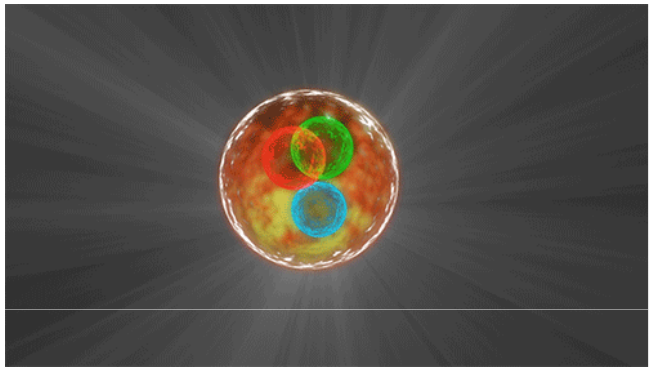
CAPÍTULO 31: Física de Partículas

- ❑ **As Forças Fundamentais na Natureza**
- ❑ **Pósitrons e outras anti-partículas**
- ❑ **Mésons e o início da Física de Partículas**
- ❑ **Classificação das Partículas**
- ❑ **Leis de Conservação**
- ❑ **Partículas Estranhas e Estranheza**
- ❑ **Criando partículas e medindo suas propriedades**
- ❑ **Quarks**
- ❑ Quarks Coloridos
- ❑ O Modelo Padrão



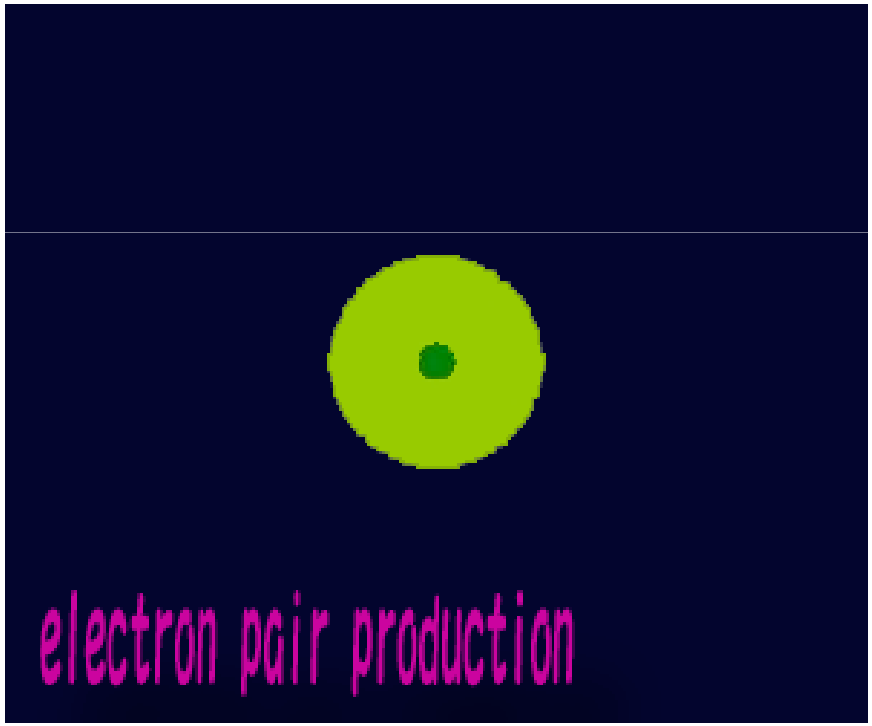
Lista de exercícios sugerida – Capítulo 30:

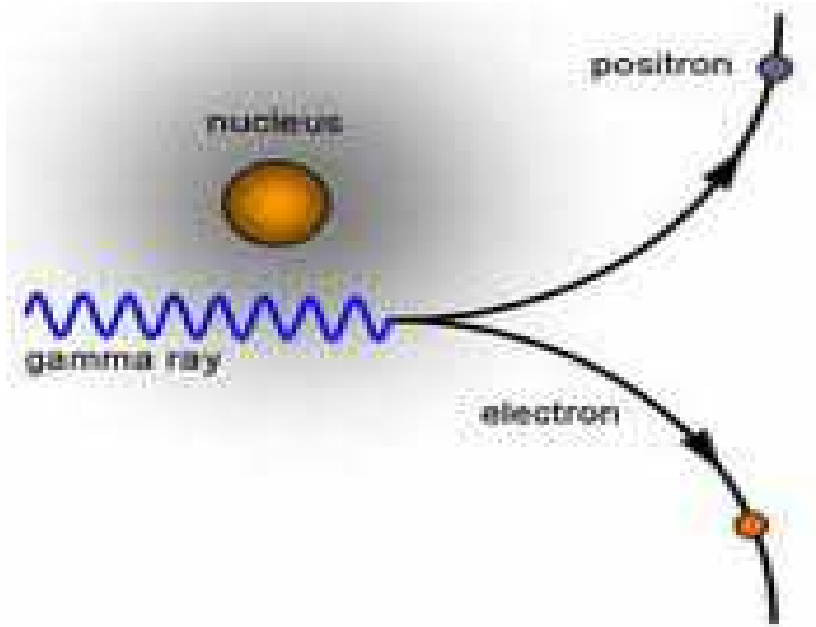
Exs.: 2, 4, 6, 10, 13, 37, 38, 40, 44, 45, 50, 53

Interação da Radiação Eletromagnética com a Matéria

$$E = h \cdot f$$

3. Produção de Pares (PP) elétron-pósitron





- **Absorção do fóton no núcleo**
- **Ejeção do elétron e pósitron**
- **Aniquilação**
- **Produção de radiação EM**

A **anti-partícula** do **elétron** é o **pósitron** que tem massa e carga, respectivamente iguais a:

$$m_e = 0.511 \, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

$$q_e = 1.60 \times 10^{-19} C$$

Uma vía comum de produção de **pósitrons** é a **produção de pares**.

Um fóton de raio-gama com uma energia suficientemente alta interage com um núcleo e é criado um par **elétron**-**pósitron**.

Como a energia total do par elétron-pósitron é: $E_R = 2(m_e) \cdot c^2$

O **fóton** precisa ter **ao menos esta energia** para criar um par elétron-pósitron.

Assim a **energia eletromagnética na forma de um raio-gama** é convertida em **massa** seguindo a **relação de Einstein**:

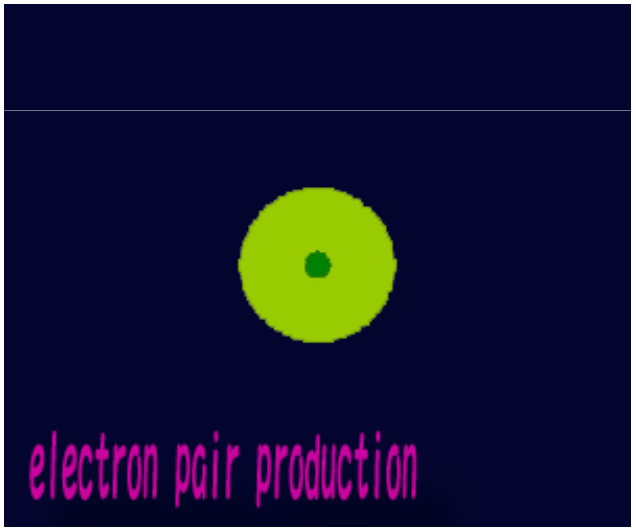
$$E_R = mc^2$$

O **processo inverso também pode ocorrer**. Sob condições apropriadas, um **elétron** e um **pósitron** podem se **aniquilar para produzir dois fótons de raio-gama** que têm uma energia combinada de **1.02MeV** mais a energia cinética inicial do elétron e do pósitron.

$$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$$

$$E_{R(e^-)} = 0.511 \, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

$$E_{R(e^+)} = 0.511 \, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$



$$E_{R(e^- + e^+)} = 2 \times 0.511 \, {}^{MeV}\!/_{c^2} = 1.02 \, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

Seção 31.2 – Exercício 1: Um fóton produz um par próton-antipróton de acordo com o esquema:

$$\gamma \rightarrow p + \overline{p}$$

Assumindo que o próton e o antipróton ficam aproximadamente em repouso, após a reação, qual é a frequência mínima possível do fóton? Qual o seu comprimento de onda?

$$E_{R(p)} = (938.3MeV)$$

$$E = h \cdot f$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} J \cdot s$$

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$c = 3 \times 10^{8} m/s$$

$$\text{Próton}: 1.6726 \times 10^{-27} Kg \rightarrow \text{u} = 1.007276 \quad \rightarrow \boxed{938{,}28\text{MeV/c}^2}$$

Seção 31.2 – Exercício 1: Um fóton produz um par próton-antipróton de acordo com a reação:

$$\gamma \rightarrow p + \overline{p}$$

Assumindo que o próton e o antipróton ficam aproximadamente em repouso, após a reação, qual é a frequência mínima possível do fóton? Qual o seu comprimento de onda?

$$E = 2E_0 = 2(938.3MeV) = 1876.6MeV = 3.0\times10^{-10}J$$

$$E = h\cdot f$$

$$f = \frac{E}{h} = \frac{3.0\times10^{-10}J}{6.63\times10^{-34}J\cdot s} = 4.53\times10^{23}Hz$$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3.0\times10^{8}m/s}{4.53\times10^{23}1/s} = 6.62\times10^{-16}m$$

$$\text{Próton}: 1.6726\times10^{-27}Kg \rightarrow \text{u} = 1.007276 \quad \rightarrow \boxed{938{,}28\text{MeV/c}^2}$$

Seção 31.2 – Exercício 4: São produzidos dois fótons quando um próton e um antipróton se aniquilam. Qual é a frequência mínima e o comprimento de onda correspondente de cada fóton?:

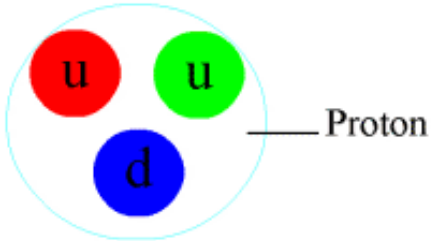
Assuma que a energia mínima e portanto a frequência mínima dos fótons é alcançada quando o próton e o antipróton possuem energia cinética próxima de zero durante o processo de aniquilação.

$$E_{mín} = \frac{2E_0}{2} = E_0 = 938.3MeV = h \cdot f_{mín}$$

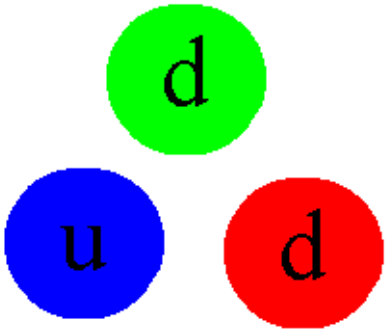
$$f_{mín} = \frac{(938.3MeV)(1.60\times10^{-13} J/MeV)}{6.626\times10^{-34} J \cdot s} = 2.27\times10^{23} Hz$$

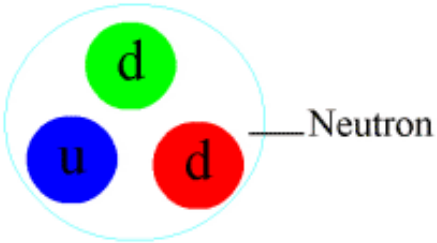
$$\lambda = \frac{c}{f_{mín}} = \frac{3.0\times10^{8} m/s}{2.27\times10^{23} Hz} = 1.32\times10^{-15} m$$

