



Física de Partículas

(1ª Parte)

23ª aula

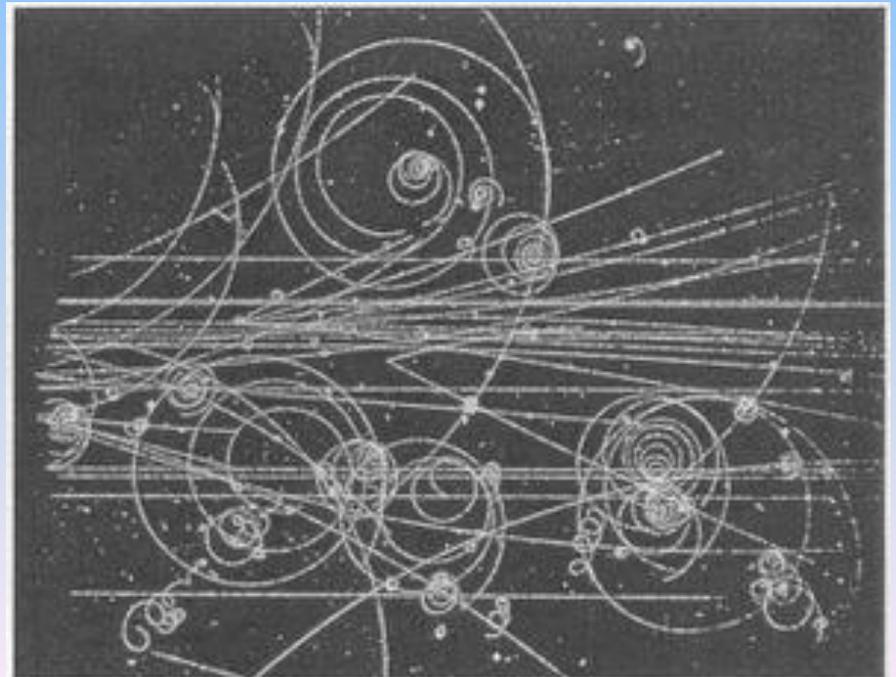
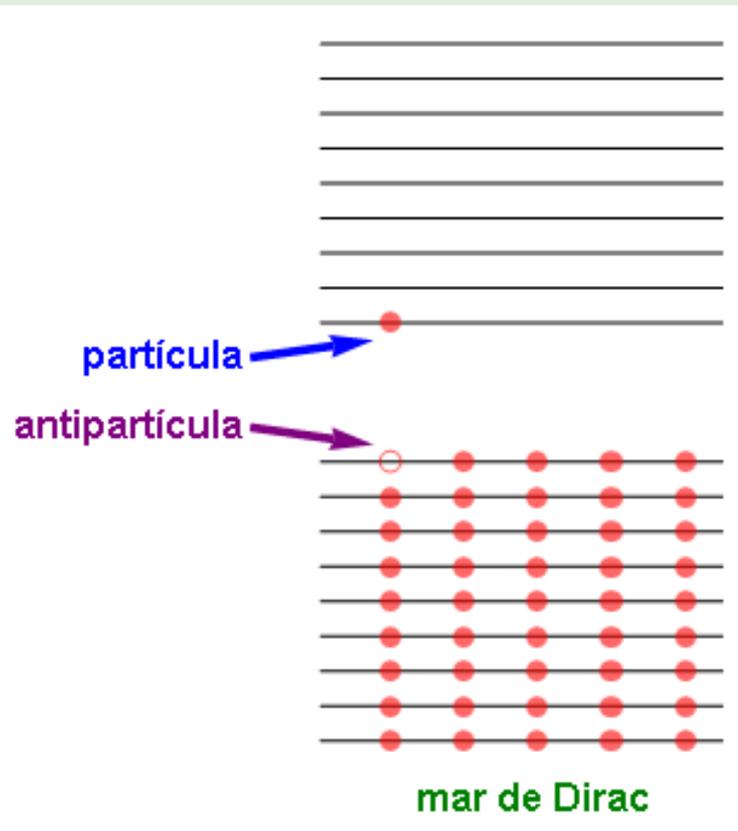
Física IV - Eng. Elétrica 2014

