



Um modelo Standard para o Universo



Partículas e Forças

O nosso Universo é governado por **quatro forças fundamentais: *força gravítica, força eletromagnética, força forte e força fraca.***

Estas forças revelam-se quando duas ou mais partículas interagem entre si.

Essa interação faz-se por meio da troca de partículas chamadas **bosões**.

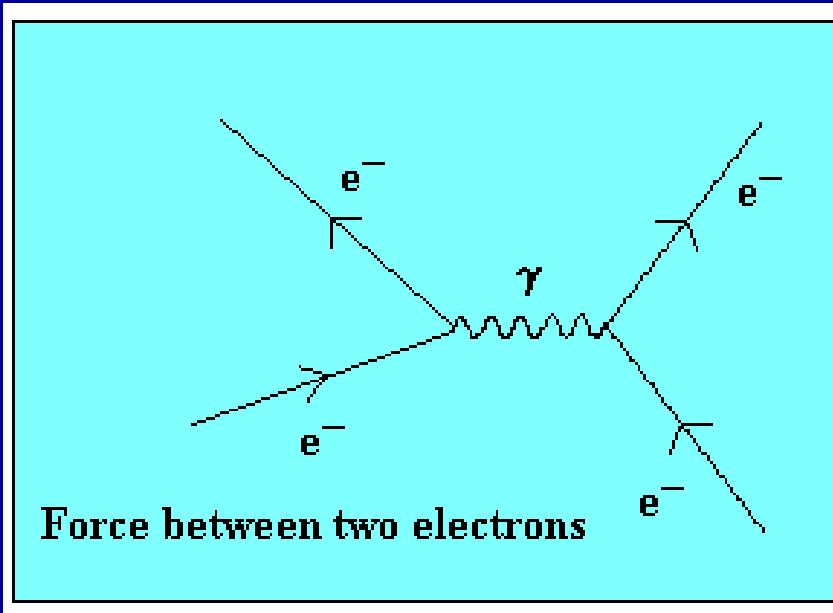


Diagrama de Feynman mostrando a interação entre dois elétrons.

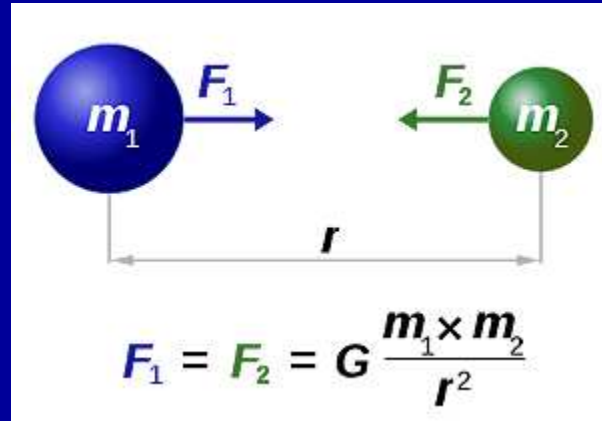
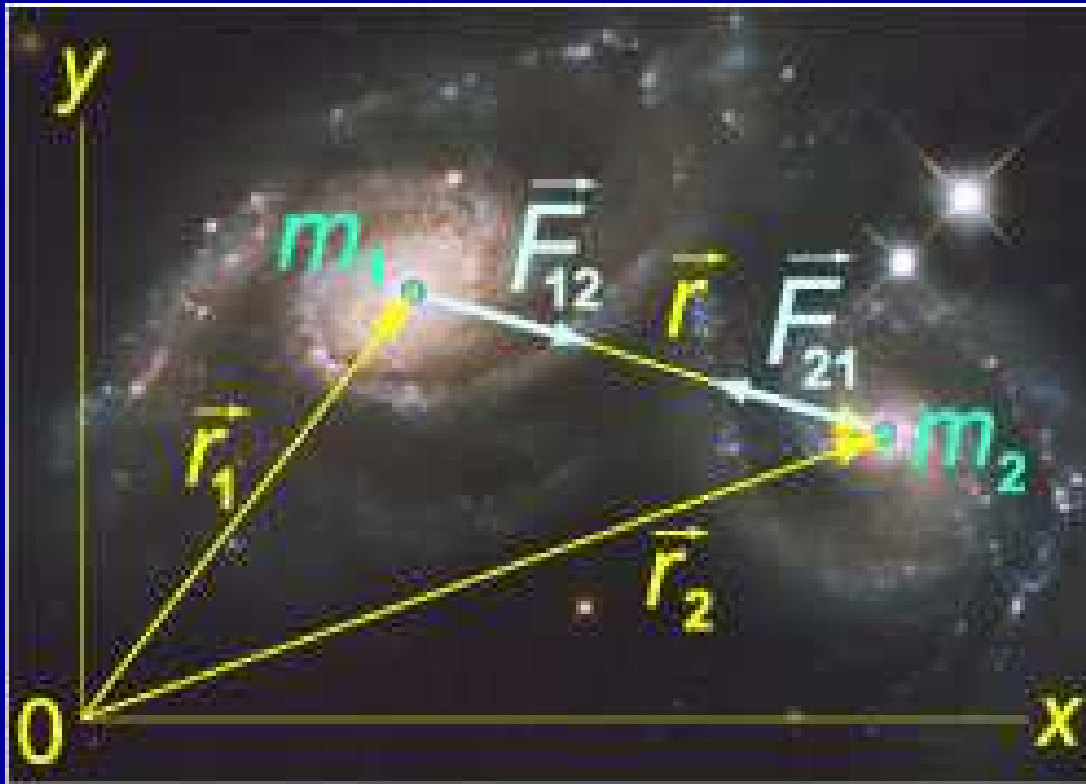
Do ponto de vista clássico sabemos que os dois elétrons repelem-se pois trata-se de cargas do mesmo sinal.

Na escala quântica os dois elétrons aproximam-se (sem se tocarem), trocam um fóton entre si, e depois afastam-se.



Gravidade: força de longo alcance que atua entre os corpos que têm massa.

É mediada por **gravitões** (partículas nunca observadas).



<http://plus.maths.org/content/how-does-gravity-work>

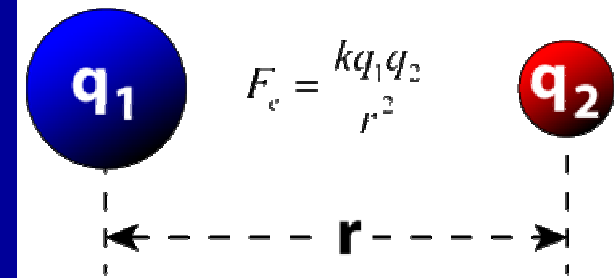
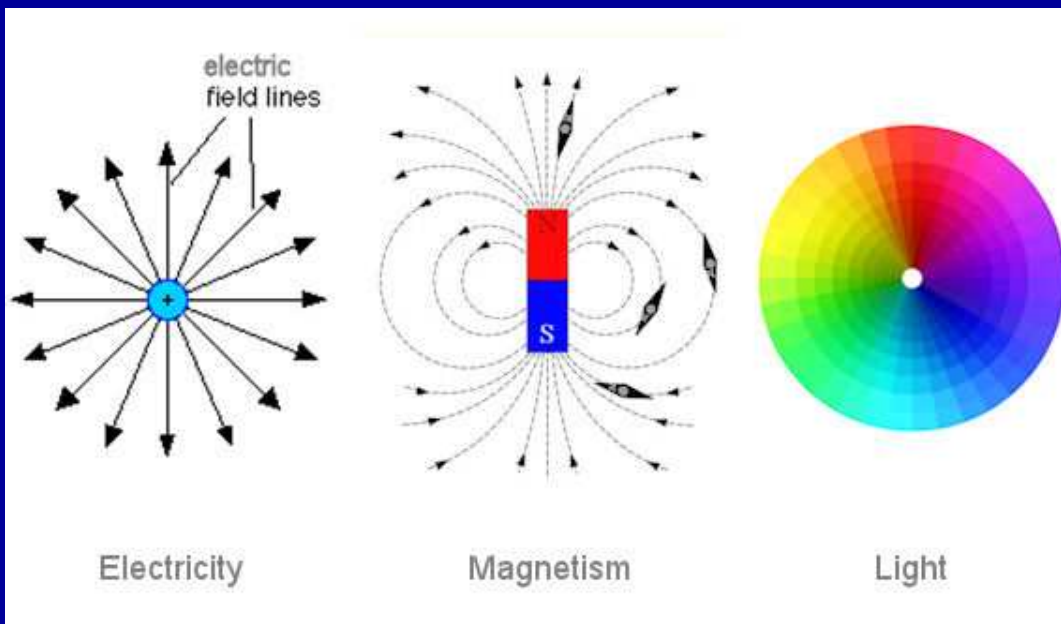


Eletromagnética: força de longo alcance que atua entre partículas com carga elétrica (e.g. prótons, elétrons).

É mediada por **fótons**.

Manifesta-se sob a forma de campo elétrico ou de campo magnético

Lei de Coulomb:

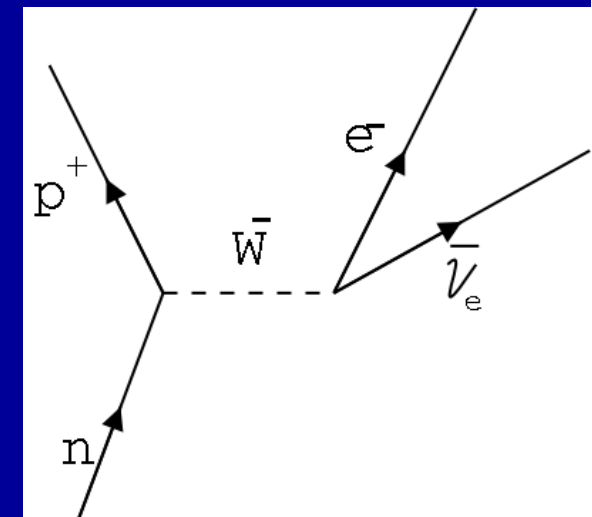
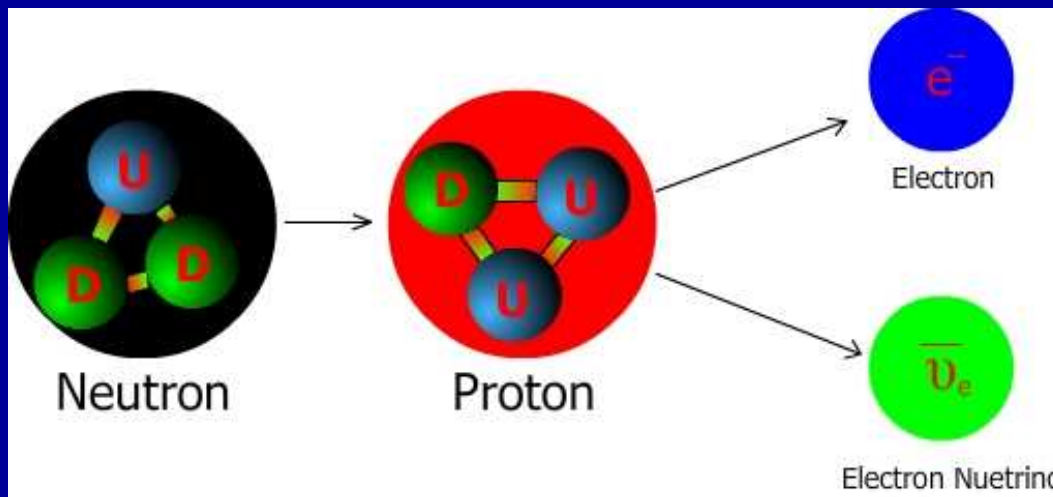


<http://www.aplusphysics.com/courses/honors/estat/Coulomb.html>



Força fraca: força de curto alcance responsável por certos processos nucleares como o **decaimento beta** (e.g. conversão entre um neutrão e um próton com a emissão de um eletrão e de um antineutrino).

