

Aula 10

O Potencial de Yukawa: Quantizando as Interações

Renan Milnitsky
Marcelo Gameiro Munhoz
Julien Minerbo

No início da década de 1930, tudo o que se sabia sobre partículas elementares poderia ser sintetizado numa espécie de Modelo Padrão da época, que estamos didaticamente denominando como Modelo Estrutural Atômico, mostrado na Figura 1.



Figura 1 - Síntese das partículas conhecidas até o início da década de 1930.

Para além de listar as partículas existentes, há incorporada na leitura que fazemos deste contexto uma perspectiva estrutural, que busca construir hipóteses explicativas sobre os fenômenos a nível atômico e subatômico em termos de estruturas.

A imagem de átomo recorre à estrutura de um núcleo composto por prótons e nêutrons e uma eletrosfera composta por elétrons. A descrição dos decaimentos radioativos como o decaimento β previa a emissão de elétrons (ou pósitrons) e anti-neutrinos (ou neutrinos), que, num primeiro momento, acreditava-se estarem sendo ejetados do interior do núcleo atômico. A estrutura do vácuo na teoria dos buracos de Dirac recorria a existência de um Mar de Elétrons, uma vez que não concebiam que elétrons poderiam estar sendo criados, mas sim ejetados do Mar de Dirac, local no qual já estariam previamente.

A ruptura que nos permite compreender como a comunidade científica da época passou a aceitar processos no qual partículas de matéria poderiam ser criadas ou absorvidas passa pelas discussões envolvendo a natureza das interações entre prótons e nêutrons. **A pequena diferença de massa entre prótons e nêutrons**, suscitava questões sobre sua estrutura. A existência de algum mecanismo de interação que nos permita compreender como, em **processos como o decaimento β , um nêutron dá lugar a um próton e vice-versa** também era uma questão. A necessidade de conseguir construir uma teoria explicativa para a **estabilidade do núcleo atômico**, que deveria encontrar dificuldades de estabilidade em função da interação coulombiana repulsiva entre prótons, era de fundamental importância.

Por este motivo, cabe, num primeiro momento, esclarecer as evidências que revelaram a existência do nêutron e contextualizar algumas das hipóteses realizadas para explicar sua estrutura e sua capacidade de interagir com prótons no interior do núcleo atômico

1. A Descoberta do Nêutron

A detecção do nêutron é realizada por Chadwick em meados de 1932 após um longo processo de investigação. Na década anterior, ele se dedicou a estudar a dinâmica das interações na região interna do núcleo atômico. Seus trabalhos consistiam em analisar o espalhamento de partículas α sobre núcleos de Hidrogênio. Sua motivação inicial é baseada em observações realizadas por Rutherford que apontavam para bruscas mudanças na magnitude da interação após atingirem distâncias próximas a $3,5 \times 10^{-13}$ cm.

Nos primeiros experimentos desenvolvidos por Chadwick, espalhando partículas α fazendo uso de alvos de parafina, seus resultados concordam com as observações de Rutherford, avaliando que no interior do núcleo existem interações que sofrem com uma

mudança de comportamento a uma distância de 4×10^{-13} a 8×10^{-13} cm [...] Fora desta superfície, a força varia aproximadamente com o inverso do quadrado da distância, como se espera nas interações eletromagnéticas clássicas. (CHADWICK, 1921, p.923, tradução nossa)

Até meados da década de 30, a natureza desta misteriosa mudança nas interações provocadas em distâncias próximas a 10^{-13} cm permaneceu inexplicada. Apesar disso, experimentos avaliando espalhamento de partículas α se tornaram uma tradição entre pesquisadores e pesquisadoras no campo de estudos da radioatividade.