Professor Alvaro Vannucci

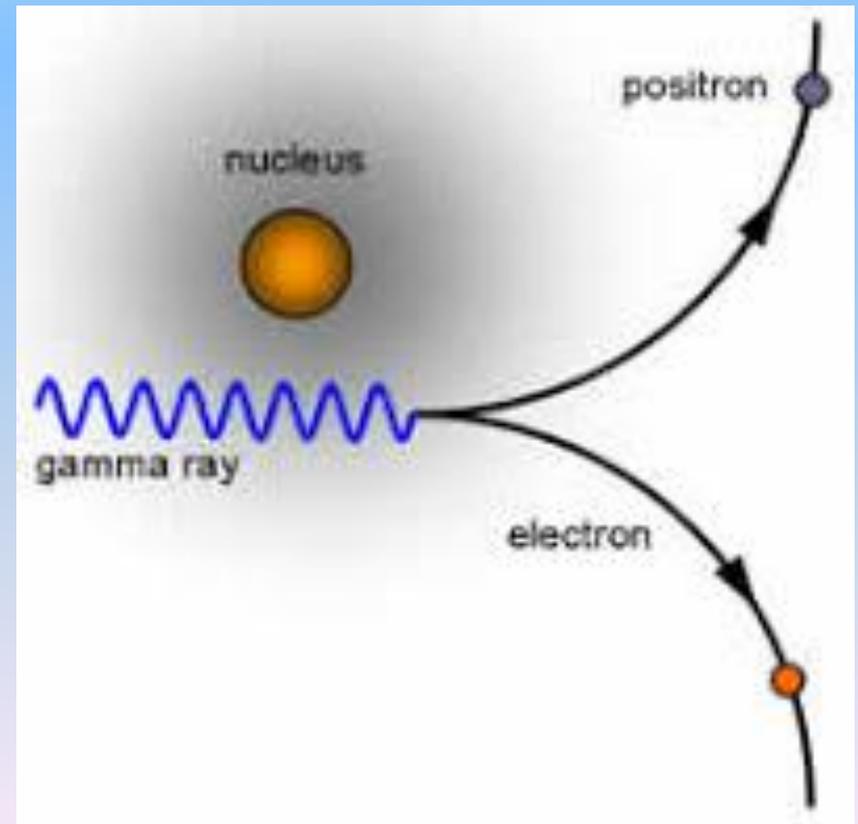
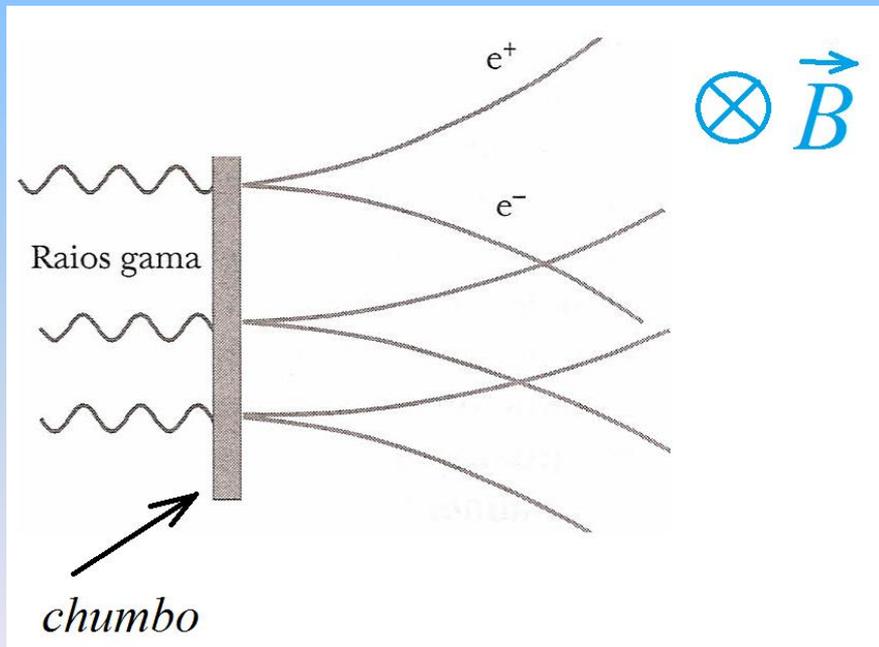
- A palavra átomo vem do grego *atamos*, que significa "*indivisível*".
- Aceitou-se inicialmente que a matéria era constituída por apenas três partículas: elétrons, prótons e nêutrons; com exceção do nêutron livre, essas partículas eram muito estáveis.
- A partir de 1945 foram descobertas novas partículas, através de experiências envolvendo colisões de alta energia.

- Essas mais de 300 partículas novas são, muito instáveis e têm meias-vidas muito curtas, entre 10^{-6} s e 10^{-23} s.
- Na década de 1920, o físico Paul Dirac incorporou a relatividade especial à mecânica quântica, observando que haveriam estados de energia negativa mesmo para partículas livres.
- Estes estados ligados seriam ocupados por elétrons, formando o chamado *mar de Dirac*. Os elétrons no *mar de Dirac* não são observáveis diretamente, pois o princípio de exclusão de Pauli não permite que reajam a forças externas - não existem estados disponíveis para uma transição