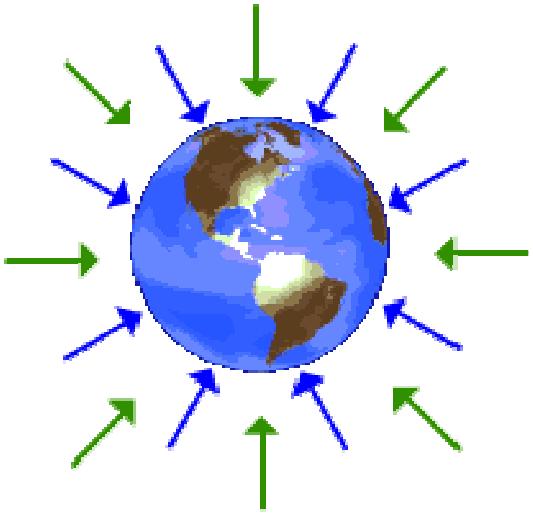
EXISTEM 4 FORÇAS FUNDAMENTAIS NA NATUREZA

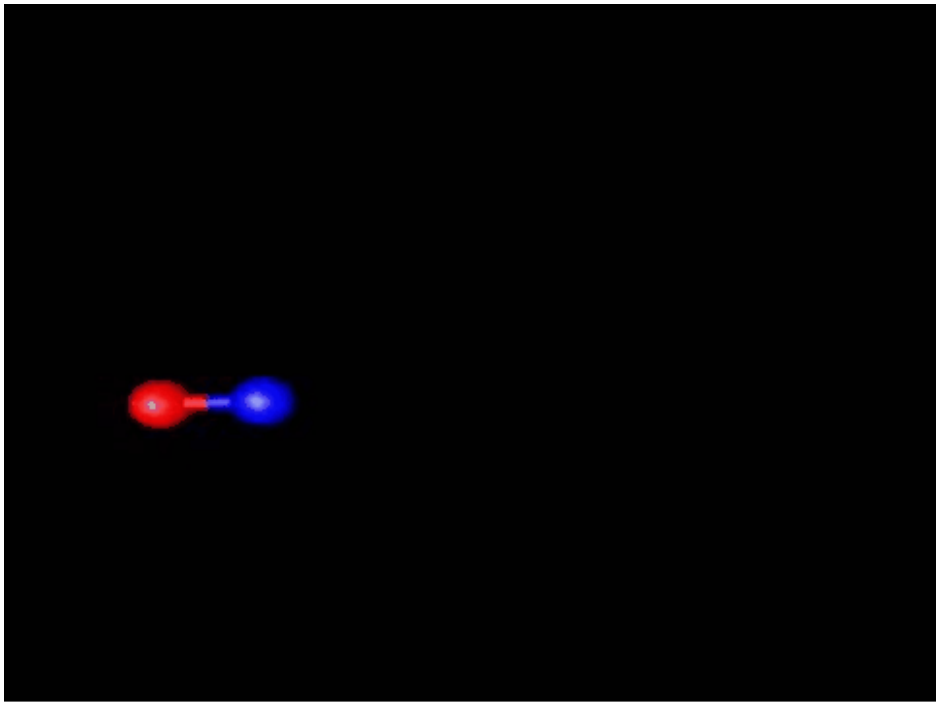


- ❑ **Força Nuclear Forte**
- ❑ **Força Eletromagnética**
- ❑ **Força Nuclear Fraca**
- ❑ **Força Gravitacional**



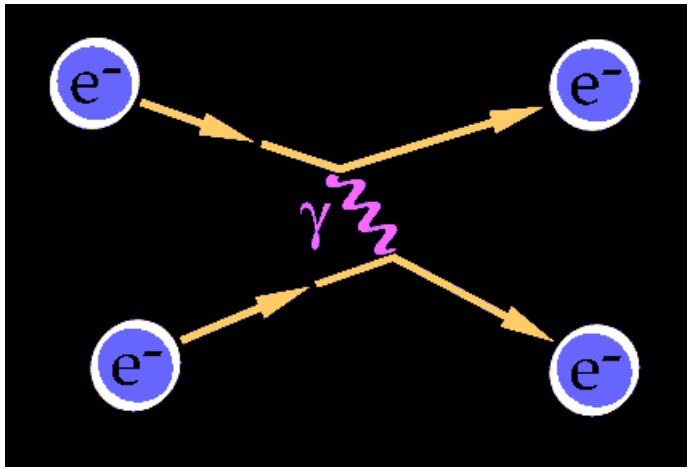






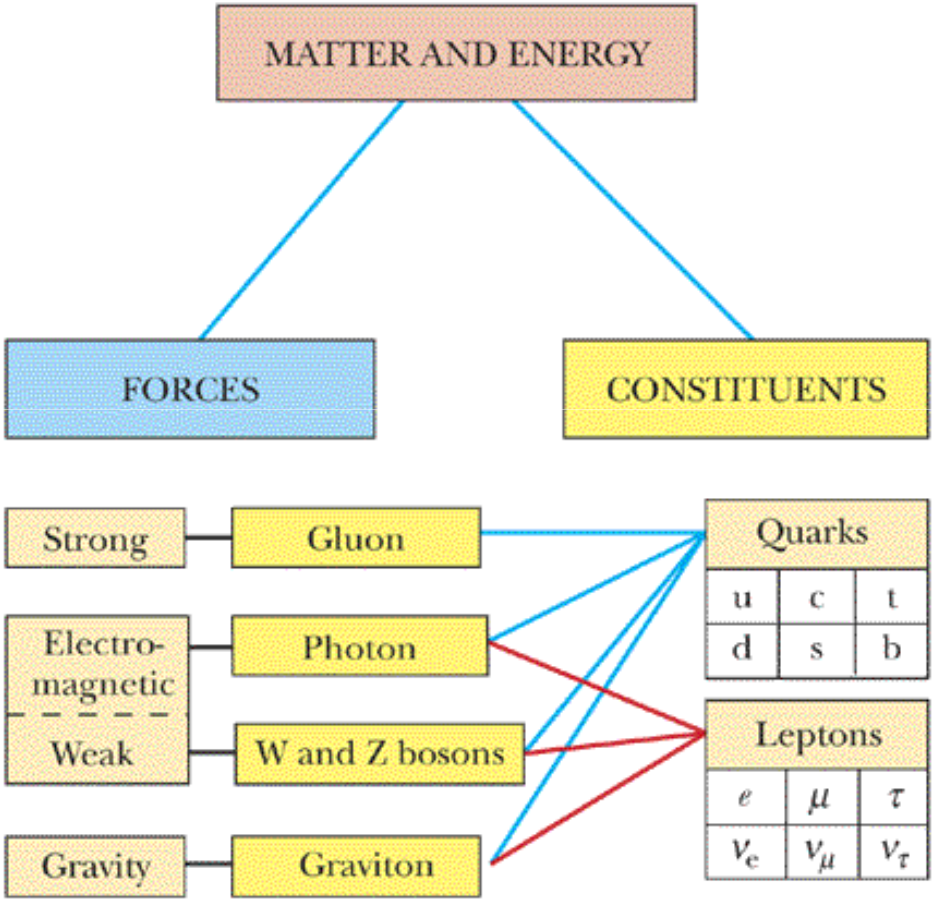
Na Física Moderna as interações entre as partículas são descritas em termos de um modelo estrutural que envolve a **troca de partículas de campos ou quanta.**

No caso da **interação eletromagnética**, as partículas de campo são os **fótons**.



Este **"diagrama de Feynman"** representa a **interação eletromagnética** (a expressão **"força"** resultaría mais familiar) entre dois elétrons **"mediada"** pelo **intercâmbio de "fótons virtuais" (não mensuráveis).**

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 31.14



Os **quarks** participam em **todas as forças fundamentais** e os **léptons** só **não participam na força forte**.

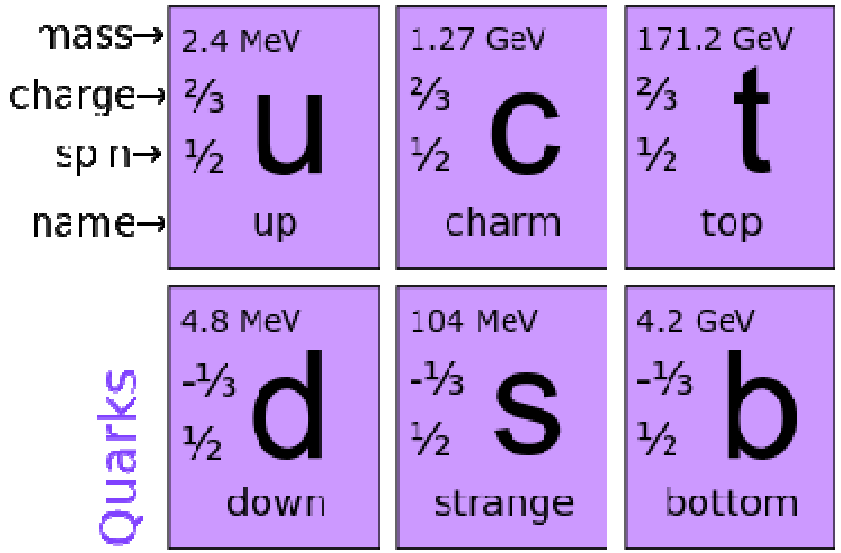
Uma **classificação** para os tipos básicos de partículas elementares é dividida em:

- **Bósons (mediadores):** partículas elementares com **spin inteiro**
- **Férmions:** partículas elementares com **spin fracionado**

No Modelo Padrão se classificam os **Férmions** em dois tipos fundamentais:

- **QUARKS**
- **LÉPTONS**

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



6 sabores

No Modelo Padrão da Física de Partículas os **Férmions** **são considerados os constituintes básicos da matéria**, que **interacionam entre eles via bósons (mediadores elementares).**

Na Física Moderna as **interações entre as partículas** são descritas em termos de um modelo estrutural que envolve a **troca de "partículas" de campos ou quanta.** **Neste contexto podemos classificar as partículas em:**

- **Bósons (mediadores):** partículas elementares com **spin inteiro**
- **Férmions:** partículas elementares com **spin fracionado:** **quarks e leptons**
- A **Força eletromagnética** é **mediada** pelas partículas de campo **fótons**.
- A **Força Nuclear Forte** é **mediada** pelas partículas de campo **glúons**.
- A **Força Fraca** é **mediada** pelas partículas de campo **bósons (W e Z).**
- A **Força Gravitacional** é **mediada** pelas partículas de campo **grávitons.**

