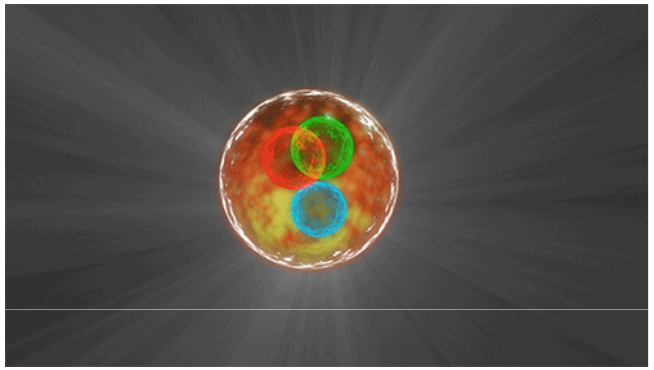
CAPÍTULO 31: Física de Partículas

- ❑ **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

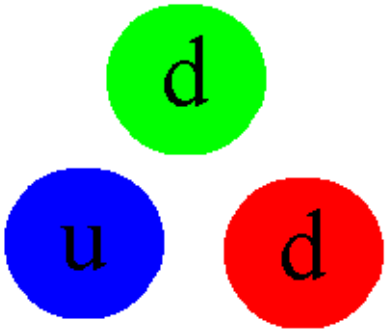


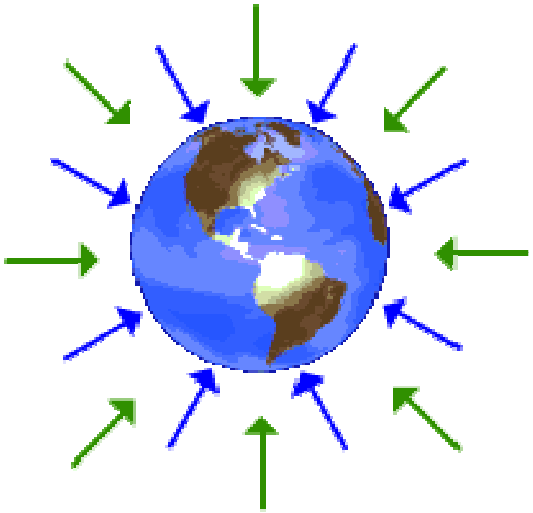
Lista de exercícios sugerida – Capítulo 30:

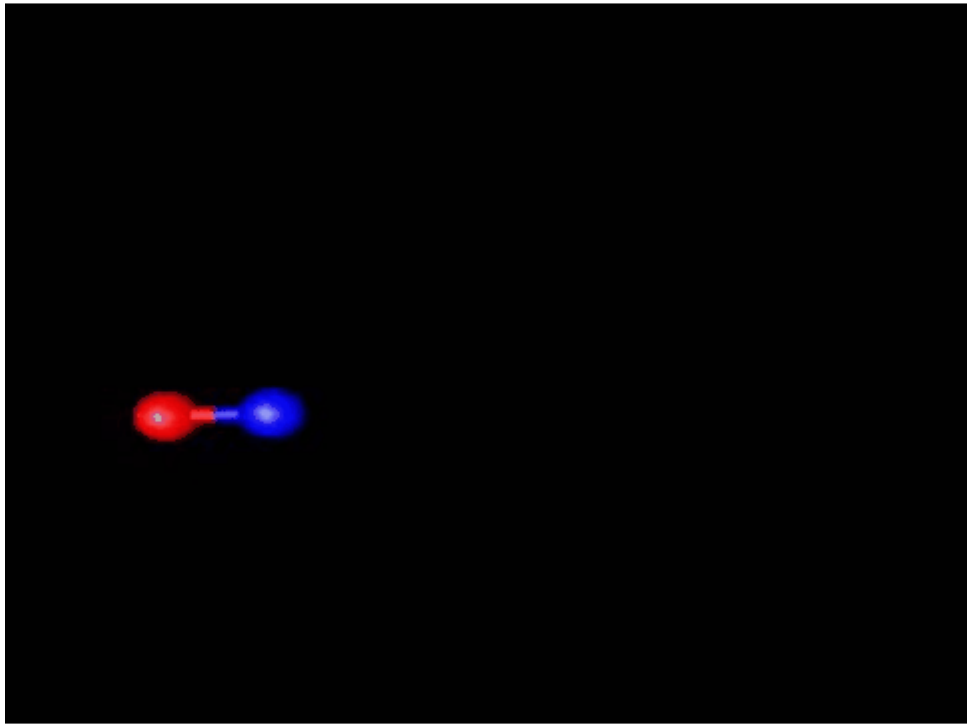
Exs.: 2, 4, 6, 10, 13, 37, 38, 40, 44, 45, 50, 53

EXISTEM 4 FORÇAS FUNDAMENTAIS NA NATUREZA

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







EXISTEM 4 FORÇAS FUNDAMENTAIS NA NATUREZA

❑ Força Gravitacional

➢ **É uma Força de longo alcance cujo efeito sobre as partículas elementares é desprezível (cresce com a massa dos corpos interagindo).**

➢ **É a Força responsável por manter planetas e galáxias unidos.**

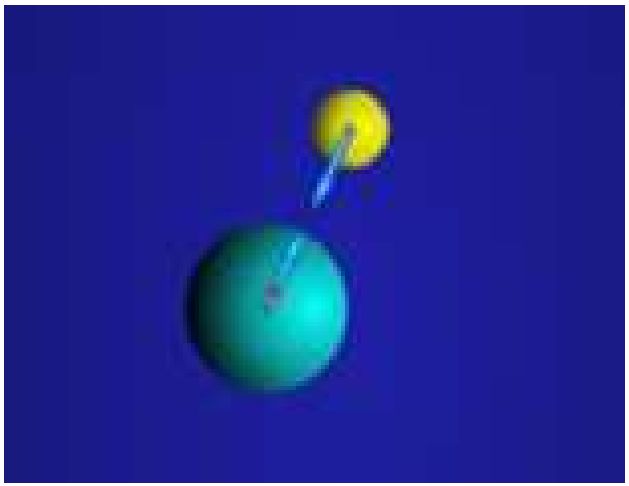
➢ **Sua intensidade é da ordem de 10^{-39} da Força Nuclear Forte.**

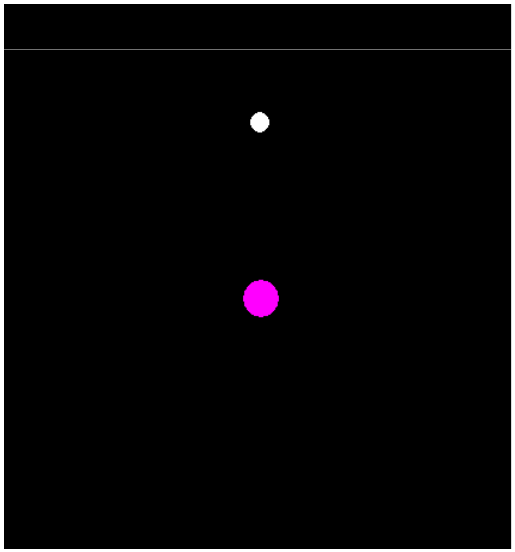
$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}; \text{onde}$$

$$\mathrm{F} \equiv \text{força (N)}$$

$$\mathrm{M} \equiv \text{massa (Kg)}$$

$$\mathrm{r} \equiv \text{distância (m)}$$



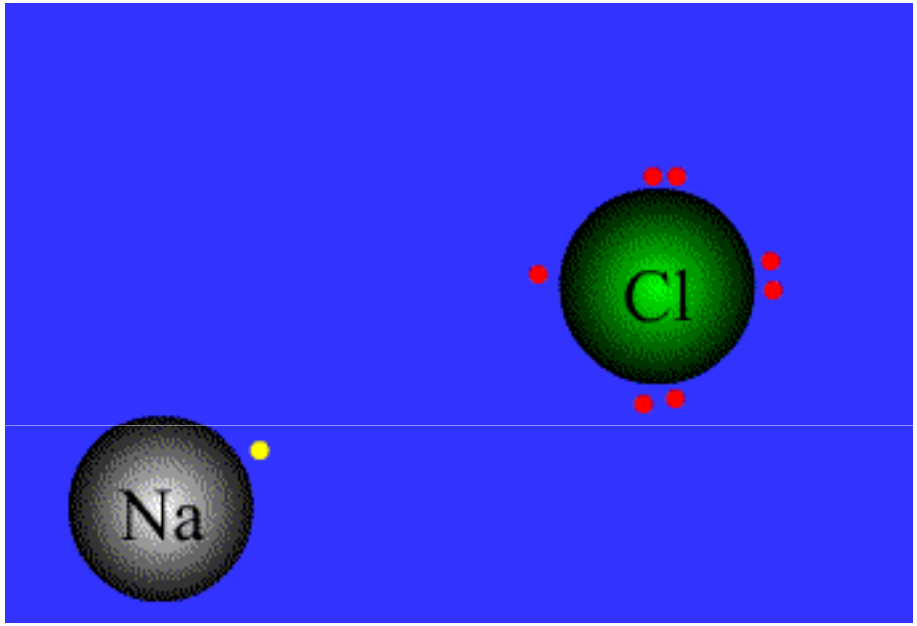


$$\mathrm{G} \equiv \text{constante gravitacional} \left(6.67259 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{Kg^2} \right)$$