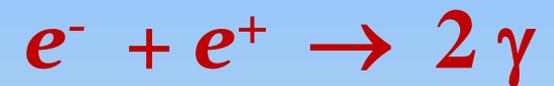
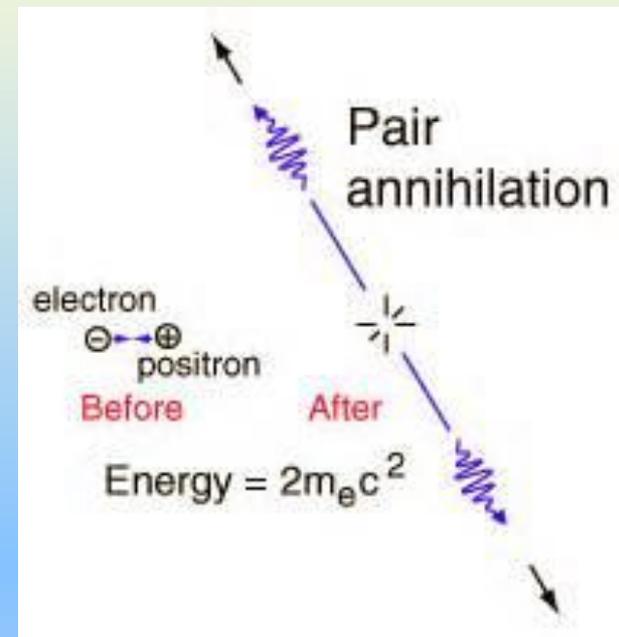
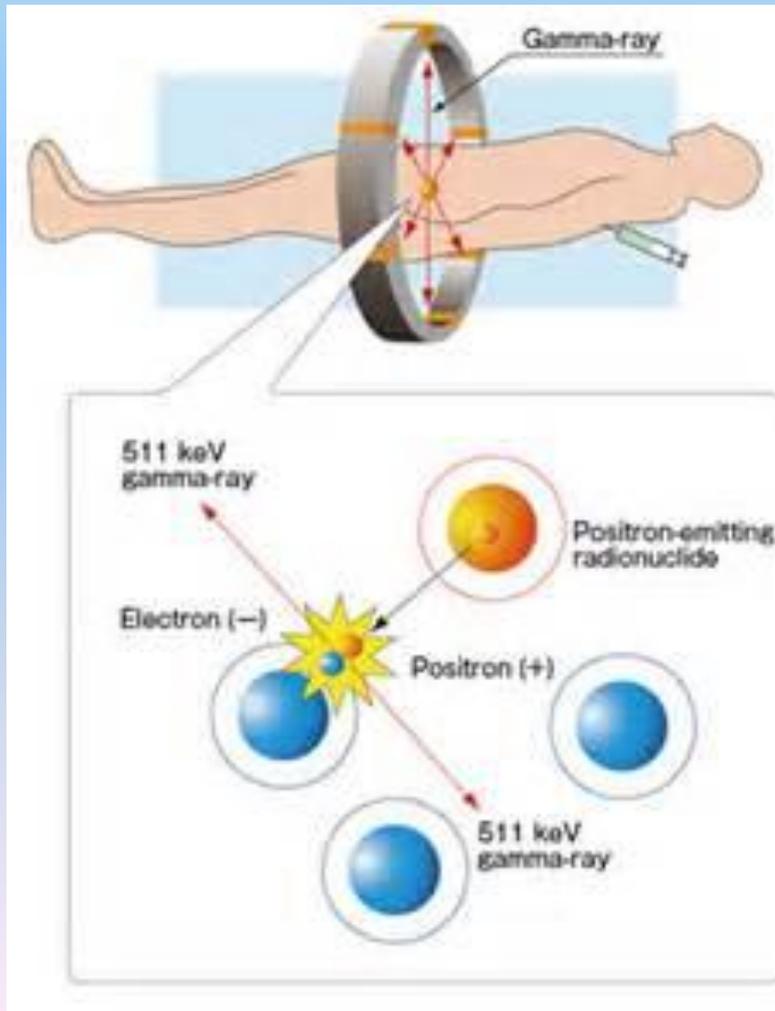
- Assim, um elétron em tal estado pode ser excitado e passar a um estado de energia positiva, deixando um *buraco* neste mar de estados preenchidos.
- O buraco pode reagir a forças externas e tornar-se observável. Suas características são similares ao do elétron, exceto pelo fato de ter carga positiva: ele é a *antipartícula* do elétron.
- O *pósitron* foi descoberto em 1932 por Carl Anderson, que, em 1936, recebeu o Prêmio Nobel de física por esse trabalho no qual utilizou uma *câmara de névoa e um campo magnético externo*.



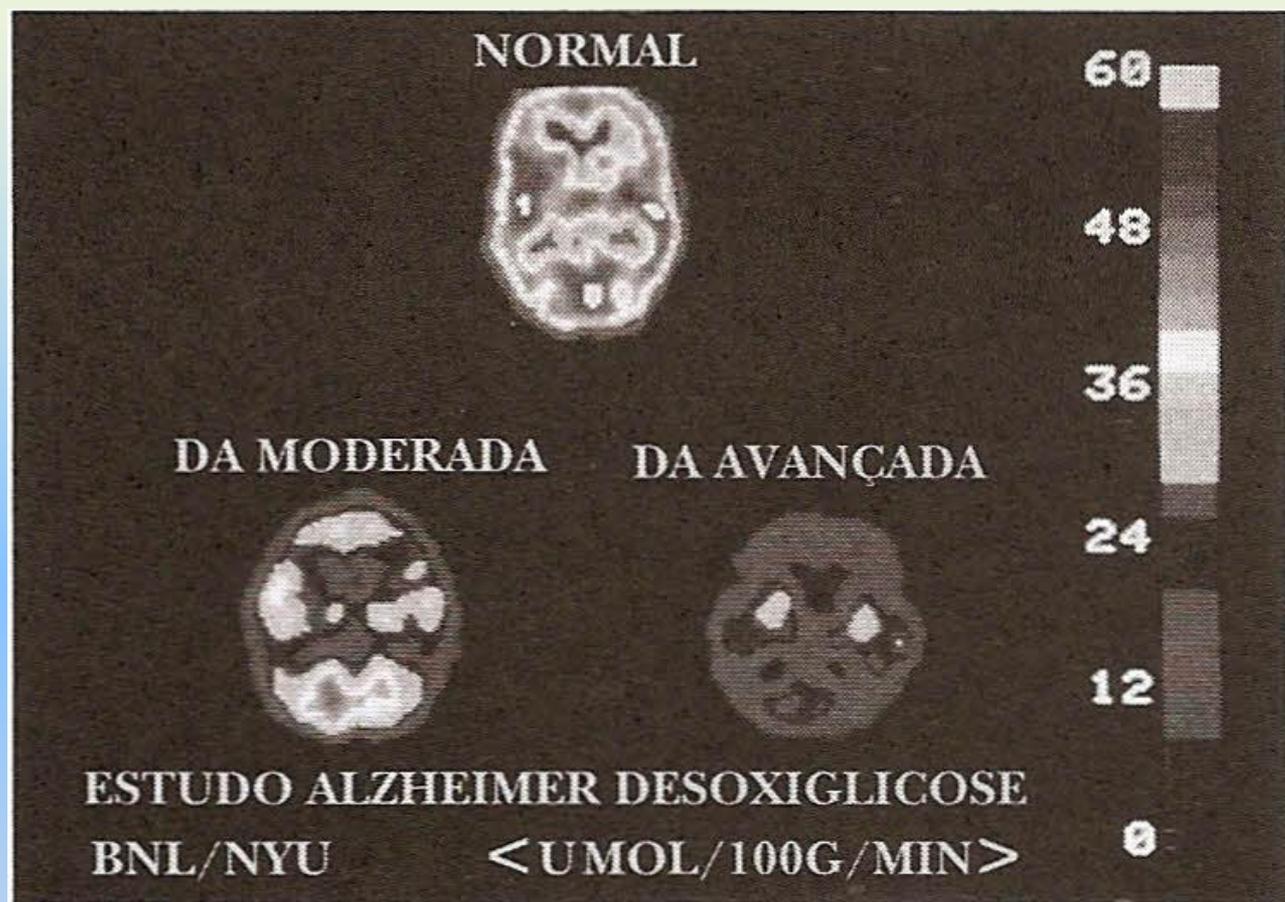
➤ Assim, quando um fóton de raio gama com uma energia alta ($> 2 \times 0,51 \text{ MeV}$) interage com um núcleo, há a possibilidade de um *par elétron-pósitron* ser criado ($E = m c^2$).



