



Universidade Federal do ABC

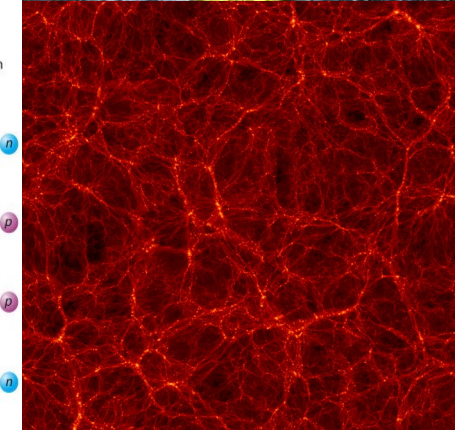
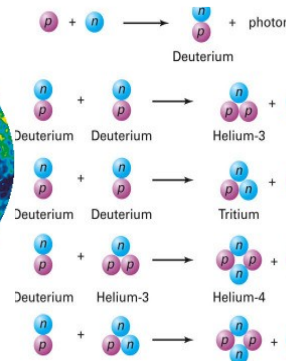
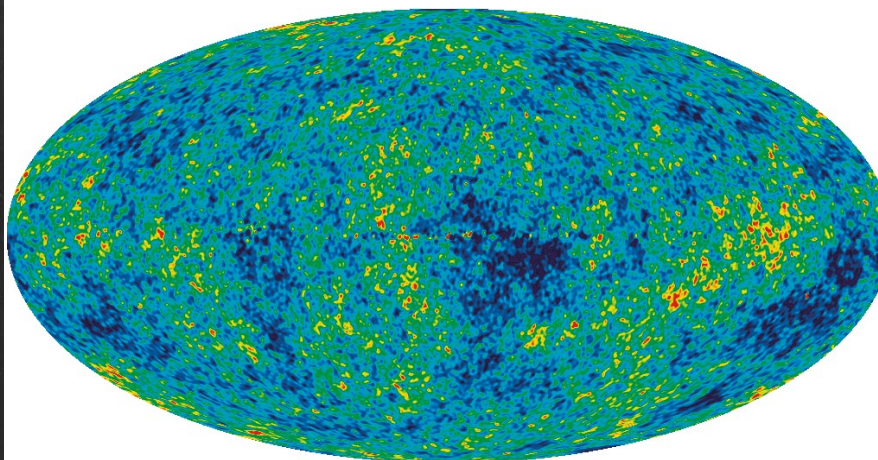
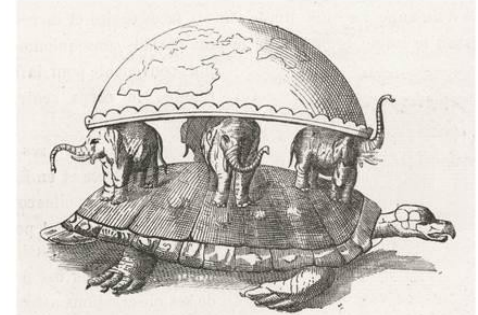
Introdução à Cosmologia

04. Teoria Padrão das Partículas, Resumo da História do Universo

Prof. Pieter Westera

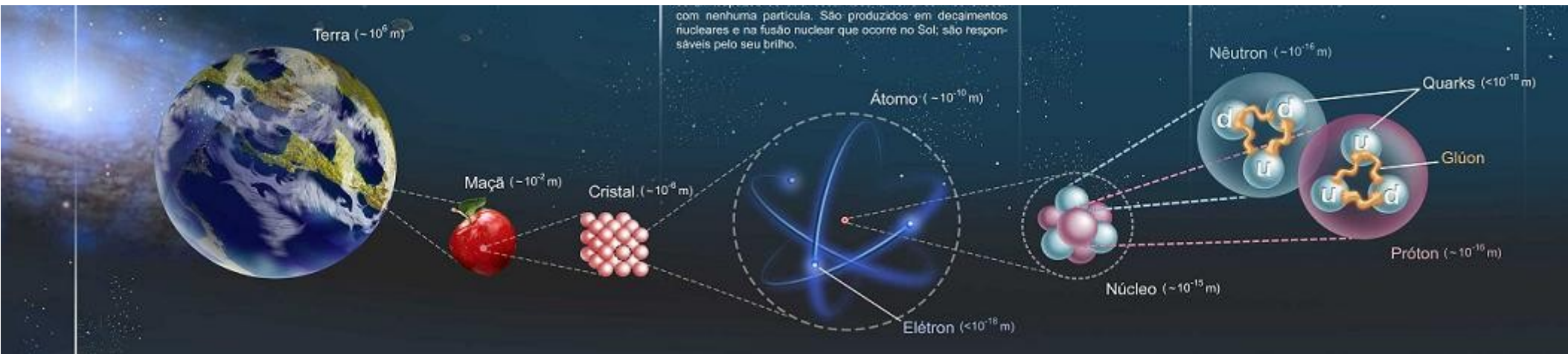
pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Cosmo.html>



Teoria Padrão das Partículas

Basicamente repetição de
Estrutura da Matéria



Átomos

A **menor unidade** de uma **substância** (do grego a-tomo = indivisível).

O conceito vem dos **gregos** (mas na **Índia**, o conceito já existia também) por considerações filosóficas, e foi fortemente defendido por **Newton**, **Claus**, **Maxwell** e **Boltzman**.

Mas no final do século XIX estava desacreditado.

John Dalton: Teoria Atômica

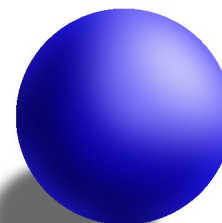
1808 - **John Dalton**
Primeiro modelo atômico
com **base experimental**,
baseado nas razões
sempre iguais entre
substâncias em reações químicas,
"Modelo da bola de bilhar"



John Dalton,
1766-1844

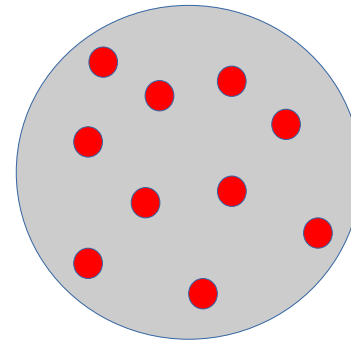
O **átomo** é uma **partícula maciça** e **indivisível**.

Uma **molécula** é um **grupo** de
átomos ligados uns aos outros.



O Átomo de Thomson: Pudim de Ameixas (Plum Pudding)

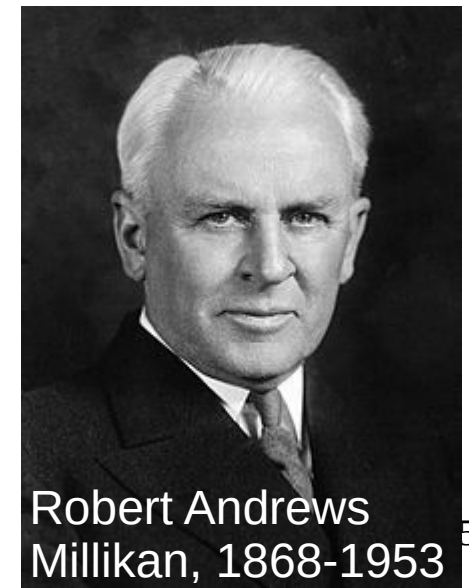
- Em 1897, J. J. Thomson descobriu o **elétron**, levando ele a um novo **modelo atômico**, uma **distribuição uniforme** dos **elétrons** num mar de **massa** e **carga positiva** garantindo o **equilíbrio**.



Joseph John Thomson,
1856-1940

- Em 1911, Robert A. Millikan determinou **massa** ($9.10 \cdot 10^{-31}$ kg) e **carga** ($-1.602 \cdot 10^{-19}$ C) do e^-

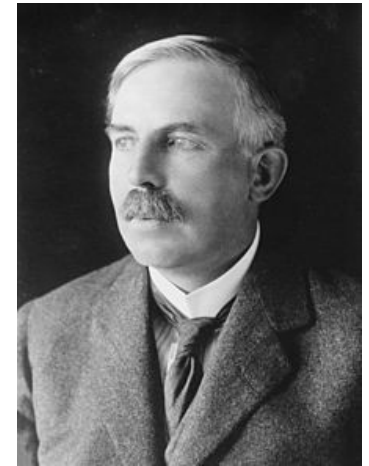
=>  Prêmio Nobel em 1923



Robert Andrews
Millikan, 1868-1953

O Átomo de Rutherford

- Em 1908-11, Ernest **Rutherford** descobriu o **núcleo atômico**, identificou uma partícula **carregada positivamente** descoberto por Eugen Goldstein em 1886 como a partícula que dá a carga ao núcleo, chamando ele de **próton** (massa $m_p = 1.673 \cdot 10^{-27}$ kg), e desenvolveu o **modelo planetário** do **átomo** (próximo slide).



Ernest Rutherford,
1871-1937

- Em 1932, **Chadwick** descobriu o **nêutron** (massa $m_n = 1.675 \cdot 10^{-27}$ kg),
rendendo a ele o Prêmio Nobel em 1935