EXISTEM 4 FORÇAS FUNDAMENTAIS NA NATUREZA

❑ Força Eletromagnética

➢ **É a Força que liga os átomos e moléculas para formar a matéria comum.**



➢ **A Força eletromagnética tem ~1% da intensidade da Força Nuclear Forte e diminui de intensidade com o inverso do quadrado da separação entre as partículas interagentes.**

$$F = \frac{k q_1 q_2}{r^2}$$

Lei de Coulomb

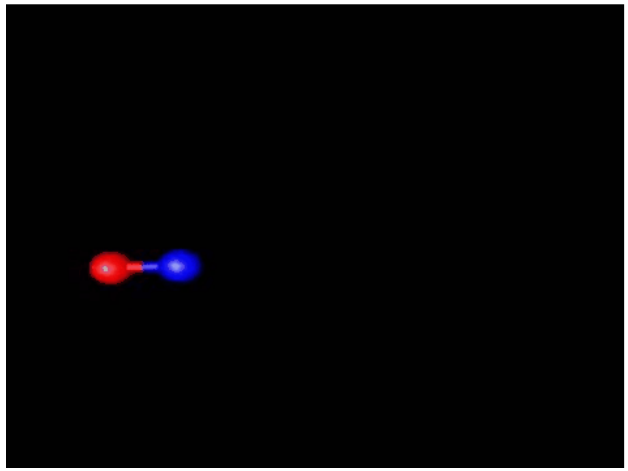
$$F = \frac{kq_1q_2}{r^2}; \text{onde}$$

F ≡ força (N)

q ≡ carga elétrica (C)

r ≡ distância (m)

k ≡ constante eletrostática $\left(8.987551787 \times 10^9 \frac{Nm^2}{C^2}\right)$



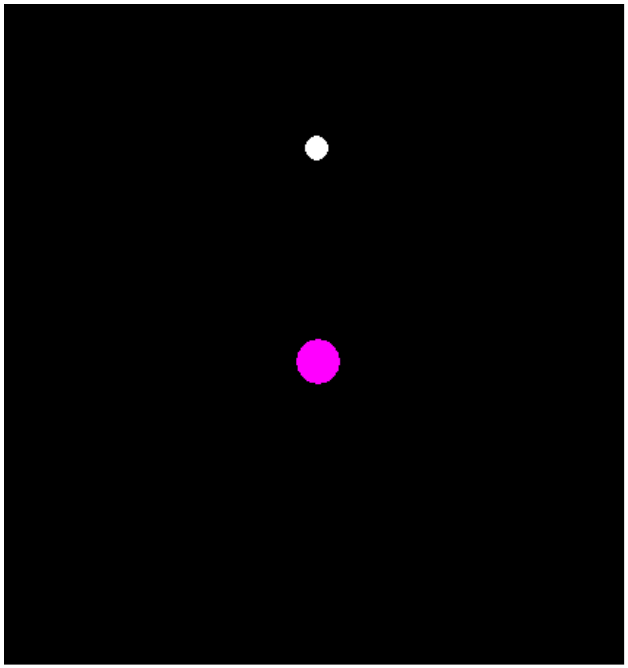
$$F = \frac{GM_1M_2}{r^2}; \text{onde}$$

F ≡ força (N)

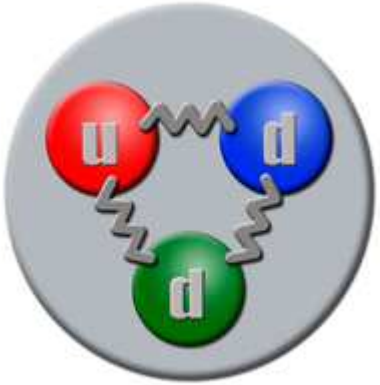
M ≡ massa (Kg)

r ≡ distância (m)

G ≡ constante gravitacional $\left(6.67259 \times 10^{-11} \frac{Nm^2}{Kg^2}\right)$



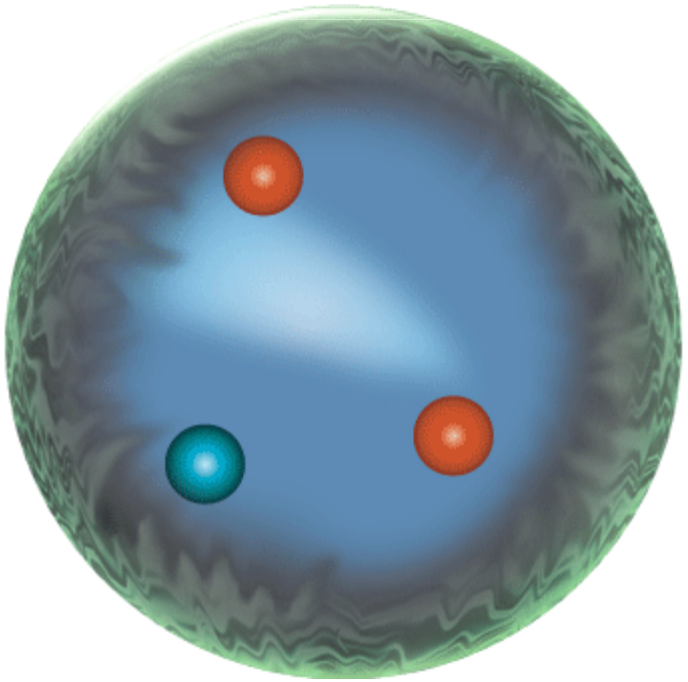
EXISTEM 4 FORÇAS FUNDAMENTAIS NA NATUREZA

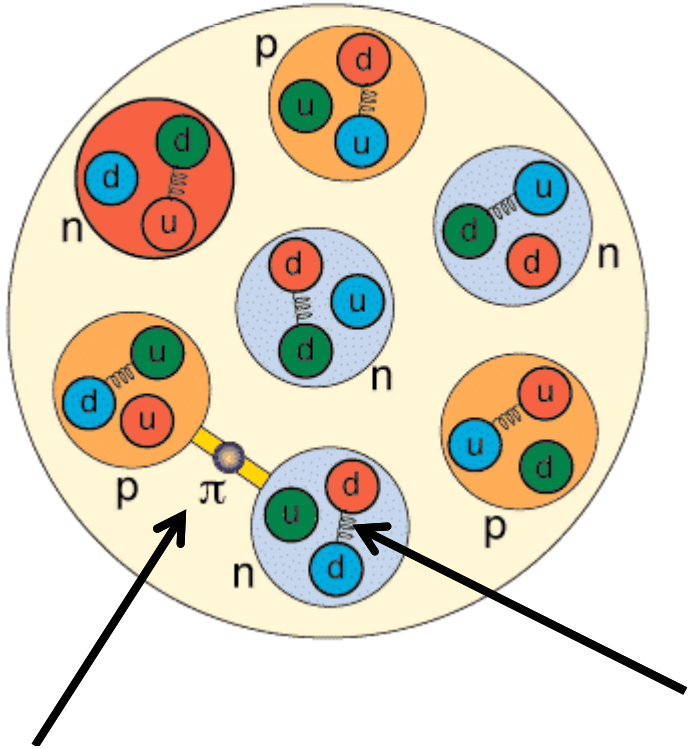


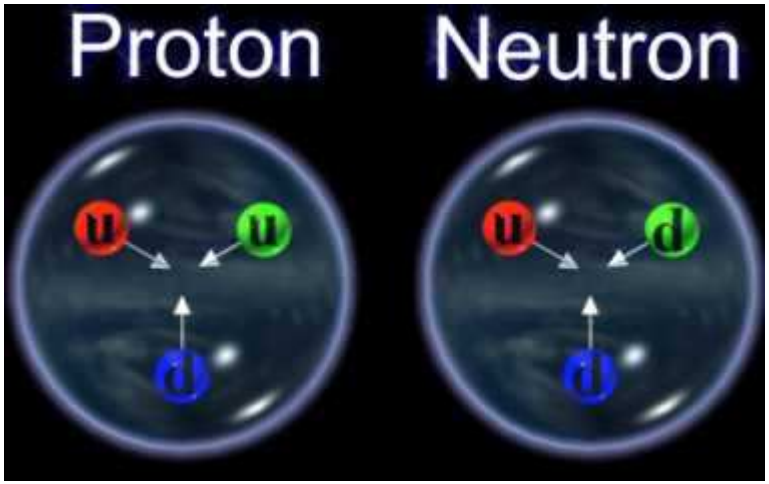
- ❑ **Força Nuclear Forte**

- ➢ **É a Força entre QUARKS**

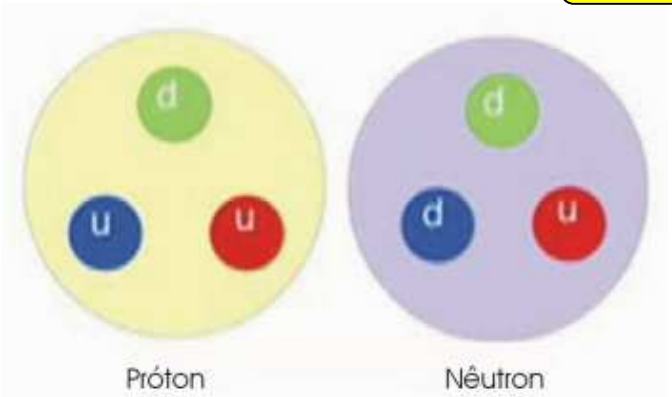
A Força entre os nucleons que mantêm o núcleo ligado é um efeito residual da Força Nuclear Forte (Força Nuclear).