É mediada por **bosões W e Z**.



<http://www.barnsley.org/penistone-grammar/science/HTML%20Files/Quarks.html>

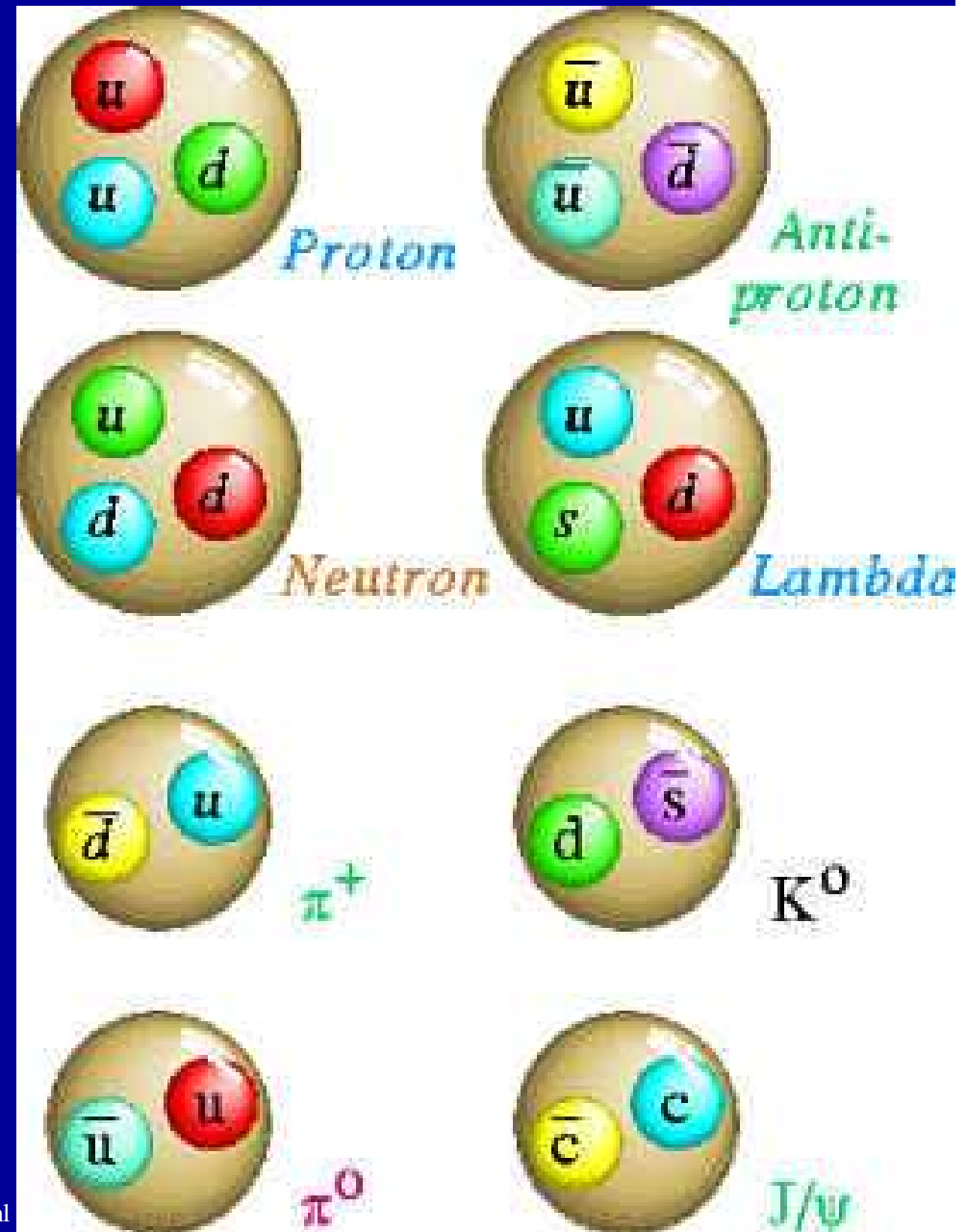
<http://pfnicholls.com/physics/particles4.html>



Força forte: força de curto alcance que atua entre partículas com **carga de ‘cor’**, ou seja, entre gluões e quarks.

É, por exemplo, a força responsável por manter a coesão dos quarks num próton (uud).

É mediada por **gluões**.



Fundamental Forces

<i>Strong</i>	<p>Force which holds nucleus together</p>	Strength 1	Range (m) 10^{-15} (diameter of a medium-sized nucleus)	Particle gluons, π (nucleons)
<i>Electro-magnetic</i>		Strength $\frac{1}{137}$	Range (m) Infinite	Particle photon mass = 0 spin = 1
<i>Weak</i>	<p>neutrino interaction induces beta decay</p>	Strength 10^{-6}	Range (m) 10^{-18} (0.1% of the diameter of a proton)	Particle Intermediate vector bosons W^+ , W^- , Z_0 . mass > 80 GeV spin = 1
<i>Gravity</i>		Strength 6×10^{-39}	Range (m) Infinite	Particle graviton ? mass = 0 spin = 2

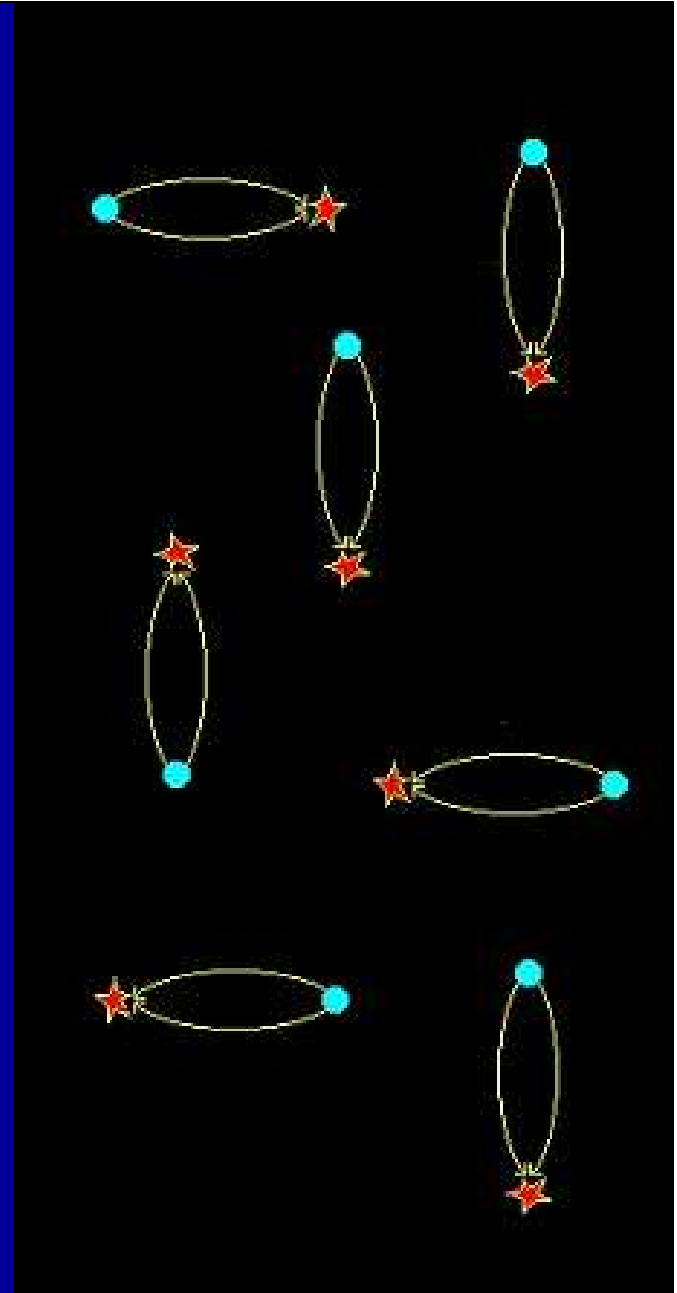


De acordo com o **Princípio da Incerteza de Heisenberg**, o **espaço vazio** não pode ser considerado completamente vazio.

Existe sempre uma certa quantidade de incerteza associada a cada ponto do espaço.

Essa incerteza manifesta-se na forma de **flutuações** partícula-antipartícula (por exemplo fóton-antifóton, elétron-antieletrão ...).

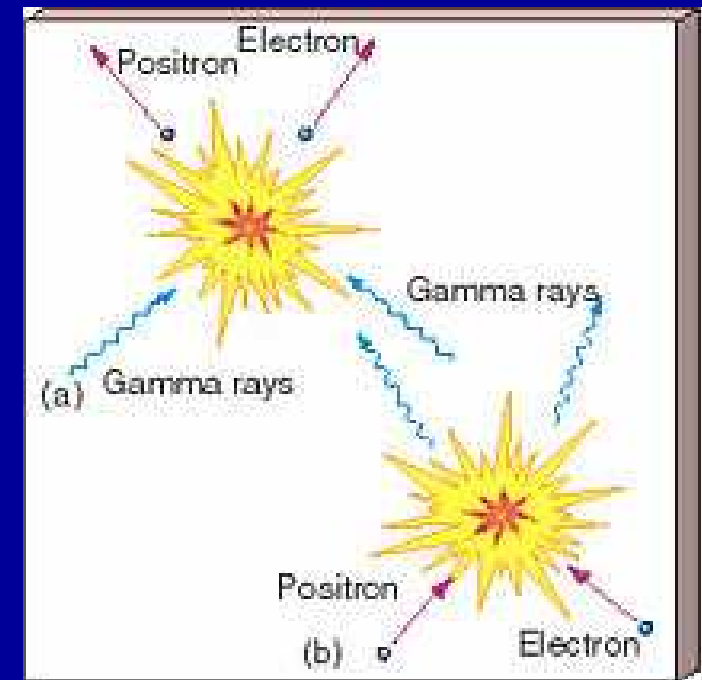
Cada par separa-se por breves instantes para logo depois se aniquilar novamente.



No entanto, se por meio de algum processo, aplicarmos energia suficiente conseguimos separar as duas partículas tornando-as em **partículas reais**.

Podemos criar, por exemplo, um par elétron – positrão (matéria – *antimatéria*).

Mais tarde as duas partículas podem encontrar-se e aniquilar-se resultando daí a libertação de radiação eletromagnética.





Modelo Standard de Física de Partículas (SMPP):

O SMMP foi testado com grande sucesso e precisão, descreve a teoria das interações **Forte**, **Fraca** e **Eletromagnética**.

A interação **gravítica** fica de parte pois ainda não temos uma Teoria da Gravidade Quântica.

Existem partículas que não reagem à força Forte.

Estas designam-se por **leptões**.

O eletrão é um leptão.

Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass	2.4 MeV/c ²	1.27 GeV/c ²	171.2 GeV/c ²	0
charge	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	1
name	u up	c charm	t top	γ photon
	4.8 MeV/c ²	104 MeV/c ²	4.2 GeV/c ²	0
	-1/3	-1/3	-1/3	0
	1/2	1/2	1/2	1
Quarks	d down	s strange	b bottom	g gluon
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	91.2 GeV/c ²
	0	0	0	0
	1/2	1/2	1/2	1
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	Z⁰ Z boson
Leptons	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	80.4 GeV/c ²
	-1	-1	-1	±1
	1/2	1/2	1/2	1
	e electron	μ muon	τ tau	W[±] W boson
				Gauge Bosons

Uma das propriedades utilizadas para classificar as partículas elementares é o chamado *spin*.