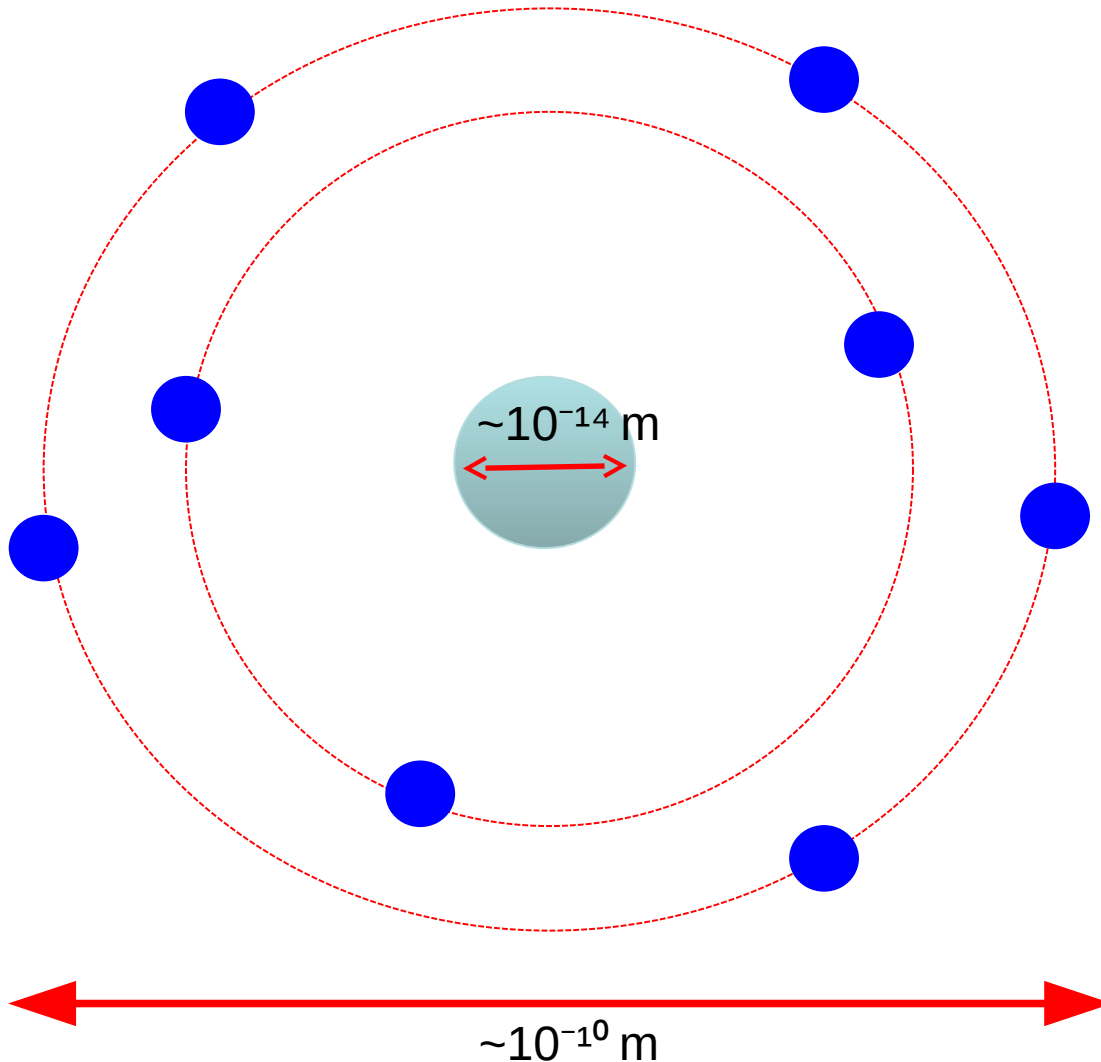


=> O **núcleo** atômico é **composto** por **prótons** e **nêutrons**.



James Chadwick,
1891-1974

O Átomo de Rutherford



- **Núcleo** de carga Ze **rodeado** por Z **elétrons** (modelo planetário).
 Z é chamado **número atômico** (H: $Z = 1$, He: $Z = 2$, etc.).
O **número atômico** determina as **propriedades físicas e químicas** do átomo.
- Quase toda a massa é **concentrada no núcleo**
- Tamanho do núcleo $\sim 10^{-14}$ m

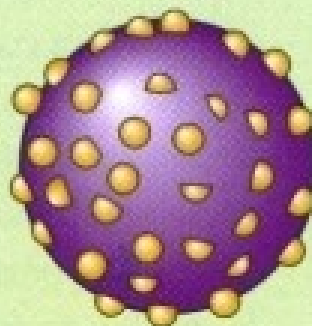
Resumo: Os modelos atômicos

Dalton:
"Bola de bilhar"



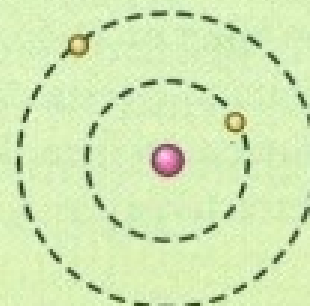
O átomo é uma esfera maciça, indivisível, neutra.

Thomson:
"Pudim de passas"



O átomo é uma esfera maciça, positiva com elétrons encravados nela.

Rutherford:
"Modelo planetário"



O átomo tem um núcleo positivo e muito pequeno ao redor do qual giram os elétrons.

Linha do tempo

1803



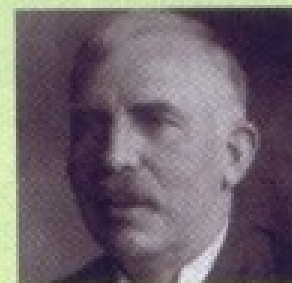
J. Dalton (1766-1844)

1897



J. J. Thomson (1856-1940)

1911



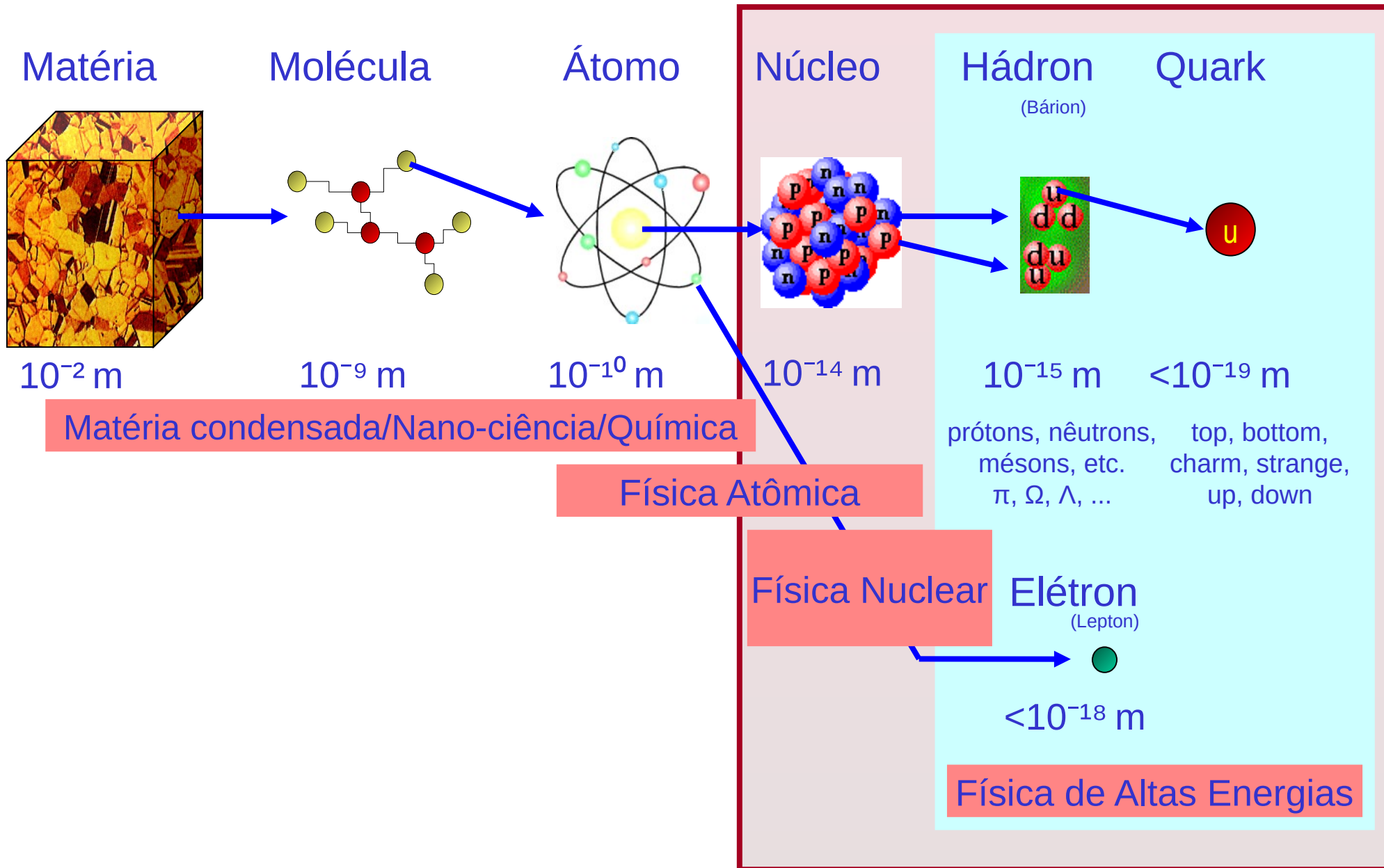
E. Rutherford (1871-1937)

Podemos continuar
dividindo?

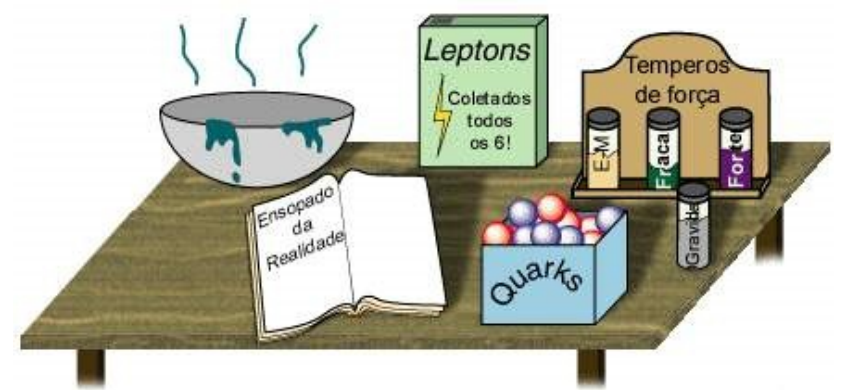
Podemos continuar dividindo?

Só modificando
as propriedades da matéria
(Moléculas => Átomos,
Átomos => Núcleos e Elétrons,
Núcleos => Nucleons,
Nucleons => Quarks)

A Estrutura da Matéria

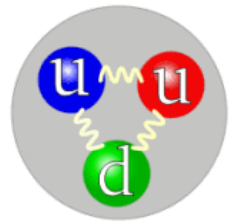


Modelo padrão

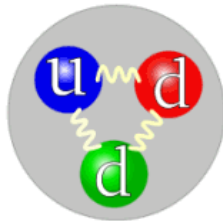


- O modelo padrão explica o que é o mundo e o que o mantém unido
- É uma teoria simples e compreensível que explica todas as centenas de partículas e interações complexas com apenas:
 - ✓ **6 quarks.**
 - ✓ **6 léptons.** O lépton mais conhecido é o elétron. Nós iremos falar sobre os léptons alguns slides adiante.
 - ✓ **Boson de Higgs.** Partícula que dá massa às partículas.
 - ✓ **Partículas transportadoras de força,** como o fóton.
- Todas as partículas de matéria que nós conhecemos são compostas de quarks e léptons, e elas interagem trocando partículas transportadoras de força.

O que são os quarks ?



Proton



Neutron

Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from Wikipedia)

O **núcleo** atômico é formado de **prótons** e **nêutrons**.