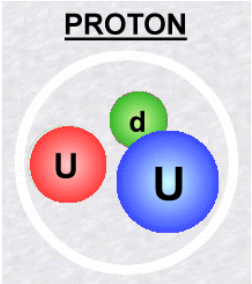


Prótons e nêutrons, são os maiores componentes da massa da matéria ordinária e são compostos por **quarks**.



Prótons e Nêutrons são constituídos por uma combinação **de 3 quarks**

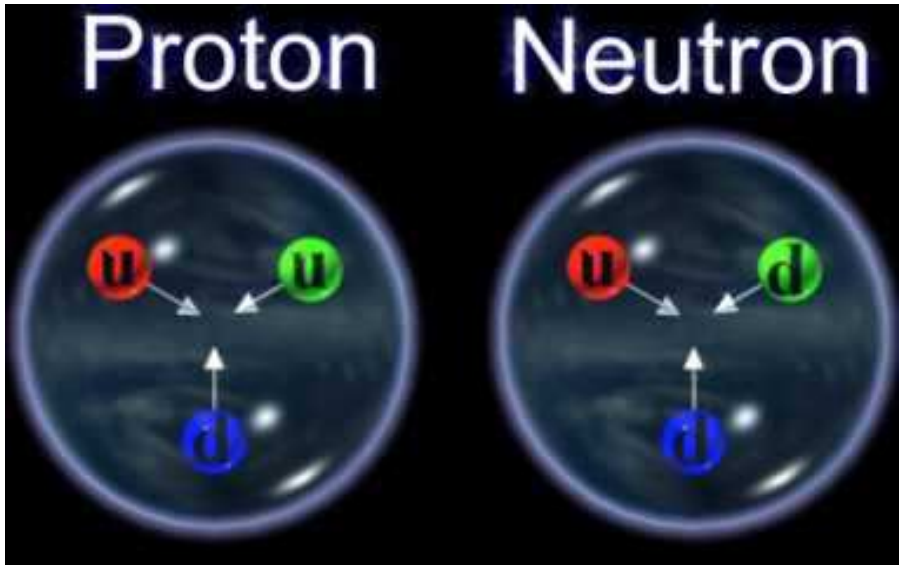
Prótons são constituídos de **dois quarks tipo "u" (up) carga positiva e um quark tipo "d" (down) carga negativa**



Nêutrons são constituídos por **dois quarks tipo "d" (down) carga negativa e um quark tipo "u" (up) carga positiva.**

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

Considerando o próton com carga positiva igual a uma unidade de carga e o nêutron com carga igual a zero (unidades de carga). Sendo um próton formado por dois quarks tipo “u” (up), com carga positiva, e um quark tipo “d” (down), com carga negativa, e que um nêutron é formado por dois quarks tipo “d” (down), com carga negativa, e um quark tipo “u” (up) com carga positiva. Qual deve ser a carga dos quarks u e d para que a carga do próton seja de 1 unidade e a carga do nêutron de 0 unidades de carga?



$$q_u + q_u + q_d = 1q \qquad (1)$$

$$2q_u + 1q_d = 1q$$

$$q_u + q_d + q_d = 0q$$

$$2q_d + 1q_u = 0q \Rightarrow q_u = -2q_d$$

Substituindo $q_u = -2q_d$ em

$$q_u + q_u + q_d = 1q \qquad (1)$$

$$-2q_d - 2q_d + q_d = 1q$$

$$-3q_d = 1q \Rightarrow q_d = -\frac{1}{3}q$$

Sendo $q_u = -2q_d \Rightarrow q_u = -2 \cdot \left(-\frac{1}{3}q\right) = \frac{2}{3}q$

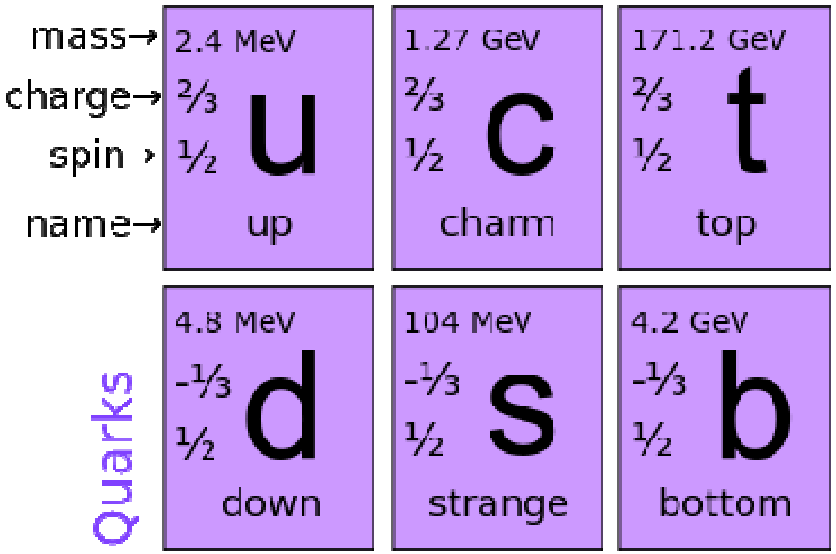
EXISTEM 4 FORÇAS FUNDAMENTAIS NA NATUREZA

❑ Força Nuclear Forte

➢ **É a Força entre QUARKS (quarks formam os hádrons)**

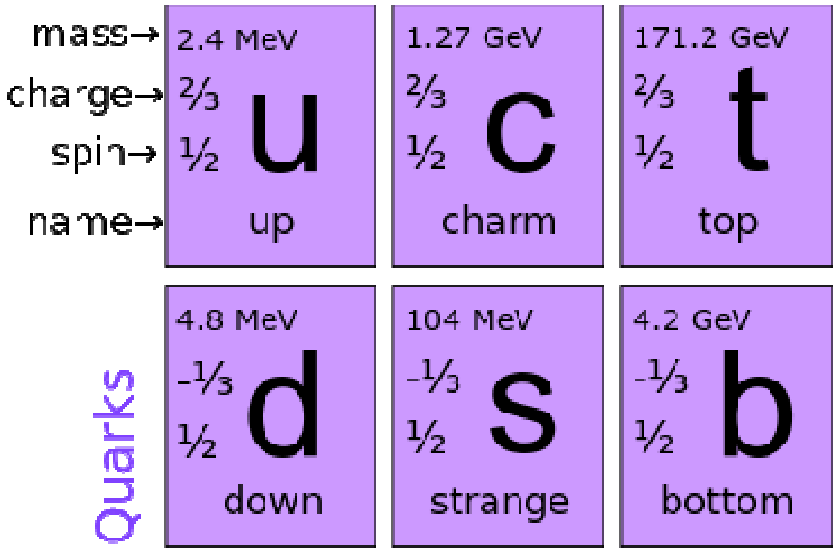
Os quarks estão entre as partículas elementares, ou seja, são os constituintes básicos de outras partículas (como os prótons e os nêutrons) e portanto da matéria em geral.

