

A Aventura das Partículas: quem são os **tijolos** e o **cimento** do universo?

Tereza Mendes

IFSC – USP

<http://www.ifsc.usp.br/~lattice>



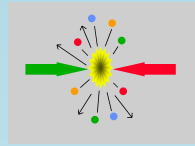
Resumo

- Do que é feita a **matéria**?
- Como são **colados** os pedaços de matéria?
- Como é realizado o **estudo** da Física de Partículas?

Referência: <http://www.sprace.org.br/AventuraDasParticulas/>

Vamos ver

- Introdução
- História
- O caso da **Cromodinâmica Quântica** (QCD)
- A QCD na **rede**



Quem são as Partículas Elementares?

() Os átomos



Quem são as Partículas Elementares?

- () Os átomos
- () Elétrons, prótons e nêutrons



Quem são as Partículas Elementares?

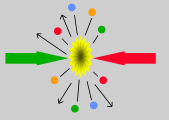
- () Os átomos
- () Elétrons, prótons e nêutrons
- (X) Quarks e léptons (e.g. elétron, neutrino)



Quem são as Partículas Elementares?

- () Os átomos
- () Elétrons, prótons e nêutrons
- (X) Quarks e léptons (e.g. elétron, neutrino)

mas... e os fótons? (e o Higgs??)



Quem são as Partículas Elementares?

- () Os átomos
- () Elétrons, prótons e nêutrons
- (X) Quarks e léptons (e.g. elétron, neutrino)

mas... e os fótons? (e o Higgs??)

... partículas vs. campos!



Quem são as Partículas Elementares?

- () Os átomos
- () Elétrons, prótons e nêutrons
- (X) Quarks e léptons (e.g. elétron, neutrino)

mas... e os fótons? (e o Higgs??)

... partículas vs. campos!

quarks e léptons: férmions (princípio de Pauli)

partículas transportadoras de força: bósons



Quais são as Interações Fundamentais?

- () Gravidade, eletromagnetismo, forças de van der Waals, atrito, viscosidade, resistência do ar, força normal, etc.



Quais são as Interações Fundamentais?

- () Gravidade, eletromagnetismo, forças de van der Waals, atrito, viscosidade, resistência do ar, força normal, etc.
- () Gravidade e eletromagnetismo



Quais são as Interações Fundamentais?

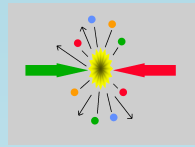
- () Gravidade, eletromagnetismo, forças de van der Waals, atrito, viscosidade, resistência do ar, força normal, etc.
- () Gravidade e eletromagnetismo
- (X) Gravidade, eletromagnetismo, força nuclear forte e fraca



Quais são as Interações Fundamentais?

- () Gravidade, eletromagnetismo, forças de van der Waals, atrito, viscosidade, resistência do ar, força normal, etc.
- () Gravidade e eletromagnetismo
- (X) Gravidade, eletromagnetismo, força nuclear forte e fraca

mas... e as leis de Newton?



Quais são as Interações Fundamentais?

- () Gravidade, eletromagnetismo, forças de van der Waals, atrito, viscosidade, resistência do ar, força normal, etc.
- () Gravidade e eletromagnetismo
- (X) Gravidade, eletromagnetismo, força nuclear forte e fraca

mas... e as leis de Newton?

... forças (interações) vs. mecânica



O que é uma interação?

■ Física clássica

- uma carga elétrica Q gera um **campo elétrico** $\vec{E} \propto Q\hat{r}/r^2$;
- uma segunda carga q está sujeita a uma **força** $\vec{F} = q\vec{E}$;
- o **alcance** é **infinito**.



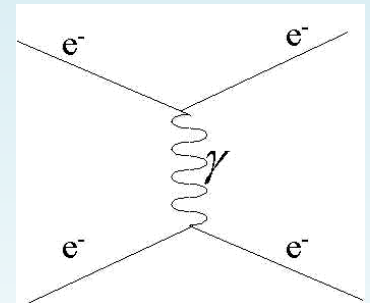
O que é uma interação?

■ Física clássica

- uma carga elétrica Q gera um **campo elétrico** $\vec{E} \propto Q\hat{r}/r^2$;
- uma segunda carga q está sujeita a uma **força** $\vec{F} = q\vec{E}$;
- o **alcance** é **infinito**.

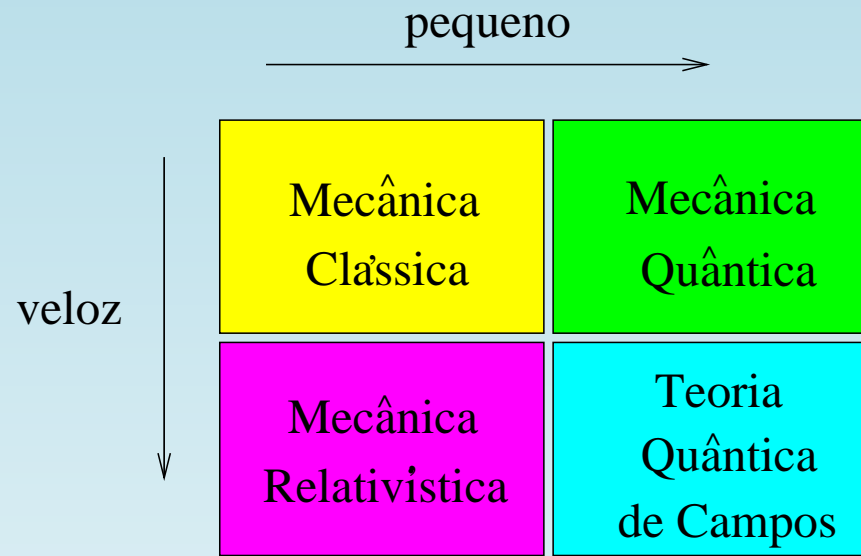
■ Física quântica

- as cargas Q e q trocam **fótons virtuais** (não observáveis), que carregam uma energia ΔE por um intervalo de tempo $\Delta t \lesssim \hbar/\Delta E$;
- sendo que o fóton não possui massa, o alcance r da força é **infinito**: $r = c\Delta t \propto 1/\Delta E$;
- a **força** é dada por
$$F = \Delta p/\Delta t \propto \Delta E/\Delta t \propto 1/r^2.$$





Física de Partículas na Teoria



mecânica **quântica**: estado ψ (probabilístico)

mecânica **relativística**: não há conservação da massa ($E = mc^2$,
partículas de massa zero)

TQC: **anti-partículas**, **spin** (princípio de Pauli), **simetria de gauge**

Partículas elementares são **idênticas** \Rightarrow importância das
simetrias e leis de conservação (números quânticos)



Física de Partículas na Prática

Como **descobrir** a interação entre partículas?

1) espalhamento 2) decaimentos 3) estados ligados

⇒ chutar uma forma de interação e comparar as previsões do modelo com resultados experimentais

Como **produzir** partículas elementares? 1) raios cósmicos

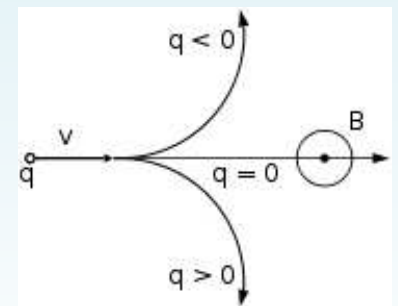
2) reatores nucleares 3) **aceleradores de partículas**

Como **detetar** partículas elementares?

partículas **carregadas** deixam **rastros** em detetores

carga pode ser deduzida de deflexão por campo magnético

momento dado pelo **raio** $R = pc/qB$





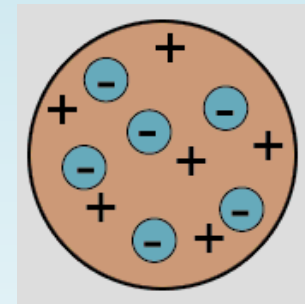
Física de partículas (até 1932)

■ Século XIX:

- toda a matéria é composta por unidades fundamentais, os **átomos** (do grego *ἄτομον*);
- os átomos são esferas de raio $\approx 10^{-8}$ cm = 1 Å .

■ 1897 (J.J. Thomson): descoberta do elétron (e)

- os raios catódicos são feixes de **partículas** com carga elétrica negativa (todas com uma dada razão e/m);
- os átomos são esferas maciças com carga positiva e os elétrons estão presos à superfície da esfera.



■ 1905 (A. Einstein): efeito foto-elétrico e descoberta do fóton (γ)

- cada elétron emitido é o resultado da absorção de um **fóton**;
- os fótons são partículas (sem massa e sem carga elétrica) de energia $E = h\nu$, onde $h \approx 6.6 \times 10^{-34}$ J s é a **constante de Planck**.





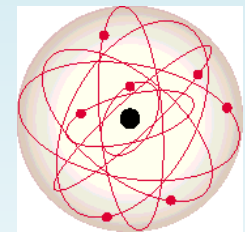
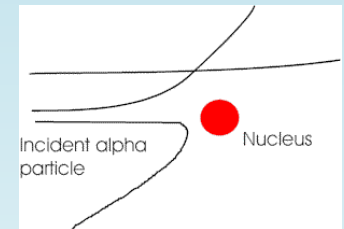
Física de partículas (até 1932)

■ 1909 (R.A. Millikan): valor da carga do elétron (e)

- a carga elétrica é **quantizada**;
- a carga do elétron é $\approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ e sua massa é $\approx 9.1 \times 10^{-28} \text{ g}$.

■ 1911 (E. Rutherford): descoberta do núcleo atômico

- **bombardeando** uma fina lâmina de ouro com partículas α foi observado que cerca de uma em cada 8000 partículas sofria um desvio de mais de 90° ;
- os átomos possuem um núcleo (de carga positiva e raio $\approx 10^{-13} \text{ cm} = 1 \text{ fm}$) em volta do qual orbitam os elétrons (**modelo planetário**).



■ 1913 (J.J. Thomson): descoberta dos isótopos

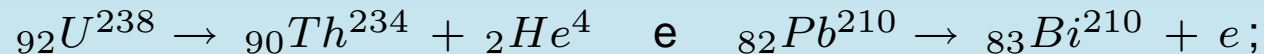
- íons de néon ($m = 20.18 \text{ u.m.a.}$) em um **campo magnético** produzem dois raios correspondentes às massas atômicas 20 e 22;
- indicamos um isótopo S como ${}_Z S^A$, onde A é o **número de massa** (\approx massa em u.m.a.) e Z é o **número atômico** (\propto carga do núcleo).



Física de partículas (até 1932)

■ 1902 (E. Rutherford): transmutação dos elementos químicos

- a **emissão** de partículas α e β acarreta a transmutação de um elemento em outro diferente:



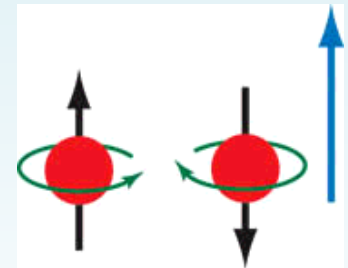
- O número de massa A e o número atômico Z são **conservados**.

■ 1919 (E. Rutherford): descoberta do próton (p)

- o núcleo do átomo de hidrogênio é reconhecido como uma **partícula fundamental**, o próton (do grego $\pi\rho\acute{\omega}\tau\omicron\varsigma$)
- o próton tem carga elétrica positiva ($q = +e$) e massa $\approx 1.67 \cdot 10^{-24}\text{g}$;
- o núcleo é constituído de A prótons e $A - Z$ elétrons.

■ 1925 (S. Goudsmit e G.E. Uhlenbeck): o spin das partículas

- o elétron (e o próton) têm **spin** (momento angular intrínseco) $1/2$ (em unidades de $\hbar = h/2\pi \approx 1.0 \times 10^{-34}\text{J s}$);
- a projeção de um spin $1/2$ em uma dada direção pode ser $\pm 1/2$;
- o núcleo ${}_{7}\text{N}^{14}$ tem spin 1; isto não pode ser explicado considerando 14 prótons e 7 elétrons.