Bosões: spin inteiro

Fermiões: spin fracionário

Um bóson especial é o chamado **bosão de Higgs** que é o responsável pelo facto de as **partículas terem massa**. (não representado neste esquema)



Existem 3 constantes fundamentais na natureza:

Velocidade da luz (**c**), Constante de gravitação (**G**) e constante de Planck (**h**).

Podemos combinar estes valores de diversas formas.

Em particular fazendo:
$$t_P \equiv \sqrt{\frac{hG}{c^5}} \approx 5.39106(32) \times 10^{-44} \text{ s}$$

obtemos uma grandeza com as dimensões do tempo.

A ordem de grandeza do seu valor é de **10^{-43}s** (*tempo de Planck*) representa o instante mais pequeno com significado para a Física atual.

Se multiplicarmos este valor pela velocidade da luz obtemos uma distância, **10^{-35}m** (*comprimento de Planck*) que representa a distância mais pequena com significado para a Física atual.



Big Bang

Era de Planck

Quando a idade do Universo era inferior ao Tempo de Planck todas as quatro forças fundamentais estavam unificadas numa única força .

Durante esta fase, designada por era de Planck, a teoria da Relatividade Geral deve ser substituída por uma *Teoria da Gravidade Quântica* (combinando a Relatividade Geral com a Mecânica Quântica).

Esta teoria deve unificar a gravidade ao lado das outras três forças fundamentais.

Seria aquilo a que chamamos uma **Teoria de Tudo**.



Era da Grande Unificação $t = 10^{-43} s$

Quando a idade do Universo é da ordem do tempo de Planck a força gravítica separa-se das outras três que continuam unificadas.

Entramos na Era da Grande Unificação.

O Universo é, nesta fase, um plasma composto por quarks, glúons, leptões, fótons, bósons X e respetivas antipartículas.

Todas as partículas estão presentes em igual abundância e são continuamente convertidas umas nas outras mediante colisões altamente energéticas.



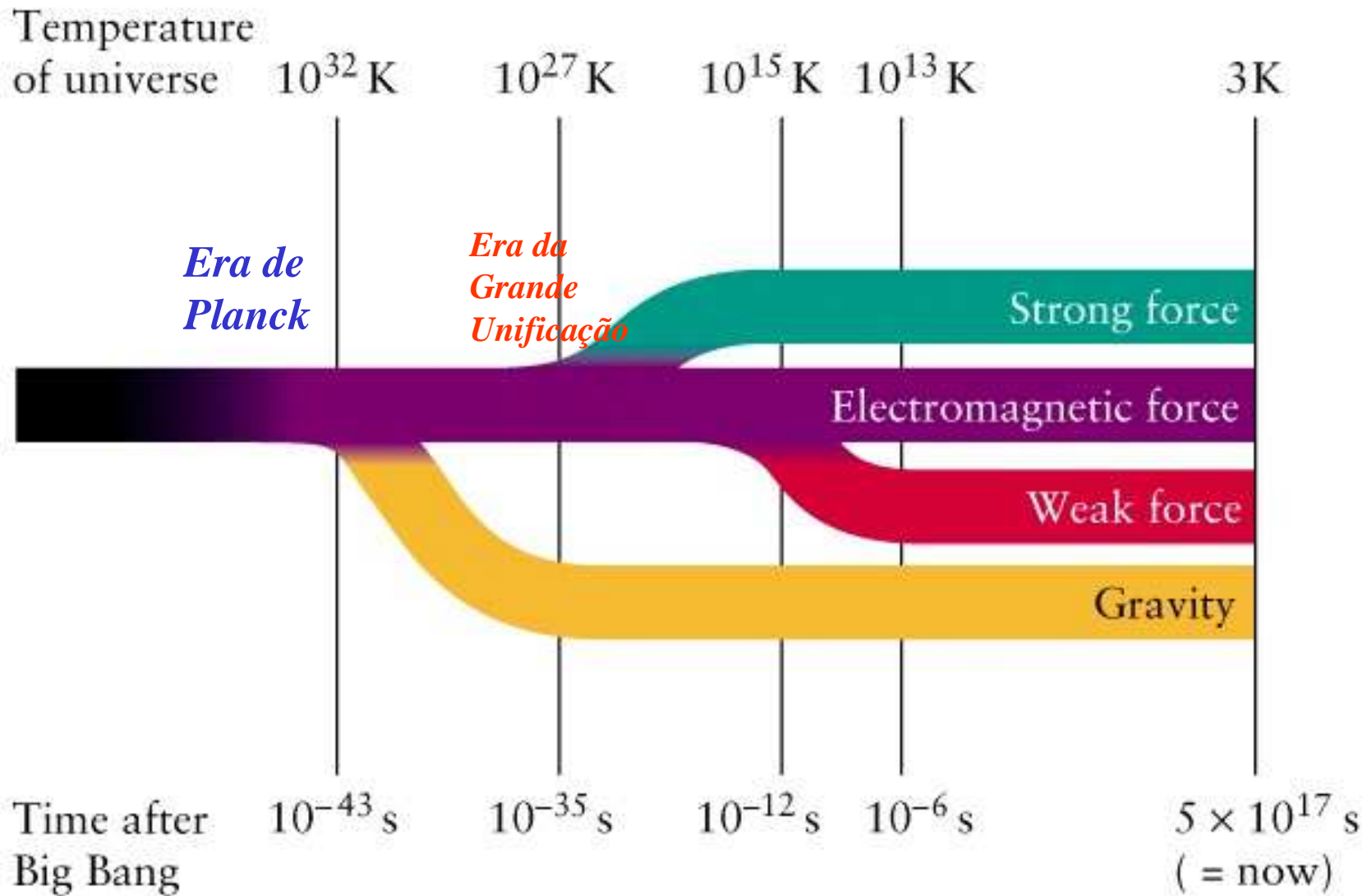
O Universo encontra-se em expansão e, portanto, a sua temperatura decresce.

Deixa também de ser possível a conversão entre léptões e quarks.

Como consequência temos que a Força Forte separa-se das outras duas num processo a que designamos por :

Transição Forte-EletoFrac $t = 10^{-35} s$

A partir deste momento apenas as forças Fraca e Eletromagnética continuam unificadas (constituindo a chamada força EletoFrac).





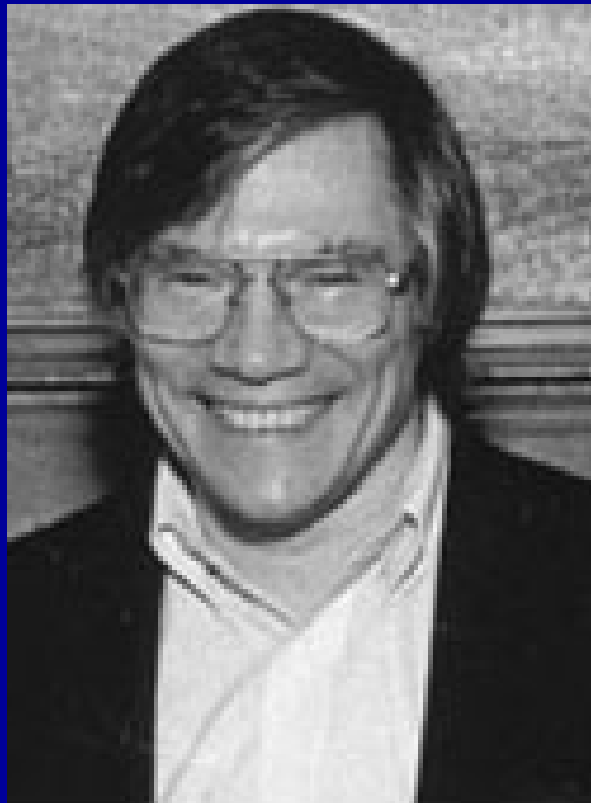
Inflação $t = 10^{-35} s$

Juntamente com a separação das força forte ocorreu no Universo um processo de inflação.

O Universo deixou de se expandir ao ritmo normal para sofrer uma expansão exponencial.

O tamanho do Universo aumentou entre 10^{50} e 10^{70} vezes.

Durante esta fase o Universo foi completamente dominado por um campo designado por *inflatão*.



GUTH

Alan Guth sugeriu em 1981 a ideia de um

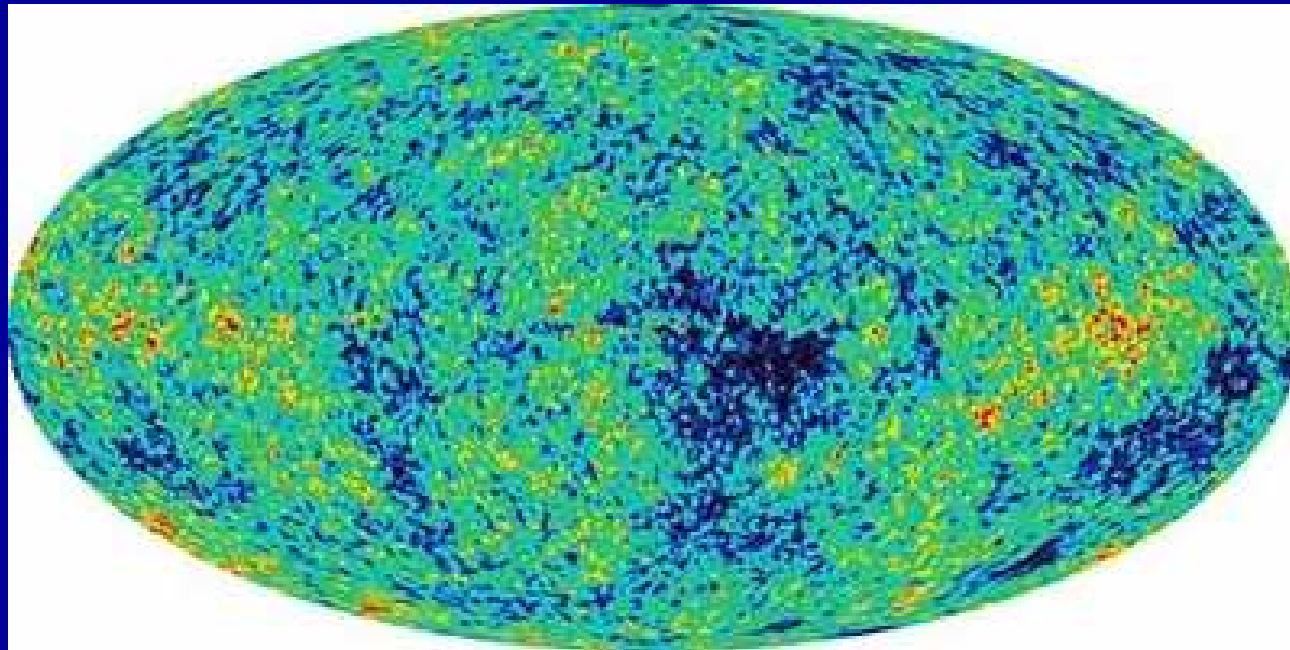
Universo inflacionário.

Embora discutível a introdução do mecanismo de inflação na teoria do Big Bang **permite resolver uma série problemas** (que estavam em aberto).

O universo continua a ser descrito de acordo com a teoria do Big Bang mas com uma fase adicional introduzida no final da era da Grande Unificação.

Mapa da CMB obtido pelo WMAP

http://cosmology.berkeley.edu/Education/CosmologyEssays/The_Cosmic_Microwave_Background.html



A partir da observação sabemos que a distribuição da radiação cósmica de fundo é isotrópica (é a mesma em qualquer direção).

