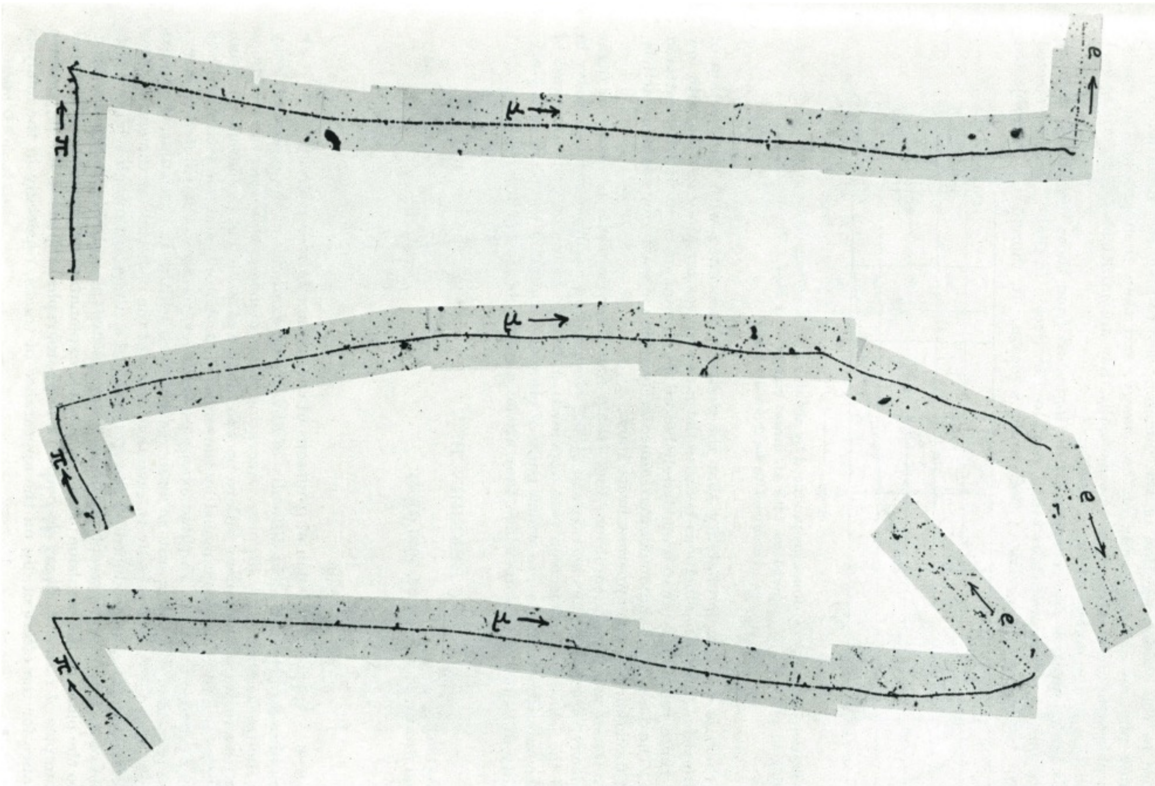
Introdução à Física de Partículas Elementares (Física Moderna IIA)

Aula 12

Diagramas de Feynman

Descoberta de Múons (μ) e Píons (π)

- A busca pelo méson de Yukawa revelou a existência de duas partículas
- Os píons (π), partícula prevista por Yukawa, decaía em múons (μ) que por sua vez decaíam em elétrons (e)



Descoberta de Múons (μ) e Píons (π)

10^{-8} s
Decaimento
Píon (π)

$$\pi^{+} \rightarrow \mu^{+} + \nu_{\mu}$$

$$\hookrightarrow e^{+} + \nu_{e} + \bar{\nu}_{\mu}$$

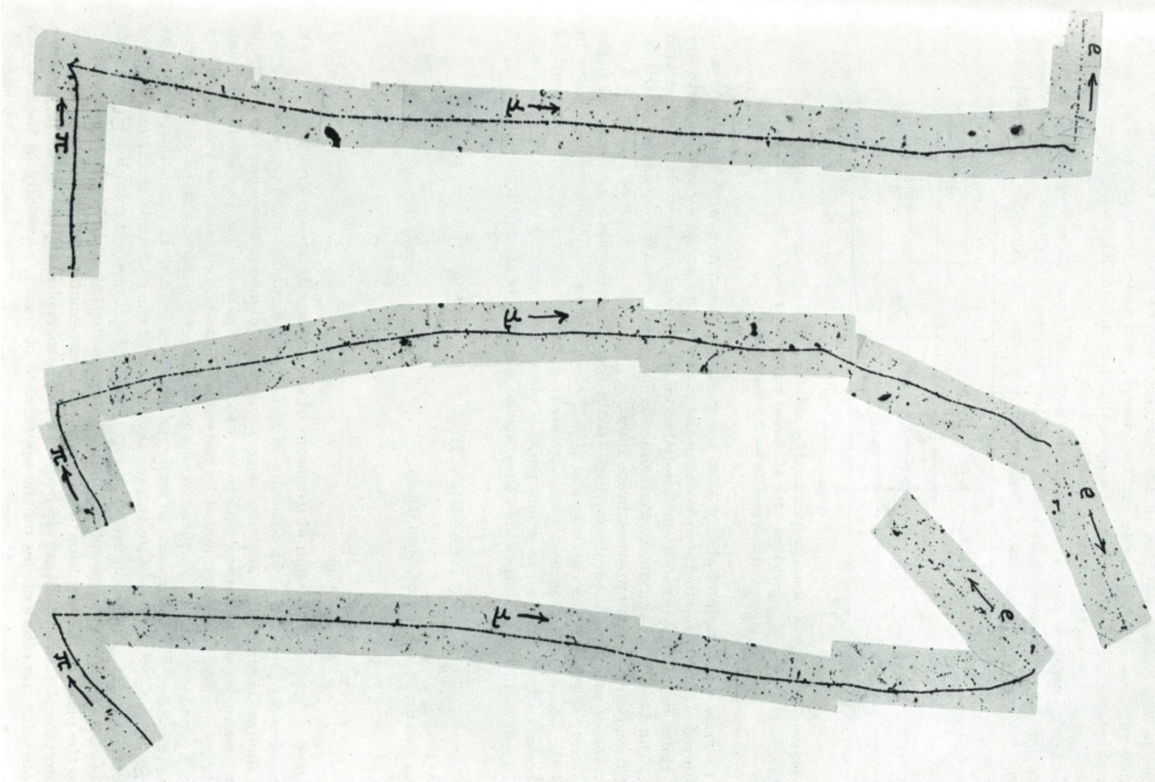
10^{-6} s
Decaimento
Múon (μ)

10^{-8} s
Decaimento
Píon (π)

$$\pi^{-} \rightarrow \mu^{-} + \bar{\nu}_{\mu}$$

$$\hookrightarrow e^{-} + \bar{\nu}_{e} + \nu_{\mu}$$

10^{-6} s
Decaimento
Múon (μ)



Descoberta de Múons (μ) e Píons (π)

10^{-8} s
Decaimento
Píon (π)

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

10^{-6} s
Decaimento
Múon (μ)

10^{-8} s
Decaimento
Píon (π)