Os quarks possuem uma carga elétrica fracionária $\pm\frac{1}{3};\pm\frac{2}{3}$ spin ½ e diferentes medidas de massa (energia) de forma a termos seis tipos classificados:



Considerando a tabela abaixo, determine a carga dos anti-quarks:

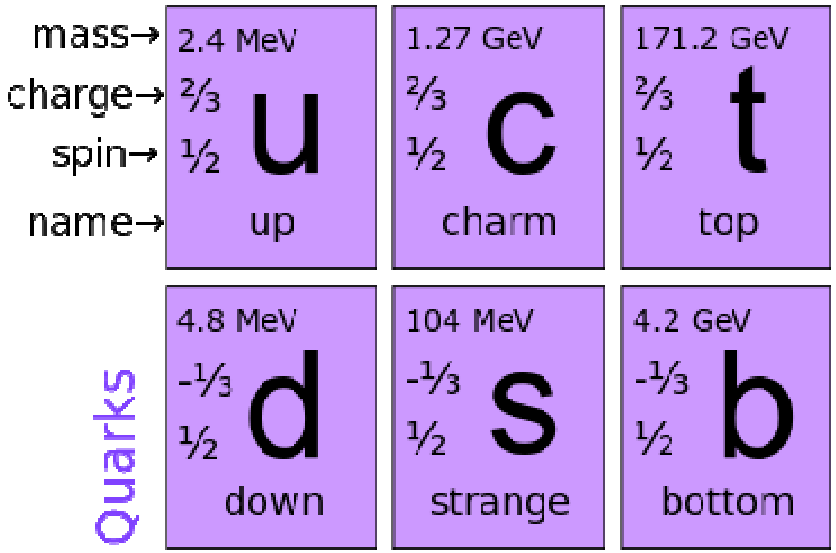
$$\bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{t}, \bar{b}$$



6 sabores

Considerando a tabela abaixo, determine a carga dos anti-quarks:

$$\bar{u}, \bar{d}, \bar{c}, \bar{s}, \bar{t}, \bar{b}$$



6 sabores

$$q(\bar{u}) = -\frac{2}{3}$$

$$q(\bar{d}) = +\frac{1}{3}$$

$$q(\bar{c}) = -\frac{2}{3}$$

$$q(\bar{s}) = +\frac{1}{3}$$

$$q(\bar{t}) = -\frac{2}{3}$$

$$q(\bar{b}) = +\frac{1}{3}$$

EXISTEM 4 FORÇAS FUNDAMENTAIS NA NATUREZA

- **Força Nuclear Forte**

- **É a Força entre QUARKS (quarks formam os hádrons)**

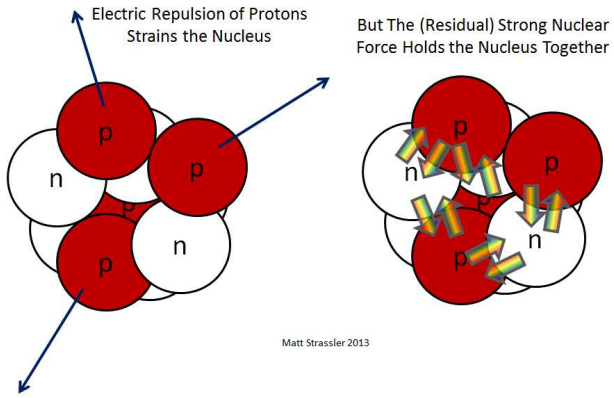
A Força entre os nucleons que mantêm o núcleo ligado é um efeito residual da Força Nuclear Forte.

Sua intensidade é considerável e dominaria todas as outras forças da natureza se o seu **raio de ação não fosse tão limitado** (da ordem de grandeza dos núcleos atômicos, 1 – 3 fm)

Isto explica porque no núcleo, dois prótons, com a mesma carga positiva Q, não são violentamente separados pela força eletromagnética:

a interação forte é muito mais poderosa e é exercida entre todos os pares de nucleons:

- próton-próton
- nêutron-nêutron e
- próton-nêutron

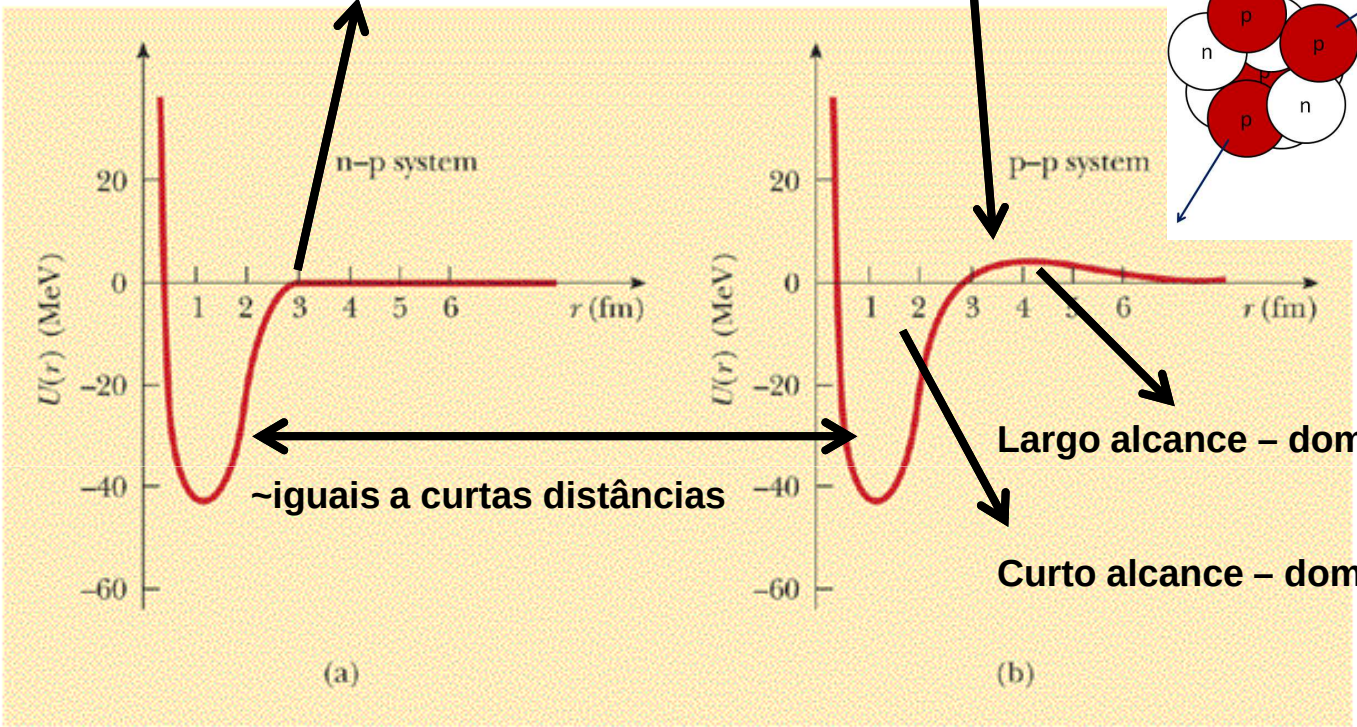


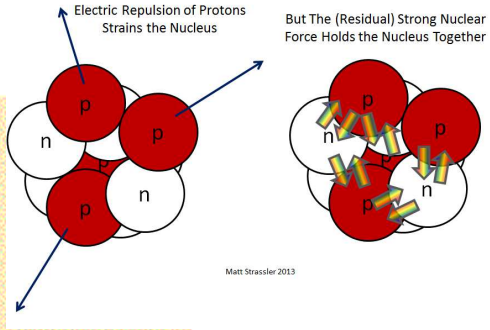
Estabilidade Nuclear

Componente repulsiva devido à força de Coulomb

Serway/Jewett; Principles of Physics, 3/e
Figure 30.3

ausência da componente repulsiva





~iguais a curtas distâncias

Largo alcance – domínio repulsivo

Curto alcance – domínio atrativo

O nêutron não sente o potencial elétrico repulsivo

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

(a) **Energia potencial em função da distância de separação** para o sistema **nêutron-próton**. (b) Energia potencial em função da distância de separação para o sistema **próton-próton**. **A diferença nas duas curvas é devido à repulsão de Coulomb no caso da interação próton-próton.**

EXISTEM 4 FORÇAS FUNDAMENTAIS NA NATUREZA

❑ Força Nuclear Fraca

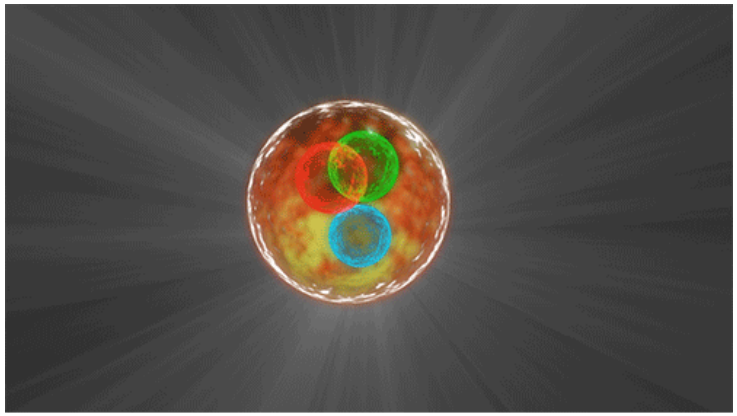
➢ **É uma Força de curto alcance (~ < 1fm) que tende a produzir instabilidade em certos núcleos.**

➢ **É a Força responsável pelo decaimento beta.**

➢ **Sua intensidade é da ordem de < 0.001% da Força Nuclear Forte.**

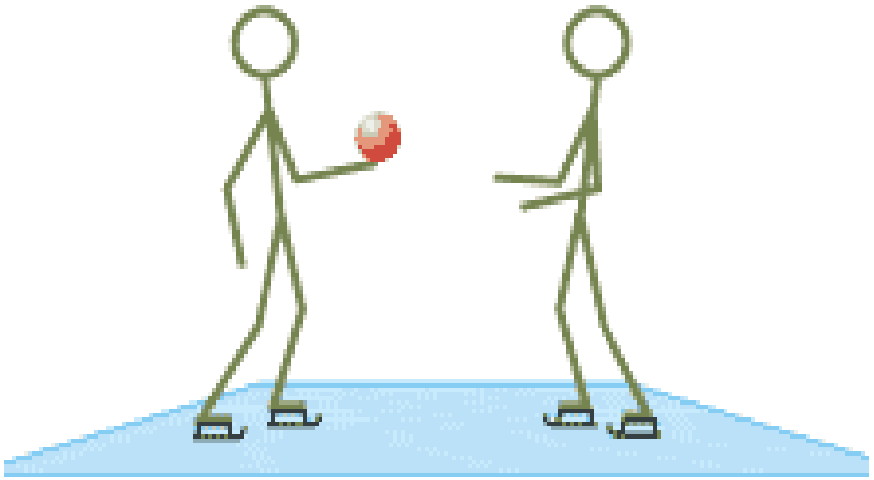
A partícula mais comum que interage somente por meio da força fraca é o ***neutrino.***

A **interação fraca** é causada pela **emissão ou absorção** de **bósons** (W e Z).