Isto significa que **em algum momento do passado todos os pontos do universo devem ter estado em contacto causal entre si.**



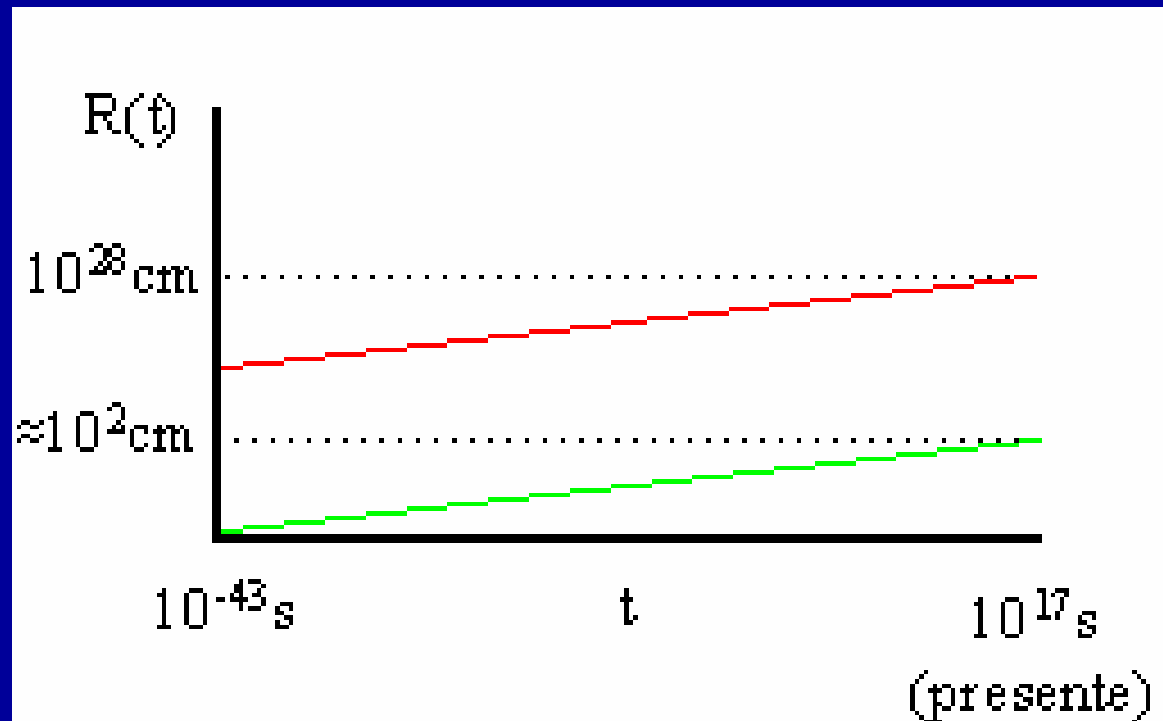
Sabemos estimar a dimensão e a idade do Universo.

Podemos recuar no tempo até ao instante inicial e ver se em algum momento a dimensão do Universo permitiu o contacto causal entre todos os seus pontos.

Verifica-se que isso nunca aconteceu.

Existe assim uma falha no modelo Standard do Big Bang.

É o chamado ***Problema do Horizonte***.

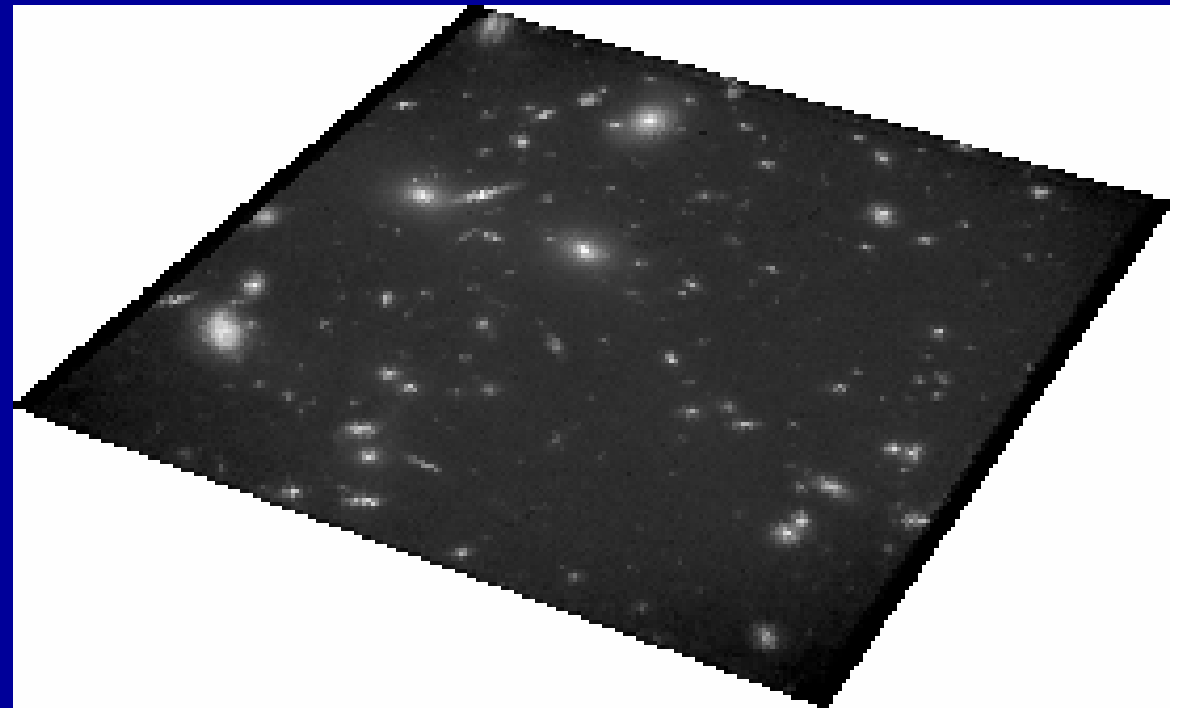


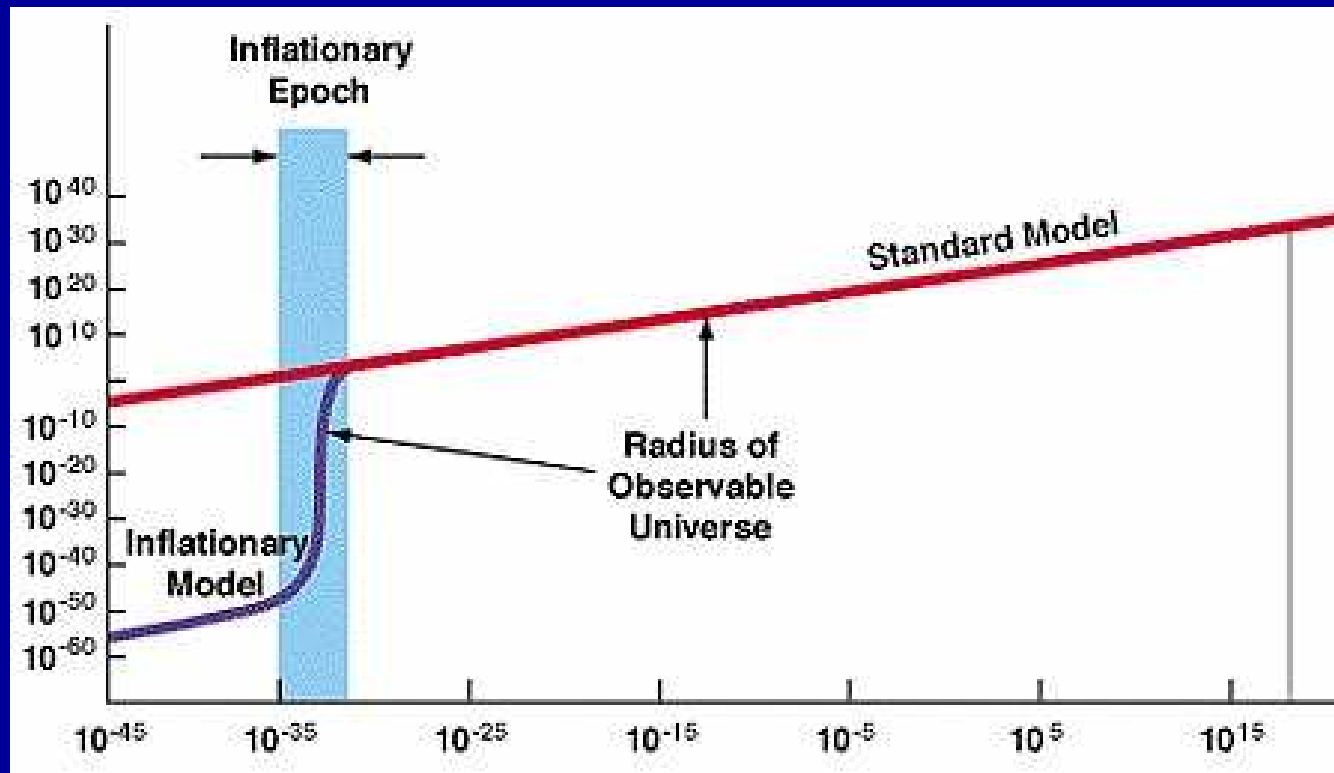


As observações recentes mostram que *o Universo é plano* o que significa que a densidade do Universo é muito próxima da densidade crítica.

Mas, se não fosse assim nos instantes iniciais as consequências teriam sido catastróficas para o Universo impedindo a formação de estrelas e galáxias.

A *teoria do Big Bang* não consegue pois explicar por si só a razão pela qual o *Universo é plano*.





De acordo com o mecanismo da inflação durante breves instantes (10^{-35} s a 10^{-33} s) o Universo foi dominado por uma força que **acelerou exponencialmente a expansão do Universo**.

O campo responsável pela inflação designa-se normalmente por *inflação*.

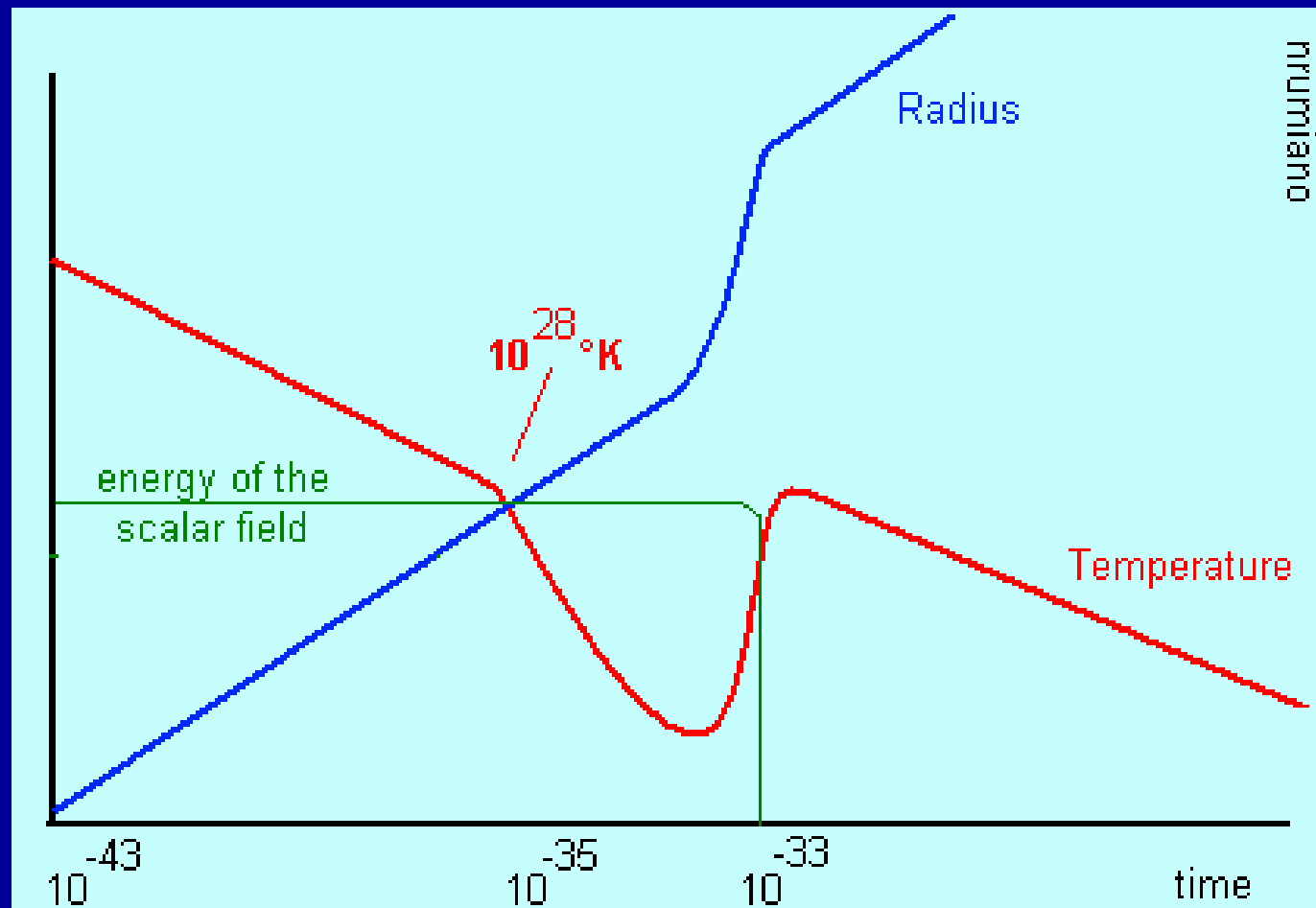
O tamanho do Universo aumentou entre 10^{50} e 10^{70} vezes.