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

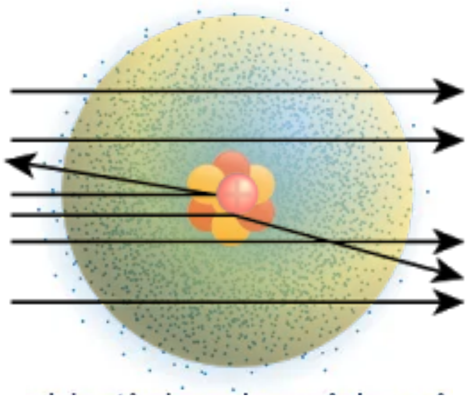
10^{-6} s
Decaimento
Múon (μ)

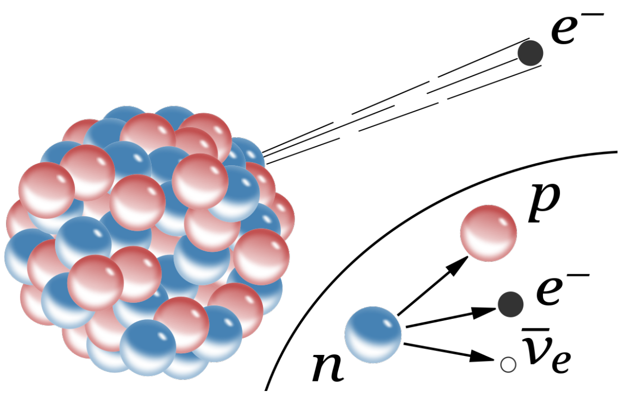
- Por que os tempos de vida média de píons (π) e múons (μ) são tão diferentes?
- Além disso, a probabilidade de interação de múons (μ) indicava ser menor do que com píons (π). Por quê?

Como avançar?

- Em termos experimentais, estabeleceu-se nesta época duas formas de se estudar a estrutura elementar da matéria: decaimentos e colisões

Medidas da Seção de Choque



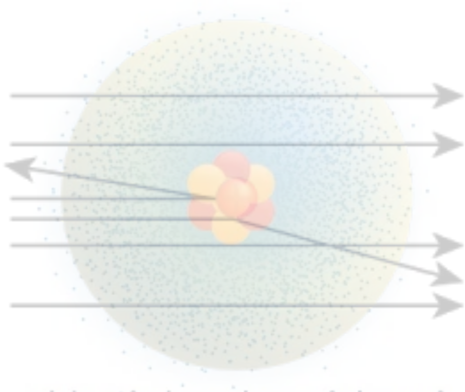


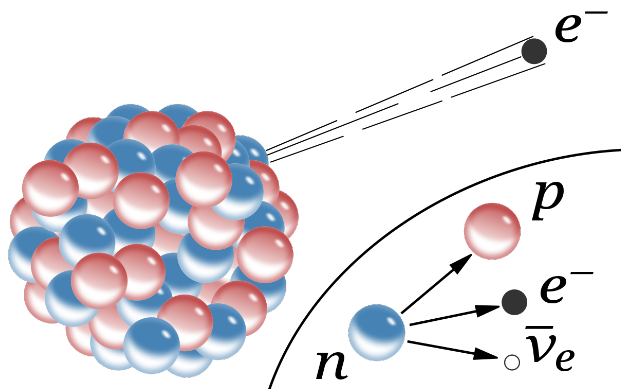
Medidas do Tempo de Vida Média

Como avançar?

- Em termos experimentais, estabeleceu-se nesta época duas formas de se estudar a estrutura elementar da matéria: decaimentos e colisões

Medidas da Seção de Choque





Medidas do Tempo de Vida Média

Decaimento de Múons (μ) e Píons (π)

- Podemos determinar precisamente o tempo que estas partículas ou até mesmo núcleos levam para decair?
- Não, pois experimentalmente, observamos que esse tempo não é fixo para diferentes “indivíduos” de um mesmo elemento
- Se temos uma amostra de certas partículas ou elementos, seu número original diminui (decai) exponencialmente com o tempo

Decaimento de Múons (μ) e Píons (π)

- Essa observação leva a uma interpretação probabilística de decaimentos
- O decaimento de núcleos, píons e múons são processos estatísticos, ou seja, impossível de prever exatamente o instante em que ele ocorrerá
- Portanto, temos que lidar com amostras e probabilidades

Taxa de Decaimento

- Se temos uma amostra $N(t)$ de partículas em um certo instante, uma fração Γ dessas partículas decairá no intervalo de tempo seguinte (dt), levando a um decréscimo dN de partículas

