

AS PARTÍCULAS ELEMENTAIS.

Ramón Cid Manzano

IES Xulián Magariños – Negreira (A Coruña)

Boletín das Ciencias 47 - pax 43- 61 - SANTIAGO 2001

É un sentimento maravilloso descubrir as características unificadoras dun complexo de fenómenos diversos que parecen totalmente desconectados na experiencia directa dos sentidos.

Albert Einstein, 1901

O Século XX que ven de rematar é sen dúbida desde o punto vista científico-técnico o século da física, da enxeñaría xenética e das tecnoloxías da comunicación. Dentro da física aparece de forma estelar o estudo sobre as partículas elementais. Isto é así, non soamente porque neste campo se unen de xeito case que poético o entendemento físico do máis pequeno (o mundo subatómico) co do máis grande (o cosmos), senón porque a física achégase as grandes preguntas que a humanidade se ten feito desde sempre: ¿Qué somos? ¿De onde vimos? ¿A onde vamos? etc.

Creo polo tanto que paga a pena neste Boletín das Ciencias, xa no novo século, achegarmos desde a perspectiva dun profesor ou profesora de secundaria ao mundo das partículas elementais. Obviamente, será unha visión cualitativa e limitada, co obxectivo fundamental de servir de refresco ou recordo para o lector ou lectora habitual desta revista e co ánimo de que sirva de estímulo para afondar neste campo.

No significado exacto do término, partículas elementais queren dicir "primarias", é dicir, os constituíntes máis simples indivisibles que forman a materia. O desenvolvemento da investigación neste campo foi cambiando a cualificación que as partículas segundo se ían descubrindo outras novas. Adquire especial significación a definición que da Murray Gell-Mann que é un dos fundadores da teoría dos quarks: "Non será elemental a partícula das que as súas propiedades poden, en principio, calcularse como se de composta se tratase".

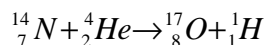
Naturalmente hai que facer unha precisión. A primeira partícula elemental, na acepción actual, é o electrón e non foi descuberto no século pasado, senón a finais do S.XIX.

O descubrimento das partículas elementais foi o resultado lóxico dos éxitos xerais no estudo da estrutura das substancias, alcanzados pola Física a finais do S.XIX.. A primeira foi o **electrón**, que foi descuberta por J.J. Thomson (1897), no estudio das descargas eléctricas en gases enrarecidos. Thomson estableceu que os raios producidos eran de natureza material establecendo experimentalmente a súa relación q/m. Non deixa de ser curioso que G.P. Thomson, fillo do anterior, establecera a natureza ondulatoria desas partículas. É unha especie de dualidade onda-corpúsculo familiar.

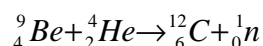
En 1909, R.Millikan obtería o valor da carga do electrón no o seu famoso experimento coas gotiñas de aceite. En 1919, E.Rutherford, que xa postulara 8 anos antes o primeiro modelo nuclear do átomo, detectou como segundo compoñente común a toda a materia, o **protón**. Cando bombardeando diferentes núcleos con partículas α observou que todos xeraban átomos de hidróxeno:



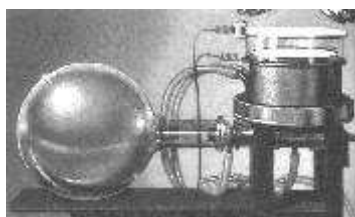
G.P. Thomson



J.Chadwick (1932) descubre o **neutrón** como terceiro componente da materia para explicar a radiación penetrante que se producía cando se bombardeaban materiais coma o berilio con partículas alfa:



Por outra banda, A.Einstein (1905), utilizando a teoría cuántica da radiación de Planck, reestableceu o modelo corpuscular da luz para explicar o efecto fotoeléctrico, recibindo as partículas ou cuantos de luz o nome de **fotón**.

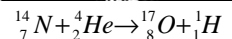
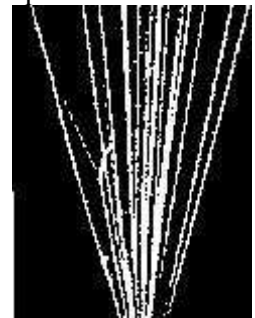


Cámara de Wilson

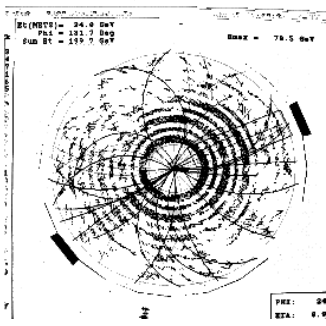
Sen entrar noutros detalles, podemos dicir que esta visión da materia e a radiación a partir de catro partículas elementais era absolutamente satisfactoria.

Non se entra en máis detalles respecto a estas partículas porque son suficientemente coñecidas e mesmo os libros de texto de secundaria xa dan información abondo sobre elas.

Antes de continuar, paga a pena facer mención de cómo detectaban naquela época as partículas. Un dos detectores máis utilizado era a cámara de Wilson. Consiste basicamente nun cilindro, cun émbolo, no que hai un vapor saturado. Cando entra no dispositivo unha partícula con carga chocará con átomos constituíntes do vapor producindo a súa ionización. Se expandimos o vapor se arrefriará producíndose a condensación do vapor pero de forma máis intensa en torno ós ións producidos pola partícula incidente. Polo que se fotografamos o interior do cilindro cando se produce a expansión, obteremos unha estela de gotiñas que materializa a traxectoria da partícula que incidíu. Se ademais o cilindro se atopa sometido a un campo magnético provocará que as partículas se desvien segundo a súas cargas, o actuar sobre elas a forza de Lorentz. Segundo o tamaño das partículas o seu poder de ionización será maior ou menor, o que permitirá unha traza ou estela máis grossa, segundo a súa enerxía cinética o seu poder de penetración na cámara será maior ou menor e segundo o seu momento lineal as desviacións producidas pola forza de Lorentz serán diferentes. Obsérvase na figura da dereita as estelas producidas por unha fonte radioactiva de partículas alfa (He-4) e como unha delas –na zona centroesquerda– choca cun núcleo de nitróxeno producíndose unha bifurcación. A estela máis fina corresponde a un protón, e outra máis grossa o núcleo de O-17 formado.