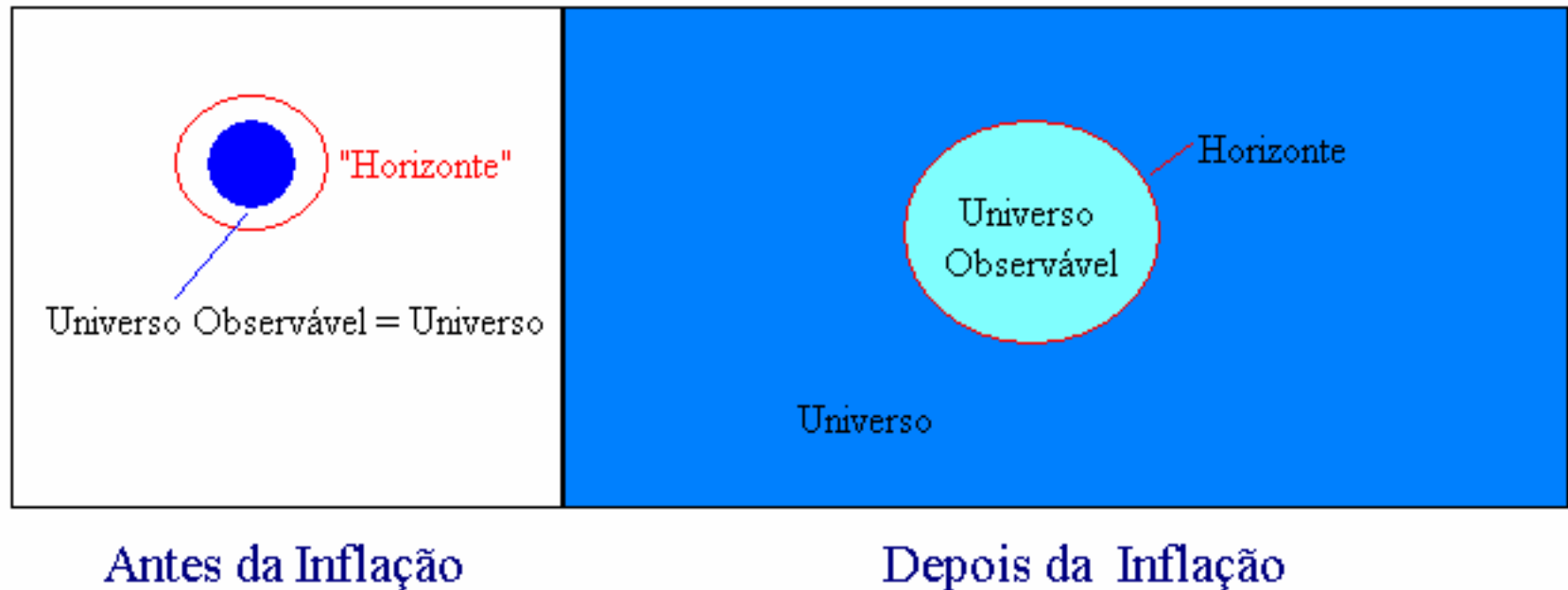


Durante a inflação o universo arrefeceu exponencialmente.

No entanto a energia libertada no final da inflação voltou a aquecer o universo para uma temperatura semelhante à que se verificava antes.

Depois da inflação a expansão do universo retomou a normalidade.





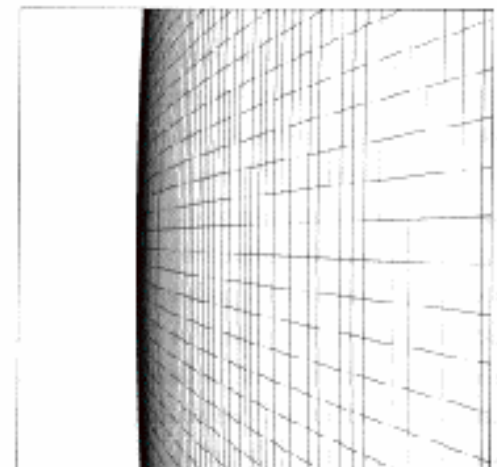
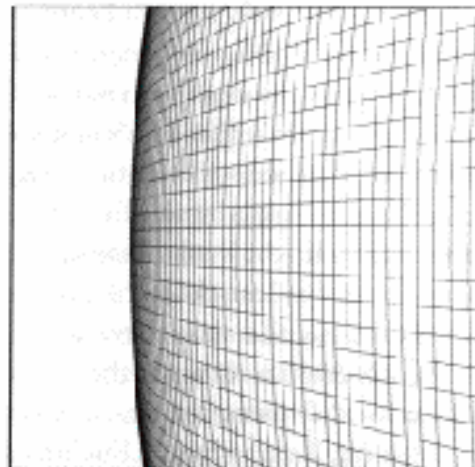
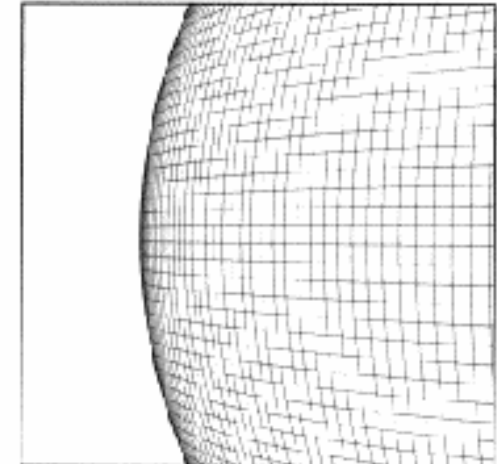
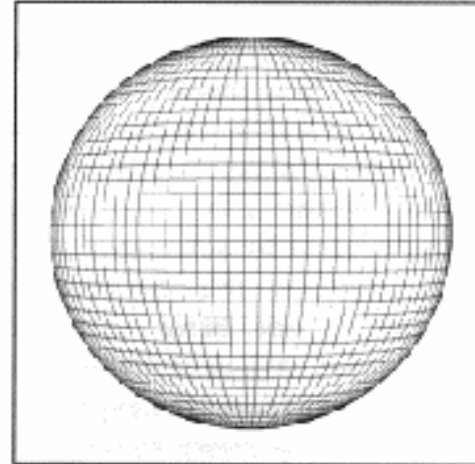
Antes da inflação todas as regiões do Universo estavam em contacto causal.

Depois da inflação o *horizonte* de qualquer observador passa a ser muito menor do que o Universo.

Para cada observador existe um *Universo Observável* cuja dimensão, que designaremos por horizonte, é muito inferior à dimensão do **Universo** na sua globalidade.



A **inflação explica** assim de uma forma muito simples a **isotropia da radiação cósmica de fundo** pois garante que no passado todos os pontos estiveram em contacto causal.



Explica também de uma forma muito simples a **geometria plana do universo**, pois, o universo observável é apenas uma pequena fração do todo.



A Era dos Quarks e a transição Eletro-Fraca

O período entre o final da inflação ($10^{-33}s$) e $10^{-10}s$ é designado por *Era dos Quarks*.

Nesta fase o Universo consiste num plasma composto por quarks, fótons, glúons e as suas antipartículas.

Pares partícula-antipartícula estão constantemente a ser criados e aniquilados. O **universo primordial** era dominado pela **radiação**.

A criação, separação e aniquilação de pares partícula-antipartícula é uma constante.

À medida que a expansão vai avançando o Universo arrefece gradualmente.

Os pares partícula-antipartícula mais energéticos vão gradualmente deixando de poder ser separados pois já não existe radiação para tal.



Quando a temperatura do Universo desce aos 100 GeV (aprox. 10^{-10} s) estão reunidas as condições para que a **Força Fraca** e a **Força eletromagnética** se separem.

O processo designa-se por

Transição Eletro-Fraca (EW).

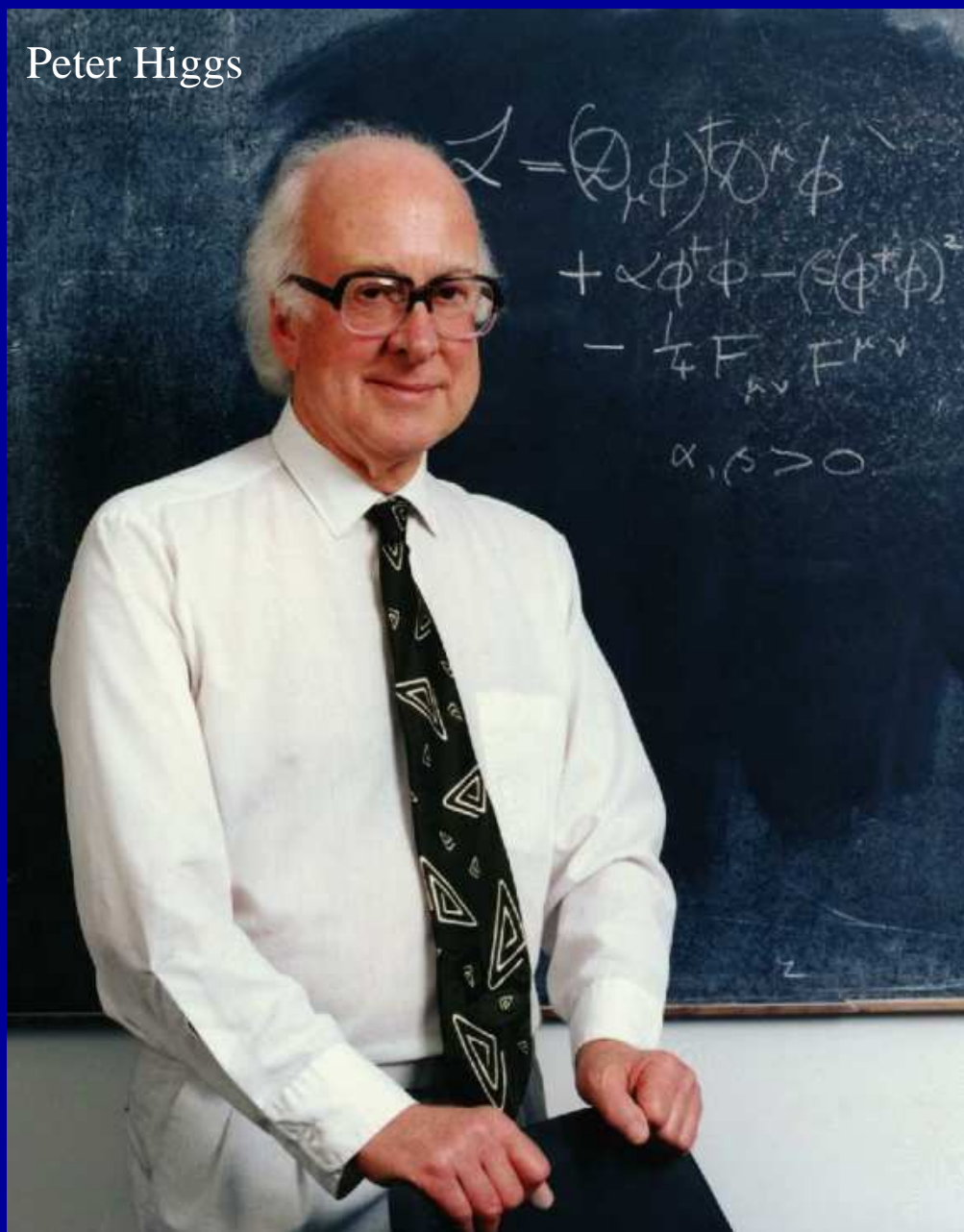
A partir deste momento :