Em 1930, Bothe & Becker perceberam a **emissão de uma radiação e ainda desconhecida produzida por espalhamentos de partículas α em alvos de Berílio. A radiação não era eletricamente carregada e tinha altíssimo poder de penetração.** Na época, em função da natureza radioativa dos materiais, acreditavam se tratar de radiação γ . Experimentos conduzidos por Joliot-Curie no ano seguinte, no entanto, colocaram um mistério ainda maior sobre a natureza desta radiação neutra. Sobre este estudo, Chadwick pontua que,

Curie & Joliot descobriram que a ionização produzida por esta radiação de berílio aumentava quando uma matéria contendo hidrogênio era colocada a sua frente. **O efeito pareceu ser devido à ejeção de prótons com velocidades até um máximo de quase 3×10^9 cm/s.** Elas sugeriram que a transferência de energia para o próton deveria ser dar por um processo semelhante ao Efeito Compton e estimou que a radiação do berílio tinha 50 MeV. (CHADWICK, 1932, p.311, tradução nossa)

O ponto de Chadwick era que esta energia de 50 MeV parecia ser inconsistente com o que estava sendo observado. Para avaliar a natureza desta misteriosa radiação, Chadwick conduziu um experimento baseado no aparato experimental mostrado na Figura 2.

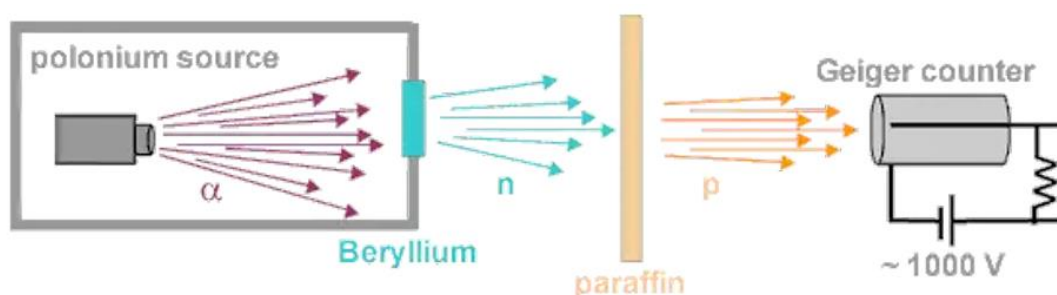


Figura 2 - Aparato experimental utilizado por Chadwick para investigar a radiação neutra emitida pelo Berílio.

A misteriosa radiação neutra era produzida a partir da colisão de partículas α com uma amostra de Berílio, ambas inseridas no interior de uma câmara isolada a vácuo. A radiação neutra era então emitida em direção a um pequeno alvo de parafina, contendo os átomos de hidrogênio exigidos para observar a ejeção de prótons evidenciadas por Joliot-Curie.

Ao colidir com o alvo, prótons de alta velocidade eram ejetados e direcionados a um contador Geiger, com o intuito de contar o número de ionizações produzidas e aferir sua energia incidente. Ao analisar o resultado de seus experimentos, Chadwick afirmou de forma categórica que “se desejássemos manter intactos os princípios de conservação da energia e do momento linear, a radiação misteriosa jamais poderia ser radiação γ ”, uma vez que:

Se atribuirmos a ejeção do próton a um espalhamento Compton devido a interação com um fóton de 50 MeV, não deveríamos obter mais do que 10.000 ionizações e ter um alcance no ar de cerca de 1,3 mm. O que observamos na realidade é a produção de pelo menos 30 mil íonizações. (CHADWICK, 1932, p.312, tradução nossa)

Como poderia o feixe de prótons adquirir mais energia para além daquela que a radiação γ poderia lhe fornecer? Estava claro para Chadwick que esta radiação neutra não se trata de radiação γ . Para lidar com o dilema, ele propõe uma solução que se baseia na existência de uma partícula neutra dotada de massa semelhante à massa do próton: **o nêutron**.