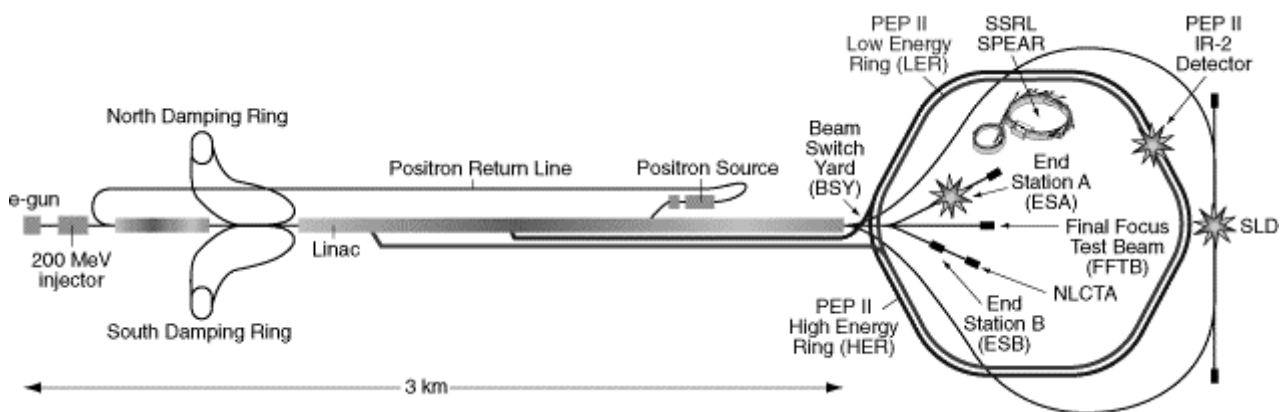


De maneira que a través de dispositivos coma estes é posible obter unha enorme información sobre os sucesos entre partículas. Ademais da cámara de Wilson existe todo un auténtico arsenal de detectores: contadores proporcionais, de resplandeco, de Cherenkov, de emulsións fotográficas, de chispas, de burbullas, tubos fotomultiplicadores, etc, etc. Actualmente son dispositivos de decenas de toneladas de material electrónico moi sofisticado no que se producen miles de fotografías por segundo ou nos que un gran ordenador procesa tódolos datos electrónicos obtidos e xera unha simulación mesmo tridimensional do que acaba de ocorrer. Decenas de físicos espallados polo mundo tratarán despois para comprender o que alí ocorreu. Ademais, as partículas, que se van facer interaccionar, son previamente aceleradas a velocidades próximas a da luz para conseguir colisións cada vez máis enerxéticas. Nuns casos esas colisións se producen sobre blancos fixos e noutros casos fanse xirar en sentidos opostos dous feixes de partículas (normalmente un de partículas e outros de antipartículas) para que cando acadan a enerxía fixada se provoque a colisión. Desta maneira a enerxía no centro de masas é o dobre. Son enormes campos magnéticos de varios teslas producidos por superconductores os responsables de manter ás partículas nas traxectorias axeitadas.



Descubrimiento do quark t

Con aceleradores lineais como o do SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) de máis de 3 km ou circulares como o do CERN don 27 km de circunferencia se conseguen enerxías actualmente do orde do TeV, mentres que nos anos trinta era do orde do MeV. No CERN entrará no 2003 un acelerador, o LHC, de 14 TeV.



Instalación para o estudo de partículas en Stanford.

Pero para seguir necesitamos, inda que sexa brevemente, mencionar algunhas cuestións teóricas da máxima importancia e que se desenvolveron nos primeiros trinta anos do Século XX.

.- O principio de incerteza: as partículas virtuais.

W. Heisenberg postulou que se dous operadores mecanocuánticos \hat{F} e \hat{R} non conmutan, as magnitudes físicas coas que se corresponden presentaran, se se miden simultaneamente, unhas indeterminacións dadas por $\Delta F \Delta R \geq \frac{1}{2} |B|$ onde B é un operador hermítico que depende das magnitudes das que se trate. Coñecemos a forma desta relación para o caso de que as magnitudes sexan o momento lineal e a posición, pero aquí ten moito máis

interese a relación cando as magnitudes son a enerxía e o tempo. Neste caso a relación a podemos escribir en termos cualitativos así:

$$\Delta E \cdot \Delta t \sim \hbar$$

Esta relación podémola expresar dicindo que en tempos suficientemente pequenos poden aparecer cantidades de enerxía da nada. Esta enerxía desaparecerá en canto o tempo correspondente teña finalizado. Decatémonos que a constante de Planck obriga a uns valores de ΔE e Δt extremadamente pequenos, pero que van cobrar unha tremenda importancia no mundo subatómico.

Se agora consideramos a ecuación de Einstein que liga a masa e a enerxía: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$ podemos escribir a relación de indeterminación anterior así:

$$\Delta m \cdot \Delta t \sim \hbar / c^2$$

Podemos dicir que nun tempo suficientemente pequeno pode aparecer masa da nada. As partículas así xeradas son coñecidas coma **partículas virtuais**.

