El premio Nobel de Física 2015: los avatares de los neutrinos (y II)

Posted on 3 de diciembre de 2015 by Jorge Velasco

Los neutrinos cósmicos

Sigamos con los años sesenta e introduzcamos a nuevos protagonistas que venían de muy lejos y que por entonces empezaban a conocerse con precisión: los *rayos cósmicos*. Partículas de energía muy elevada provenientes del espacio exterior, compuestas sobre todo de protones (en un 90%) y otros núcleos atómicos. Determinar su origen, así como el mecanismo que permite que alcancen energías colosales en algunos casos, se convirtió en un campo activo de investigación que no ha perdido un ápice de interés en la actualidad.

Al chocar en las altas capas de la atmósfera, los rayos cósmicos crean numerosas partículas secundarias, entre las cuales muchos piones y muones, que, como sabemos, se desintegran en neutrinos. Ahora bien, ¿cómo detectar estos neutrinos que debían producirse en buena cantidad?

El descubridor del neutrino, Frederick Reines, fue pionero nuevamente en este campo. La solución: construir un enorme detector subterráneo que observaría el paso de los muones producidos en los escasísimos choques de los neutrinos. El que Reines y sus colaboradores situaron en el fondo de una mina de oro en Suráfrica se convirtió en el mayor del mundo en la época (sesenta metros de longitud y veinte toneladas de instrumentos). El 23 de febrero de 1965 se descubrió el primer neutrino *natural* (es decir, no creado por los seres humanos, como los provenientes de un reactor nuclear). Los neutrinos cósmicos se incorporaban al acervo de partículas predichas y detectadas.

Raymond Davies y el misterio de los neutrinos solares

Volvamos a Davies donde lo dejamos, empezando a tomar datos en 1967. Como diría muchos años más tarde, una vez concluido el experimento: «Ya en la primera toma de datos quedó claro que el número de neutrinos solares medidos era inferior al predicho […]. Presentamos nuestros primeros resultados en una reunión de la Sociedad Estadounidense de Química en 1968… Tras casi treinta años de datos y treinta años de mejora del experimento […], los números no han cambiado mucho: el Sol produce un tercio de los neutrinos esperados.

La discrepancia empezó a conocerse como «El problema de los neutrinos solares». ¿Qué iba mal? ¿Un error de John Bahcall en los cálculos? ¿El experimento de Davies? ¿Algo completamente distinto, esto es, una nueva física? Durante veinte años todas las causas de discrepancia imaginables fueron examinadas por cientos de físicos, químicos y astrónomos. Bahcall afinó sus cálculos; Davies, sus técnicas experimentales: persistía el error. En cuanto a posibilidades más exóticas, en 1971, un joven pero ya brillante físico, Stephen Hawking, sugirió como solución la existencia en la zona central del Sol de ¡un agujero negro! Afortunadamente, en palabras de Bahcall, «El experimento vino en ayuda del pensamiento». Completemos antes el cuadro general que nos permitirá entender la solución del misterioso puzle.

Nacimiento y apogeo de la Teoría Estándar de Partículas Elementales

El hecho más destacado en Física Fundamental a lo largo de los años sesenta y setenta fue la elaboración de la Teoría Estándar de Partículas Elementales (TEPE). Tras un período de tanteos y pasos en falso, desde mediados de los años cincuenta hasta comienzos de los setenta, en el que se descubrieron –la época gloriosa de los detectores llamados cámaras de burbujas– cientos de nuevas partículas y no se sabía cómo clasificarlas ni poner un atisbo de orden en semejante zoo, las cosas fueron clarificándose. Se sucedieron ideas y experimentos, las piezas encajaban en el rompecabezas y, a mediados de los setenta, todo, o casi todo, se entendió. Una elaborada síntesis de teoría y experimento permitió explicar, con muy pocos constituyentes básicos, el conjunto de los procesos observados.