Segundo Chadwick,

as dificuldades desaparecem se supusermos que a radiação consiste em partículas de massa equivalente ao próton, mas carga 0, ou **nêutrons**. A captura da partícula α pelo núcleo Be^9 resultaria na formação de um núcleo C^{12} e na emissão do **nêutron**. A partir das relações de energia deste processo, a velocidade do **nêutron** emitido pode ser de cerca de 3×10^9 cm/s. As colisões do **nêutron** com os átomos da parafina através das quais ele passa, dão origem aos prótons ejetados e as energias observadas estão em concordância justa com essa visão. (CHADWICK, 1932, p.312, tradução nossa)

Chadwick pontua, que mesmo possuindo a mesma massa do próton, ambas partículas interagem de forma completamente diferente com a matéria. Enquanto um próton é carregado eletricamente e interage através da força eletromagnética, o nêutron não é dotado de carga elétrica e não sofre ação da interação coulombiana, explicando sua alta penetrabilidade e evidenciando a existência de outra força responsável pelo freamento dos nêutrons. Além do mais, a existência do nêutron dá um novo passo resolução de um problema envolvendo os decaimentos β e excluindo de vez a possibilidade de existirem elétrons no interior do núcleo atômico, considerando-o agora composto exclusivamente por prótons e nêutrons. Cabe, no entanto, compreender como prótons e nêutrons interagem provocando a estabilidade do núcleo e as instabilidades que dão origem ao decaimento β .

2. Primeiras hipóteses sobre a Estrutura do Núcleo e Decaimentos

Com a descoberta do nêutron, as hipóteses ainda existentes sobre elétrons no núcleo atômico, responsáveis por minimizar a ação repulsiva da interação eletromagnética entre prótons, foram definitivamente rejeitadas.

A “expulsão” dos elétrons do núcleo, no entanto, não significou seu recuo como hipótese nuclear. Para explicar a interação entre prótons e nêutrons sem a necessidade de recorrer a existência de um novo tipo de interação, as primeiras tentativas de Chadwick foram a de não reconhecer o nêutron como uma partícula fundamental, mas sim como uma partícula composta por um próton e um elétron – o elétron estava sendo expulso do núcleo, mas colocado no interior de seus constituintes. Baseado nesta ideia, Heisenberg desenvolve uma proposta na qual a interação entre prótons e nêutrons se daria a partir de uma troca de elétrons, a exemplo do diagrama mostrado à esquerda na Figura 3. Nela podemos ver um nêutron n se transformando em um próton p a partir da troca um elétron com um próton p' que, ao recebê-lo, se transforma em um nêutron n' . Eventualmente, o elétron pode ser ejetado durante este processo de interação o que provocaria o decaimento β como mostrado à direita da Figura 3.

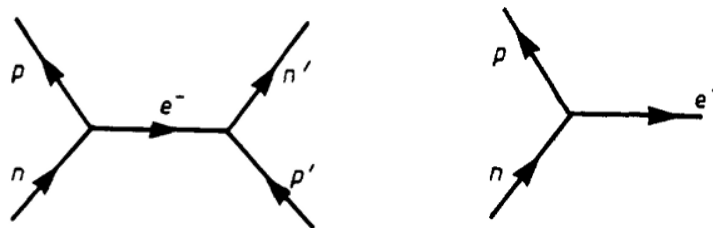


Figura 3 - Proposta de Heisenberg para interações entre prótons e nêutrons mediadas pela troca de elétrons.

Ainda que esta troca de elétrons possa parecer uma hipótese estranha, ela é inspirada nas teorias químicas de ligações covalentes, onde átomos químicos neutros conseguem interagir e formar moléculas a partir do compartilhamento de elétrons, como é o caso da molécula de H_2 . Nesta proposta fica clara a resistência não apenas de postular novas partículas e interações, como também a resistência de imaginar processos no qual partículas possam ser criadas – o elétron ejetado e observado no decaimento β seria aquele previamente presente no interior dos nêutrons.

Abrindo um caminho diferente, Fermi propõe uma hipótese explicativa para as interações nucleares a partir de sua teoria para o decaimento β . Em sua proposição, as interações nucleares seriam mediadas por pares elétrons-neutrinos, ou suas respectivas antipartículas. Uma diferença crucial com a perspectiva de Heisenberg e Chadwick, é a de que ele não prevê a existência das partículas no interior dos núcleos – elas na realidade seriam criadas quando as interações ou decaimentos ocorrem. Como mostrado na Figura 4, a interação seria descrita em termos da criação de um par $e - \nu$ que seria trocada entre prótons e nêutrons, sendo emitido de um deles e absorvido pelo outro. Do mesmo modo, o decaimento β seria explicado pela produção de um par $e - \nu$ que não seria ejetado do núcleo atômico.

