



## LOS NEUTRINOS PESADOS

Roberto Martínez  
Universidad Nacional de Colombia,  
Departamento de Física,  
Facultad de Ciencias

Todos los experimentos que se realizaron en el siglo pasado para medir la velocidad de la tierra con respecto al éter, medio material necesario para entender la propagación de las ondas electromagnéticas y determinar la velocidad de la luz en el "vacío", fueron fallidos.

**MUCHAS HIPOTESIS SE TEJERON INTENTADO explicar los resultados experimentales.** Por ejemplo, para comprender los resultados fallidos del experimento de Michelson y Morley se propuso la hipótesis de que los cuerpos se contraían cuando se movían con respecto al éter.

Sin embargo, fue necesario esperar hasta 1905, cuando un empleado de patentes de Berna, Albert Einstein, propuso la Relatividad Especial la cual permitió establecer consistentemente las leyes del movimiento de los cuerpos y fenómenos electromagnéticos.

Los postulados propuestos por A. Einstein afirman que para todos los observadores que se mueven a velocidad constante las leyes para describir los fenómenos de la naturaleza son iguales y la velocidad de la luz en cualquiera de estos sistemas de referencia es la misma e independiente de la velocidad del observador.

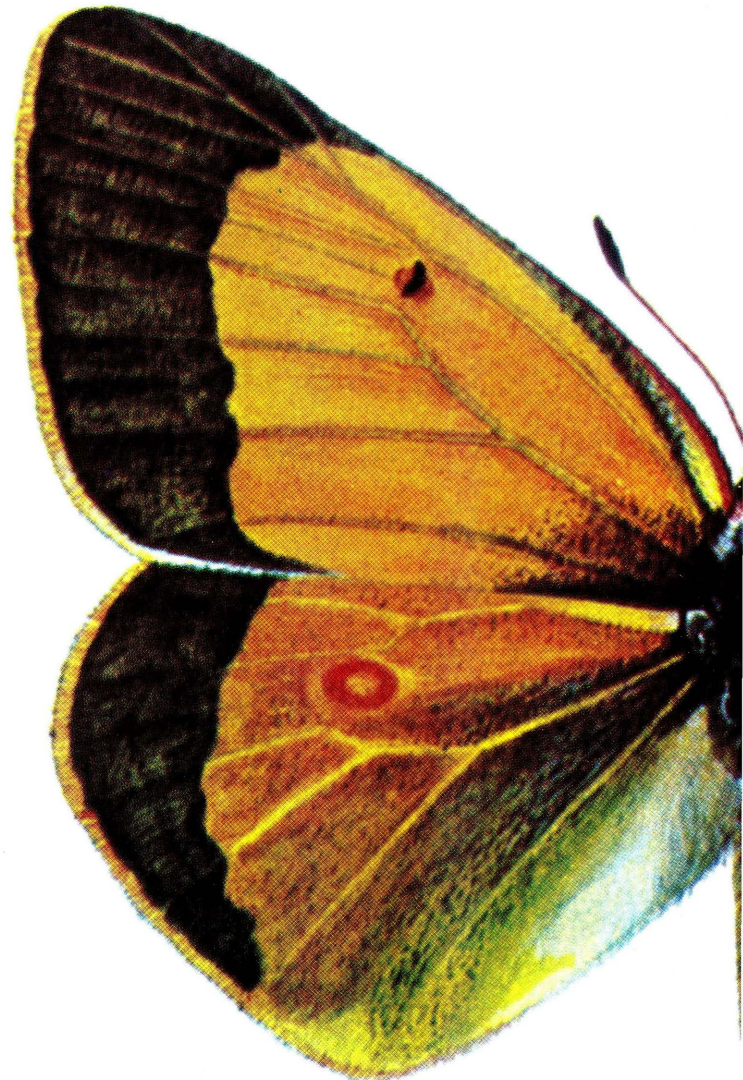
Simultáneamente se presentaron algunos fenómenos que no se podían explicar con base en la mecánica newtoniana ni en las leyes del electromagnetismo, tales como: la energía radiada por un cuerpo negro, algunos espectros de emisión, los experimentos de dispersión de partículas realizados por E. Rutherford, etc.