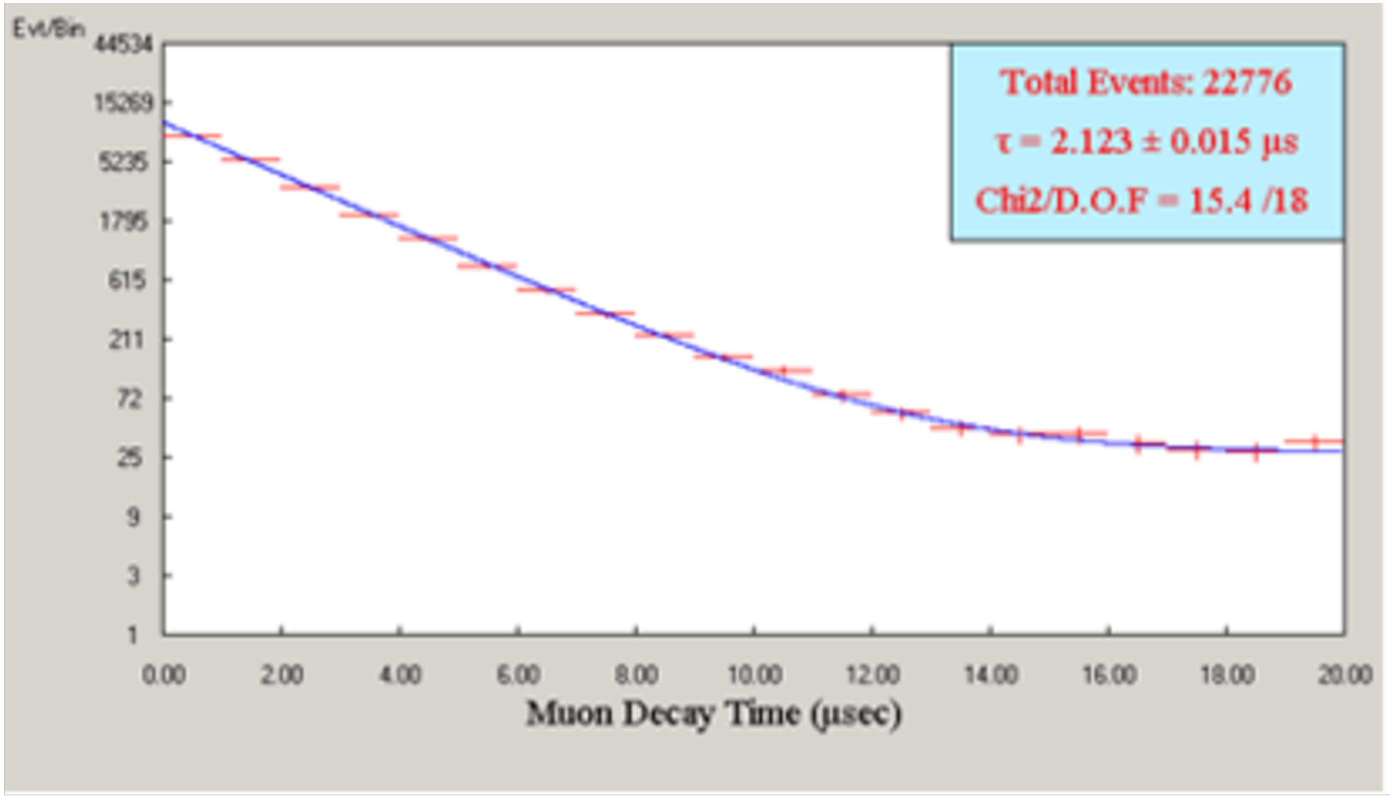
$$dN = -\Gamma N dt$$

- Essa equação tem como solução

$$N(t) = N(0)e^{-\Gamma t}$$

- sendo Γ a taxa de decaimento dessas partículas

Taxa de Decaimento

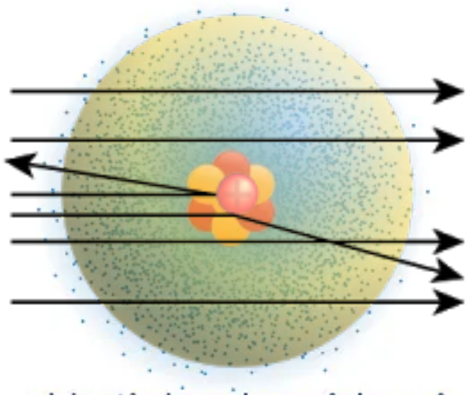


https://www.teachspin.com/muon-physics

Como avançar?

- Em termos experimentais, estabeleceu-se nesta época duas formas de se estudar a estrutura elementar da matéria: decaimentos e colisões

Medidas da Seção de Choque



Medidas do Tempo de Vida Média

Colisões entre partículas

- Em 1909, a descoberta do núcleo atômico havia sido feita a partir de colisões entre partículas
- Porém, inicialmente, essas colisões limitavam-se a emissões radioativas
- Nas palavras de Rutherford em 1928: "*I have long hoped for a source of positive particles more energetic than those emitted from natural radioactive substances*"

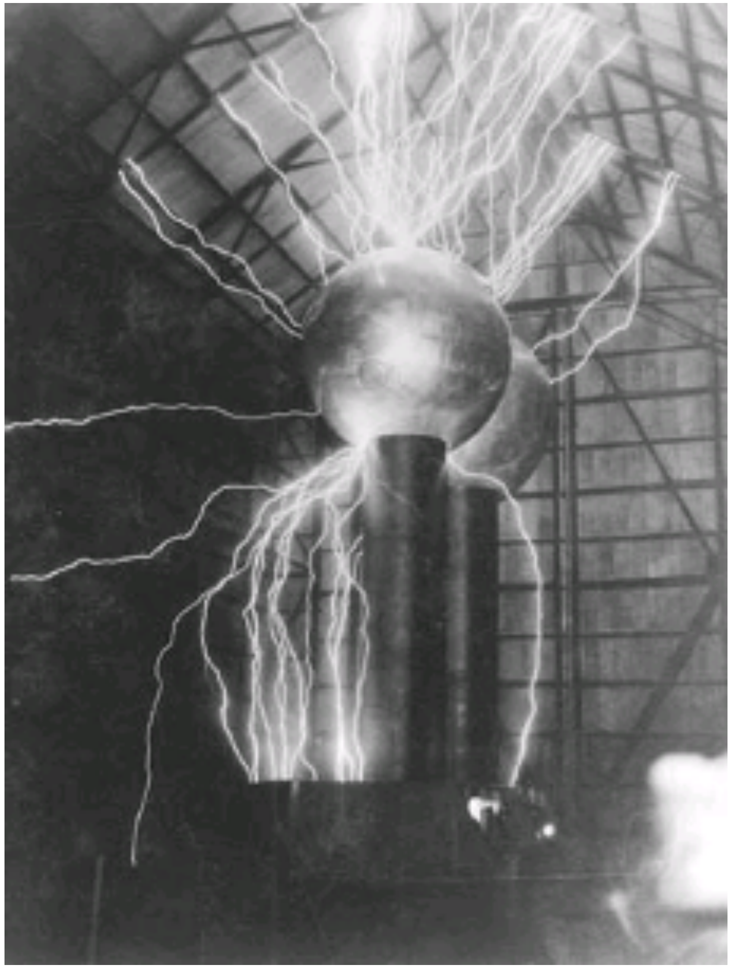
IFUSP Instituto de Física da USP

Aceleradores de Partículas

- Equipamentos com capacidade de acelerar (levar do repouso até altíssimas velocidades) diferentes tipos de partículas e provocar a colisão entre elas
- A força elétrica é usada para acelerar e a magnética para direcionar o feixe de partículas
- O desafio, portanto, era criar fontes de alta tensão elétrica e bastante estáveis

Van de Graaf

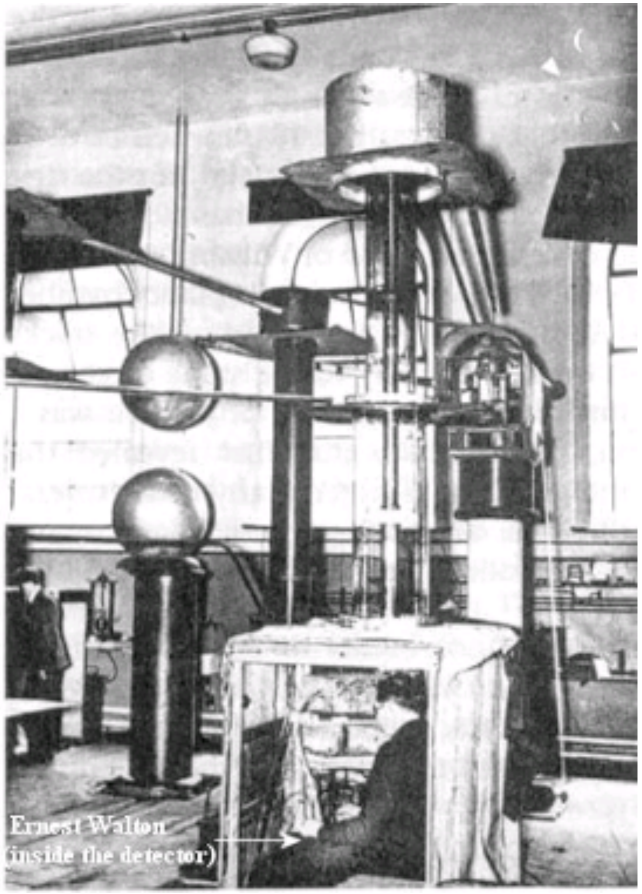
- Em 1929, o engenheiro americano Robert Van de Graaf desenvolve um equipamento para criar altas tensões usando correias para transporta a carga elétrica a terminais