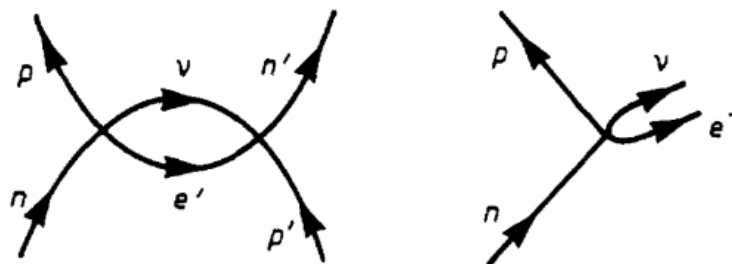


Figura 4 - Interações e decaimentos sobre a perspectiva de Fermi, fazendo uso da criação de pares $e - \nu$.

É importante notar como estas hipóteses tentam lidar com os problemas da estabilidade nuclear e dos decaimentos fazendo uso de partículas e interações já existentes. Como veremos seguir, o caminho para resolver os mistérios do regime nuclear demandam o nascimento de uma nova concepção sobre as interações que seja capaz de unir os princípios da teoria quântica e da relatividade restrita.

3. Potencial de Yukawa e o *quantum* das Interações Nucleares

Em 1935, Yukawa apresenta uma proposta nada usual para descrever as interações nucleares. Sua proposta se baseia nas limitações apresentadas pelas propostas de Heisenberg e Fermi sobre o mecanismo de troca de partículas para mediar a interação. Para Yukawa, as interações nucleares representavam uma força inteiramente nova e ainda desconhecida pela física teórica.

Sua abordagem é a de construir uma teoria de campos para as forças nucleares inspirada no eletromagnetismo. No entanto, ao invés de escrever equações para os potenciais V e \vec{A} , Yukawa propõe a existência de um novo potencial U responsável pela ação do campo nuclear nucleares. Segundo as naturezas dos spins de prótons e nêutrons, o físico teórico japonês aponta que:

Como o próton e o nêutron obedecem a estatística de Fermi, **este novo campo nuclear é acompanhado por um quanta** que deve obedecer a estatística de Bose [tendo spin 0] e ele deve ser quantizado seguindo o método geral da teoria quântica. (Yukawa, 1935, p.12)

O desafio é conseguir realizar uma descrição das forças nucleares a partir de um campo ainda desconhecido, aliando suas naturezas quânticas e relativísticas. Ao propor que a ação do campo nuclear é quantizada, Yukawa sugere a existência de um novo *quantum*, o *meson U*, uma partícula que agiria tanto como mediadora das interações nucleares, quanto como responsável pelo decaimento β , como mostrado na Figura 5. A nomenclatura *meson* origina etimologicamente de palavra mediação, no sentido de ela ser entendida como a partícula mediadora das interações nucleares.

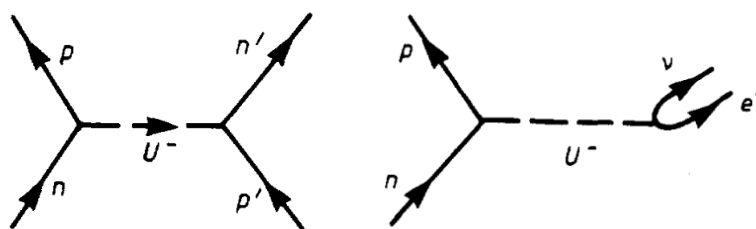


Figura 5 - Interações nucleares mediadas para ação do méson U, o quantum do campo nuclear.

