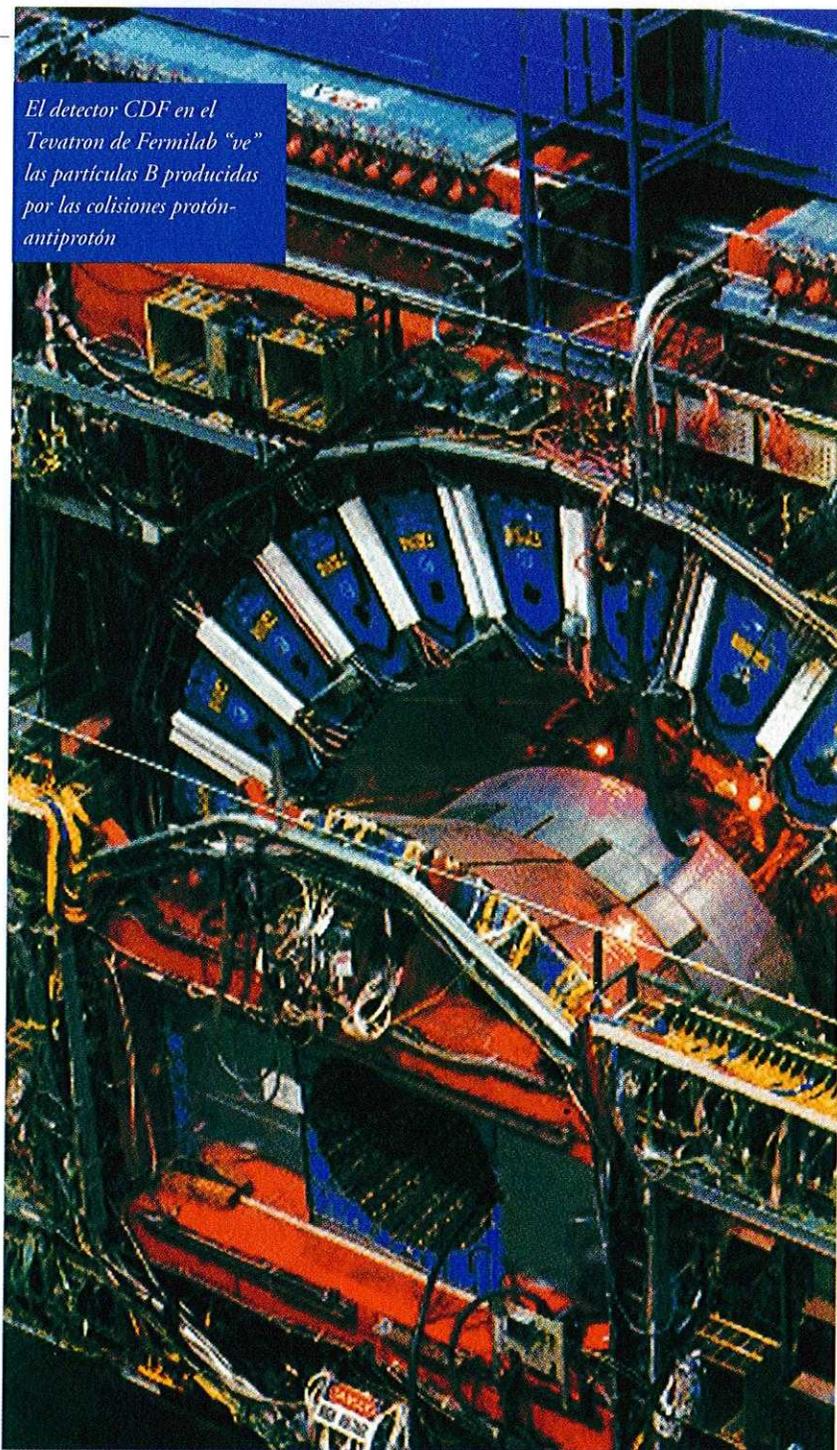
Un tema importante en la Física de las partículas durante el último medio siglo han sido las relaciones de simetría que salieron a la luz a mediados de los 50, cuando se descubrió la violación de la “*paridad*”. La conservación de la paridad es la proposición, aparentemente inocua, que las leyes de la Física son las mismas, o simétricas, cuando se invierten espacialmente, (la operación paridad, P), como en un universo imagen de espejo.