Cockcroft e Walton

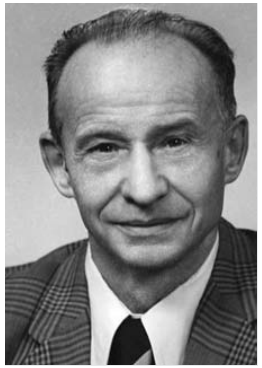
- Quase em paralelo, John Cockcroft e Ernest Walton criam em 1932 em Cambridge, um outro equipamento para gerar altas tensões e ser usado como acelerador de partículas
- Com o seu equipamento, a primeira reação nuclear foi estudada:

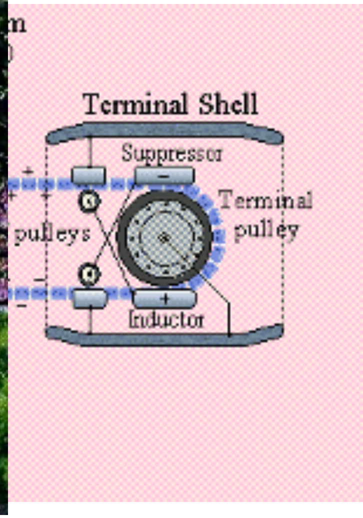
$$p + {}^{7}Li \rightarrow {}^{4}He + {}^{4}He$$



Wisconsin

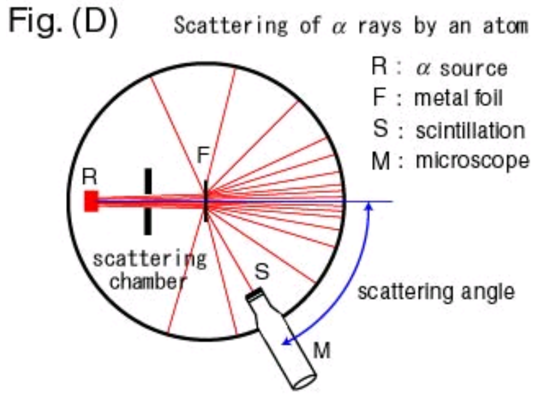
- Também nessa época, Raymond Herb da Universidade de Wisconsin desenvolveu diversas melhorias
- Em 1965, ele cria os aceleradores tipo Pelletron, que o Brasil foi o primeiro a adquirir

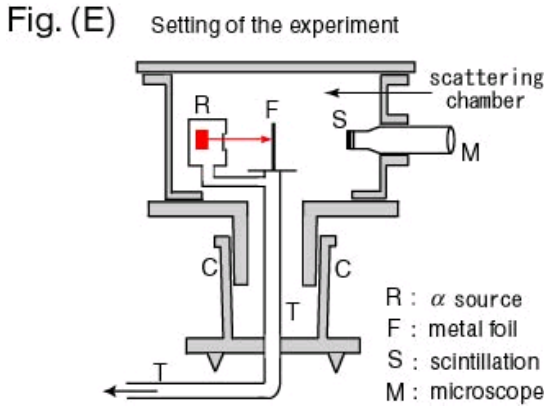




Descoberta do Núcleo Atômico

- Geiger e Marsden (1909) observam o resultado do bombardeamento de partículas-α em finas folhas de certos materiais, medindo o número de partículas espalhadas em função do ângulo
- Para a surpresa de todos, eles observam partículas espalhando em ângulos bastante traseiros





Descoberta do Núcleo Atômico

- Em 1911, Rutherford publica um artigo deduzindo a expressão para o espalhamento de partículas-α em função do ângulo θ de espalhamento

$$dN = N(\theta)d\theta = \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Zze^2}{2mv^2}\right)^2 \frac{I \cdot \rho \cdot t}{sen^4\left(\theta/2\right)} 2\pi \cdot sen(\theta)d\theta$$

- Esse resultado é melhor representado a partir do conceito de seção de choque

Normalizando as medidas: Definição de seção de choque

- Ao incidir um feixe de partículas sobre um alvo, o número de partículas por unidade de tempo que irão interagir com o alvo (*N*) é proporcional ao número de partículas por unidade de tempo no feixe (intensidade do feixe - *I*) e o número de átomos no alvo por unidade de área *(n):*

$$N \propto I \cdot n$$

- A constante de proporcionalidade depende dos processos físicos envolvidos na interação e é chamada de seção de choque (σ):

$$N = \sigma \cdot I \cdot n$$

Seção de Choque

- A seção de choque tem unidade de área:

$$\sigma = N/_{I \cdot n} \Rightarrow {}^{partículas/s}/_{partículas/s \cdot partículas/área} = área$$

- Ela corresponde a uma área efetiva que o projétil deve entrar para interagir com o alvo
- Uma interpretação melhor para a seção de choque é simplesmente a probabilidade de interação

Seção de choque diferencial

- A seção de choque diferencial ($d\sigma/d\Omega$) fornece o número de partículas espalhadas em um dado elemento de ângulo sólido $d\Omega$, ou seja:

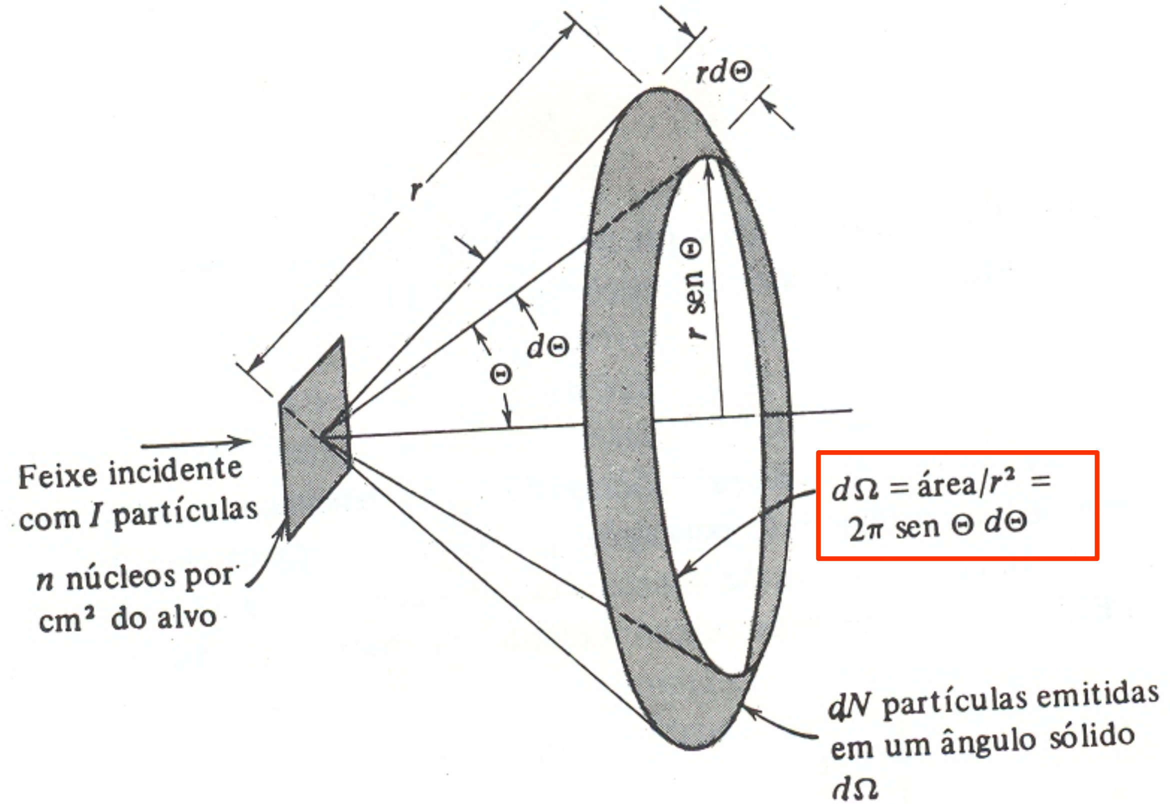
$$dN = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot I \cdot n \cdot d\Omega$$