Pero había más aún, mucho más: una explicación de resultados conocidos en un marco más amplio y coherente es siempre una buena noticia, pero la predicción de fenómenos completamente nuevos resulta mucho más decisiva para inclinar el fiel de la balanza del lado de las nuevas ideas. En 1973, el descubrimiento de las corrientes neutras en el Laboratorio Europeo de Física de Partículas (CERN, Ginebra) supuso el espaldarazo decisivo para la teoría, confirmado brillantemente diez años después por la detección, nuevamente en el CERN, del bosón intermediario de la interacción débil, también predicho por la teoría.
El primer Nobel que oficializó esta realidad se otorgó en 1979 a Sheldon Lee Glashow, Abdus Salam y Steven Weinberg «por sus contribuciones a la teoría unificada de las interacciones débil y electromagnética entre las partículas elementales». Varios premios posteriores (1984, 1990, 1999, 2004, 2008) confirmaron aspectos parciales, hasta llegar finalmente al último, en 2013, en el que François Englert y Peter Higgs lo recibieron tras la verificación de la gran predicción que habían hecho ¡cuarenta años antes!: la existencia de una nueva partícula, llamada bosón de Higgs, piedra clave de todo el edificio, que se observó en 2012 en el CERN.

La TEPE describe de manera unificada tres de las cuatro fuerzas (*interacciones*, en el

lenguaje de los físicos) con que se explican todos los procesos conocidos: la *fuerte*, que mantiene a protones y neutrones juntos en el núcleo atómico; la *nuclear débil*, responsable de procesos como la desintegración beta, que motivó la creación del neutrino para ser explicada, y la *electromagnética*, que facilita nuestra vida cotidiana gracias al funcionamiento de los electrodomésticos o las comunicaciones con móviles. Queda la cuarta, la *gravitación*, la más familiar, que –curiosamente– no se ha logrado incorporar a este esquema en lo que constituye la gran asignatura pendiente de la física básica actual.

Existían problemas, por supuesto, como el déficit de neutrinos solares. Pero los físicos de partículas estaban tan entusiasmados con sus éxitos, resonantes en muchos casos, que preferían echar la culpa a errores en el modelo estándar del Sol. Los físicos solares se estarían equivocando en algo, seguro, pensaban. Bastaría posiblemente con modificar alguna cantidad, rectificar por aquí y por allí, y el asunto se arreglaría.

Ser buen científico no garantiza ser buen adivino. El asunto se resolvió, pero el error no provenía de los físicos solares, sino de los *particuleros*, entre quienes me incluyo. Y la solución que vino del horno solar trompeteó al mismo tiempo el anuncio del final de la TEPE quemada, más allá de toda posibilidad de recuperación, por la confirmación experimental de las imprevistas propiedades de los neutrinos que enviaba el astro rey.

Los neutrinos en la TEPE

¿Qué nos dice la TEPE sobre los neutrinos? Primero, que no tienen masa. Los experimentos no han logrado detectarla. La TEPE lo asume como un hecho. Segundo, que vienen en tres sabores: al electrónico y al muónico, asociados al electrón y al muón, se les unió el *neutrino taónico*, descubierto en 2000, asociado a otro «superelectrón», el *tau*, descubierto en 1975, con una masa tres mil quinientas veces superior a la del electrón (el descubridor del *tau*, Martin R. Perl, compartió el premio Nobel con Frederick Reines en 1995). Tercero, que, al desplazarse, su sabor no cambia: un neutrino electrónico conserva su identidad, no se convierte en muónico o tauónico y viceversa. Por último, que existen neutrinos y antineutrinos. El concepto de antimateria fue introducido en 1928 por Paul Dirac: a toda partícula le corresponde una antipartícula, caracterizada por tener la misma masa, pero otras propiedades (como la carga eléctrica) con signo opuesto, predicción confirmada en 1932 al descubrirse el positrón, antipartícula del electrón, a la que siguió en 1955 la del antiprotón, antipartícula del protón. En algunos casos, partícula y antipartícula coinciden, como ocurre con el fotón.