Muchos de estos nuevos resultados experimentales se lograron entender a partir de 1926 cuando E. Schrödinger propuso la ecuación que permitía conocer la evolución temporal de un sistema cuántico o describir la física del átomo donde la mecánica newtoniana ya no es válida. Una característica de esta ecuación es que la descripción del mundo cuántico se hace con una función  $\Psi$  la cual se interpreta como la amplitud de probabilidad de que ocurra un evento, perdiéndose el ideal laplaciano y de la Física Clásica de tener un mundo completamente determinista.

Dicha ecuación no era consistente con los postulados de la relatividad especial, es decir, no era la ecuación adecuada para describir el mundo independientemente del observador. P.M. Dirac, en 1928, encontró una ecuación que describía el mundo cuántico y además respetaba los postulados de la nueva teo-

ría propuesta por A. Einstein. La teoría propuesta por Dirac trajo consigo muchas sorpresas. Predecía la existencia de estados de energía negativa lo cual fue un reto para Dirac al tratar de entender desde el punto de vista físico dichas soluciones.

Un electrón tiene energía positiva, carga electromagnética negativa y un número cuántico adicional llamado espín. La ecuación de Dirac predice la exis-



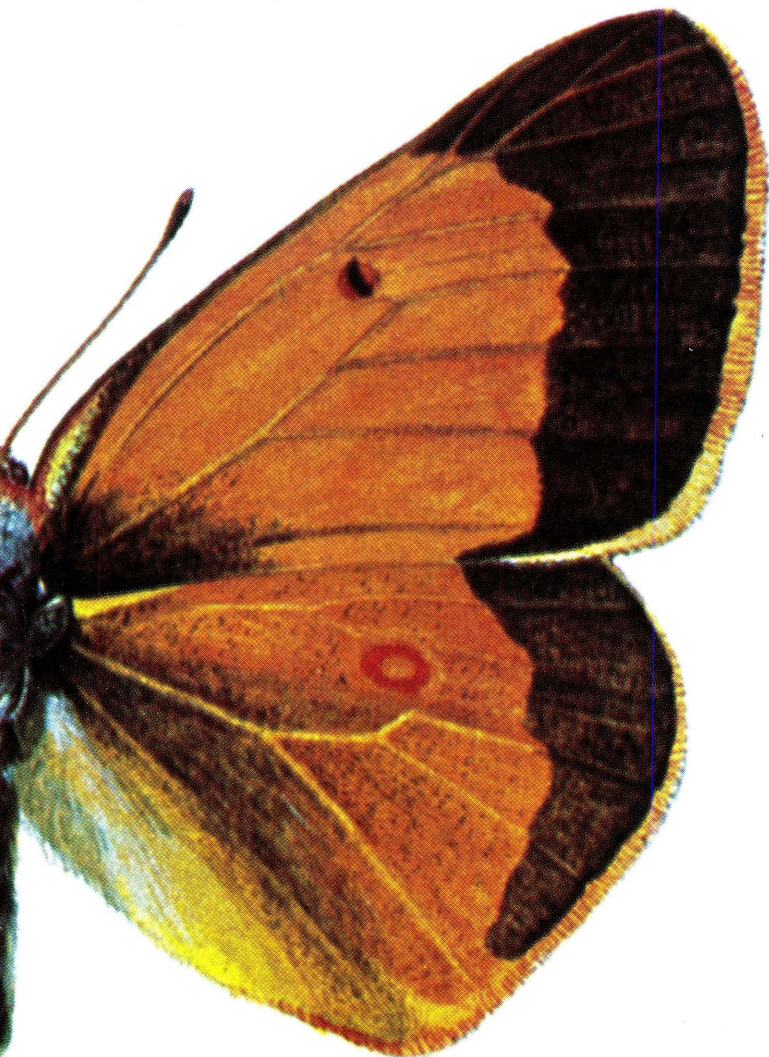
tencia de un estado físico de energía negativa, carga electromagnética positiva y espín en sentido contrario al del correspondiente electrón. A este estado cuántico se le llama positrón y se le conoce como la antipartícula asociada al electrón.

Para garantizar la estabilidad de la materia, Dirac propuso que todos los estados de energía negativa estaban ocupados por electrones y cuando un electrón en el átomo de Hidrógeno está en el estado fundamental o el estado de menor energía, no puede caer en uno de energía negativa porque este ya está ocupado y el principio de exclusión del Pauli prohíbe que haya más de dos electrones en el mismo estado de energía.