➤ O processo inverso também pode ocorrer: *aniquilação pósitron - elétron*



Aplicação importante:
Positron emission tomography (PET)



Imagens *PET* do cérebro de uma pessoa idosa saudável e de pacientes sofrendo da doença de Alzheimer. As regiões claras contêm concentrações mais altas de glicose radioativa indicando taxas mais altas de metabolismo e, portanto, maior atividade cerebral

MÉSONS e o Início da Física de Partículas

- Na década de 1930, seis partículas eram consideradas as constituintes fundamentais da matéria: o próton, o elétron, o nêutron, o fóton, o neutrino e o pósitron.
- Nesta época também investigava-se a natureza intrínseca da força eletromagnética, considerando que ela derivava de uma "troca de fótons virtuais" entre as cargas elétricas.

- Foi quando o físico japonês Hideki Yukawa utilizou essa idéia na tentativa de explicar a origem da força nuclear: através de uma nova partícula trocada entre os núcleons no núcleo.
- Além disso, estabeleceu que o alcance da força seria inversamente proporcional à massa dessa partícula, aproximadamente 200 vezes a massa do elétron. Como a massa da nova partícula se situa entre a do elétron e a do próton, ela foi chamada de *méson* (do grego *mesa*, significando "médio").

- Iniciou-se uma busca experimental do méson utilizando-se raios cósmicos que interagem com a atmosfera da Terra. Em 1937, foi descoberta uma partícula com massa de $106 \text{ MeV}/c^2$ ($\sim 207 m_e$)
- Percebeu-se depois que a partícula interagia fracamente com a matéria e, portanto, não poderia ser a que procuravam (recebeu o nome de *múon*, ou méson μ)
- A descoberta do méson π - ou *píon* - foi finalmente realizada experimentalmente por Powell, Occhialini e Lattes, em 1947.

➤ O pión possui três variedades: π^+ , π^- , π^0 ; enquanto os dois primeiros têm massas de $139,6 \text{ MeV}/c^2$, o último tem massa de $135,0 \text{ MeV}/c^2$.

➤ Os píons e os múons são partículas muito instáveis. Por exemplo, o π^- , que tem uma vida médio de $2,6 \times 10^{-8} \text{ s}$, decai para um múon e um antineutrino. O múon, que tem vida média de $2,2 \mu\text{s}$, decai para um elétron, um neutrino e um antineutrino:



➤ A interação entre duas partículas pode ser representada gráfica/pictoricamente através de um *diagrama de Feynman*.

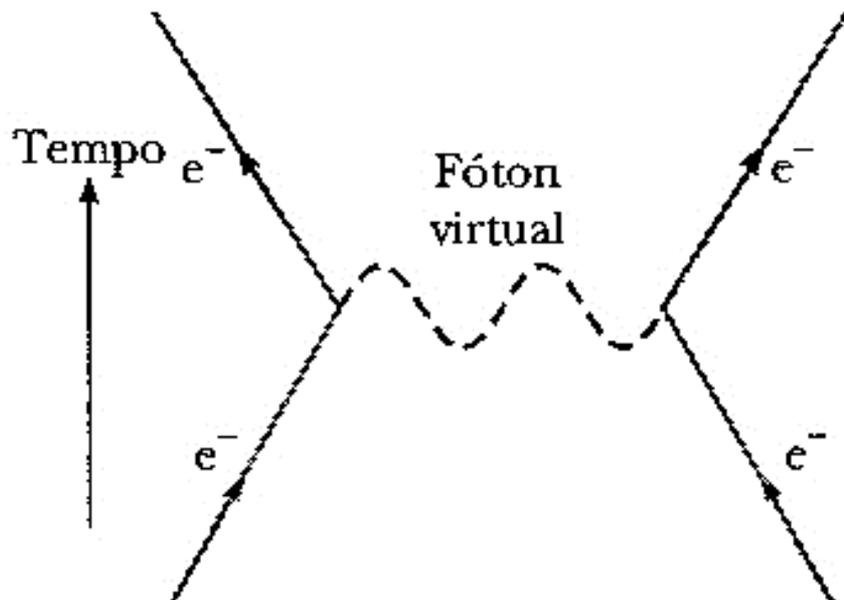


Diagrama de Feynman representando um fóton mediando a força eletromagnética entre dois elétrons.

➤ A interação é representada como se ocorresse em um único instante. O fóton virtual desaparece durante a interação sem ser detectado.