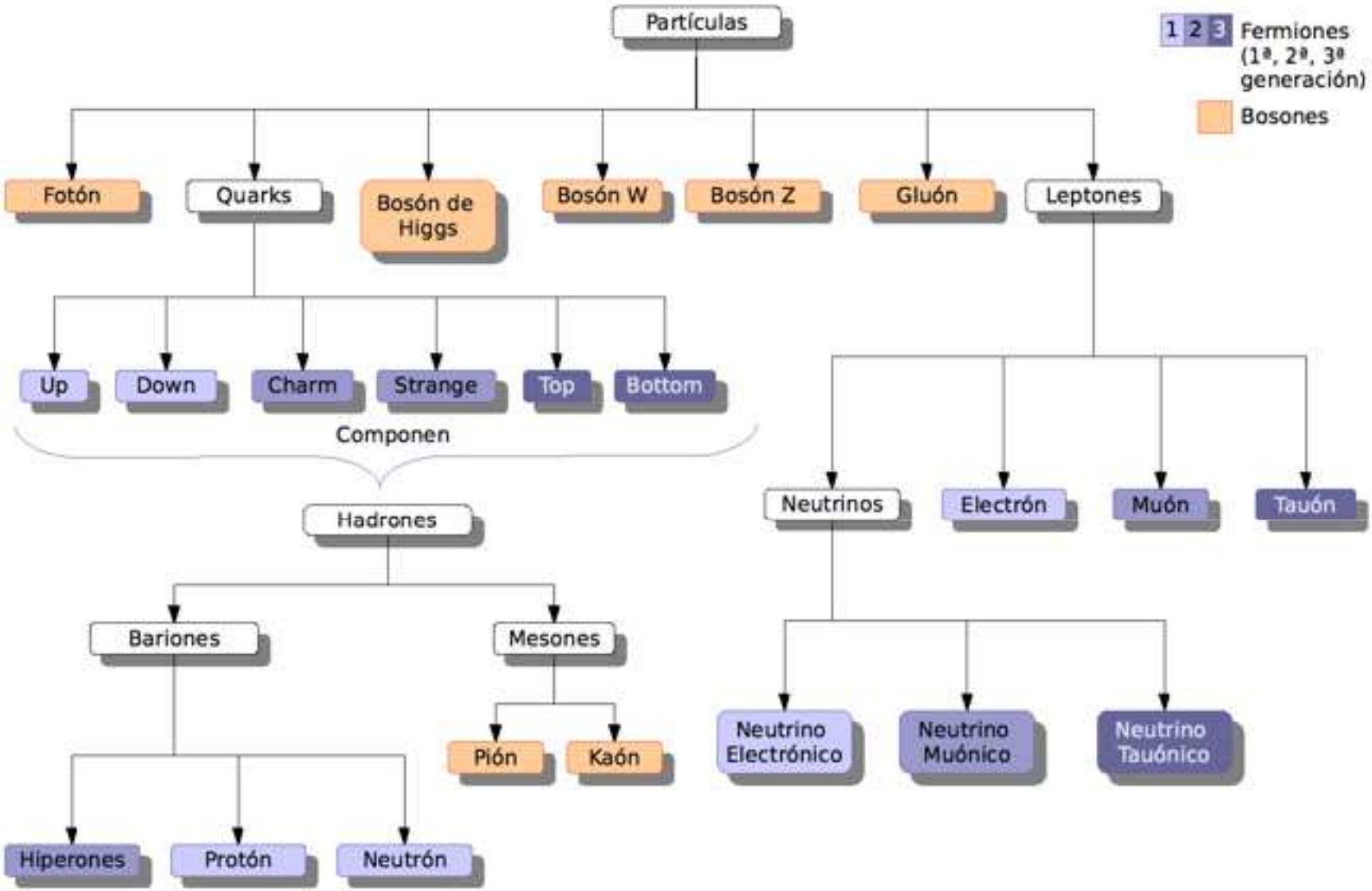
Os Férmions são partículas elementares divididas em quarks e leptons

Os prótons e nêutrons são formados por 3 quarks e portanto são bárions.

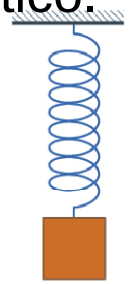
Os mésons são formados por um quark e um anti-quark.

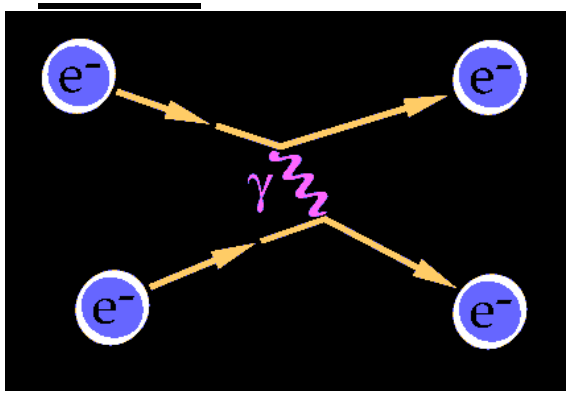
Qualquer partícula subatômica formada por **quarks** que permanecem unidos devido à **interação nuclear forte** é denominada **hádron.**

Hoje existem 6 **léptons:** o **elétron**, o **múon**, o **tau** e os **neutrinos** associados


Partículas
1 2 3 Fermiones (1ª, 2ª, 3ª generación)
Bosones
Fotón
Quarks
Bosón de Higgs
Bosón W
Bosón Z
Gluón
Leptones
Up
Down
Charm
Strange
Top
Bottom
Componen
Hadrones
Bariones
Mesones
Pión
Kaón
Hiperones
Protón
Neutrón
Neutrinos
Electrón
Muón
Tauón
Neutrino Electrónico
Neutrino Muónico
Neutrino Tauónico

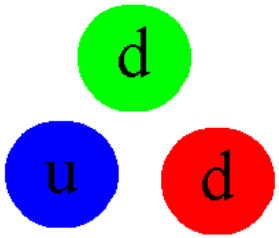
Assim, a **Força Eletromagnética** é mediada pelos **fótons** e os fótons **(bósons)** são os "quanta" do campo eletromagnético.





Da mesma forma, a força nuclear forte é mediada por partículas de campo chamadas de **glúons**. Os **glúons,** assim como os fótons, não possuem massa, nem carga elétrica, mas transmitem e sofrem a interação nuclear forte.
Glúons são bósons que transportam a força nuclear forte.

"partículas" elementares

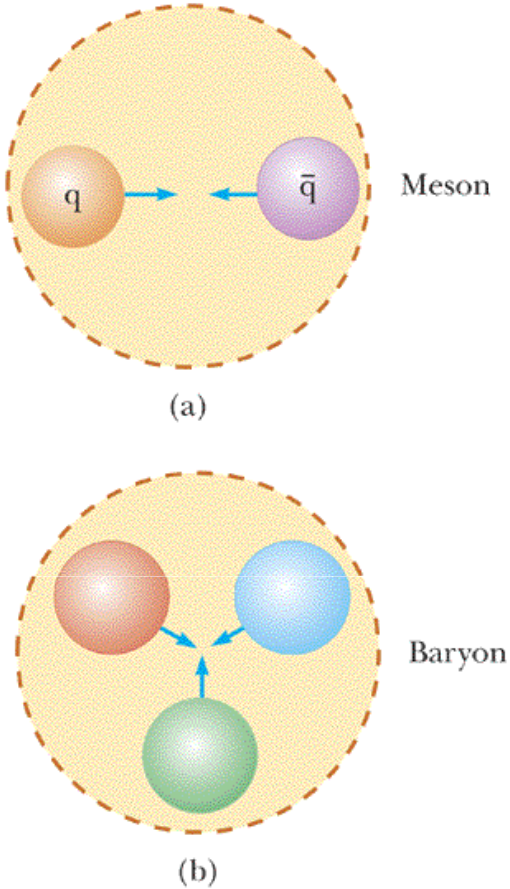


Glúons mantêm os quarks unidos formando prótons e nêutrons

A **Força Fraca** é mediada por partículas chamadas **bósons (W e Z).**
partículas elementares caracterizadas por um spin inteiro.

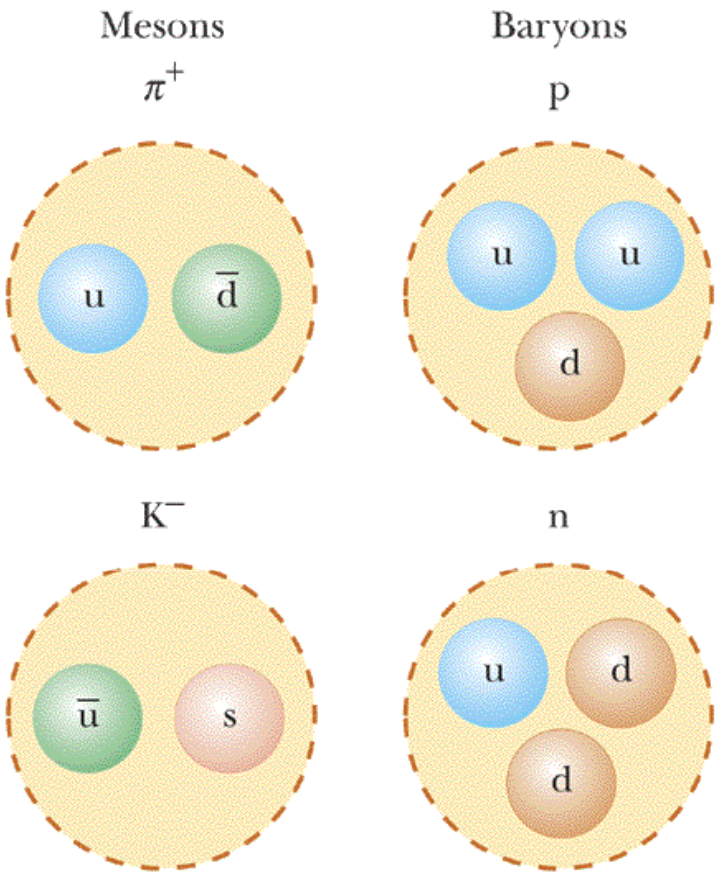
E a Força Gravitacional é mediada pelos quanta do campo gravitacional chamados de **grávitons** **(partícula teórica que seria um bóson)**.

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 31.12



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 31.11



Harcourt, Inc. items and derived items copyright © 2002 by Harcourt, Inc.

Os **mésons** (compostos por um **quark** e um **anti-quark**) satisfazem as condições de **hádrons** (**mésons** e **bárions** – compostos de quarks que sofrem a força forte) e **bósons** (mediadores – spin inteiro). **Bárions** são formados por 3 **quarks** **(de primeira geração "up" (u) e "down" (d)).**
Um anti-bário é constituído de 3 antiquarks.