Os prótons e os nêutrons são formados por dois "sabores" (tipos) de **quarks**.

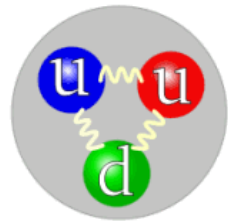
Existem **6** tipos de quarks, mas usualmente falamos em **três pares**: **up/down**, **charmoso/estranho** e **top/bottom**.

Os quarks têm **carga elétrica fracionária**, ao contrário do próton e do elétron que têm cargas inteiras $+e$ e $-e$, respectivamente.

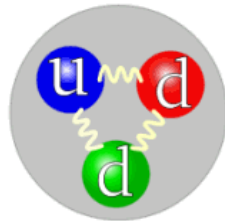
Eles têm mais um número quântico, chamado **número bariônico B** , de $\frac{1}{3}$ (e os correspondentes anti-quarks, daqui a 2 slides, de $-\frac{1}{3}$)

	Quarks	
Sabor / Nome	Massa [Gev/c ²]	Carga el. [e]
d down	0.006	$-\frac{1}{3}$
u up	0.003	$\frac{2}{3}$
s strange	0.1	$-\frac{1}{3}$
c charm	1.3	$\frac{2}{3}$
b bottom	4.3	$-\frac{1}{3}$
t top	175	$\frac{2}{3}$

O que são os quarks ?



Proton



Neutron

Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from Wikipedia)

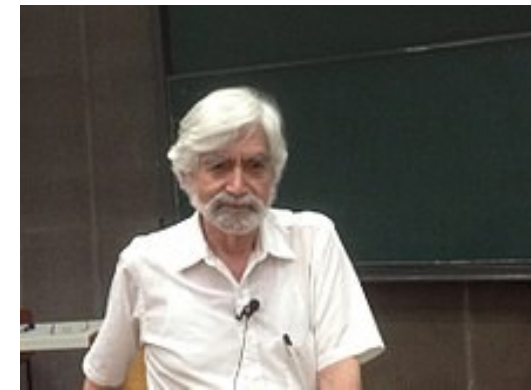
O Modelo de quarks (nome inspirado em *Finnegans Wake* de James Joyce) foi **proposto** independentemente por **Gell-Mann** e **Zweig** em 1964, e estendido nos anos seguintes por outros físicos.

Os quarks foram **descobertos** de 1968 a 1995 em **aceleradores de partículas**.

	Quarks	
Sabor / Nome	Massa [Gev/c ²]	Carga el. [e]
d down	0.006	-1/3
u up	0.003	2/3
s strange	0.1	-1/3
c charm	1.3	2/3
b bottom	4.3	-1/3
t top	175	2/3



Murray Gell-Mann,
1929-2019

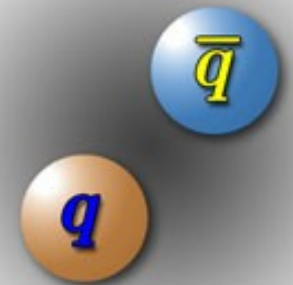
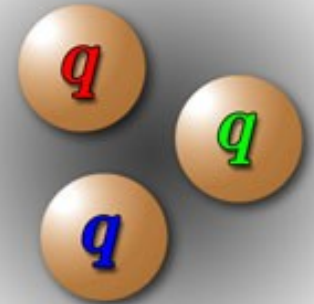


George Zweig,
nascido em 1937

Hádrons

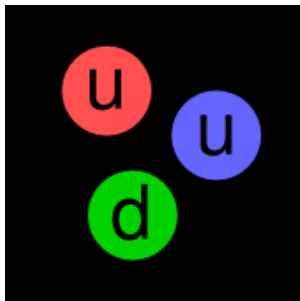
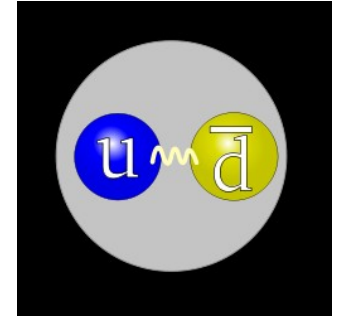
- Temos 6 quarks diferentes agrupados em três famílias. Cada um desses quarks tem o seu anti-quark (anti-up, anti-down, ..., simbolizado por uma barra)
- As **anti-partículas** têm a mesma massa da partícula correspondente, mas têm **carga elétrica e número bariônico com sinal oposto**
- Os quarks se combinam para formar partículas chamadas **hádrons**. Os hádrons se dividem para formar **dois grupos** de partículas:
 1. Partículas formadas por 3 quarks (ou três anti-quarks) são chamadas de bárions (do grego baros = pesado) e têm número bariônico total 1 (ou -1).
 2. Partículas formadas por dois quarks (um quark e um anti-quark) são chamadas de mésons (do grego meso = meio) e têm número bariônico total 0.

A carga total dos hádrons é um número inteiro de cargas elementares.



Hádrons

- Exemplos de bárions: **próton** (uud) e **nêutron** (ddu)
- Exemplos de mésons: π^- (píon - $d\bar{u}$) e K^+ (káons - $u\bar{s}$)
- **Não** existem partículas formadas por **um** único quark e até o momento não temos evidência de hádrons compostos por **mais de 3** quarks.
- Os quarks da **primeira família** são os que compõem o **núcleo** atômico no Universo. Os **quatro** quarks **restantes** (e seus anti-quarks) formam **partículas menos estáveis** que têm **vidas curtas** mas que existem em nosso ambiente natural. Elas existiam com maior abundância no **nascimento** do **Universo** e são observadas nos **acelerados** de **partículas**.



Resumo

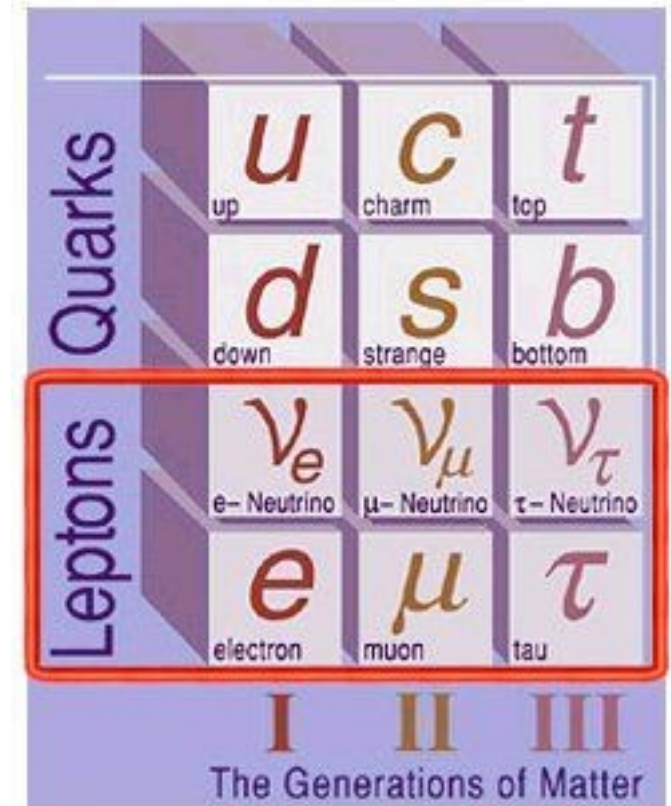
Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

Resumo

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

Léptons

- Outro tipo de partículas de matéria são os **léptons** (do grego leve)
- Existem **6** léptons e todos são partículas **elementares**, ou seja são **indivisíveis**.
- Temos **três** léptons **carregados negativamente** (carga $-e$): o elétron e^- , o múon μ^- e o tau τ^- . Suas anti-partículas (e^+ , μ^+ e τ^+) têm carga positiva ($+e$)
- Temos também **três** léptons **neutros**: o **neutrino do elétron** ν_e , **neutrino do múon** ν_μ e o **neutrino do tau** ν_τ . Os neutrinos também têm anti-neutrinos (com barra).
- Similar ao número bariônico, leptons têm o **número leptônico** L , $+1$ para os léptons e -1 para as anti-partículas. Ainda existem os números leptônicos de família (ou sabor) L_e (1 para e^- e ν_e , -1 para e^+ e $\bar{\nu}_e$, 0 para todas as outras partículas), L_μ (análogo a L_e) e L_τ (idem).



A Descoberta do Neutrino

1932: W. Pauli propõe a **existência** dos **neutrinos** no **decaimento beta**.

1955: Cowan e Reines **detectam experimentalmente** os neutrinos.



Reines recebeu o prêmio Nobel em 1995 em nome dos dois.

Por muito tempo, considerou-se a possibilidade, que neutrinos **não** têm **massa**, mas nos anos 80, **neutrinos** provindo do **Sol refutaram** esta tese.

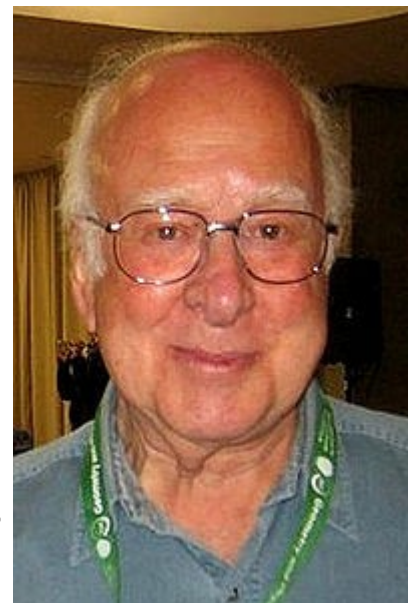


Clyde L. Cowan (1919-1974) Frederick Reines (1918-1998)


A Partícula (ou o Bóson) de Higgs

Em 1964, três grupos de pesquisadores, um deles liderado por Peter Higgs, preveram a existência de uma **partícula**, um bóson de spin zero, que daria **massa** às **outras partículas**.

Em 2012, uma partícula com as propriedades previstas desta partícula foi **criada** no LHC (*Large Hadron Collider*) no CERN (*European Organisation of Nuclear Research*) na Suíça/França, e **detectada** pelas colaborações ATLAS e CMS.



Peter Higgs *1929

 Higgs ganhou o prêmio Nobel em 2013, juntamente com François Englert.

