

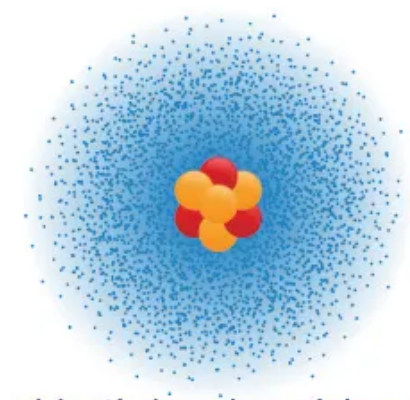
Introdução à Física de Partículas Elementares (Física Moderna IIA)

Aula 10

O Potencial de Yukawa: quantizando as interações

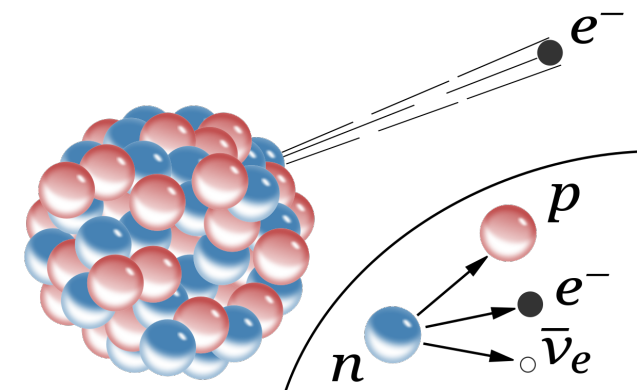
Modelo Estrutural Atômico

- Na década de 30 do século XX, estabelece-se o que estamos chamando de Modelo Estrutural Atômico
- O modelo do átomo, com prótons e nêutrons compondo o núcleo e elétrons orbitando a sua volta conforme descrito pela física quântica relativística, que dava conta também do spin e a antimatéria, recém descoberta



Modelo Estrutural Atômico

- Os decaimentos radioativos eram explicados pela emissão de antineutrinos (neutrinos) e elétrons (pósitrons)
- Os fótons explicavam a aplicação da física quântica ao eletromagnetismo



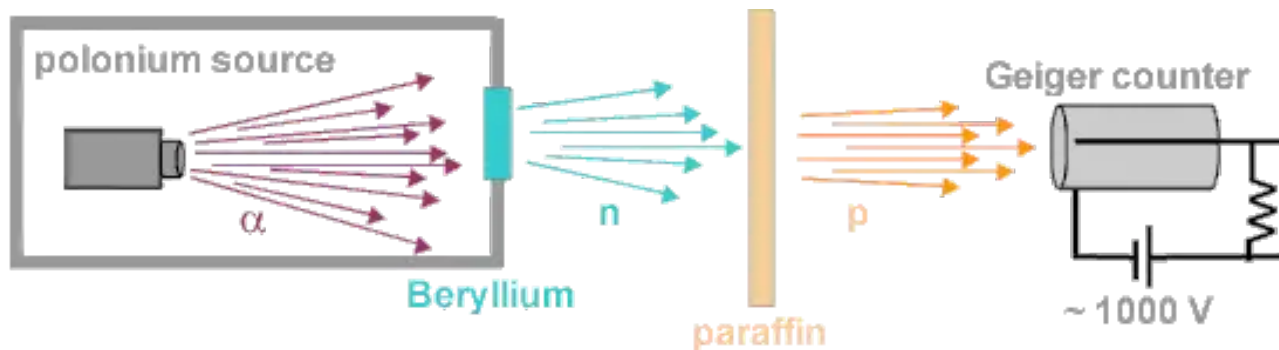
Interações

- Porém, um dos grandes desafios que o Modelo Estrutural Atômico levanta é a estabilidade (e instabilidade, ou seja, decaimentos) do núcleo
- Qual é o mecanismo responsável pela atração entre prótons e nêutrons que mantém o núcleo estável? E como se dá o processo de decaimento?
- Como conciliar esses mecanismos com a física quântica e a relatividade?

