



Física de Partículas

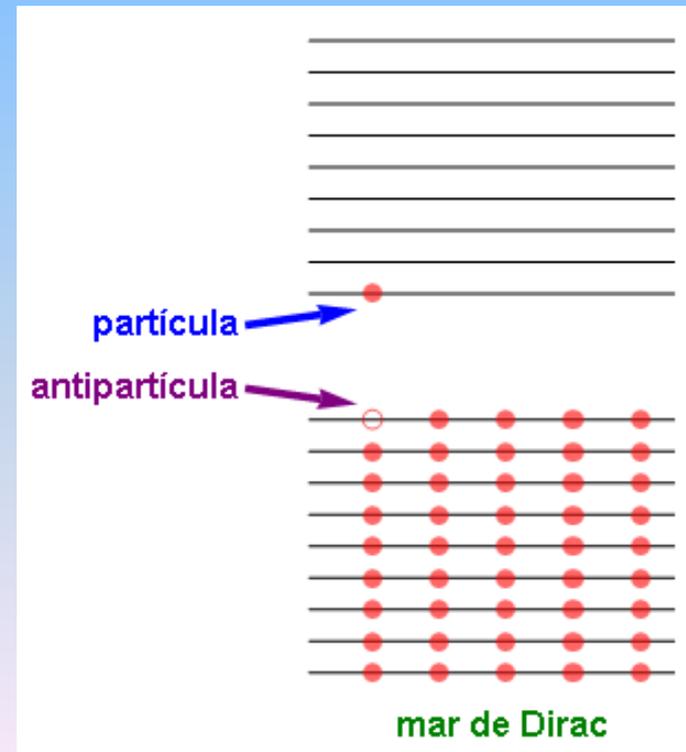
(2ª Parte)

24ª aula

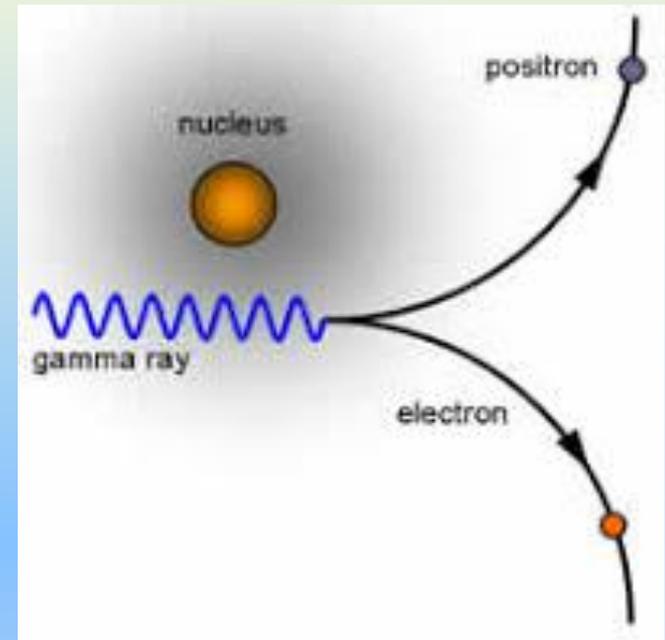
Física IV - Eng. Elétrica 2014

Professor Alvaro Vannucci

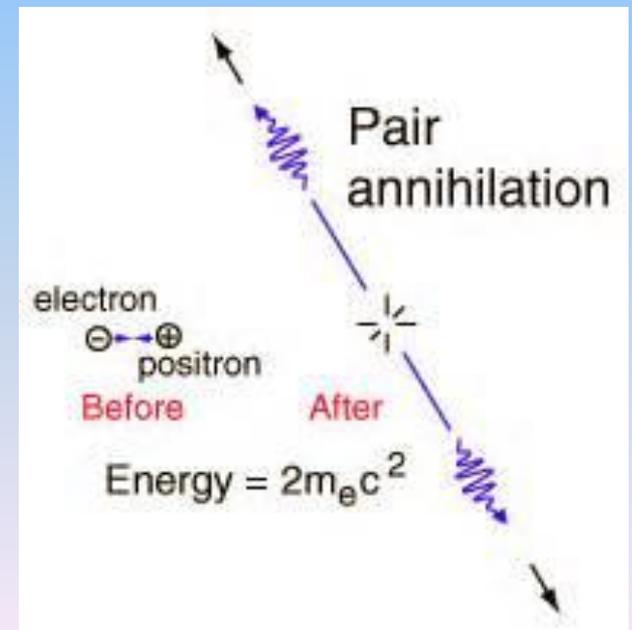
- **Vimos na última aula ...**
- Mais de 300 novas partículas foram descobertas nas últimas décadas, sendo a grande maioria muito instáveis e com meias-vidas muito curtas, entre 10^{-6} s e 10^{-23} s.
- O *pósitron*, que é a *anti-partícula* do elétron, foi proposto por Dirac na década de 1920 e descoberto em 1932.