Un nombre: Bruno Pontecorvo

Mientras la TEPE iba afianzándose y Davies acumulaba resultados sobre los neutrinos solares, el mundo de los neutrinos seguía su ritmo propio. Si tuviéramos que mencionar a una figura vinculada a este proceso, al margen de quienes hemos citado, hay un nombre que sobresale por encima del resto: Bruno Pontecorvo.

Fue una figura interesante, controvertida y, a la postre, trágica, que encapsuló las contradicciones de la Guerra Fría. Formaba parte del grupo de jóvenes muy brillantes de Enrico Fermi en los años 1934-1936 en Roma. De origen judío, abandonó Italia por Francia cuando Mussolini se alió con Hitler, y allí trabajó con Irène Curie y Frédéric Joliot, afiliándose al Partido Comunista, al que permaneció fiel toda su vida. Cuando Hitler invadió Francia escapó a Estados Unidos (pasando por España) y en 1943 trabajó en Canadá, en reactores nucleares, durante seis años. Finalmente, en 1949 se mudó al Reino Unido como ciudadano británico. En el verano de 1950 se fue de vacaciones con su familia a Italia. Repentinamente, volaron hacia Helsinki y con ayuda soviética entraron en la Unión Soviética. Cinco años más tarde, apareció en público como miembro del Instituto de Física Nuclear en Dubna, cerca de Moscú. Hasta 1978 no se le permitió viajar al extranjero, aunque siguió residiendo en Dubna.

Realizó tres grandes contribuciones a nuestro entendimiento de las propiedades de los neutrinos. En 1946 propuso que, aunque la probabilidad de que un neutrino choque con la materia es bajísima, la detección es posible si se dispone de muchísimos neutrinos. Se dio cuenta de que un reactor nuclear podría ser una fuente adecuada (Frederick Reines leyó este artículo en 1951). En el mismo artículo imaginó el método radioquímico que emplearía Davies, junto con detalles técnicos: por ejemplo, el empleo de un líquido como blanco. A finales de los años cincuenta sugirió que neutrinos electrónicos y muónicos eran distintos, e ideó el tipo de experimento para producir neutrinos que llevaron a cabo Melvin Schwartz, Jack Steinberger y Leon Lederman. Para concluir a lo grande: tras los primeros resultados de Davies, elaboró, utilizando las propiedades de la Mecánica Cuántica, el primer modelo serio, en 1967, para explicar el misterio de los neutrinos que, a la postre, y con retoques, sería el bueno, en el que *los neutrinos no son estables, a medida que se desplazan en el vacío cambian de sabor, convirtiéndose unos en otros*. Un neutrino electrónico originado en el interior del Sol va *cambiando de sabor* en su viaje a la Tierra hasta convertirse en un neutrino muónico, indetectable con la técnica de Davies. Para ello –lo que tendrá consecuencias devastadoras sobre la TEPE–, *los neutrinos deben necesariamente tener masa*.

Pocos investigadores de neutrinos serían tan merecedores como Pontecorvo de un premio Nobel. Pero murió en 1983 y jamás sabremos si la Academia Sueca se lo habría concedido.

Interludio antes del vibrante final

Volvamos al río Savannah, en el otoño de 1955: al poner en marcha el detector, Frederick Reines no observó de entrada señal alguna: ningún neutrino detectado. Surgió una hipótesis inquietante: ¿y si los neutrinos emitidos eran inestables y se desintegraban antes de recorrer los once metros desde el reactor hasta alcanzar el detector? ¡Ninguno sería observado! A Reines esta idea le pareció *repulsiva*, pero era una posibilidad que no podía excluirse. Pontecorvo ayudó a ir cambiando la semántica: poco a poco, la palabra *estabilidad* fue dando paso a *oscilaciones*.