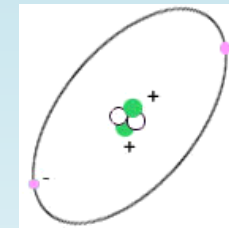
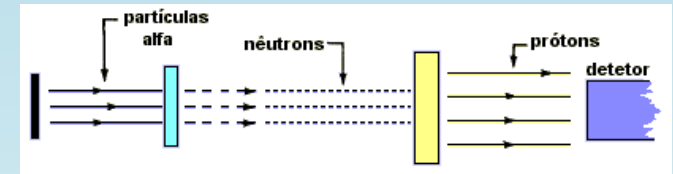
Física de partículas (até 1932)

■ 1932 (J. Chadwick): descoberta do nêutron (n)

■ a partícula emitida na reação

${}_4\text{Be}^9 + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_6\text{C}^{17} + n$ é uma partícula sem carga, com massa ligeiramente maior que a do próton, de spin $1/2$;

■ o **núcleo** do átomo assume sua representação atual (W.K. Heisenberg): conjunto de Z prótons e de $A - Z$ nêutrons.





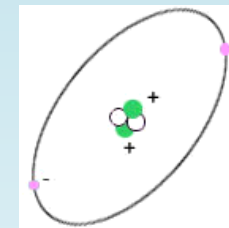
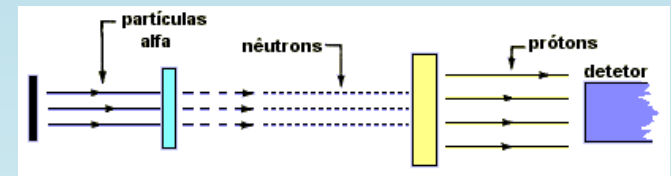
Física de partículas (até 1932)

■ 1932 (J. Chadwick): descoberta do nêutron (n)

■ a partícula emitida na reação

${}_4\text{Be}^9 + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_6\text{C}^{17} + n$ é uma partícula sem carga, com massa ligeiramente maior que a do próton, de spin $1/2$;

■ o núcleo do átomo assume sua representação atual (W.K. Heisenberg): conjunto de Z prótons e de $A - Z$ nêutrons.



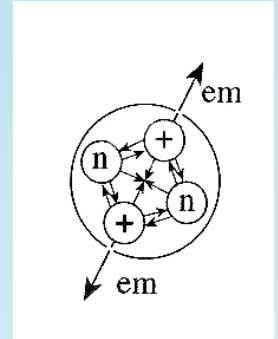
A situação em 1932

Partícula	Massa relativa	Carga relativa	Spin (\hbar)
Próton (p)	1	+1	$1/2$
Nêutron (n)	1	0	$1/2$
Elétron (e)	$\approx 1/1840$	-1	$1/2$
Fóton (γ)	0	0	1



Problemas: o núcleo

- Por que os núcleos são estáveis?
 - os **prótons** dentro de um núcleo se repelem devido à força elétrica;
 - os **nêutrons** não têm carga elétrica; por que eles ficam dentro do núcleo?





Problemas: o núcleo

■ Por que os núcleos são estáveis?

- os **prótons** dentro de um núcleo se repelem devido à força elétrica;
- os **nêutrons** não têm carga elétrica; por que eles ficam dentro do núcleo?

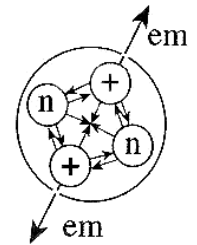


Fig. 9.9 Frank and Ernest discuss some physics problems including how velcro binds neutrons and protons into nuclei.



Problemas: o núcleo

■ O dêuteron $D = {}_1H^2$

- o processo ${}_1H^2 + \gamma \rightarrow p + n$ permite medir a **energia de ligação** entre próton e nêutron;
- sendo $M_p = 1.0071$ u.m.a. , $M_n = 1.0083$ u.m.a. e $M_D = 2.0130$ u.m.a. e usando a relação $E = m c^2$ (onde c é a velocidade da luz no vácuo) obtemos que o fóton deve ter uma energia de pelo menos
 $M_p + M_n - M_D = 0.0024$ u.m.a. = 2.24 MeV



Problemas: o núcleo

■ O dêuteron $D = {}_1H^2$

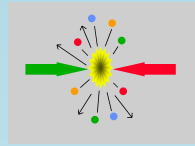
- o processo ${}_1H^2 + \gamma \rightarrow p + n$ permite medir a **energia de ligação** entre próton e nêutron;
- sendo $M_p = 1.0071$ u.m.a. , $M_n = 1.0083$ u.m.a. e $M_D = 2.0130$ u.m.a. e usando a relação $E = m c^2$ (onde c é a velocidade da luz no vácuo) obtemos que o fóton deve ter uma energia de pelo menos $M_p + M_n - M_D = 0.0024$ u.m.a. = 2.24 MeV



■ A força nuclear

- deve existir uma força nuclear que explique a **estabilidade** dos núcleos e sua energia de ligação;
- esta deve ser uma **força atrativa**, bem mais forte que a força elétrica;
- esta força é a mesma entre $n - n$, $n - p$ e $p - p$;
- o **alcance** desta força nuclear é da ordem do raio do núcleo ($1 \text{ fm} = 10^{-13} \text{ cm}$).

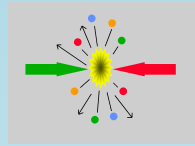




Problemas: o decaimento β

■ Decaimento α

- no decaimento ${}_{60}\text{Nd}^{144} \rightarrow {}_{58}\text{Ce}^{140} + {}_2\text{He}^4$ a energia da partícula α é de 1.8 MeV



Problemas: o decaimento β

■ Decaimento α

- no decaimento ${}_{60}\text{Nd}^{144} \rightarrow {}_{58}\text{Ce}^{140} + {}_2\text{He}^4$ a energia da partícula α é de 1.8 MeV (sempre a mesma!).

Problemas: o decaimento β

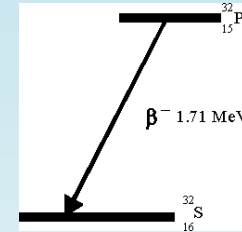


■ Decaimento α

- no decaimento ${}_{60}\text{Nd}^{144} \rightarrow {}_{58}\text{Ce}^{140} + {}_2\text{He}^4$ a energia da partícula α é de 1.8 MeV (**sempre a mesma!**).

■ Decaimento β

- no decaimento ${}_{15}\text{P}^{32} \rightarrow {}_{16}\text{S}^{32} + e^-$ a energia do elétron deveria ser de 1.71 MeV ;
- de fato, a energia do elétron varia de quase zero até 1.71 MeV .





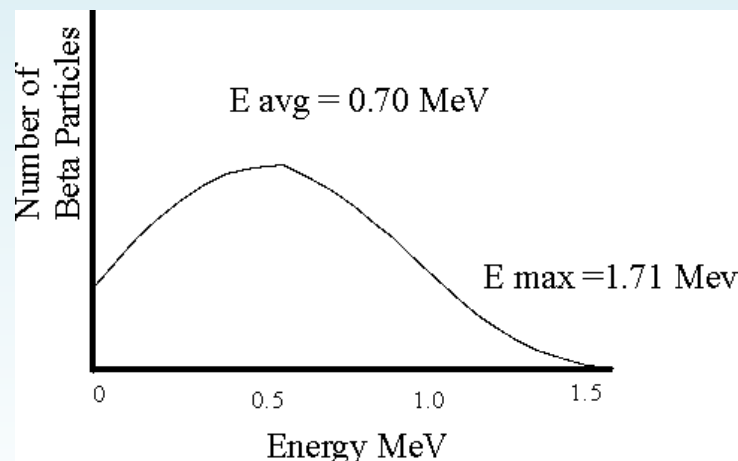
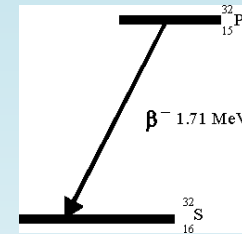
Problemas: o decaimento β

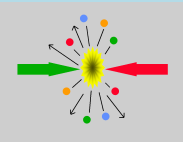
■ Decaimento α

- no decaimento ${}_{60}\text{Nd}^{144} \rightarrow {}_{58}\text{Ce}^{140} + {}_2\text{He}^4$ a energia da partícula α é de 1.8 MeV (sempre a mesma!).

■ Decaimento β

- no decaimento ${}_{15}\text{P}^{32} \rightarrow {}_{16}\text{S}^{32} + e^-$ a energia do elétron deveria ser de 1.71 MeV;
- de fato, a energia do elétron varia de quase zero até 1.71 MeV.

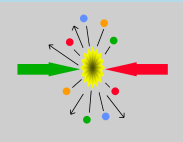




Problemas: o decaimento β

- Problemas:

- a energia e o momento angular total não são conservados no decaimento β .



Problemas: o decaimento β

■ Problemas:

- a **energia** e o **momento angular total** não são conservados no decaimento β .



■ 1931 (W. Pauli): uma nova partícula

- uma nova partícula de carga elétrica zero e spin $1/2$ poderia explicar o espectro do decaimento β e a conservação do momento angular total;
- a massa da nova partícula deveria ser muito pequena ou nula.

Problemas: o decaimento β



■ Problemas:

- a **energia** e o **momento angular total** não são conservados no decaimento β .



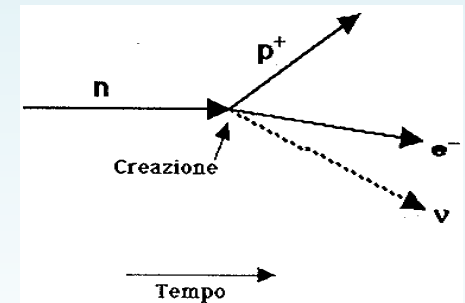
■ 1931 (W. Pauli): uma nova partícula

- uma nova partícula de carga elétrica zero e spin $1/2$ poderia explicar o espectro do decaimento β e a conservação do momento angular total;
- a massa da nova partícula deveria ser muito pequena ou nula.



■ 1934 (E. Fermi): uma nova força

- uma nova força (a força **fraca**) é responsável pelo decaimento β ;
- a partícula de Pauli é chamada **neutrino**.





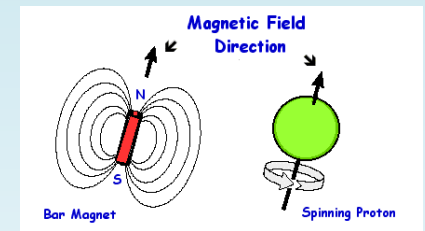
Problemas: o momento magnético

■ O elétron

- o elétron possui, além do spin, um **momento magnético intrínseco** μ_e ;
- o valor de μ_e é $\approx -2.0 \mu_B$, onde $\mu_B = e\hbar/2m_e \approx 5.8 \times 10^{-11} \text{ MeV / T}$.

■ O próton

- o próton também possui um momento magnético μ_p ;
- o valor de μ_p é $\approx 2.79 \mu_N$ onde $\mu_N = e\hbar/2m_p \approx 3.1 \times 10^{-14} \text{ MeV / T}$.



■ O nêutron

- em 1936 foi descoberto que o nêutron (que não tem carga elétrica!) possui um momento magnético intrínseco μ_n ;
- o valor de μ_n é $\approx -1.91 \mu_N$.



Novas partículas: as anti-partículas

■ 1928 (P.A.M. Dirac): Mecânica Quântica Relativística

- a **equação de Dirac**, extensão relativística da equação de Schrödinger, descreve uma partícula de spin $1/2$ (como o elétron);
- o conceito de **spin** aparece naturalmente;
- o **momento magnético** do elétron é previsto igual a $2\mu_B$ (os momentos magnéticos μ_p e μ_e permanecem não entendidos);
- a equação de Dirac prevê a existência de uma partícula com a mesma massa do elétron mas com a carga elétrica do próton.