➤ Um fóton de raio gama com energia alta ($> 2 \times 0,51 \text{ MeV}$), ao interagir com um núcleo, há a possibilidade de que um *par elétron-pósitron* seja criado ($E = m c^2$).

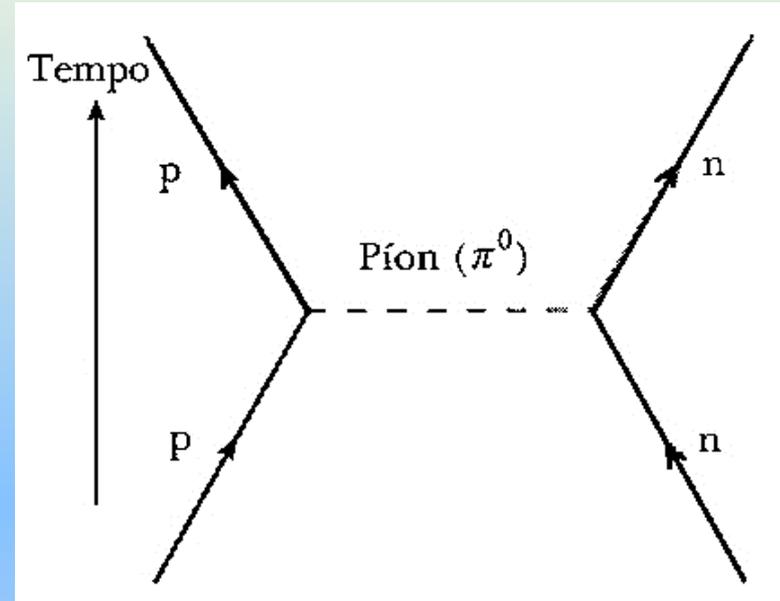


➤ E o processo inverso também pode ocorrer: *aniquilação pósitron - elétron*.



- Na década de 1930 já investigava-se a força eletromagnética, considerando-a derivando de uma "*troca de fótons virtuais*" entre as cargas elétricas.
- Foi quando Yukawa propôs que a força nuclear poderia ser explicada através da troca de uma nova partícula pelos núcleons no núcleo, *o méson*
- O méson μ , (ou *múion*), ao ser descoberto, não se mostrou aquele que procuravam. A descoberta do méson π - ou *píon* - só foi realizada experimentalmente por Powell, Occhialini e Lattes, em 1947.

➤ Atualmente é comum estudar a interação entre partículas através de um *diagrama de Feynman*.



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

- Os **Hádrons** dividem-se (de acordo com as suas massas e spins) em **Mésons** e **Bárions**.
- Os **Mésons** possuem **spin nulo ou inteiro (0 ou 1)** e massas intermediárias (entre a do elétron e a do próton); enquanto que os **Bárions** têm massas iguais ou superiores à do próton e **têm spins fracionários (1/2 ou 3/2)**.
- Os **prótons** e os **nêutrons** são bárions
- Já os **Léptons**, todos têm spin $\frac{1}{2}$ e parecem ser partículas realmente elementares, sem estrutura.

- São seis os léptons conhecidos: o *elétron*, o *múon* e o *tau*, além de um *neutrino* associado a cada um.

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

Leis de Conservação das Partículas Elementares

- Conservação do número bariônico: atribui-se um número bariônico $B = +1$ para todos os bárions, $B = -1$ para todos os antibárions e $B = 0$ para todas as demais partículas.
- Conservação do número leptônico: há três leis de conservação, uma para cada variedade de léptons (*elétron*, *múon* e o *tau*).

➤ Ex.: O *elétron* e o *neutrino do elétron* têm um *número eletrônico-leptônico*: $L_e = +1$, os *antiléptons* e^+ e $\bar{\nu}_e$ têm $L_e = -1$; e todas as outras partículas têm $L_e = 0$. *A mesma regra vale para os demais Léptons*

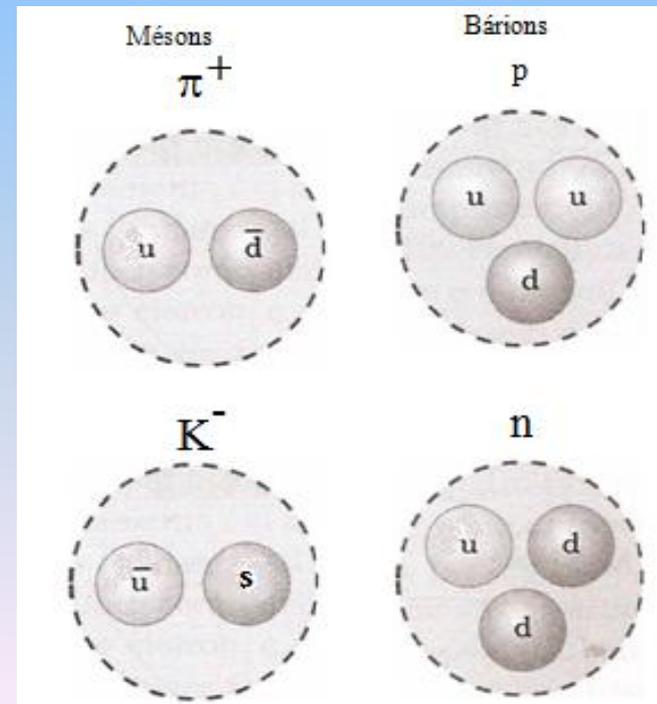
➤ Na aula passada aplicamos a lei de conservação dos números leptônicos para determinar se o decaimento seguinte poderia ocorrer:

$$(a) \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{Antes: } L_\mu = +1 \\ \text{Após: } L_\mu = 0 + 0 + 1 = +1 \\ \text{Antes: } L_e = 0 \\ \text{Após: } L_e = +1 - 1 + 0 = 0 \end{array} \right.$$

- Finalmente vimos um grupo de partículas que exibiam propriedades incomuns nos modos de produção e decaimento e, portanto, foram chamadas *partículas estranhas*: káon (K), lambda (Λ) e sigma (Σ).
- A estas partículas foi associado um novo *número quântico* S , denominado *estranheza*.
- E uma *lei de conservação* foi estabelecida, atribuindo-se valores $S = +1$ para uma dessas partículas na reação e $S = -1$ para a outra (e todas as demais que não forem *estranhas* têm $S = 0$).

Os Quarks

- Em 1963, foi proposto que os *hádrons* seriam sistemas compostos de dois ou três constituintes fundamentais, chamados de *quarks*.
- Esses quarks seriam de três, tipos designados pelos símbolos *u* (*up*), *d* (*down*) e *s* (*strange*).
- Enquanto os *bárions* teriam *três* quarks, os *mésons* seriam constituídos de *um quark* e de *um antiquark*.



- Uma propriedade incomum dos quarks é a de que eles possuem múltiplos fracionários da carga eletrônica e .
- Os quarks u , d , e s possuem, respectivamente, cargas de $+2/3 e$, $-1/3 e$ e $-1/2 e$.
- Todos os quarks têm spin $1/2$ (o que significa que eles são **férmions**). Cada quark, existe associado um antiquark: de carga oposta, número bariônico oposto e estranheza oposta.

- O modelo original dos quarks não se mostrou suficiente para explicar certas constatações experimentais. De forma que em 1967 um quarto quark foi proposto.
- A este novo quark c (*charme*), com carga $+2/3e$, foi também associado um número quântico *charm* (C); sendo que o novo quark tem charm $C = +1$, seu antiquark charm $C = -1$ e os demais quarks $C = 0$
- Nas décadas seguintes dois novos quarks (e respectivos antiquarks) foram ainda propostos: os quarks *top* (t) e *bottom* (b), com números quânticos *topness* e *bottomness*, de valores $+1, 0, -1$ (a todos os quarks e antiquarks).

TABELA 31.3

Propriedades dos Quarks e Antiquarks

Quarks								
Nome	Símbolo	Spin	Carga	Número Bariônico	Estranheza	Charm	Bottomness	Topness
<i>Up</i>	u	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
<i>Down</i>	d	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	0
<i>Strange</i>	s	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	-1	0	0	0
<i>Charmed</i>	c	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	+1	0	0
<i>Bottom</i>	b	$\frac{1}{2}$	$-\frac{1}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	+1	0
<i>Top</i>	t	$\frac{1}{2}$	$+\frac{2}{3}e$	$\frac{1}{3}$	0	0	0	+1

Antiquarks								
Nome	Símbolo	Spin	Carga	Número Bariônico	Estranheza	Charm	Bottomness	Topness
<i>Antiup</i>	\bar{u}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
<i>Antidown</i>	\bar{d}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	0
<i>Antistrange</i>	\bar{s}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	+1	0	0	0
<i>Anticharmed</i>	\bar{c}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	-1	0	0
<i>Antibottom</i>	\bar{b}	$\frac{1}{2}$	$+\frac{1}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	-1	0
<i>Antitop</i>	\bar{t}	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}e$	$-\frac{1}{3}$	0	0	0	-1

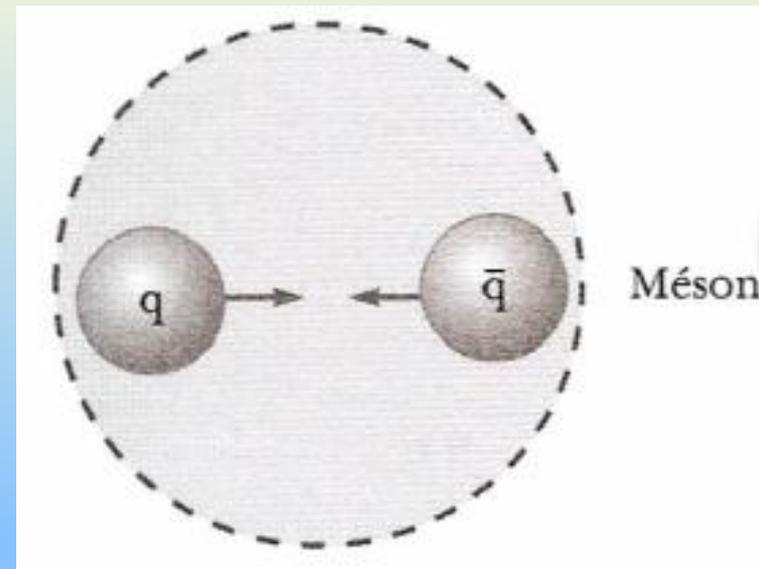
➤ A composição de Quarks de alguns Mésons e Bárions