En 1979, Reines llevó a cabo el primer experimento sobre oscilaciones del neutrino, con resultados negativos. A lo largo de los años ochenta se unieron varios más. La teoría no se quedaba rezagada: además de las oscilaciones en el vacío, estudiadas por Pontecorvo, se completó la idea por Lincoln Wolfenstein en 1978 y los rusos Stanislav Mijeiev y Aleksei Smirnov en 1985: al atravesar materia (como el interior del Sol), las oscilaciones se ven afectadas y hay que tenerlo en cuenta. En su honor se llama el efecto MSW. Las oscilaciones, pues, seguían su camino y empezaban a tomar carta de ciudadanía. Pero sus seguidores constituían aún una parte pequeña de la comunidad científica y los éxitos de la TEPE eran espectaculares. Reines lo reflejó bien en su conferencia del premio Nobel en 1995: «A día de hoy, no hay evidencia definitiva de las oscilaciones de neutrinos».

El primer paso: KamiokaNDE

Aunque la TEPE funcionaba de maravilla, su estructura no resultaba satisfactoria para los puristas que gustan de teorías elegantes, bellas, precisas y sin cabos sueltos. Por ejemplo, no explicaba por qué las masas de las partículas son las que son, por qué hay tres neutrinos y no cincuenta, o por qué las masas del muón y del tau son mucho mayores que las del electrón. Pronto aparecieron candidatas que pretendían dar una respuesta a dichas cuestiones, que pretendían *ir más allá* de la Teoría Estándar. En una de ellas, la Teoría de la Gran Unificación (TGU), el protón no era una partícula estable y al cabo de mucho, mucho tiempo (10.000.000.000.000.000.000.000.000.000 de años; ¡10 seguido de treinta ceros!) se desintegraba en otras. Para verificarla, Masatoshi Koshiba y sus colaboradores idearon un experimento parecido a los que conocemos de Reines y Davies. Un detector subterráneo, en este caso lleno de tres mil toneladas de agua, en el fondo de la mina de zinc de Mozumi, en Japón, que se valía de la técnica llamada Cherenkov, bien conocida de los físicos. Como el protón es un nucleón (el otro nucleón es el neutrón), el experimento se bautizó como KamiokaNDE (NDE: *Nucleon Decay Experiment*, Experimento de Desintegración del Nucleón).

Pero el ser humano propone y la naturaleza es lo que es. KamiokaNDE empezó a tomar datos en 1983, sin observar ninguna desintegración de un protón. Al intentar mejorar este resultado negativo, que contribuyó de manera importante al abandono de la TGU, los

investigadores se encontraron con una vía sin salida. La mejora era imposible, puesto que el detector estaba invadido por neutrinos atmosféricos que enmascaraban la señal esperada de la desintegración del protón. Como se dice en las escuelas: convierte tu problema en una solución. O lo que es lo mismo: ¡reciclemos el detector para que mida neutrinos! Así fue: Koshiba y sus colegas se dieron cuenta de que, mejorando la instrumentación, obtendrían un estupendo detector de neutrinos solares, creando KamiokaNDE-II en 1985. Su nuevo objetivo era entender la discrepancia observada en el experimento de Davies: ¿por qué se medían menos neutrinos solares de los esperados?

Los resultados anunciados por KamiokaNDE en 1989 confirmaban los resultados de Davies de hacía veintiún años. Con una salvedad: se medían menos neutrinos provenientes del Sol de los esperados, cierto, pero la discrepancia era menos severa que en el caso de Davies. KamiokaNDE observaba la mitad de los neutrinos esperados. En la década siguiente varios experimentos realizados con técnicas diferentes confirmaron estos resultados. Estaba claro que *faltaban* neutrinos solares, aunque en diferentes proporciones según los experimentos, lo que no acababa de arreglar las cosas. ¿El problema estaba solucionándose o, por el contrario, complicándose?