Mésons ← **HÁDRONS** → Bárions

partícula - quarks

$\pi^+ \equiv u\bar{d}$

$\pi^- \equiv \bar{u}d$

$\pi^0 \equiv d\bar{d}$

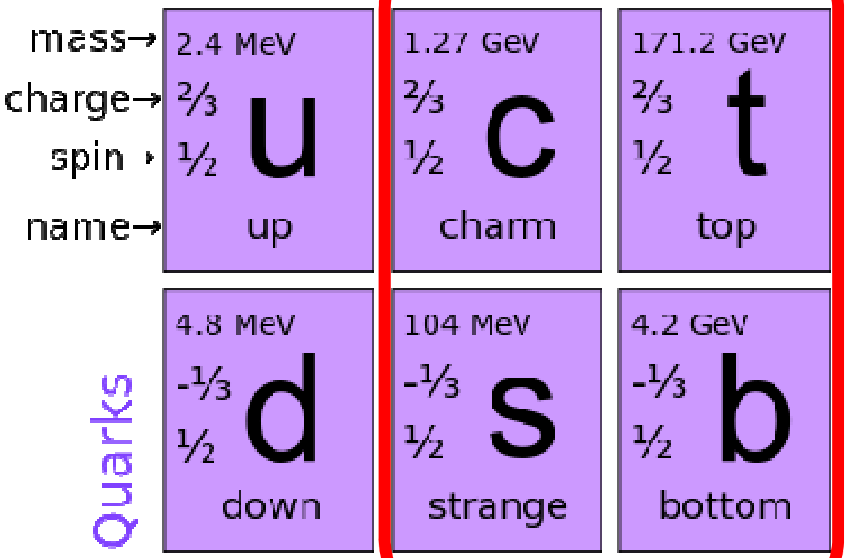
$K^+ \equiv u\bar{s}$

$K^- \equiv \bar{u}s$

$K^0 \equiv d\bar{s}$

$J/\psi \equiv c\bar{c}$

Os **quarks** possuem **múltiplos fracionários de carga "e"**



Descobertos como componentes de certos mésons e bárions massivos/energéticos

partícula - quarks

$p \equiv uud$

$n \equiv udd$

$\Lambda^0 \equiv uds$

$\Sigma^+ \equiv uus$

$\Sigma^0 \equiv uds$

$\Sigma^- \equiv dds$

$\Xi^0 \equiv uss$

$\Xi^0 \equiv dss$

$\Omega^- \equiv sss$

Em **Física Nuclear** as **leis da conservação** (de energia, momento, carga elétrica) são importantes na compreensão do motivo pelo qual certos **decaimentos e reações nucleares ocorrem enquanto que outros decaimentos e reações nucleares não ocorrem**.

Em Física de Partículas temos novas Leis de Conservação:

A conservação do **número bariônico:** ***Sempre que um bárion é formado em uma reação ou em um decaimento, também é criado um antibárion.***

Este esquema pode ser quantificado atribuindo-se um **número bariônico** para todos os **bárions B=+1**

B=-1 para todos os **anti-bárions**

B=0 para **todas as outras partículas**

Assim a **Lei de Conservação** do **número bariônico** afirma que sempre que ocorre uma reação ou decaimento, ***a soma dos números bariônicos do sistema antes do processo tem de ser igual à soma dos números bariônicos depois do processo.***

Exemplo 31.1: Verificando os números bariônicos

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

$$(a)\ p + n \rightarrow p + p + n + \overline{p}$$
$$(b)\ p + n \rightarrow p + p + \overline{p}$$

Se atribui um **<u>número bariônico</u>** para todos os **bárions B=+1**

B=-1 para todos os **<u>anti-bárions</u>**

B=0 para **<u>todas as outras partículas</u>**

Assim a **Lei de Conservação** do **número bariônico** afirma que sempre que ocorre uma reação ou decaimento, ***a soma dos números bariônicos do sistema antes do processo tem de ser igual à soma dos números bariônicos depois do processo.***

Exemplo 31.1: Verificando os números bariônicos

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

$$(a)\ p + n \rightarrow p + p + n + \overline{p}$$

$$(b)\ p + n \rightarrow p + p + \overline{p}$$

(a) O lado esquerdo da equação fornece um número bariônico total 1+1=2. O lado direito da equação 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 de 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.

Em Física de Partículas temos novas Leis de Conservação:

A **conservação** do **número leptônico:**

Três Leis de Conservação envolvem o número leptônico, uma lei para cada variedade de léptons.

A Lei de conservação do número eletrônico-leptônico afirma que: **A soma dos números eletrônicos-leptônico do sistema antes de uma reação ou decaimento é igual à soma dos números eletrônicos-leptônico após a reação ou decaimento.**

Cada um dos 6 léptons $\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$

possui uma antipartícula. É atribuído ao elétron, múon ou tau e ao neutrino asociado um número leptônico $L_{e,\mu,\tau} = +1$

os anti-léptons $e^+, \mu^+, \tau, \bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$ têm um

número leptônico $L_e = -1$

e **todos os outros** têm $L_e = 0$

Em Física de Partículas temos novas Leis de conservação:

A **Conservação** do **número leptônico:**

Os **léptons** formam um grupo de partículas que participa nas **interações eletromagnéticas** (se as partículas são carregadas) e **interações fracas**. Todos os léptons têm spin ½ .

Diferentemente do que ocorre com os hádrons, o número de léptons conhecido é pequeno: Os léptons são o **elétron, o múon, o tau** e seus **neutrinos** associados

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

Cada um desses seis léptons possui uma antipartícula.

É atribuído ao elétron e ao neutrino do elétron um número eletrônico-leptônico $L_e = +1$

os **anti-léptons** e^+ e $\bar{\nu}_e$ têm um **número eletrônico-leptônico** $L_e = -1$

e todos os outros têm $L_e = 0$

EXERCÍCIO:

Cada um dos 6 léptons $\begin{pmatrix} e^- \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^- \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$

possui uma antipartícula.

É atribuído ao elétron e ao neutrino do elétron um número eletrônico-leptônico $L_e = +1$

os anti-léptons e^+ e $\bar{\nu}_e$ têm um número eletrônico-leptônico $L_e = -1$

e todos os outros têm $L_e = 0$

considere o decaimento beta (-) do nêutron: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Verifique se o número eletrônico-leptônico e o número bariônico são conservados.

Considere o decaimento beta (-) do nêutron:

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu}_e$$

antes do decaimento o número eletrônico-leptônico era $L_e = 0$

depois do decaimento a soma do número eletrônico-leptônico é:

0 + 1 + (-1)=0. Assim, o número eletrônico-leptônico é conservado.

o número bariônico também é conservado:

antes do decaimento o número bariônico era B=+1

Depois do decaimento, a soma dos números bariônicos é: +1+0+0=+1

Similarmente, quando um decaimento envolve múons, o número muônico-leptônico L_μ deve ser conservado.

São atribuídos números positivos para o μ^- e $\nu_\mu, L_\mu = +1$ os anti-múons têm números negativos μ^+ e $\bar{\nu}_\mu, L_\mu = -1$ e todos os outros têm $L_\mu = 0$

Seção 31.5 – Leis de Conservação:

Exercício 13: Cada uma das reações seguintes é proibida. Determine uma **Lei de Conservação (carga, número eletrônico-leptônico, número bariônico)** que é violada para cada reação.

Se atribui um **número bariônico** para

todos os **bárions B=+1**

B=-1 para todos os **anti-bárions**

B=0 para **todas as outras partículas**

$$(a)\ \mathrm{p} + \overline{\mathrm{p}} \rightarrow \mu^{+} + e^{-}$$

$$(\mathrm{b})\ \pi^{-} + \mathrm{p} \rightarrow p + \pi^{+}$$

$$(c)\ \mathrm{p} + \mathrm{p} \rightarrow \mathrm{p} + \pi^{+}$$

$$(d)\ \mathrm{p} + \mathrm{p} \rightarrow \mathrm{p} + \mathrm{p} + n$$

$$(e)\ \gamma + \mathrm{p} \rightarrow \mathrm{n} + \pi^{0}$$

Cada um dos 6 léptons $\begin{pmatrix} e^{-} \\ \nu_e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mu^{-} \\ \nu_\mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau \\ \nu_\tau \end{pmatrix}$

possui uma antipartícula. É atribuído ao elétron e ao neutrino do elétron um número eletrônico-leptônico $L_e = +1$

os anti-léptons e^{+} e $\overline{\nu}_e$ têm um número eletrônico-leptônico $L_e = -1$

e todos os outros têm $L_e = 0$

Seção 31.5 – Leis de Conservação:

Exercício 13: Cada uma das reações seguintes é proibida. Determine uma **Lei de Conservação (carga, número eletrônico-leptônico, número bariônico)** que é violada para cada reação.

$(a)\ p + \overline{p} \rightarrow \mu^{+} + e^{-}$ $\quad L_e \ \ 0+0 \rightarrow 0+1 \quad L_\mu \ \ 0+0 \rightarrow -1+0$

$(b)\ \pi^{-} + p \rightarrow p + \pi^{+}$ $\quad$ carga $-1+1 \rightarrow +1+1$

$(c)\ p + p \rightarrow p + \pi^{+}$ $\quad$ numero bariônico $+1+1 \rightarrow +1+0$

$(d)\ p + p \rightarrow p + p + n$ $\quad$ numero bariônico $+1+1 \rightarrow +1+1+1$

$(e)\ \gamma + p \rightarrow n + \pi^{0}$ $\quad$ carga $\quad 0+1 \rightarrow 0+0$

$$(a)\ p + \overline{p} \rightarrow \mu^{+} + e^{-}$$

$$L_e \quad 0 + 0 \rightarrow 0 + 1$$

$$L_\mu \quad 0 + 0 \rightarrow -1 + 0$$

$$\text{carga}\ 1 - 1 \rightarrow +1 - 1$$

$$\text{nº bariônico}\ 1 - 1 \rightarrow 0 + 0$$

$$(b)\ \pi^- + p \rightarrow p + \pi^+$$

carga $-1 + 1 \rightarrow +1 + 1$

L_e $0 + 0 \rightarrow 0 + 0$

L_μ $0 + 0 \rightarrow 0 + 0$

nº bariônico $0 + 1 \rightarrow 1 + 0$

$$(c)\ p + p \rightarrow p + \pi^{+}$$

$$\text{carga}\ \ +1+1 \rightarrow +1+1$$

$$\mathrm{L_e}\ \ 0+0 \rightarrow 0+0$$

$$\mathrm{L}_{\mu}\ \ 0+0 \rightarrow 0+0$$

$$\text{nº bariônico}\ 1+1 \rightarrow 1+0$$

$$(d)\ p + p \rightarrow p + p + n$$

$$\text{carga}\ \ +1+1 \rightarrow +1+1+0$$

$$\mathrm{L_e}\ \ 0+0 \rightarrow 0+0$$

$$\mathrm{L}_{\mu}\ \ 0+0 \rightarrow 0+0$$

$$\text{nº bariônico}\ 1+1 \rightarrow 1+1+1$$

$$(e)\ \gamma + p \rightarrow n + \pi^0$$

carga $0 + 1 \rightarrow 0 + 0$

L_e $0 + 0 \rightarrow 0 + 0$

L_μ $0 + 0 \rightarrow 0 + 0$

nº bariônico $0 + 1 \rightarrow 1 + 0$

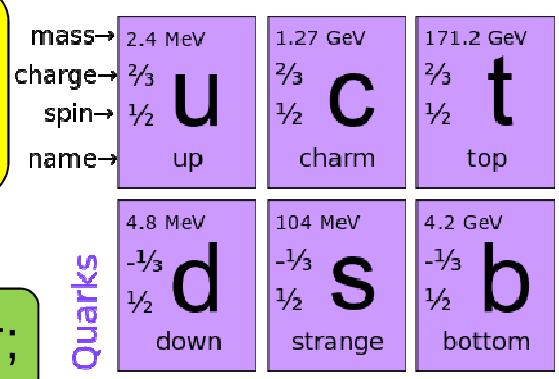
Originalmente, foi previsto por **Hideki Yukawa** que os **mésons** eram os **portadores da força que une o próton ao nêutron**.

O píon foi o primeiro méson autêntico a ser descoberto.