Novas partículas: as anti-partículas

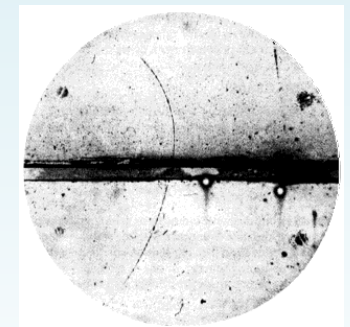
■ 1928 (P.A.M. Dirac): Mecânica Quântica Relativística

- a **equação de Dirac**, extensão relativística da equação de Schrödinger, descreve uma partícula de spin $1/2$ (como o elétron);
- o conceito de **spin** aparece naturalmente;
- o **momento magnético** do elétron é previsto igual a $2\mu_B$ (os momentos magnéticos μ_p e μ_e permanecem não entendidos);
- a equação de Dirac prevê a existência de uma partícula com a mesma massa do elétron mas com a carga elétrica do próton.



■ 1932 (C. Anderson): descoberta do pósitron (e^+)

- usando **raios cósmicos** foi detectada (em uma câmara de nuvens) uma partícula de carga positiva;
- usando um **campo magnético** foi possível calcular a razão q/m e determinar o sinal da carga elétrica;
- a partícula era um **anti-elétron** (ou **pósitron**).





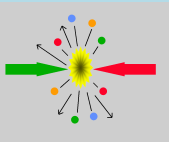
A situação em 1934

Partícula	Massa relativa	Carga relativa	Spin (\hbar)
Próton (p)	1	+1	1/2
Nêutron (n)	1	0	1/2
Elétron (e)	$\approx 1/1840$	-1	1/2
Fóton (γ)	0	0	1
Pósitron (e^+)	$\approx 1/1840$	+1	1/2
Neutrino (ν)	≈ 0	0	1/2



A força nuclear

- 1935 (H. Yukawa): uma nova partícula mediadora
 - consideramos que uma **partícula de massa** m seja trocada entre prótons e nêutrons; a energia mínima desta partícula é $E = m c^2$;
 - o **alcance** da força é dado por $r = c \Delta t \approx \hbar c / \Delta E$;
em unidades $\hbar = c = 1$ obtemos $r \approx 1/m$;
 - sendo $r \approx 1 \text{ fm}$ obtemos $m \approx 200 \text{ MeV}$.



A força nuclear

- 1935 (H. Yukawa): uma nova partícula mediadora
 - consideramos que uma **partícula de massa** m seja trocada entre prótons e nêutrons; a energia mínima desta partícula é $E = m c^2$;
 - o **alcance** da força é dado por $r = c \Delta t \approx \hbar c / \Delta E$;
em unidades $\hbar = c = 1$ obtemos $r \approx 1/m$;
 - sendo $r \approx 1 \text{ fm}$ obtemos $m \approx 200 \text{ MeV}$.
- **Mais partículas**
 - em 1947, Lattes, Powell e Occhialini descobriram a partícula de Yukawa: o méson- π , ou **píon** ($m \approx 139.6 \text{ MeV}$);
 - o píon decai rapidamente em partículas mais leves, como o méson- μ , ou **múon**.



Píons e múons

Partícula	Massa (MeV)	Q	Spin (\hbar)	τ (s)	decaimento
π^+	139.6	1	0	2.6×10^{-8}	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
π^-	139.6	-1	0	2.6×10^{-8}	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
π^0	135.0	0	0	0.8×10^{-16}	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
μ^+	105.66	1	1/2	2.2×10^{-6}	$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
μ^-	105.66	-1	1/2	2.2×10^{-6}	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$



Píons e múons

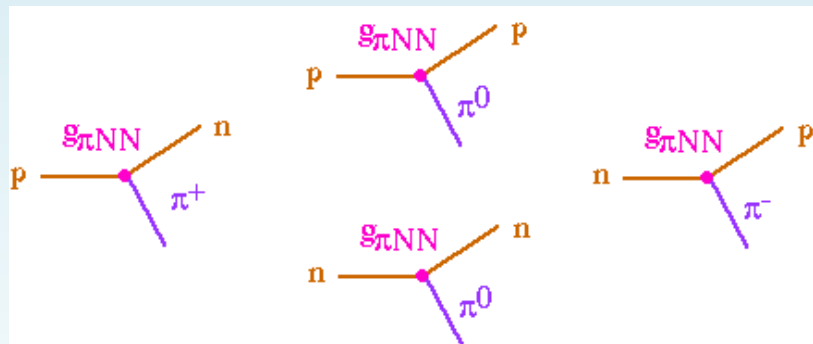
Partícula	Massa (MeV)	Q	Spin (\hbar)	τ (s)	decaimento
π^+	139.6	1	0	2.6×10^{-8}	$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$
π^-	139.6	-1	0	2.6×10^{-8}	$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$
π^0	135.0	0	0	0.8×10^{-16}	$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$
μ^+	105.66	1	1/2	2.2×10^{-6}	$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
μ^-	105.66	-1	1/2	2.2×10^{-6}	$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$

Píons e núcleons

- prótons e nêutrons trocam píons

- pode acontecer que
 $p \leftrightarrow n + \pi^+$

- também podemos ter
 $n \leftrightarrow p + \pi^-$

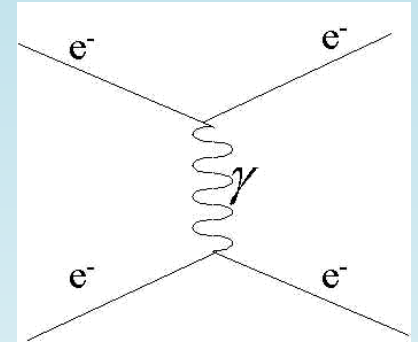


Problema: a constante de acoplamento



■ Intensidade da interação: o caso do E.M.

- no E.M. a quantidade $\alpha = e^2/(4\pi\hbar c)$ não tem dimensão física e $\alpha \approx 1/137$;
- em um **diagrama de Feynman** cada **vértice** contribui com um fator $\sqrt{\alpha}$ para a amplitude do processo \rightarrow um fator α para a probabilidade;
- exemplo: no espalhamento Rutherford a troca de um fóton virtual (2 vértices) contribui com $\alpha^2 \sim e^4$ para a probabilidade (**seção de choque**);
- é possível fazer uma expansão em potências de α (**teoria de perturbação**).

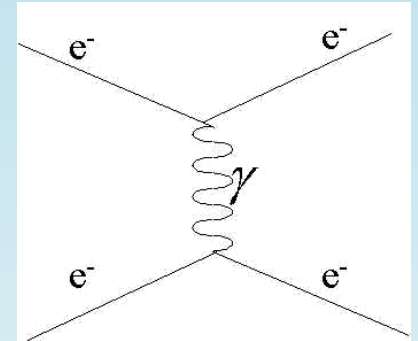


Problema: a constante de acoplamento



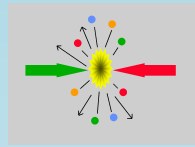
■ Intensidade da interação: o caso do E.M.

- no E.M. a quantidade $\alpha = e^2/(4\pi\hbar c)$ não tem dimensão física e $\alpha \approx 1/137$;
- em um **diagrama de Feynman** cada **vértice** contribui com um fator $\sqrt{\alpha}$ para a amplitude do processo \rightarrow um fator α para a probabilidade;
- exemplo: no espalhamento Rutherford a troca de um fóton virtual (2 vértices) contribui com $\alpha^2 \sim e^4$ para a probabilidade (**seção de choque**);
- é possível fazer uma expansão em potências de α (**teoria de perturbação**).



■ Intensidade da interação: o caso πNN

- $g_{\pi NN}$ também não tem dimensão física e $\alpha_s = g_{\pi NN}^2/(4\pi)$ é ~ 1 (depende do processo);
- a teoria de perturbação apresenta problemas!



Proliferação das partículas

Novas partículas (e anti-partículas) foram descobertas no anos cinquenta e sessenta:

- **mésons** ($K^\pm, \eta^0, K^0, \bar{K}^0$) de massa entre a do pión e a do próton;
- **híperons** ($\Lambda^0, \Sigma^{\pm 0}, \Xi^{0-}, \Omega^-$) de massa um pouco maior do que a massa do próton.



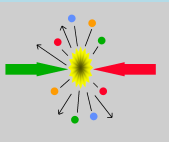
Proliferação das partículas

Novas partículas (e anti-partículas) foram descobertas no anos cinquenta e sessenta:

- **mésons** ($K^\pm, \eta^0, K^0, \bar{K}^0$) de massa entre a do pión e a do próton;
- **híperons** ($\Lambda^0, \Sigma^{\pm 0}, \Xi^{0-}, \Omega^-$) de massa um pouco maior do que a massa do próton.

1953 (M. Gell-Mann e K.Nishijima): um novo número quântico

- A é o **número bariônico**: $A = 1$ para os bárions, -1 para os anti-bárions e 0 para os mésons;
- o **isospin** $I = (n - 1)/2$, onde n é o número de partículas do mesmo “tipo”:
 $I = 1/2$ para p e n , $I = 0$ para Λ^0, Ω^- , etc. ;
- S é a **estranheza**: $S = 0$ para p, n e η^0 , $S \neq 0$ para os híperons e os káons;
- a carga elétrica de cada partícula é dada por $Q = I_3 + (A + S)\frac{1}{2}$;
- a estranheza S é **conservada** na produção de híperons e káons (colisão de prótons e píons);
- a estranheza S **não é conservada** no decaimento (relativamente lento) de híperons e káons.

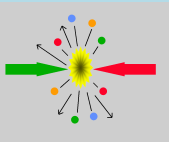


1964 (Gell-Mann e Zweig): o modelo de quarks

- todos os hádrons são compostos de 3 partículas (mais as anti-partículas correspondentes);
- as novas partículas foram chamadas de **quarks**

Three quarks for Muster Mark!

Finnegans Wake by James Joyce



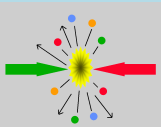
1964 (Gell-Mann e Zweig): o modelo de quarks

- todos os hádrons são compostos de 3 partículas (mais as anti-partículas correspondentes);
- as novas partículas foram chamadas de **quarks**

Three quarks for Muster Mark!

Finnegans Wake by James Joyce

- cada **méson** é um par quark-anti-quark;
- cada **bárion** consiste de três quarks;
- os 3 quarks são: **up** (u), **down** (d) e **strange** (s);
- os quarks têm spin $1/2$.



1964 (Gell-Mann e Zweig): o modelo de quarks

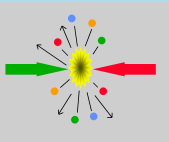
- todos os hádrons são compostos de 3 partículas (mais as anti-partículas correspondentes);
- as novas partículas foram chamadas de **quarks**

Three quarks for Muster Mark!

Finnegans Wake by James Joyce

- cada **méson** é um par quark-anti-quark;
- cada **bárion** consiste de três quarks;
- os 3 quarks são: **up** (u), **down** (d) e **strange** (s);
- os quarks têm spin $1/2$.

Quark	Carga relativa	A	I	S
u	$2/3$	$1/3$	$1/2$	0
d	$-1/3$	$1/3$	$1/2$	0
s	$-1/3$	$1/3$	0	-1



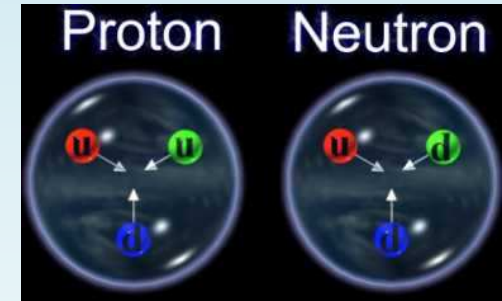
O modelo de quarks

■ Hádrons

- cada **méson** é um par quark-anti-quark;
- cada **bárion** consiste de três quarks;
- os 3 quarks são: **up** (u), **down** (d) e **strange** (s);
- os quarks têm spin $1/2$.