I = intensidade do feixe

n = centros espalhadores por unidade de área

$$n = \rho \cdot t$$

Seção de choque diferencial



Seção de choque diferencial de Rutherford

- Portanto, como: $$dN = \frac{d\sigma}{d\Omega} \cdot I \cdot n \cdot d\Omega$$

e:

$$dN = N(\theta)d\theta = \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Zze^2}{2mv^2}\right)^2 \frac{I \cdot \rho \cdot t}{sen^4\left(\theta/2\right)} 2\pi \cdot sen(\theta)d\theta$$

tem-se que:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dN}{I \cdot n \cdot d\Omega} = \left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Zze^2}{2mv^2}\right)^2 \frac{1}{sen^4\left(\theta/2\right)}$$

O sucesso da descrição de Rutherford?

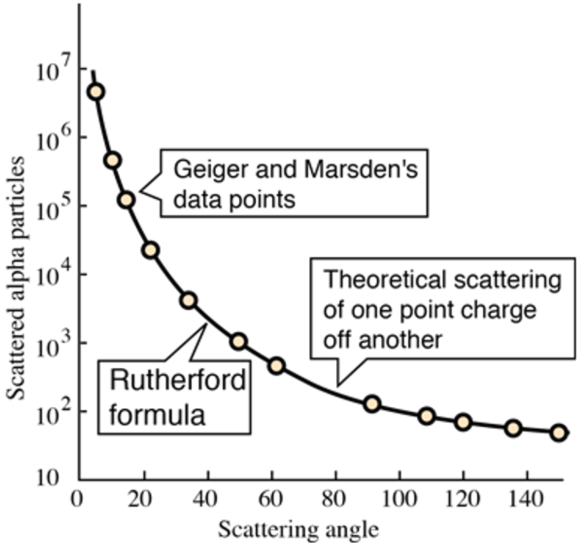
- Note que Rutherford só conseguiu fazer uma descrição da seção de choque pois ele conhecia o comportamento matemático da interação Coulombiana

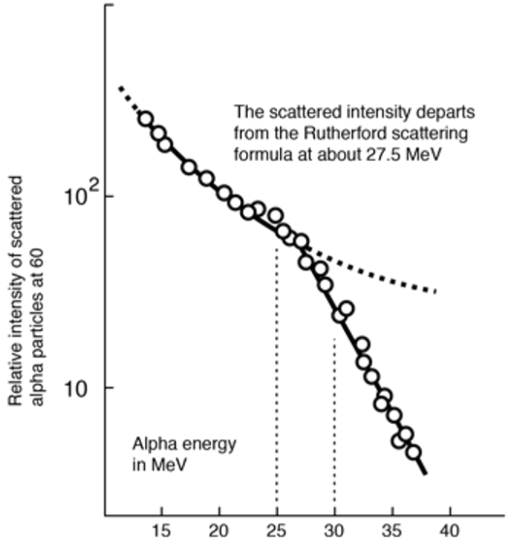
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{dN}{I \cdot n \cdot d\Omega} = \boxed{\left(\frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\right)^2 \left(\frac{Zze^2}{2mv^2}\right)^2} \frac{1}{sen^4\left(\theta/_2\right)}$$

- Será que Rutherford conseguiria descrever o espalhamento se a forma matemática da força elétrica não fosse conhecida?

As limitações da descrição de Rutherford

- Boa descrição até o momento em que as interações nucleares passam a exercer influência

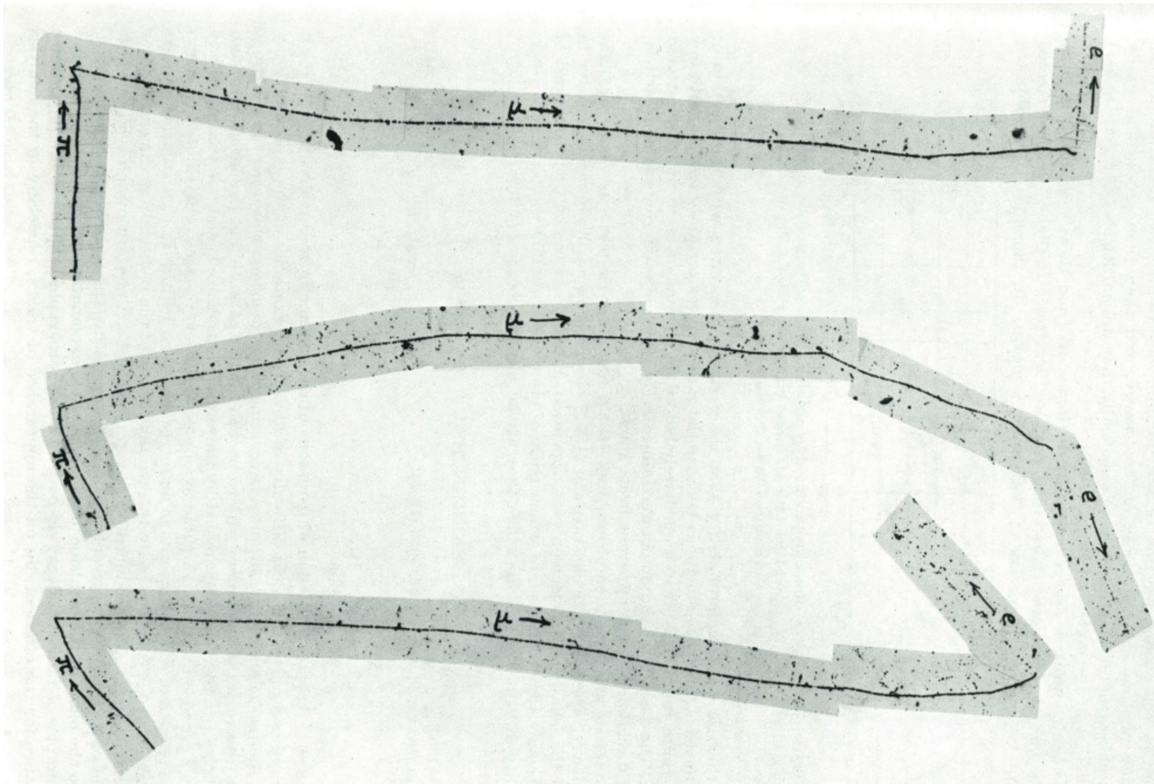




- Como descrever teoricamente uma interação que não conhecemos a forma matemática?