➤ No núcleo, os núcleons interagem através da troca de um píon; este seria o processo responsável pela estabilidade do núcleo (pela força nuclear)

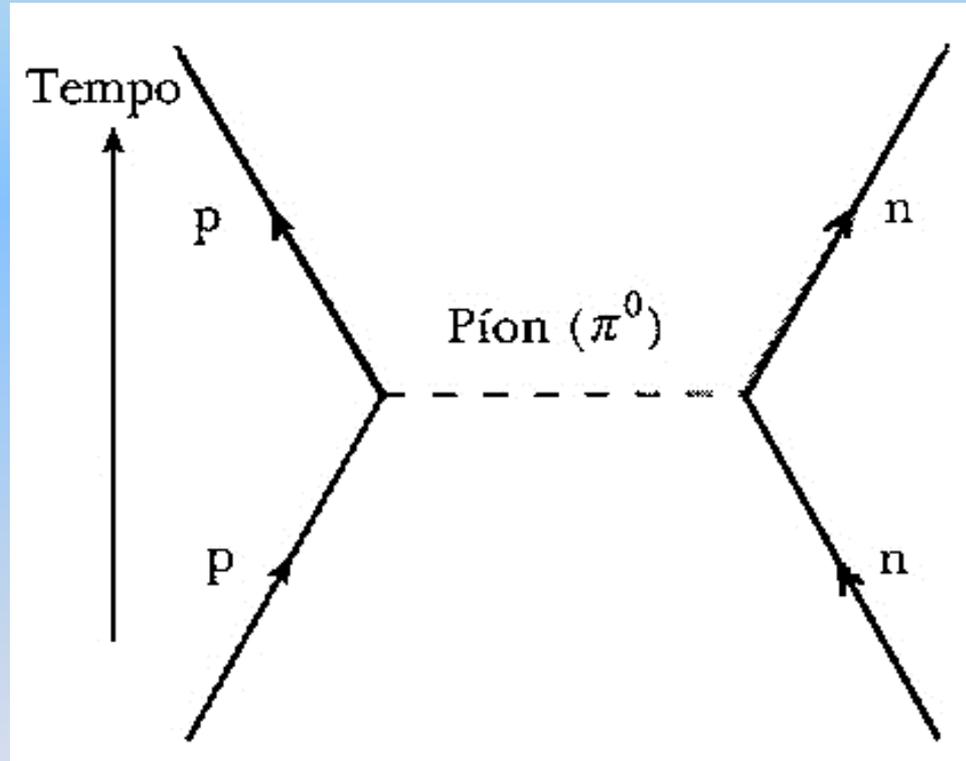


Diagrama de Feynman representando um próton e um nêutron interagindo pela força nuclear com um píon mediando a força.

Classificação das Partículas Elementares

➤ Na década de 1960 todas as partículas (que não eram partículas de campo) foram classificadas em duas grandes categorias - *hádrons* (partículas que interagem por meio da força nuclear) e *léptons* (do grego 'leptos', significando "pequeno" ou "leve").

Hádrons

- Partículas que interagem por meio da força nuclear e são divididas em duas classes (de acordo com as suas massas e spins: **mésons** e **bárions**).
- Todos os **mésons** possuem **spin nulo ou inteiro** (0 ou 1) e têm massas intermediárias (entre a do elétron e a do próton).
- Já os **bárions** têm massas iguais ou superiores à massa do próton (o nome bárion significa "pesado" em grego), e seus **spins têm sempre um valor fracionário** ($1/2$ ou $3/2$). Os **prótons** e os **nêutrons** são bárions

Léptons

- Os léptons formam um grupo de partículas que participa nas interações eletromagnéticas
- Os léptons têm spin 1/2. Enquanto os hádrons possuem tamanho e estrutura; os léptons parecem ser partículas realmente elementares, sem estrutura.
- Diferentemente dos hádrons, o número de léptons conhecido é pequeno. Acredita-se que existam apenas seis léptons: o **elétron**, o **múon** e o **tau**, além de um neutrino associado a cada um.

$$\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^- \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$$

Categoria	Nome da Partícula	Símbolo	Antipartícula	Massa (MeV/c ²)	Vida(s) Média(s)	Principais Modos de Decaimento ^a
<i>Léptons</i>	Elétron	e ⁻	e ⁺	0,511	Estável	
	Elétron neutrino	ν_e	$\bar{\nu}_e$	$< 7 \times 10^{-6}$	Estável	
	Múon	μ^-	μ^+	105,7	$2,20 \times 10^{-6}$	$e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$
	Múon neutrino	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	$< 0,3$	Estável	
	Tau	τ^-	τ^+	1 784	$< 4 \times 10^{-13}$	$\mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau, e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$
	Tau neutrino	ν_τ	$\bar{\nu}_\tau$	< 30	Estável	
<i>Hádrons</i>						
<i>Mésons</i>	Píon	π^+	π^-	139,6	$2,60 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu$
		π^0	Self	135,0	$0,83 \times 10^{-16}$	2γ
	Káon	K^+	K^-	493,7	$1,24 \times 10^{-8}$	$\mu^+ \nu_\mu, \pi^+ \pi^0$
		K_S^0	\bar{K}_S^0	497,7	$0,89 \times 10^{-10}$	$\pi^+ \pi^-, 2\pi^0$
		K_L^0	\bar{K}_L^0	497,7	$5,2 \times 10^{-8}$	$\pi^\pm e^\mp \bar{\nu}_e, 3\pi^0$
	Eta	η	Self	548,8	$< 10^{-18}$	$2\gamma, 3\pi$
		η'	Self	958	$2,2 \times 10^{-21}$	$\eta \pi^+ \pi^-$
<i>Bárions</i>	Próton	p	\bar{p}	938,3	Estável	
	Nêutron	n	\bar{n}	939,6	920	$p e^- \bar{\nu}_e$
	Lambda	Λ^0	$\bar{\Lambda}^0$	1 115,6	$2,6 \times 10^{-10}$	$p \pi^-, n \pi^0$
	Sigma	Σ^+	$\bar{\Sigma}^-$	1 189,4	$0,80 \times 10^{-10}$	$p \pi^0, n \pi^+$
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	1 192,5	6×10^{-20}	$\Lambda^0 \gamma$
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^+$	1 197,3	$1,5 \times 10^{-10}$	$n \pi^-$
	Xi	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	1 315	$2,9 \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 \pi^0$
		Ξ^-	$\bar{\Xi}^+$	1 321	$1,64 \times 10^{-10}$	$\Lambda^0 \pi^-$
	Ômega	Ω^-	Ω^+	1 672	$0,82 \times 10^{-10}$	$\Xi^0 \pi^0, \Lambda^0 K^-$

Leis de Conservação das Partículas Elementares

- **Conservação do número bariônico:** sempre que um **bárion** é criado em uma reação ou em um decaimento, também é criado um **antibárion**.
- Convencionou-se atribuir um número bariônico $B = +1$ para todos os bárions, $B = -1$ para todos os antibárions e $B = 0$ para as demais partículas.
- Assim, a lei de conservação do número bariônico afirma que o *número bariônico resultante* sempre permanece constante, em qualquer processo.