■ Próton e nêutron

- o **próton** consiste de 2 quarks u e um quark d :
a carga elétrica total é
 $2 \times 2/3 + 1 \times (-1/3) = +1$;
- o **nêutron** consiste de 2 quarks d e um quark u :
a carga elétrica total é $2 \times (-1/3) + 1 \times 2/3 = 0$.



■ O momento magnético

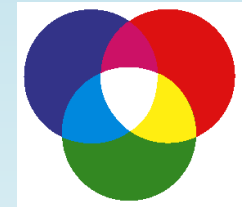
- a razão μ_n/μ_p é ≈ -0.685 ;
- a razão prevista pelo modelo de quarks é -0.667 .



Quarks: evidências experimentais

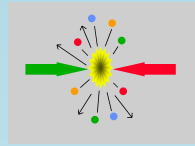
■ Três cores

- a partícula Δ^{++} é constituída de 3 quarks u e tem spin $3/2$;
- a configuração $\Delta^{++} = u \uparrow u \uparrow u \uparrow$ viola o **princípio de Pauli**;
- solução: cada quark tem um novo número quântico, a **carga de cor**;
- existem **3 cores** (vermelho, verde, azul) e 3 anti-cores (amarelo, magenta, ciano).



■ Três cores e carga elétrica fracionária

- a razão $R = \frac{\sigma(e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{hádrons})}{\sigma(e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-)}$ é proporcional a $N_c \sum_f q_f^2$;
- com uma energia de 10 GeV no centro de massa podemos produzir os quarks up, down, strange, charm e bottom e R é proporcional a $3 \left[2 \left(\frac{2}{3} \right)^2 + 3 \left(\frac{1}{3} \right)^2 \right] = 11/3$, de acordo com os experimentos.



Problema: quarks livres

- Por que nunca foi observada uma carga elétrica fracionária?



Problema: quarks livres

- Por que nunca foi observada uma carga elétrica fracionária?
- **Resposta:** os quarks estão **confinados** dentro dos hádrons!





Problema: quarks livres







- Por que nunca foi observada uma carga elétrica fracionária?
- **Resposta:** os quarks estão **confinados** dentro dos hádrons!

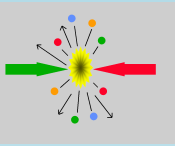


- **Confinamento:** é necessária uma **energia infinita** para separar os quarks que constituem uma dada partícula.



Mais quarks

$\left(\frac{2}{3}\right)$ up 	$\left(\frac{2}{3}\right)$ charm 	$\left(\frac{2}{3}\right)$ top 
 down $\left(-\frac{1}{3}\right)$	 strange $\left(-\frac{1}{3}\right)$	 bottom $\left(-\frac{1}{3}\right)$



Um potencial confinante

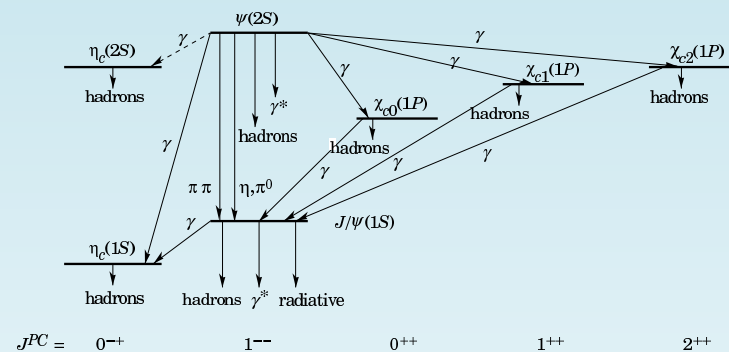
Podemos estudar o **espectro** das partículas $c\bar{c}$ e $b\bar{b}$ usando a equação (não-relativística) de Schrödinger

$$H\psi = \left[2m + \frac{p^2}{m} + V(x) \right] \psi = E\psi .$$

Com o **potencial** (E. Eichten et al., 1978)

$$V_{C+l}(r) = -\frac{4}{3} \frac{g^2}{r} + \sigma r$$

e usando os parâmetros $g^2 = 0.39$, $\sigma = 0.18 \text{ GeV}^2$, $m_c = 1.84 \text{ GeV}$ e $m_b = 5.17 \text{ GeV}$ é possível descrever razoavelmente bem as partículas observadas.





As massas dos hádrons

- A partícula J/ψ (estado ligado $c\bar{c}$) tem massa ≈ 3.1 GeV



As massas dos hádrons

- A partícula J/ψ (estado ligado $c\bar{c}$) tem massa ≈ 3.1 GeV
- A massa do quark c é $\approx 1.15 - 1.35$ GeV



As massas dos hádrons

- A partícula J/ψ (estado ligado $c\bar{c}$) tem massa ≈ 3.1 GeV
- A massa do quark c é $\approx 1.15 - 1.35$ GeV
- A massa do próton (estado ligado uud) é ≈ 0.938 GeV



As massas dos hádrons

- A partícula J/ψ (estado ligado $c\bar{c}$) tem massa ≈ 3.1 GeV
- A massa do quark c é $\approx 1.15 - 1.35$ GeV
- A massa do próton (estado ligado uud) é ≈ 0.938 GeV
- Considerando a massa dos quarks u e d temos
 $2m_u + m_d \approx 10$ MeV !



As massas dos hádrons

- A partícula J/ψ (estado ligado $c\bar{c}$) tem massa ≈ 3.1 GeV
- A massa do quark c é $\approx 1.15 - 1.35$ GeV
- A massa do próton (estado ligado uud) é ≈ 0.938 GeV
- Considerando a massa dos quarks u e d temos
 $2m_u + m_d \approx 10 \text{ MeV} !$

\Rightarrow de onde vem a **massa** dos núcleons (i.e. a **massa do universo**)!??



Liberdade assintótica

- A seção de choque do **espalhamento inelástico profundo** pode ser explicada imaginando que o próton seja constituído de **partículas livres** (R.P. Feynman, 1969) (pártons \rightarrow quarks).



Liberdade assintótica

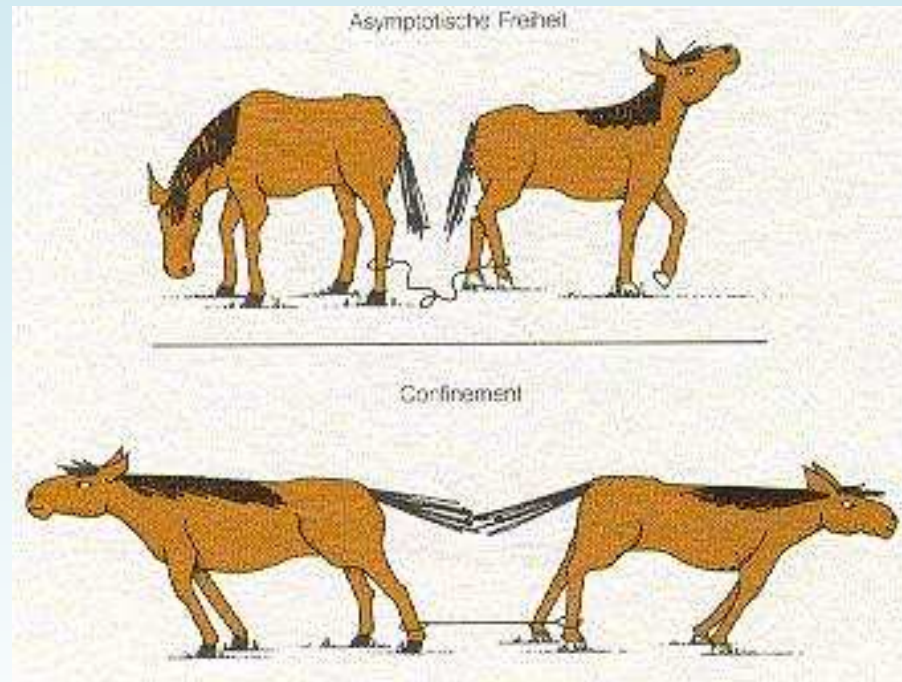
- A seção de choque do **espalhamento inelástico profundo** pode ser explicada imaginando que o próton seja constituído de **partículas livres** (R.P. Feynman, 1969) (pártons \rightarrow quarks).
- **D.J. Gross, H.D. Politzer e F. Wilczek** ganharam o **prêmio Nobel de Física de 2004**:

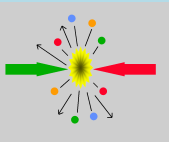
“for the discovery of asymptotic freedom
in the theory of the strong interaction”



Liberdade assintótica e confinamento

A altas energias (pequenas distâncias), quarks se comportam como **partículas livres**, mas a grandes distâncias a **força** torna-se **constante** e seria necessária uma energia infinita para separar dois quarks.





Um outro potencial confinante

Um outro potencial que permite reproduzir o espectro dos mésons $c\bar{c}$ e $b\bar{b}$ é o potencial (J.L. Richardson, 1979)

$$V_R(r) = -\frac{4}{3} \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \exp(ip \cdot r) \frac{\alpha_s(p)}{p^2}, \quad \alpha_s(p) = [b_0 \log(1 + p^2/\Lambda^2)]^{-1}$$

onde $b_0 = 33 - 2N_f/12\pi$. Para $p^2 \ll \Lambda^2$ (r grande) achamos

$$\alpha_s(p) \sim [b_0 p^2/\Lambda^2]^{-1}, \quad V_R(r) \sim \int \frac{d^3p}{p^4} e^{ip \cdot r} \sim r$$

enquanto no limite $p^2 \gg \Lambda^2$ (r pequeno) obtemos

$$\alpha_s(p) = [b_0 \log(p^2/\Lambda^2)]^{-1}, \quad V_R(r) \sim \int \frac{d^3p e^{ip \cdot r}}{p^2 \log(p^2/\Lambda^2)} \sim \frac{g^2(r)}{r}.$$



Um outro potencial confinante

Um outro potencial que permite reproduzir o espectro dos mésons $c\bar{c}$ e $b\bar{b}$ é o potencial (J.L. Richardson, 1979)

$$V_R(r) = -\frac{4}{3} \int \frac{d^3p}{(2\pi)^3} \exp(ip \cdot r) \frac{\alpha_s(p)}{p^2}, \quad \alpha_s(p) = [b_0 \log(1 + p^2/\Lambda^2)]^{-1}$$

onde $b_0 = 33 - 2N_f/12\pi$. Para $p^2 \ll \Lambda^2$ (r grande) achamos

$$\alpha_s(p) \sim [b_0 p^2/\Lambda^2]^{-1}, \quad V_R(r) \sim \int \frac{d^3p}{p^4} e^{ip \cdot r} \sim r$$

enquanto no limite $p^2 \gg \Lambda^2$ (r pequeno) obtemos

$$\alpha_s(p) = [b_0 \log(p^2/\Lambda^2)]^{-1}, \quad V_R(r) \sim \int \frac{d^3p e^{ip \cdot r}}{p^2 \log(p^2/\Lambda^2)} \sim \frac{g^2(r)}{r}.$$

**A intensidade da interação α_s torna-se menor
para r pequeno !**



Cromodinâmica Quântica (QCD)

A **força forte** entre os quarks é devida à **carga de cor**. A partícula mediadora é chamada de **glúon**.