Resumo

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2

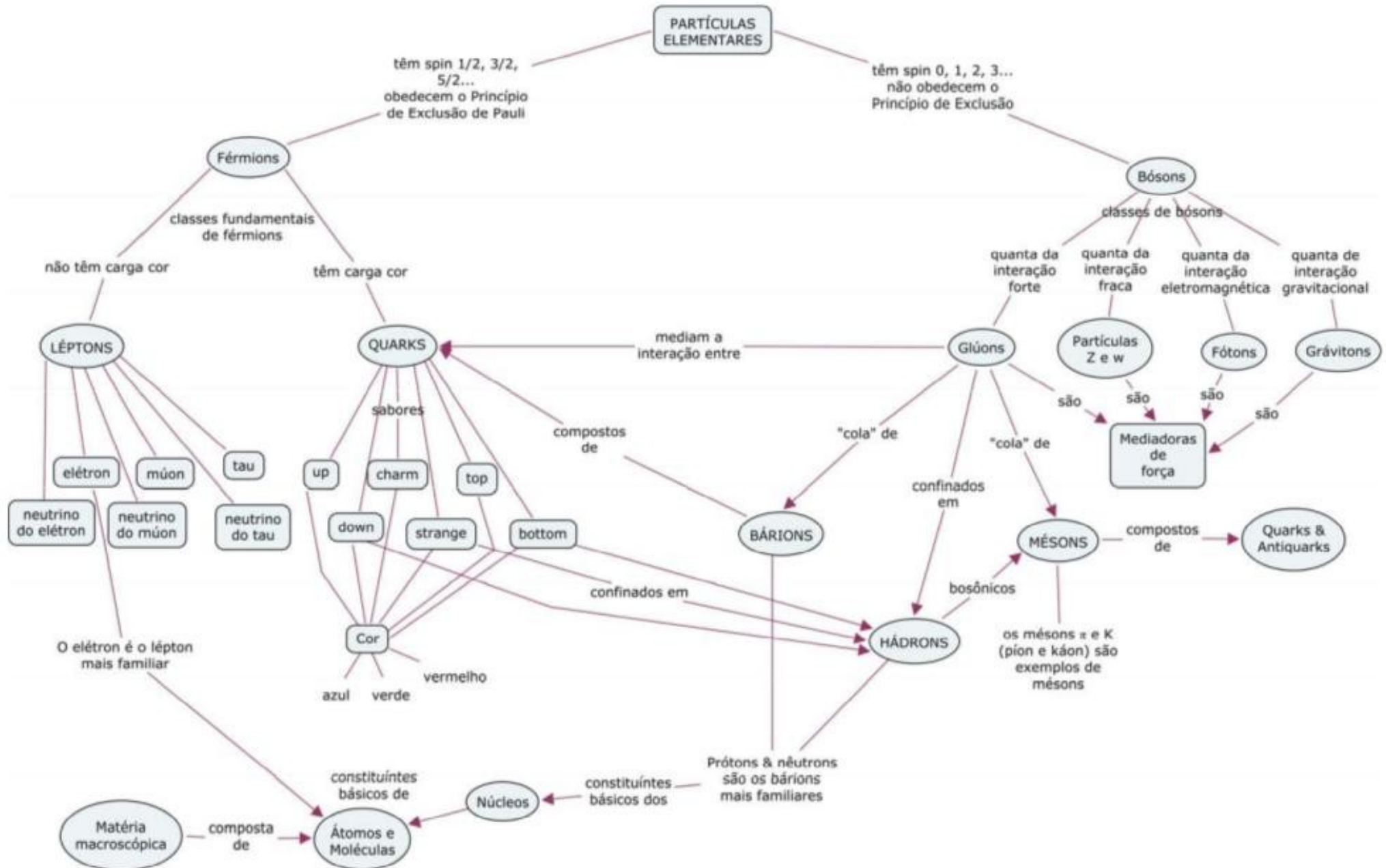
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-6}$	0
e^- electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ^- muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ^- tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c ²	Electric charge
u up	0.003	2/3
d down	0.006	-1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	-1/3
t top	175	2/3
b bottom	4.3	-1/3

BOSON spin = 0, 1, 2, ...
H⁰ Higgs spin = 0
massa: 125 GeV/c²
carga: 0

Resumo



Leis de Conservação

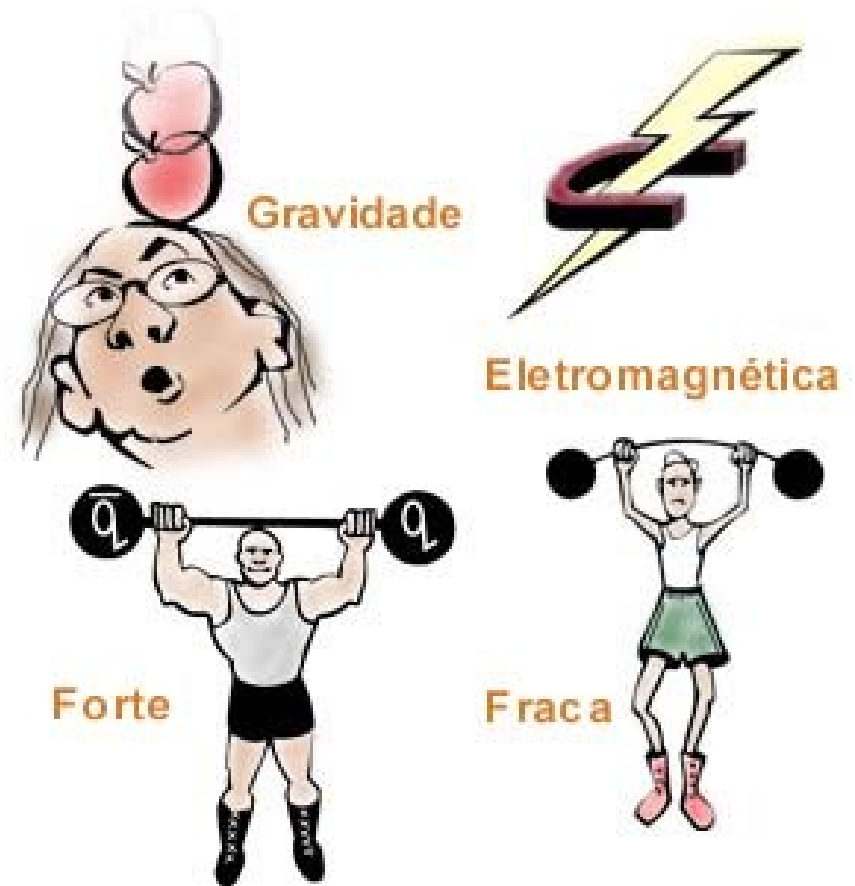
No **modelo padrão**, em **processos** físicos (interações entre partículas, decaimentos, fusões, etc.) são **conservados**:

- **Energia total** (mas não necessariamente a massa total, esta pode ser transformada em outras formas de energia, conforme $E = mc^2$, vide aulas sobre relatividade)
- **Momento linear total**
- **Carga elétrica total**
- **Número bariônico total**
- **Número leptônico total**
- Os números leptônicos de família com ressalvas

Interações fundamentais da natureza

- O Universo que conhecemos só pôde ser criado, por que as **partículas fundamentais** da natureza **interagem** entre elas. Essas interações incluem forças repulsivas, atrativas, de decaimento e aniquilação.
- Existem quatro **interações fundamentais** na natureza :

Força gravitacional,
eletromagnética,
nuclear fraca e
nuclear forte



Interações fundamentais da natureza

- Todos os fenômenos da natureza são provocados por essas quatro forças.
- Próton e nêutron dentro do núcleo são mantidos pela **força forte**.
- A **interação fraca** é responsável pelo decaimento beta dos núcleos atômicos.
- A queda de uma maçã e o movimento dos planetas são causados pela **força gravitacional**.
- Uma onda eletromagnética que se propaga, como a luz, as ondas de rádio ou as reações químicas que ocorrem nos neurônios em nossos cérebros são devidas à **força eletromagnética**.

Interações fundamentais da natureza

- Somente a **força gravitacional** tem um **caráter universal**, já que ela atua em toda matéria, independente da carga ou de qualquer outra propriedade.
- A força eletromagnética, por exemplo, tem sua origem na carga elétrica e portanto não atua em partículas sem carga como é o caso do nêutron.

Como as partículas interagem ?

- O problema é que as coisas interagem sem se tocar! Como dois ímãs "sentem" a presença um do outro e se atraem ou se repelem de acordo com a situação? Como o Sol atrai a Terra?

A resposta seria "magnetismo" e "gravidade", ***mas o que são essas forças?***

Em um nível fundamental, a força não é apenas algo que acontece para as partículas.

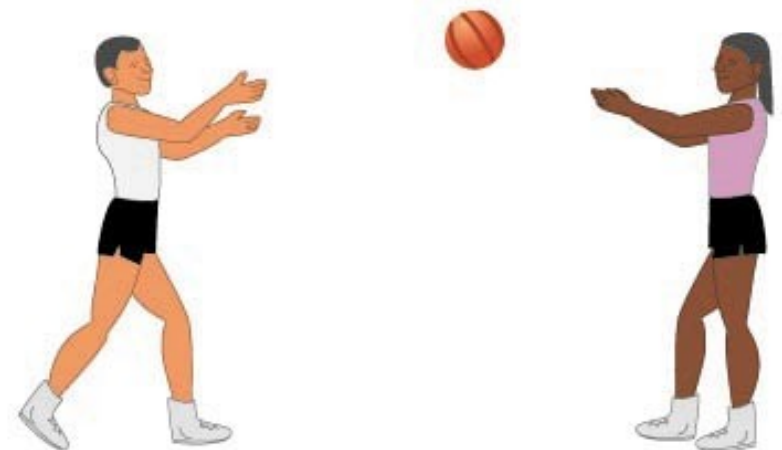
"É uma coisa que é trocada entre duas partículas".



- Descobriu-se que todas as interações que afetam as partículas da matéria são devidas a uma troca de **partículas transportadoras de força**, um tipo completamente diferente de partícula. Essas partículas são como bolas de basquete atiradas entre as partículas da matéria (que são como os jogadores de basquete). O que nós pensamos normalmente como "forças" são, na verdade, os efeitos das partículas transportadoras de força sobre as partículas da matéria.

Importante:

Uma partícula transportadora, de um tipo particular de força, só pode ser absorvida ou produzida por partículas da matéria que são afetadas por essa força. Por exemplo, elétrons e prótons têm carga elétrica; portanto, eles podem produzir e absorver as transportadoras de forças eletromagnéticas, ou seja, os fótons. Nêutrons, por outro lado, não têm carga elétrica, então eles não podem absorver ou produzir fótons.



Eletromagnetismo



A força eletromagnética faz com que objetos com cargas opostas se atraiam e objetos com cargas iguais venham a se repelir. Muitas forças do cotidiano, como a força de atrito, e até mesmo o magnetismo, são causadas pela força eletromagnética



A partícula transportadora da força eletromagnética é o **fóton** (γ).
O fóton é o *quantum* da radiação eletromagnética \rightarrow luz.