Consideremos o tempo que unha partícula precisaría para atravesar un núcleo ($\sim 10^{-15}$ m) levando a velocidade da luz ($\Delta t = 10^{-15} / 3 \cdot 10^8 \sim 10^{-23}$ s) e levemos este resultado a calquera das relacións anteriores. Obteremos que dentro dun núcleo pode aparecer unha cantidade de enerxía do orde de 10^{-11} J ou do orde de 100 MeV. En téminos de masa isto significa 200 veces a masa do electrón. Polo tanto dentro dun núcleo, e en calquera outra parte, poden aparecer partículas desta masa sen violar ningún principio, con tal de que pasado ese exíguo tempo desaparezan. Se o tempo considerado é aínda máis pequeno a partícula que poderá aparecer poderá ter aínda máis masa.

En base a esta nova situación os físicos nos anos trinta empezaron a construír outra forma de entender as interaccións. O sempre insatisfactorio modelo da forza a distancia foi cambiado polo intercambio de partículas virtuais que son as portadoras da forza. Así, a interacción electromagnética prodúcese a través de **fotóns virtuais**. Nace así a EDC (Electrodinámica cuántica) que se convertería na teoría máis exitosa da Física. Vésase a dereita a dispersión de dous electróns por intercambio dun fotón virtual (γ) mediante un diagrama de Feynman que é un dos fundadores da EDC.

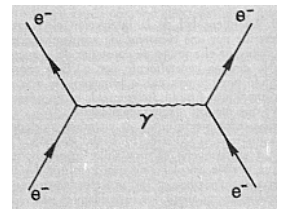


Diagrama de Feynman

A interacción gravitatoria prodúcese a través dunhas partículas chamadas **gravitóns** de masa en repouso tamén cero como os fotóns. Ocorre que dado que a interacción gravitatoria é do orde de 10^{37} máis débil que a electromagnética a detección deses gravitóns so ten sido posible nos últimos anos e de forma indirecta. (Diminución do período orbital das estrelas dobres por perda de enerxía ao estaren continuamente emitindo eses gravitóns).

Aínda que o mecanismo que explicaba a estabilidade atómica estaba perfectamente explicada mediante a interacción electromagnética por intercambio de fotóns virtuais entre protóns e electróns, non pasaba o mesmo coa estabilidade nuclear. ¿Cómo era posible que no núcleo puideran convivir decenas de protóns coa mesma carga nun espacio de 10^{-15} m. Postulouse a existencia dunha nova interacción: a interacción forte que resultou ser cen veces máis intensa que a electromagnética. Hideki Yukawa, explicou o mecanismo de actuación desta interacción a través dunhas partículas virtuais chamadas **pións** (inicialmente foron chamadas mesóns~intermedios). Veremos máis adiante que en realidade os pións non son os portadores da interacción forte, xa que realmente esta interacción ocorre dentro dos nucleóns, entre os quarks, quedando a interacción a través dos pións como unha reliquia da verdadeira interacción forte (unha especie de forza de Van der Waals nuclear). Se volvemos a considera-la relación de indeterminación $\Delta m \cdot \Delta t \sim \hbar / c^2$ e temos en conta que as partículas virtuais se moven coa velocidade da luz:

$$c = \Delta L / \Delta t$$

-sendo ΔL a distancia que poden recorrer sen violar o principio de incerteza, é dicir o seu alcance- podemos na relación anterior substituir Δt , obtendo:

$$\Delta m \cdot \Delta L \sim \hbar / c$$

Polo tanto canto maior sexa a masa da partícula menor será a distancia que poda recorrer e viceversa. Daquela, dado que os fotóns e os gravitóns non posúen masa en repouso, o seu alcance será infinito. En efecto, a interacción electromagnética e a interacción gravitatoria teñen alcance infinita. Sen embargo, dado que os pións si posúen masa en repouso, ese alcance debe verificar a relación de indeterminación. A interacción forte a través dos pións so ocorre a distancias nucleares. En efecto, sabemos que entre núcleos veciños existe a repulsión eléctrica pero non a atracción por interacción forte.

Máis adiante veremos que a cuarta interacción, a débil, se produce a través duns portadores da interacción chamados bosóns vectoriais W^\pm de masa 80 GeV e Z de 90 GeV o que supón unha enorme masa. Naturalmente o alcance desta interacción é o máis pequeno. Hai que dicir que igual que existen os fotóns virtuais e os fotóns reais, tamén existen os pións reais, ademais dos virtuais. Foron descubertos nos raios cósmicos en 1948 por Cecil Powell sendo as súas masas de 135 MeV para o neutro (π^0) e 140 MeV para os cargados (π^+ , π^-). Como



Raios cósmicos

se pode comprobar coa expresión anterior, a aproximación a través das relacións de indeterminación para a súas masas está dentro dese orde.

- A ecuación de Dirac: a antimateria.

A mecánica cuántica, tanto na súa versión ondulatoria como matricial, non tiña en conta a teoría especial da relatividade.

Así a ecuación de ondas é: $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi$, de onde como sabemos \hat{H} é o operador de Hamilton.

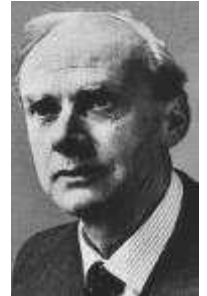
No caso non relativista é igual a $\hat{H} = \hat{P}^2/2m + V$

Foi Dirac que en 1928 formulou a ecuación de Schrödinger tendo en conta efectos relativistas. Nese caso a ecuación é a mesma que a anterior pero o operador de Hamilton toma a forma:

$\hat{H} = c \cdot \alpha \cdot \hat{P} + \beta m c^2$, na que \hat{P} é o operador momento lineal da partícula e α e β son operadores mecanocuánticos a obter segundo as condicións do problema.