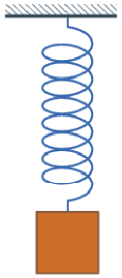
NOVO CONCEITO

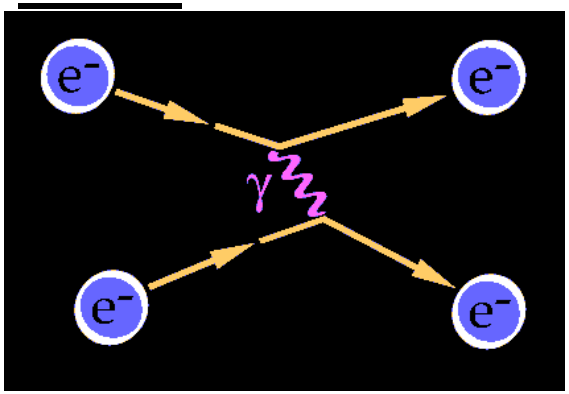
Na Física Moderna as **interações entre as partículas** são descritas em termos de um modelo estrutural que envolve a **troca de "partículas" de campos ou quanta.**



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

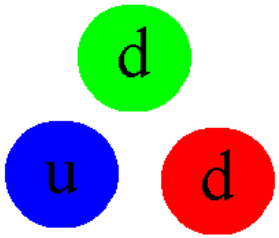
Assim, a Força Eletromagnética é mediada pelos **fótons** e os fótons são os "quanta" do campo eletromagnético.





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.**

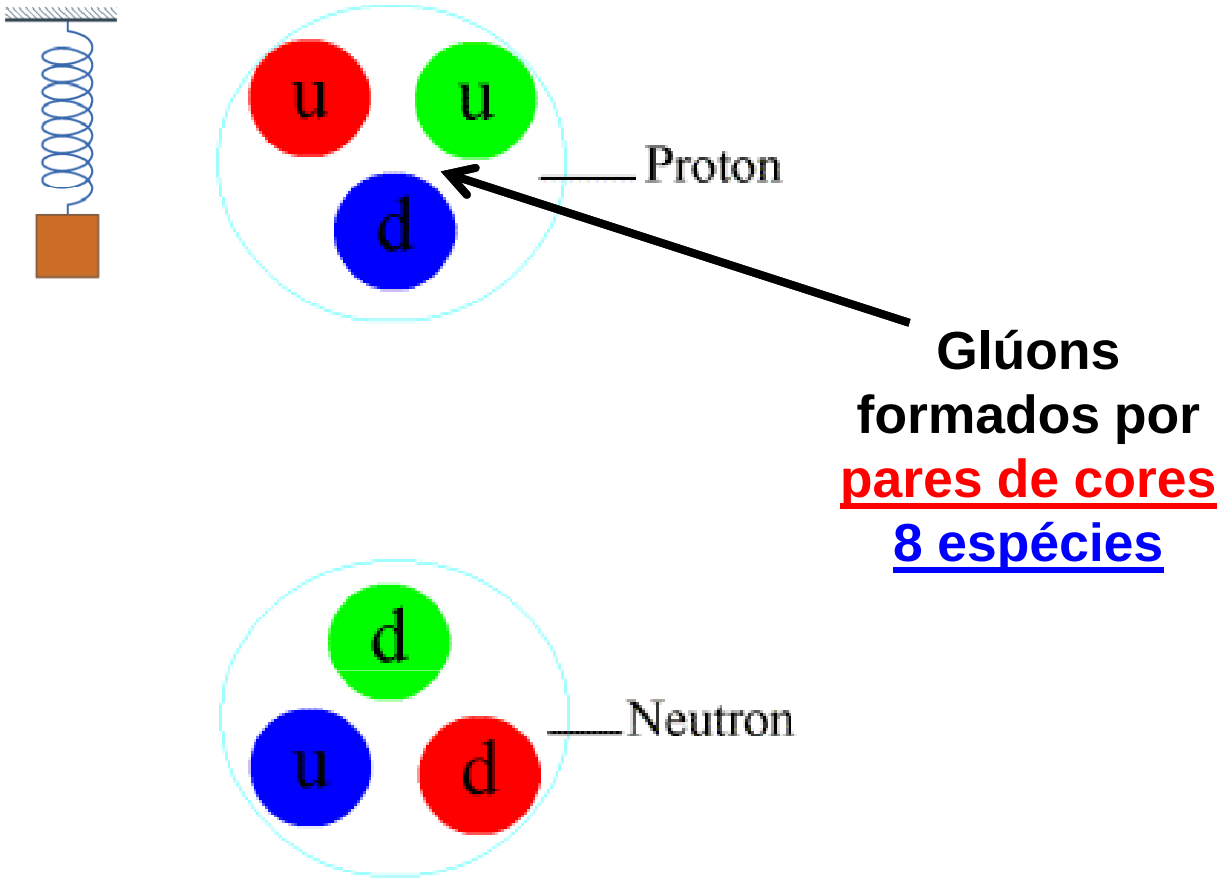
"partículas" elementares



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.**

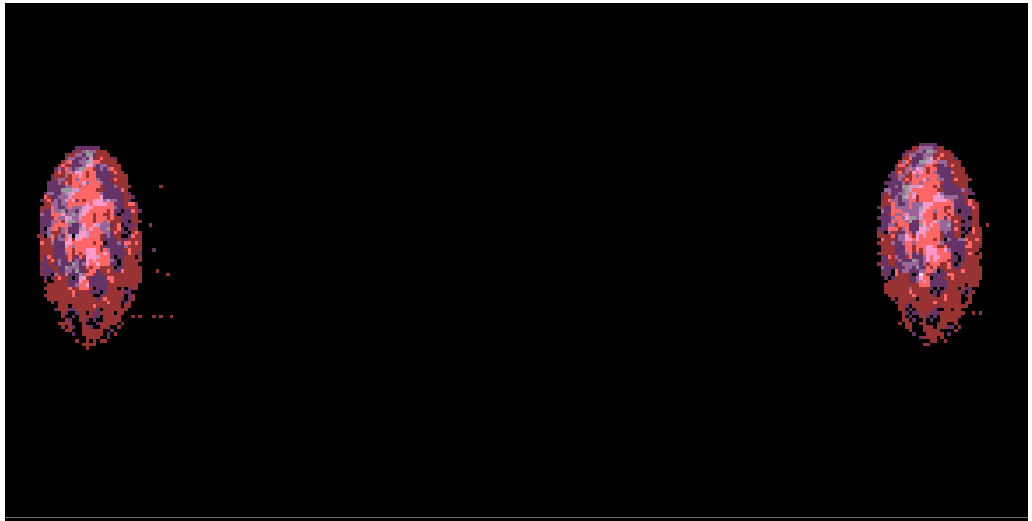
E a Força Gravitacional é mediada pelos quanta do campo gravitacional chamados de **grávitons** **(partícula teórica que seria um bóson)**.

