



Universidade da Madeira

Grupo de Astronomia

# *Universo*

*explosivo, inflacionário,  
acelerado e desconhecido*

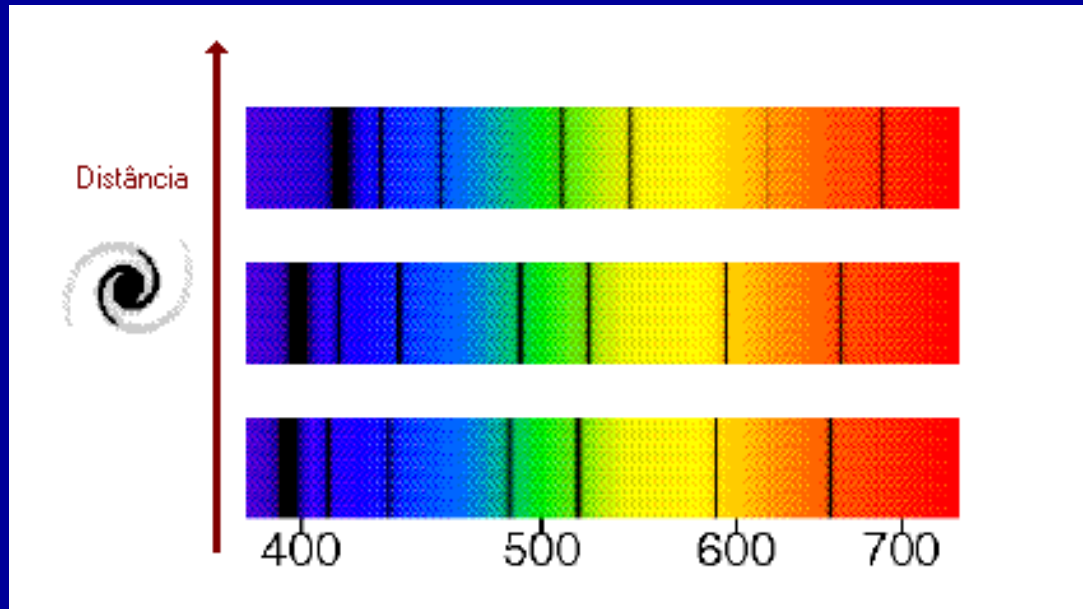
*Laurindo Sobrinho*

*V EAAM*

*23 de Setembro de 2006*



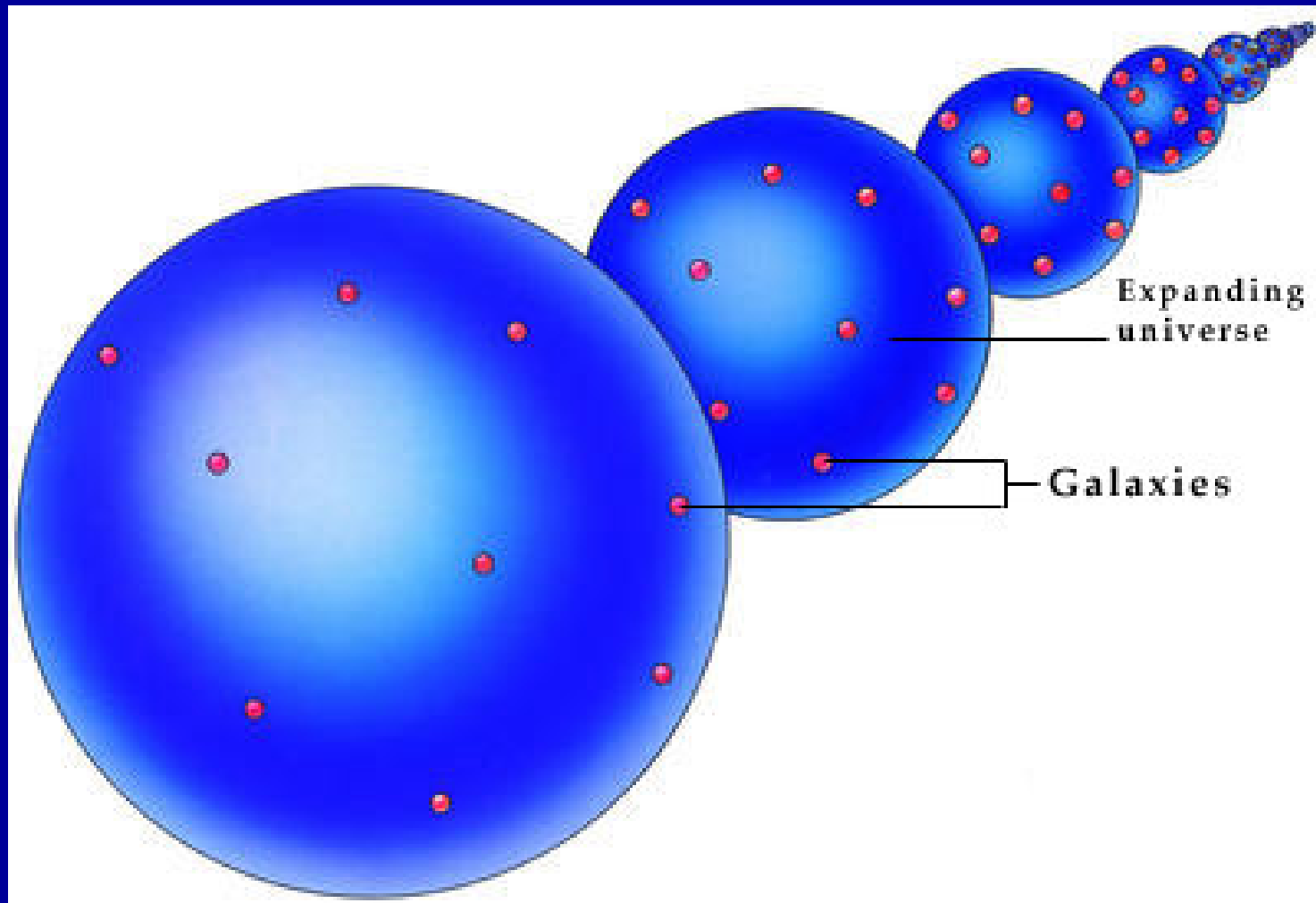
## 1 O Universo em Expansão

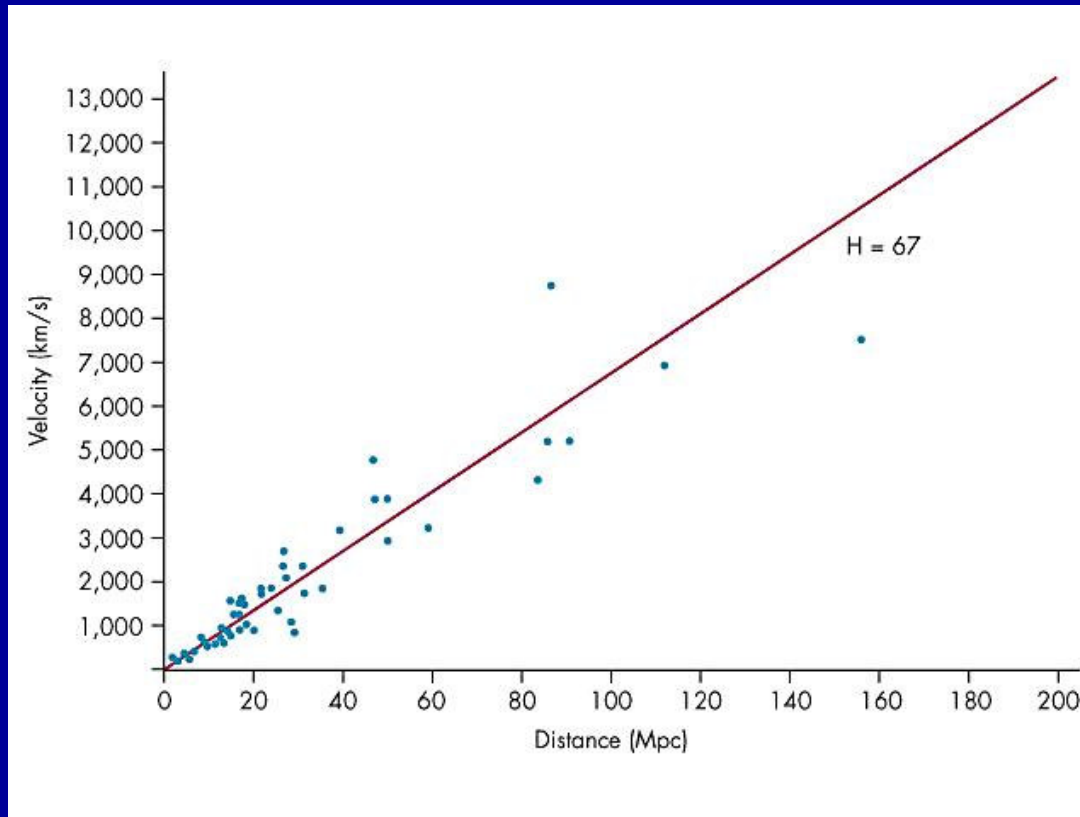


Ao examinar a luz emitida por galáxias distantes Edwin Hubble verificou em 1929 que esta aparecia sempre desviada para o vermelho. Todas essas galáxias estão a afastar-se da Nossa Galáxia. Verificou ainda que quanto maior a distância maior é a velocidade de afastamento.



Conclusão: **O Universo está em expansão!**

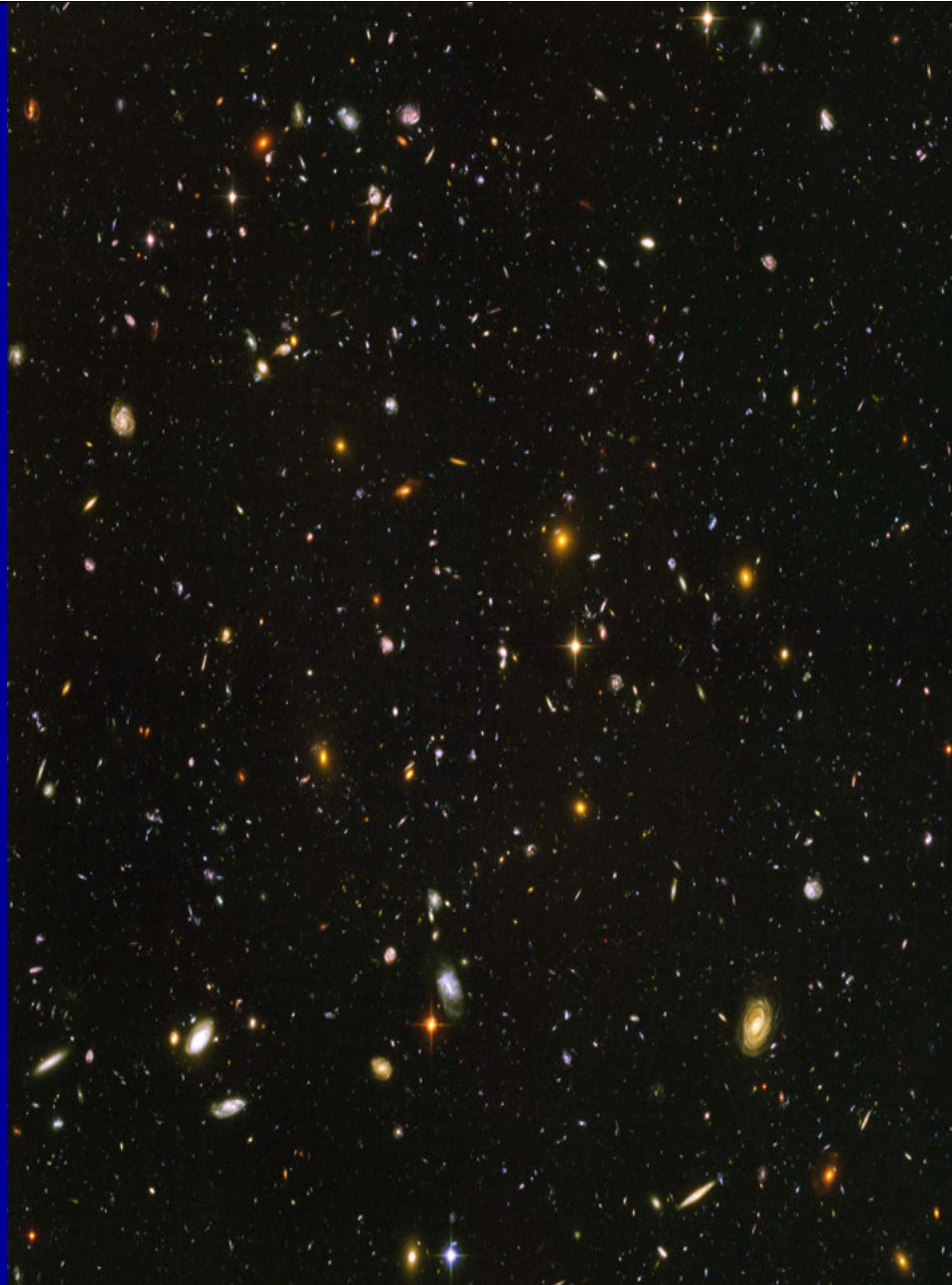




Lei de Hubble :

$$v = H_0 D$$

Hubble verificou que existia uma **relação linear entre a velocidade de recessão das galáxias e a respectiva distância**. A relação de proporcionalidade entre essas duas grandezas é actualmente designada por **constante de Hubble** e representa-se por  $H_0$ .