O píon, portador da força nuclear forte, aparece em três variedades correspondendo aos **3 estados de carga**: π^+, π^0, π^-

As partículas π+ e π- têm massas iguais a $139\,MeV/c^2$

A partícula π_0 tem massa inferior e igual a $135\,MeV/c^2$



Os píons têm spin zero

um quark **"up"** e outro quark **"anti-down"** compõe o **π^+**;

um quark **"down"** e outro **"anti-up"** compõe o **π^-**, sua antipartícula.

a combinação **"up-antiup"** e **"down-antidown"** constitui o **π^0**,

O méson $\pi^\pm$ tem uma massa de 139,6 MeV/c^2 e uma vida média de $2{,}6 \times 10^{-8}$ segundos. A desintegração principal é em um muon e um neutrino:

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

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

decaimento por partículas que não sofrem a Força Nuclear Forte

Muitas **partículas descobertas na década de 1950** foram produzidas pela **interação nuclear de píons com prótons e nêutrons na atmosfera**.

Um grupo dessas partículas: **o káon (K), o lambda (Λ) e o sigma (Σ)** exibiam propriedades incomuns na **massa de repouso (energia > píon)** e **modos de produção e de decaimento** e, portanto, foram designadas **partículas estranhas**.

$$m_{K^0} = 498\, {}^{MeV}\!/_{c^2}; \quad m_{\Lambda^0} = 1116\, {}^{MeV}\!/_{c^2}; \quad m_{\Sigma} = 1190\, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

Experiências realizadas com **aceleradores de partículas a altas energias** mostram que existem **quatro tipos de mésons "K":**

$$K^+, K^- \text{ cargas positiva e negativa}$$

$$K^0, \overline{K}^- \text{ cargas neutras}$$

Analogamente aos mésons "π" todos os mésons "K" são bósons de spin "0".
Suas massas de repouso são:

$$m_{K^+} = m_{K^-} = 494\, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

$$m_{K^0} = m_{\overline{K}^0} = 498\, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

Mésons

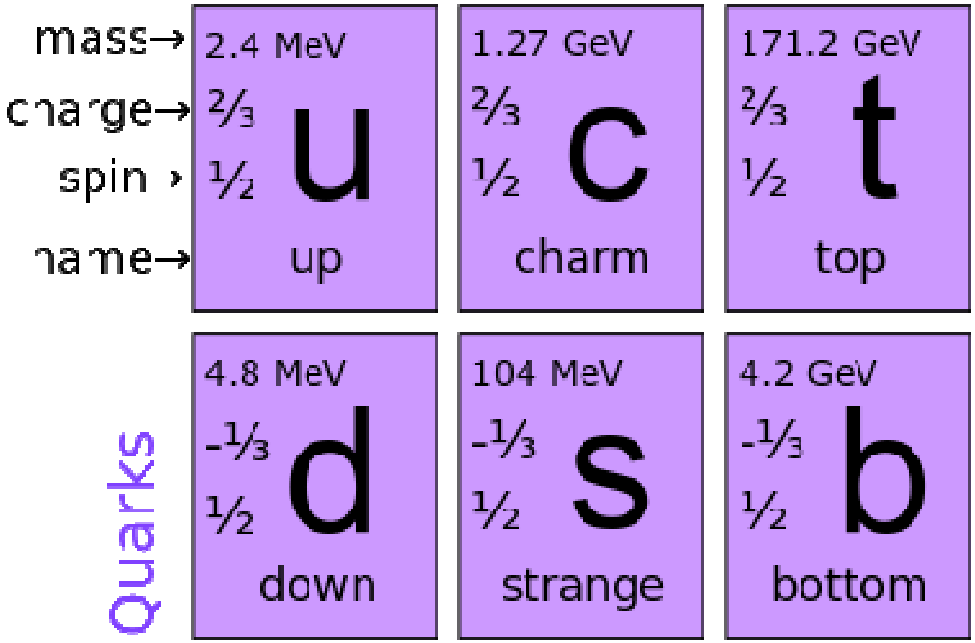
partícula - quarks

Mésons-π (Píons)

$$\pi^+ \equiv u\bar{d}$$

$$\pi^- \equiv \bar{u}d$$

$$\pi^0 \equiv d\bar{d}$$



Mésons K (Káons)

$$K^+ \equiv u\bar{s}$$

$$K^- \equiv \bar{u}s$$

$$K^0 \equiv d\bar{s}$$

$$m_{K^+} = m_{K^-} = 494\, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

$$m_{K^0} = m_{\bar{K}^0} = 498\, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

$$J/\psi \equiv c\bar{c}$$

Strange – terceiro quark

Bárions

partícula - quarks

$$p \equiv uud$$

$$n \equiv udd$$

Lambda $\Lambda^0 \equiv uds$

Sigma

$$\sum^{+} \equiv uus$$

$$\sum^{0} \equiv uds$$

$$\sum^{-} \equiv dds$$

Xi

$$\Xi^0 \equiv uss$$

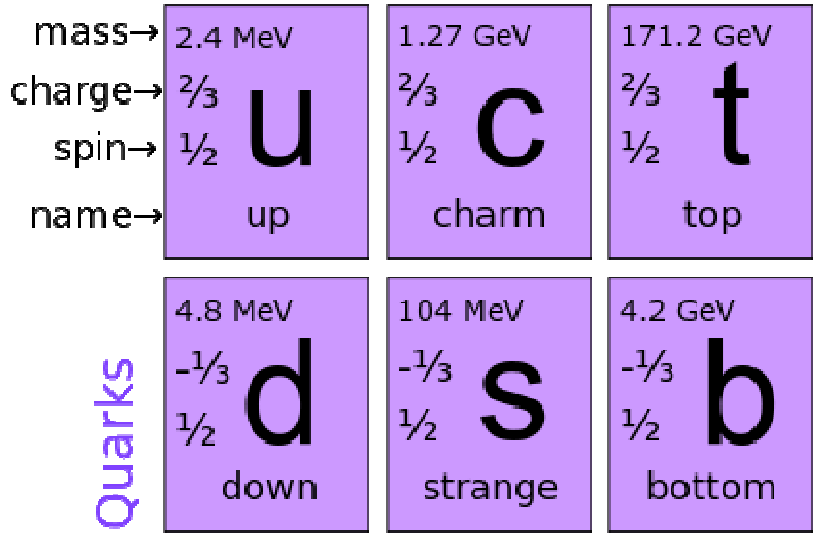
$$\Xi^0 \equiv dss$$

Omega $\Omega^- \equiv sss$

$$m_{\Lambda^0} = 1116 \, {}^{MeV}\!/_{c^2};$$

$$m_{\Sigma} = 1190 \, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

Strange – terceiro quark



Muitas **partículas descobertas na década de 1950** foram produzidas pela **interação nuclear de píons com prótons e nêutrons na atmosfera**.

Um grupo dessas partículas: **o káon (K), o lambda (Λ) e o sigma (Σ)** exibiam propriedades incomuns na **massa de repouso (energia)** e **modos de produção e de decaimento** e, portanto, foram designadas **partículas estranhas**.

$$m_{K^0} = 498\, {}^{MeV}\!/_{c^2}; \quad m_{\Lambda^0} = 1116\, {}^{MeV}\!/_{c^2}; \quad m_{\Sigma} = 1190\, {}^{MeV}\!/_{c^2}$$

Uma propriedade incomum é que estas partículas são sempre **produzidas aos pares**. Por exemplo, quando um **píon colide com um próton**, são produzidas **duas partículas estranhas neutras**:

$$\pi^- + p^+ \rightarrow \boxed{\Lambda^0 + K^0}$$

Contudo não ocorre a reação $\pi^- + p^+ \rightarrow n^0 + \boxed{K^0}$ na qual **apenas uma das partículas finais** é **estranha**.

Embora não sejam violadas leis de conservação conhecidas e a energia do píon seja suficiente para iniciar a reação.

A segunda característica peculiar destas partículas é que embora elas sejam produzidas pela **Força Nuclear** a uma taxa elevada, elas não decaem a uma taxa muito alta em partículas que interagem por meio da Força Nuclear.

Em vez disso, elas **decaem muito lentamente, o que é característico da Força Fraca.**

Suas **meias-vidas** estão no intervalo: $10^{-10}s - 10^{-8}s$

$$K \rightarrow \pi + \pi$$

$$K^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$$

$$\Lambda^0 \rightarrow p + \pi^-$$

$$\Lambda^0 \rightarrow n + \pi^0$$

A maioria das **partículas** que interagem pela **Força Nuclear** têm tempos de vida muito mais curtos, da ordem de $10^{-20}s$ ou menos.

Para explicar essas propriedades incomuns das partículas estranhas foi criado **um novo número quântico "S" denominado estranheza**, juntamente com uma nova **Lei de Conservação**.

A produção de **partículas estranhas aos pares** é explicada atribuindo-se:

- **S=+1 para uma das partículas e S=-1 para a outra.**

- **Todas as partículas que não forem estranhas têm a estranheza S=0.**

Portanto,

$$S = 0 \text{ para qualquer nucleon (nêutron ou próton) e píon}$$

$$S = -1 \text{ para o } \Lambda^0 \text{ e para o } \Sigma$$

$$S = +1 \text{ para o } K^+ \text{ e } K^0$$

$$S = -1 \text{ para o } K^- \text{ e } \overline{K}^0$$

Seção 31.5 Leis de Conservação – Exercício 14

(a) Mostre que o número bariônico e a carga são conservados nas seguintes reações de um píon com um próton.

$$\pi^+ + \mathrm{p} \rightarrow K^+ + \sum{}^+$$

$$\pi^+ + \mathrm{p} \rightarrow \pi^+ + \sum{}^+$$

(b) É observada a primeira reação, mas a segunda nunca ocorre. Explique.

$$\mathrm{S} = 0 \text{ para qualquer nucleon (nêutron ou próton) e píon}$$

$$\mathrm{S} = -1 \text{ para o } \Lambda^0 \text{ e para o } \Sigma$$

$$\mathrm{S} = +1 \text{ para o } \mathrm{K}^+ \text{ e } \mathrm{K}^0$$

$$\mathrm{S} = -1 \text{ para o } \mathrm{K}^- \text{ e } \overline{\mathrm{K}}^0$$

Seção 31.5 Leis de Conservação – Exercício 14

(a) Mostre que o número bariônico e a carga são conservados nas seguintes reações de um píon com um próton.

$$\pi^+ + \mathrm{p} \rightarrow K^+ + \sum{}^+ \quad \text{numero bariônico } 0+1 \rightarrow 0+1 \quad \text{carga } 1+1 \rightarrow 1+1$$

$$\pi^+ + \mathrm{p} \rightarrow \pi^+ + \sum{}^+ \quad \text{numero bariônico } 0+1 \rightarrow 0+1 \quad \text{carga } 1+1 \rightarrow 1+1$$

(b) É observada a primeira reação, mas a segunda nunca ocorre. Explique.

A produção de partículas estranhas ao pares é explicada atribuindo-se S=+1 para uma das partículas e S=-1 para a outra. Todas as partículas que não forem estranhas têm a estranheza S=0.

$$\pi^+ + \mathrm{p} \rightarrow K^+ + \sum{}^+ \quad \text{estranheza } 0+0 \rightarrow +1\text{-}1$$

$$\pi^+ + \mathrm{p} \rightarrow \pi^+ + \sum{}^+ \quad \text{estranheza } 0+0 \rightarrow 0-1$$

Portanto a estranheza não é conservada na segunda reação

Seção 31.2 – Exercício 2: Na técnica PET (pósitron emission tomography ou tomografia por emissão de pósitrons) um elemento radioativo que sofre um decaimento e+ é introduzido em seu corpo. Detectores de radiação eletromagnética, situados ao redor do corpo do paciente, detectam os raios-gama, resultado da aniquilação dos pósitrons com elétrons situados no tecido do corpo do paciente. Suponha um paciente que recebe uma injeção de glicose contendo da ordem

$$10^{10} \text{ átomos de } {}^{14}\text{O}$$

e que o O-14 é distribuído uniformemente em 2 litros de sangue após 5 minutos. Conhecendo a **meia-vida do O-14, igual a 70.6s**, qual será a ordem de grandeza da atividade dos átomos de oxigênio em 1cm^3 (1 cm cúbico) de sangue?

