

I) Constituyentes fundamentales de la materia

	quarks		leptons	
1ª generación	u	d	e	ν_e
2ª generación	c	s	μ	ν_μ
3ª generación	t	b	τ	ν_τ

II) Situación en los años 20

e^- descubierta en 1899 por J.J. Thomson

p núcleo del átomo de hidrógeno $p \equiv (uud)$

$(A, Z) = A \text{ protones} + (A-Z) \text{ electrones}$
núcleo.

III) Nuestra historia empieza a finales de 1930 y las principales dificultades del modelo anterior eran

III i) Desintegración β : $(A, Z) \rightarrow (A, Z+1) + e^-$

$$\Rightarrow E_e = \frac{c^2}{2M_i} (M_i^2 - M_f^2 + m_e^2)$$

En realidad el espectro de los electrones emitidos es continuo con energías $[0, E_{\max}]$, $E_{\max} \approx E_e$.

III ii) Falsa estadística del $^{14}_7\text{N}$ y ^6_3Li . De acuerdo con II) debían ser fermiones, mientras que se sabía que eran bosones (espectro de bandas del N_2 aseguraba que $^{14}_7\text{N}$ tenía spin 1)

III iii) El protón y electrón tienen un momento magnético

$$\mu_e = 1.0011596521884(43) \frac{e\hbar}{2m_e c}$$

$$\mu_p = 2.792847386(63) \frac{e\hbar}{2m_p c}$$

$\Rightarrow \mu_e \gg \mu_p$ ¿Por qué el momento magnético de un núcleo es de orden de μ_p ?

IIIc) No es posible encontrar un pozo suficientemente profundo y estrecho para confinar partículas tan ligeras como el electrón en una región tan pequeña como el núcleo.

IV) N. Bohr (Faraday Lecture 1932) "Sin embargo, en el estado actual de la teoría atómica hay que decir que no tenemos ningún argumento, empírico o teórico, para defender el principio de la conservación de la energía en el caso de las desintegraciones beta; más aún, el intentar hacerlo, nos conduce a complicaciones y dificultades --- Del mismo modo que el dar cuenta de los aspectos de la constitución atómica, esenciales en la explicación de la materia, nos exige renunciar a la idea clásica de causalidad, así también las características de la estabilidad atómica nos pueden obligar a renunciar a la idea misma de balance energético --- Lo indico sólo para subrayar que en la teoría atómica, a pesar de todo el proceso reciente, hemos de estar preparados para nuevas sorpresas."

V) P. Debye, refiriéndose al problema del espectro continuo, dice "Lo mejor, como con los nuevos impuestos, es no pensar en ello en absoluto". (1930)

VI) W. Pauli: Zürich 04-12-1930 carta dirigida a los asistentes a una reunión de físicos que tuvo lugar en Tübingen.

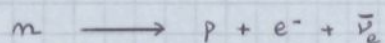
Queridos Sras y Sres radioactivos:

Como el portador de estas líneas, a quien les pido que escuchem amablemente, explicará con más detalle, considerando la "falsa" estadística de los núcleos de N-14 y Li-6, así como también el espectro β continuo, he encontrado un remedio desesperado para salvar el "teorema de intercambio" de la estadística y el teorema de la energía. A saber, la posibilidad de que pudieran existir en el núcleo partículas eléctricamente neutras que deseen

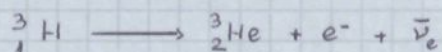
llaman neutrones, que tienen spin $1/2$ y obedecen al principio de exclusión, y que además difieren de los cuanta de luz en que no se mueven con la velocidad de la luz: La masa del neutrón debe ser del mismo orden de magnitud que la masa del electrón y, en cualquier caso, no mayor que 0.01 la masa del protón. - El espectro β continuo sería comprensible con la hipótesis de que en la desintegración β un neutrón es emitido juntamente con el electrón, de tal forma que la suma de las energías del neutrón y del electrón es constante."-----

VII) En febrero de 1932, J. Chadwick descubre el neutrón y, la propuesta de E. Fermi, la nueva partícula postulada por W. Pauli se pasa a llamar neutrino

VIII) En 1933, E. Fermi, usando el formalismo de la teoría cuántica de campos, propone una teoría de la desintegración β , que incorporaba el neutrino y era notablemente sencilla, exitosa y de muy larga vida. Con esta teoría el neutrino se convertía en una partícula más. La desintegración β de un núcleo era debida a que un neutrón del mismo se desintegraba