Para descrever as características deste méson, Yukawa propõe uma retomada da teoria clássica de campos eletromagnéticos. Partindo das equações de Maxwell

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} & \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \end{aligned}$$

podemos reescrever os campos elétricos \vec{E} e magnéticos \vec{B} em termos do potencial escalar V e do potencial vetor \vec{A}

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} = \nabla^2 V \qquad \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{A}}{\partial t^2} = \nabla^2 \vec{A}$$

Percebendo semelhanças estruturais entre estas equações e a equação de Klein-Gordon, Yukawa utiliza um raciocínio análogo para descrever a ação do campo U fazendo uso desta que é a primeira tentativa de descrição quântica e relativística, e que descreve muito bem o comportamento de partículas de spin 0.

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} \Psi$$

Note que a Equação de Klein-Gordon possui uma estrutura muito semelhante às equações dos potenciais elétrico e magnético, com a adição de um termo dependente da massa $m^2 c^2 / \hbar^2$. Se utilizamos a equação de Klein-Gordon para descrever a natureza quântica de objetos de massa nula, com $m = 0$, a equação se torna

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2}$$

Que é exatamente a equação que descreve uma partícula de massa associada a ação do campo eletromagnético, ou seja, **o fóton**. Este é um argumento central para Yukawa, pois o que faz com que a ação do campo eletromagnético tenha alcance infinito, apesar de que sua intensidade decair com $1/r^2$, é o fato de que os fótons, o *quantum* do campo eletromagnético, não possuem massa.

Pensando analogamente, Yukawa aponta que o fato de a interação nuclear ter uma ação limitada a distâncias da ordem de $\sim 10^{-13} \text{ cm}$, como verificaram Chadwick e Rutherford, deve estar associado ao fato de que o *quantum* das interações nucleares deve ter uma massa $m \neq 0$. **Yukawa é o primeiro cientista a associar o alcance das interações a massa do quantum que media a interação.** Seu trabalho da descrição do *quantum* das interações nucleares lhe rendeu o prêmio Nobel em 1949 e é reconhecido um dos marcos fundantes do estudo das interações na Física de Partículas. Sua importância é tal que, numa celebração do aniversário de 30 anos da Teoria de Yukawa em 1965, o físico Nicholas Kemmer destaca

Me parece bem claro que Hideki Yukawa em 1935 estava para além de seu tempo e encontrou a chave para enfrentar problema das interações nucleares num momento em que nenhum outro físico teórico no mundo estava preparado para lidar com ela. (Kemmer, 1965, p.602)

Para determinar as características do quantum de ação das forças nucleares, inspirado na analogia e no comportamento dos potenciais elétricos e magnéticos, Yukawa escreve a equação de Klein-Gordon em termo do potencial nuclear $U(\mathbf{r}, t)$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 U}{\partial t^2}(\mathbf{r}, t) = \nabla^2 U(\mathbf{r}, t) - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} U(\mathbf{r}, t)$$

Escrevendo a versão independente do tempo, com $\frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = 0$, temos que

$$\nabla^2 U(r) - \frac{m^2 c^2}{\hbar^2} U(r) = 0$$

Yukawa mostrou que uma solução possível para o potencial nuclear pode ser dada por

$$U(r) = \frac{g}{r} e^{-\frac{mcr}{\hbar}}$$

que é conhecido como o Potencial de Yukawa.

Note que ele possui um termo $1/r$ característico do potencial elétrico que descreve interações coulombianas, acoplado a um termo $e^{-mcr/\hbar}$, que ao mesmo tempo descreve um potencial que decresce exponencialmente com o aumento da massa e reconstrói o potencial coulombiano para $m = 0$.

Podemos extrair uma equação para a descrição aproximada das forças tomando o gradiente deste potencial, que é dado por

$$\vec{F} = \vec{\nabla} U(r) \approx \frac{g}{r^2} \left[1 - \left(\frac{mcr}{\hbar} \right)^2 \right] \hat{e}_r$$

Novamente, note que para $m = 0$, a força retoma a forma da força de coulomb que contempla o inverso do quadrado da distância, onde

$$\vec{F} \approx \frac{g}{r^2} \hat{e}_r$$

Já para $m \neq 0$, verificamos que as condições para as quais a força se anula ($F = 0$) ocorrem a distância r dada por

$$r = \frac{\hbar}{mc}$$

materIALIZANDO a proposta de Yukawa na qual o alcance da interação depende da massa. Mais uma vez, note que para $m \rightarrow 0$ (fóton) temos que $r \rightarrow \infty$ (alcance infinito das interações eletromagnéticas).