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}}$$

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$R = \lambda N$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} = \frac{0.693}{70.6s} = 0.00982s^{-1}$$

depois de 5 minutos, o número de O -14 é :

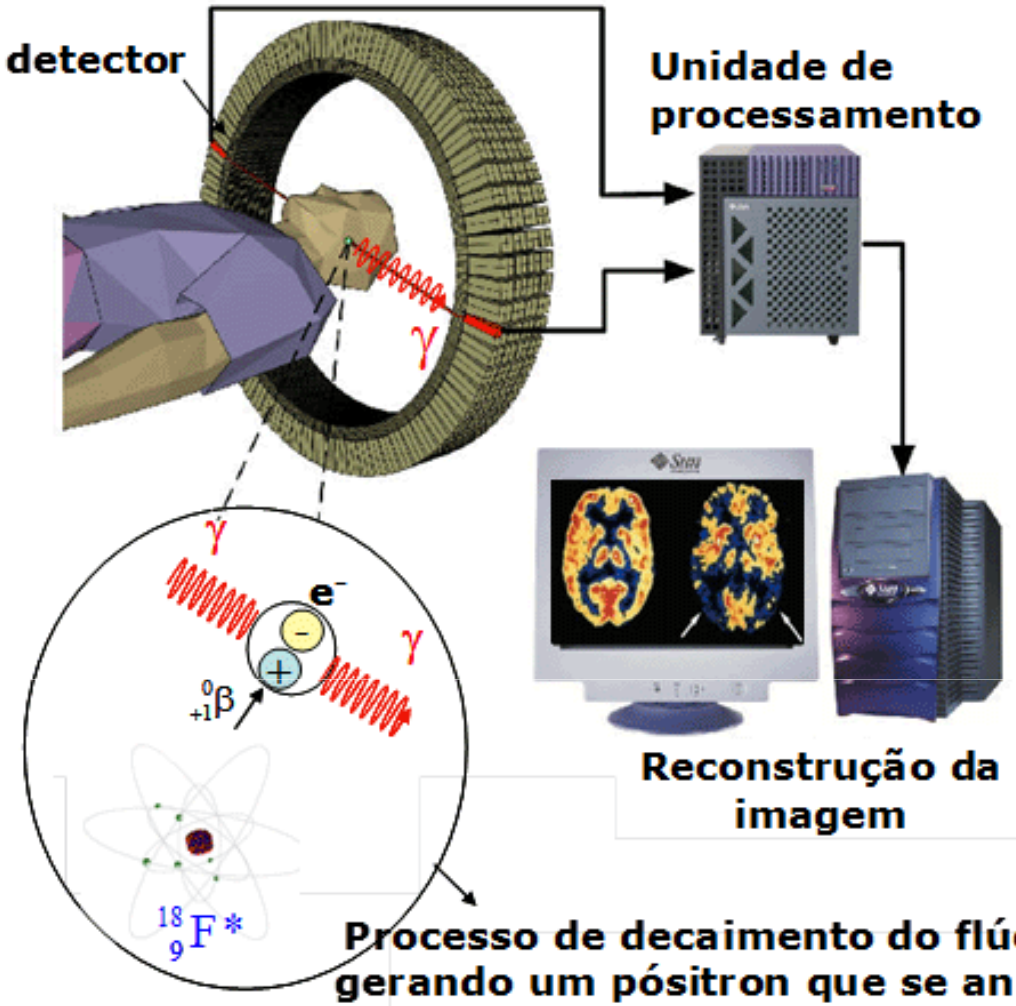
$$N = N_0 e^{-\lambda t} = 10^{10} e^{-\left(0.00982s^{-1}\right)(300s)} = 5.26\times10^{8} \text{ átomos}$$

em 1cm^3 :

$$N' = N\left(\frac{1.0cm^3}{2000cm^3}\right) = 5.26\times10^{8} \text{ átomos}\times\left(\frac{1.0cm^3}{2000cm^3}\right) = 2.63\times10^{5} \text{ átomos}$$

e

$$R = \lambda N' = 0.00982s^{-1}\times 2.63\times10^{5} \text{ átomos} = 2.58\pm\times10^{3} Bq$$



Processo de decaimento do flúor 18 gerando um pósitron que se aniquila com elétrons da matéria formando os raios gama. (veja figura 4)

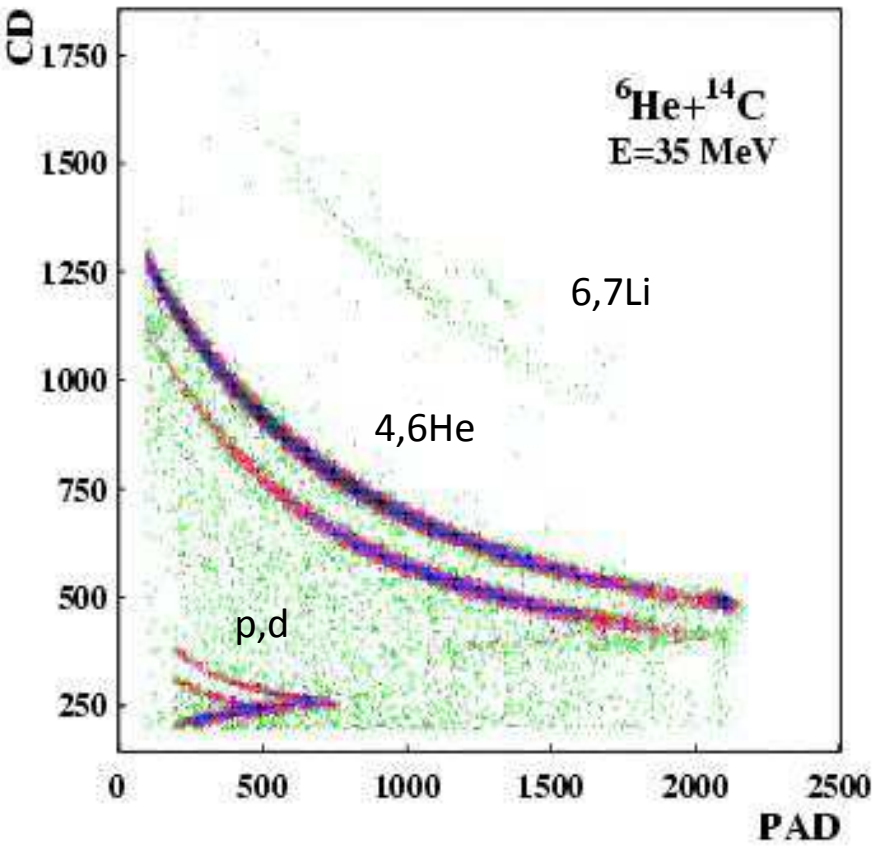
Equipamentos utilizados para a tomografia por emissão de pósitron

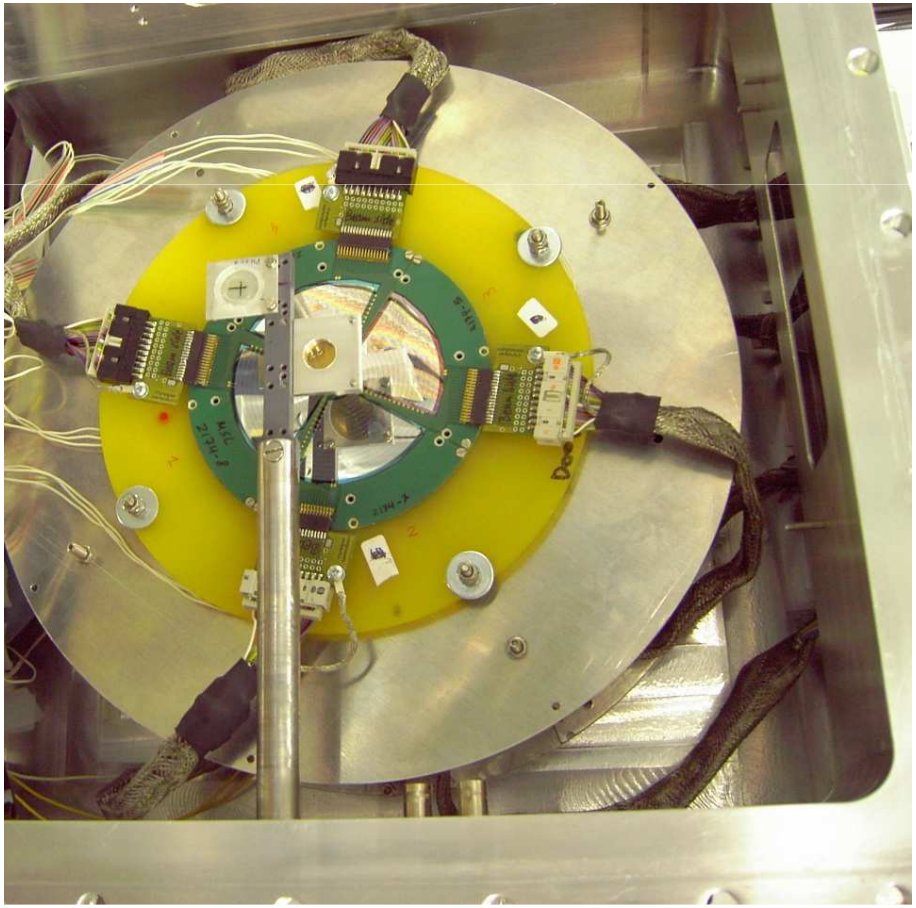
Reação Nuclear -> Radioisótopo -> emite pósitrons-> aniquilação e- e+-> raios gama