Cuando todos los estados de energía negativa están ocupados, se dice que el átomo se encuentra en el estado vacío. Al sacar un electrón del estado vacío queda un "agujero" el cual se comporta como la antipartícula asociada al electrón, el positrón.

Empezando la década de los años treinta ya se había estudiado el problema de la radiación y desintegra-

*El cuerpo de la mariposa respeta la simetría de la paridad.*



ción de los átomos, entre los cuales estaba la desintegración  $\beta$ . Del espectro de energía de la desintegración  $\beta$  parecía concluirse que la energía total no se conservaba, lo cual ponía en duda el principio de conservación de la energía que parecía inamovible. Mientras que varios físicos que llegaron a hacer grandes aportes dudaron de dicho principio de conservación; otros investigadores más "conservadores", como Wolfgang Pauli, sugirieron que en la desintegración  $\beta$  debería existir una partícula que se llevara la energía faltante (1).

En la desintegración  $\beta$  un neutrón decae en un protón, un electrón y la misteriosa partícula necesaria para balancear la ecuación de conservación de la energía: el neutrino, como lo llamo Enrico Fermi para decir que era como un neutrón muy liviano.

Sólo en 1955, F. Reines y C. Cowan en los Alamos, lograron detectar el neutrino; su masa era tan pequeña que incluso se podía considerar igual a cero.

En el desarrollo de las ideas hay un hecho que destacar. En 1956 los físicos chinos Chen Ning Yang y Tsung Dao Lee propusieron, sobre la base de consideraciones teóricas, que la paridad debería ser una simetría rota, lo cual significa que cuando ocurre un fenómeno en la naturaleza, el fenómeno equivalente a reflejar el anterior en un espejo, no puede ocurrir. Podemos creer que una persona respeta la simetría de paridad, porque anatómicamente la parte izquierda al reflejarla en el espejo "coincide" con la parte derecha; sin embargo, orgánicamente ésta se viola porque el corazón está localizado en el lado izquierdo.

En 1957 la señora Wu montó un experimento con cobalto radiactivo y mostró que efectivamente en la desintegración  $\beta$ , mediada por la interacción o fuerza débil, se viola la paridad.

El átomo de cobalto se coloca en un campo magnético y al ocurrir el decaimiento  $\beta$ , se desintegra un neutrón del núcleo en protón, electrón y neutrino. Si la paridad fuera una buena simetría se esperaría que saliera igual número de neutrinos en dirección del campo magnético como en sentido contrario, sin embargo en los resultados experimentales la gran mayoría de los neutrinos sale en la dirección del campo magnético.

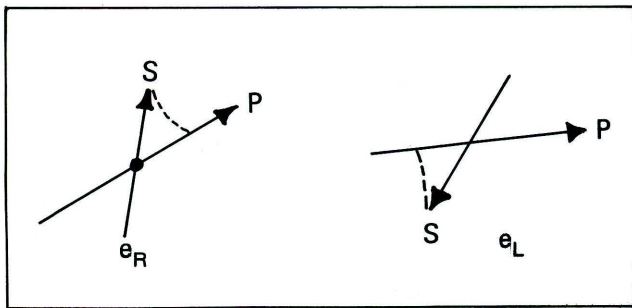
Otro hecho importante en la década de los años 50 fue la dispersión o choque de electrón-protón. A bajas energías el choque es similar al de dos bolas de billar, pero cuando se aumenta la energía, el electrón puede vencer cualquier barrera de fuerzas y penetrar en el interior del protón. Los resultados experimentales indicaron que el choque se parecía al de una partícula con muchas otras, similar al que ocurre en un juego de billar-pool, como si el protón se desintegrara.

Los anteriores experimentos llevaron a los físicos a pensar que el protón tenía estructura interna.

**Podemos creer que una persona respeta la simetría de la paridad, porque anatómicamente la parte izquierda al reflejarla en el espejo "coincide" con la parte derecha; sin embargo, orgánicamente esta se viola porque el corazón está localizado en el lado izquierdo.**

Siguiendo este orden de ideas, M. Gell-Mann y G. Zweig (2), lograron construir todas las partículas que se conocían en la época a partir de solamente tres partículas fundamentales llamadas, por Gell-Mann, quark up, quark down y quark strange.