A teoria matemática que descreve a interação forte é chamada **Cromodinâmica Quântica** (QCD). A QCD é descrita pela **Lagrangiana**

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F_a^{\mu\nu} + \sum_{f=1}^6 \bar{\psi}_f (i \gamma^\mu D_\mu - m_f) \psi_f$$

$$F_{\mu\nu}^a \equiv \partial_\mu A_\nu^a - \partial_\nu A_\mu^a + g_0 f_{abc} A_\mu^b A_\nu^c$$

$$D_\mu \equiv \partial_\mu - i g_0 A_\mu^a T_a$$

Esta Lagrangiana é **invariante** por **transformações locais** de **gauge**:

$$A_\mu^\Omega(x) = \Omega(x) A_\mu(x) \Omega^{-1}(x) - \frac{i}{g_0} [\partial_\mu \Omega(x)] \Omega^{-1}(x)$$

$$\psi_f^\Omega(x) = \Omega(x) \psi_f(x)$$

onde $\Omega(x) = \exp[-i g_0 \Lambda^a(x) T_a] \in SU(3)$.

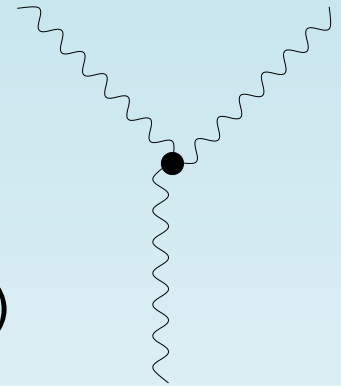


A interação forte

A Lagrangiana da QCD é semelhante à da QED mas além de termos **quadráticos** nos campos de glúon e de quarks (propagadores) aparecem termos com três e quatro campos de gauge:

$$\mathcal{L}_{AAA} = g_0 f_{abc} A_a^\mu A_b^\nu \partial_\mu A_\nu^c \quad (\text{vértice de três glúons})$$

$$\mathcal{L}_{\bar{\psi}\psi A} = g_0 \bar{\psi} \gamma^\mu A_\mu \psi \quad (\text{vértice de quark-quark-glúon})$$



Os **vértices** com 3 e 4 partículas mediadoras (glúons) estão presentes somente nas teorias de gauge **não-abelianas**.

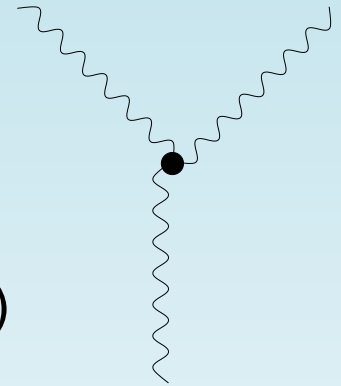


A interação forte

A Lagrangiana da QCD é semelhante à da QED mas além de termos **quadráticos** nos campos de glúon e de quarks (propagadores) aparecem termos com três e quatro campos de gauge:

$$\mathcal{L}_{AAA} = g_0 f_{abc} A_a^\mu A_b^\nu \partial_\mu A_\nu^c \quad (\text{vértice de três glúons})$$

$$\mathcal{L}_{\bar{\psi}\psi A} = g_0 \bar{\psi} \gamma^\mu A_\mu \psi \quad (\text{vértice de quark-quark-glúon})$$



Os **vértices** com 3 e 4 partículas mediadoras (glúons) estão presentes somente nas teorias de gauge **não-abelianas**.



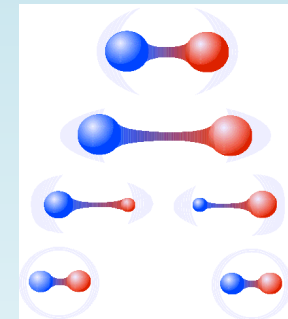
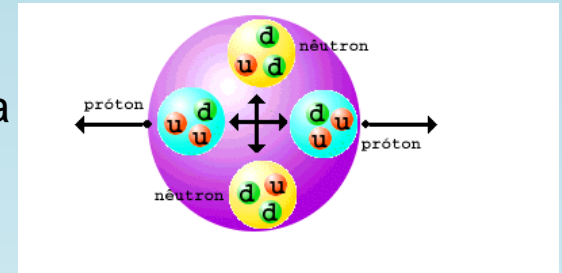
Os **glúons** também têm carga de cor e **interagem entre eles!** \implies
Efeitos não-lineares!



Quarks e hádrons

Usando a QCD deveria ser possível:

- obter um potencial $q \bar{q}$ linear (**potencial de corda**) para r grande;
- explicar por que os hádrons contêm 2 ou 3 quarks/anti-quarks;
- prever o **confinamento** dos quarks;
- explicar a **força nuclear** (entre partículas sem carga de cor) como uma **interação residual** da força forte;
- prever a **quebra da corda**.

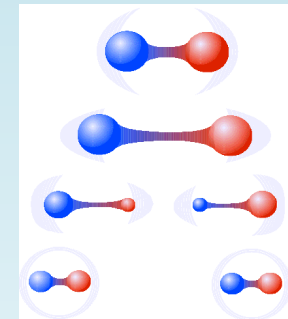
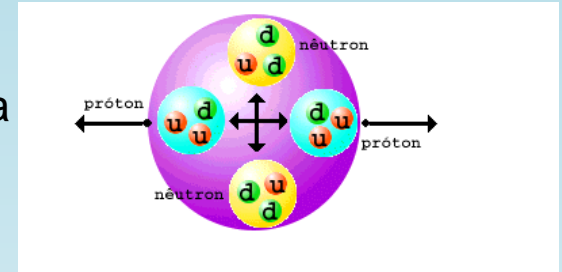




Quarks e hádrons

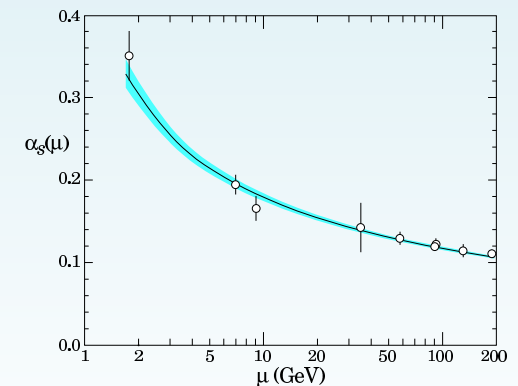
Usando a QCD deveria ser possível:

- obter um potencial $q \bar{q}$ linear (**potencial de corda**) para r grande;
- explicar por que os hádrons contêm 2 ou 3 quarks/anti-quarks;
- prever o **confinamento** dos quarks;
- explicar a **força nuclear** (entre partículas sem carga de cor) como uma **interação residual** da força forte;
- prever a **quebra da corda**.



Como fazer as contas?

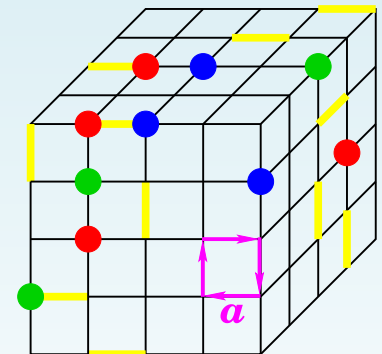
- A intensidade da interação α_s torna-se maior para r grande (p pequeno) e vice-versa (**liberdade assintótica**).
- A **teoria de perturbação** apresenta problemas no limite de baixas energias.





QCD na rede

- K. Wilson (1974); demonstrou **confinamento** no limite de acoplamento forte
- Quantização usando **integrais de trajetória** \implies soma sobre as configurações com peso $e^{iS/\hbar}$
- **Formulação Euclidiana** (continuação analítica para variável temporal imaginária) \implies peso $e^{-S/\hbar}$
- Introdução da **rede discreta para o espaço-tempo** \implies corte para **grandes momentos** $1/a$ (ultra-violeta) \implies regularização da teoria
- Redes de **tamanho finito** \implies corte para **pequenos momentos** $1/L$ (infra-vermelho)





Modelo de mecânica estatística clássica

- Consideremos uma partícula de massa $m = m_{rede}/a$.
- No limite do contínuo ($a \rightarrow 0$) $\implies m_{rede} \rightarrow 0$.
- No mesmo limite o comprimento de correlação $\xi_{rede} = 1/m_{rede} \rightarrow \infty$.
- O limite do contínuo corresponde ao ponto crítico da teoria de rede.

Métodos de Monte Carlo:

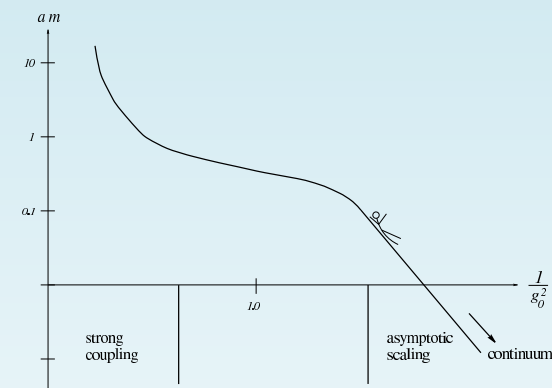
simulações sem quarks (quenched QCD) e com quarks (full QCD \sim 100 vezes mais pesadas) \implies super-computadores.





De volta ao espaço contínuo

- Limite termodinâmico (volume $V = N^d$ infinito).
- Limite do contínuo ($a \rightarrow 0$).
 - $N \rightarrow \infty$ para ter $L = aN$ (medido em fm) fixo e $N > \xi_{rede}$;
 - grupo de renor. $\implies \log(\xi_{rede}) \sim 1/g_0^2 \sim \beta$; isso implica $g_0 \rightarrow 0$, $\beta \rightarrow \infty$ e $\xi_{rede} \sim e^\beta$ (lei de escala assintótica), i.e. $\xi = 1/m \sim a e^\beta$;
 - elimina e^β calculando razão de duas massas (lei de escala) ou fixa o espaçamento de rede a usando um input experimental (renormalização).
- Limite quiral (m_q pequenas).





Partículas na rede

O comprimento de onda de Compton de uma partícula é dado por

$$\lambda = \frac{h}{m c} = \frac{1.2 \text{ GeV fm}}{m (\text{GeV})}$$

Para estudar uma partícula usando o formalismo de rede devem ser satisfeitas as desigualdades

$$a \ll \lambda \ll L = Na$$





Partículas na rede

O comprimento de onda de Compton de uma partícula é dado por

$$\lambda = \frac{h}{m c} = \frac{1.2 \text{ GeV fm}}{m (\text{GeV})}$$

Para estudar uma partícula usando o formalismo de rede devem ser satisfeitas as desigualdades

$$a \ll \lambda \ll L = Na$$



Exemplo: estudo do pión e do quark b

$$m_\pi \approx 140 \text{ MeV} \longrightarrow \lambda_\pi \approx 8.5 \text{ fm}$$

$$m_b \approx 5 \text{ GeV} \longrightarrow \lambda_b \approx 0.24 \text{ fm}$$

$$a \ll \lambda_b \ll \lambda_\pi \ll Na$$

\Rightarrow

$$a \approx 0.06 \text{ fm} \quad \text{e} \quad L \approx 34 \text{ fm}$$

Redes de tamanho $\sim 560^4$!