O nêutron segundo Chadwick



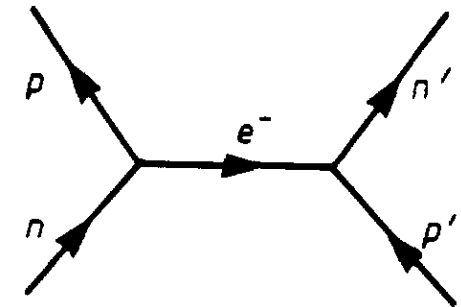
- O nêutron foi descoberto em 1932 por James Chadwick



- Ele acreditava que o nêutron era um próton combinado com um elétron e não uma partícula "fundamental", como o próton (na época). Proposta semelhante já havia sido feita por Rutherford em 1920.

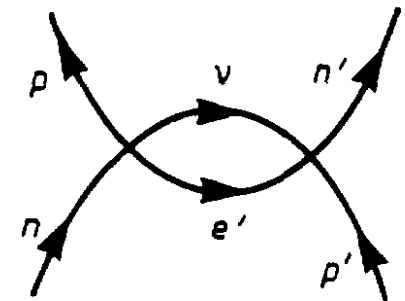
Estabilidade Nuclear

- Heisenberg acreditava que haviam elétrons no núcleo
- Sua proposta para as força nucleares consistia:
 - na troca de elétrons entre prótons e nêutrons
 - na troca de dois elétrons entre nêutrons
 - e prótons só interagiam através da força Coulombiana



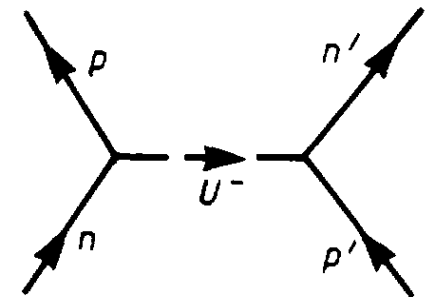
Estabilidade Nuclear

- Fermi propõe que os elétrons não existem dentro dos núcleos, mas são criados durante o decaimento beta com os neutrinos
- Com essa proposta, a interação nuclear é vista como uma extensão do decaimento beta, envolvendo também os neutrinos



Estabilidade Nuclear

- O físico japonês Yukawa, propõe em 1934 que um nova partícula deveria ser responsável pela força nuclear e não o elétron
- A inspiração de Yukawa foi o trabalho de Heisenberg, Fermi e a visão quântica do eletromagnetismo com a emissão de fótons em transições atômicas



Interação Eletromagnética

- Como relacionar os campos eletromagnéticos, descritos pelas equações de Maxwell, com a sua quantização, ou seja, os fótons?
- Não vamos resolver esta questão, mas usar um caminho semelhante para a força nuclear

Interação Eletromagnética

- Das equações de Maxwell:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad \vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0 \quad \vec{\nabla} \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

- Podemos escrever os campos elétrico e magnético em termos do potencial escalar V e vetor \vec{A}

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} \text{ e } \vec{E} = -\vec{\nabla} V - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}$$

Interação Eletromagnética

- Com isso, podemos representar a propagação de ondas eletromagnéticas no vácuo a partir dessas potencias através das equações

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

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

Eletromagnetismo Quântico

- A formulação quântica do eletromagnetismo parte dessas equações, considerando que os campos eletromagnéticos são quantizados, ou seja, possuem unidades mínimas, que neste caso é o fóton
- Uma característica importante do eletromagnetismo quântico é que seu quanta, o fóton, tem massa de repouso nula, portanto o alcance da força eletromagnética é infinita (longo alcance)

Equação de Klein-Gordon

- Essas equações são muito parecidas com as equação de Klein-Gordon (em 3 dimensões):

$$-\hbar^2 \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}(\vec{r}, t) = -\hbar^2 c^2 \nabla^2 \psi(\vec{r}, t) + m^2 c^4 \psi(\vec{r}, t)$$