Se resolvemos a ecuación de Schrödinger para unha partícula libre na formulación de Dirac obtemos para a súa enerxía o valor:

$$E = \pm(c^2 p^2 + m^2 c^4)^{1/2}$$



A enerxía negativa non tiña explicación dado que unha partícula libre só posúe enerxía cinética e esta sempre é positiva. Dirac postulou como explicación, que o baleiro é aquel estado que está ocupado por partículas, por exemplo electróns, coas enerxías máis baixas (negativas). Como os estados que ocupan son os máis estables, de mínima enerxía, non interaccionan con nada e polo tanto pasan para nós desapercibidos. Se por unha acción exterior suficiente (por exemplo a incidencia dun fotón moi enerxético) extraemos un deses electróns con enerxía negativa pasará a ocupar un estado baleiro de enerxía positiva. Aparece pois un electrón, e ademais no baleiro queda un "oco" de enerxía negativa que a tódolos efectos se comporta como unha partícula positiva de igual masa que o electrón. **P.A.M. Dirac**

O fotón incidente crea un par de partículas: $\gamma = e^+ + e^-$

Por outra parte, dado que hai un estado de baixa enerxía baleiro un electrón calquera de enerxía positiva "baixará" a ocupalo desaparecendo o oco e aparecendo a diminución de enerxía do electrón en forma de fotón.. Polo tanto, o que temos é a conversión einsteiniana de enerxía en masa en estado puro.

Outra vez a relación de Einstein aparece pero esta vez ó revés: $e^+ + e^- = \gamma$

O primeiro proceso chámase de creación e o segundo de aniquilación.

Hai que facer mención a que mentres que as relacións de incerteza deron lugar o concepto de partícula virtual, aquí a aparición de partículas é absolutamente real, sendo ademais o mecanismo polo que se xeran partículas nas colisións que se producen nos aceleradores. Polo tanto a unión da mecánica cuántica coa relatividade especial da como resultado que tódalas partículas posúen unha especie de antagonista, a **antipartícula**, de igual masa e demais características físicas pero que se diferencian no signo contrario dalgunhas características de interacción, como son a carga eléctrica ou o momento magnético.

Úsase un guión por riba dunha letra para indicar a antipartícula, agás o para o electrón que ten por antipartícula o positrón.

En 1932, Carl Anderson descubriu os **positróns** nos raios cósmicos. En 1955 Emil Segre e Owen Chamberlain descubriron xa nun acelerador o **antiprotón**, mentres que en 1956 Cork e Lambertson descubriron o **antineutrón**. Leon Lederman no 1965 detecta o antideuterón e en 1969 Prokoshkin detecta el antihelio-3. O CERN en 1996 anunciou que fabricaran 9 átomos de antihidróxeno, é dicir un átomo formado por un positrón que xira arredor dun antiprotón. É o primeiro antiátomo fabricado. O estudio das enerxías destes antiátomos poderían dar resposta a por qué hai máis materia que antimateria.

Como xa se dixo, a creación e aniquilación dos pares partícula-antipartícula é a base da xeración de novas partículas nos aceleradores de partículas. Cando se provoca que dúas partículas batan entre si, ben nun acelerador lineal -feixe contra un branco- ou nun acelerador circular -feixe de partículas contra feixe de antipartículas- nesa colisión desaparecen as partículas colisionantes creándose fotóns que de inmediato dan lugar a creación de novos pares partícula-antipartícula. Estas parellas non duran moito tempo, senón que a súa vez se desintegran noutras de menor masas. Segundo a enerxía do centro de masas dos sistema en colisión, as partículas que se crean terán cada vez máis masa. Naturalmente, as regras da mecánica cuántica e de conservación da enerxía, da carga eléctrica e do

momento lineal gobernarán estes procesos. Cando a enerxía da que se dispón no momento do choque é a axeitada para que se forme un determinado par se produce nos detectores unha avalancha de sinais que deberán ser posteriormente analizadas.

Como se ve a ecuación de Dirac non é un mero xogo teórico. Pero esta ecuación da lugar a outra consecuencia moi notable. Introduce de xeito natural o concepto de *spin*. Ata ese momento o spin fora introducido por Uhlenbeck y Goudsmit coma unha necesidade para explicar os desdobramentos espectrais, asociándoo o xiro do electrón sobre si mesmo. Coa ecuación de Dirac o spin obtense como unha propiedade mecanocuántica intrínseca de tódalas partículas e que non ten parangón con ningunha outra magnitude clásica. Os valores de spin poden ser enteiros ou semienteiros. As partículas con spin enteiro compórtanse segundo a estatística de Bose-Einstein e chámanse **bosóns**, podendo ocupar moitos bosóns o mesmo estado mecanocuántico. As partículas con spin semienteiro responden a estatística de Fermi-Dirac e chámanse **fermións**. Así os fotóns son bosóns (podemos atopar infinitos no mesmo estado -nun raio láser-, mentres que os electróns son fermións (non podemos atopar dous en idéntico estado cuántico).

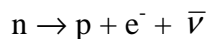
.- A desintegración β : o neutrino.

A radioactividade era un fenómeno xa moi estudado no primeiro cuarto do século pasado, pero a chamada radiación β presentaba un moi serio problema.

Dentro dun núcleo radioactivo, por exemplo o Co-60, un neutrón se convertía nun protón e un electrón saía a gran velocidade. Naturalmente, dada a gran masa do núcleo en cuestión -en comparación coa do electrón liberado- a penas retrocedía, polo que o aspecto enerxético do proceso había que estudialo no electrón xerado. O espectro continuo das enerxías que se detectaban neses electróns era inexplicable. ¿Onde estaba o resto da enerxía para electróns que non posuían o máximo valor? Böhr chegou a propoñer que non se cumpría a conservación da enerxía na radiación β . Ademais, dado que as tres partículas en cuestión (neutrón, protón e electrón) son fermións -spin semienteiro- non saían as contas no que a conservación do spin do sistema se refería. Esta situación foi habilmente resolta por W.Pauli quen en a finais de 1930 propuxo como solución que na desintegración β tamén se produciría outra partícula que sería a que se levaría o resto da enerxía a computar. Esa partícula debería ser neutra pois non aparecían restos de ionización producida por ela, e moi moi lixeira pois non era detectada de ningún xeito. Ademais tiñan que ter spin semienteiro para que se conservase o spin entre o estado inicial e final. Esa partícula foi chamada por Enrico Fermi **neutrino**.