A partir dos trabalhos de Chadwick e Rutherford, que estimam o alcance das interações nucleares próximo a $\sim 10^{-13} \text{ cm} = \sim 10^{-15} \text{ m}$, é possível realizar uma primeira estimativa da massa dos mésons propostos por Yukawa

$$m = \frac{\hbar}{rc} \rightarrow mc^2 = \frac{\hbar c}{r} = \frac{6,6 \cdot 10^{-16} \text{ eV} \cdot \cancel{s} \cdot 3 \cdot 10^8 \cancel{m/s}}{10^{-15} \cancel{m}}$$

$$mc^2 = 19,8 \cdot 10^7 \text{ eV} = 198 \text{ MeV}$$

$$m \approx 200 \text{ MeV}/c^2$$

Yukawa, portanto, propõe a existência de uma nova partícula para mediar as interações nucleares e prevê que a massa desta partícula seja próxima de $200 \text{ MeV}/c^2$, uma massa maior que a de elétrons e pósitrons ($0,5 \text{ MeV}/c^2$) e menor que a de prótons e nêutrons ($940 \text{ MeV}/c^2$).

Apesar de ser uma solução inovadora e elegante, nenhuma partícula com massa intermediária a de prótons e elétrons havia sido detectada até 1935. Sobre os tipos de carga elétrica previstos para os mésons, Yukawa aponta que

A lei de conservação da carga demanda que o novo quantum deve ter versões com carga positiva e negativa e sua massa é intermediária, sendo menor do que a dos prótons e nêutrons e maior que a dos elétrons. [...] Até o momento, nenhum *quantum* com tais propriedades foi encontrado por experimentos. Entretanto, nas interações nucleares, tal quantum não poderia ser emitido do espaço sideral, devendo ser produzido na Terra pela interação com nossa atmosfera. (Yukawa, 1935, p.12)

4. Conservação da Energia, Princípio da Incerteza e Partículas Virtuais

Assim como a Equação de Dirac trouxe dificuldades estruturais com a previsão de energias negativas, a teoria de Yukawa para os mésons mediadores das interações nucleares também traz questões problemáticas associadas, principalmente, a conservação da energia, mas que podem ser contornadas recorrendo ao princípio da incerteza e definindo um conceito fundamental para descrever a ação dos campos na teoria quântica das interações: as partículas virtuais.

Segundo Yukawa, a interação entre um nêutron e um próton se daria a partir da criação do méson U^- , fazendo com que, a partir da conservação da carga elétrica, ele possa se tornar um próton. Similarmente, um próton ao emitir um méson U^+ poderia transformaria em um nêutron, obedecendo novamente à conservação a carga elétrica. Os diagramas da Figura 6 representam estes processos

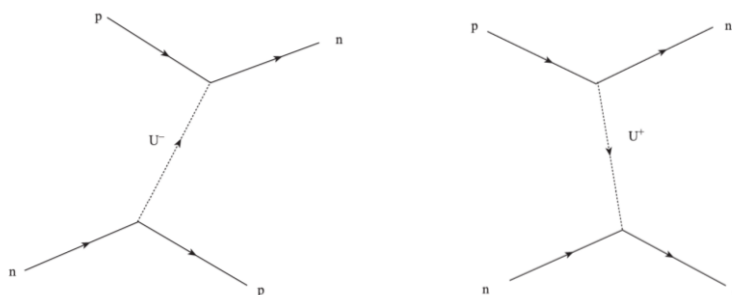
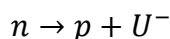


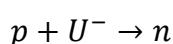
Figura 2 - Interação entre prótons e neutrons mediadas pelos mesons U^+ e U^- propostos por Yukawa.