De otra parte Glashow, Weimberg y Salam desarrollaron un modelo donde unificaban las interacciones débiles y electromagnéticas, conocido como el Modelo Estándar de las interacciones electrodébiles. En dicho modelo la interacción débil actúa sobre la componente de quiralidad izquierda e ignora la componente de quiralidad derecha de la partícula. La quiralidad es una variable física adicional necesaria para describir las partículas cuánticamente y corresponde a la proyección del espín en la dirección del momento lineal.



Componente de quiralidad derecha e izquierda del electrón.

Según el Modelo Estándar, los fenómenos observados en la naturaleza hasta la fecha, se pueden entender con el siguiente conjunto de partículas elementales:

$$\begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_L \\ s_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t_L \\ b_L \end{pmatrix} u_R \quad d_R \quad c_R \quad s_R \quad t_R \quad b_R$$

$$\begin{pmatrix} \nu_{eL} \\ e_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{\mu L} \\ \mu_L \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_{\tau L} \\ \tau_L \end{pmatrix} e_R \quad \mu_R \quad \tau_R$$

Los símbolos  $U_L$  y  $U_R$  denotan los quarks up de quiralidad izquierda y derecha, respectivamente. De igual manera  $c$ ,  $s$ ,  $t$  y  $b$  representan el quark charm, quark strange, quark top y quark bottom, respectivamente, los cuales fueron introducidos posteriormente.

Se ha asumido que los neutrinos compañeros del electrón, muón y tau no tienen componentes de quiralidad derecha, lo cual es consecuencia de asumir que son partículas sin masa. Los físicos han hecho varios intentos para tratar de hallar una cota a la masa de los neutrinos o medir una componente de quiralidad derecha.

Se han propuesto neutrinos masivos para completar la densidad de materia necesaria para que el Universo sea cerrado como la superficie de una esfera y tener un modelo cosmológico correspondiente al big bang el cual se expande y contrae como se infiere de algunas observaciones astronómicas. La cantidad de materia en el Universo se puede medir a partir de la energía lumínica que llega a la tierra. Esta energía es menor que la cantidad que se esperaría para tener el modelo de big bang descrito anteriormente.

Los científicos han supuesto que existe materia que no emite radiación, conocida como materia oscura. Hay muchos candidatos para materia oscura en el Universo, entre ellos están los neutrinos.

Para tener un modelo cosmológico big bang, la masa de los neutrinos existentes en el Universo debe satisfacer la cota (3)

$$\sum_i m_{\nu_i} \leq 40 \text{ eV}$$

donde  $i$  indica que es necesario considerar la contribución de todos los neutrinos existentes actualmente, es decir, aquellos que tienen una vida media mayor que la edad del Universo y eV es una unidad para medir la masa de las partículas.

Otro de los experimentos cruciales que ha obligado a postular una masa para los neutrinos es el flujo de los neutrinos solares producidos en las reacciones termonucleares del sol (4).

La cantidad de neutrinos detectados en la tierra es una tercera parte del valor predicho con el modelo estándar solar. Una de las posibles explicaciones es que el momento magnético del neutrino interactúa con los intensos campos magnéticos solares cambiando el carácter de este, el cual no puede ser detectado en el laboratorio terrestre (5). Como el momento magnético es

proporcional a la masa del neutrino, la única forma de encontrar una explicación a esta discrepancia es asumiendo que estos son masivos.

Otra posibilidad para entender la discrepancia entre el flujo de neutrinos solares es suponer que los neutrinos asociados al  $e$ ,  $\nu$  y  $\tau$  se mezclan entre sí y existe una probabilidad de que el neutrino asociado al electrón, el cual es detectado en el experimento terrestre, se convierta en otra clase de neutrino, ya sea el muónico, taónico u otra clase de neutrino (6).

Varios experimentos basados en el decaimiento  $\beta$  se han propuesto para tratar de medir su masa o encontrar una cota para esta.