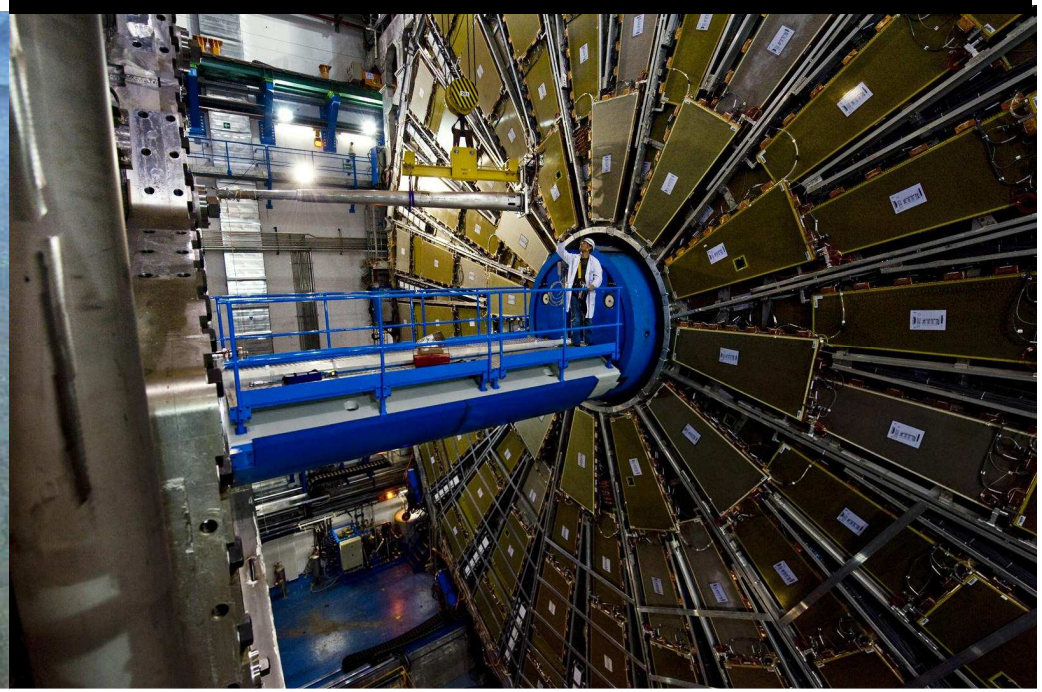


A força nuclear (ou força forte residual) é responsável pela **interação entre um próton e um nêutron**. Os círculos duplos pequenos e coloridos são **glúons (que são bósons – spin inteiro),** que mantêm a ligação entre prótons e nêutrons. Estes glúons também mantêm a combinação quark-antiquark chamada de **píon**, e, assim, **ajudam a transmitir uma parte residual da força forte.**

QUANDO NÚCLEOS colidem e a densidade de energia das partículas produzidas é suficientemente elevada, então um plasma quark-glúon poderia ser produzido.

Condições extremas de pressão e temperatura



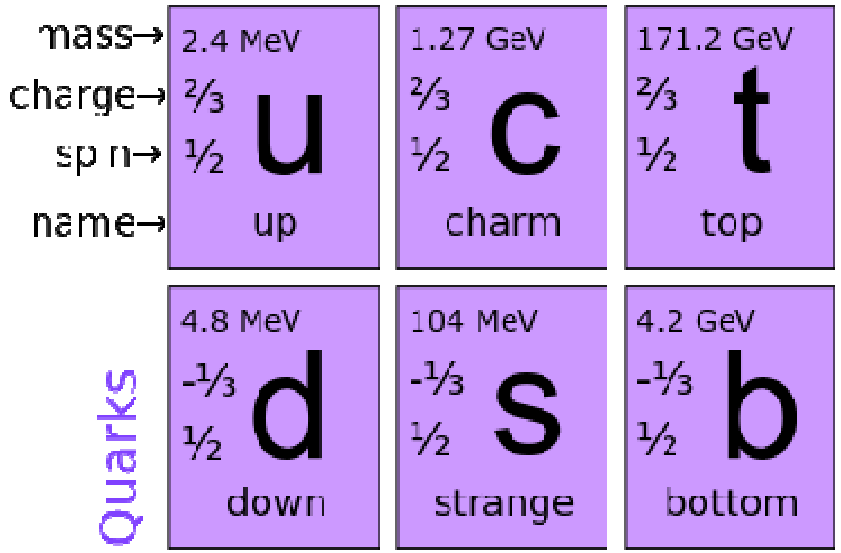


Uma **classificação** para os tipos básicos de partículas elementares é dividida em:

- **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**



6 sabores

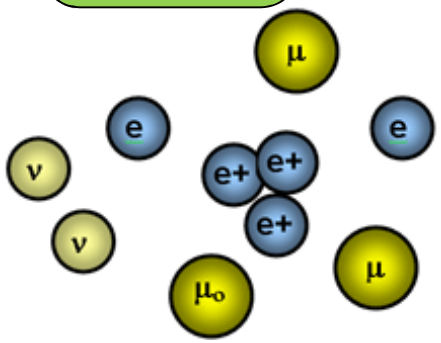
No Modelo Padrão da Física de Partículas os **Férmions são considerados os constituintes básicos da matéria**, que **interacionam entre eles via bósons (mediadores elementares).**

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

- **Bósons:** partículas elementares com **spin inteiro**
- **Férmions:** partículas elementares com **spin fracionado**

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

- **QUARKS**
- **LÉPTONS**



ν_e	e neutrino
e^-	electron
ν_μ	μ neutrino
μ^-	muon
ν_τ	τ neutrino
τ^-	tau

FERMIONS matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1\times10^{-8}$	0	u up	0.003	2/3
e electron	0.000511	−1	d down	0.006	−1/3
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0	c charm	1.3	2/3
μ muon	0.106	−1	s strange	0.1	−1/3
ν_τ tau neutrino	<0.02	0	t top	175	2/3
τ tau	1.7771	−1	b bottom	4.3	−1/3

No Modelo Padrão da Física de Partículas os **Férmions são considerados os constituintes básicos da matéria**, que **interagem via bósons.**

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

- **Bósons:** partículas elementares com **spin inteiro**
- **Férmions:** partículas elementares com **spin fracionado**

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

➢ **QUARKS** formam as **partículas do núcleo atômico**, e **interagem mediante a Força Nuclear Forte**

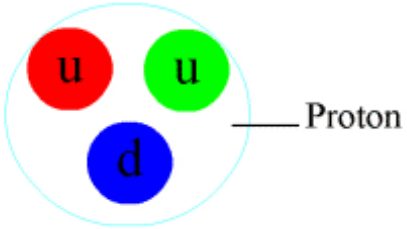
➢ **LÉPTONS** entre eles estão os **elétrons** e outras partículas que interagem basicamente mediante a **interação da Força Fraca e eletromagnética (neste último caso, se as partículas são carregadas).**

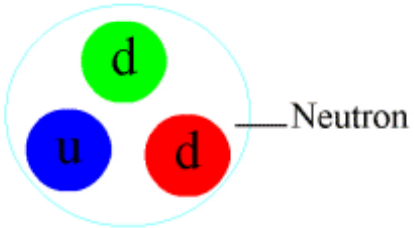
TODOS os léptons têm spin ½

ν_e	e neutrino
e^-	electron
ν_μ	μ neutrino
μ^-	muon
ν_τ	τ neutrino
τ^-	tau

No Modelo Padrão da Física de Partículas os férmions são considerados os constituintes básicos da matéria, que interacionam entre eles via bósons

As **partículas compostas** que contêm um **número par de férmions (partículas elementares de spin fracionado)** chegam a comportar-se como **bósons (partículas elementares)** para valores de energia tais que não se quebrem as ligações entre elas. Este é o caso dos **mésons**

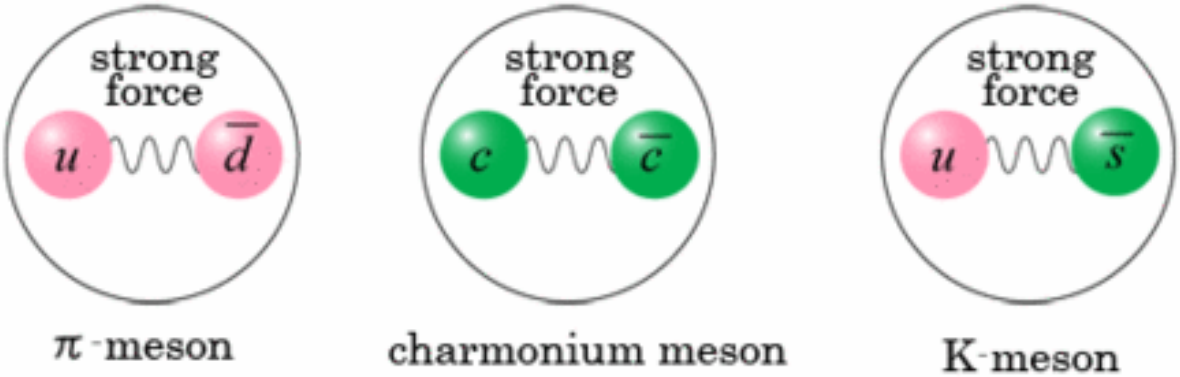


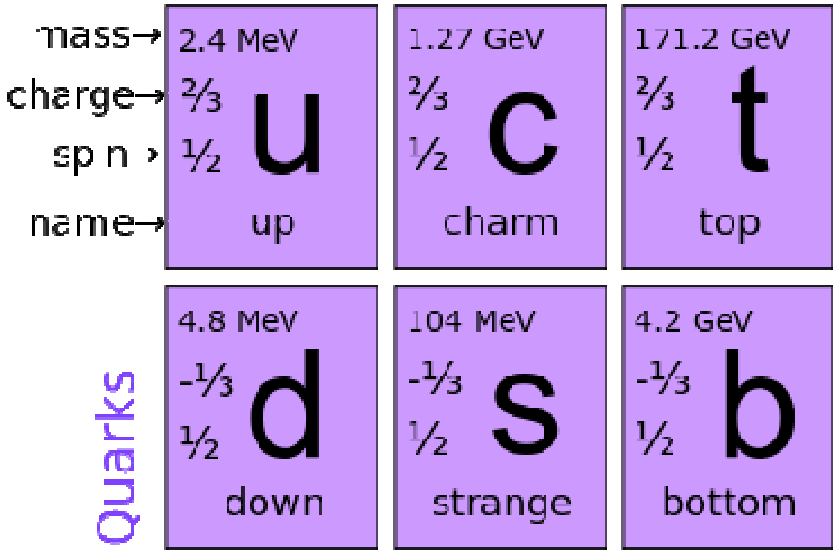


Em Física de Partículas **méson** é um **bóson (partícula elementar com spin inteiro [0,1])** que **responde à interação nuclear forte**, isto é, um **hádron** (definido como uma composição de quarks mantidos juntos pela força nuclear forte).