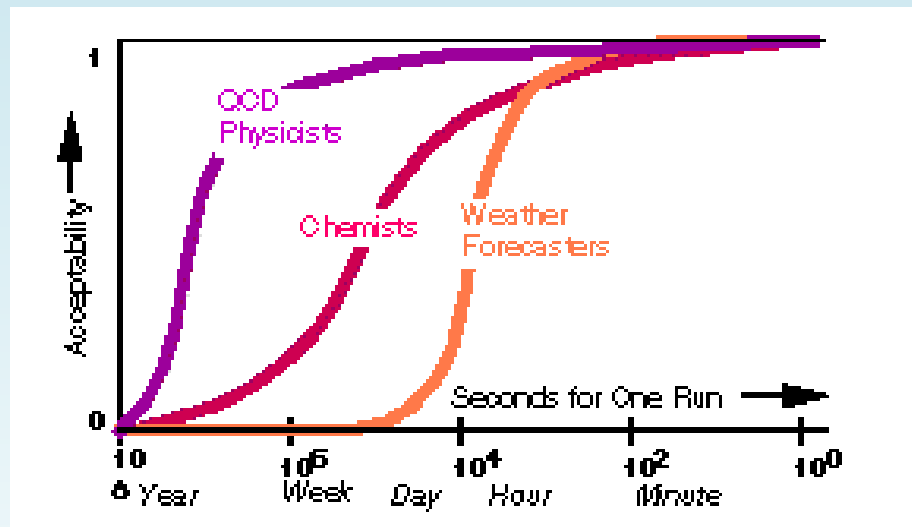




Problemas-Desafio da Supercomputação

Estudo do [Scalable Computing Laboratory](#), Universidade do Estado do Iowa (2001): “A Paradigm For Grand Challenge Performance Evaluation”

Aceitabilidade de tempo de simulação por cultura científica



“QCD physicists have an extraordinary tolerance for execution times that take a significant fraction of a human lifetime”



Super-computadores para o estudo da QCD

Século passado: **APE100** (100 Gflops, Europa);
QCDSP (400–600 Gflops, EUA); **CP-PACS** (600
Gflops, Japão); **APEmille** (~ 1 Tflops, Europa)





Super-computadores para o estudo da QCD

Século passado: **APE100** (100 Gflops, Europa);
QCDSP (400–600 Gflops, EUA); **CP-PACS** (600
Gflops, Japão); **APEmille** (~ 1 Tflops, Europa)



Novos supercomp. dedicados dos anos 2000
(~ 10 Tflops): **QCDOC** (EUA), **apeNEXT** (Europa);
No Japão: (parte do) **Earth Simulator** (40 Tflops);
SciDAC, EUA estabelece **requisitos** de cerca de
40 Teraflops para resolver a QCD



Super-computadores para o estudo da QCD

Século passado: **APE100** (100 Gflops, Europa);
QCDSP (400–600 Gflops, EUA); **CP-PACS** (600
Gflops, Japão); **APEmille** (~ 1 Tflops, Europa)



Novos supercomp. dedicados dos anos 2000
(~ 10 Tflops): **QCDOC** (EUA), **apeNEXT** (Europa);
No Japão: (parte do) **Earth Simulator** (40 Tflops);
SciDAC, EUA estabelece **requisitos** de cerca de
40 Teraflops para resolver a QCD

Clusters de PC atuais (milhares de nós): **Blue Gene/L**
(**IBM**) no Lawrence Livermore National Laboratory na
Califórnia, EUA (478 Tflops); **Blue Gene/P** (**IBM**) em
Jülich, Alemanha (167 Tflops)





Super-computadores para o estudo da QCD

Século passado: **APE100** (100 Gflops, Europa);
QCDSP (400–600 Gflops, EUA); **CP-PACS** (600
Gflops, Japão); **APEmille** (~ 1 Tflops, Europa)



Novos supercomp. dedicados dos anos 2000
(~ 10 Tflops): **QCDOC** (EUA), **apeNEXT** (Europa);
No Japão: (parte do) **Earth Simulator** (40 Tflops);
SciDAC, EUA estabelece **requisitos** de cerca de
40 Teraflops para resolver a QCD

Clusters de PC atuais (milhares de nós): **Blue Gene/L**
(**IBM**) no Lawrence Livermore National Laboratory na
Califórnia, EUA (478 Tflops); **Blue Gene/P** (**IBM**) em
Jülich, Alemanha (167 Tflops)



Projeto **QPACE** (Universidades Europeias + IBM): supercomputador
paralelo para QCD na rede, escalável, processadores PowerXCell 8i.



Recursos Locais

IFSC–USP: **21+23+29 Gflops** (peak), 4+8+12 GB de memória

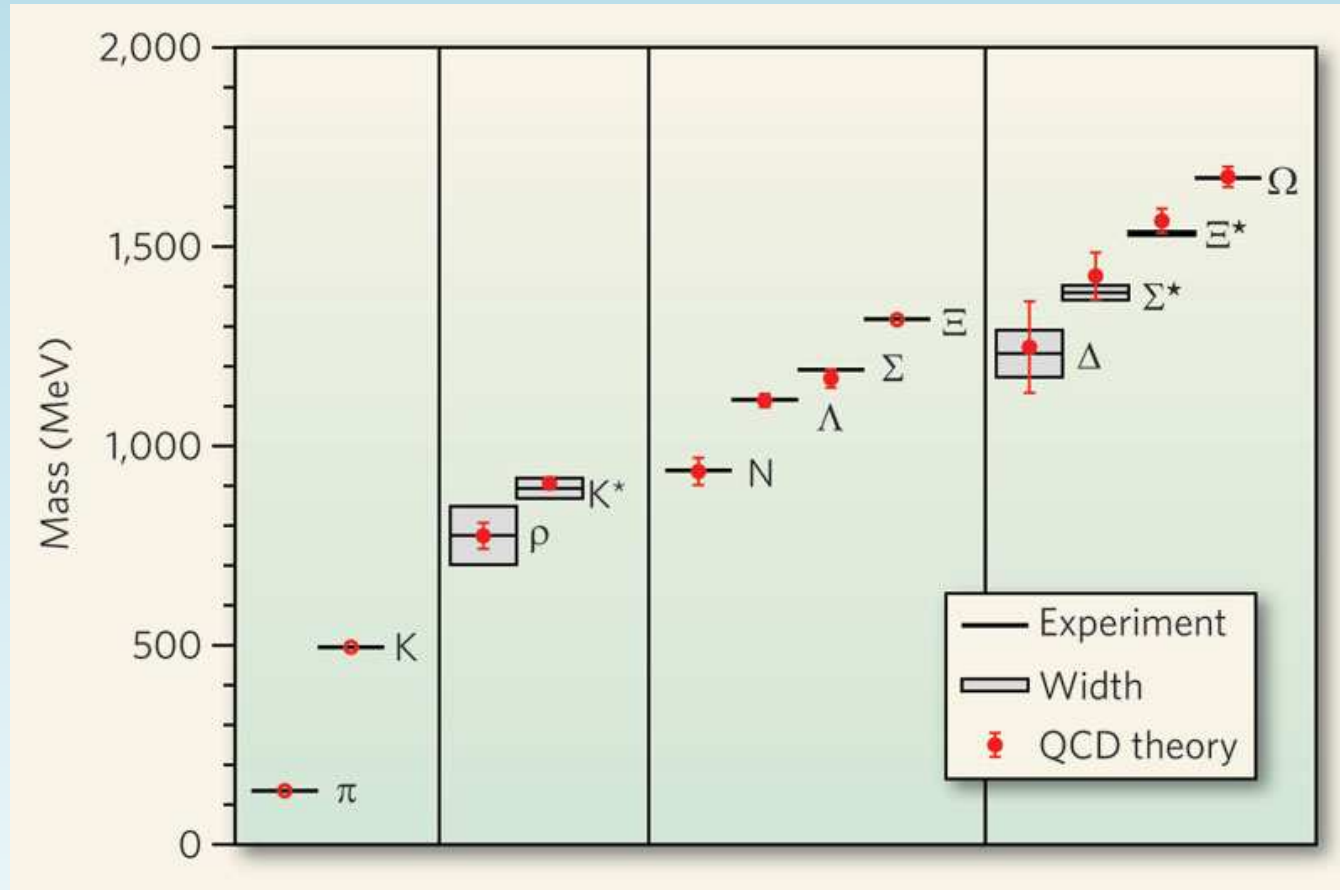
- **Cluster 1:** 16 nós e 1 servidor com **866MHz Pentium III** e 256/512 MB RAM (133 MHz), 4 nós com **1.7GHz Pentium IV** e 256 MB RAM (266 MHz), rede full duplex de **100 Mbps**
- **Cluster 2:** 4 nós **2.8GHz Pentium IV** e 1 GB RAM (400 MHz), 4 nós **3.0GHz Pentium IV** e 1 GB RAM (400 MHz), duas redes full duplex de **100 Mbps**
- **Cluster 3:** 8 nós **3.6GHz Pentium IV** e 1.5 GB RAM (400 MHz), redes full duplex de **1 Gbps**



Supercomputador IBM na **USP**: 112 blades com 2 CPU's dual-core PowerPC 970 de 2.5GHz, rede Myrinet, cerca de **4.5 Tflops peak**, **posição 363** no *TOP500* (Novembro de 2006)



Resultados da QCD na rede: espectro



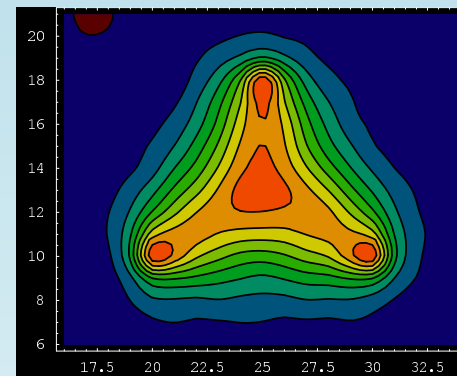
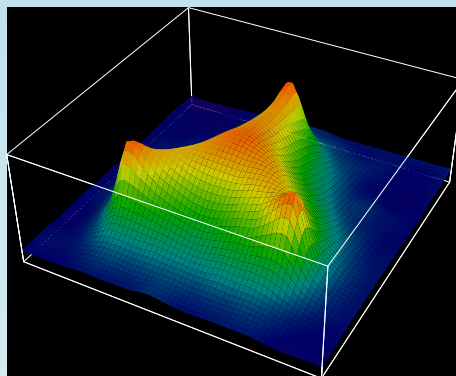
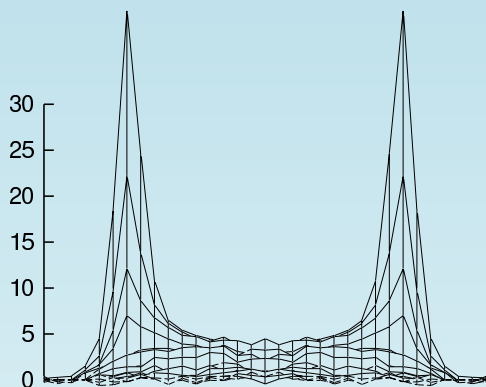
Massas dos hádrons leves obtidas por [S. Dürr et al. \(Science, 2008\)](#) vs. valores experimentais. **Note:** π , K , Ξ como inputs.

Citado por [F. Wilczek](#) em *Nature* 456, 449 (27 Novembro 2008).

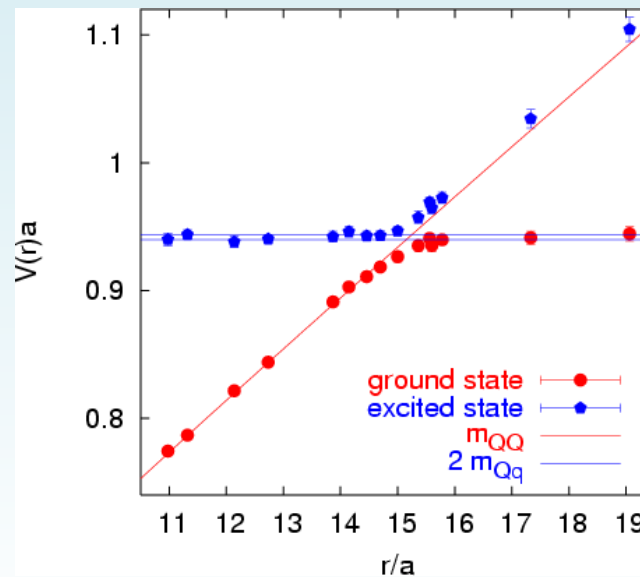
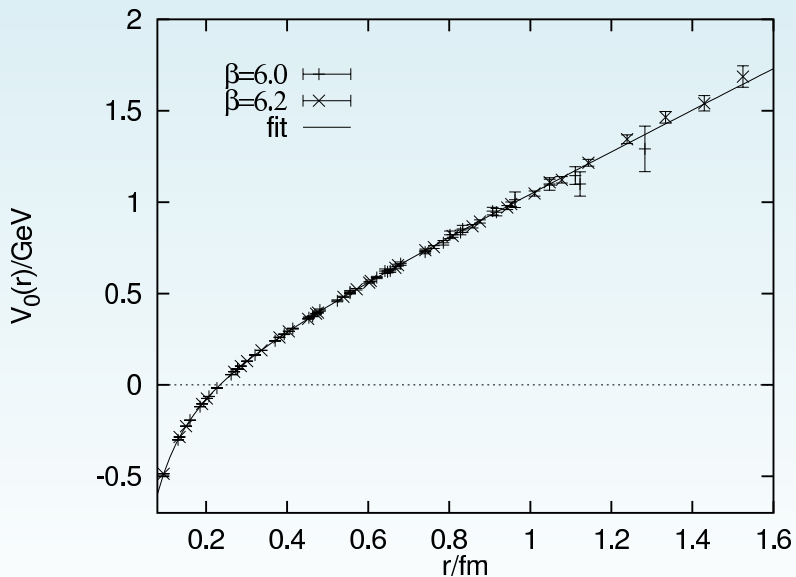