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

- a menos do termo com a massa

Proposta de Yukawa

- Yukawa assumiu que a força nuclear também pode ser escrita em termos de um potencial, que chamaremos de $U(\vec{r}, t)$, que porém obedece a equação de Klein-Gordon:

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

- considerando que a massa do quantum (partícula) dessa força não é zero como o fóton
- A versão independente do tempo dessa equação é dada por

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

Proposta de Yukawa

- Yukawa mostrou que a solução dessa equação é dada por:

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

- Podemos extrair a força a partir desse potencial que é dada por:

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

- Para $m = 0$, temos a força com alcance infinito (como no eletromagnetismo)

- Para $m \neq 0$, a força se anula em $r' = \frac{\hbar}{mc}$

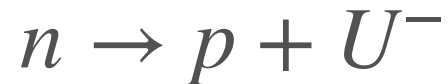
Proposta de Yukawa

- Portanto, o alcance da força depende da massa do quantum do campo
- Como já era conhecido o curto alcance da força nuclear, da ordem de $10^{-15}m$, pode-se calcular o valor esperado para a massa desse quantum da força nuclear que é:

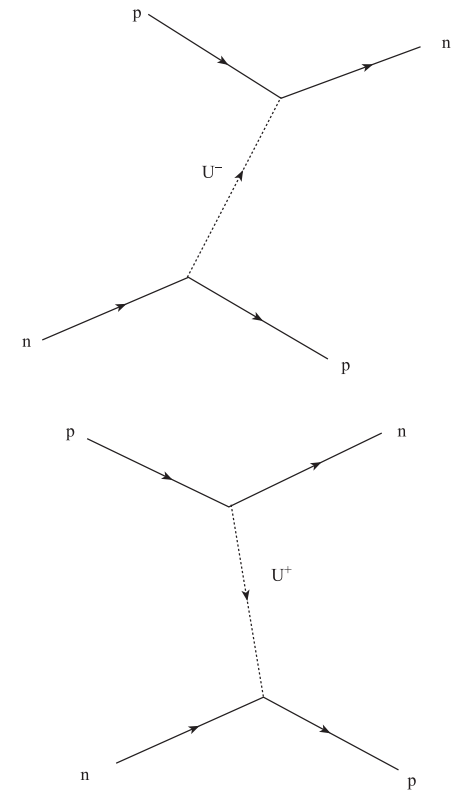
$$mc^2 = \frac{\hbar c}{r'} \approx 200MeV$$

Conservação de Energia?

- Portanto, Yukawa propõe que o nêutron, por exemplo, emitiria essa partícula com carga negativa, se transformando em um próton



- Se a partícula U^{-} tem uma massa de 200 MeV, o processo acima não conserva energia, pois a massa do nêutron é ligeiramente maior que a do próton



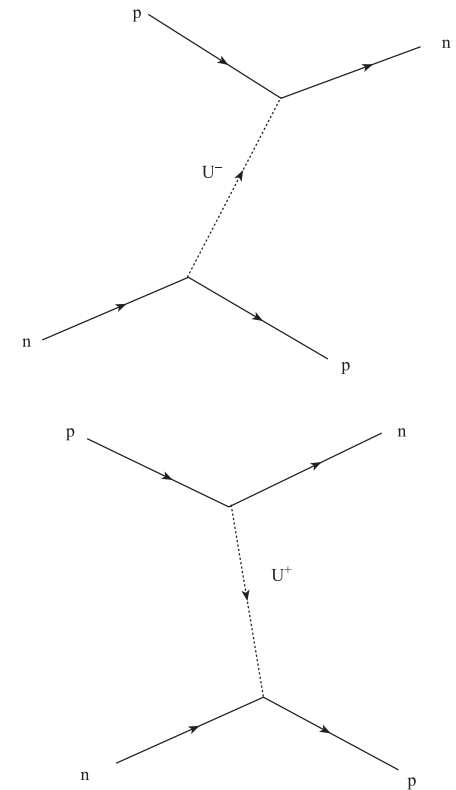
Conservação de Energia?