Os mésons são partículas formadas por um **quark** e um **anti-quark com carga elétrica igual a -1, 0, +1**

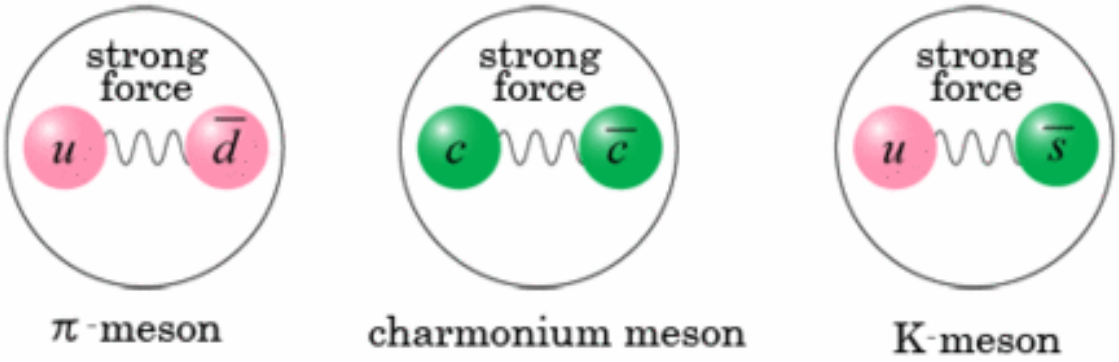
Quais são os valores das cargas dos seguintes mésons?

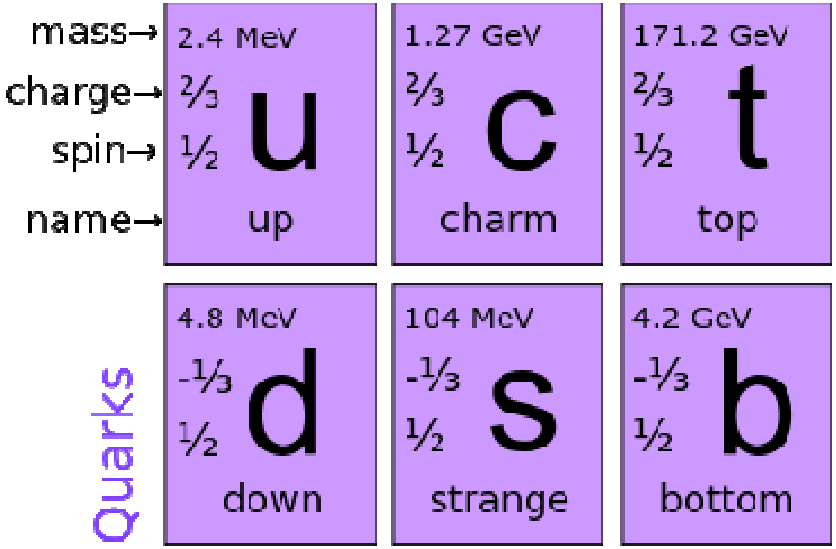




Quais são a(s) possível(is) combinações (quark-antiquark) entre "u" e "d" para formar cada um dos mésons π+,π- e π_0 (onde +, - e 0 representam as possíveis cargas do méson (+1e, -1e, 0e).

Quais são os valores das cargas dos seguintes mésons?





$$q(u)+q(\bar{d})=\frac{2}{3}+\frac{1}{3}=1$$

$$q(c)+q(\bar{c})=\frac{2}{3}-\frac{2}{3}=0$$

$$q(u)+q(\bar{s})=\frac{2}{3}+\frac{1}{3}=1$$

Quais são a(s) possível(is) combinações (quark-antiquark) entre "u" e "d" para formar cada um dos mésons π+,π- e π0 (onde +, - e 0 representam a carga do méson)

$$\pi^{+}\rightarrow u\bar{d};\quad \pi^{-}\rightarrow d\bar{u};\quad \pi^{0}\rightarrow d\bar{d}/u\bar{u}$$

As partículas compostas de **quarks** que interagem por meio da **força nuclear forte** são chamadas de **hádrons**.

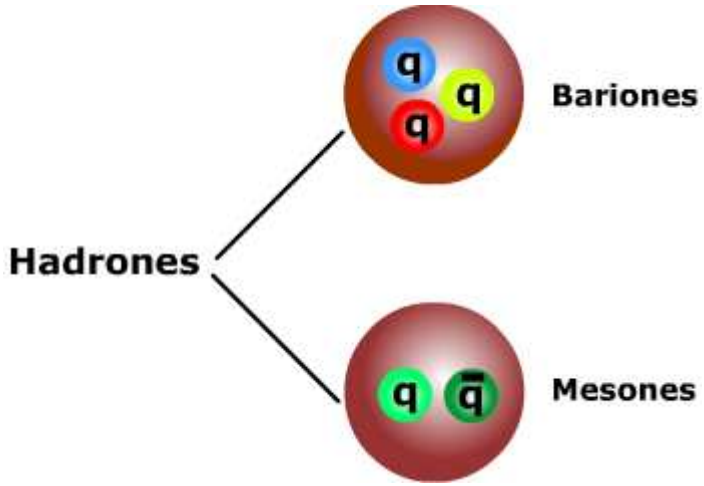
Os **hádrons** são divididos em duas classes dependendo do número de suas massas e spin:

❑ **Mésons** possuem spin nulo ou inteiro (0 ou 1) e uma massa entre o elétron e o próton (daí o nome « méson »). A maioria dos **mésons** possuem massas nestes intervalos. Os **mésons** são formados por um **quark e um anti-quark.**

❑ Os **Bárions** têm massas iguais ou superiores à massa do próton e seus spins têm sempre um valor fracionado:

$$\frac{1}{2} \text{ ou } \frac{3}{2}$$

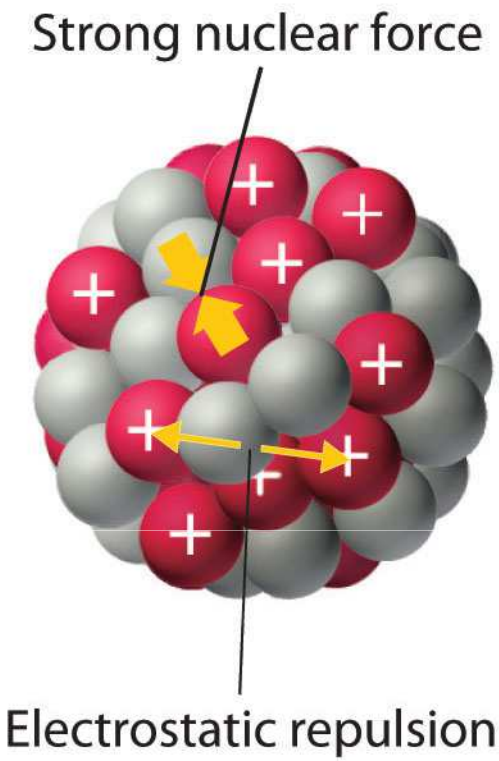
Assim prótons e nêutrons são bárions.



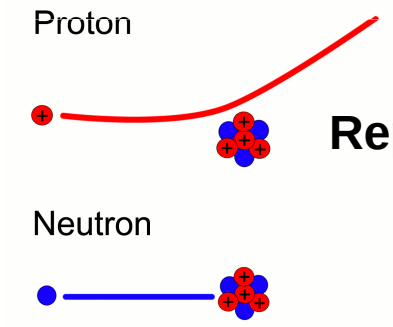
O próton tem uma única carga positiva “+e” e o elétron tem uma única carga negativa “-e” onde:

$$e = 1.6 \times 10^{-19} C$$

O **nêutron não tem carga elétrica**, ou seja, é **eletricamente neutro**.



Como o nêutron não tem carga,
não interage eletricamente com outras partículas e é difícil de ser detectado (e é altamente ionizante).