- **Conservação do número eletrônico-leptônico:**
Na verdade há três aspectos na lei de conservação envolvendo o número leptônico; um para cada variedade de léptons (*elétron, múon e o tau*).
- Ao *elétron* e ao *neutrino do elétron* é atribuído um **número eletrônico-leptônico: $L_e = +1$** , aos antiléptons e^+ e $\bar{\nu}_e$: $L_e = -1$; e a todas as outras partículas $L_e = 0$.
- Como exemplo, vamos investigar o decaimento do nêutron:



- Note que antes do decaimento o número eletrônico-leptônico era $L_e = 0$, e após o decaimento ele é $L_e = 0 + 1 - 1 = 0$; assim, o número eletrônico-leptônico é conservado.
- Veja que o número bariônico também precisa ser conservado: antes do decaimento $B = +1$; e após o decaimento, $B = +1 + 0 + 0 = +1$.
- A mesma regra vale para os léptons múon (L_μ) e tau (L_τ).

➤ Ex. Utilize a lei de conservação do número bariônico para determinar se podem ocorrer as seguintes reações:



Solução: (a) O lado esquerdo da equação fornece um número bariônico total de $1 + 1 = 2$. O lado direito fornece um número bariônico de $1 + 1 + 1 + (-1) = 2$. Assim, o número bariônico é conservado e a reação pode ocorrer (desde que o próton incidente tenha energia suficiente tal que seja satisfeita a conservação da energia)

➤ b) O lado esquerdo da equação fornece um número bariônico total de $1 + 1 = 2$; contudo, o lado direito fornece $1 + 1 + (-1) = 1$. Como o número bariônico não é conservado, a reação não pode ocorrer.



Ex. Utilize a lei de conservação do número eletrônico-leptônico para determinar qual dos seguintes esquemas de decaimento pode ocorrer

$$(a) \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$(b) \quad \pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_e + \nu_\mu$$

Solução: a) Como esse decaimento envolve um múon e um elétron, tanto L_μ quanto L_e precisam ser conservados. Antes do decaimento, $L_\mu = +1$ e $L_e = 0$. Após o decaimento $L_\mu = 0 + 0 + 1 = +1$ e $L_e = +1 - 1 + 0 = 0$. Assim, os dois números são conservados e o decaimento é possível, quanto a este aspecto.



b) Antes do decaimento, $L_\mu = 0$ e $L_e = 0$. Após o decaimento, $L_\mu = -1 + 0 + 1 = 0$, mas $L_e = 0 + 1 + 0 = 1$. Assim, o decaimento não é possível, pois o número eletrônico-leptônico não é conservado.



Ex.: Um estudante afirma ter observado um decaimento de um elétron em dois neutrinos, deslocando-se em direções opostas. Quais leis de conservação seriam violadas por esse decaimento?



- (i) A conservação da **carga elétrica** é violada, pois a carga negativa do elétron desapareceu.
- (ii) A conservação do **momento angular** é violada, pois o momento angular original é aquele do elétron, com spin $\frac{1}{2}$, mas existem duas partículas com spin $\frac{1}{2}$ após o decaimento.
- (iii) A conservação do **número eletrônico-leptônico** também é violada, pois existe um lépton antes do decaimento e dois depois do decaimento.