A observação do universo quando feita em escalas a partir dos  $10^8$  anos luz mostra que este é **homogéneo** (todos os pontos são equivalentes) e **isotrópico** (todas as direcções são equivalentes). Assim a **expansão do universo é descrita por um factor de escala  $R$  que apenas depende da idade do universo.**

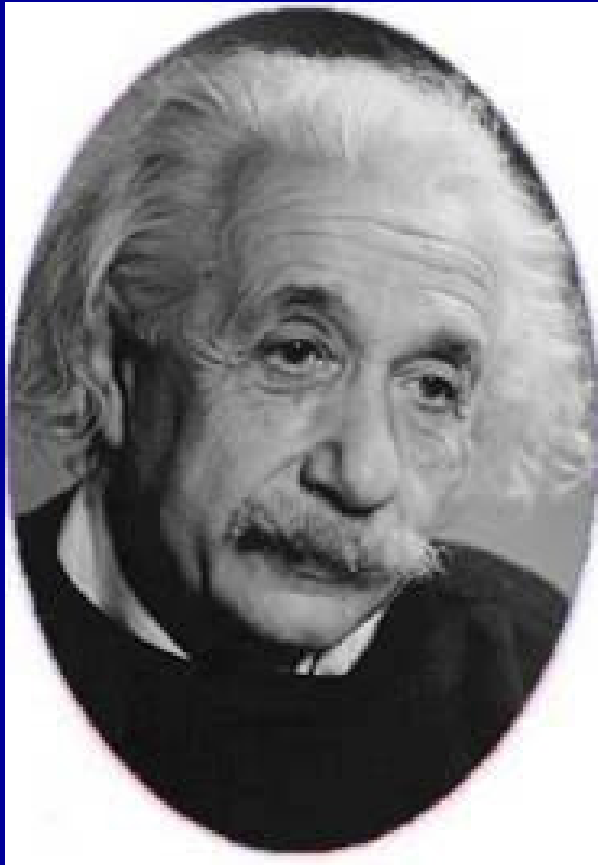


No contexto da Teoria da Relatividade Geral a evolução do factor de escala, ou seja, a **evolução do Universo** é descrita pela chamada **equação de Friedmann**:

$$\left(\frac{\dot{R}}{R}\right)^2 - \frac{8}{3}\pi G\rho - \frac{1}{3}\Lambda c^2 = -\frac{kc^2}{R^2}$$

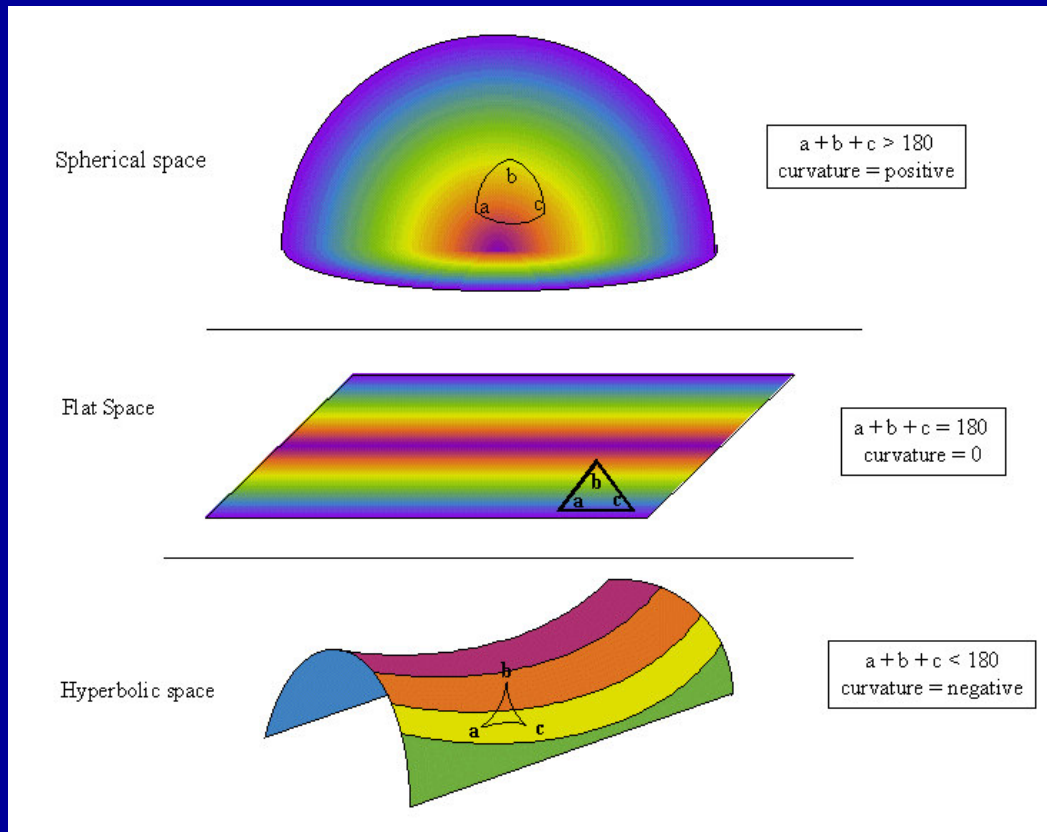
onde  $G$  é a constante de gravitação universal,  $\rho$  é a densidade do universo,  $\Lambda$  é a chamada **constante cosmológica** e  $k$  indica a **curvatura do espaço-tempo**. Esta equação é apenas aplicável durante a era dominada pela radiação que se estende desde o início do universo até aos  $\approx 10^6$  anos quando a matéria passou a ser dominante.

A presença da constante cosmológica é equivalente a assumir que a matéria não é a única responsável pela gravidade existindo outra fonte adicional que poderá ser atractiva ( $\Lambda < 0$ ) ou repulsiva ( $\Lambda > 0$ ).



A **constante cosmológica** foi introduzida por Einstein em **1917** com o propósito de construir um **modelo estático** para o universo uma vez que sem a sua presença a Teoria da Relatividade Geral apontava para um universo em expansão ou em contracção o que na altura não fazia sentido.

Com a descoberta de Hubble em 1929 Einstein abandonou esta ideia chegando mesmo a considerá-la como a maior **asneira** da sua vida. No entanto, como veremos mais adiante, poderá existir mesmo (embora não pelas mesmas razões) uma constante cosmológica não nula.



O valor de **k** indica qual a **geometria** do universo:

**k=0** : universo plano

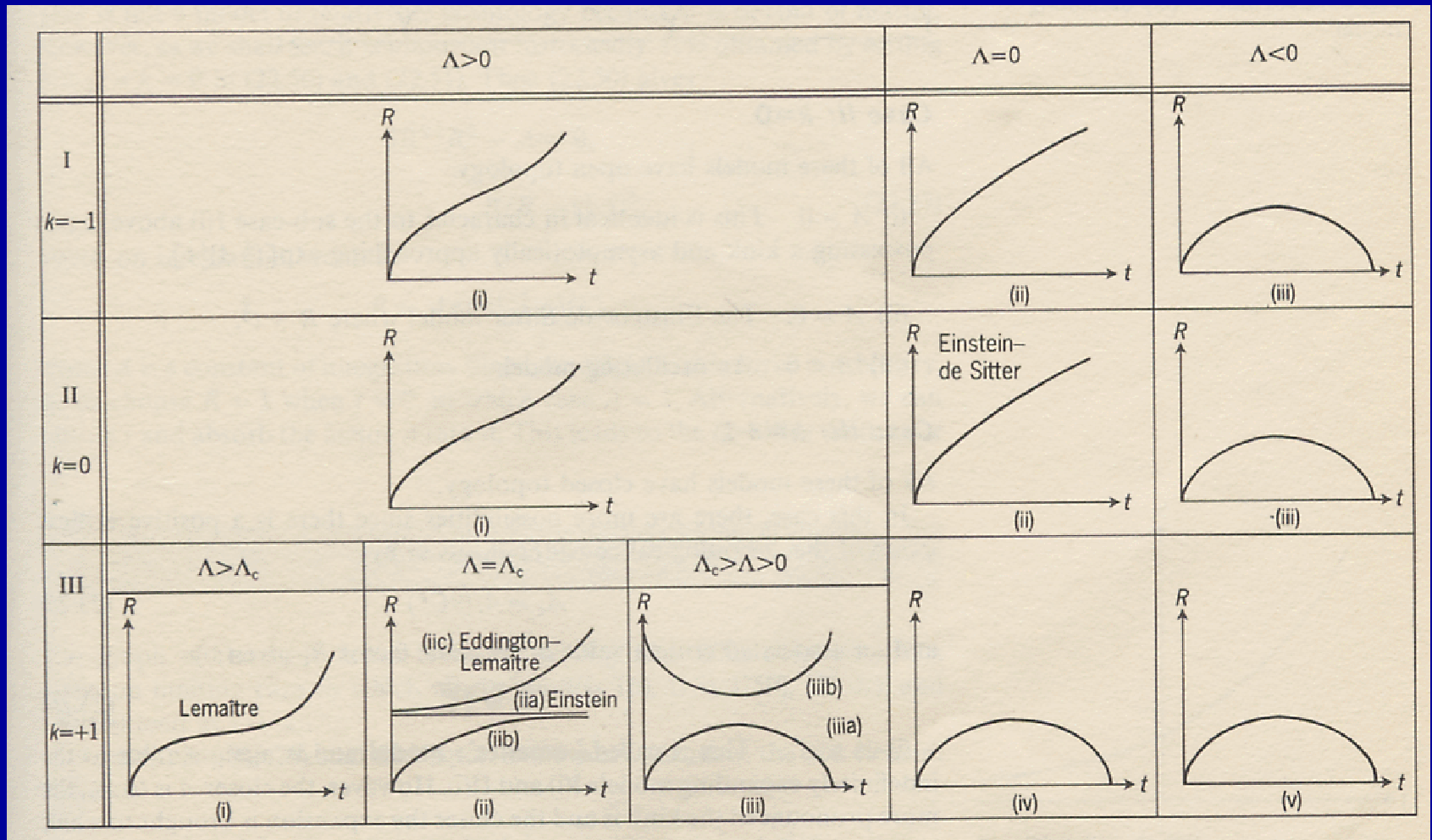
**k=1** : universo elíptico fechado

**k=-1** : universo hiperbólico aberto.





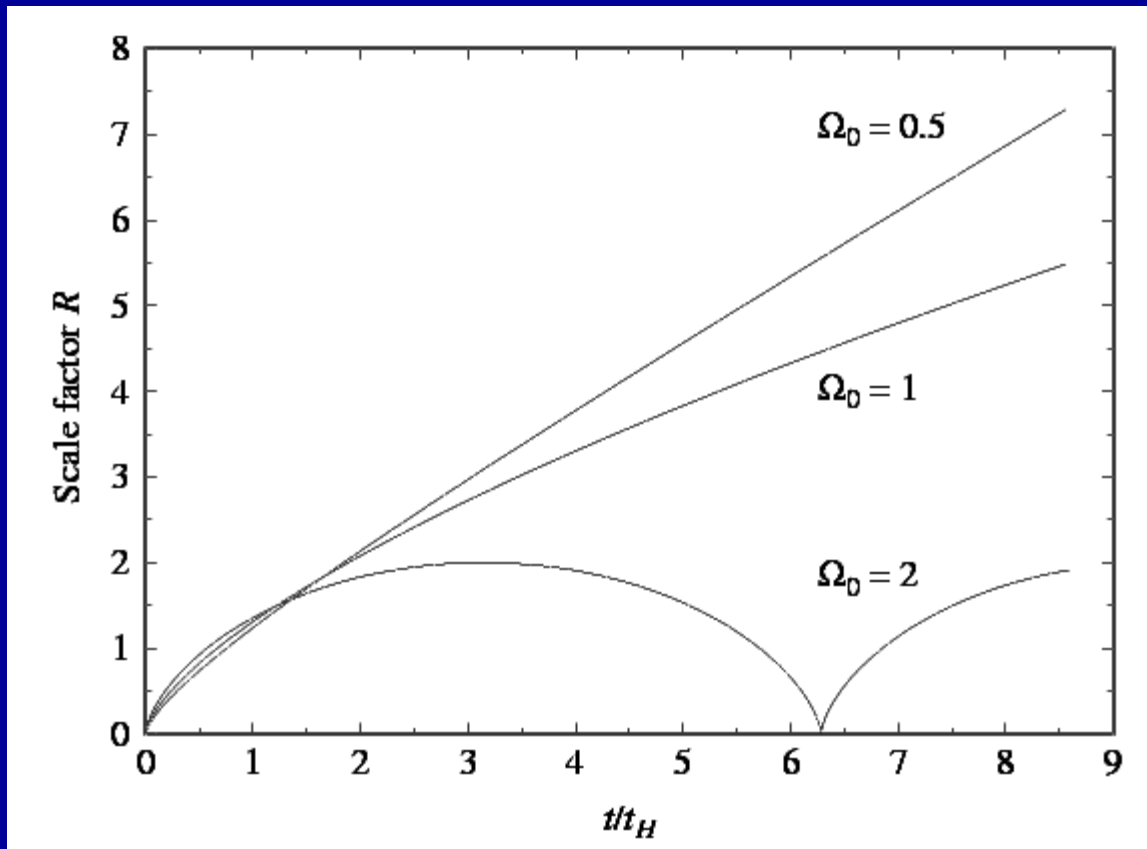
# Universidade da Madeira



Jogando com os valores possíveis para  $k$  e  $\Lambda$  podemos construir **diferentes modelos de universos**. Em alguns desses modelos a expansão continua eternamente ao passo que noutros a expansão dá lugar à contracção.