Animados por las observaciones de T. D. Lee y C. N. Yang de que no había evidencia experimental de que las interacciones débiles conservasen la paridad, C. S. Wu y sus colaboradores descubrieron en 1957 que las interacciones débiles no conservan la paridad en la degradación radiactiva del cobalto 60. Un descubrimiento sorprendente fue que las interacciones débiles dependen de la “mano” específica de las partículas. En términos modernos, esto se debe a que las partículas portadoras cargadas W sólo se acoplan de “mano izquierda”.

A esta evidencia pronto siguió que otra simetría, la *conjugación de carga (C)*, también era violada. Es la operación de cambiar las partículas en sus antipartículas y viceversa. Sin embargo, la violación C ocurría de tal manera que la operación combinada de *conjugación de carga y paridad (CP)* restauraba la simetría. Así, la degradación de los antinúcleos de imagen invertida en espejo del cobalto 60, por ejemplo, se comportaban de la misma manera que los del cobalto 60.

Aunque P y C no dan siempre buenas simetrías, la Naturaleza respetaba la operación combinada CP y ésta era el premio de consolación pa-

El detector CDF en el Tevatron de Fermilab “ve” las partículas B producidas por las colisiones protón-antiprotón



ra los físicos o, al menos, así parecía hasta 1964. Menos de una década después de la caída de la simetría de la paridad, los físicos fueron de nuevo sorprendidos cuando la invariancia CP cayó también por los suelos. Un experimento que constituyó un hito histórico, realizado por James Cronin y Val Fitch, vio una rara degradación del *mesón K* neutro que sería imposible si CP fuera una sime-

tría perfecta. El efecto es pequeño ya que sólo se da un caso entre 500.

La violación de la paridad podía ser atribuída a una característica intrínseca de las interacciones débiles, pero la violación CP seguía siendo un misterio: el efecto era muy pequeño y difícil de estudiar. ¿Era una característica sólo de las interacciones débiles, el signo de un nuevo tipo de interacción o algo completamente di-

ferente? Mientras el origen de la violación CP permanecía en el misterio, al poco tiempo, el renombrado físico soviético **Andrei Sajarov** manifestó que la violación CP era un ingrediente necesario para una eventual explicación de cómo un Universo inicialmente simétrico materia-antimateria pudo evolucionar en uno dominado por la materia.

Hizo falta tiempo para que la sugerencia de **Sakharov** fuese tenida en cuenta, pero al final pasó de ser un desagradable obstáculo en la marcha de las interacciones débiles a ser un componente crítico de una explicación de por qué existimos.

¿Mezcla de quarks?

De las muchas ideas ofrecidas para explicar la violación CP, una propuesta notablemente audaz se basaba en la mezcla de quarks. En esta hipótesis, propuesta por **N. Cabibbo** en 1963, el estado del quantum de los quarks con masas definidas es una mezcla de los estados que la interacción débil "ve".

Con sólo cuatro quarks, la matriz de rotación (que transforma una serie de estados de quarks en la otra) queda restringida a números reales y no puede acoger la violación CP. En 1972, ocho años después del descubrimiento de la violación CP, **M. Kobayashi** y **T. Maskawa** propusieron que la mezcla de quarks se generalizase para cubrir tres generaciones de pares de quarks. Con seis quarks, la matriz de rotación, conocida ahora como la matriz **Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM)**, puede tener una fase física que es un número complejo y esto puede encajar para la violación CP observada en los mesones *K* neutros.

Esta atrevida propuesta no atrajo mucha atención. Después de todo sólo se conocían tres quarks en aquella época. Había especulaciones acerca de un cuarto quark, pero incluso el modelo mismo de quarks era contemplado con persistente suspicacia. Y **Kobayashi** y **Maskawa** estaban

proponiendo no un nuevo quark, sino tres...

El panorama empezó a cambiar rápidamente en 1974 cuando se descubrió el *J/psi* y se completó la segunda generación de quarks. En un tiempo sorprendentemente corto, se presentó también la tercera generación **Kobayashi** y **Maskawa**: el leptón *tau* apareció en 1975, y luego el quark-*b* salió a la superficie con el descubrimiento del epsilon en 1977. La espera fue más larga, sin embargo, antes de que su compañero, el quark *top*, apareciera definitivamente en 1995.