Seção de choque de Múons (μ) e Píons (π)

- Para além da vida média, na época também foram medidas as seções de choque de interação de múons (μ) e píons (π) com núcleos atômicos



Seção de choque de Múons (μ) e Píons (π)

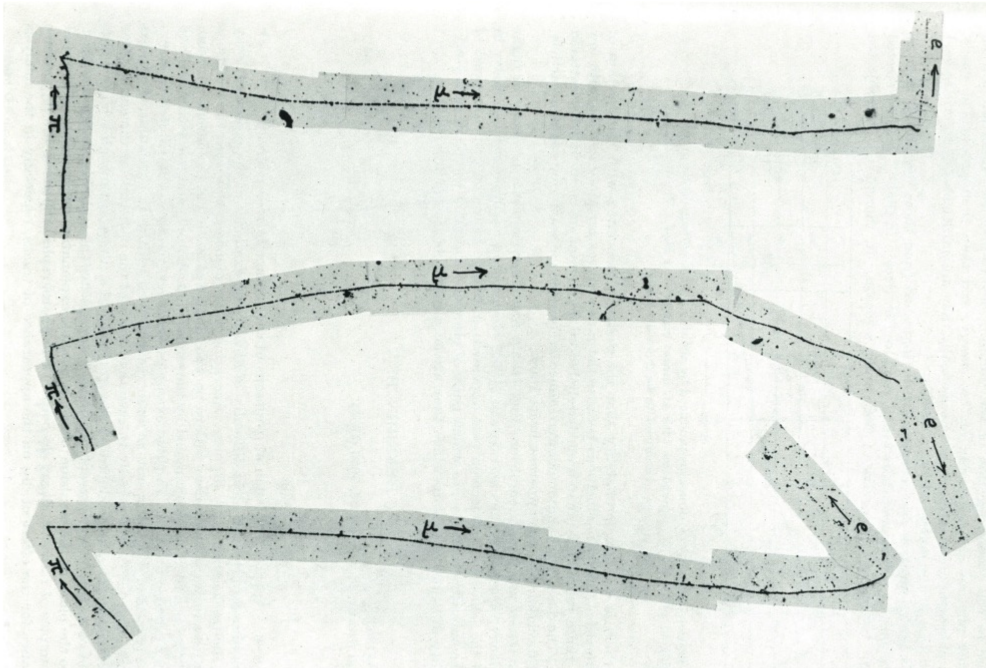
- Apesar de mesma carga e massas próximas

$m_\pi = 140MeV/c^2$ e $m_\mu = 105MeV/c^2$

- múons (μ) e píons (π) possuíam seções de choque significativamente diferentes

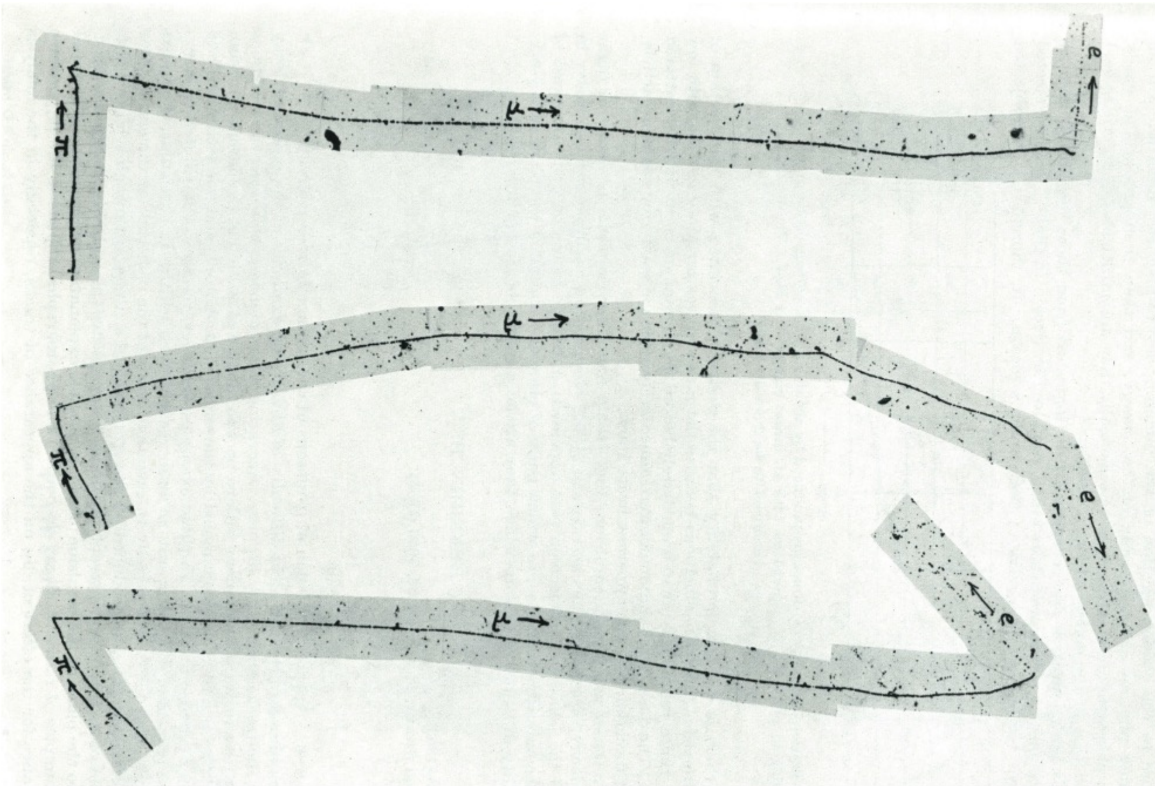
$\sigma_\pi \approx 10^{-26}m^2$ e $\sigma_\mu \approx 10^{-28}m^2$

- A probabilidade de interação com múons (μ) indicava ser menor do que com píons (π)



Seção de choque de Múons (μ) e Píons (π)

- Por que as seções de choque de píons (π) e múons (μ) são tão diferentes?
- Píons (π) parecem interagir mais fortemente e múons (μ) mais fracamente.
- Será que eles são regidos pelas mesmas interações?