QCD na rede: confinamento

Pode-se observar a formação de **tubos de fluxo**



Crescimento linear do potencial entre quarks, **quebra da corda**





Forças e partículas elementares

Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2			Quarks spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge	Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	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

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of \hbar , which is the quantum unit of angular momentum, where $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. Masses are given in GeV/c^2 (remember $E = mc^2$), where $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$. The mass of the proton is $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

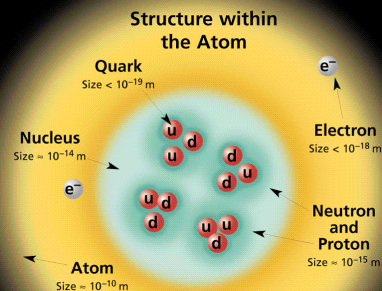
Unified Electroweak spin = 1			Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge	Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0	g gluon	0	0
W^-	80.4	-1	Color Charge		
W^+	80.4	+1	Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and W and Z bosons have no strong interactions and hence no color charge.		
Z^0	91.187	0	Quarks Confined in Mesons and Baryons		

Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called hadrons. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq .

Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Property	Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Fundamental	Residual
Acts on:		All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles experiencing:		Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons	Mesons
Particles mediating:						
Strength relative to electromag for two u quarks at:						
10^{-18} m		10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
$3 \times 10^{-17} \text{ m}$		10^{-41}	10^{-4}	1	60	Not applicable to hadrons
for two protons in nucleus		10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

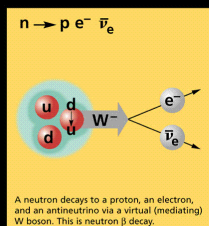
Mesons $q\bar{q}$						
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.						
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin	
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0	
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0	
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1	
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0	
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0	

Matter and Antimatter

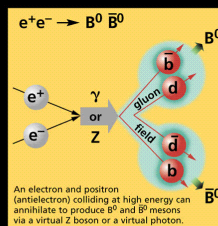
For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons ($e.g.$, Z^0 , γ , and $\eta_c = c\bar{c}$, but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Figures

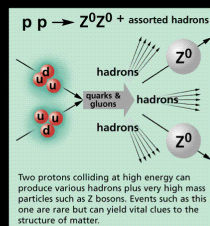
These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



A neutron decays to a proton, an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β decay.



An electron and positron (antilepton) colliding at high energy can annihilate to produce B^0 and \bar{B}^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.



Two protons colliding at high energy can produce various hadrons plus very high mass particles such as Z bosons. Events such as this one are rare but can yield vital clues to the structure of matter.

The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

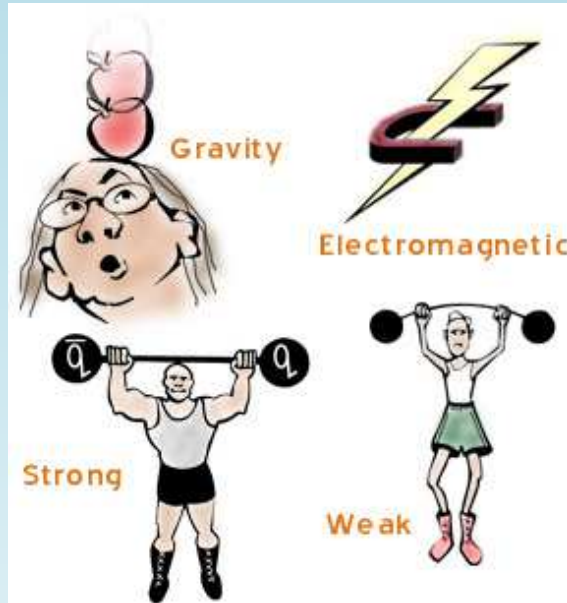
U.S. Department of Energy
U.S. National Science Foundation
Lawrence Berkeley National Laboratory
Stanford Linear Accelerator Center
American Physical Society, Division of Particles and Fields
BURLE INDUSTRIES, INC.

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

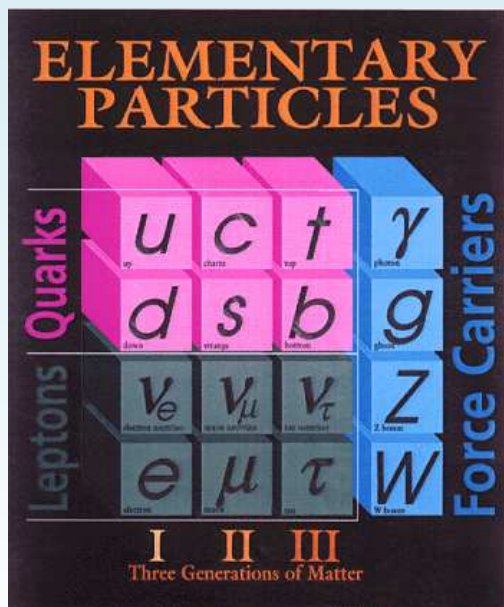
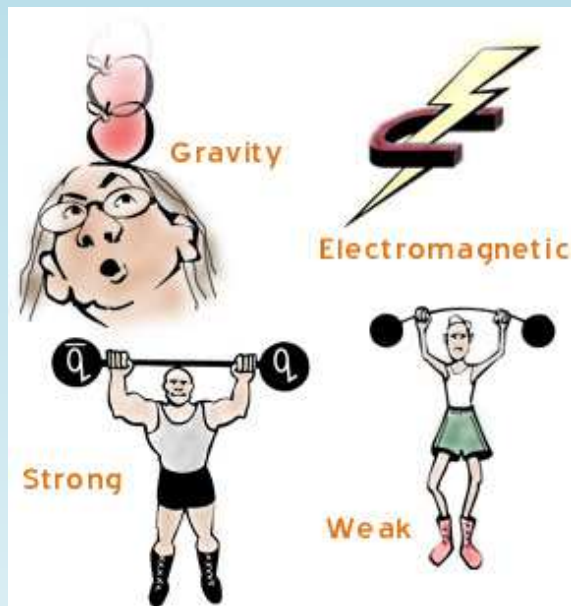


Forças e partículas elementares



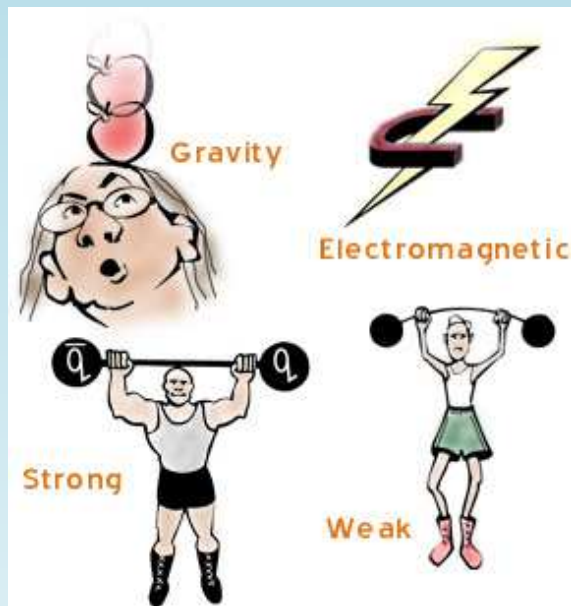


Forças e partículas elementares

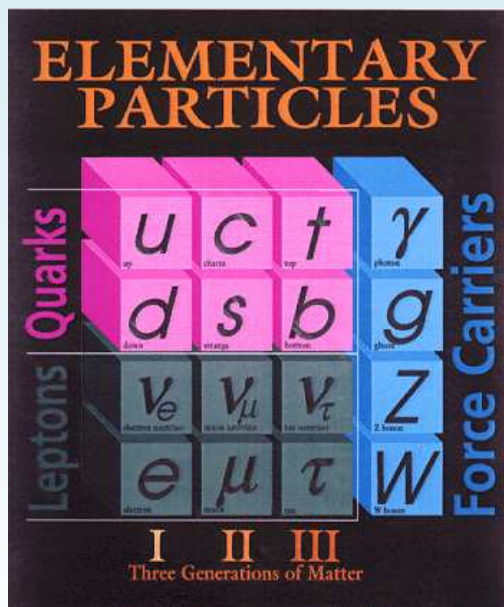




Forças e partículas elementares

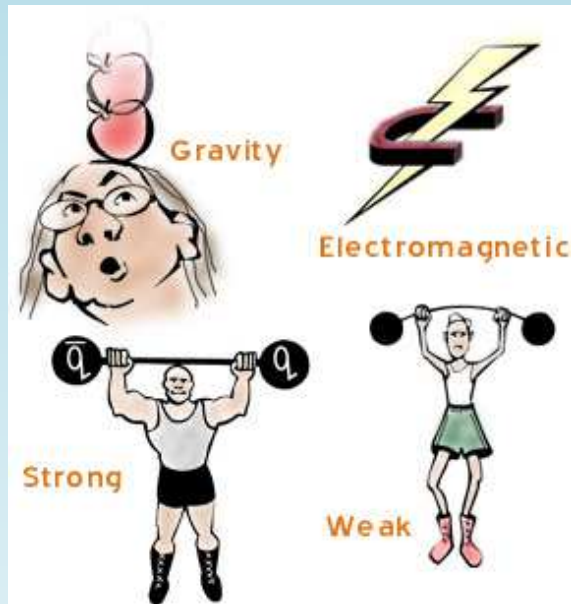


Força	Intensidade relativa	alcance (cm)
forte	1	infinito (10^{-13})
e.m.	10^{-2}	infinito
fraca	10^{-13}	10^{-16}
gravitacional	10^{-39}	infinito

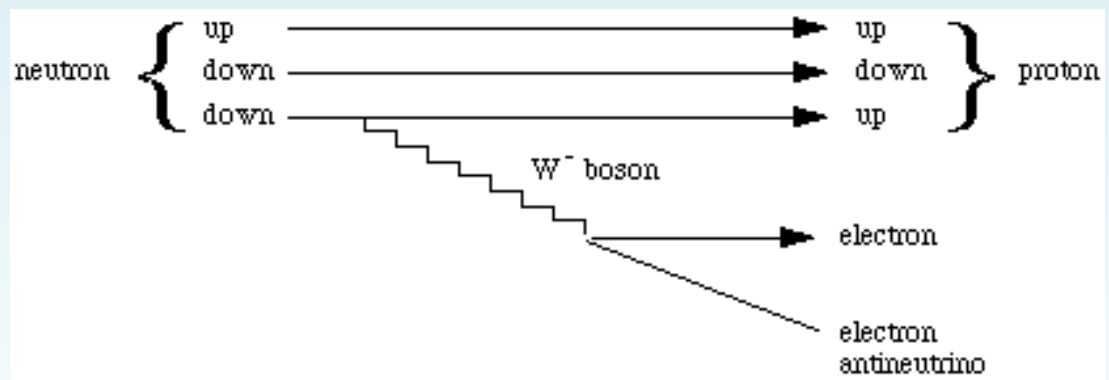
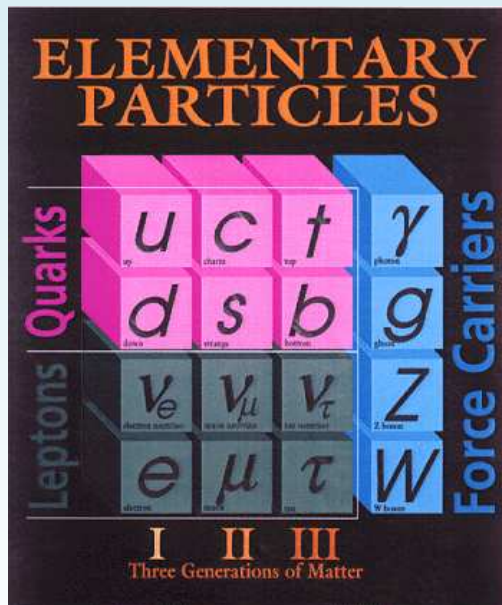