Ainda que a teoria seja consistente do ponto de vista dos campos e da relação entre o alcance da interação e a massa das partículas, quando representamos interações desta natureza em forma de reação, como a expressa por



ela expressa claramente um problema com relação à conservação da energia. Ainda que haja uma pequena diferença entre a massa de prótons (~ 938 MeV) e nêutrons (~ 939 MeV), o fato de o méson de Yukawa possuir uma massa próxima de 200 MeV implica claramente que esta reação não é permitida pela não conservação da energia ($939 \text{ MeV} \neq 938 \text{ MeV} + 200 \text{ MeV}$). Como então lidamos com esta questão?

A solução proposta por Yukawa foi então propor a inversão a lógica da reação



recorrendo conjuntamente a um princípio fundamentalmente quântico para sustentar a conservação da energia: o princípio da incerteza.

Segundo o princípio da incerteza, no processo de interação entre prótons e nêutrons, pode haver uma variação na energia ΔE , que é naturalmente prevista pela incerteza dos processos quânticos. Yukawa propõe que se esta variação na energia ocorrer em um intervalo de tempo Δt consistente com o princípio da incerteza

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

então o princípio de conservação de energia permanece intacto. O que isto significa?

Em um intervalo de tempo Δt , pode ocorrer uma variação de energia $\Delta E = 200 \text{ MeV}$ que rompe com a conservação da energia, mas que não pode ser detectada com a devida precisão pois isso violaria o princípio da incerteza. Na prática, é como se a violação acontecesse, mas devido a natureza quântica das flutuações na energia, ela não pode ser medida e nem observada com precisão. O mesmo processo de flutuações na energia devido ao princípio da incerteza é o que explica, por exemplo, o efeito túnel, no qual partículas penetram uma barreira de potencial mesmo sem possuir energia o suficiente para penetrá-la.

Se levarmos em consideração que este processo ocorre no alcance das interações nucleares, podemos estimar o intervalo de tempo Δt em que o méson de Yukawa possa ser emitido sem que a violação na conservação de energia possa ser observada. Considerando que ele se movimenta na velocidade da luz e que percorre a distância r delimitada pelo alcance das interações nucleares, temos que

$$\Delta t = \frac{r}{c}$$

Substituindo este intervalo Δt no princípio da incerteza, podemos obter uma expressão aproximada para a massa da partícula

$$\Delta E \Delta t \approx \hbar$$

$$\Delta E \frac{r}{c} \approx \hbar$$

$$\Delta E \approx \frac{\hbar c}{r}$$

$$mc^2 \approx \frac{\hbar c}{r}$$

Que é exatamente o mesmo resultado que obtemos quando extraímos a massa pela análise do potencial de nuclear proposto por Yukawa! Substituindo os valores chegamos a uma estimativa para a massa que aponta aproximadamente para os mesmos $200 \text{ MeV}/c^2$.

Estas partículas que violam a conservação da energia em um intervalo de tempo permitido pelo princípio da incerteza são denominadas como partículas “virtuais”. Elas se distinguem de partículas “reais” exatamente pelo fato de que não podem ser detectadas experimentalmente e tem grande utilidade teórica na descrição quântica da ação dos campos.

Isto significa que Yukawa está propondo uma partícula que não pode ser detectada? Não necessariamente. Se o objetivo é detectar o méson enquanto está mediando a interação nuclear, a resposta definitivamente é **não**. Pois sua existência na mediação está fadada a um tempo que, no princípio da incerteza, o torna indetectável.

No entanto, como ela é uma partícula cuja origem está intimamente associada a interações nucleares, se pudéssemos avaliar reações nucleares que ocorrem em altas energias (lembre que a massa estimada dos mésons é de ~ 200 MeV), eles podem ser produzidos como resíduos dos processos de interação e aí sim serem detectados.

Acontece que nenhuma amostra radioativa desta época era capaz de emitir entidades nucleares com energias acima dos 200 MeV. A única fonte de partículas com energias o suficiente para produzir estes mésons seriam os raios cósmicos, por este motivo mais uma vez retornaremos ao palco experimental para compreender o processo de investigação da partícula de Yukawa.

Cabe ressaltar que essa contínua necessidade de romper e atingir determinados regimes de energia que faz com que a Física de Partículas também seja conhecida como Física de Altas Energias.