La mezcla de quarks se convirtió en una parte integral del Modelo Estándar de la Física de las Partículas y la hipótesis de **Kobayashi** y **Maskawa**, en un candidato preferente para describir la violación CP en el único lugar en que ha sido repetidamente observada: los mesones *K* neutros.

Buscando desesperadamente la violación CP

Uno de los principales objetivos de la Física B ha sido completar el mapa de la matriz CKM. Los mesones *B* son análogos a los mesones *K*: el quark "extraño" es sustituido simplemente por el quark "b". Del mismo modo que los mesones *K* neutros se manifestaron como una poderosa herramienta de trabajo, ahora las miradas se dirigen a los mesones *B* neutros.

Los estudios con los mesones *B* neutros son particularmente útiles porque los resultados son asimismo sensibles a los elementos CKM relacionados con los quarks *top*, (incluso aunque el quark *top* no ha sido producido físicamente). Esto se presenta en particular en el caso de la mezcla de partículas *B* neutras y sus antipar-

tículas, con las que se han llevado a cabo tremendos progresos durante la última década en los colisionadores de alta energía, como el anillo LEP en el CERN y el Tevatron en Fermilab.

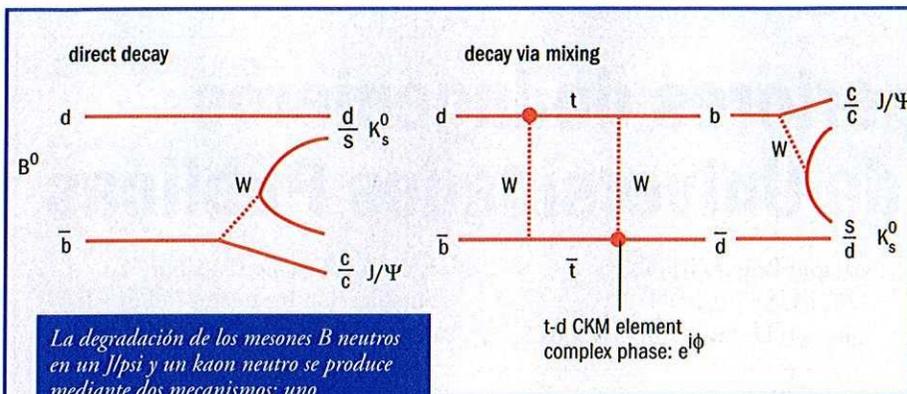
A pesar de estos avances, persiste la fastidiosa cuestión de la violación CP: un efecto mínimo sólo observado en los mesones *K* neutros. Después de 35 años de delicados experimentos con los mesones *K*, el progreso ha sido limitado. La noticia buena es que no sólo los mesones *B* ofrecen un nuevo campo para el estudio de la violación CP, sino que, de acuerdo al modelo CKM, debería haber muchas manifestaciones de la violación y los efectos, en algunos casos, serían amplios. El problema es producir suficientes mesones *B*, e incluso el LEP se queda corto.

La necesidad de obtener más partículas *B* ha ocasionado una proliferación de nuevas instalaciones por todo el globo terráqueo. Está la HERA-B en DESY (objetivo unifilar en un haz de protones), la mejora de prestaciones del venerable anillo electrón-positrón CESR en Cornell, las nuevas factorías dedicadas al electrón-positrón en KEK (Japón) y SLAC (Stanford), el colisionador protón-antiprotón Tevatron mejorado con el nuevo inyector principal, y finalmente el nuevo LHC en el CERN.

Dos caminos para la degradación

La pieza clave de estos estudios es la búsqueda de una asimetría entre las degradaciones de los dos mesones *B* neutros (que son una partícula y una antipartícula uno de otro) en una partícula *J/psi* y un mesón *K* de vida corta. Este modelo "de oro" es

Normalmente pensamos que la antimateria es como una especie de materia invertida que se comporta del mismo modo que la materia pero con propiedades invertidas, como la carga eléctrica. El cómo la naturaleza eligió la materia en vez de la antimateria es un misterio.