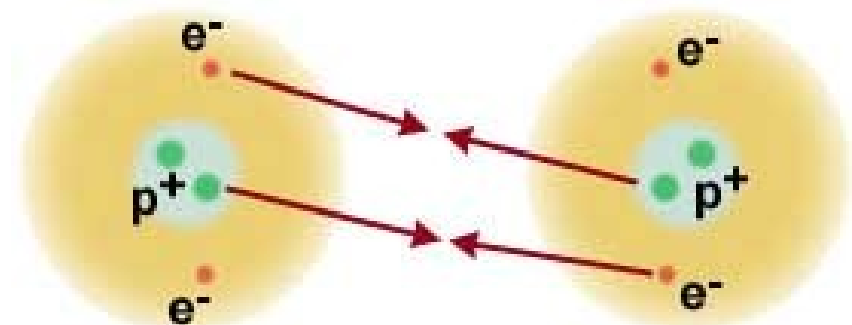
Fótons de energias das mais diversas varrem todo o espectro eletromagnético de raios-X, luz visível, ondas de rádio e assim por diante.

Os fótons têm massa zero e sempre viajam à "velocidade da luz", c , que é cerca de 300 000 000 metros por segundo.

Os átomos geralmente têm o mesmo número de prótons e de elétrons. Eles são eletricamente neutros, isso porque os prótons positivos existem em número igual ao dos elétrons negativos. **Uma vez que os átomos são neutros, o que faz com que eles se grudem formando moléculas estáveis?**

Resposta: *A força residual eletromagnética*. As partes carregadas de um átomo podem interagir com as partes carregadas de outro átomo. Isso permite que diferentes átomos se juntem.

É a força eletromagnética quem permite que os átomos se unam formando moléculas, mantendo o mundo unido e criando a matéria que interage conosco o tempo todo



Força residual E-M em ação: Os átomos são eletricamente neutros, mas os elétrons de um são atraídos pelos prótons do outro, e vice-versa!



E o núcleo? Quem o mantém unido?

- O núcleo é formado de prótons e nêutrons. Os nêutrons têm carga nula, e os prótons têm carga positiva e se repelem uns aos outros. Por que então o núcleo não explode?

Nós não podemos contar com o núcleo mantido unido apenas pela força eletromagnética. O que mais poderia ser? Gravidade? Não! A força gravitacional é fraca demais para exceder a força eletromagnética.



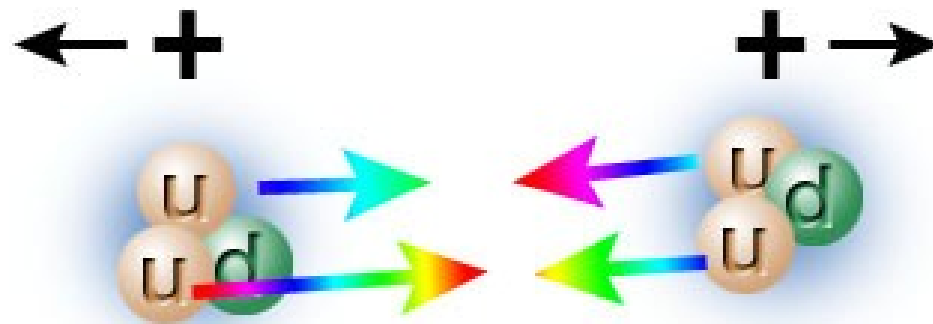
Força Forte



- Temos que saber mais coisas sobre os quarks que compõem os prótons e os nêutrons.
- Os quarks além da carga eletromagnética têm outro tipo de carga, a chamada **carga de cor**. A força entre partículas carregadas com cor é muito forte.
- A força forte segura os quarks grudados para formar os prótons e os nêutrons.
- Suas partículas transportadoras são chamadas de **glúons** (vem do inglês glue = cola)
- A carga de cor comporta-se de modo diferente da carga eletromagnética. Os glúons possuem carga de cor.
- E enquanto os quarks têm carga de cor, as **partículas compostas** de quarks (prótons, nêutrons, ...) não têm essa carga (elas têm **cor neutra**). Por essa razão, a força forte apenas é levada em consideração em interações **entre quarks**. Ela **não** age entre os núcleos de **átomos diferentes**.
- ! Ela **aumenta** com a distância até $\sim 1 \text{ fm}$ (10^{-15} m), distância, a partir daquela ela cai para zero (distância de alcance da força)

Força Forte Residual

- A **força forte** prende os quarks juntos por terem **carga de cor**. Mas isso ainda não explica o que mantém o núcleo unido....
- Não é à toa que a força tem o nome de forte. A força forte entre os quarks de um próton e os quarks de outro próton é **forte** o bastante para **superar** a **força eletromagnética repulsiva**.



Isso é chamado de **interação forte residual**, e é essa interação que **mantém** o **núcleo coeso**.

Força Fraca



- Sabemos que existem seis tipos de quarks e seis tipos de léptons (o elétron e seu neutrino são léptons).
- Toda matéria estável no Universo é composta pelos quarks mais leves (up e down) e pelo elétron que é o lépton carregado mais leve.
- **Interações fracas** são as responsáveis pelo decaimento de quarks e léptons pesados em quarks e léptons mais leves. Quando partículas fundamentais decaem observamos seu desaparecimento e sua substituição por duas ou mais partículas diferentes. Mesmo que o total de massa e energia seja conservado, um pouco da massa original da partícula é convertido em energia cinética, e as partículas resultantes sempre têm menos massa que a partícula original que decaiu.
- *A única matéria estável ao nosso redor é composta dos quarks e léptons de menor massa, que não podem mais decair.*
- As partículas transportadoras das interações fracas são as partículas W^+ , W^- , e a Z (ou Z^0). As W são carregadas eletricamente e a Z é neutra. Elas são partículas com massa, ao contrário do fóton que media a interação eletromagnética.

Gravidade



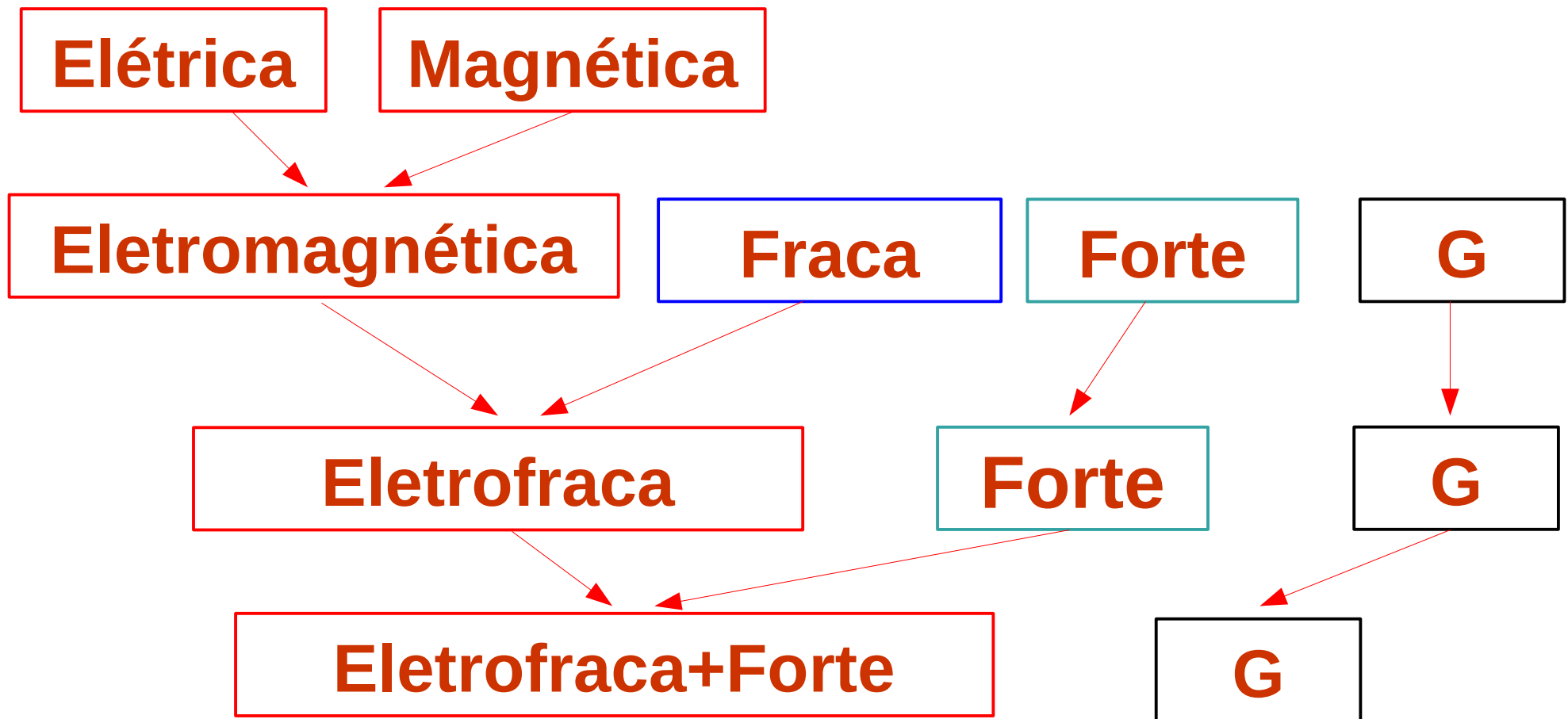
- A gravidade certamente é das interações fundamentais, mas ela é um pouco **mais complicada** (na Relatividade Geral, ela não é bem uma força, vide aulas sobre)
- A partícula transportadora da gravidade ainda não foi encontrada. Tal partícula, contudo, foi prevista e poderá ser encontrada um dia: o **gráviton**.
- Os efeitos da gravidade são **extremamente pequenos** (comparado com as outras três interações) na maioria das situações em física de partículas. O Modelo Padrão funciona bem mesmo sem explicar a gravidade.