- a Força Fraca passa a ser mediada pelos bosões Z e W
- e a força eletromagnética pelos fótons.

Todas as quatro forças estão separadas a partir deste momento.



Peter Higgs



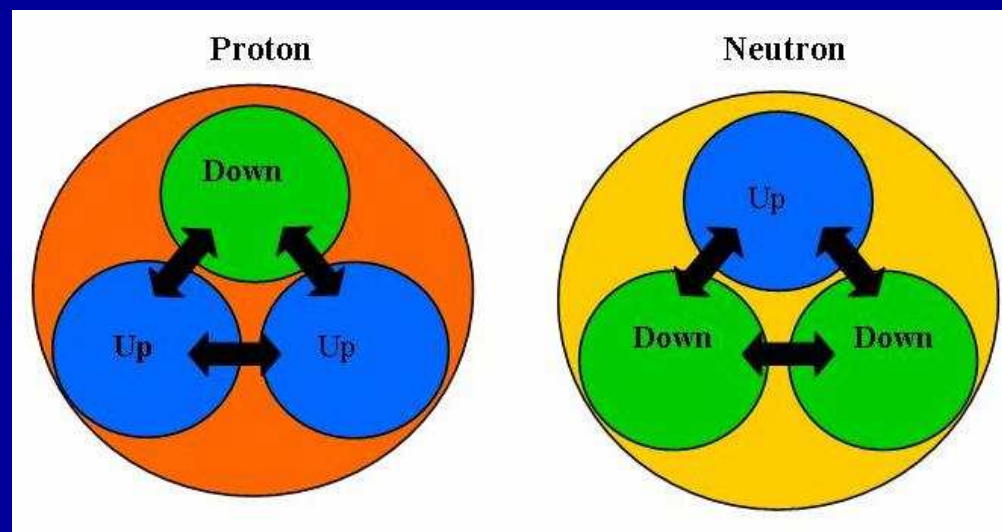
É também durante este processo que entra em cena o *bosão de Higgs* o qual confere *massa* às partículas materiais.



Quando a idade do Universo se aproxima dos 10^{-4} s ocorre a chamada

Transição quark-hadrões (QCD)

durante a qual os quarks **up** e **down** juntam-se com a ajuda dos **gluões** para formarem **neutrões** e **protões** estáveis



A radiação existente já não é suficiente para destruir estas partículas compostas



Era dos Leptões $t = 3.5 \times 10^{-4} s$

Esta fase começa logo depois de terem decaído os últimos mesões Pi (ou piões).

O Universo é agora composto por fótons, prótons, neutrões, eletrões, positrões, neutrinos e antineutrinos (já muito semelhante à constituição atual).

Quando a idade do Universo é de $1s$ os **neutrinos deixam de participar nas colisões** podendo então mover-se livremente a grandes distâncias.

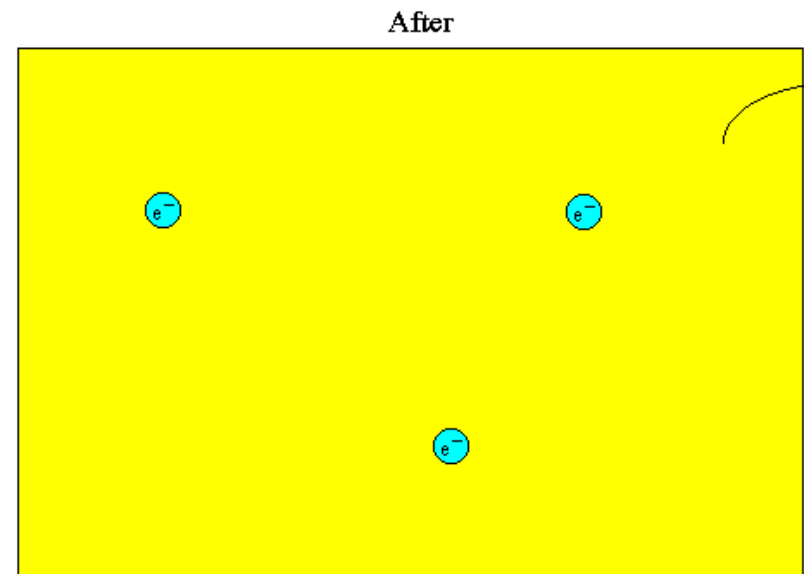
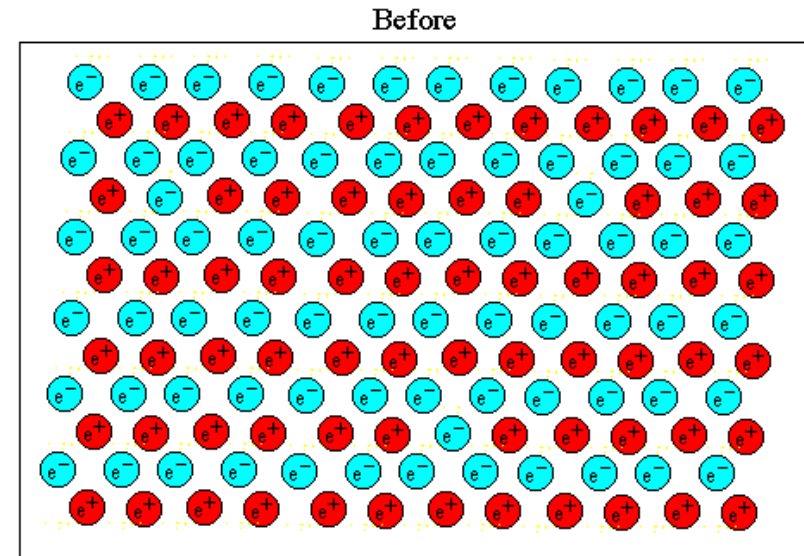
Dizemos que o Universo tornou-se transparente para os neutrinos.

Muitos dos neutrinos que cruzam o Universo no presente são provenientes desta época.

Aos 3s deixam de ser produzidos pares de partículas elétron-positrão.

Os positrões existentes aniquilam-se com os elétrons sobrando no processo apenas um pequeno excesso de elétrons: aqueles que existem no Universo atual.

Este evento marca o fim da era dos leptões.





Nucleosíntese primordial

$$t = 200s$$

$$T = 10^9 K$$

O Universo continua a expandir-se e, conseqüentemente, a arrefecer.

Aos **200s** prótons e neutrões podem juntar-se de forma estável formando os primeiros núcleos atómicos num processo designado por **Nucleosíntese primordial**.

A primeira reação de fusão nuclear a ter lugar é aquela em que um próton e um neutrão juntam-se para dar origem a um núcleo de Deutério.

Nesta fase já não existem fótons com energia suficiente para separar as duas partículas.

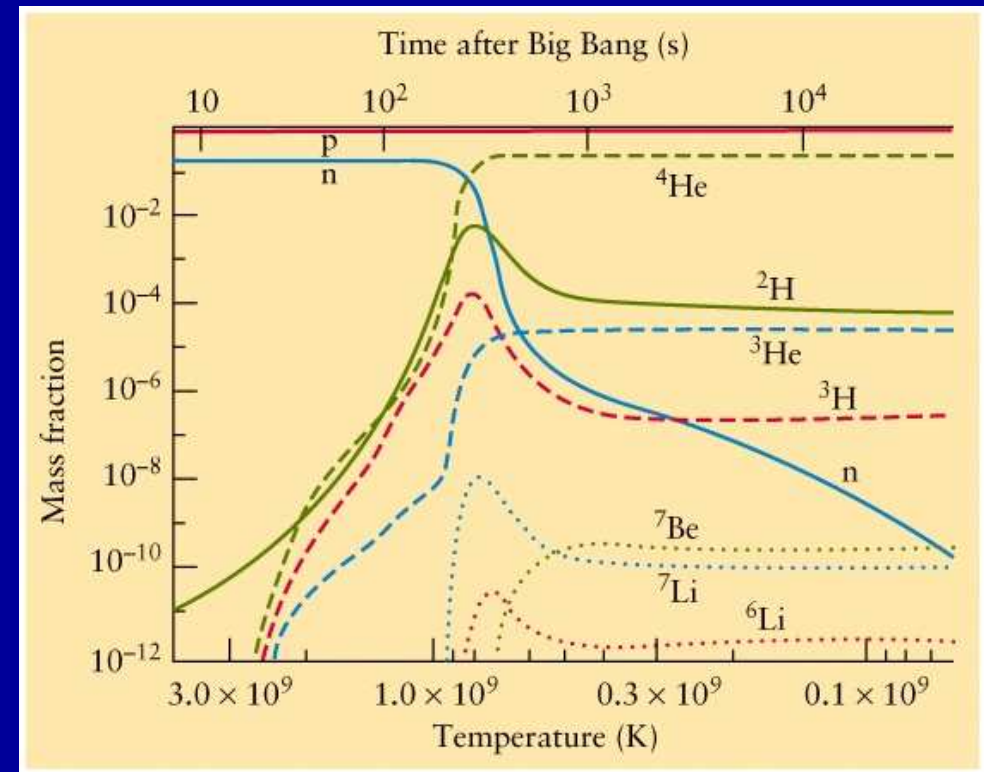
Assim praticamente todo o deutério formado nesta época continua presente no Universo atual.

A partir do momento em que existe uma determinada abundância de deutério no Universo estão reunidas as condições para que se produzam núcleos mais complexos (trítio, Helio-3, Helio-4, Lítio e Berílio)



A nucleosíntese primordial termina aos **1000s** deixando o Universo composto, em termos de matéria, por núcleos de Hidrogénio, Hélio e vestígios de Lítio e Berílio.

A partir deste momento a temperatura do Universo, cada vez mais baixa, não permite as aproximações necessárias entre componentes para que se formem elementos mais complexos.



↑ ↑
Nucleosíntese
primordial



Universo dominado pela matéria

O Universo continua em expansão.