Seja  $\rho$  a **densidade actual do Universo**. Se  $\rho$  for superior ou igual a uma determinada **densidade crítica**  $\rho_c$  então o universo não se vai expandir para sempre dando lugar à contracção. O **parâmetro da densidade** é definido por:

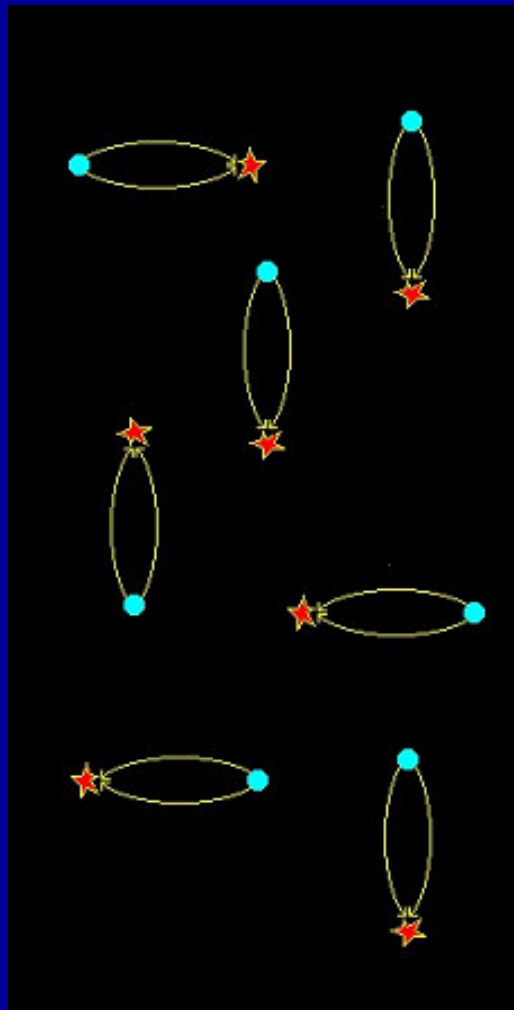


$$\Omega = \frac{\rho}{\rho_c}$$

O seu valor actual é muito próximo de 1 o que significa que o Universo é praticamente plano ( $k=0$ ).

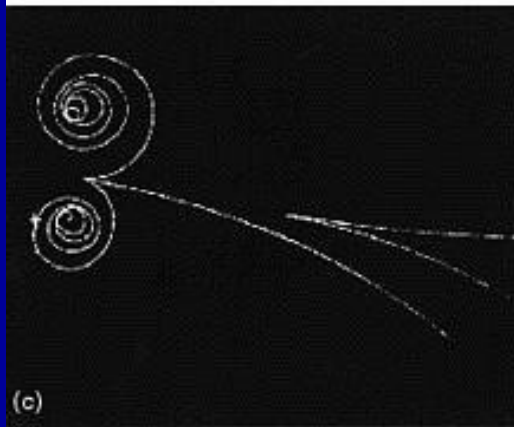
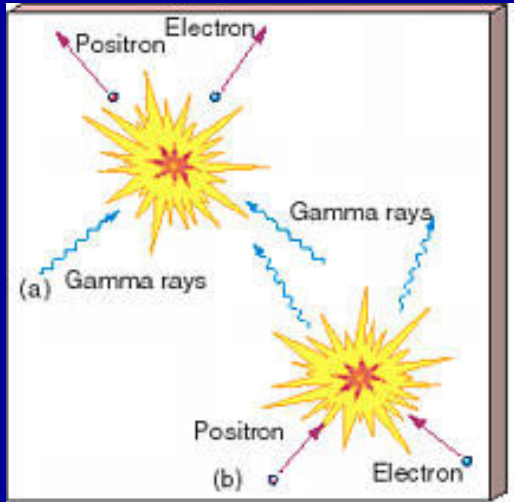


## 2 Modelo do Big Bang



No início o universo estava concentrado numa pequena região de dimensão Planckiana com uma temperatura muito elevada. Era, assim, um universo regido pelas leis da Mecânica Quântica.

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, electrão-antielectrão ...).



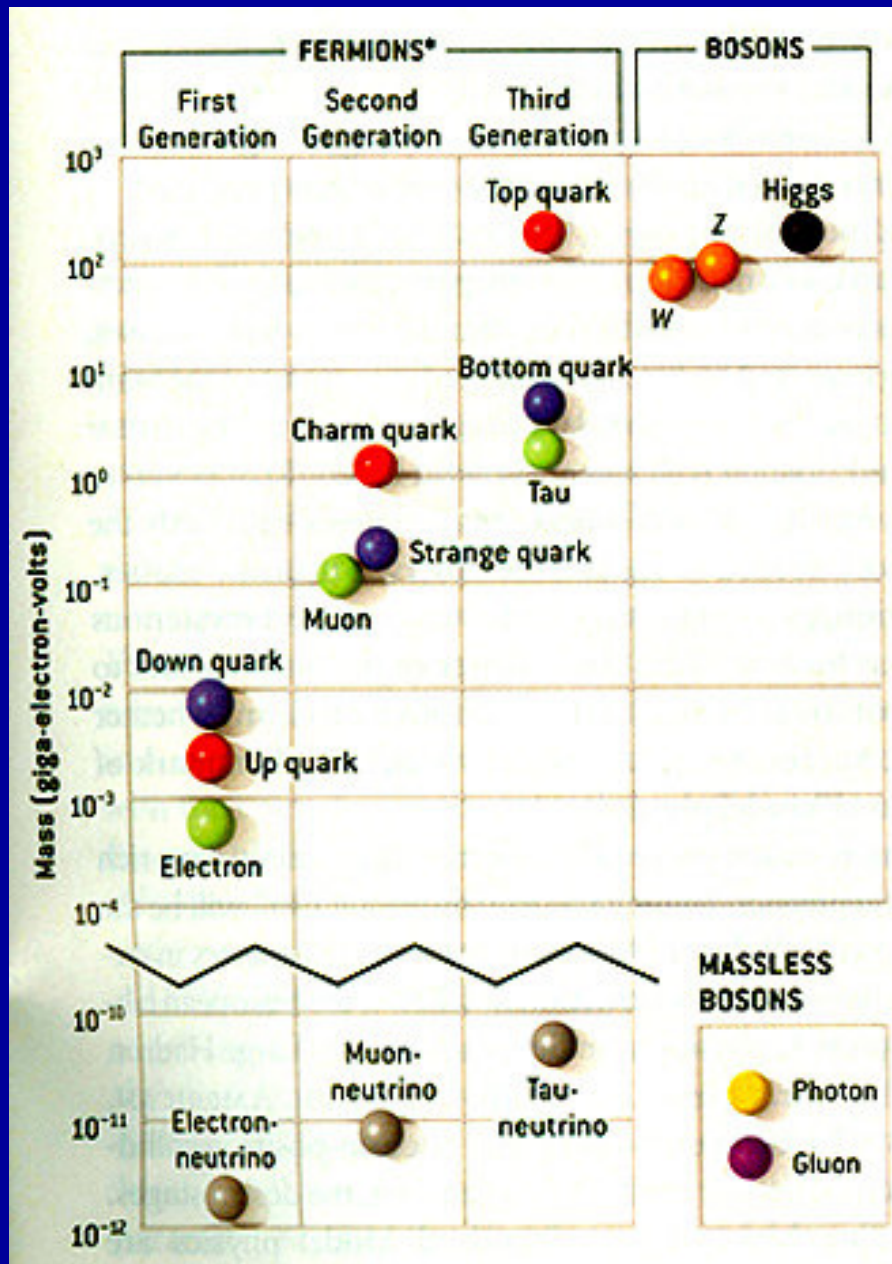
Separação de um par electrão-positrão.

Cada par separa-se por breves instantes para logo depois se aniquilar novamente. Um dos elementos do par tem energia  $+E$  e o outro energia  $-E$  pelo que a energia total do par é nula, garantindo assim a conservação da energia. Estas partículas não são detectáveis e por isso dizem-se **partículas virtuais**.

No entanto, se por meio de algum processo, aplicarmos energia suficiente conseguimos separar as duas partículas tornando-as em **partículas reais**. Claro que mais tarde as duas partículas podem encontrar-se e aniquilar-se resultando daí a libertação de radiação electromagnética.



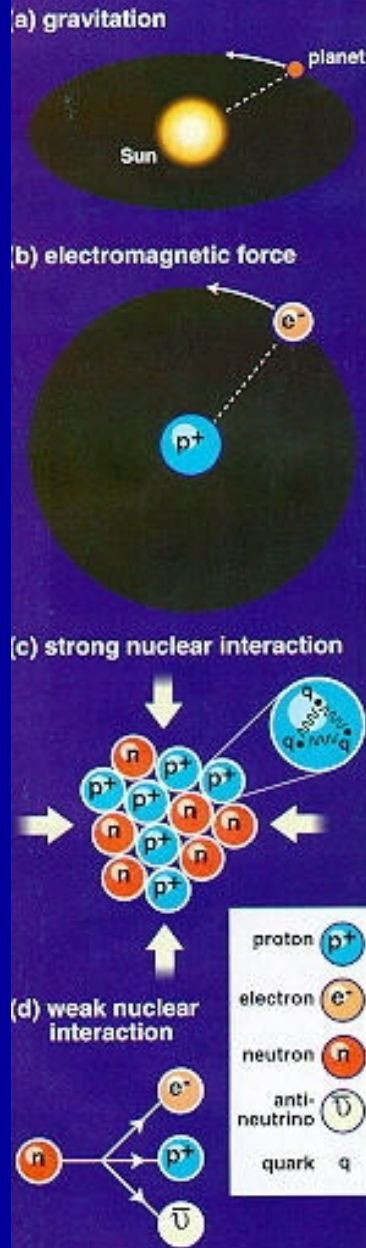
# Universidade da Madeira



O **universo primordial** era dominado pela **radiação**. A criação, separação e aniquilação de pares partícula-antipartícula era uma constante.

À medida que a expansão foi avançando o universo foi arrefecendo gradualmente.

Os pares partícula-antipartícula mais energéticos foram gradualmente deixando de poder ser separados pois já não existia radiação suficientemente energética para o fazer.



**Gravidade:** força de longo alcance que actua entre os corpos que têm **massa**. É mediada por **gravitões** (partículas nunca observadas).

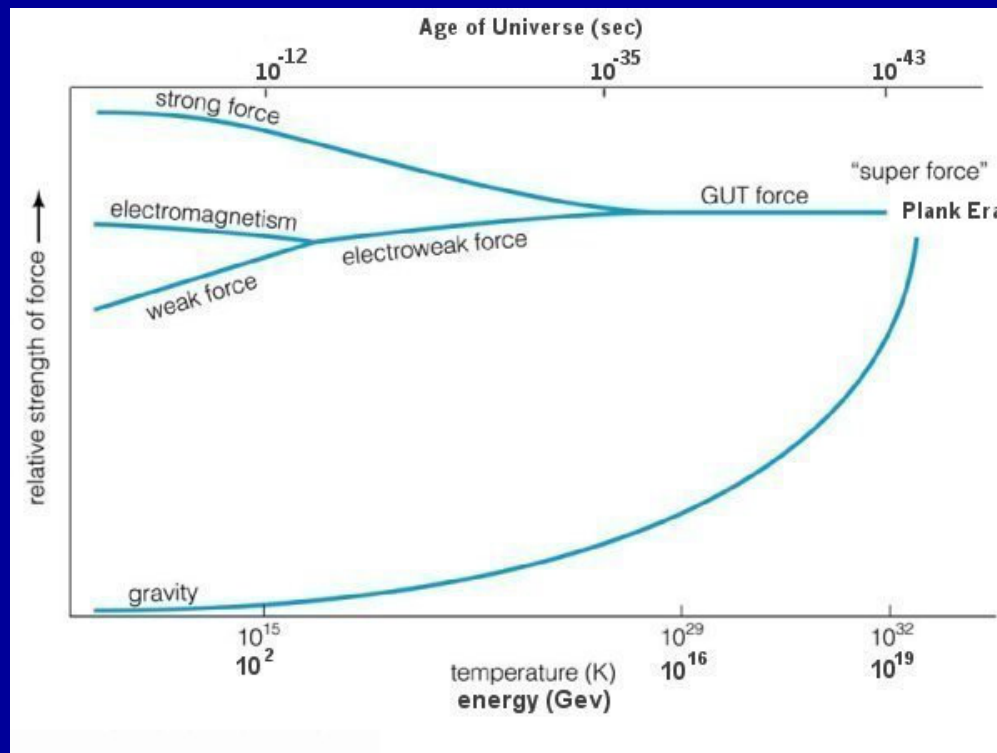
**Electromagnetismo:** força de longo alcance que actua entre partículas com **carga eléctrica** (e.g protões, electrões). É mediada por **fotões**.

**Força fraca:** força de curto alcance responsável por certos processos nucleares como o **decaimento beta** (e.g. conversão entre um neutrão e um protão com a emissão de um electrão e um anti-neutrino). É mediada por **bosões W e Z**.

**Força forte:** força de curto alcance que actua 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 protão (uud) . É mediada por **gluões**.



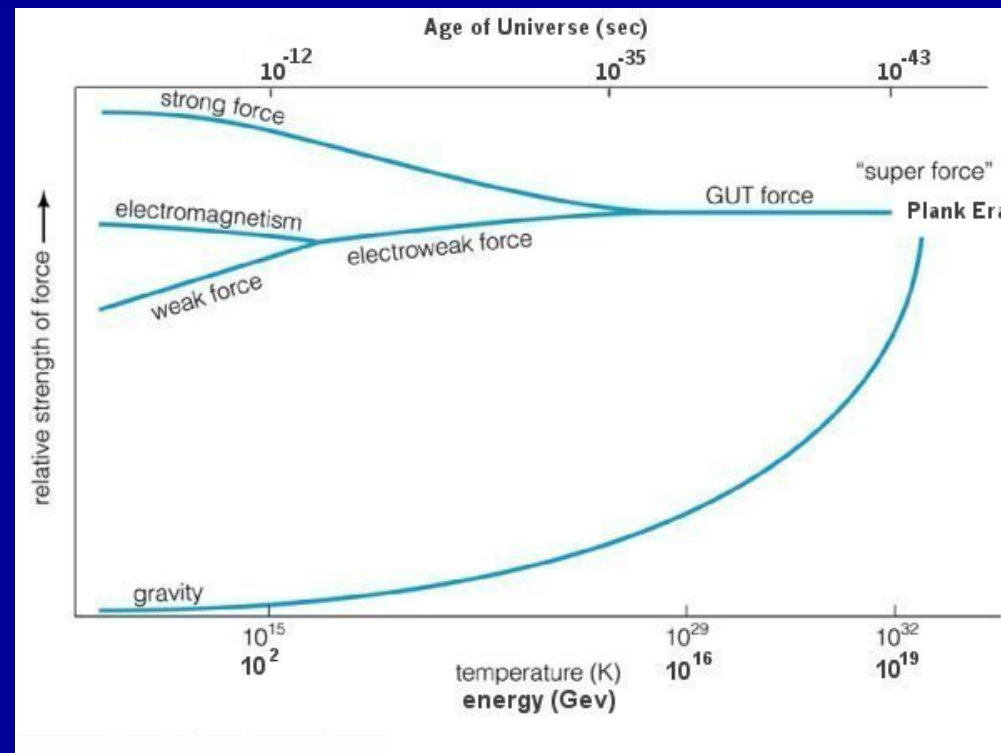
**Era de Planck** : estende-se desde o instante inicial até aos  $10^{-43}$ s (tempo de Planck). Nesta fase as 4 forças fundamentais estão unificadas numa única força. Não é aplicável a Teoria da Relatividade Geral. O universo deve ser descrito por uma teoria da Gravidade Quântica que ainda desconhecemos.