E. Fermi



En realidade, como se ve na ecuación, nesta desintegración non é o neutrino senón o antineutrino quen acompaña ó electrón. Isto garante a conservación doutra magnitude chamada “número leptónico” do que falaremos no que sigue.

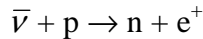
Os físicos déronse conta de que entre as partículas que coñecían, non tódolos procesos ocorrían. Dividiron as partículas en dúas clases. Unhas, como o protón e o neutrón, recibiron o nome de **barións** (pesados) mentres que as outras, como o electrón e o neutrino, **leptóns** (lixeiros). Se acuñaron dous novos números que se deberían conservar: o número bariónico, B, e o número leptónico, L. Tódolos barións teñen B=1, e as súas antipartículas B = -1, sendo para o resto B=0, mentres que tódolos leptóns terían L=1 e as súas antipartículas L=-1, mentres que o resto L=0. Se levamos estas novas regras a ecuación da desintegración β vemos que non se conserva L, salvo que en realidade sexa un antineutrino a partícula que acompaña no proceso ó electrón. É dicir, ademais da regras de conservación coñecidas temos que engadir a conservación do número bariónico e leptónico. Isto obviamente restrinxe as posibilidades dos procesos entre partículas que era o que se observaba.

Por exemplo é posible o proceso: $p \rightarrow n + e^{+} + \nu$ que se coñece como “desintegración β^{+} ”.

Fermi englobou a desintegración β dentro nun novo tipo de interacción, a débil, e da súa teoría se seguían moitos outros procesos nos que os neutrinos -e por supostos a os antineutrinos- podían intervenir.

A interacción gravitatoria esixe que as partículas posúan carga inercial -á que chamamos masa- e os gravitóns como partícula portadora da interacción. A interacción electromagnética esixe que as partículas interaccionantes posúan carga eléctrica, a a presenza do fotón como partícula portadora. Daquela as partículas que interaccionan debilmente deben posuír unha propiedade que Fermi chamou carga débil, e a presenza das partículas intermediarias que xa foron citadas con anterioridade: W^{+}, W^{-} e Z.

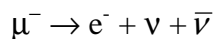
Un dos posibles sucesos previstos pola teoría débil de Fermi era a propia interacción do antineutrino producido na desintegración β cun protón:



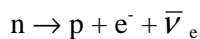
F.Reines e C.Cowan a partir de 1953 empezaron a estudar este proceso utilizando como fonte de antineutrinos o reactor nuclear de Savannah River (EEUU) a través dun enxeñoso experimento e en 1956 a comunidade científica aceptou sen reservas a detección do antineutrino, se ben xa ninguén dubidaba da súa existencia. Pasaran 26 anos desde que Pauli os postulara, e son poucos se pensamos que o físico austríaco prognosticou que nunca poderían ser detectados.

Volvendo a metade dos anos 30, todo era satisfactorio. Existían protóns, neutróns, electróns, neutrinos, a súas respectivas antipartículas (só a do electrón fora detectada, pero non se dubidaba da existencia das outras) e catro interaccións, coas súas respectivas partículas portadoras da interacción -entre elas o fotón-. O marco era suficientemente completo e en realidade para moitos propósitos aínda hoxe é perfectamente suficiente tanto en moitos campos da Física como da Química. Pero en 1936, C.Anderson, que descubrira o positrón uns anos antes, descubre unha nova partícula moi parecida ó electrón pero unhas 200 veces máis pesada: o **muón** (masa=105,7 MeV). Tiña unha vida media de $2 \cdot 10^{-6}$ μ s. Primeiro creron que era a partícula -o pión- que Yukawa postulara coma portadora da interacción forte, pero a súa débil interacción cos núcleos das substancias que había nos detectores non permitía tal consideración. A tódolos efectos o muón era como un electrón pesado. Forma tamén parte da familia dos leptóns. Pero a súa aparición produciu unha seria conmoción, ata o extremo de que o físico nuclear Isidor Rabi chegou a dicir: "¿Pero quen pediu este prato?". En realidade Rabi non sabía o que se viña encima. Na década dos 50 e 60, cos aceleradores de partículas funcionando en varios países, a lista de novas partículas xa non deixaría de aumentar.

Volvendo o muón, o proceso mediante o cal se desintegraba era:



Cando se tentou reproducir os experimentos de Reines e Cowan cos neutrinos ou antineutrinos procedentes do muón obtivéronse sucesos como: $\bar{\nu} + p \rightarrow n + \mu^+$ ou $\nu + n \rightarrow p + \mu^-$ pero nunca se atopan nas partículas resultantes electróns ou positróns. Isto indicaba que os neutrinos, ou antineutrinos, procedentes dos muóns eran diferentes ós vistos para os electróns. Polo tanto hai que diferenciar entre neutrinos, e antineutrinos muónicos e electrónicos. Así que a desintegración beta antes citada queda agora correctamente escrita así:



e en tódolos procesos nos que aparecen neutrinos, ou antineutrinos haberá que especificar a que clase pertencen.

En 1975 Martin Pearl obtivo en Stanford por colisión dun feixe de electróns e positróns o terceiro compoñente da familia dos leptóns: o **taón**, ó que naturalmente leva asociado o seu propio neutrino. A súa masa é de 1,8 GeV, é dicir, maior que a do protón ou a do neutrón, polo que xa ten pouco de lixeiro. Pearl compartiu con Reines o premio Nobel en 1995, que se pode considerar como o "Nobel dos leptóns".