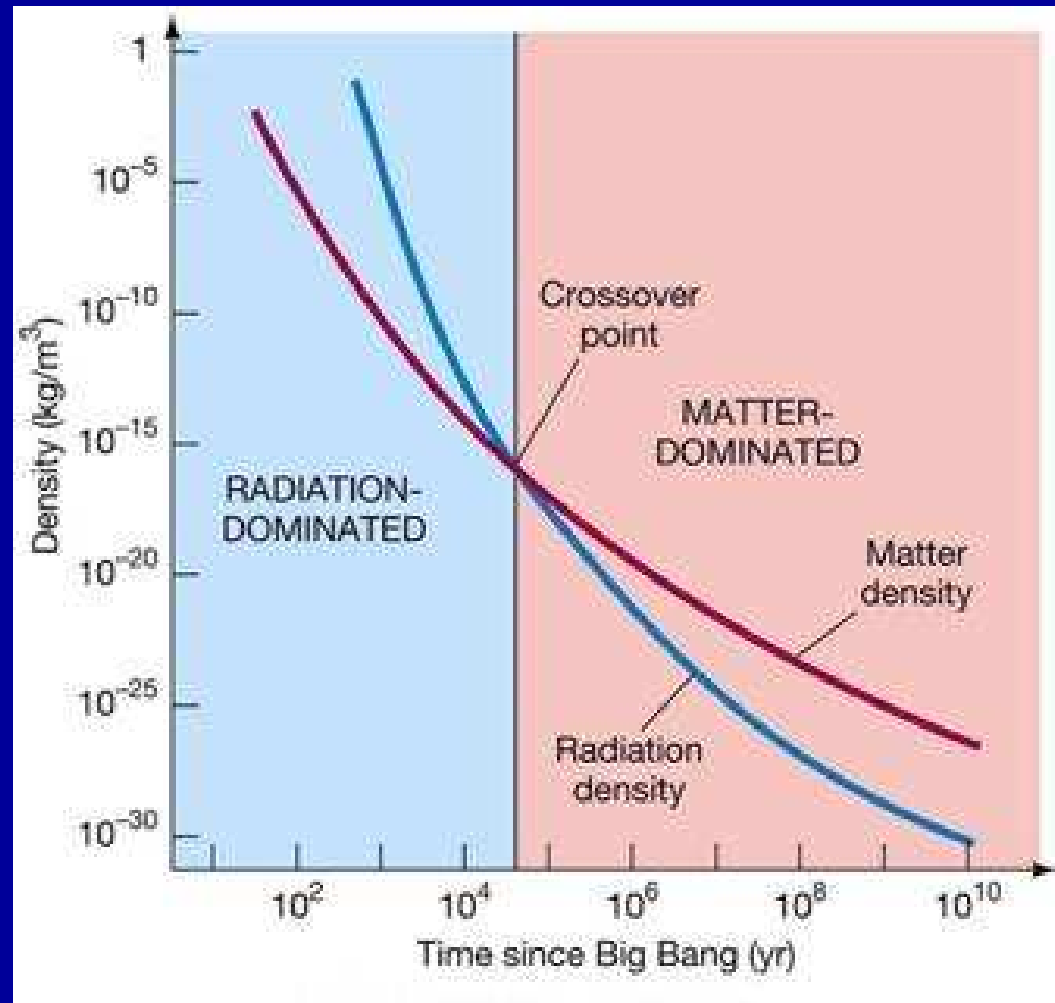
A densidade total da radiação bem como a densidade total de matéria decrescem continuamente, ou seja, os fótons e núcleos atômicos diluem-se num volume cada vez maior.

Para além disso, os fótons também perdem energia (são desviados para o vermelho - *redshift*) pelo que a densidade da radiação (fótons) decresce mais rapidamente do que a da matéria (núcleos atômicos).



Quando a idade do Universo é da ordem dos **100 000 anos** a densidade da matéria ultrapassa em valor densidade da radiação.

O Universo deixa de ser dominado pela radiação para passar a ser dominado pela matéria.



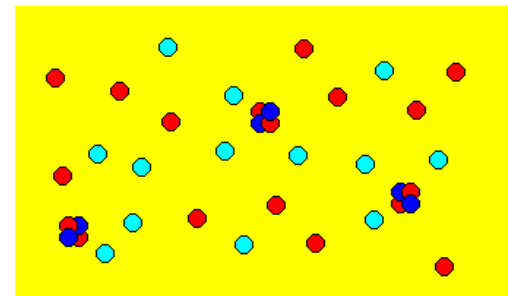
Era da Recombinação

Aos **280 000 anos** a temperatura do Universo desceu já para os 3800K o que permite que os eletrões se combinem com os núcleos atómicos formando átomos neutros.

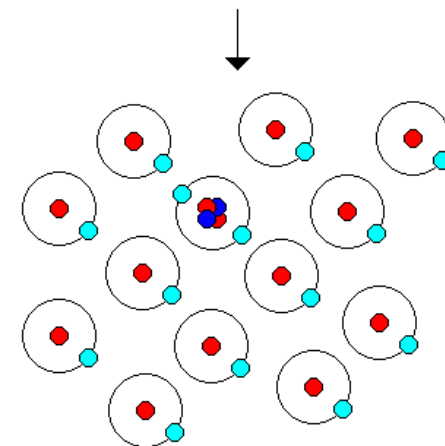
Este processo é designado por Recombinação.

Recombination

As the Universe expands and cools, protons and electrons combine to form hydrogen (the most abundant element). And helium nuclei combine with electrons to form helium atoms. This process is called recombination.



- electron
- proton
- helium nuclei



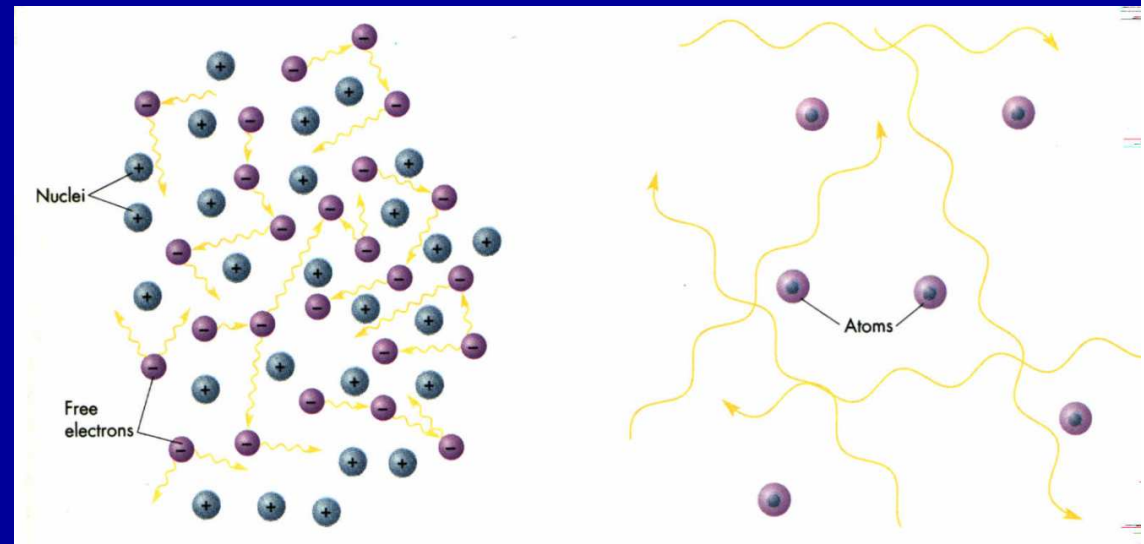
- hydrogen atom
- helium atom



Libertação dos fótons

Quando o Universo tinha cerca de **380 000 anos** e a sua temperatura tinha descido para os 3000K a densidade de eletrões livres atingiu um valor suficientemente baixo de tal forma que os fótons passaram a percorrer grandes distâncias sem interagir com qualquer eletrão.

Dizemos que **o Universo tornou-se transparente para os fótons.**

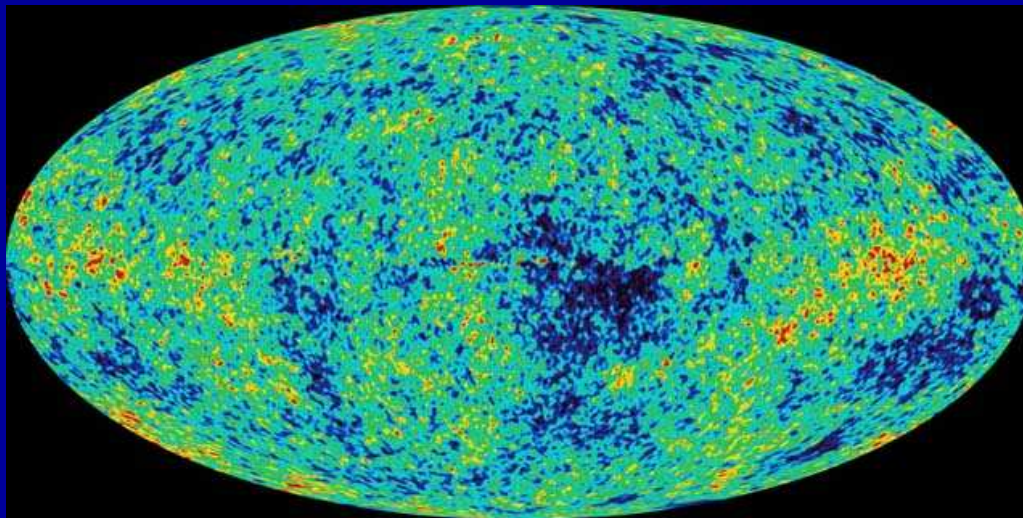




Muitos destes fotões estão ainda hoje a atravessar o Universo.

Constituem a chamada *Radiação Cósmica de Fundo (CMB)*.

A observação destes fotões permite obter a imagem mais antiga que conseguimos do nosso Universo.



Mapa da CMB obtido pelo WMAP
http://cosmology.berkeley.edu/Education/CosmologyEssays/The_Cosmic_Microwave_Background.html

No momento da libertação estes fotões eram altamente energéticos (3000K).

Com a expansão do Universo foram perdendo energia, ou seja, foram sendo desviados para o vermelho.

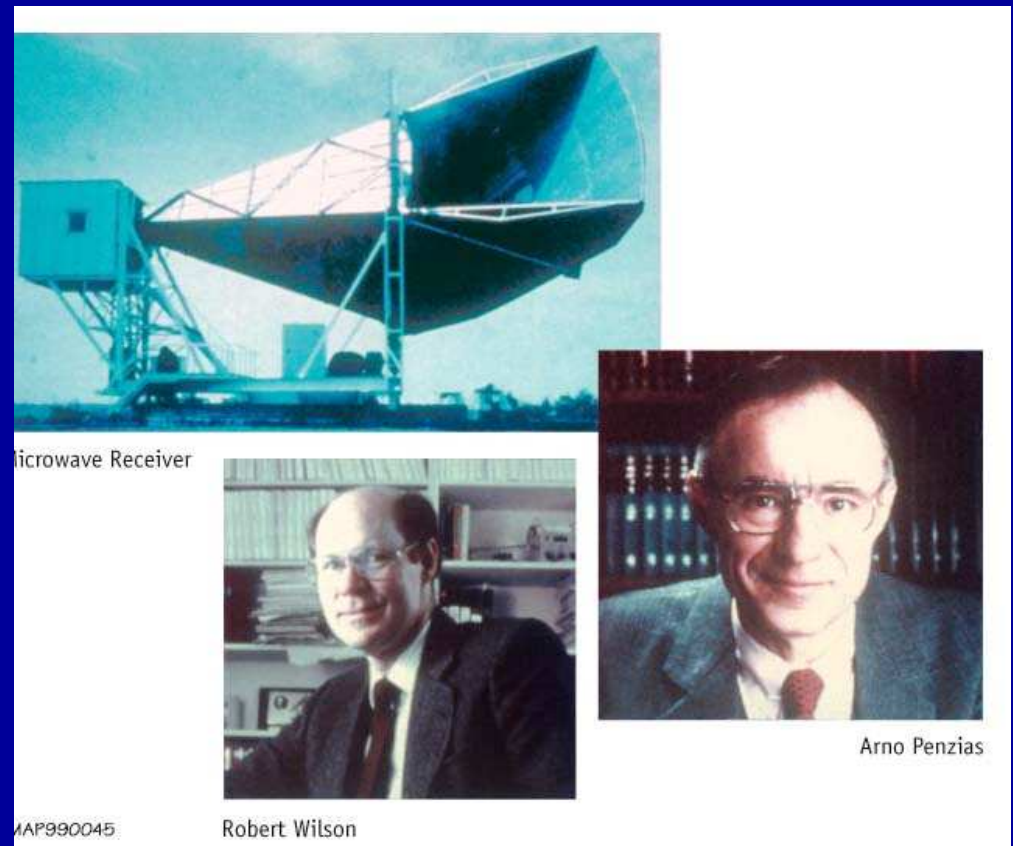


A existência desta radiação foi prevista em primeira mão em 1948 por **George Gamow** tendo vindo a ser detetada, de forma acidental, em 1965 por **Arno Penzias** e **Robert Wilson**.