Pero KamiokaNDE había ido más lejos. Estudiando con cuidado los neutrinos atmosféricos producidos por los rayos cósmicos para evitar que falseasen la medida de los neutrinos solares, encontraron un resultado sorprendente: de los dos tipos de neutrinos atmosféricos producidos –electrónicos y muónicos–, se medían menos muónicos de los previstos, lo que Masatoshi Koshiba denominó la *anomalía de los neutrinos atmosféricos*, que enseguida se interpretó como causada por las oscilaciones de neutrino: los neutrinos muónicos se convertían en tauónicos, que no medía el detector. Pero la precisión no era suficiente para que pudiera catalogarse como un descubrimiento. Había que mejorarla para estar seguros.

El segundo paso: Super-KamiokaNDE

El paso siguiente consistió en construir un detector más grande: Super-KamiokaNDE (SK), que contenía cincuenta mil toneladas de agua muy pura, estuvo listo en 1996.

En 1998, Takaaki Kajita presentó los resultados en el congreso bianual más importante dedicado a los neutrinos, que se celebraba aquel año en Japón, que confirmaban sin lugar a dudas los resultados anteriores: *existía un déficit de neutrinos atmosféricos*, que se interpretó enseguida como *la prueba evidente de la existencia de las oscilaciones de los neutrinos*, provocando una cerrada ovación de los asistentes. Las consecuencias sobre el misterio de los neutrinos solares era obvia: la causa tenía que ser la misma en ambos fenómenos. Pero también había que probarlo.

La estocada final: Sudbury Neutrino Observatory

El 18 de junio de 2001, una colaboración internacional dirigida por Arthur McDonald, llamada Sudbury Neutrino Observatory (SNO), anunció que había resuelto el misterio de los neutrinos solares. Su detector era un gran tanque con mil toneladas de agua pesada (D2O), situado en una mina de níquel en Sudbury (Ontario, Canadá). SNO estudió, al igual que Kamiokande y SK, los neutrinos solares, pero con una técnica distinta.

Combinando sus resultados con los que había obtenido Super-KamiokaNDE, SON fue capaz de determinar el número total de neutrinos, el cual ¡coincidía con el número predicho por los modelos teóricos del Sol! Del total, los neutrinos electrónicos constituían sólo un tercio. Este resultado corroboraba las medidas de Davies. Los hallazgos del SNO fueron confirmados por experimentos posteriores.

Teníamos, treinta y cuatro años después, la prueba tangible buscada desde 1968, cuando Davies anunció sus primeros resultados. No faltaban neutrinos, sino que la mayor parte de los neutrinos producidos en el interior del Sol, bajo la forma de neutrinos electrónicos, aparecían bajo otro sabor al ser detectados en la Tierra. Estaban presentes, pero como neutrinos muónicos o tauónicos, más difíciles de detectar. Es decir, oscilaban de un sabor a otro, cambiando su identidad.

La prudencia de la Academia Sueca

La Academia, en aquel año de 2001, lo tenía menos claro, sin embargo, y apostaba por la precaución, ya que al año siguiente, 2002, fueron Raymond Davies y Masatoshi Koshiba quienes obtuvieron el premio Nobel por «haber creado un nuevo campo: la astronomía de neutrinos». Y proseguía la Academia: «El Modelo Estándar de Partículas tendrá que modificarse si los neutrinos tienen masa».

Trece años después, parece que la Academia sí lo tiene claro y le ha llegado finalmente el turno a Takaaki Kajita y Arthur McDonald porque «Los dos experimentos descubrieron que los neutrinos cambian de identidad […] la conclusión es que los neutrinos deben de tener masa, aunque sea muy pequeña […], las observaciones muestran claramente que la TEPE no puede ser la teoría completa de los constituyentes fundamentales del Universo».

El largo y sinuoso camino se había acabado… ¡de momento! Los neutrinos tienen un gran futuro por delante y seguro que los encontraremos pronto nuevamente en este blog ya que, como concluye la Academia: «Nuevos descubrimientos de sus más profundos secretos cambiarán seguramente nuestra comprensión actual de la historia, estructura y futuro

destino del Universo».