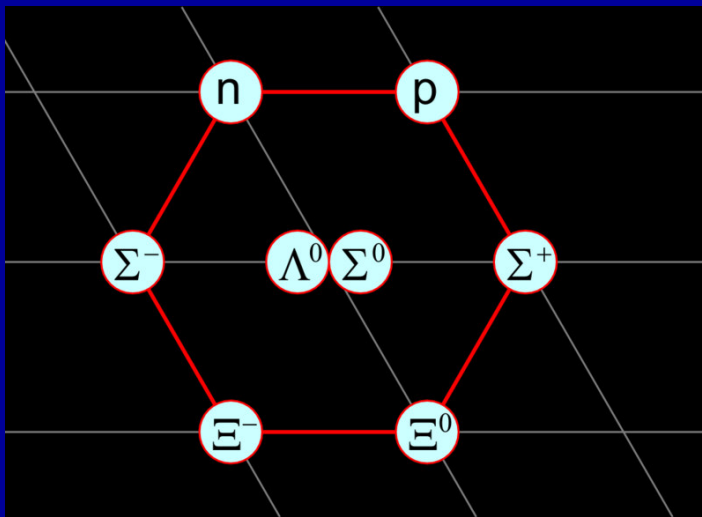
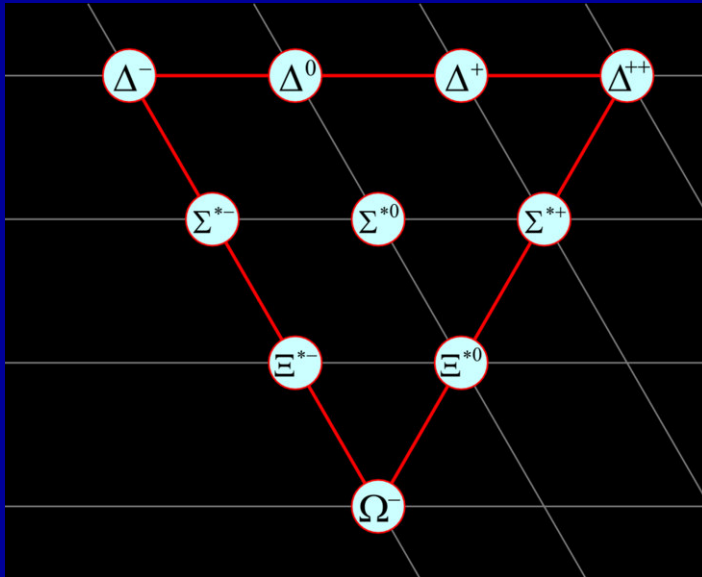
A era de Planck termina quando a idade do Universo é igual a 1 tempo de Planck e a força da **gravidade separa-se** das restantes 3 forças.



**Era da Grande Unificação (GUT):** estende-se dos  $10^{-43}$ s aos  $10^{-35}$ s. Nesta fase as forças forte, fraca e electromagnética estão unificadas numa única força mediada por um **bosão X**. O final da era GUT corresponde à **separação da força forte**. Passam a existir a força forte e a **força electrofraca** (união entre a força electromagnética e a força fraca). Deixam de ser produzidos bosões X e os existentes acabam por decair.





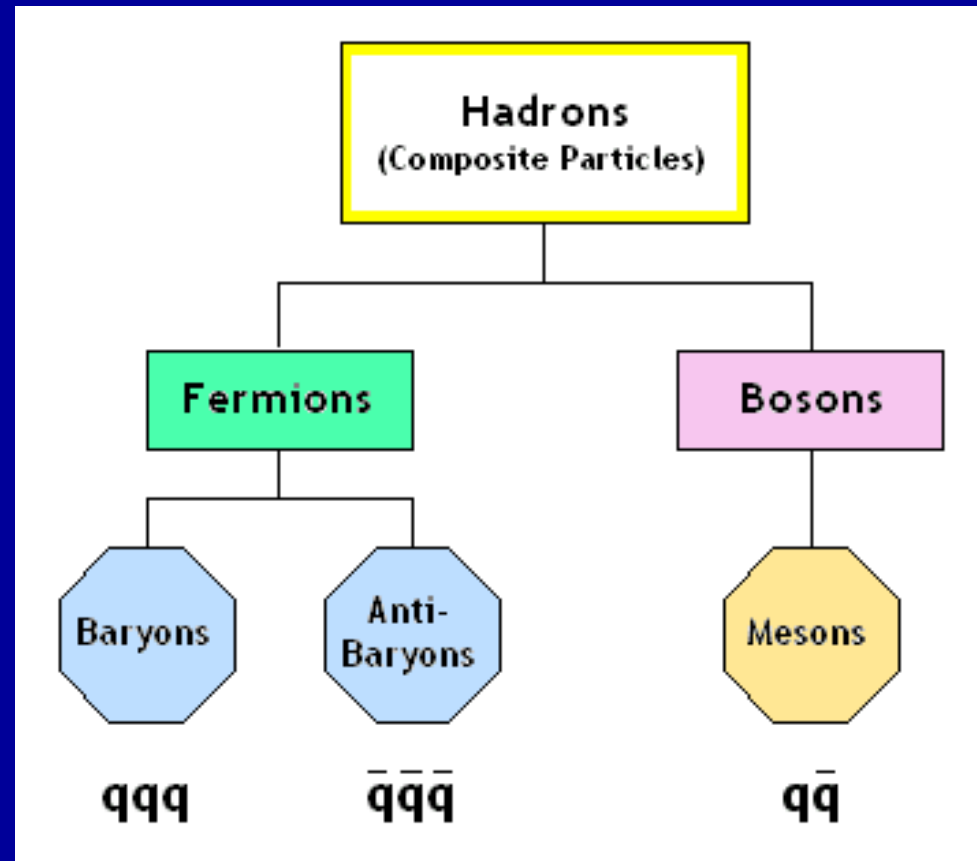


**Era dos Quarks:** período que vai desde os  $10^{-35}$ s aos  $10^{-6}$ s. Nesta fase o universo é composto por quarks, leptões, fótons, glúons e respectivas antipartículas. Quando o universo tinha aproximadamente  $10^{-12}$ s a **força electrofraca separa-se** dando origem à força electromagnética e à força fraca. A partir deste momento todas as 4 forças estão separadas.

Durante esta fase deixam de ser produzidos **bariões Omega, Sigma, Csi e Lambda**. Do decaimento destes bariões surgem os primeiros prótons e neutrões estáveis produzidos no Universo.

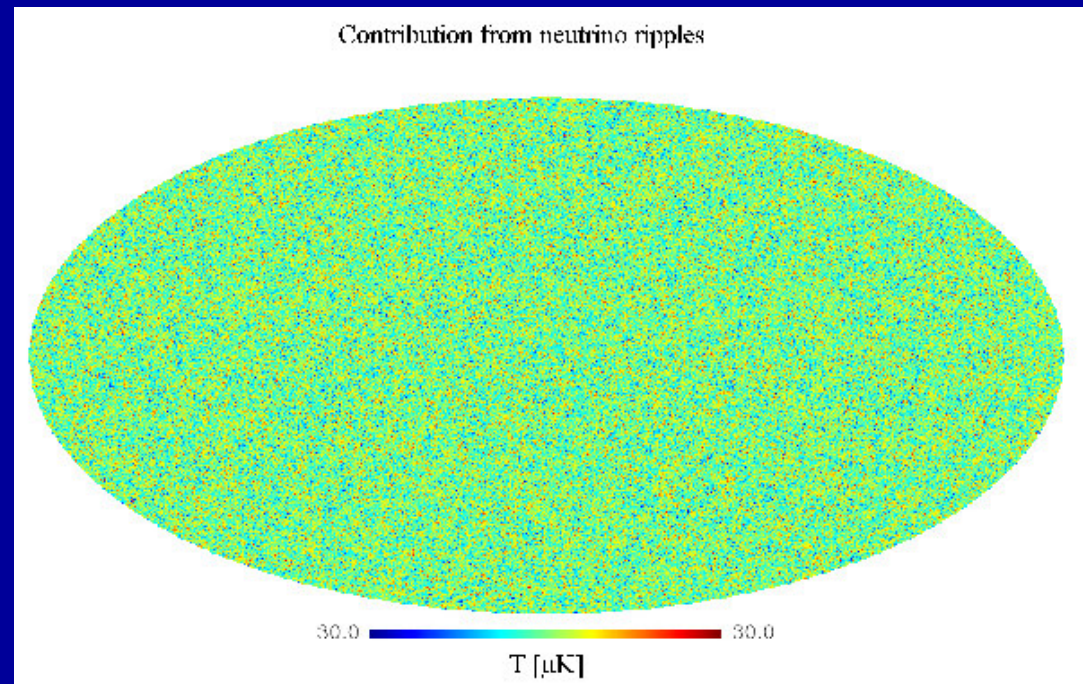


**Era dos Hadrões:** aos  $10^{-6}$ s já não existem quarks, antiquarks e glúons livres. Os quarks combinam-se para formar prótons e neutrões (que são bariões). Pares do tipo quark-antiquark combinam-se para formar mesões. Aos  $10^{-4}$ s a **existência de antimatéria é cancelada** ficando apenas um pequeno excesso de matéria para formar todas as estruturas que existem no presente universo.



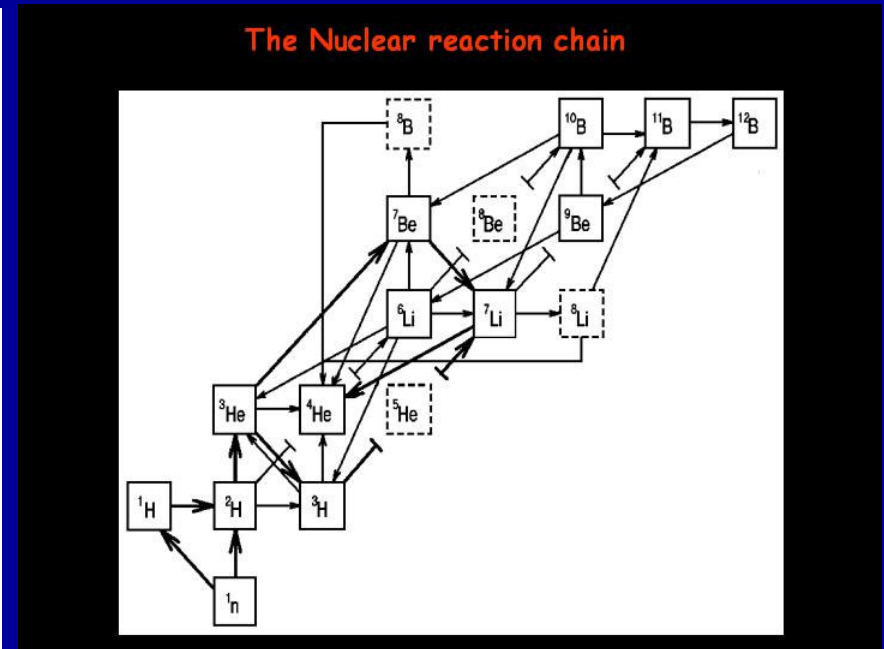
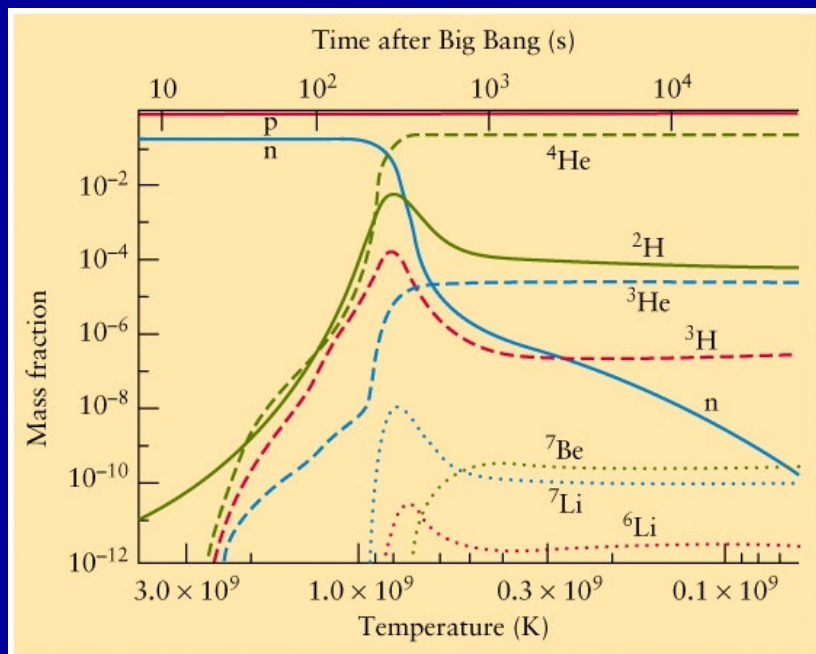


**Era dos leptões** : inicia-se aos  $10^{-4}$ s depois de terem decaído os últimos mesões. O universo é agora composto por electrões, positrões neutrinos e fótons. Quando o universo tinha **1s** tornou-se **transparente para os neutrinos** (estes deixaram praticamente de interagir com a matéria). Com um telescópio de neutrinos podemos ver como era o universo com apenas 1s de idade!