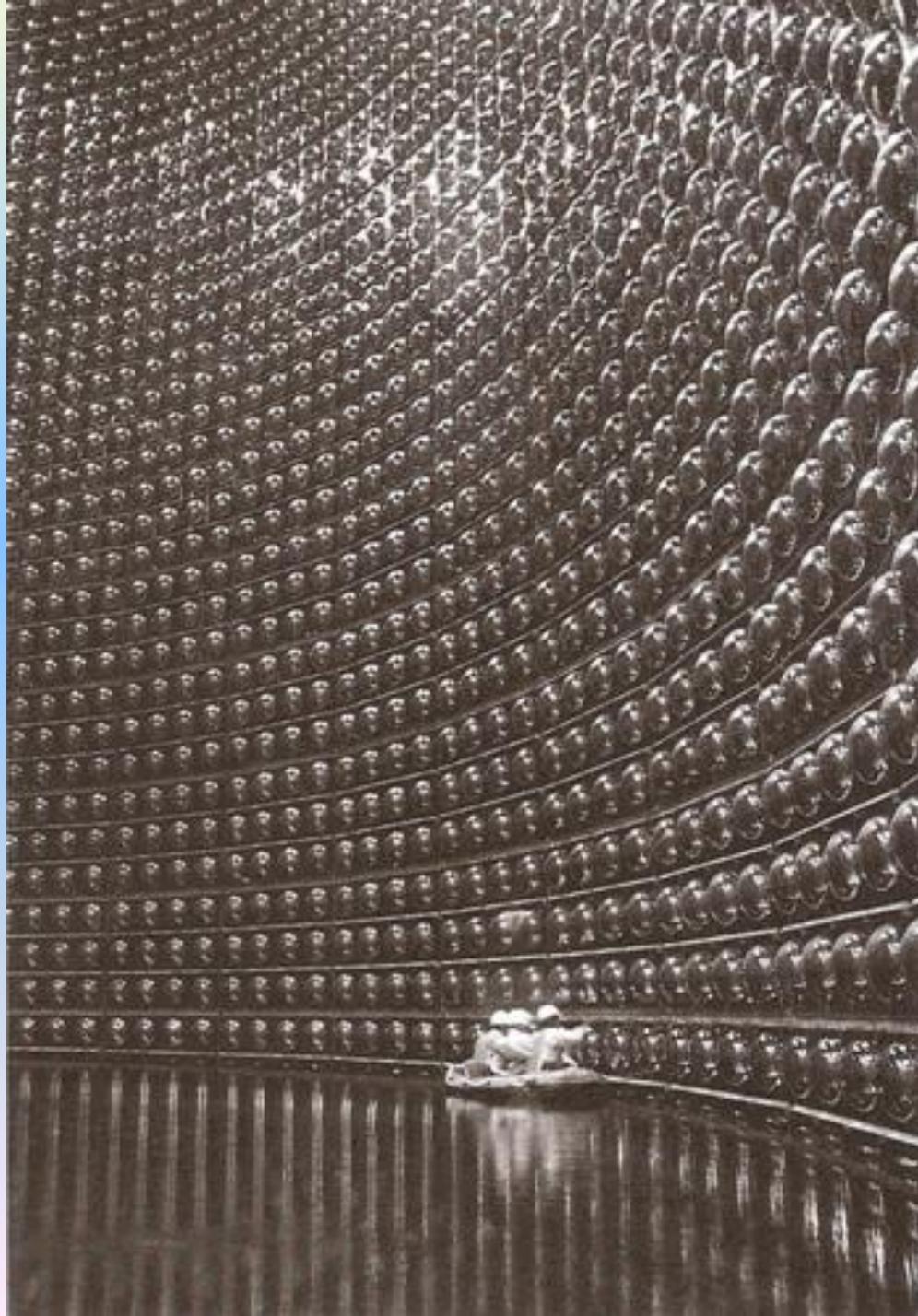
$$e^- \rightarrow \nu_e + \nu_e$$

➤ Quanto às outras leis de conservação, elas são obedecidas:

- 1) A **energia** pode ser conservada (energia de repouso do elétron aparece como energia cinética dos neutrinos).
- 2) As direções opostas das velocidades dos neutrinos permitem a conservação do **momento linear**.
- 3) Também são mantidas a conservação do **número bariônico** e dos **outros** números leptônicos.

Ex.: *Detectando o Decaimento do Próton*: Medidas obtidas no detector de neutrinos Super Kamiokande no Japão indicam que a meia-vida do próton é de pelo menos 10^{33} anos.

(a) Estime quanto tempo teríamos de observar, na média, para ver um próton em um copo de água sofrer um decaimento.



Este detector de neutrinos Super Kamiokande no Japão é utilizado para estudar fótons e neutrinos.

Ele contém 50.000 toneladas de água altamente purificada e 13.000 fotomultiplicadoras.

A fotografia foi tirada enquanto o detector estava sendo preenchido.

Os técnicos utilizam uma balsa para limpar os fotodetectores antes que eles sejam submersos

Solução: a) Vamos supor que um copo de água contém cerca de um quarto de litro, ou 250 g. O número de moléculas em um copo de água é de aproximadamente

$$\frac{(250 \text{ g}) (6,02 \times 10^{23} \text{ moléculas/mol})}{18 \text{ g/mol}} = 8,4 \times 10^{24} \text{ moléc.}$$

➤ Agora, cada molécula de água contém um próton em cada um de seus dois átomos de hidrogênio mais oito prótons no átomo de oxigênio, dando um total de 10 prótons. Assim, no copo de água estão $8,4 \times 10^{25}$ prótons. E como vimos, a constante de decaimento é:

$$\lambda = \frac{0,693}{T_{1/2}} = \frac{0,693}{10^{33} \text{ anos}} = 6,9 \times 10^{-34} \text{ ano}^{-1}$$

➤ Esta é a probabilidade de qualquer próton específico decair em um ano. A probabilidade de que algum próton em nosso copo de água vá decair em um intervalo de 1 ano é:

$$\begin{aligned} P(\text{decaimento}) &= (8,4 \times 10^{25}) (6,9 \times 10^{-34} \text{ ano}^{-1}) = \\ &= 5,8 \times 10^{-8} \text{ ano}^{-1} \end{aligned}$$

➤ Ou seja, teremos de observar nosso copo de água por $1/P = 17$ milhões de anos!

b) O detector de neutrinos Super Kamiokande contém 50.000 toneladas de água. Estime o tempo médio entre a detecção de decaimentos de prótons.

➤ Novamente, como 1 mol de água vale 18g então 50.000 ton contém $7,4 \times 10^{33}$ moléculas de H_2O , que corresponde a $7,4 \times 10^{34}$ prótons no detector.

➤ A probabilidade de algum próton no detector decair no intervalo de 1 ano é:

$$P = (7,4 \times 10^{34}) (6,9 \times 10^{-34} \text{ ano}^{-1}) = 51 \text{ ano}^{-1}$$

➤ Assim, devemos esperar $1/P \sim 0,02$ ano (intervalos de uma semana) para detecção de neutrinos

Partículas Estranhas e Estranheza

- Muitas partículas foram descobertas na década de 1950, produzidas pela interação nuclear de píons com prótons e nêutrons na atmosfera.
- Um grupo dessas partículas - as partículas **káon (K)**, **lambda (Λ)** e **sigma (Σ)** - exibiam propriedades incomuns nos modos de produção e decaimento e, portanto, foram chamadas *partículas estranhas*.
- Uma dessas propriedades incomuns é que estas partículas são sempre produzidas aos pares.