Como xa se comentou antes, na década dos 50 e 60 decenas de partículas empezaron a aparecer en canto os aceleradores ían permitindo máis e máis enerxías de colisión. Non chegaba o alfabeto grego para dar nome a tanta partículas, nalgúns casos neutras, noutros negativas, positivas e mesmo dipositivas como a Δ^{++} . Había dúas familias de partículas: as que sentían tódalas interaccións, os barións e mesóns, que recibiron o nome de **hadróns**, e por outra banda os que non sentían a interacción forte, pero si as outras tres, os **leptóns**.

Pero había unha clara asimetría, xa que mentres que a segunda familia estaba formada por 6 partículas, había centenas na dos hadróns. Do mesmo xeito que para os elementos químicos a finais do S.XIX, impoñíase algún tipo de sistematización. Moitos dos hadróns parecían agruparse en subfamilias de oito elementos coas mesmas propiedades de número bariónico, spin e igual masa, se non se considera a interacción electromagnética. Estas agrupación reciben o nome de octetes, e o formalismo matemático que permite tratar estas situacións é a teoría de grupos. Así Murray Gell-Mann e Yuval Ne'eman lograron describir as partículas coñecidas no contexto do chamado grupo unitario SU(3). A importancia que tivo esta interpretación matemática foi que os físicos podían predicir a existencia de novas partículas e as propiedades que terían, e non contentarse con esperar a obter os datos experimentais e aceptalos sen máis. Ten un certo parecido coas prediccións sobre novos elementos químicos segundo a que familia da Táboa Periódica pertencen. Afortunadamente para unha exposición como esta non é necesario entrar no terreo da teoría de grupos, xa que o propio Gell-Mann e tamén George Zweig introduciron en 1964 o **modelo de quarks** como mellor solución para facer converxer o modelo matemático co modelo físico. Hai



M. Gell-Mann

que dicir que o nome de quark foi suxerido por Gell-Mann tomándoo do libro "O despertar de Finnegan" de James Joyce, no que o protagonista Mr Finn é as veces suplantado polos seus tres fillos que se chamaban quarks, e como veremos a continuación, o protón e o neutrón, son "suplantados" na interacción forte por tres quarks. Así cos tres quarks que se necesitaban para interpretar o hadrones en 1964, o grupo SU(3) non é outra cousa que a descrición de tódalas posibles combinacións que se poden facer con tres quarks. Estes son:

Quark	spin	Carga*	masa (GeV)
u	$\pm 1/2$	$+2/3$	0,3
d	$\pm 1/2$	$-1/3$	0,3
s	$\pm 1/2$	$2/3$	0,45

(* Tómase como unidade de carga á do electrón, polo que os quarks teñen carga fraccionara)

As combinacións de tres quarks son os **barións**, e a dun quark e un antiquark chámanse **mesóns**. Utilizando os tres quarks podíanse entender tódolos barións e mesóns coñecidos en 1964 e mesmo predicir algúns que aínda non apareceran.

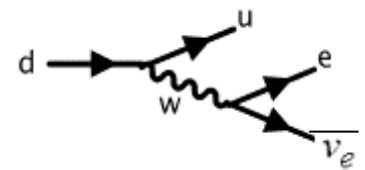
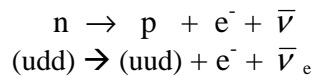
Así temos como exemplo de barións: protón = uud , neutrón = udd ,

e como exemplo de mesóns: pión (+) = $u\bar{d}$, pión (-) = $\bar{u}d$

Lémbrese que un guión por riba dunha letra indica a antipartícula (neste caso un antiquark).

Moitos experimentos se teñen feito a fin de conseguir "ver" os quarks. Basta indicar, dada a súa simplicidade, o que a finais da década dos 70 se realizou en Stanford. Un feixe de electróns acelerados ata enerxías de 20MeV se fixeron incidir sobre un branco. A esas enerxías os electróns co parámetro de impacto axeitado serían dispersados polos protóns. O resultado sería moi diferente se a carga eléctrica do protón esta distribuída de xeito uniforme (o electrón a penas será dispersado) ou se está repartida en zonas puntiformes. Como se pode ver é en esencia o mesmo que fixo Rutherford para introducirse nos átomos. Os resultados indicaron que o protón ten a súa carga "repartida".

Se volvemos a desintegración beta podemos escribir en termos de quarks o seguinte:



Polo tanto un "quark d" convértese en "quark u" por un proceso de interacción débil no que está presente a partícula intermediaria W^+ que finalmente da lugar os ao electrón e o antineutrino electrónico.

Sen embargo podemos atopar un problema co modelo quark. Así a partícula Δ^{++} está formada por tres quarks "u". Se nos fixamos, isto obriga que alomenos esta partícula en estado fundamental presente dous quarks co mesmo spin, e iso contravén o principio de exclusión de Pauli, e iso non pode ocorrer. Para salvar esta situación é preciso introducir unha nova propiedade cuántica que permita que tódolos barións, como fermións que son, veñan representados por unha función de onda antisimétrica. Harald Fritzsch e o propio M.Gell-Mann introduciron o "número cuántico de cor". Por suposto que aquí a cor nada ten que ver coa súa acepción normal. Cada quark pode aparecer en tres cores diferentes: vermello, azul e verde. Só son permitidas aquelas combinacións de cores que dean cor branco: singletes de cor. No caso dos barións terán que haber un quark vermello, outro verde e outro azul, mentres que nos mesóns se un quark é vermello o antiquark terá que ser antivermello, etc. Nos quarks a cor xoga o mesmo papel, para as interaccións entre eles, que a carga eléctrica xoga na interacción eléctrica. Pode pensarse que "a carga de cor" é unha artificialidade que posúen os quarks, pero pénsese que exactamente ocorre o mesmo coa masa ou a carga eléctrica. Son magnitudes físicas introducidas para poder explicar fenómenos, e a súa bondade reside no éxito que teñen explicando eses fenómenos. Do feito de que tódolos hadróns, sexan barións ou mesóns, non presenten cargas de cor neta (son brancos) derivase que entre eles non existan as forzas que si existen entre os quarks: a verdadeira interacción forte. Da mesma maneira que o fotón, tal como vimos, é a partícula portadora da interacción electromagnética entre partículas con carga eléctrica, a partícula intermediaria entre partículas con carga de cor, é dicir entre quarks, é a partícula chamada **gluón**. Esta partícula é a que mantén ós quarks realmente formando os barións e os mesóns (o gluón "pega" os quarks entre si). Da mesma maneira que a electrodinámica cuántica é a doutrina que explica a interacción electromagnética, unha vez proposta a carga de cor estableceuse a chamada **cromodinámica cuántica** que explica tódalas interaccións fortes en base á interacción entre quarks, sendo o gluón a partícula intermediaria. Como xa se comentou con anterioridade as forzas