Repulsão – Força de Coulomb

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

$$\text{Nêutron}: 1.6750 \times 10^{-27} Kg \rightarrow \text{u} = 1.008665 \rightarrow 939{,}57 \text{MeV/c}^2$$

$$\text{Elétron}: 9.109 \times 10^{-31} Kg \rightarrow \text{u} = 5.486 \times 10^{-4} \rightarrow 0.511 \text{MeV/c}^2$$

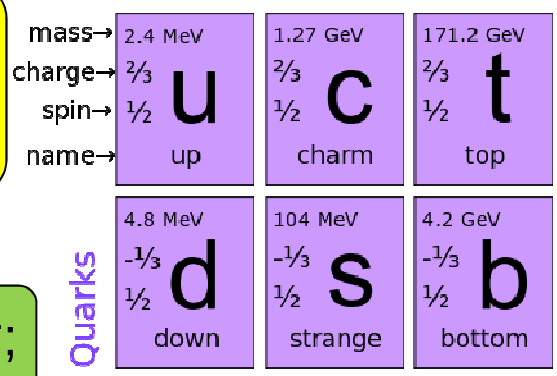
Originalmente, foi previsto por **Hideki Yukawa** que os **mésons** eram os **portadores da força que une o próton ao nêutron**.

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.

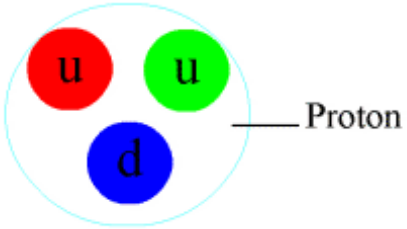
a combinação **"up-antiup"** e **"down-antidown"** constitui o **π^0**,

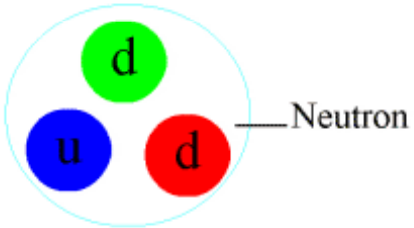
O méson $\pi^\pm$ tem uma massa de 139,6 MeV/c² e uma vida média de $2{,}6 \times 10^{-8}$ segundos. A desintegração principal é em um muon e um neutrino:

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

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

As **partículas compostas** que contêm um **número par de férmions (partículas elementares de spin fracionado)** chegam a comportar-se como **bósons (partículas elementares)** para valores de energia tais que não se quebrem as ligações entre elas. Este é o caso dos **mésons**



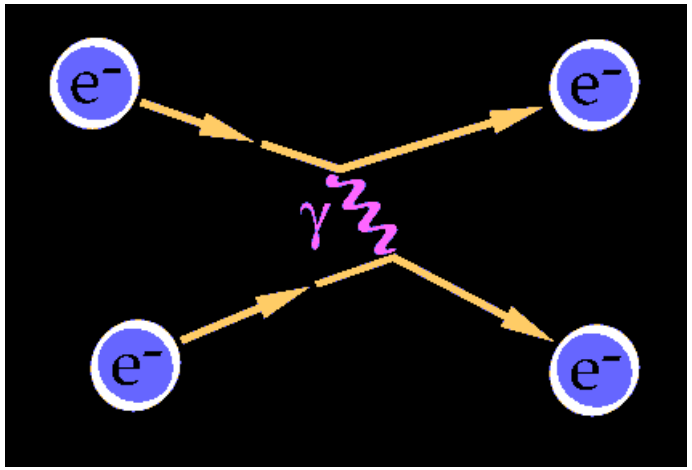


Em Física de Partículas **méson** é um **bóson (partícula elementar com spin inteiro [0,1])** que **responde à interação nuclear forte**, isto é, um **hádron** (definido como uma composição de quarks mantidos juntos pela força nuclear forte).

Os mésons são partículas formadas por um **quark** e um **anti-quark com carga elétrica igual a -1, 0, +1**

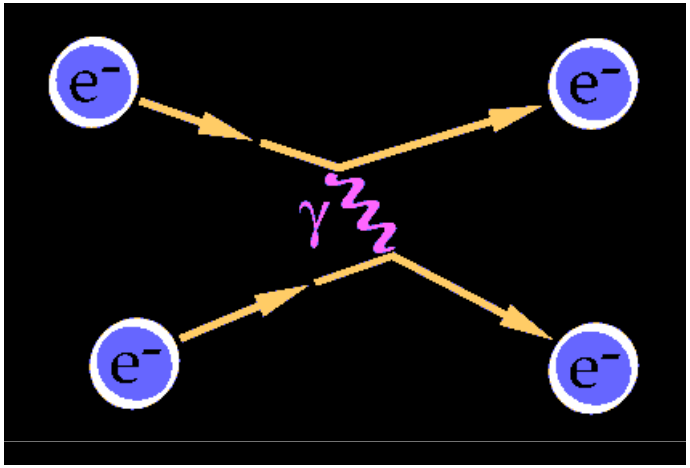
Na Física Moderna as interações entre as partículas são descritas em termos de um modelo estrutural que envolve a **troca de partículas de campos ou quanta.**

No caso da interação eletromagnética, as partículas de campo são os **<u>fótons</u>**.



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

Na interação elétron-elétron, o fóton que transfere energia e momento de um elétron para outro é chamado de ***<u>fóton virtual</u>***, pois desaparece durante a interação sem ser detectado.



Os fótons virtuais não violam a Lei de Conservação de energia pois, pelo princípio da incerteza, têm um tempo de vida muito curto.

Pelo Princípio da Incerteza $\Delta t \Delta E \approx \frac{\hbar}{2} \Rightarrow \Delta E \approx \frac{\hbar}{2\Delta t}$ ou $\boxed{\Delta t \approx \frac{\hbar}{2\Delta E}}$

Para um tempo muito pequeno (Δt) a incerteza na energia do sistema composto pelos dois elétrons e pelo fóton é maior que a energia do fóton.

Considerando **um píon** fazendo a **mediação da força nuclear** entre um **próton** e um **nêutron** como no modelo de Yukawa. **A energia de repouso** ***ΔE_R*** necessária para criar um **píon de massa m_π** é dada pela equação de Einstein:

$$\Delta E_R = m_\pi c^2$$

A simples existência do píon tende a violar a lei de conservação da energia se a partícula existisse por um tempo maior do que $\Delta t \approx \dfrac{\hbar}{2\Delta E_R}$

Onde Δt é o tempo necessário para o píon transferir-se de um núcleon para outro.

Portanto: $\Delta t \approx \dfrac{\hbar}{2\Delta E_R} = \dfrac{\hbar}{2m_\pi c^2}$

Como o píon não pode deslocar-se mais rápido do que a velocidade da luz, **existe uma distância "d" máxima que ele pode percorrer** que é $\Delta t \cdot c$ assim:

$$d = c\Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{d}{c} \approx \frac{\hbar}{2m_\pi c^2} \Rightarrow m_\pi c^2 \approx \frac{\hbar c}{2d}$$

Estimativa da energia do píon

Considerando a atuação da força nuclear em distâncias da ordem do fermi (fm). Utilizando este valor na equação abaixo, estime a energia do píon.

$$d = c\Delta t \Rightarrow \Delta t = \frac{d}{c} \approx \frac{\hbar}{2m_\pi c^2} \Rightarrow m_\pi c^2 \approx \frac{\hbar c}{2d}$$

$$\hbar = 1.055 \times 10^{-34}\, J \cdot s$$

$$c = 3.00 \times 10^{8}\, m/s$$

$$1\, fm \rightarrow 10^{-15}\, m$$

O alcance da força nuclear é da ordem de $10^{-15} m \equiv 1 fm$

Utilizando este valor para “d” na equação: $d = c\Delta t \approx \dfrac{\hbar}{2m_\pi c}$

$$m_\pi c^2 \approx \frac{\hbar c}{2d} = \frac{\left(1.055\times10^{-34} J\cdot s\right)\left(3.00\times10^{8} m/s\right)}{2\left(1\times10^{-15} m\right)} = 1.6\times10^{-11} J \approx 100 MeV$$

Esta é a mesma ordem de grandeza das massas dos píons.

Seção 31.3 Mésons e o Início da Física de Partículas – Exercício 5:

Um dos mediadores da interação fraca é o bóson Z_0 com massa igual a:

$93 GeV/c^2$. Utilize esta informação para encontrar a ordem de grandeza do alcance da força de interação fraca.

$$c\cdot\Delta t = d = \frac{hc}{4\pi\Delta E}$$

Seção 31.3 Mésons e o Início da Física de Partículas – Exercício 5:

Um dos mediadores da interação fraca é o bóson Z_0 com massa igual a: $93 GeV/c^2$. Utilize esta informação para encontrar a ordem de grandeza do alcance da força de interação fraca.

A criação de um bóson virtual Z^0 representa uma flutuação de energia:

$\Delta E = 93\times10^9 eV$ e não pode durar mais que:

$\Delta t = \dfrac{\hbar}{2\Delta E}$ e mover-se por uma distância maior que $c\cdot\Delta t$

$$c\Delta t = \frac{hc}{4\pi\Delta E} = \frac{(6.626\times10^{-34} J\cdot s)(3.0\times10^8 m/s)}{4\pi\left(93\times10^9 eV\right)}\left(\frac{1eV}{1.6\times10^{-19} J}\right) = 1.06\times10^{-18} m$$

$$d \approx 10^{-18} m$$