➤ Por ex., quando um pión colide com um próton, são produzidas (com alta probabilidade) duas partículas estranhas neutras:



➤ E nunca ocorrem reações tipo: $\pi^{-} + p^{+} \rightarrow n^{0} + K^{0}$ nas quais apenas uma das partículas finais é estranha, embora não sejam violadas leis de conservação conhecidas e a energia do pión seja suficiente para iniciar a reação.

➤ Pos essa e outras propriedades incomuns das partículas estranhas, foi necessário introduzir um novo *número quântico* S , denominado **estranheza**.

➤ E uma *lei de conservação* foi estabelecida para estas partículas. Atribuindo-se valores $S = +1$ para uma das partículas e $S = -1$ para a outra (todas as demais partículas que não forem estranhas têm $S = 0$), então sempre que ocorre uma reação ou decaimento, a soma das estranhezas do sistema antes e depois do processo deve ser igual.

➤ Ex. a) Verifique se ocorre a reação seguinte, com base na conservação da estranheza..

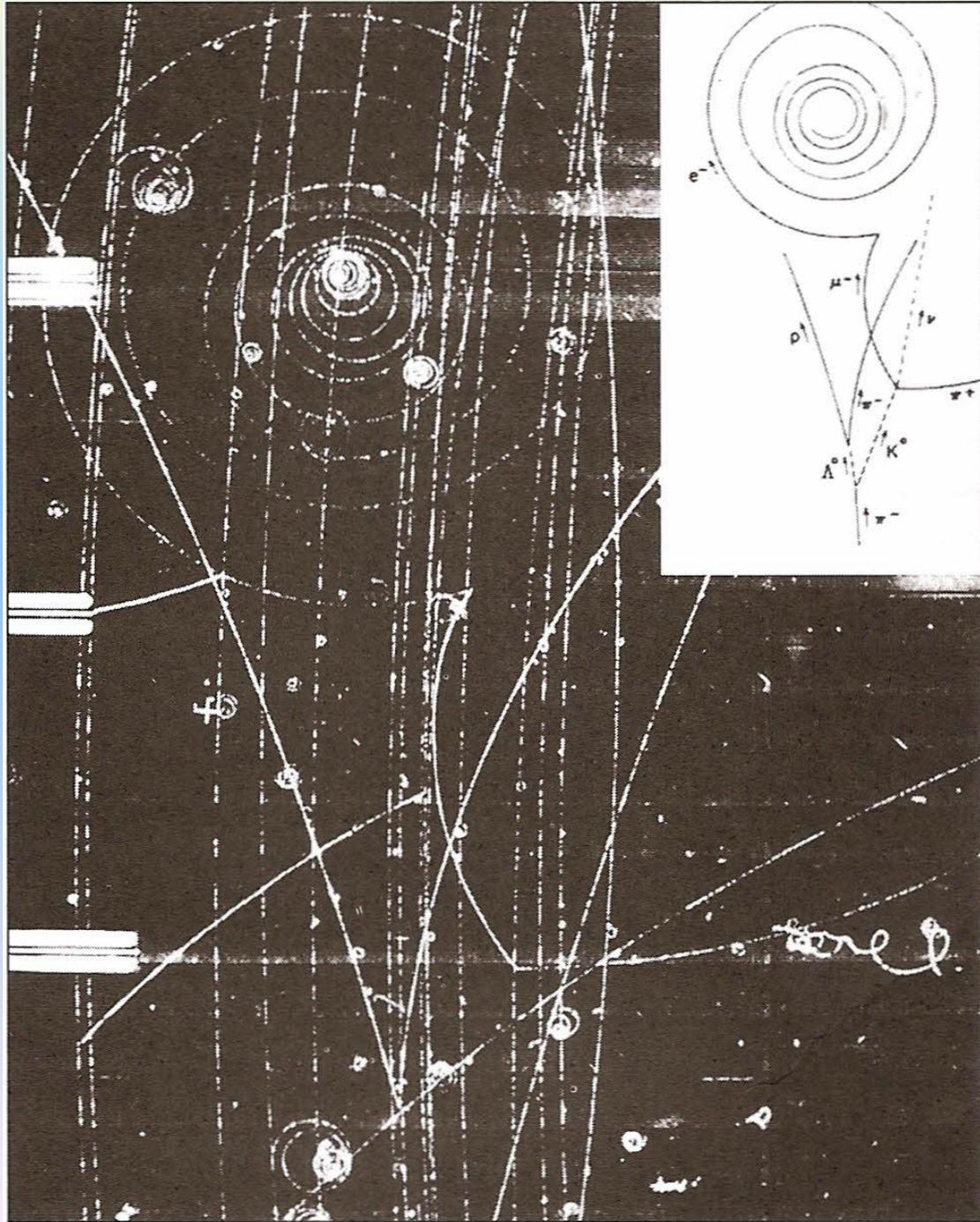


➤ *Solução:* Estado inicial tem estranheza $S = 0 + 0 = 0$. Como a estranheza do K^+ é $S = +1$ e a estranheza do Σ^- é $S = -1$, a estranheza do estado final é $+1 - 1 = 0 \therefore$ a estranheza é conservada e a reação é permitida.

➤ b) Mostre que a reação seguinte não conserva a estranheza:



➤ *Solução:* O estado inicial tem estranheza $S = 0 + 0 = 0$ e o estado final tem estranheza $S = 0 - 1 = -1 \therefore$ a estranheza não é conservada.



➤ *Píons negativos entram por baixo. Um deles colide com um próton estacionário no hidrogênio, produzindo duas partículas estranhas, Λ^0 e K^0 , de acordo com a reação:*



Nenhuma das partículas estranhas neutras deixa traço, mas seus decaimentos subseqüentes em partículas carregadas podem ser vistos claramente