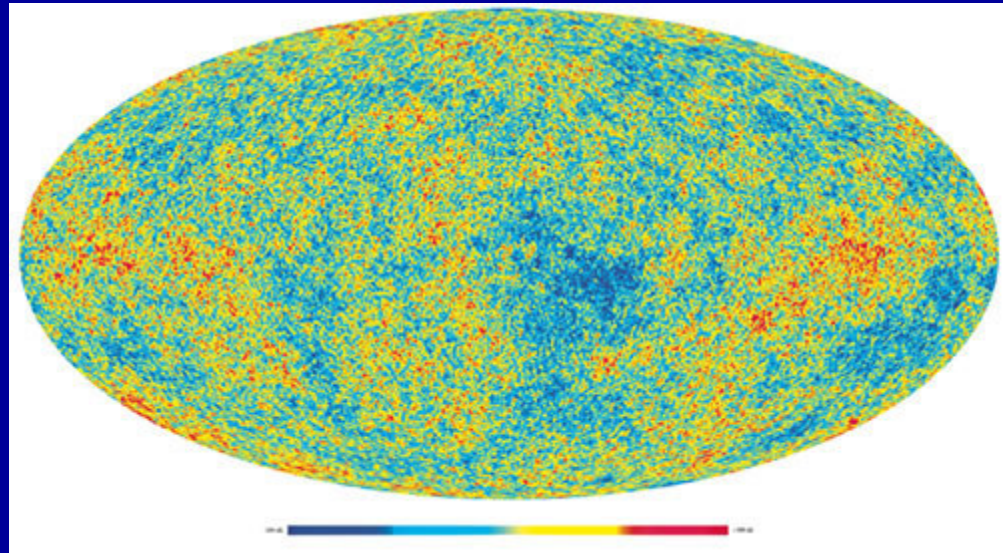


**Era da nucleosíntese** : Quando o universo tinha cerca de **3 minutos** de idade tornou-se possível a **síntese de núcleos atômicos** a partir dos prótons e neutrões existentes. Já não existia radiação com energia suficiente para quebrar os núcleos formados. O processo terminou aos 15 minutos depois de se terem formado núcleos de deutério, hélio, lítio e berílio.





Quando a temperatura do universo desceu o suficiente para permitir que os electrões se combinassem com os núcleos atómicos formando **átomos neutros** o **universo tornou-se transparente para a radiação**, ou seja, para os fotões. Isto aconteceu quando o universo tinha cerca de **300 000 anos**. A radiação libertada nessa altura viajou livremente pelo universo podendo detectada actualmente como uma **radiação de fundo em microondas**. A existência desta radiação foi prevista em primeira mão em 1948 por **Jorge Gamow**.

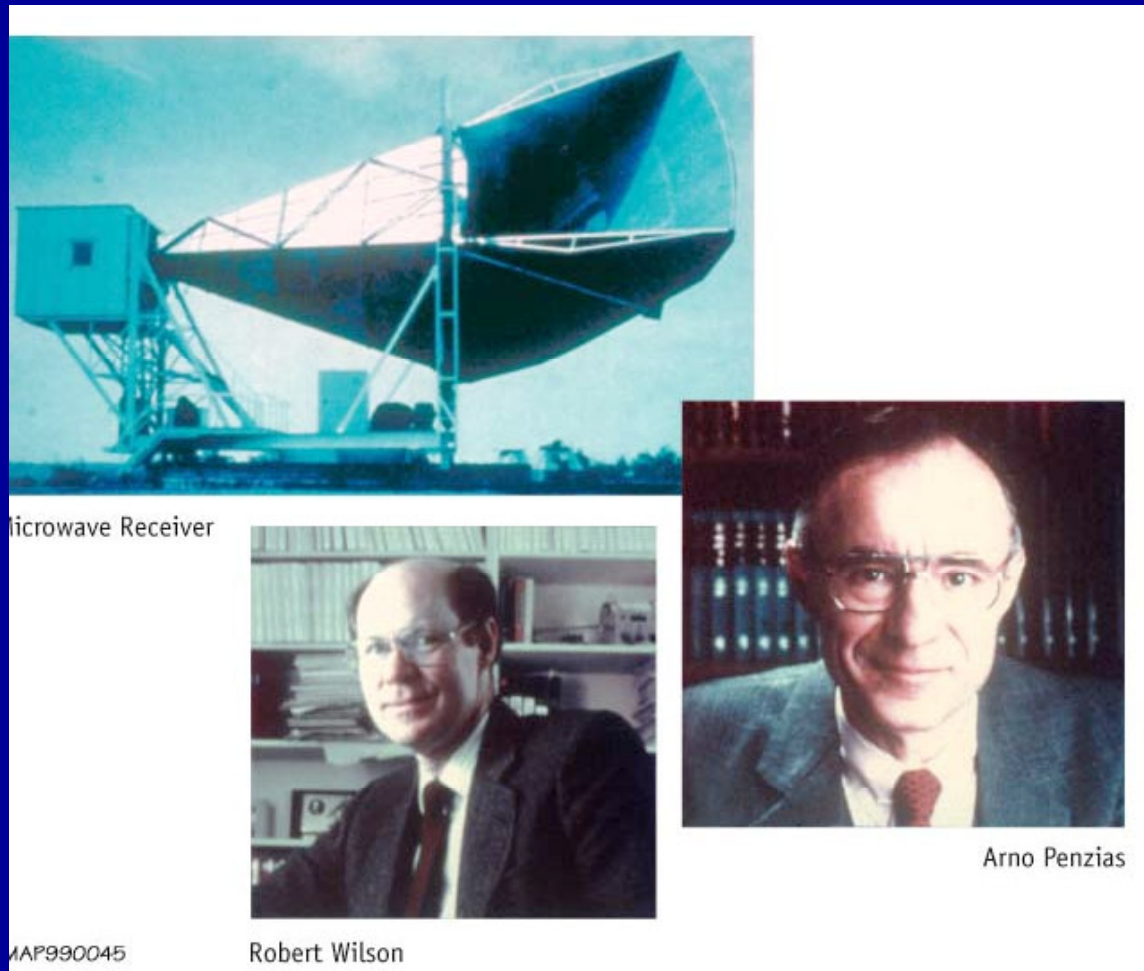




# Universidade da Madeira

Grupo de Astronomia

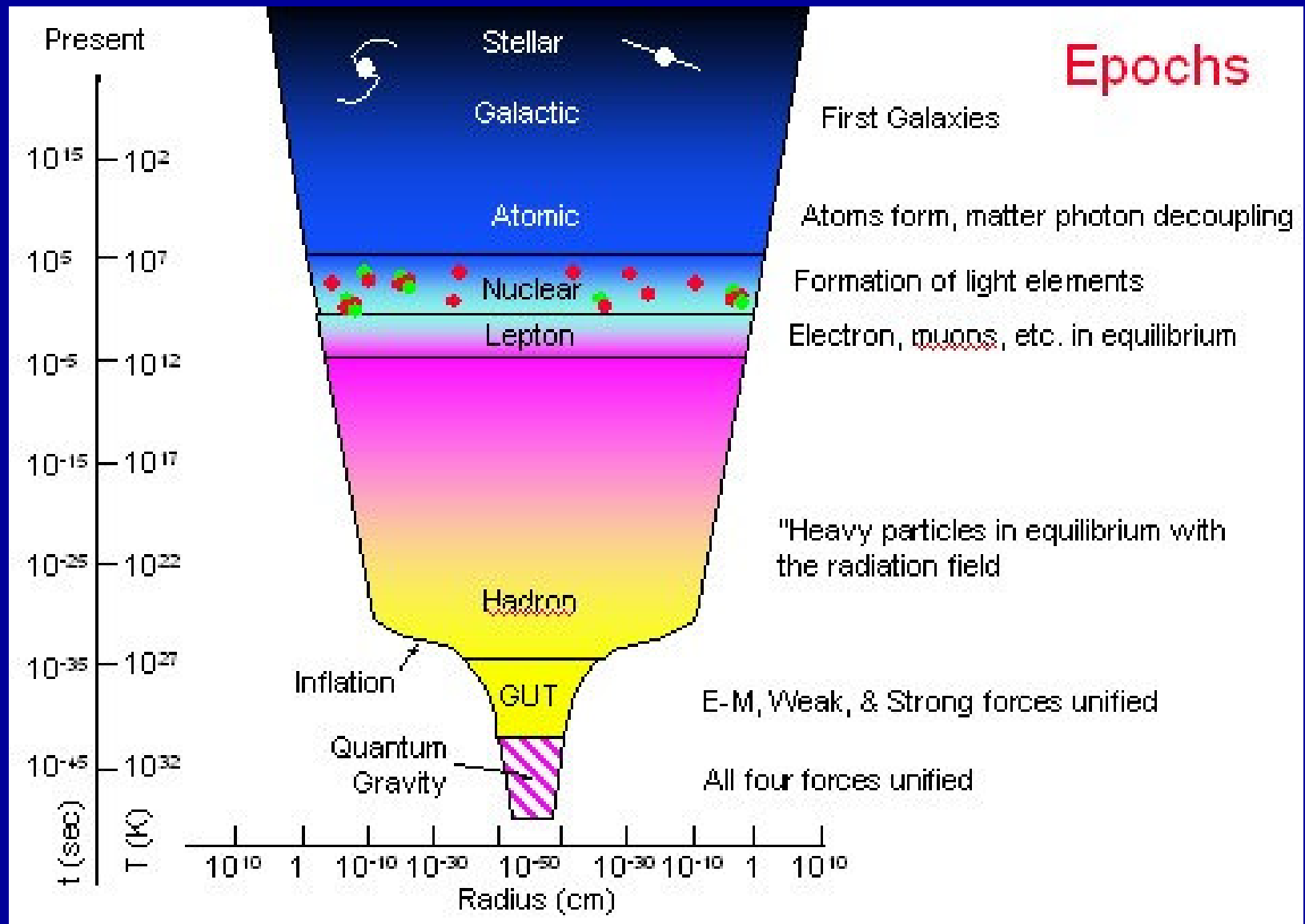
A existência de **radiação de fundo** devida ao Big Bang, prevista pela primeira vez por George Gamow em 1948, apenas veio a ser detectada em 1965 por **Arno Penzias** e **Robert Wilson**.