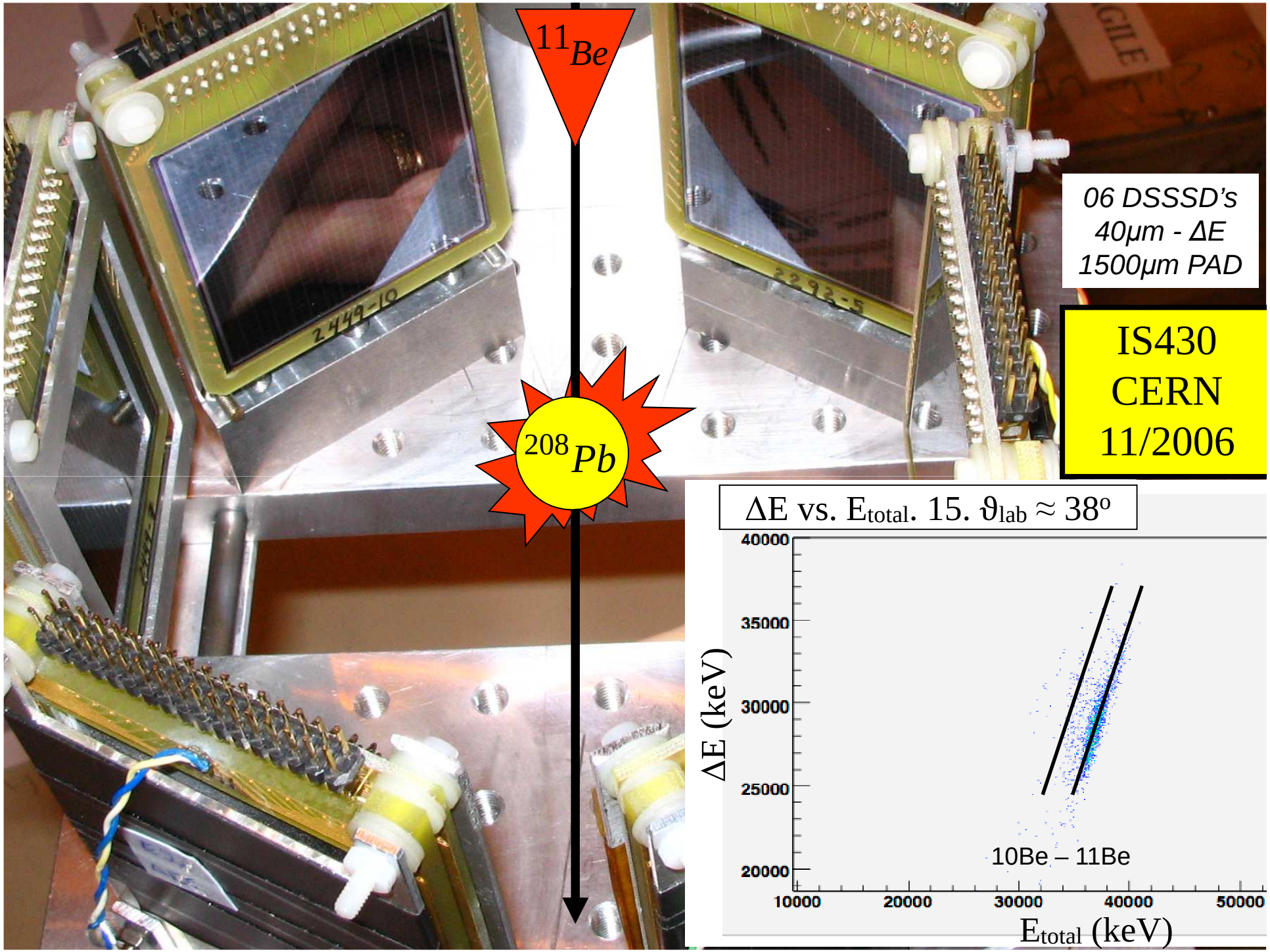
18Fluor -> GLUCOSA -> radiação detectável -> Glucosa detectável

CENTRO: Cyclotron Research Center (CRC), *Louvain La Neuve - Bélgica.*
TEMA: Study of neutron rich Be, C isotopes using $^{6}He+^{14}C$ transfer reactions
(experiência - PH217)

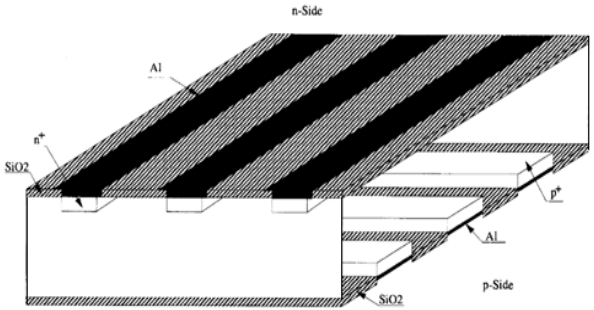
"Reactions induced by 35MeV ^{6}He beam on ^{12}C and ^{14}C".
European Physical Journal Special Topics 150, 43 (2007).

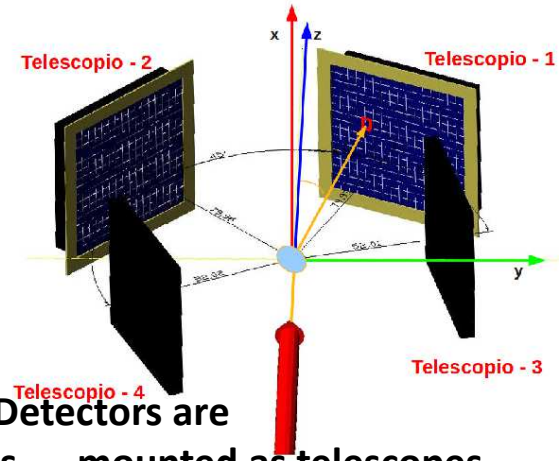


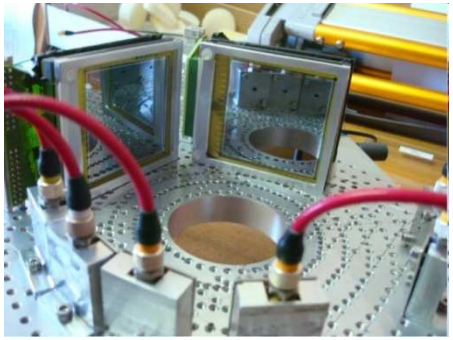



^{11}Be
^{208}Pb
06 DSSSD's
40μm - ΔE
1500μm PAD
IS430
CERN
11/2006
ΔE vs. E_{total}. 15. $\vartheta_{lab} \approx 38^o$
ΔE (keV)
40000
35000
30000
25000
20000
10000
20000
30000
40000
50000
10Be – 11Be
E_{total} (keV)

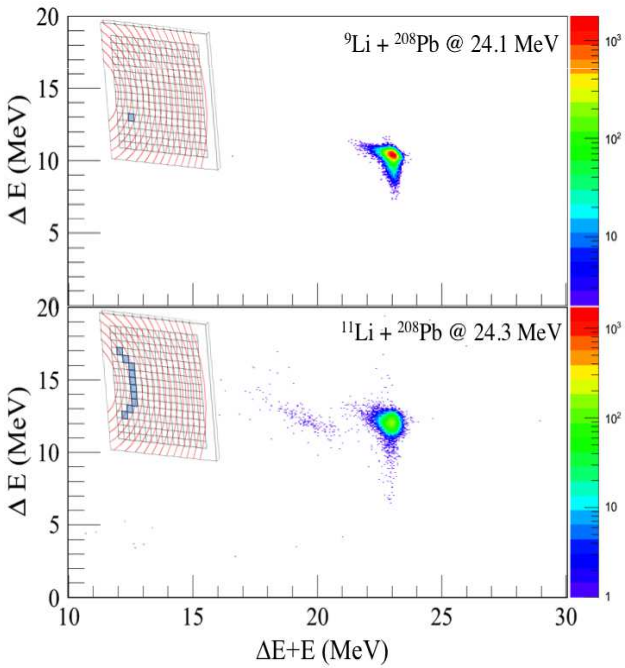
Novel dual single sided silicon strip detector chip for radiotherapy verification

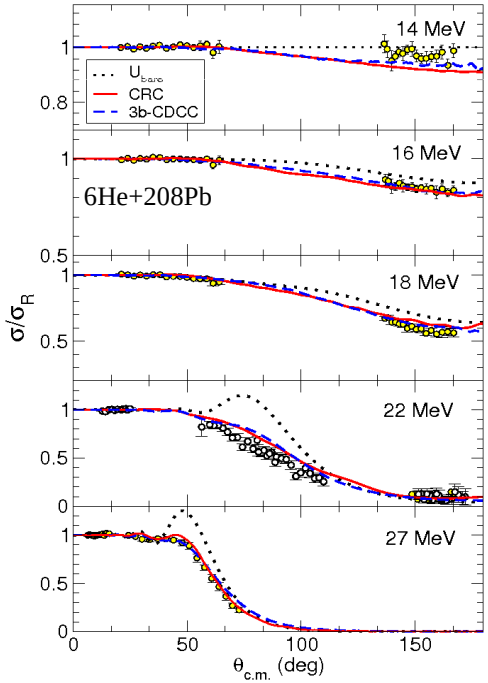


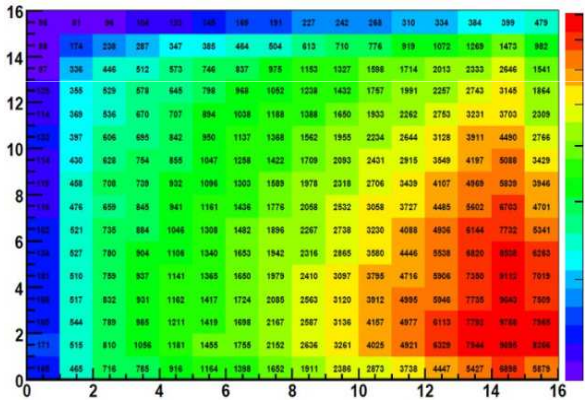




Pixelated Silicon Detectors are widely used for nuclear reactions – mounted as telescopes.







- Hit map
-number of counts/pixel
- deposited energy (ΔE)

Physical Review Letters. 109, 262701 (2012)
Physical Review Letters 110, 142701 (2013)

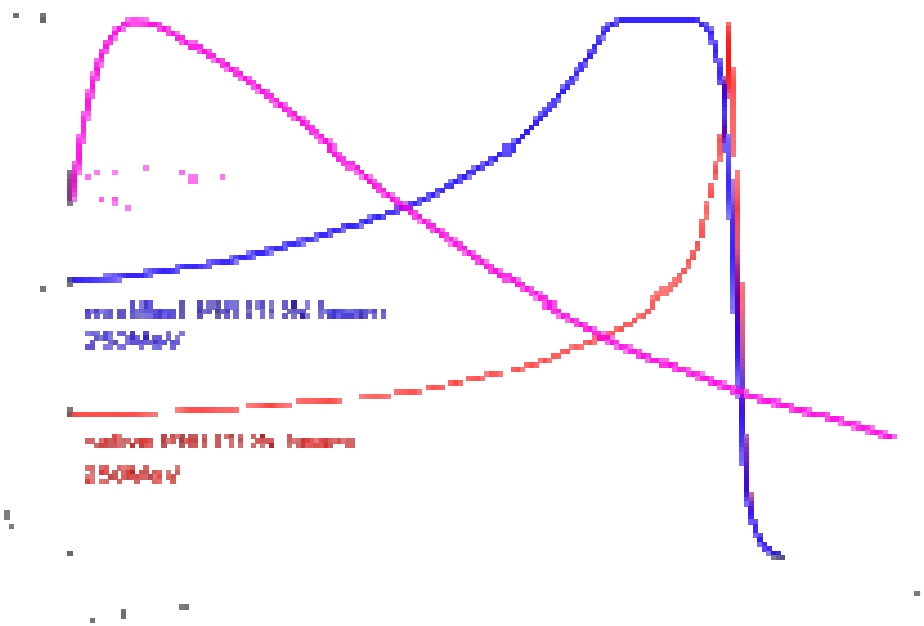
Nuclear Physics A 840 (2010) 19
Physics Letters B 693 (2010) 310

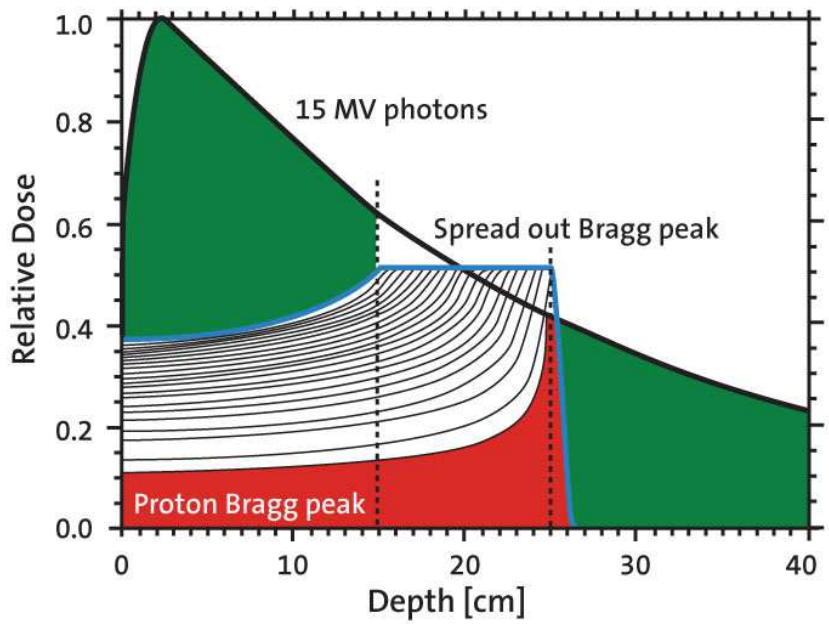
Efeitos Físicos de um feixe de partículas:

Os prótons e íons pesados depositam preferentemente sua energia perto do fim da sua trajetória, no que chamamos "pico de Bragg", antes de parar.