Producción do quark t

Como xa se comentou con anterioridade as forzas

nucleares non son en si mesmas forzas elementais, senón só consecuencia das forzas superintensas da cromodinámica cuántica. Son as forzas de Van der Waals que hai no núcleo.

Dado que desde 1975 se coñecen 6 leptóns era lóxico que se propuxeran outros tantos quarks. As letras que os designan proceden dos nomes **up, down, strange, charme, bottom e top**. Cos tres primeiros (u,d,s) se podían explicar as partículas que se coñecían ata 1964 e algunhas que faltaban por descubrir. Barións e mesóns, nos que aparecen os outros tres quarks (c,b,t) foron producidos sucesivamente segundo os aceleradores eran capaces de acelerar máis e máis os feixes de electrón, protóns, positróns e antiprotóns. Precisamente no Tevatrón do Fermilab de Chicago durante o ano 1994 se propiciaron as condicións para que aparecera a primeira partícula con quarks top: un mesón top-antitop. Un feixe de protóns e outro de antiprotóns acelerados ata facelos chocar cunha enerxía no centro de masas de 1,8 TeV. No ano 1995 anunciouse que había un número suficiente de sucesos que poñían de manifesto sen dúbida a creación do sexto tipo de quark.

Rematado o século temos pois completada a lista de partículas elementais coñecéndose a teoría que as explica como o Modelo Estándar. As seguintes dúas táboas esquematizan a súa descrición en termos de partículas.

Familia	quarks	spin	carga	masa (GeV)	leptóns	spin	carga	masa (GeV)
I	u	$\pm\frac{1}{2}$	+2/3	0,3	e^-	$\pm\frac{1}{2}$	-1	$5 \cdot 10^{-4}$
	d	$\pm\frac{1}{2}$	-1/3	0,3	ν	$\pm\frac{1}{2}$	0	0 (?)
II	s	$\pm\frac{1}{2}$	2/3	0,45	μ^-	$\pm\frac{1}{2}$	-1	0,107
	d	$\pm\frac{1}{2}$	-1/3	1,5	ν_μ	$\pm\frac{1}{2}$	0	0 (?)
III	b	$\pm\frac{1}{2}$	+2/3	4,9	τ^-	$\pm\frac{1}{2}$	-1	1,78
	t	$\pm\frac{1}{2}$	-1/3	170	ν_τ	$\pm\frac{1}{2}$	0	0 (?)

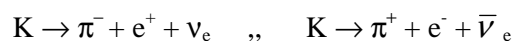
Partículas intermediarias:

Interacción	forte	electromagnética	débil	gravitatoria
Intensidade	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-39}
Partículas intermediarias	gluón	fotón	bosóns W^\pm, Z	gravitón

Coas catro partículas da primeira familia (u, d, e^- , ν) podemos explicar todo o que nos rodea, polo que realmente o Modelo Estándar ten reducido bastante a complexidade en termos de elementalidade. Non deixa de ser curioso que os gregos hai vintecinco séculos explicaban o universo tamén con catro elementos.

A pesares do seu éxito moitos son os retos aos que o Modelo Estándar terá que dar resposta. Quizais o máis notable é explicar por que o gluón, fotón e gravitón non teñen masa, mentres que os bosóns vectoriais W^\pm, Z teñen valores de 80 e 90 GeV, e **o por qué das masas** dos diferentes leptóns e quarks (sobre todo a do quark top). Unha das propostas que se teñen feito para explicar cómo as partículas obteñen masa é a partir do mecanismo de Higgs. Segundo este modelo, o espacio-tempo está cheo dunhas partículas chamadas bosóns de Higgs. As diferentes partículas se acoplan de xeito diferente a estes bosóns. Obviamente, os fotóns, gravitóns e gluóns non se acoplan en absoluto, mentres que as W^\pm e Z si. O resto das partículas se acoplarán de diferente maneira. Desde logo os bosóns de Higgs serán buscados nos próximos anos nos novos aceleradores.

Outro deses retos é por qué hai **máis materia que antimateria**. Así, o estudio da desintegración do mesón K pon de manifesto que dos dous modos de desintegración que presenta, o primeiro é máis corrente que o segundo:

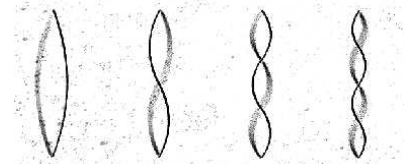


A diferenza destes procesos, aparentemente simétricos, coñécese como violación espontánea da simetría e a súa comprensión pode dar resposta a asimetría entre materia e antimateria.

O terceiro reto é a **unificación** de tódalas interaccións. Paralelamente ó descubrimento das partículas, moitos físicos teóricos dedicáronse a tentar unificar as distintas interaccións en busca dunha única. Na década dos 70 A.Salam, S.Weinberg e S.B.Glashow unificaron a interacción débil e a electromagnética, falándose agora da interacción electrodébil.