Resumo sobre as interações



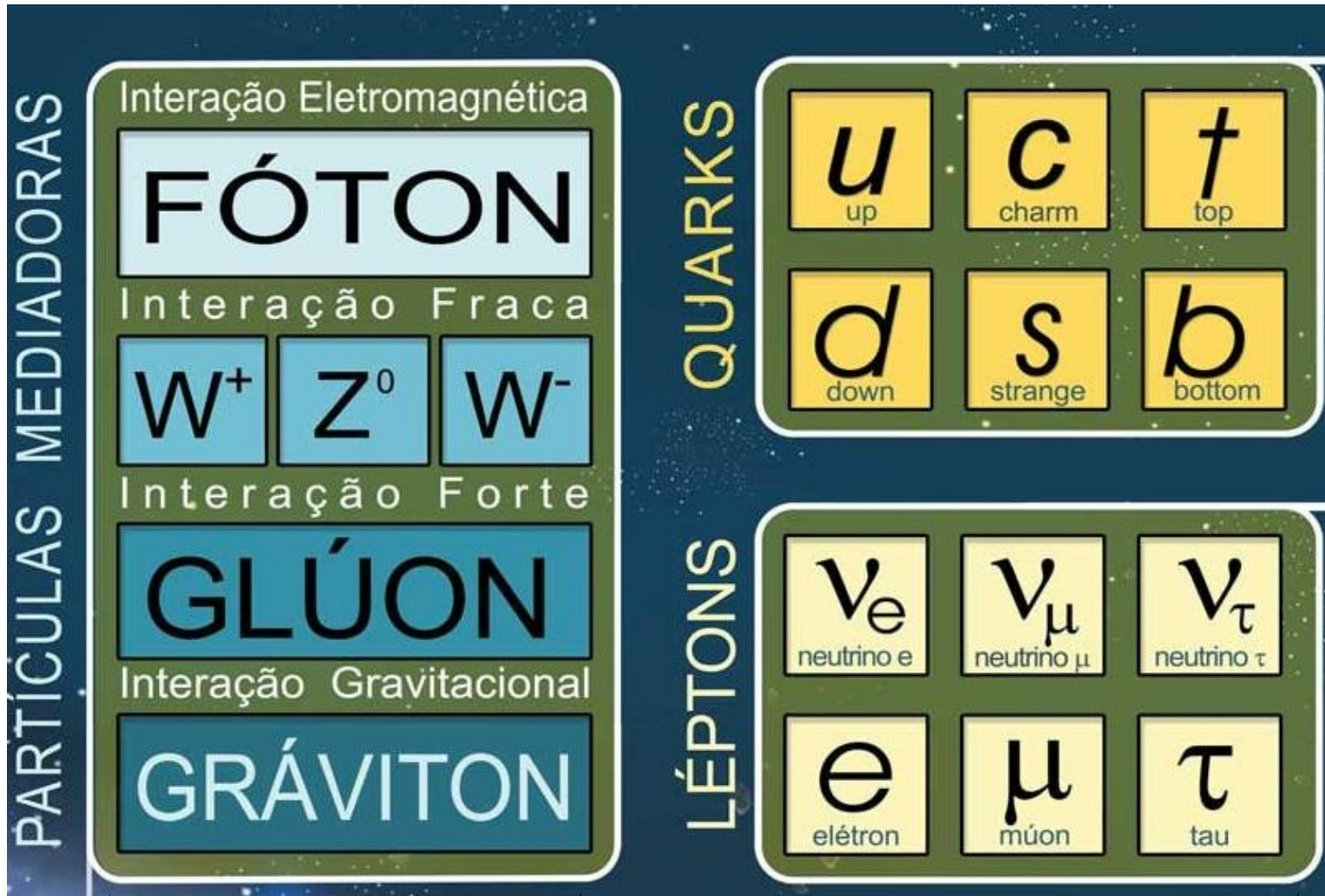
	Gravidade	Fraca Eletromagnética (Eletrofraca)	Forte
Transportada por:	Gráviton <small>(ainda não observado)</small>	W^+ W^- Z^0	Fóton
Atua em:	TODAS	Quarks e Léptons	Quarks e Glúons
Vida média [s]	-	10^{-8}	10^{-16}
Seção choque [m ²]	-	10^{-22}	10^{-36}
Alcance [m]	∞	10^{-18}	∞
Intensidade	10^{-4^0}	10^{-6}	1/137

O Santo Graal da ciência



O Modelo Padrão

1^a 2^a 3^a <= gerações



+ anti-partículas

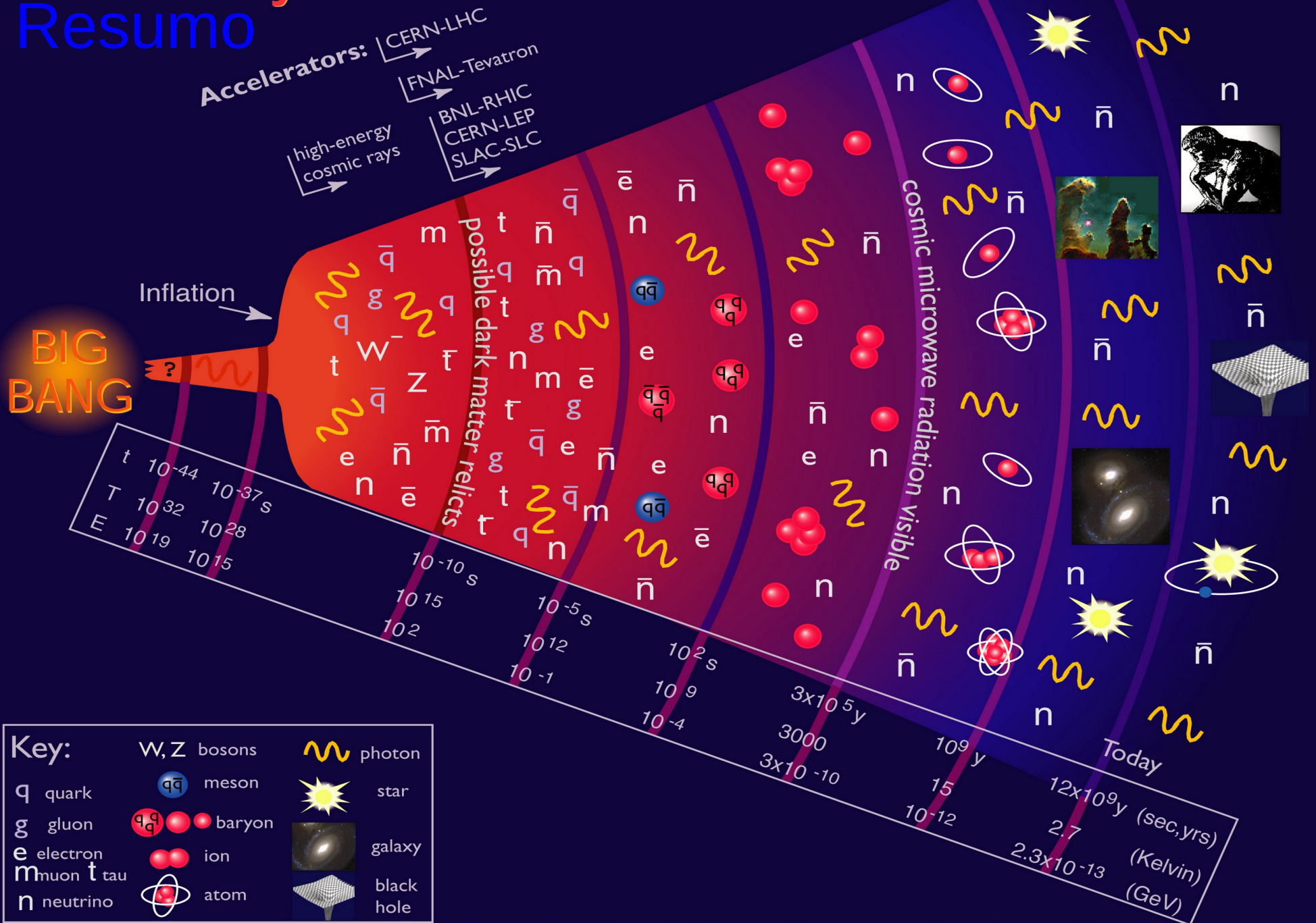
+ bóson de Higgs

bósons

férmions

History of the Universe

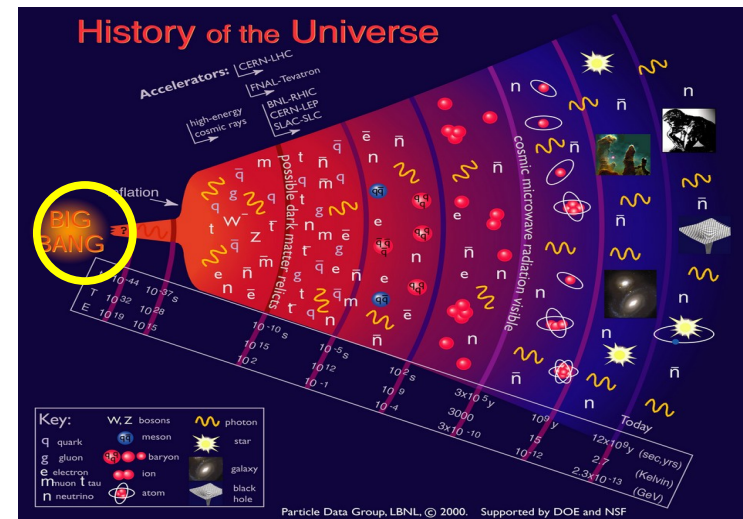
Resumo



Teoria do *Big Bang*

0:

Big Bang, começo do tempo. O Universo "nasce" de uma singularidade inicial, q. d. um estado de densidade e temperatura infinitas.



Desde então: **Expansão**, **redução** da **temperatura**.

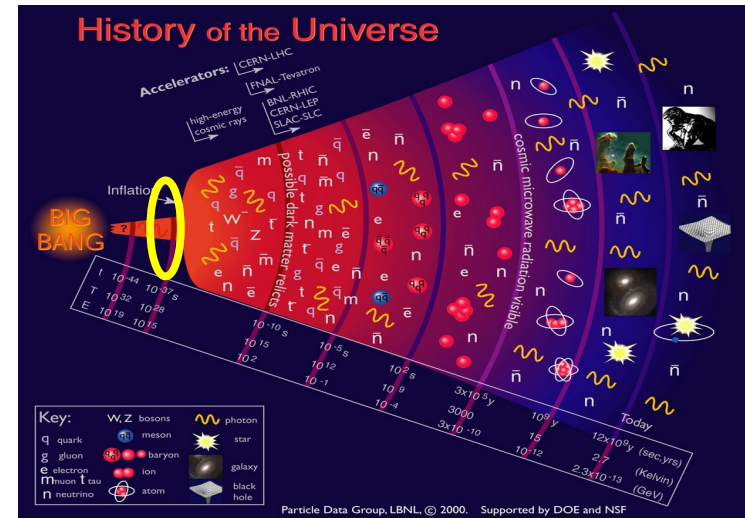
até $\sim 5 \cdot 10^{-44}$ sec ($T \geq 10^{32}$ K):

Época de **Planck**: densidade e temperatura altas demais para ser tratada pela física que conhecemos hoje.