Em Física Médica, esta propriedade pode ser usada para obter um tratamento mais eficiente de um tumor do que o alcançado com fótons, nos quais a dose absorvida diminui exponencialmente com a penetração.

$$I = I_0 \exp\left[-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)\cdot(\rho \cdot x)\right]$$





Captura de nêutrons seguida de uma reação nuclear:

Principle of Boron Neutron Capture Therapy (BNCT)

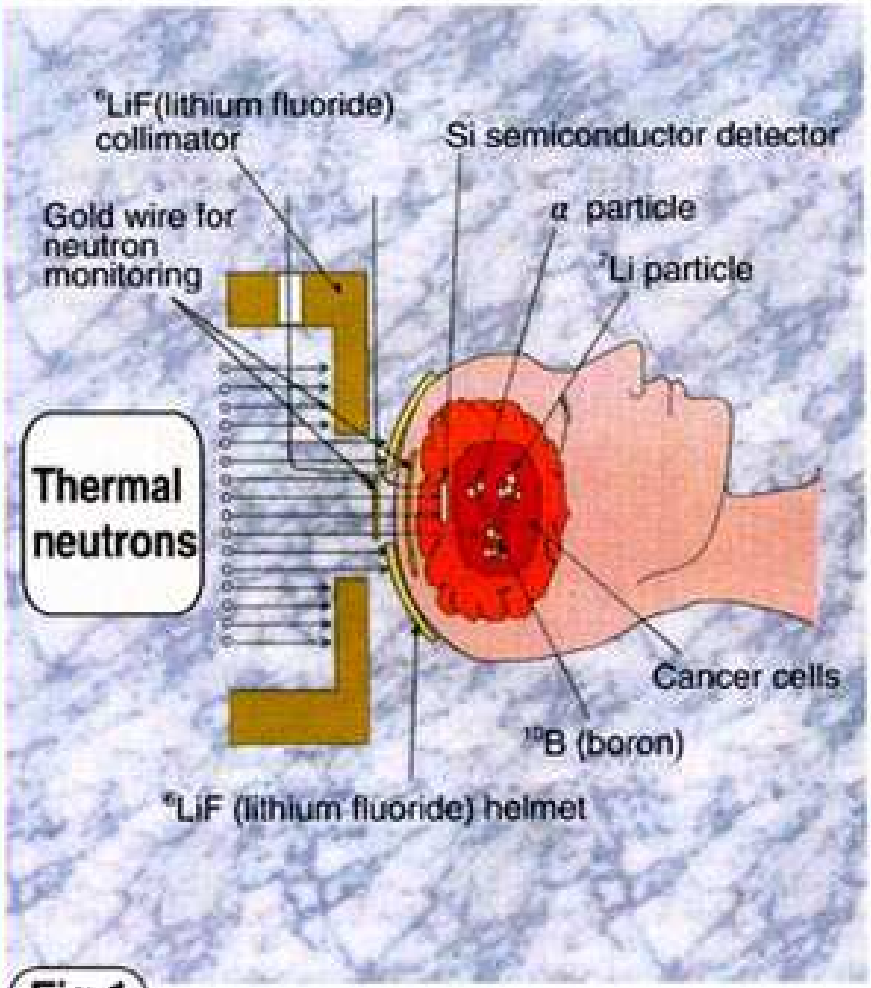
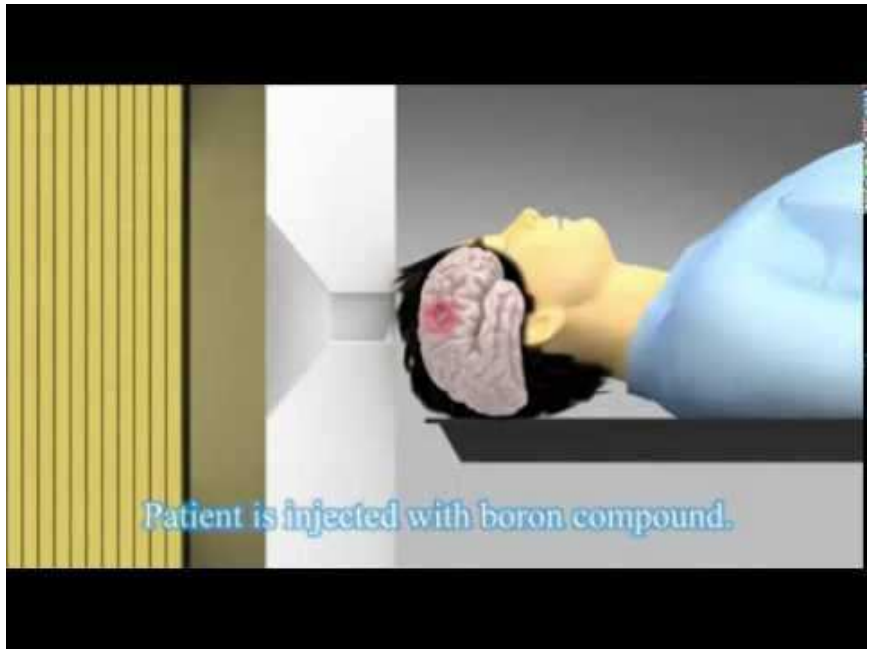
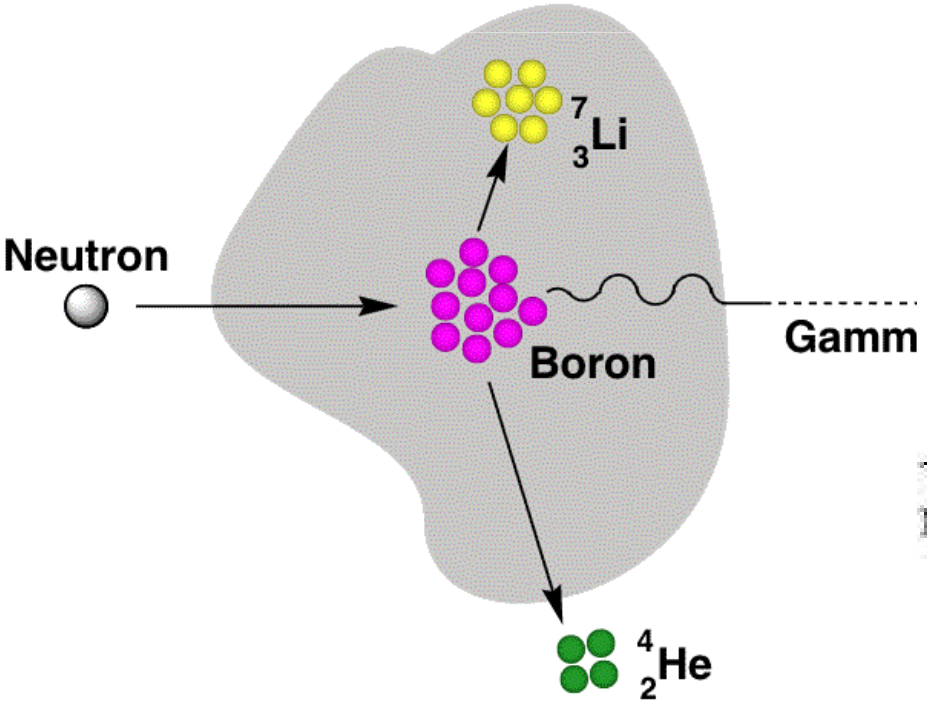
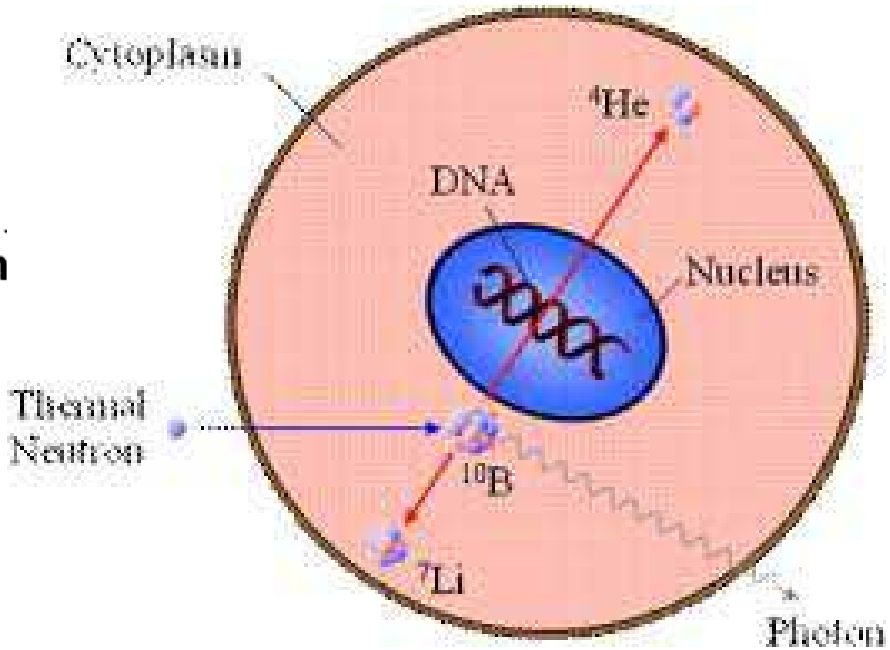


Fig.1

In boron neutron capture therapy (BNCT), boron compound is injected into a patient's body in advance. Owing to the blood-brain barrier function, boron compounds do not enter healthy brain cells easily but readily find their way into malignant tumor cells. Neutrons are irradiated on the affected part of the brain, enabling selective destruction of the tumor cells containing boron by the alpha and lithium particles generated from the $^{10}B(n, \alpha)\,^{7}Li$ reaction.


Patient is injected with boron compound.


Neutron
Boron
Gamm
$^{7}_{3}Li$
$^{4}_{2}He$


Cytoplasm
^{4}He
DNA
Nucleus
Thermal Neutron
^{10}B
^{7}Li
Photon