Descrição Teórica

- A fundamental importância desses dois observáveis é o fato de permitirem uma conexão entre o experimento e a teoria
- Portanto, é preciso encontrar uma forma de descrever teoricamente esses observáveis a partir da física quântica

Emissão de Fótons

- Em 1927, Dirac propõe uma forma de tratar a emissão espontânea de fótons por átomos excitados

$$A \rightarrow A^* + \gamma$$

- Ele utiliza da chamada abordagem perturbativa, ou seja, a emissão pode ser tratada como uma perturbação no estado inicial do átomo que leva ao estado final mais o fóton

Regra de ouro de Fermi

- Em 1933, Fermi propõe uma forma para descrever o decaimento beta baseando-se nesse trabalho de Dirac
- Essa expressão é conhecida como regra de ouro de Fermi

Regra de ouro de Fermi

- A regra diz que a taxa de transição (ou decaimento) de um estado inicial (i) para um estado final (f) é dada por:

$$\Gamma_{fi} = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{fi}|^2 \rho(E)$$

- onde $|M_{fi}|^2$ é a probabilidade de transição do estado inicial para o final e $\rho(E)$ é a densidade de estados finais com energia E

Diagramas de Feynman

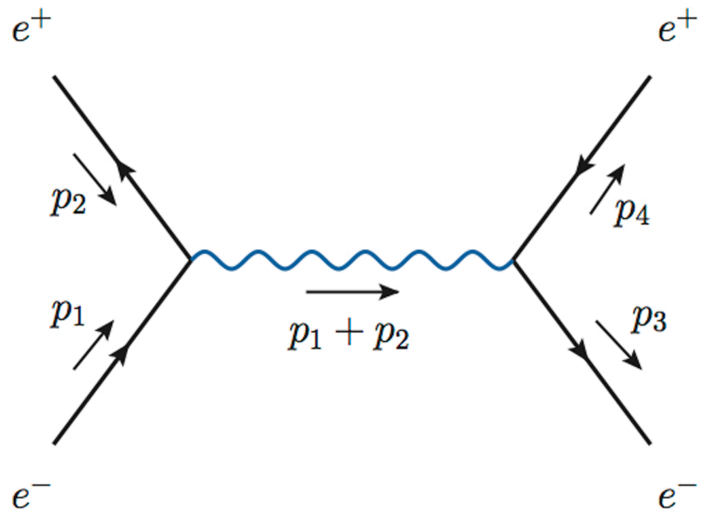
- O fator M_{fi}, chamado de amplitude de probabilidade, é que contém toda a física envolvida no processo considerado e precisa ser calculado
- Feynman, em 1948, propôs uma formulação do eletromagnetismo quântico estabelecendo regras que facilitam o cálculo dessas amplitudes de probabilidade

As regras de Feynman

- Os diagramas de Feynman essencialmente representam um processo físico do tipo

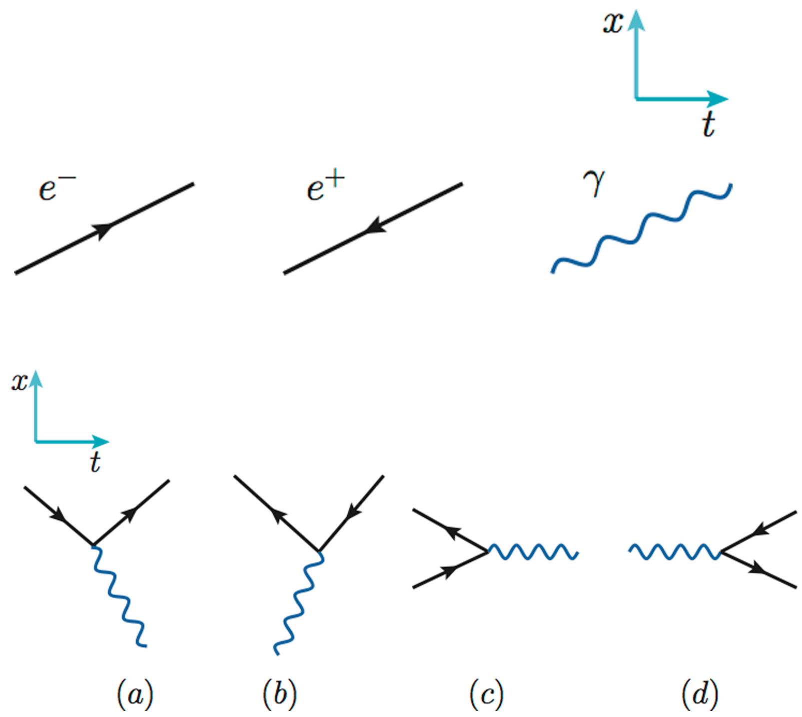
partículas iniciais →interação → partículas finais

- a partir de uma série de regras que facilitam o cálculo de M_{fi}



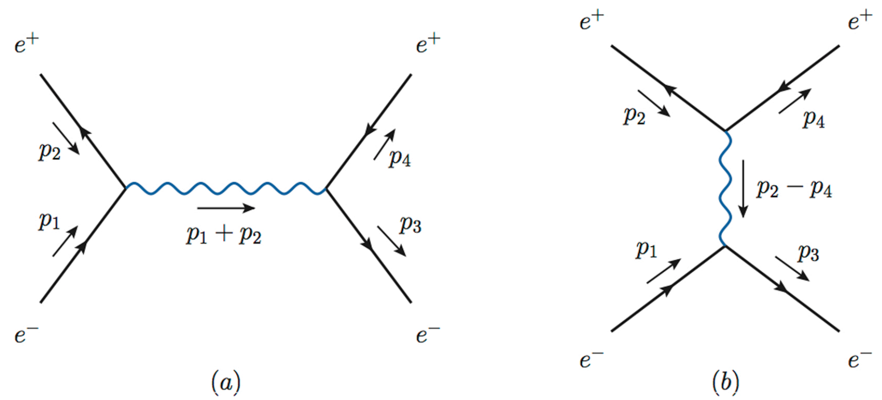
As regras de Feynman

- Inicialmente, precisamos decidir o que significa cada direção do diagrama (tempo e espaço)
- Linhas cheias são usadas para as partículas, com flechas no sentido do tempo para matéria e no sentido oposto para antimatéria
- Linhas diferentes são usadas para as partículas virtuais
- As interações são representadas por vértices



Espalhamento Bhabha

- Vamos tomar como exemplo o espalhamento de um elétron em um pósitron
- Para esse espalhamento, duas possibilidades devem ser consideradas:
  - o elétron e o pósitron se aniquilando, produzindo um fóton virtual que em seguida cria um par elétron-pósitron
  - a emissão de um fóton virtual por uma das partículas que interage com a outra

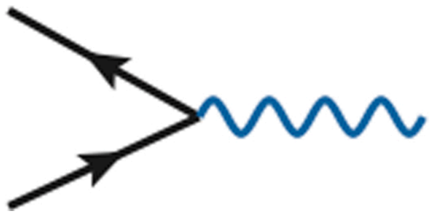


As regras de Feynman

- Feynman calculou uma expressão matemática para cada elemento do diagrama

$$= \frac{-ig^{\mu\nu}}{p^2+i\epsilon}$$

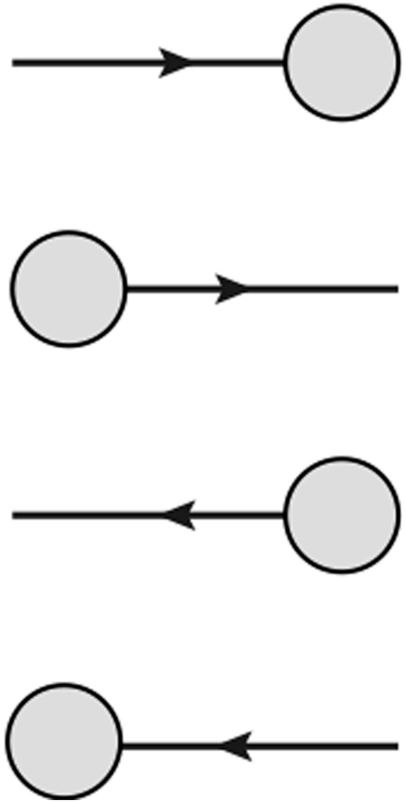
$$= \frac{i(\not{p}+m)}{p^2+m^2+i\epsilon}$$



$$= -ie\gamma^{\mu}$$

As regras de Feynman

- Feynman calculou uma expressão matemática para cada elemento do diagrama
- Combinando essas expressões com os spinores da equação de Dirac, é possível calcular M_{fi}