		Composição de Quark	
Partícula			
<i>Mésons</i>		<i>Bárions</i>	
π^+	$u\bar{d}$	p	uud
π^-	$\bar{u}d$	n	udd
π^0	$d\bar{d}$	Λ^0	uds
K^+	$u\bar{s}$	Σ^+	uus
K^-	$\bar{u}s$	Σ^0	uds
K^0	$d\bar{s}$	Σ^-	dds
J/Ψ	$c\bar{c}$	Ξ^0	uss
		Ξ^-	dss
		Ω^-	sss

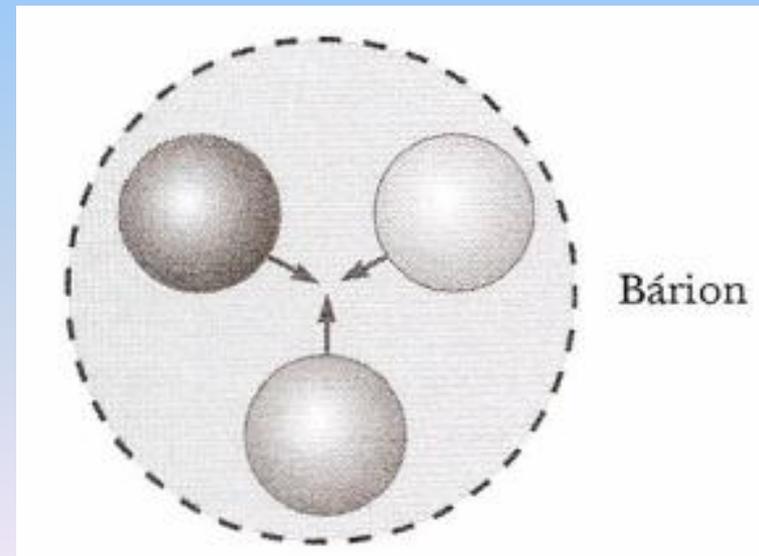
- Atualmente acredita-se que as partículas fundamentais na natureza são: **seis quarks** (nunca observou-se um quark isolado) e **seis léptons**, além das respectivas antipartículas.
- Logo após ter sido proposto a existência dos quarks, observou-se que certas partículas tinham composições de quarks que violavam o princípio da exclusão de Pauli.
- Foi então sugerido um novo número quântico correspondente a uma nova propriedade chamada **cor** (com três variedades: **vermelha**, **verde** e **azul** - os **antiquarks** teriam as cores **antivermelha**, **antiverde** e **antiazul**).

- Devido ao princípio da exclusão, os **três quarks** em um *bárion* têm *cores diferentes*; e como a combinação das cores básicas geram a cor branca, uma combinação dos três quarks com cores diferentes gera uma cor branca - ou sem cor.
- Um *méson* teria um quark de uma cor e um antiquark da anticor correspondente. O resultado é que os bárions e os mésons são sempre incolores.
- **A força cromática entre quarks é análoga à força elétrica entre cargas**; mesmas cores se repelem e cores opostas se atraem. Dois quarks vermelhos se repelem, mas um quark vermelho é atraído por um quark antivermelho.

➤ A teoria de como os quarks interagem entre si é chamada de Cromodinâmica Quântica, ou **CDQ**. A atração entre quarks de cores opostas para formar um méson ($q\bar{q}$) é indicada na figura.



➤ Por outro lado, todos os bárions contêm três quarks de três cores diferentes (são incolores).



- Agora, a teoria CDQ oferece uma explicação mais básica da força nuclear, que pode ser formulada em termos de quarks e troca de glúons.
- O glúon é uma partícula (sem massa) que intermedia a força nuclear forte (interações entre os nucleons), assim como os fótons virtuais intermediam as interações entre cargas elétricas.
- Temos atualmente conhecimento de quatro forças fundamentais, com as quais tentamos estudar o Universo:

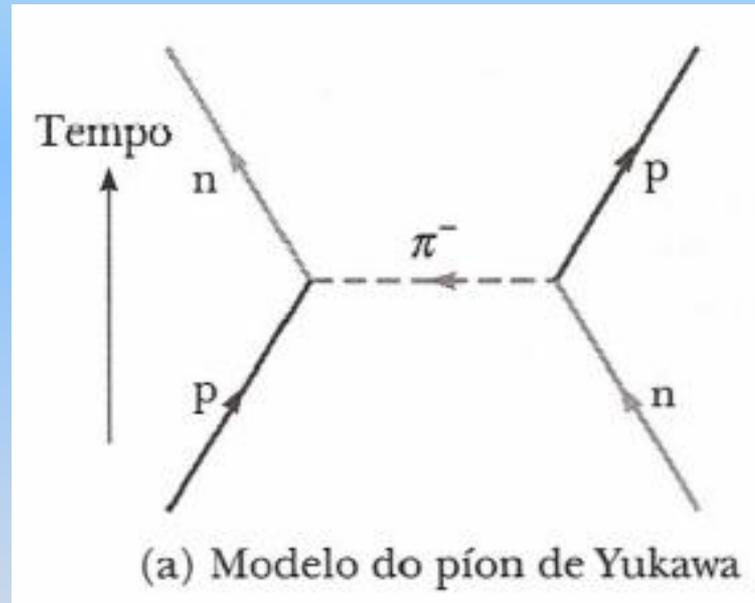
➤ São elas a **força nuclear forte** (troca de **glúons**), a **força eletromagnética** (troca de **fótons**), a **força nuclear fraca**, já unificada com a eletromagnética e responsável pelos processos de decaimento radioativo (troca de **bósons W e Z**), e a **força gravitacional** (troca de **grávitons**).

TABELA 31.1

Interações das Partículas

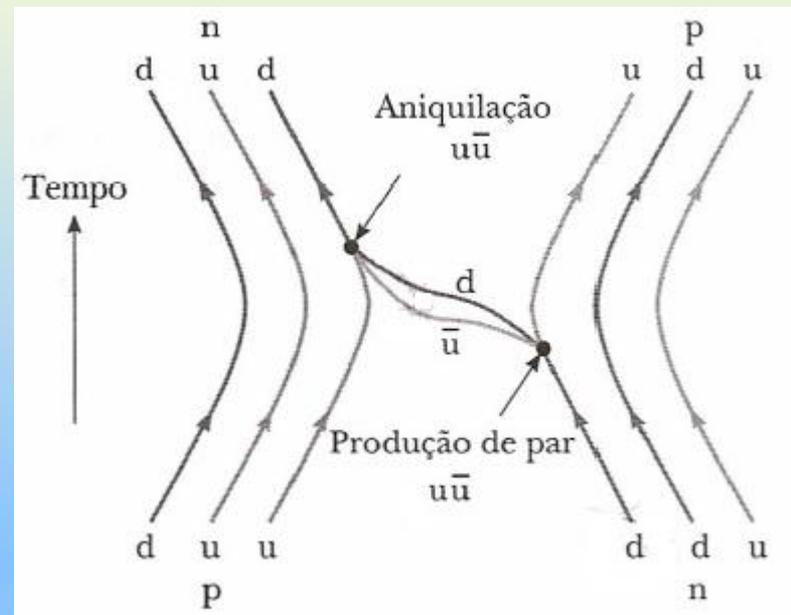
Interação	Intensidade Relativa	Alcance da Força	Partícula Mensageira do Campo
Nuclear	1	Curto (~ 2 fm)	Glúon
Eletromagnética	10^{-2}	∞	Fóton
Fraca	10^{-5}	Curto ($\sim 10^{-3}$ fm)	Bósons W^{\pm}, Z^0
Gravitacional	10^{-39}	∞	Gráviton

➤ A força de interação entre um nêutron e um próton (no núcleo ou em um espalhamento) pode então ser descrita por meio da troca de um pión (um bárion transformando-se no outro):



➤ Ou então através do modelo no qual cada quark no nêutron e no próton está emitindo e absorvendo glúons continuamente.

➤ *Ex.*: um quark *down* no nêutron à direita emite um glúon. A energia do glúon é então transformada para criar um par($u\bar{u}$).