Forças e partículas elementares



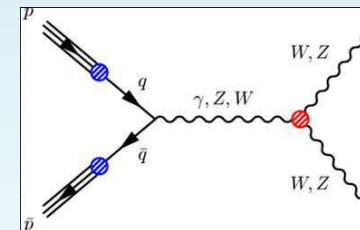
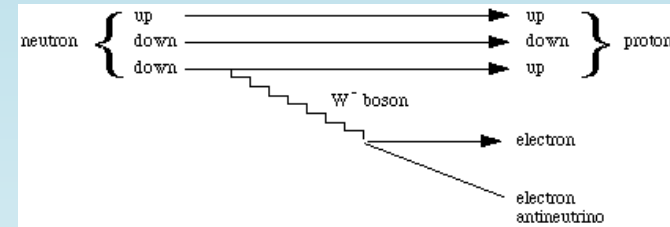
Força	Intensidade relativa	alcance (cm)
forte	1	infinito (10^{-13})
e.m.	10^{-2}	infinito
fraca	10^{-13}	10^{-16}
gravitacional	10^{-39}	infinito





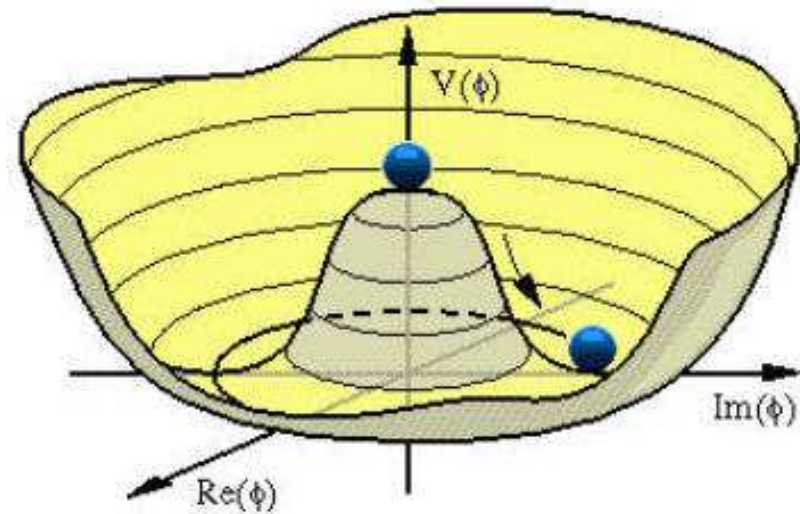
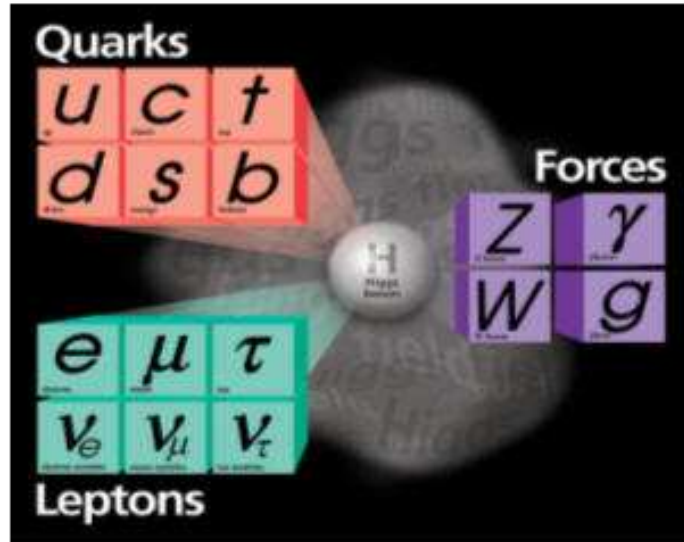
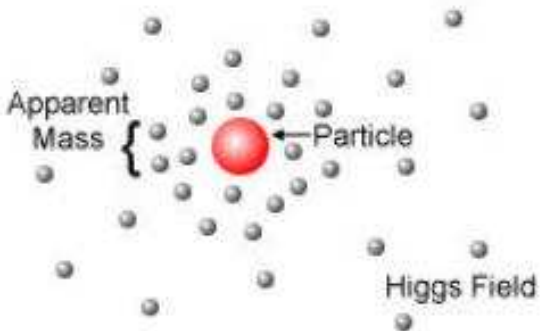
A teoria eletrofraca

- Na teoria **eletrofraca** os bósons de gauge são o fóton γ e as partículas W^\pm e Z^0
- Os bósons de gauge não pode ter massa (simetria de gauge)
- **Problema:** os bósons W^\pm têm massa ~ 80 GeV e o bóson Z^0 tem massa ~ 90 GeV



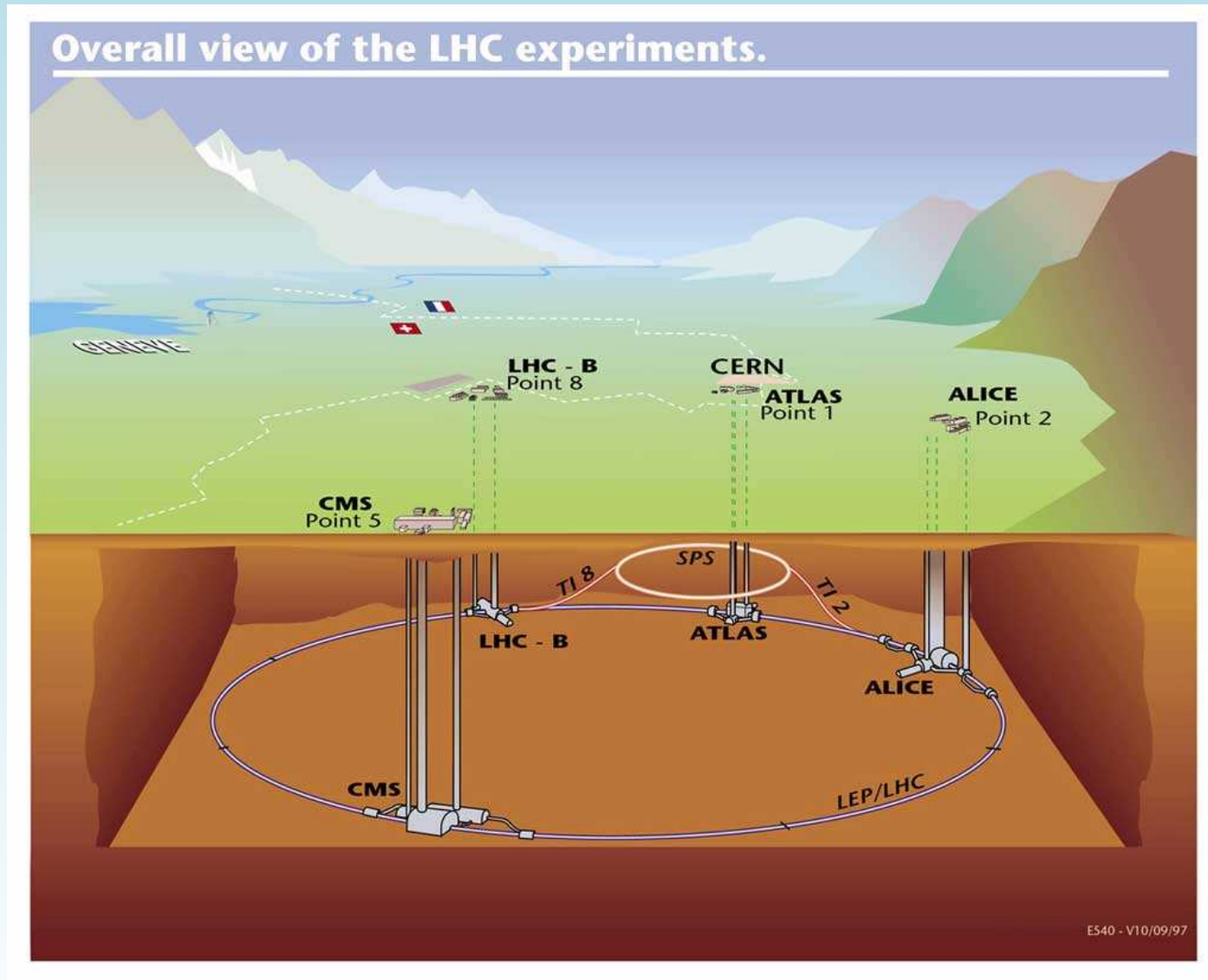


O bóson de Higgs





LHC (Cern)





Missão do LHC

- **energia suficiente** para encontrar (?) o **bóson de Higgs**, partículas super-simétricas, etc. (**Atlas**, CMS)
- estudo da **B physics** (LHCb): **desequilíbrio entre matéria e anti-matéria no universo** (violação da simetria CP, medida dos elementos da matriz CKM)
- colisão de íons pesados (Alice): re-criação das condições do universo primordial (**little bang**), estudo do **plasma de quarks e glúons**



Conclusão

É muito bom participar dessa aventura!



As unidades na física de partículas



■ É conveniente redefinir as unidades físicas:

- Em vez de $c = 299792458$ m/s, fixamos $c = 1$ (sem dimensão física);
- Em vez de $\hbar = 6.5821189910^{-16}$ eV·s, fixamos $\hbar = 1$ (sem dimensão física);
- para a energia considera-se o eV: o elétron-volt é a quantidade de energia que um elétron recebe/cede atravessando uma diferença de potencial elétrico de um Volt ($1 \text{ eV} \approx 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$).



■ Consequências:

- $[c] = 1$ implica que $[T] = [L]$ (podemos medir o tempo em fm);
- $[c] = 1$ implica que $[E] = [m]$ (podemos medir as massas em eV: $M_p \approx 938.3 \text{ MeV}$, $M_e \approx 0.51 \text{ MeV}$, $M_n \approx 939.6 \text{ MeV}$, $\Delta M_D \approx 2.24 \text{ MeV}$);
- $[\hbar] = 1$ implica que $[E] = [T^{-1}]$ (podemos medir tempo e comprimentos em termos da unidade de energia: $1 \text{ fm} \approx 5 \text{ GeV}^{-1}$).

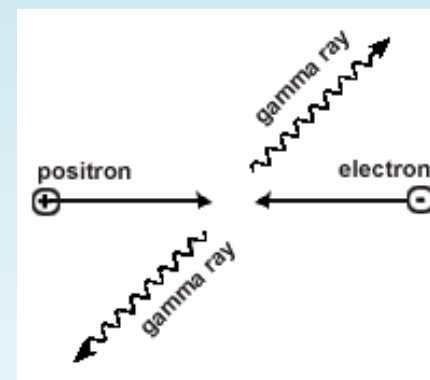
Criação e aniquilação de pares



- Criação de um par elétron-pósitron ($E = mc^2$)



- Aniquilação de um par elétron-pósitron ($E = mc^2$)



- Conservação de energia e momento

- o fóton não tem massa $\rightarrow E = pc$ e sua velocidade é $v = c = 1$;
- o processo $e + e^+ \rightarrow \gamma$ não é permitido.