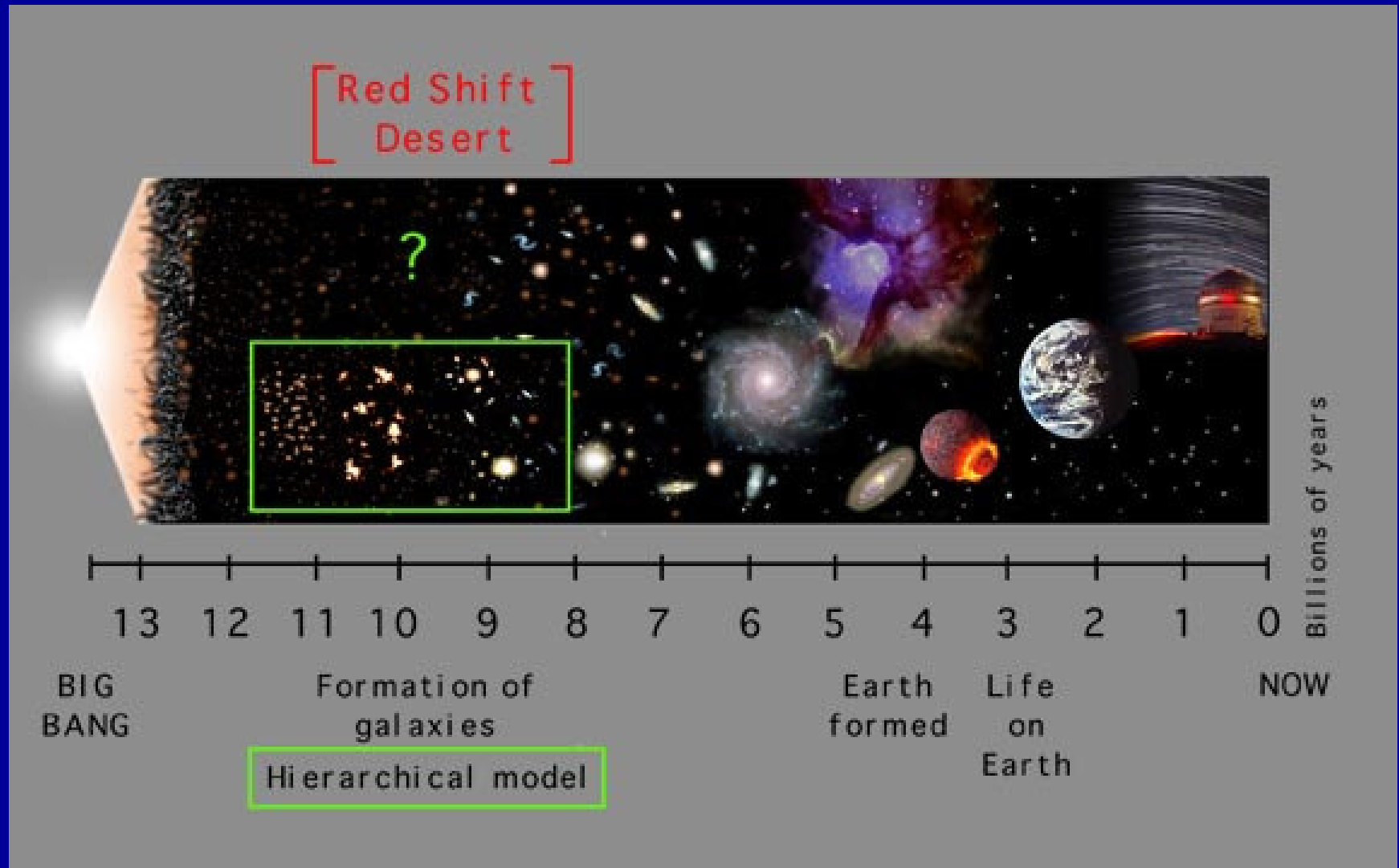




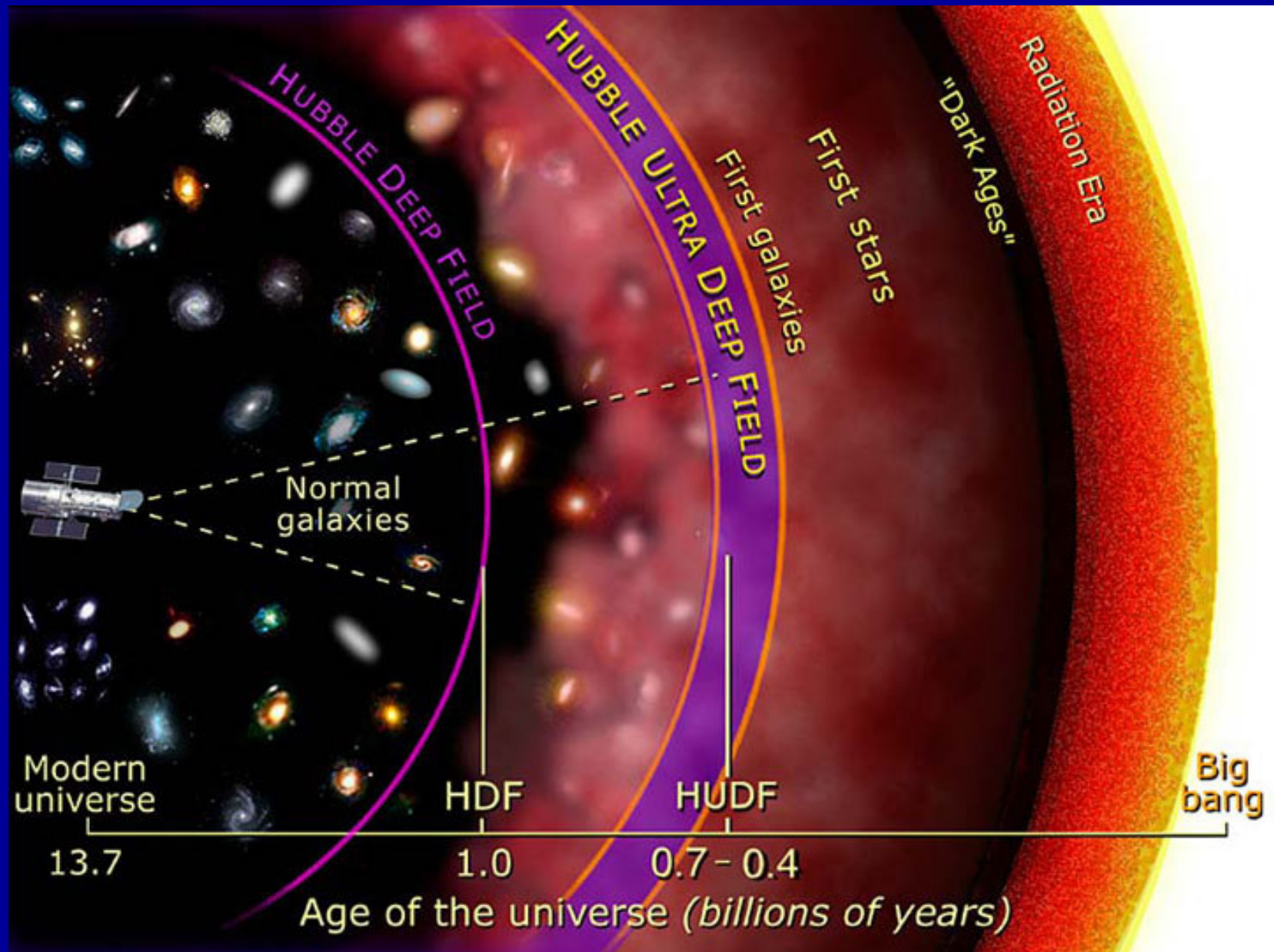
# Universidade da Madeira

Grupo de Astronomia



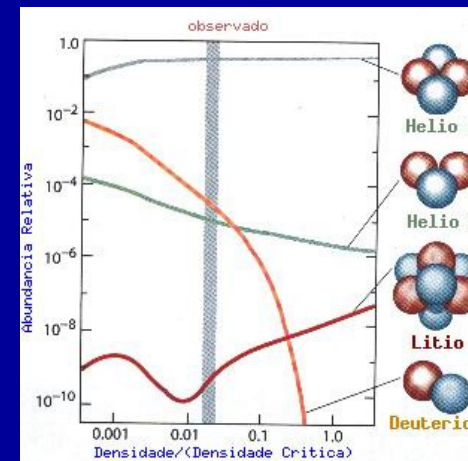
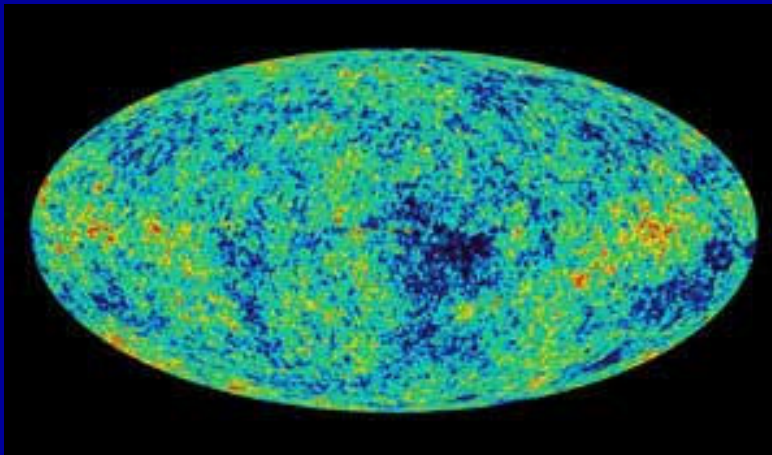




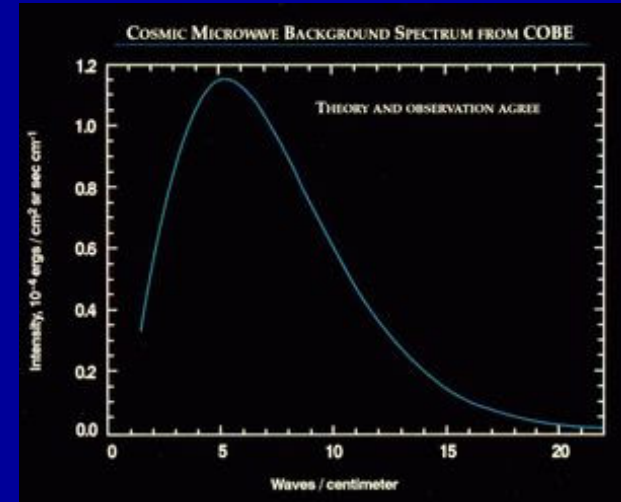
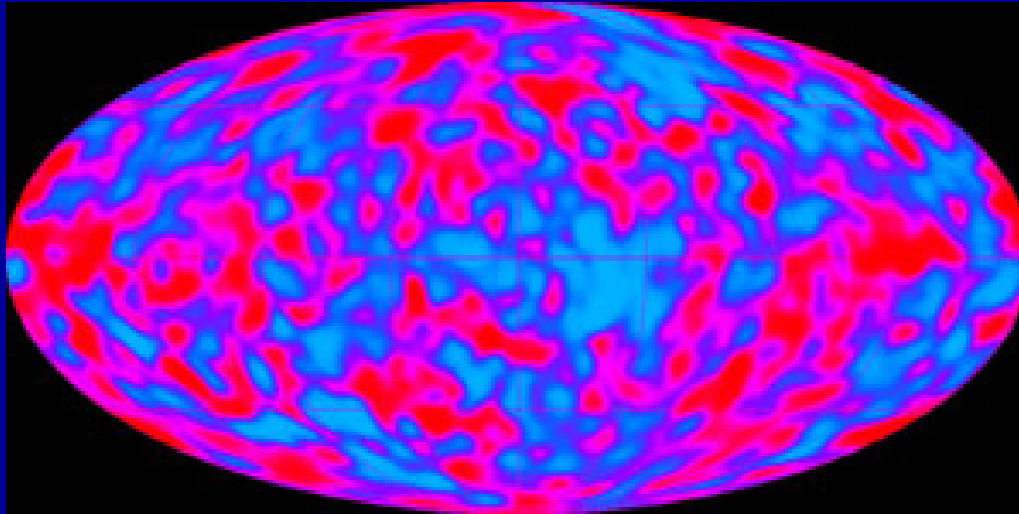




## 3 Inflação



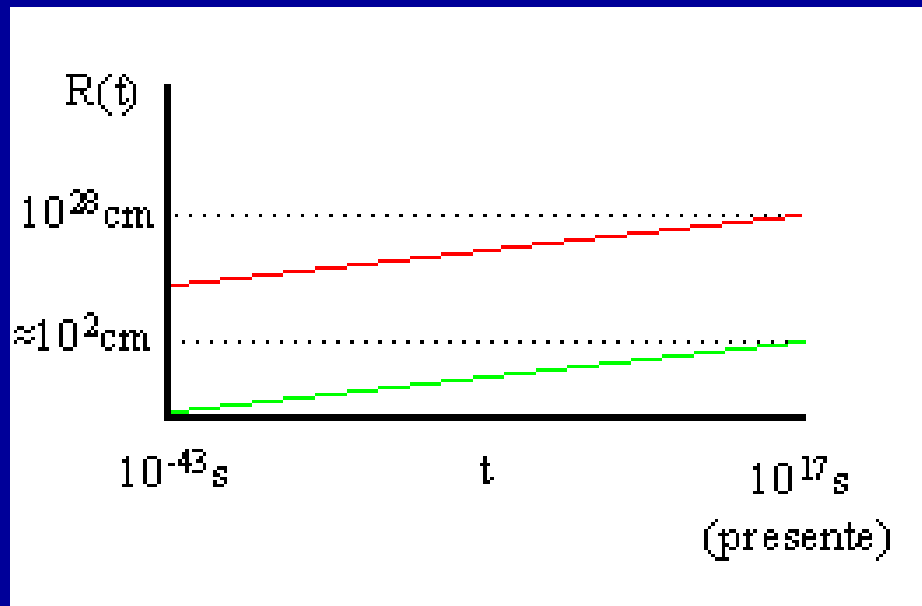
Embora o modelo Standard do Big Bang tenha tido grande sucesso, por exemplo, na previsão da existência da **radiação cósmica de fundo de microondas** e na explicação do processo de **nucleosíntese primordial dos elementos**, não é capaz de dar resposta a outros problemas, como por exemplo, o **problema do horizonte** e o problema relacionado com o facto de termos um universo plano.



A partir da observação sabemos que a distribuição da radiação cósmica de fundo é isotrópica, isto é, é a mesma em qualquer direcção que se olhe. Isto significa que **em algum momento do passado todos os pontos do universo devem ter estado em contacto causal entre si** (deve ter sido possível ir de um extremo ao outro do Universo a uma velocidade não superior à da luz num intervalo de tempo inferior à idade do Universo).



Sabemos que o Universo mede cerca de  $10^{28}\text{cm}$  e que existe há cerca de  $10^{17}\text{s}$ . Atendendo à velocidade de expansão (que sabemos deduzir a partir da TRG) podemos recuar no tempo até ao instante inicial e ver se em algum momento a dimensão do Universo permitiu o contacto casual entre todos os seus pontos. Verifica-se que isso nunca aconteceu.

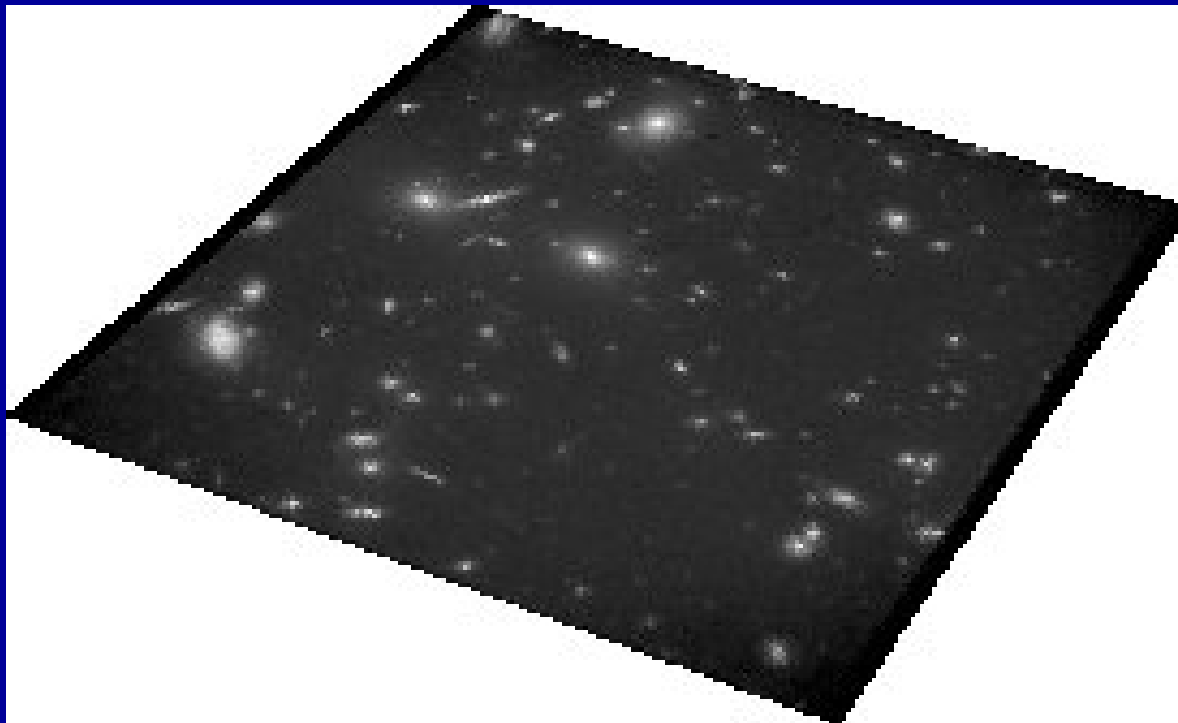


Ou então, dada a isotropia observada então no início as diferentes partes do Universo estavam em contacto causal. Considerando a mesma velocidade de expansão que anteriormente resulta que o Universo actual deveria ter uma dimensão inferior a 2.5m (!?)