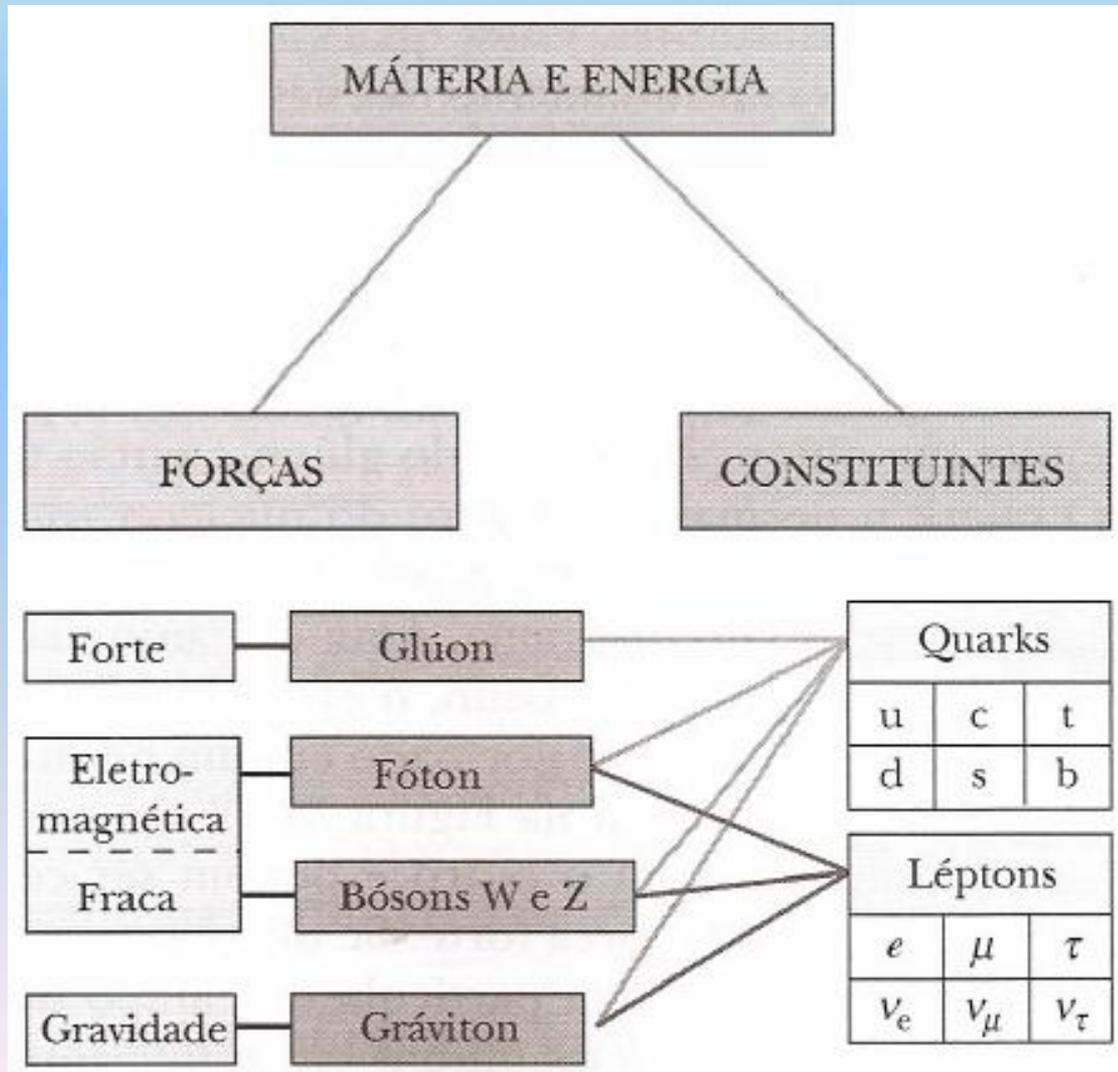
➤ O quark u permanece dentro do núcleon (que se transformou agora em um próton) e o quark d e o antiquark \bar{u} são transmitidos para o próton.

➤ O \bar{u} então aniquila um quark u dentro do próton e o quark d é capturado; como resultado, o próton transforma-se em um nêutron

O Modelo Padrão

- O *Modelo Padrão* da física de partículas descreve as forças fundamentais forte, fraca e eletromagnética, bem como as partículas fundamentais que constituem toda a matéria.
- As partículas elementares estão, de fato, em três categorias: os léptons, os quarks e as partículas de campo. Os quarks e os léptons têm *spin 1/2* (são *férmions*), enquanto as partículas de campo têm *spin 1 ou acima* (são *bósons*).

➤ Espera-se um dia que todas as forças sejam unificadas; de forma que o modelo padrão pode ser resumido na tabela:



- Um problema ainda não respondido pelo *Modelo Padrão* é o fato do fóton não ter massa, enquanto os bósons W_{\pm} e Z têm massa intrínseca, por ex.
- Devido a essa diferença de massa, as forças eletromagnética e fraca são bem diferentes a baixas energias, mas passam a ter naturezas similares em energias muito elevadas.
- Esta "quebra de simetria" deixa em aberto a questão da origem das massas das partículas. Para resolver esse problema, é que foi proposta uma partícula hipotética chamada de ***bóson de Higgs***.