$= u(p)$

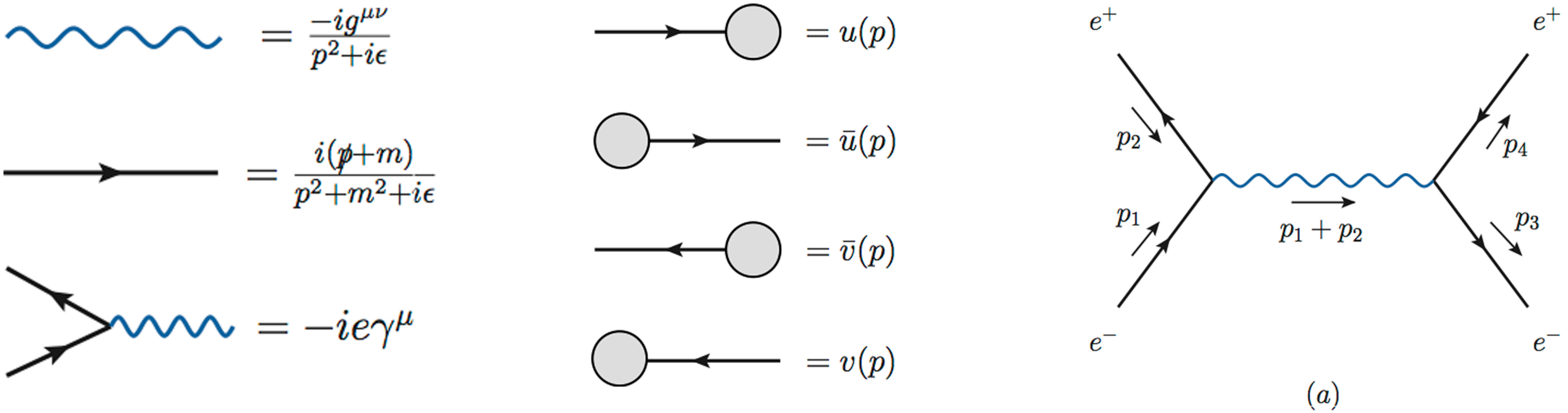
$= \bar{u}(p)$

$= \bar{v}(p)$

$= v(p)$

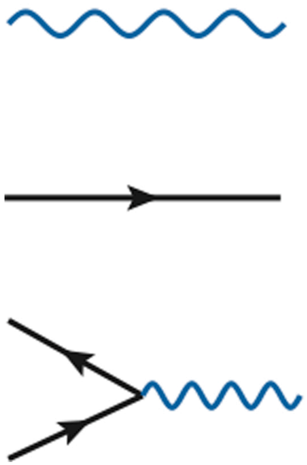
Espalhamento Bhabha

$$iM^a_{fi} = (-ie^2)[\bar{v}(p_2)\gamma^\mu u(p_1)]\frac{-ig_{\mu\nu}}{(p_1+p_2)^2}[\bar{u}(p_3)\gamma^\mu v(p_4)]$$



Espalhamento Bhabha

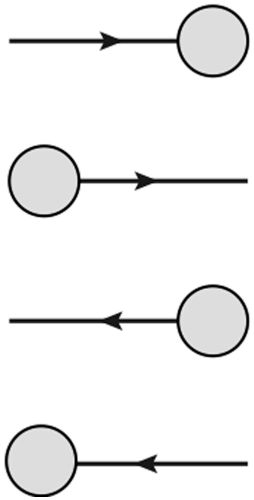
$$iM^b_{fi} = (-ie^2)[\bar{v}(p_2)\gamma^\mu v(p_4)]\frac{-ig_{\mu\nu}}{(p_2-p_4)^2}[\bar{u}(p_3)\gamma^\mu u(p_1)]$$



$$= \frac{-ig^{\mu\nu}}{p^2+i\epsilon}$$

$$= \frac{i(\not{p}+m)}{p^2+m^2+i\epsilon}$$

$$= -ie\gamma^\mu$$

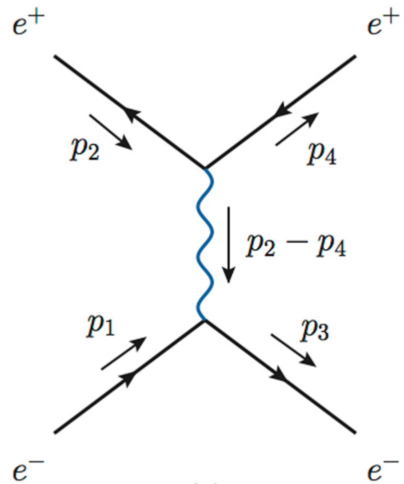


$$= u(p)$$

$$= \bar{u}(p)$$

$$= \bar{v}(p)$$

$$= v(p)$$



(b)

Espalhamento Bhabha

- A partir das variáveis de Mandelstam

$$s = 2(\overrightarrow{p}_1 \cdot \overrightarrow{p}_2) = 2(\overrightarrow{p}_3 \cdot \overrightarrow{p}_4)$$

$$t = -2(\overrightarrow{p}_1 \cdot \overrightarrow{p}_3) = -2(\overrightarrow{p}_4 \cdot \overrightarrow{p}_2)$$

$$u = -2(\overrightarrow{p}_1 \cdot \overrightarrow{p}_4) = -2(\overrightarrow{p}_3 \cdot \overrightarrow{p}_2)$$

- Chega-se à seção de choque para esse espalhamento

$$\frac{d\sigma}{dt} = \frac{2\pi\alpha^2}{s^2}\left(\frac{t^2+u^2}{s^2} + \frac{s^2+u^2}{t^2} + \frac{2u^2}{st}\right)$$

Espalhamento Bhabha

- Esse resultado pode ser expresso em termos do ângulo de espalhamento θ, visto que

$$t = -s\frac{1 - cos\theta}{2} \text{ e } u = -s\frac{1 + cos\theta}{2}$$

- temos que:

$$\frac{d\sigma}{d\cos\theta} = \frac{\alpha^2}{s}\left[\frac{(1-\cos^2\theta)}{2} + \frac{(5+2\cos\theta+\cos^2\theta)}{(1-\cos^2\theta)} - \frac{(1+\cos\theta)^2}{(1-\cos\theta)}\right]$$

Eletrodinâmica Quântica

- Além de Feynman, Julian Schwinger e Sin-Itri Tomonaga também estabeleceram independentemente formas alternativas para o que chamamos hoje da Eletrodinâmica Quântica
- Essa teoria representou um enorme avanço para a física de partículas

Who ordered that?

- Com a descoberta do meson-pi ou pion (π) e a elaboração da eletrodinâmica quântica, a descrição da estrutura elementar da matéria parecia resolvida, a menos do meson descoberto por Anderson em 1937, o chamado muon (μ)
- Afinal, qual seria o papel dessa partícula nessa descrição?