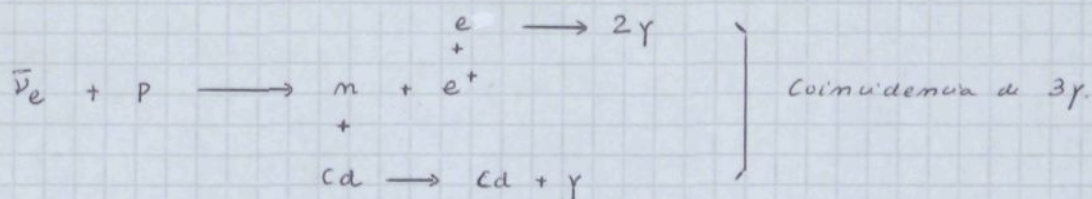
IX) La masa del neutrino (o mejor del antineutrino) se puede determinar en principio del estudio del espectro de los electrones emitidos en la desintegración β



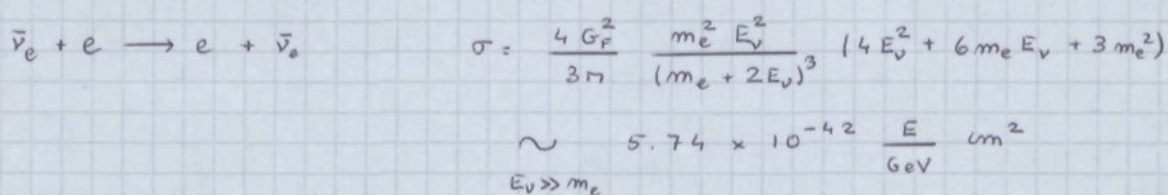
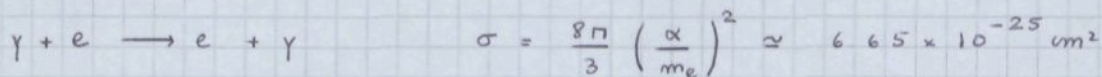
pues $\Delta \equiv M({}^3_1\text{H}) - M({}^3_2\text{He}) = 0.529562(17) \text{ MeV}/c^2$ muy pequeña. El estudio de la zona de energías más altas de los electrones emitidos da, en principio, información sobre la masa del neutrino. Hoy día todo lo que sabemos es que

$$m_{\nu_e} < 7.3 \text{ eV}/c^2 \approx 1.4 \times 10^{-5} m_e$$

x) C.L. Cowan, F. Reines, F.B. Harrison, H.W. Krause y A.D. McGuire detectaron, en 1956, por primera vez antineutrinos usando el reactor nuclear de Savannah River



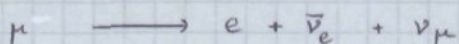
XI) Seccíomes eficaces



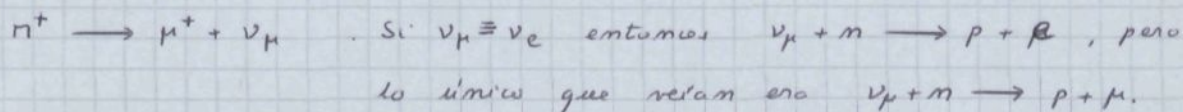
El recorrido libre medio de un neutrino de 1 GeV en un material como la Tierra es $\lambda = 6 \times 10^8$ km.

x11) Cargas : $L_e^{(e)} = +1$ $L_{\nu_e}^{(e)} = +1$ (Carga leptónica electrónica)

xiii) En 1936, S.H. Neddermeyer y C.D. Anderson anunciaron que, en la radiación cósmica, habían encontrado una nueva partícula, que hoy día conocemos con el nombre de muón. Esta nueva partícula se desintegra, prácticamente siempre, según el canal



En 1962, J. Steinberger y otros prueban experimentalmente que $\nu_\mu \neq \nu_e$:


$$L_{\mu}^{(\mu)} = +1, \quad L_{\nu_{\mu}}^{(\mu)} = -1 \quad (\text{carga leptónica muónica})$$

$$m_{\nu_\tau} < 0.27 \text{ MeV}$$

XIV) En 1975, M.L. Perl descubre un nuevo leptón: el τ , que también tiene un neutrino asociado ($N_c \neq \nu_\mu$, $\nu_e \neq \nu_\tau$)

$$m_{\nu_\tau} < 35 \text{ MeV}$$

Nuevos números de carga leptónicas - tauónicas.

XV) No hay más familias

XVI) La medida precisa de la anchura del Z^0 asegura que $N=3$

XVII) Anteriormente se sabía que, usando el modelo cosmológico standard, los datos sobre la abundancia de helio primordial implicaban que $N \leq 4$.