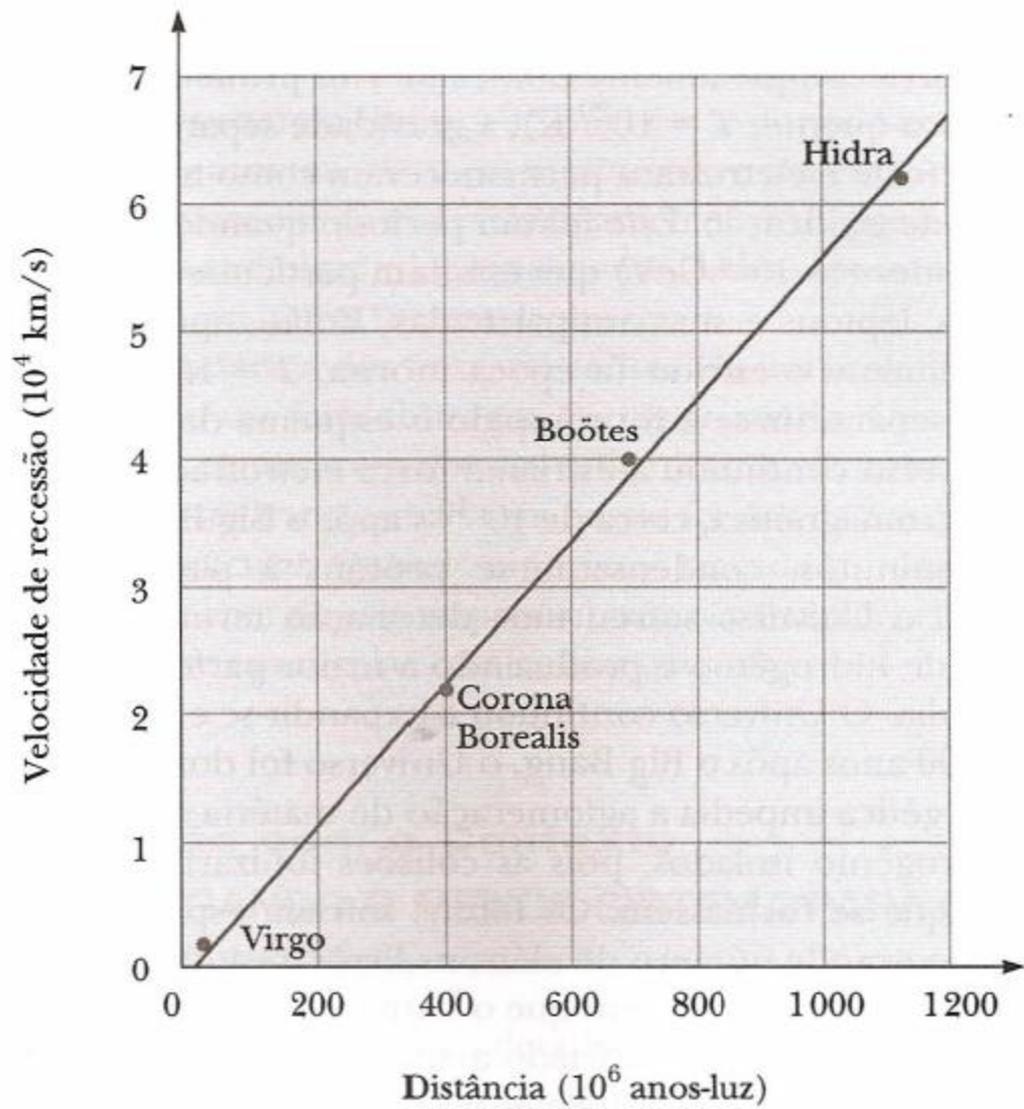
O Big Bang da criação do Universo

- No início do séc. XX, observações espectroscópicas levaram Edwin Hubble a propor que o Universo encontrava-se em expansão, uma vez que os espectros medidos indicavam um 'desvio para o vermelho' (*red shift*) devido ao efeito Doppler.
- Utilizando os telescópios do Mount Wilson - Ca, Hubble mostrou que as velocidades das galáxias aumentavam na proporção direta de sua distância R até nós:

$$v = HR$$

(lei de Hubble),

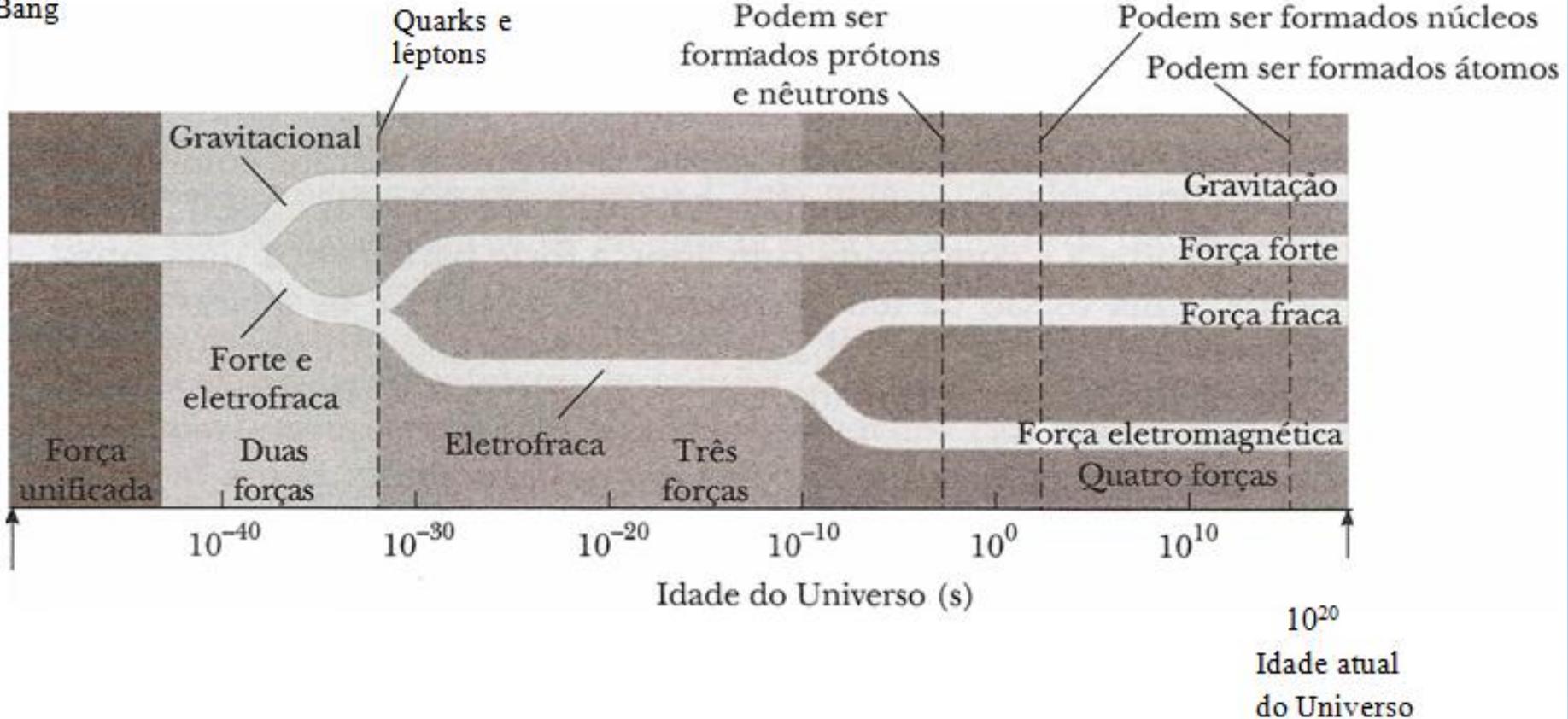
; sendo $H = 17 \times 10^{-3} \text{ m/s}^1 \cdot \text{anos-luz}$



➤ Se as galáxias estavam todas se afastando umas das outras, então isto significaria que houve um tempo em que elas estariam bem próximas; **ou muito, muito próximas!**

➤ De acordo com tal teoria, o Universo teria surgido de uma *singularidade* com densidade infinita entre 15 e 20 bilhões de anos atrás. Nas primeiras frações de segundo após o Big Bang as energias envolvidas seriam tão extremas que as quatro forças fundamentais da física estariam unificadas.

BigBang



- Somente após alguns minutos os prótons e os nêutrons puderam condensar-se, a partir da sopa quente primordial.
- Até cerca de 700 000 anos após o Big Bang, o Universo foi dominado pela radiação; esta radiação energética é que impedia a aglomeração de matéria ou mesmo a formação de átomos de hidrogênio isolados.
- Somente após a temperatura ter caído para $T \sim 3.000 \text{ K}$ é que se formou a massa de hidrogênio e hélio presente até os dias de hoje (na proporção de 26% He e 74% H).

- Observações recentes com relação à velocidade e rotação de galáxias de um aglomerado indicam que a quantidade de matéria não luminosa (*matéria escura*) é muito maior que a matéria luminosa presente nas estrelas e nas nuvens de gás.
- Por outro lado, medidas mais sofisticadas têm mostrado que as galáxias estão se afastando de forma acelerada, indicando a existência de uma *energia escura* por trás deste fenômeno.
- Estes dois pontos são ainda motivo de muita controvérsia e nenhuma explicação apresentada até o momento parece satisfazer todas as condições de contorno do problema.

- Agora, se incertezas persistem quanto à origem do Universo, maiores dúvidas ainda surgem quanto ao seu final: Ele se expandirá para sempre ou um dia entrará em colapso?
- Estudos indicam que se a densidade média de átomos no Universo for menor do que uma certa *densidade crítica*, a expansão do Universo acontecerá para sempre.
- Porém, se ela **exceder o valor crítico**, a expansão do Universo cessará e se iniciará um processo de *contração*, levando-o eventualmente a um novo estado superdenso e a uma outra expansão, correspondendo a um *Universo oscilante*.

➤ Ex. Um quasar é um corpo altamente luminoso que está muito distante da Terra. Sua velocidade pode ser mensurada por medidas do deslocamento Doppler na luz que ele emite. Um certo quasar afasta-se da Terra com uma velocidade $v = 0,55c$. A que distância ele se encontra?

Lei de Hubble: $v = HR$; $H = 17 \times 10^{-3} \text{ m/s}^1 \cdot \text{anos-luz}$

$$\begin{aligned} \therefore R &= (0,55)(3 \times 10^8 \text{ m/s}) / 17 \times 10^{-3} \text{ m/s}^1 \cdot \text{anos-luz} = \\ &= 9,7 \times 10^9 \text{ anos-luz} \end{aligned}$$