La degradación de los mesones B neutros en un J/ψ y un kaon neutro se produce mediante dos mecanismos: uno (izquierda) en el que B decae directamente y otro en el que la partícula neutra B primero “oscila” en su antipartícula, mediante transiciones a quark, antes de decaer. Nótese que en este proceso está involucrado el quark top lo que introduce un término de interferencia entre este mecanismo y la degradación directa. Esto da origen a diferentes ritmos de degradación para los dos mesones B neutros, violando por tanto la simetría CP.

ideal en varios aspectos: el estado resultante tiene propiedades CP bien definidas; la relación entre la asimetría de degradación y los parámetros CKM no está plagada de incertidumbres teóricas, como es el caso en algunas otras degradaciones; y, experimentalmente, la degradación es fácil de identificar cuando la partícula J/ψ decae a su vez en un par de leptones. Se produce también en una proporción relativamente alta, pero aún menor de que una partícula B neutra entre un millar se degrade de esta forma.

La violación CP se manifiesta asimismo por los ritmos desiguales de degradación de las partículas B neutras y sus antipartículas. Este efecto se manifestaría fuertemente a causa de los sutiles efecto de interferencia en las mezclas de las partículas B neutras. Una partícula B neutra puede decaer directamente, o puede oscilar en su antipartícula antes de decaer (ver figura). Se piensa que estos dos caminos diferentes tienen fases ligeramente diferentes, y la interferencia entre ambas produce una ligera asimetría.

Mientras la violación CP clásica en mesones K neutros se produce en la proporción aproximada de una violación cada 500 degradaciones, se espe-

ra que la asimetría, en los momentos de máxima interferencia en el ciclo de oscilación en las partículas B neutras, produzca diferencias en los ritmos de degradación de una cada ocho.

Cuando se observa, esta violación CP no es una oscura sutileza. Aunque un ataque masivo a este problema esté comenzando con la puesta en marcha de las factorías B, las salvas de partida ya han sido disparadas. El experimento OPAL en el LEP en 1998 fue el primero en publicar resultados de una investigación de violación CP con una muestra de alrededor de una docena de degradaciones de “modelos de oro”. Dadas las favorables condiciones de “limpieza” ambiental del LEP y las poderosas técnicas de “rastreo” para distinguir las partículas neutras B de sus antipartículas, el experimento obtuvo una asimetría de 3,2, pero con un error de ± 2 . Matemáticamente, tal asimetría debe situarse entre -1.0 y +1.0.

Además, los errores fueron importantes para las dimensiones del experimento. No ha sido menos intrigante el obtener un número tan elevado de errores, pues es bastante improbable que las medidas fluctúen a un valor tan alto si se conserva el CP. De todos modos, fue un logro impresionante para tan pocos experimentos.

Pisando los talones de OPAL, está el experimento CDF en el Tevatron de Fermilab. La ventaja de un colisionador de hadrones es el ritmo de producción de partículas B mucho más alto. Por las muestras de datos existentes, el CDF fue capaz de reunir varios cientos de degradaciones de

“modelo de oro”. En el verano de 1998, el CDF anunció una medida de asimetría CP de $1,8 \pm 1,1$, usando un método único para separar las partículas neutras B y sus antipartículas. También aquí aparece una asimetría positiva desacomunadamente alta, pero con la mitad de incertidumbre que en los resultados del OPAL. ¿Está apareciendo un nuevo modelo?

En febrero de 1999, el CDF publicó los resultados de un análisis pormenorizado, utilizando todos los datos disponibles y con un minucioso proceso para minimizar el grado de incertidumbre. El resultado preliminar de la asimetría fue de $0,79 \pm 0,43$, físicamente posible. Este resultado es sorprendentemente próximo a la asimetría esperada de aproximadamente 3/4 según las limitaciones experimentales de la matriz CKM. El límite, excluyendo la no asimetría, es sólo un poco mejor que en los resultados anteriores, pero el grado de incertidumbre es la mitad, y es todavía demasiado alto para pretender que la violación CP haya sido finalmente observada fuera del sistema del mesón K, pero está excitantemente próxima. La incertidumbre se reduce y la evidencia aumenta.

Las perspectivas parecen brillantes para la nueva generación de experimentos B de buscar grandes efectos de violación CP y en cuestión de meses se podrían esperar nuevas señales especialmente de las nuevas factorías B en KEK y SLAC. En el 2000, los experimentos Tevatron reanudarán la búsqueda donde la dejó el CDF.

En los años venideros, una extensa serie de experimentos a nivel mundial estudiarán las diversas manifestaciones de la violación y ensayarán rigurosamente el modelo CKM. Esto permitirá ir más allá de la descripción del fenómeno CKM y desvelar algunos de los misterios que rodean la emergencia de un Universo dominado por la materia que resulta tan conveniente para nuestra existencia. ■