George Gamow

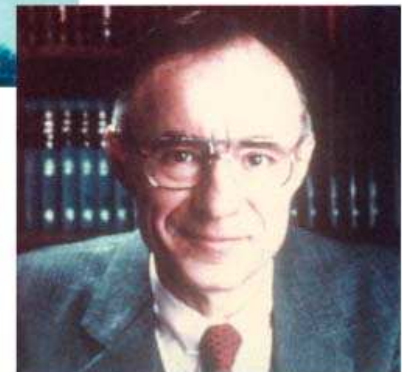
Atualmente estes fotões observam-se na banda rádio das **micro-ondas** (2.7K).



Microwave Receiver



Robert Wilson



Arno Penzias



Idades escuras do Universo

Entre a libertação dos fótons e a formação dos primeiros objetos luminosos decorre um período relativamente longo designado por **Cosmic Dark Ages**.

Durante este período o Universo continuou em expansão mas não existiam fontes de radiação que nos possam informar sobre os processos que decorreram durante essa fase.

Reionização $t = 10^{16} s$

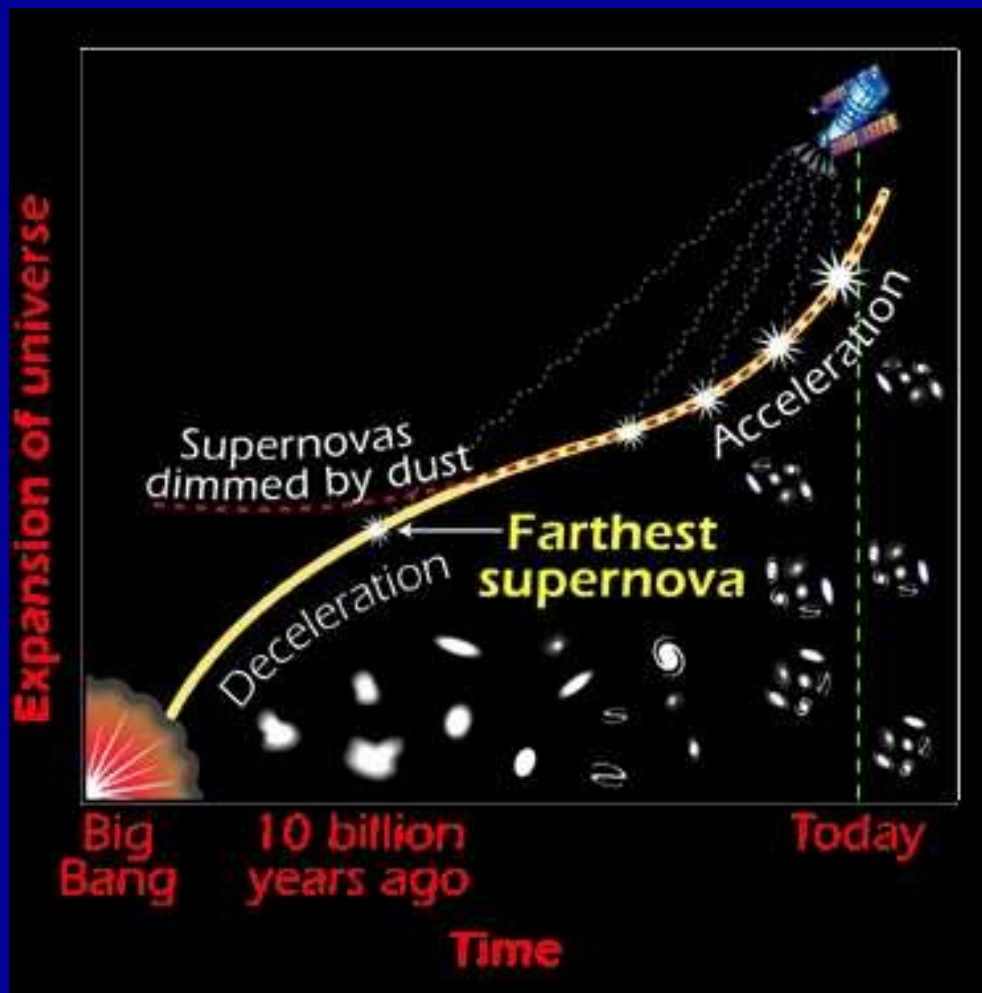
Depois de se terem formado as primeiras estrelas no Universo a radiação emitida por estas acabou por ionizar o hidrogénio neutro disperso pelo Universo.

Assim, o Universo voltou a ser composto por um plasma como já havia acontecido antes quando a sua temperatura era mais elevada.

A grande diferença é que agora além desse plasma existem estrelas (provavelmente já agrupadas em galáxias).

Universo dominado pela energia escura

$$t = 2.8 \times 10^{17} \text{ s}$$



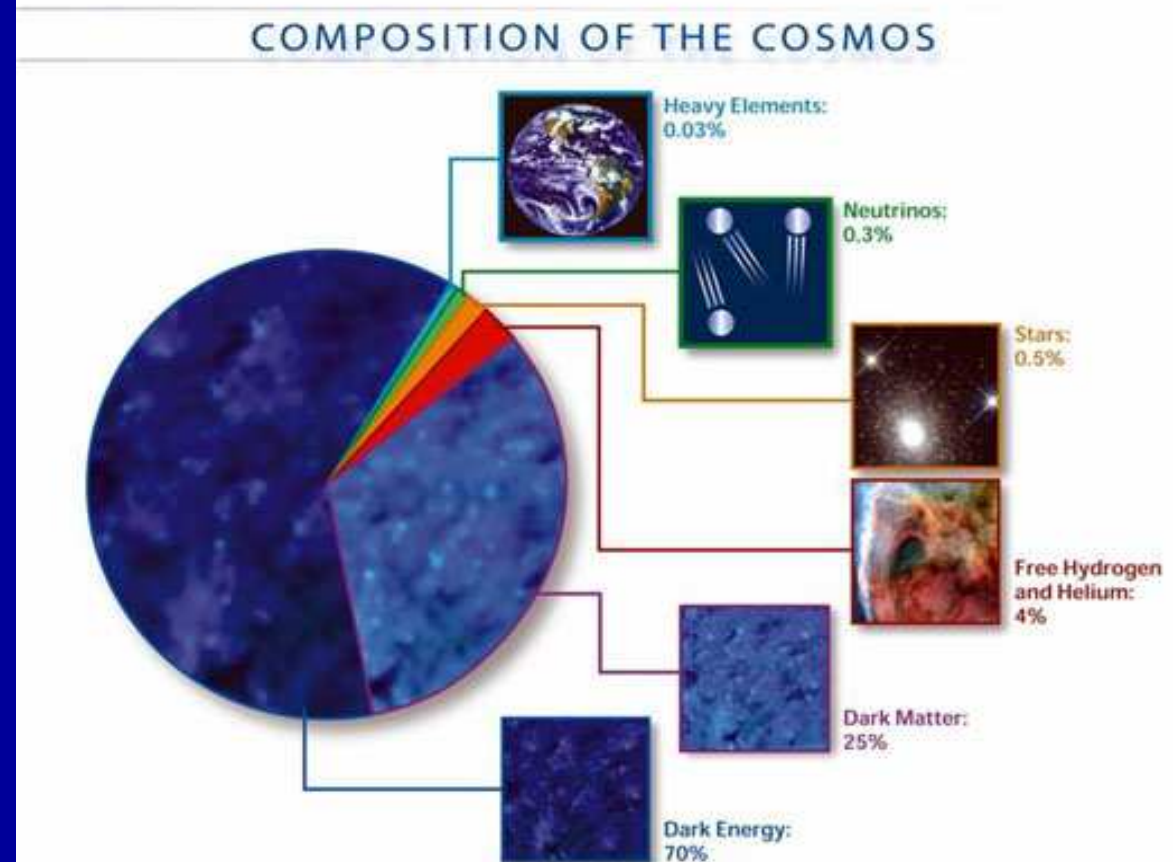
Quando a idade do Universo atingiu **0.7** da sua idade atual este passou a ser dominado pela chamada **Energia Escura**.

A expansão do Universo que, até então vinha desacelerando, passou a acelerar exponencialmente.



A natureza da energia escura é completamente desconhecida e a sua deteção direta afigura-se também, para já, muito complicada.

A ideia mais simples para a explicação da energia escura é a de que esta é simplesmente o custo a pagar por ter espaço, ou seja, é a *energia intrínseca do espaço*.





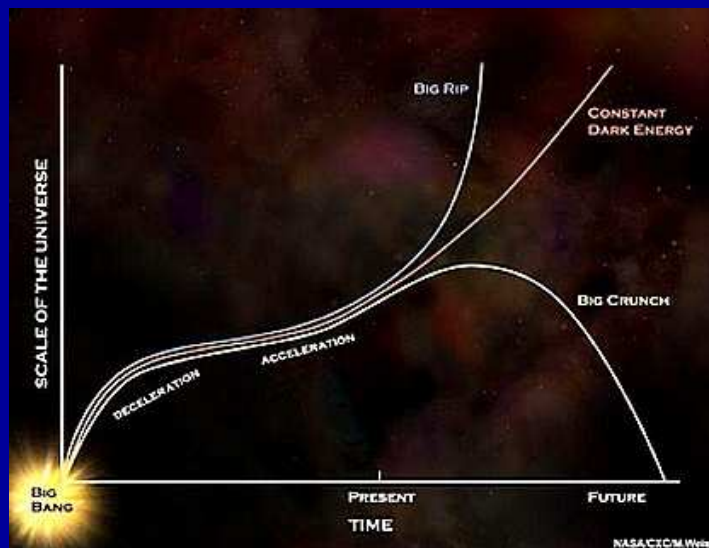
O Futuro do Universo

$$t_0 = 4.3 \times 10^{17} \text{ s}$$

Sabemos que no presente o Universo é dominado pela Energia Escura (que esta acelerando a expansão do Universo).

Se assim continuar o Universo caminha em direção ao chamado **Big RIP**: tudo irá se afastar demasiado e o Universo irá arrefecer eternamente.

Se por outro lado existir um retrocesso na expansão então podemos caminhar para o outro extremo que será o **Big Crunch**: o Universo colapsa sobre si mesmo fazendo o percurso inverso ao que fez desde o Big Bang.



Entre o **Big Crunch** e o **Big RIP** podemos imaginar uma infinidade de situações.