XVIII) ¿Tienen los neutrinos masa nula? De la misma forma que existe una radiación de fondo formada por fotones con $T = 2.7 \text{ K}$ existe una gas de neutrinos a una temperatura de $\bar{T} = 1.9 \text{ K}$ que implica una densidad de neutrinos de 109 N/cm^3 y que contribuyen a la densidad media del universo

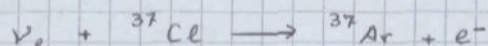
$$\rho_\nu = 109 \sum_\nu m_\nu \text{ cm}^{-3}$$

$$\Rightarrow \sum_\nu m_\nu c^2 \lesssim 100 \text{ eV} \quad (\text{si todos son ligeros})$$

Otros argumentos cosmológicos implican la imposibilidad de neutrinos estables con masas comprendidas entre unos pocos MeV y 1 GeV.

XIX) Oscilaciones de neutrinos. En la teoría electrodébil standard, que describe con sorprendente aproximación todos los datos conocidos de estas interacciones se supone que los neutrinos ν_i ($i=e, \mu, \tau$) asociados a los leptones ℓ_i ($i=e, \mu, \tau$) no tienen masa. Supongáse que los neutrinos fueran masivos, entonces puede muy bien suceder que los campos de neutrinos con masas bien definidas no fueran los que representan ν_i , sino combinaciones lineales de los mismos. En este caso aparecerían oscilaciones de neutrinos, es decir que un neutrino electrónico, creado en una desintegración del neutrón, se propagaría pasando por los distintos tipos de neutrinos.

XVIII) El problema de los neutrinos solares. En 1967, R. Davis et al. montaron un detector de neutrinos solares. El detector consistía de 615 toneladas de percloroetileno (C_2Cl_4) situado a una profundidad de 1500 m en la Homestake Mine en South Dakota. Pretendían detectar neutrinos procedentes del Sol mediante la reacción



La captura de neutrinos al estado fundamental del ${}^{37}\text{Ar}$ tiene un umbral de 0.814 MeV, pero, con mucho, la captura más probable es al primer estado excitado del ${}^{37}\text{Ar}$ cuyo umbral es 2.12 MeV. Los neutrinos que nos llegan del Sol son principalmente (ni 90%) debidos al proceso $p + p \longrightarrow d + \nu_e + e^+$, pero $E_{\nu_e} \in [0, 0.42 \text{ MeV}]$ y no son útiles en este experimento. En este experimento se detectan aproximadamente un 74% de los neutrinos que provienen ${}^8\text{B} \longrightarrow {}^8\text{Be} + e^+ + \nu_e$ pues $E_{\nu_e} \in [0, 10.6 \text{ MeV}]$. Cálculos basados en el modelo standard del Sol dan para este experimento un resultado $(8.0 \pm 3.3) \text{ SNU}$ donde una SNU se define como una captura por cada 10^{36} átomos y por segundo. Es de esperar que en el detector se transformen 1 o 2 átomos de Cl en Ar cada día.

Después de más de 20 años de observaciones el flujo medio de neutrino hallado es $(2.3 \pm 0.3) \text{ SNU}$, esto es un factor de $1/3$ a $1/2$ menor que el esperado.

Este resultado ha sido confirmado por un método totalmente distinto: El estudio de la reacción $\nu_e + e^- \longrightarrow e + \nu_e$ y estudiando el retroceso del electrón saliente. En la mina Kamiokande de Japón se ha montado un detector formado por unas 8.000 toneladas de agua, que está rodeado por muchos fotomultiplicadores. Estos miden la energía y dirección del retroceso del electrón en base a la radiación Cherenkov emitida. El experimento solo es sensible a ν_e con $E_{\nu_e} \geq 7.15 \text{ MeV}$. El resultado es un flujo 0.46 ± 0.05 veces el esperado.

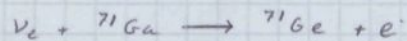
XIX) Posibles soluciones

- Modelo standard solar erróneo
- $\nu_e \longrightarrow \nu_{\text{masajado}} + \text{bosón de Goldstone}$
- Gran momento magnético que permitiera la inversión de su helicidad

iv) Oscilaciones máximas de neutrinos

v) Oscilaciones pequeñas de neutrinos, resonantes en el sol.

XX) Mas interesante



donde el umbral es 0.233 MeV y permite detectar los ν_e producidos de la reacción pp. Hay dos experiencias en fase inicial de este tipo. El detector GALLEX, con 30 toneladas de Galio, en el Gran Sasso. La otra es la colaboración SAGE (Soviet-American Gallium Experiment) en el paucoso con 57 toneladas de Galio.

En Phys. Rev. Lett. 16-07-92 se publicaron unos primeros resultados del GALLEX, que daban un ritmo de captura del $(63 \pm 16)\%$ del predicho por el modelo standard.

XXI) ¿Partículas de Dirac o de Majorana? Si no, entonces la pregunta tiene sentido