Teoria do *Big Bang*

$5 \cdot 10^{-44} \text{ s} - 10^{-36} \text{ s}$: $T \geq 10^{28} \text{ K}$:

Época da **GUT** (*Grand Unified Theory*, "Grande Teoria Unificada"): As forças **eletromagnética**, **nuclear forte** e **fraca** eram **unificadas** em uma.



O Universo consistia de uma "sopa" primordial de **quarks** (os constituintes dos prótons e dos nêutrons) e **partículas transportadoras de forças** (fótons, grávitons, glúons, ...).

Matéria e **anti-matéria** se formavam e aniquilavam constantemente.

Teoria do *Big Bang*

10^{-36} s - 10^{-34} s ($T \sim 10^{28}$ K):

Inflação: aumento exponencial do tamanho do Universo por um fator $\geq 10^{43}$ em $< 10^{-34}$ s (\Rightarrow aula Inflação).

A "sopa" primordial continuou, mas parte das **partículas** virtuais (aquelas que estavam se formando e aniquilando) se tornaram **reais**.

Nesta época devem ter sido emitidas intensas **ondas gravitacionais**.

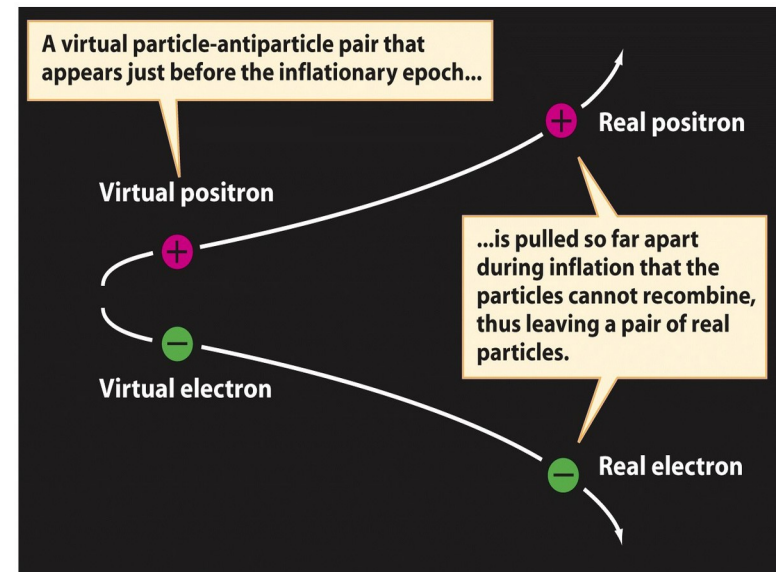
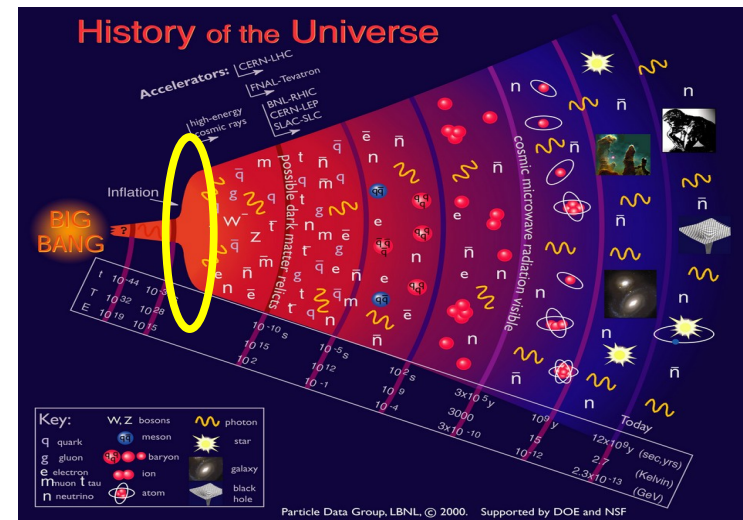


Figure 27-10
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Teoria do *Big Bang*

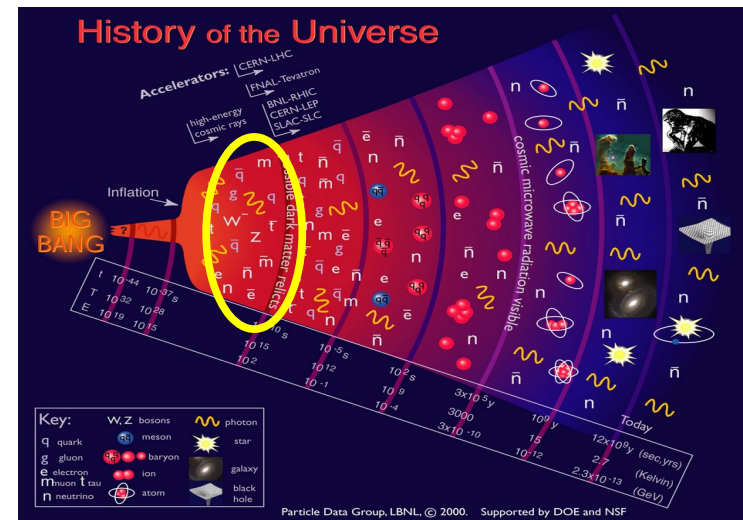
10^{-34} s - 10^{-11} s:

10^{28} K $\geq T \geq 10^{15}$ K:

Época **Eletrofraca**: As forças **eletromagnética** e **fraca** ainda eram **unificadas** em uma, a força **eletrofraca**, enquanto a força **forte** já era uma força **distinta**.

A "sopa" primordial continuou.

Esta época é, às vezes, chamada de "grande deserto", por que não houve formação de partículas novas.



Teoria do *Big Bang*

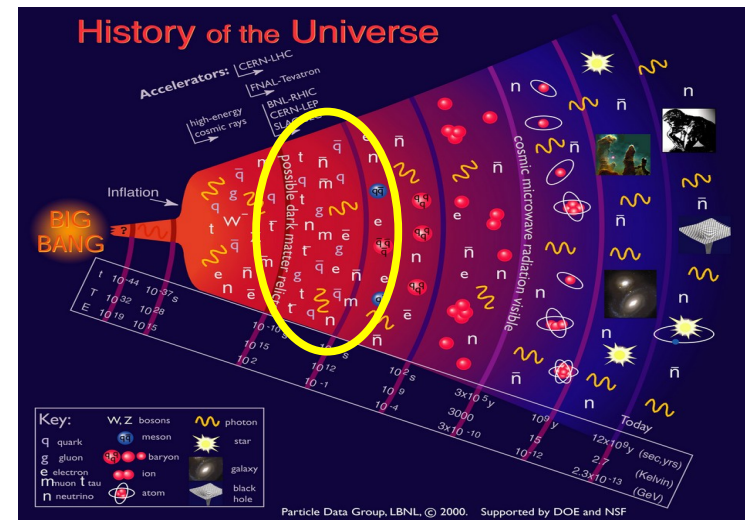
10^{-11} s - 1 ms:

10^{15} K $\geq T \geq 10^{12}$ K:

Até 10^{-5} s, Era dos Quarks, depois Época das **Partículas**: As forças **eletromagnética** e fraca se "**desacoplaram**", q. d. se tornaram duas forças **distintas**.

Bariogênese: A "sopa" primordial se tornou **prótons** e **nêutrons** (bárions, 3 quarks) e mésons (pares quark-antiquark), sobrando de um pequeno **desequilíbrio** entre matéria e anti-matéria $10^{9+1} : 10^9$.

São os mesmos prótons e nêutrons que constituem a matéria hoje.



Teoria do *Big Bang*

1 ms - ~5 min:

$10^{12} \text{ K} \geq T \geq 10^9 \text{ K}$:

Época da Nucleossíntese:
Fusão nuclear dos prótons e nêutrons, formando núcleos de hélio e um pouquinho de deutério, lítio e berílio.

=> composição química primordial do Universo:

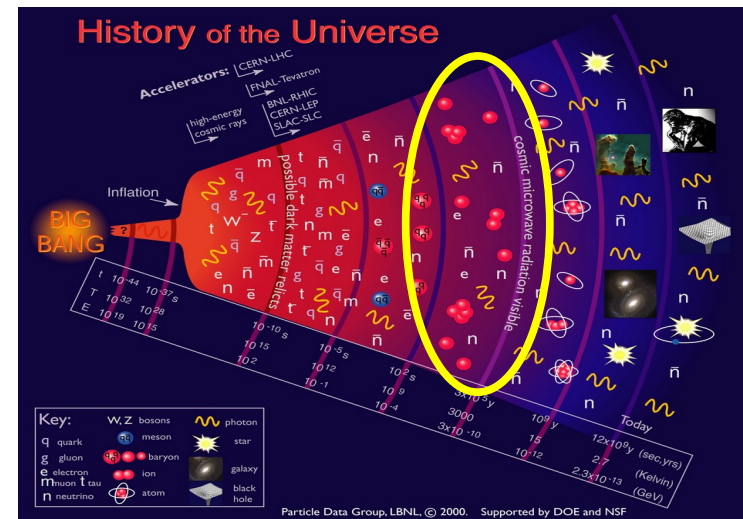
H (~76%), He (23% a 24%), D (0.01%), Li (< 0.01%).

~98% dos átomos de hoje

(=> aula Nucleossíntese Primordial)

Durante esta época também aconteceram:

- ~0.1 s: desacoplamento dos neutrinos
- ~1.3 s: aniquilação e^-e^+



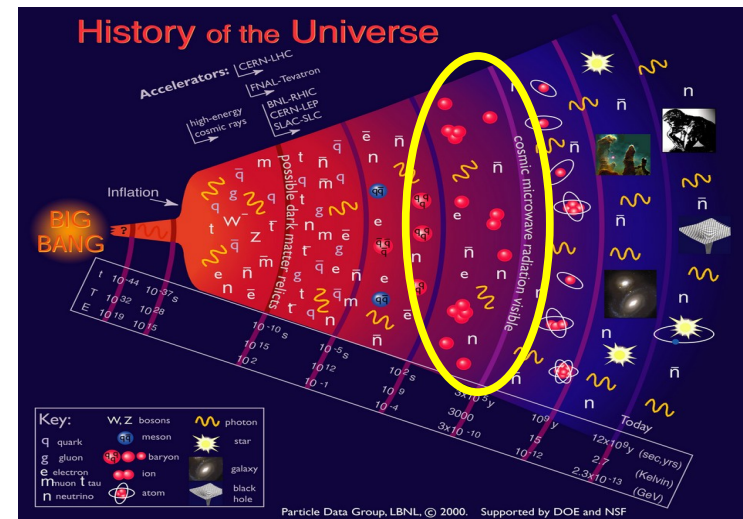
Teoria do *Big Bang*

4 min - ~378 000 anos:

$10^9 \text{ K} \geq T \geq 3000 \text{ K}$:

Época dos Núcleos:
Núcleos e elétrons interagindo constantemente com fótons ("partículas de luz").