Existe assim uma falha no modelo Standard do Big Bang. É o chamado **Problema do Horizonte**.



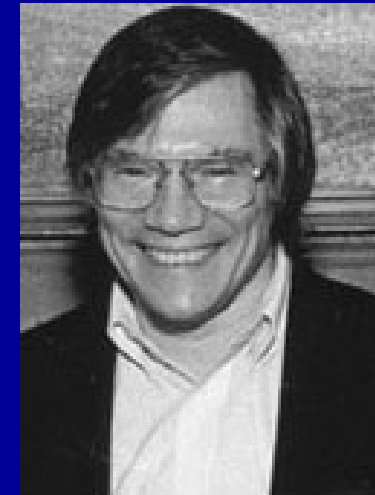
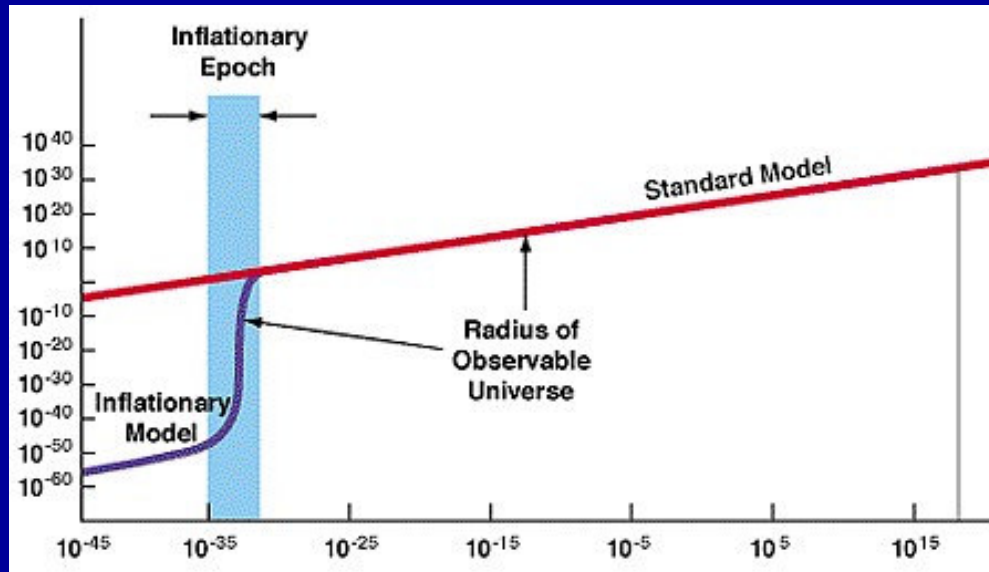
As observações mostram que **o Universo é praticamente plano** (ou seja,  $k$  é praticamente zero) o que significa que a densidade do Universo é muito próxima da densidade crítica, ou seja que  $\Omega \approx 1$ . Mas se fosse assim nos instantes iniciais as consequências teriam sido catastróficas para o Universo impedindo a formação de estrelas e galáxias.



A teoria do Big Bang não consegue pois explicar a razão pela qual a densidade do universo é praticamente igual à densidade crítica.



# Universidade da Madeira

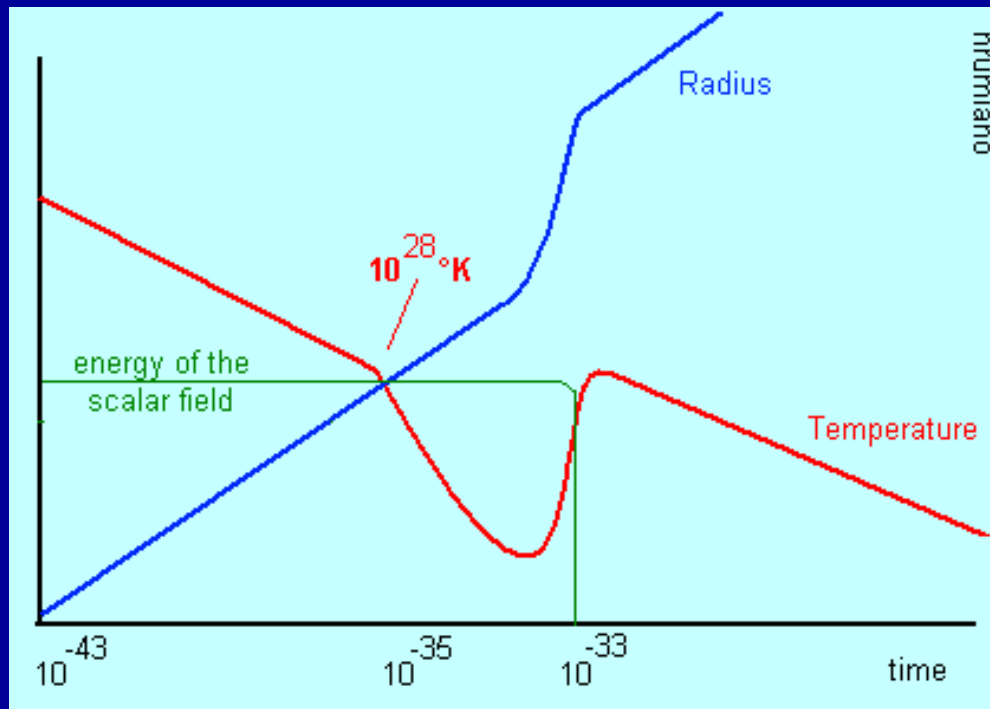


GUTH

Para resolver estes e outros problemas **Alan Guth** sugeriu em 1981 a ideia de um **Universo inflacionário**. 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. Quando a força forte separou-se das restantes forças o universo entrou num estado de alta energia designado por **falso vácuo**. Durante algum tempo o espaço vazio adquiriu uma enorme pressão que temporariamente venceu a força de gravidade e **acelerou exponencialmente a expansão do Universo**. O campo responsável pela inflação designa-se normalmente por **inflação**.



A inflação teve início quando a idade do Universo era de  $10^{-36}$ s e terminou aproximadamente aos  $10^{-33}$ s. Durante este período **a dimensão do Universo aumentou de um factor da ordem de  $10^{30}$** . Depois da inflação a expansão do universo retomou a normalidade.

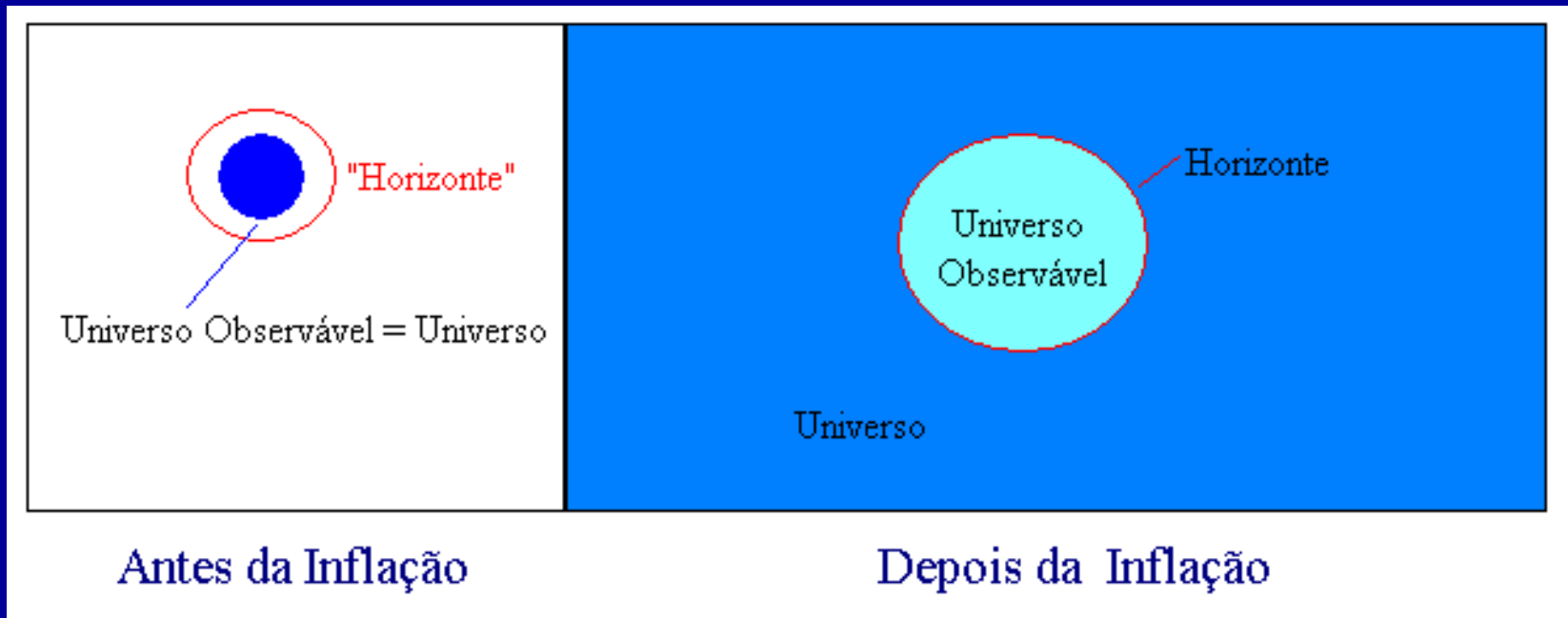


Durante a inflação o universo arrefeceu exponencialmente. No entanto a energia libertada no final da inflação voltou a aquecer o universo para uma temperatura semelhante à que se verificava antes.

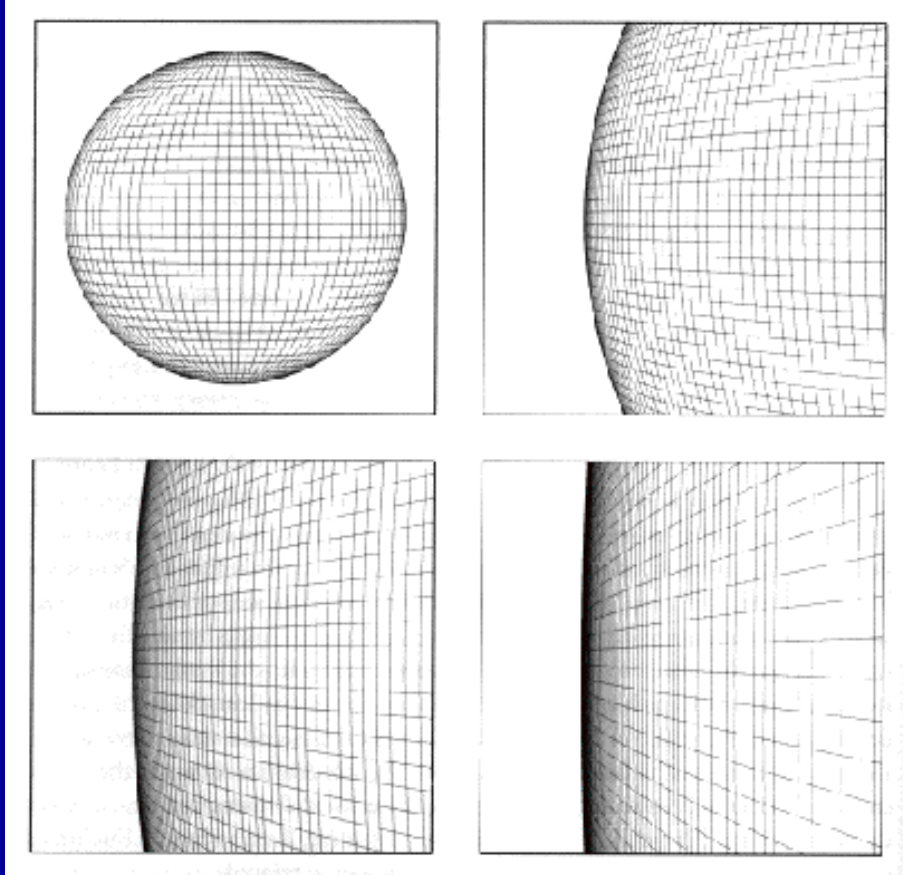


**Nota:** durante a inflação a expansão do Universo decorreu a uma velocidade superior à da luz. Sabemos que nenhum corpo pode andar a velocidades superiores à da luz. Isto não levanta qualquer problema neste caso, pois durante a inflação o que avançou a velocidades superiores à da luz foi a dilatação do espaço e não qualquer corpo material.