John Simpson de la Universidad de Guelph en Ontario (6) ha estudiado cuidadosamente el decaimiento  $\beta$  del tritio, el cual se puede pensar como un átomo de helio que le falta un neutrón en su núcleo, y a partir del espectro de energía del electrón, el cual se puede medir con mucha precisión, se ha tratado de determinar una cota para la masa de este. De los resultados experimentales se infiere que el neutrino tiene una masa del orden de 40 eV, pero en el uno por ciento de ocasiones la masa medida para el neutrino es de 17000 eV (17KeV). A dicho neutrino se le ha llamado el neutrino pesado y ha sido una sorpresa para la comunidad internacional.

Cabe destacar que J. Simpson viene realizando los experimentos desde 1985 y en esa época la comunidad no creía en él. Recientemente ha presentado de nuevo sus resultados y los físicos se han interesado por tratar de encontrar modelos teóricos que puedan explicarlos.

Si se supone la hipótesis de que existe una mezcla entre los neutrinos, el decaimiento  $\beta$  se puede entender como se observa en la figura anterior, donde la cruz indica la probabilidad de que el neutrino electrónico, 40 eV, se convierta en un neutrino pesado de 17 KeV. Como las mediciones muestran que el neutrino pesado se

presenta en el uno por ciento, este ángulo de mezcla debe ser proporcional a 0.01.

La razón por la cual anteriormente no se había reportado este resultado experimental era porque la precisión en las mediciones borraba esta fracción tan pequeña que se obtiene en el laboratorio.

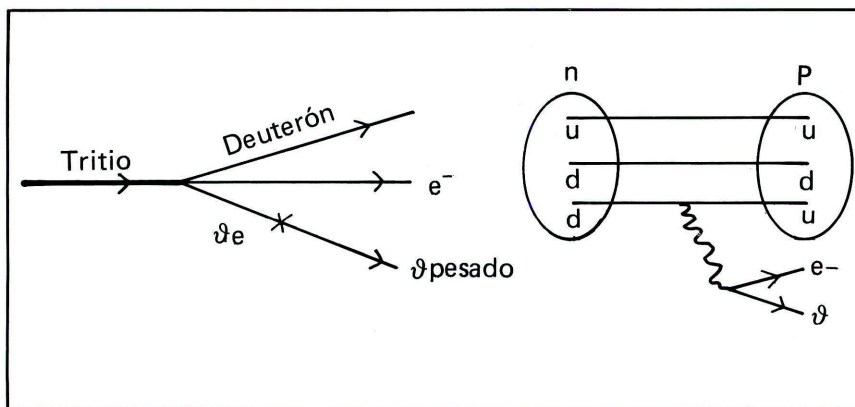
La existencia de neutrinos pesados hace pensar que el Modelo Estándar de las interacciones electrodébiles es incompleto a pesar de haber sido sometido a pruebas experimentales, las cuales coinciden con los valores predichos por el modelo.

Los investigadores se ven en la necesidad de introducir nueva física para entender todos los hechos relacionados con la masa del neutrino, en especial este resultado experimental reciente de 17 KeV.

Agradezco a Colciencias por el apoyo económico que me ha brindado para llevar a cabo mis actividades de investigación. ●

#### CITAS

- (1) Georges Gamow. Bibliografía de la Física. Alianza Editorial. Madrid (1980).
- (2) Herald Fritzsch. Los quarks, la materia prima de nuestro universo. Alianza editorial, Madrid (1984).
- (3) E. Cowsik, J. McClelland, Phys. Rev. Lett. 29, 669 (1972).
- (4) E. Firesman, T. Cleveland, R. Davis, J. Rowley, Solar Neutrino and Neutrino Astr. Amer. Inst. of Phys. Conf. Proc. No. 126. – R. Davis et. al. Phys. Rev. Lett. 20, 1205 (1968).
- (5) M. Voloshin, M. Vysotsky, L. B. Okun. Sov. Phys. JETP 64, 446 (1986) – R. Cisneros. Astrophys. Space Sci. 10, 87 (1971).
- (6) J.J. Simpson. Phys. Rev. Lett. 54, 1081 (1985) – J.J. Simpson, A. Hime. Phys. Rev. D. 39. 1825 (1985).



*Decaimiento del Tritio en deuterón, electrón y neutrino - decaimiento  $\beta$  a nivel de partículas elementales.*