No meio desta época, em ~50 000 anos, respectivamente ~9000 K, a densidade das partículas ultrapassa aquela dos fótons, a Era da Radiação termina e a da Matéria começa (=> aula O Modelo Λ CDM).



Teoria do *Big Bang*

~378 000 anos, $T = \sim 3000$ K:

Final da Época dos Núcleos

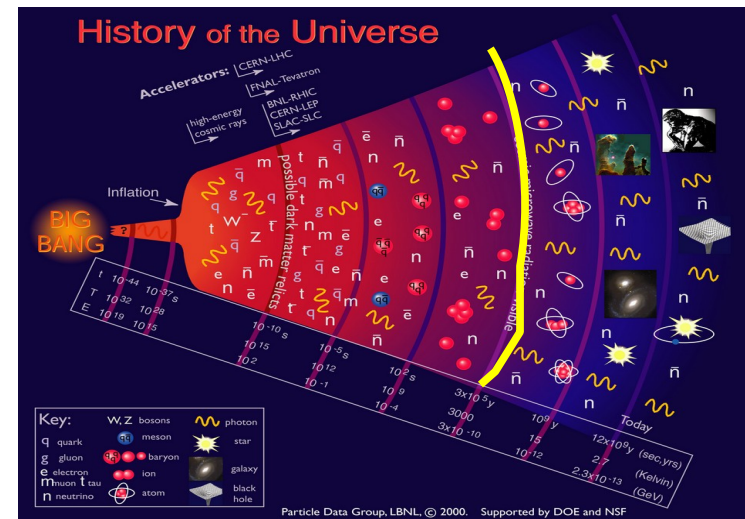
"**Re-combinação**": **núcleos** e **elétrons** formando **átomos**:
elétricamente neutros

=> **não interagem** mais com
os **fótons**

=> Desde então, a luz pode viajar livremente pelo espaço, "o Universo se tornou transparente".

A luz emitida/espalhada pouco antes, na "superfície de última difusão" (ou de último espalhamento) ainda está permeando o Universo e pode ser observada como

Radiação Cósmica de Fundo (=> aulas RCF).



Teoria do *Big Bang*

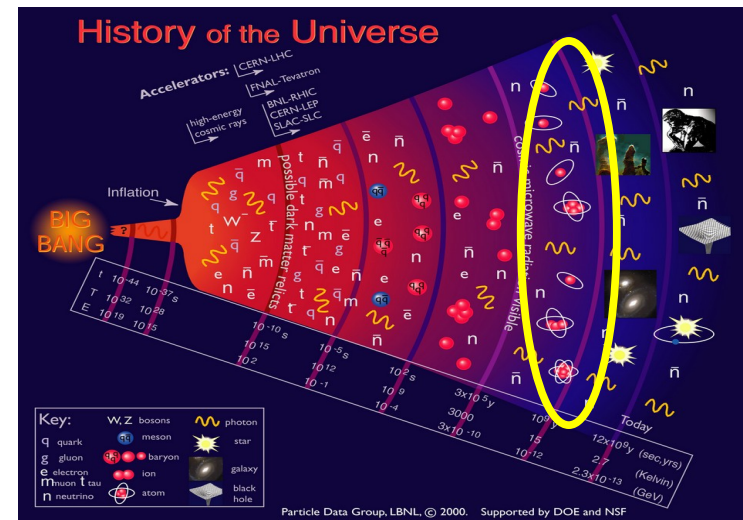
A partir das 378 000 anos:

Época dos **Átomos**:
átomos e ainda um pouco de plasma consistindo de **íons** e **elétrons**, "Idade das trevas".

Após alguns 100 mi. de anos
($T \sim 15$ K):

Formação de **estrelas** e **galáxias**.

A radiação gerada na formação destes objetos causou a **Reionização** do gás no Universo, principalmente do hidrogênio. Nesta época a densidade já tinha diminuído tanto, que este novo plasma não interferiu significativamente na propagação da RCF.

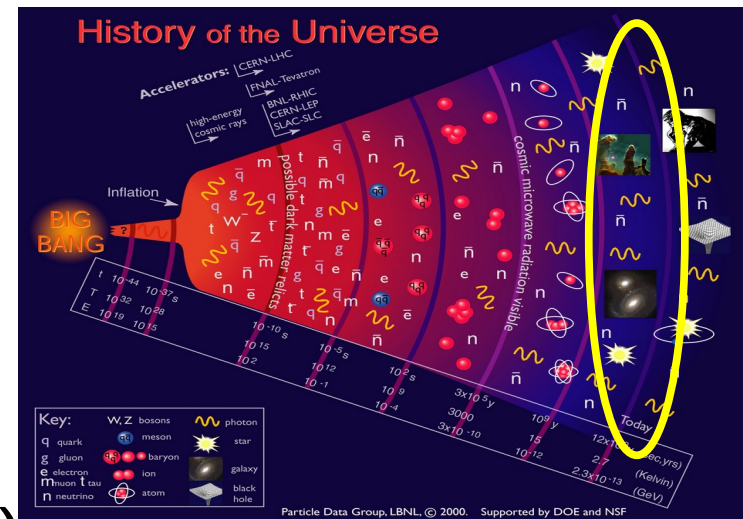


Teoria do *Big Bang*

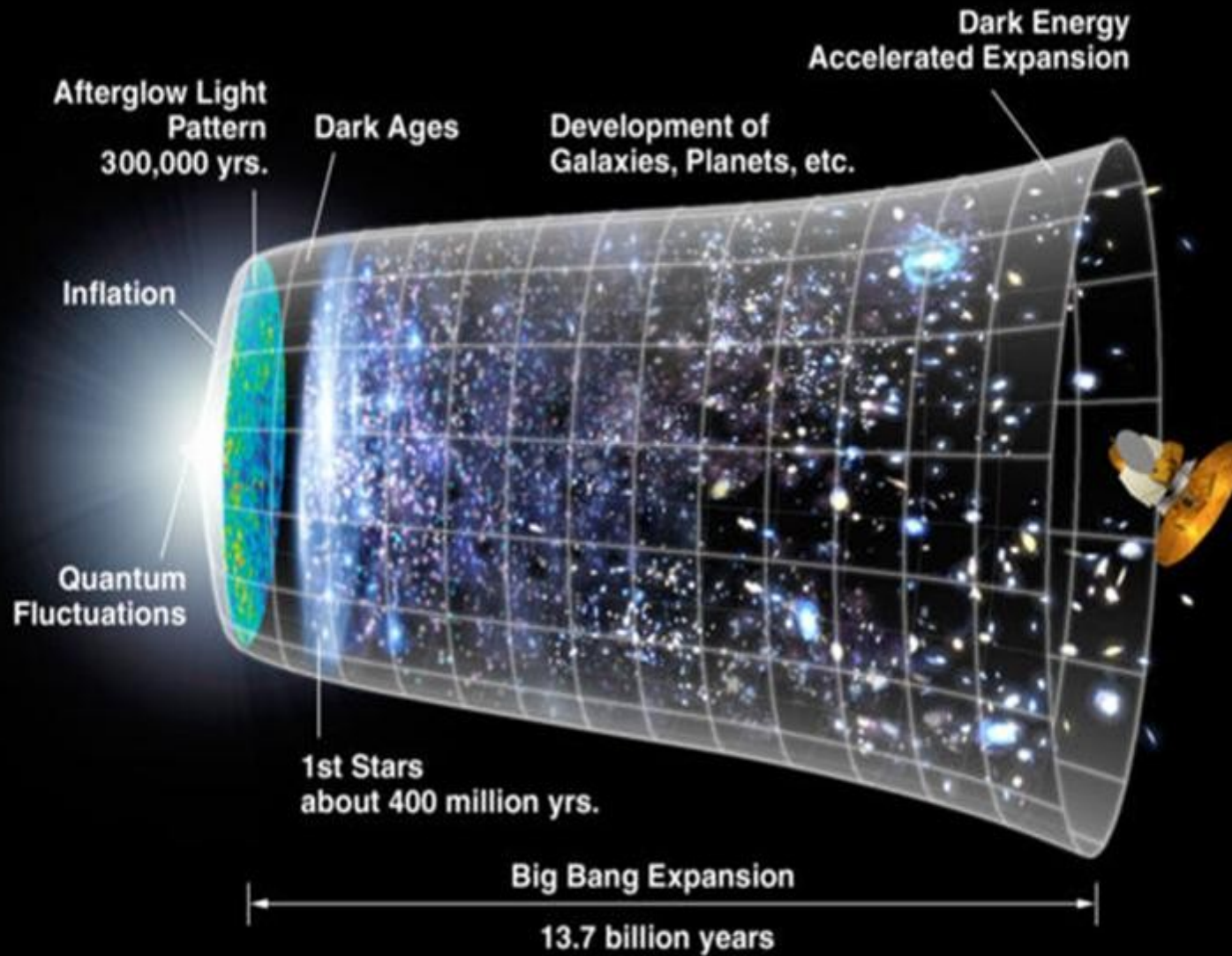
De ~1 bi. de anos até hoje:

Época das **galáxias**:
Galáxias se formando e
fusionando, formando **Grupos**,
Aglomerados e
Super-Aglomerados
(=> aula Evolução de Estruturas)

No meio, a Era da Matéria dá lugar à Era Λ
(=> aula O Modelo Λ CDM), naquela o Universo está
expandindo aceleradamente (=> Energia Escura).



Resumo



Outro Resumo: *Redshifts* de Formação de algumas Estruturas

Structure	Redshift
Density fluctuations in CMB	$[z_{\text{dec}}]_{\text{WMAP}} = 1089$
Spheroids of galaxies	$z \sim 20$
The first engines of active galactic nuclei	$z \geq 10$
The intergalactic medium	$z \sim 10$
Dark halos of galaxies	$z \sim 5$
The first 10% of heavy elements	$z \geq 3$
Rich clusters of galaxies	$z \sim 2$
Thin disks of spiral galaxies	$z \sim 1$
Superclusters, walls, and voids	$z \sim 1$

Tabela 30.3 do livro



Universidade Federal do ABC

Introdução à Cosmologia

FIM PRA HOJE