Moitos outros pasos se teñen dado para unificar esta última coa interacción forte (as teorías de gran unificación GUT) e os cálculos parecen indicar que isto sería posible para enerxías por riba de 10^{15} GeV, e que a unificación das catro se produciría para enerxías do orde da chamada enerxía de Planck = 10^{19} GeV. A estes valores non habería diferenza entre interaccións, e polo tanto entre partículas. Os esforzos teóricos diríxense cara as chamadas **teorías de supersimetría**, e en particular as **Teorías de Cordas**.

Nelas tódalas partículas elementais substitúense por un so obxecto unidimensional: unha corda sen espesor pero de lonxitude finita. As diferentes partículas elementais son modos de vibración desa corda, e a esas vibracións se lles poden asignar atributos tales como masa, carga, spin, etc. As interaccións entre cordas consiste na unión e separación delas. Por exemplo unha corda aberta pode dividirse en dous, ou ben dúas cordas poden unirse por un dos seus extremos formando unha única corda.



Catro vibracións para unha corda

Outra vez na física, como xa ocorreu antes cos nomes dos quarks ou coas “súas cores”, necesitamos recorrer a una linguaxe próxima. Pero naturalmente estamos a falar dun modelo matemático e non poderemos ver no futuro imaxes de cordas que se moven a través do espazo, pero si medir a súas propiedades e polo tanto detectar as súas características, e daquela comprobar a bondade do modelo.

Se a teoría das cordas ten éxito, dado que se trata dunha teoría de carácter xeométrico, será a xeometría a responsable de tódalas forzas e partículas. Pensemos que segundo a teoría xeral da relatividade de Einstein, o universo está gobernado pola xeometría. Daquela poderíamos unificar mecánica cuántica e relatividade xeral, polo que esas dúas teorías físicas, actualmente incompatibles, que explican por separado o microcosmos e o macrocosmos, estarían finalmente reconciliadas.

Así en 1997 os teóricos de cordas elaboraron un modelo de “burato negro” que explica a radiación de Hawking proposta desde outros supostos.

Ademais, si o modelo de cordas é correcto cada partícula hoxe coñecida deberá ter unha compañeira máis pesada chamada “spartícula” e se espera que nos próximos anos podan ser detectadas nos novos aceleradores.

Outros teóricos tamén cren dadas as enerxías presentes no Big Bang podamos atopar pegadas a escala astrofísica da produción de partículas que estarían preditas a esas temperaturas polos modelos de cordas.

Hai non obstante unha visión de todos estes aspectos que merece ser considerada. A teoría do **bootstrap** ou da autodocimancia proposta por Geoffrey Chew. A idea básica é que debe haber un pequeno número de principios que gobernen o comportamento das partículas. O único requisito que se impón a esta colección de primeiros principios é que sexa lóxicamente consistente, é dicir que non de lugar a contradicións. No seu ángulo máis radical, esta teoría afirma que só hai un conxunto de tales principios. Polo tanto, o mundo é como é por que non pode ser de outra maneira sen deixar de ser lóxicamente consistente. Nunha visión desde as partículas poderíamos dicir que as partículas (sexan puntos matemáticos ou cordas) existen por que interaccionan e interaccionan por que existen.

BIBLIOGRAFÍA

a) algúns libros de divulgación:

- ASIMOV ISAAC. (1983). **El electrón es zurdo**.. Alianza Editorial. Madrid.
 BOROVOI A. (1985). **Como se registran las partículas**. Editorial Mir. Moscova
 DAVIS PAUL (1985). **En busca de las ondas de gravitación**. Barcelona. Salvat.
 FEYNMAN R., WEINBERG S. (1991). **Las partículas elementales y las leyes de la física**. Gedisa. Barcelona.
 FEYNMAN RICHARD. (2000). **El carácter de la ley física**. Tusquets. Barcelona.
 FRITZSCH HARALD. (1982) **Los quarks, la materia prima de nuestro Universo**. Alianza Editorial. Madrid.
 HOUELLEBECQ MICHEL. (1999). **Las partículas elementales**. Anagrama. Barcelona.
 INVESTIGACIÓN Y CIENCIA. (1983). **Partículas elementales**.. Prensa Científica. Barcelona.
 KITAIGORODSKI A. (1985). **Fotones y núcleos**. Reditorial Mir. Moscova.
 KOPYLOV G. (1984). **Conozcamos la cinemática**. Editorial Mir. Moscova.
 TAYLOR JOHN G. (1984). **Las nueva Física**. Alianza Universidad. Madrid.
 TREFIL JAMES S. (1985). **De los átomos a los quarks**. Salvat. Barcelona.
 WEINBERG S. (1984). **Los tres primeros minutos de universo**. Alianza Universidad. Madrid.

b) algúns artigos

- ANTONIADIS I.(2001) La teoría de cuerdas. Mundo Científico 226 (pax 24-30).
BONNEAUD G., HITLIN D.(2000). Tras la pista de la antimateria. Mundo Científico 208 (pax 75)
BOYA L.J. (1997). La historia del muón. Revista Española de Física 11(3).
DOBADO A. (1994). El descubrimiento del quark t. Revista Española de Física 8(3).
FAE (1999). Investigación sobre neutrinos. Foro Nuclear 405.
HUSSON D. (2001). Los quarks. Mundo científico 223 (pax 72-75).
MAESTRE J.A., JOSA I. (2000). Búsqueda experimental del bosón de Higgs. Revista Española de Física 14(2).

c) algunhas Webs

Física de Partículas (USC)	http://www.usc.es/~fpgdd
The Particle Adventure	http://durpdg.dur.ac.uk/lbl/cpep/spanish/adventures.html .
CERN	http://microcosm.web.cern.ch/ .
SLAC Virtual Visitor Center	http://www2.slac.stanford.edu/vvc .
AntimatterMirror of the Universe	http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter/ .
Página sobre R.P. Feynman.	http://www.amasci.com/feynman.html
American Institute of Physics	http://www.aip.org/ .
Physics World.	http://physicsweb.org/toc
The Institute of Physics	http://www.iop.org/ .