- A solução para esse dilema é considerar o processo inverso



- que restaura a conservação de energia se esse processo for rápido o suficiente, consistente com o princípio da incerteza

- $\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$

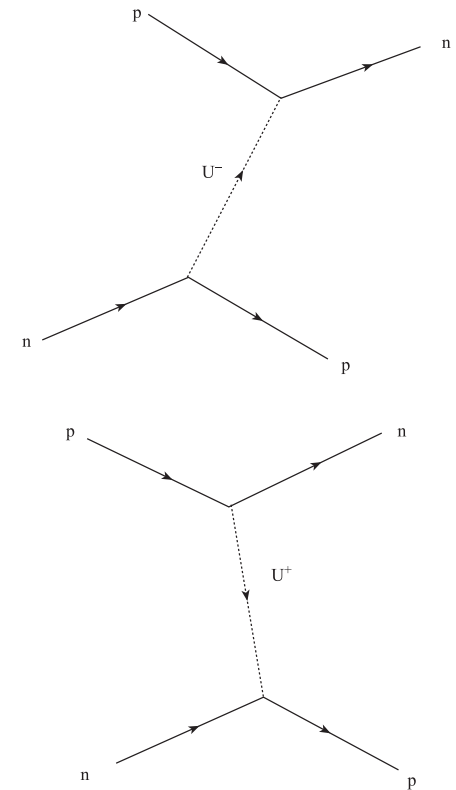


Conservação de Energia?

- Considerando que a partícula U^- viaja a velocidade da luz e o alcance da força é r' , então $\Delta t \approx \frac{r'}{c}$ e

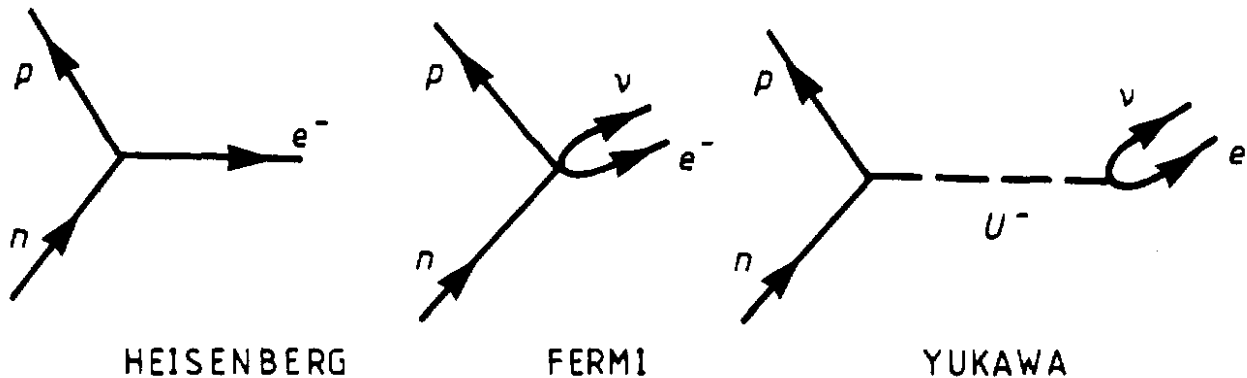
$$\Delta E \frac{r'}{c} \approx \hbar/2 \Rightarrow \Delta E \approx \frac{\hbar c}{2r'}$$

- Sendo $\Delta E = mc^2 \approx \frac{\hbar}{r'c}$



Decaimentos Nucleares

- A proposta do meson de Yukawa também pode ser aplicada para explicar o decaimento beta dos núcleos, que seria a consequência da emissão e decaimento desse méson



Uma nova partícula?

- Yukawa portanto propõe a existência de uma nova partícula e consegue prever o valor da sua massa
- Caberia em seguida aos experimentais verificar a sua existência