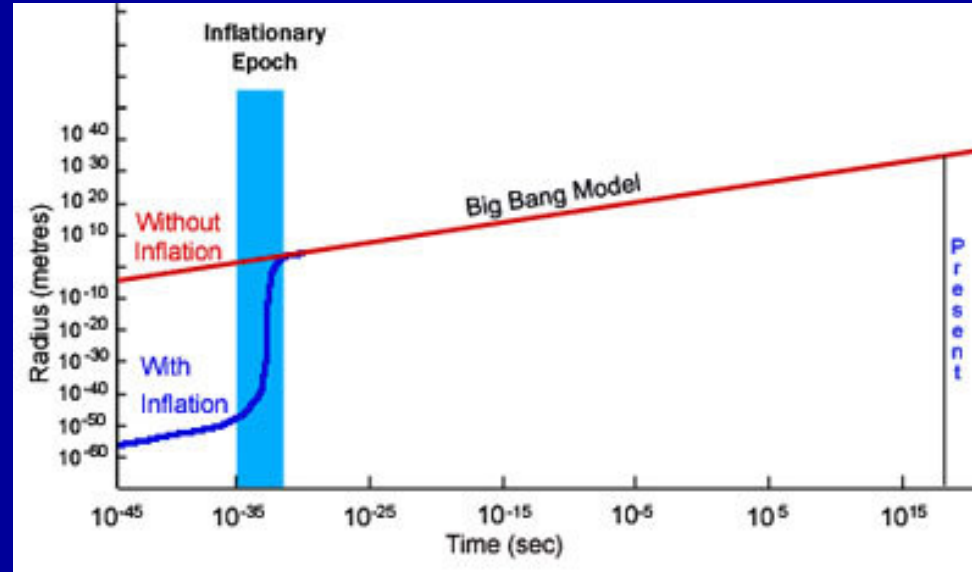


Antes da inflação todas as regiões do Universo estavam em contacto causal. Depois da inflação o **horizonte** de qualquer observador passa a ser muito menor do que o Universo. Para cada observador existe um **Universo Observável** cuja dimensão, que designaremos por horizonte, é muito inferior à dimensão do **Universo** na sua globalidade.



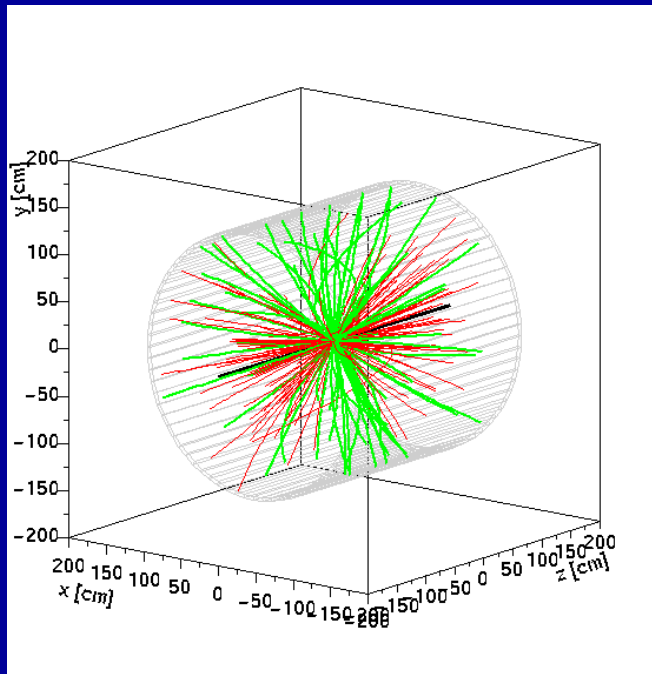
A **inflação explica** assim de uma forma muito simples a **isotropia da radiação cósmica de fundo** pois garante que no passado todos os pontos estiveram em contacto causal.

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



A ideia de colocar a inflação exactamente no final da era da grande unificação reside no facto de ser nesse instante que a maioria das **teorias da grande unificação (GUTs)** têm uma maior influência na evolução do Universo.

**Nota:** existem outras teorias inflacionárias mais elaboradas (e.g. Dupla Inflação), todas elas procurando explicar da melhor forma possível o universo em que vivemos.

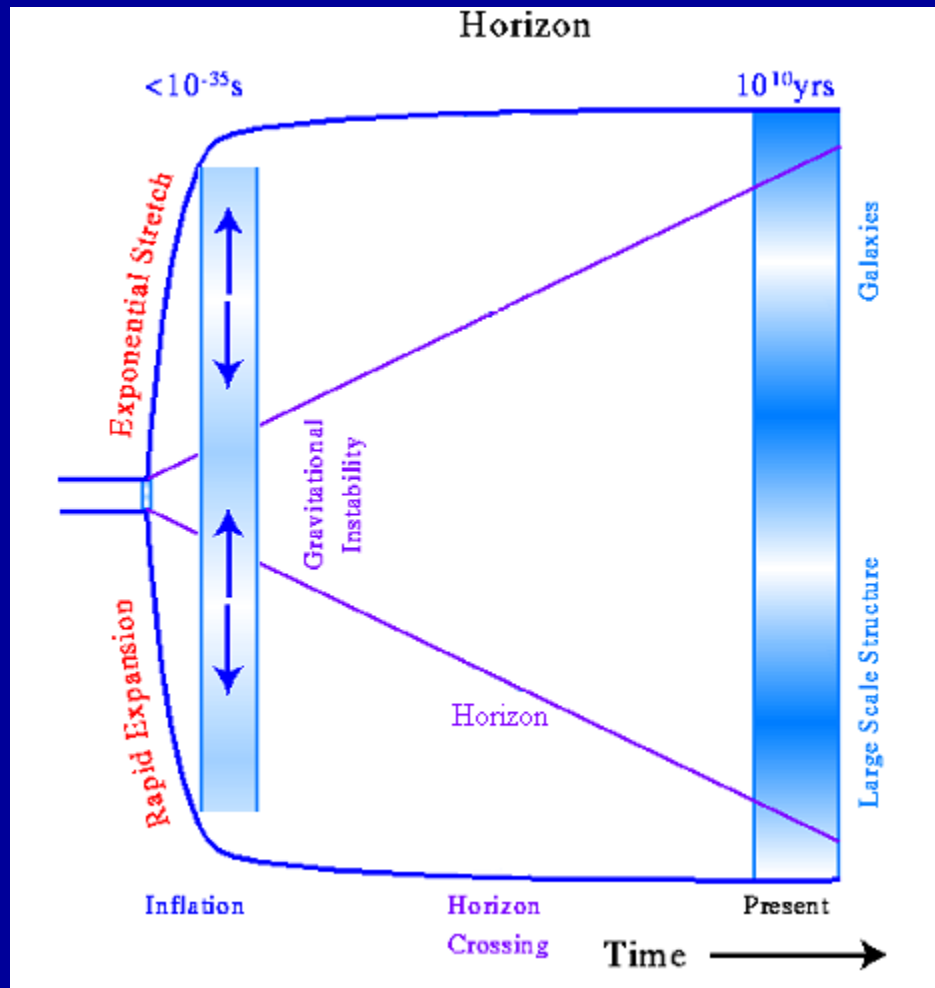


Simulação de um monopolo magnético

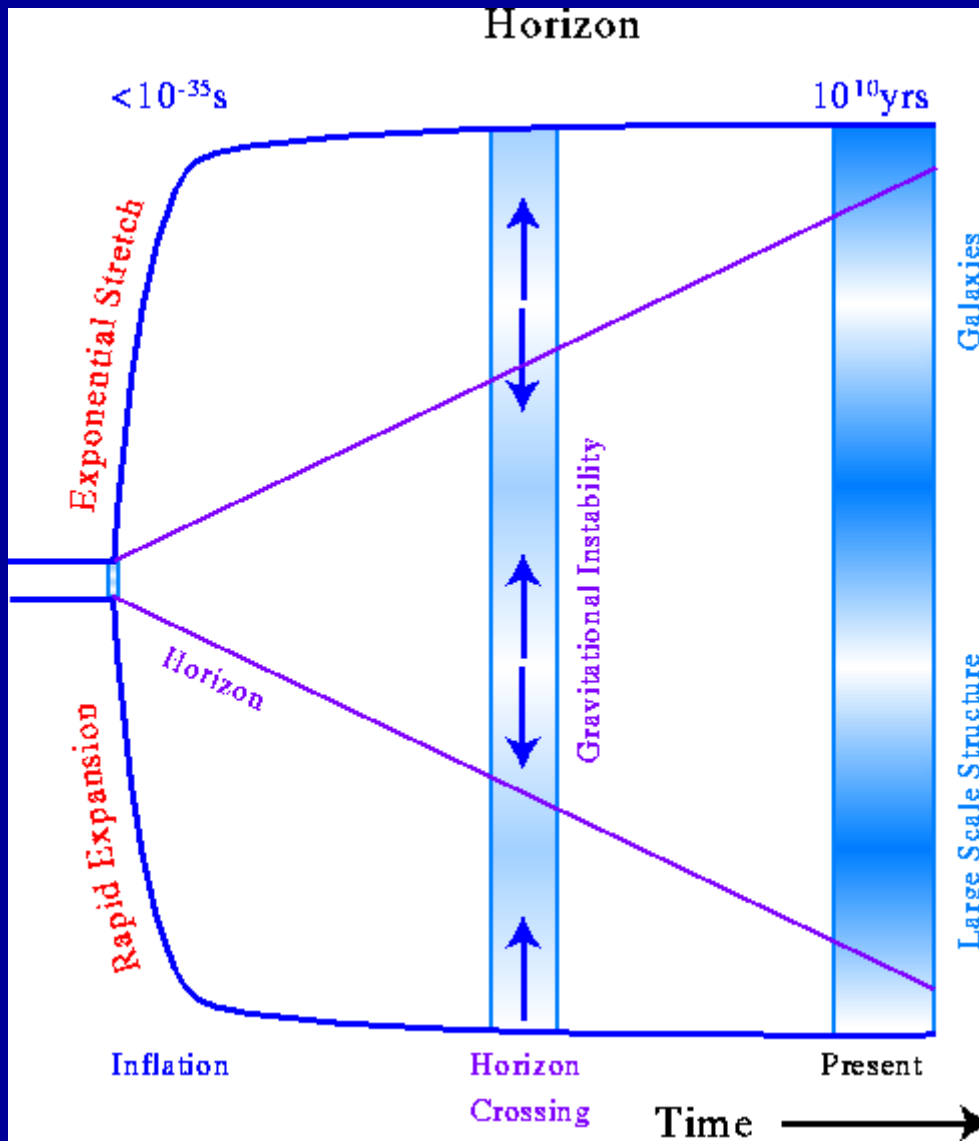
Na natureza não se observam **monopólos magnéticos**. Sempre que temos um íman existe polo Norte e um polo Sul.

Muitas teorias prevêem que no universo primordial possam ter sido criadas grandes quantidades de monopólos magnéticos **estáveis**.

No entanto isso teria acontecido antes dos  $10^{-35}$  s, ou seja, antes da inflação. **Com a inflação os monopólos magnéticos foram diluídos no Universo** pelo que a sua observação actualmente é muito improvável.



A inflação vem também ajudar dar resposta ao problema da **formação de estrutura no Universo**. As flutuações quânticas no universo anterior à inflação foram amplificadas para dimensões cósmicas. Muitas delas atingiram dimensão superior à do horizonte no final da inflação.

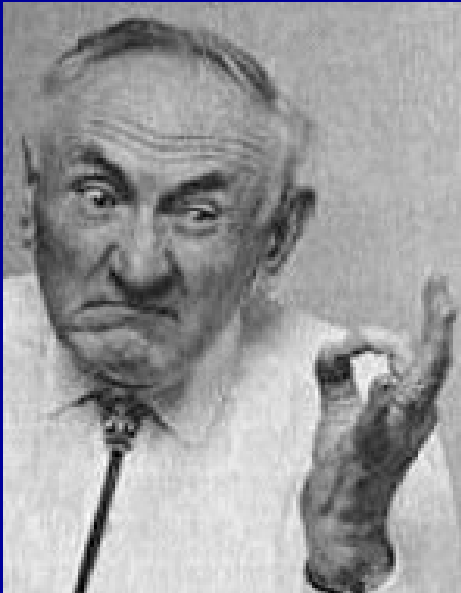


À medida que o horizonte se vai alargando as flutuações acabam por entrar de novo no interior do horizonte.

Consoante a amplitude e o comprimento de onda dessas flutuações estas podem simplesmente dissipar-se ou então dar origem à formação de buracos negros ou de estruturas mais complexas como galáxias ou enxames de galáxias.



## 4 Matéria Escura



Ao observar em 1933 enxame de galáxias de Coma o astrofísico suíço **Fritz Zwicky** verificou, baseando-se no movimento das galáxias próximas dos extremos do enxame, que este possuía muito mais massa para além daquela estimada a partir do brilho das suas galáxias.

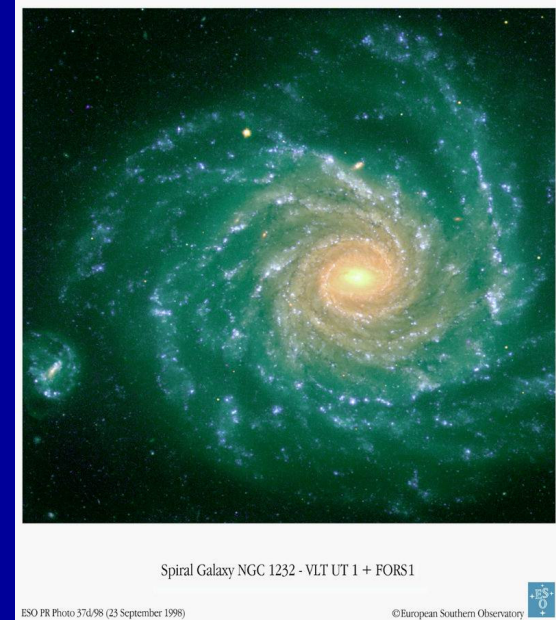
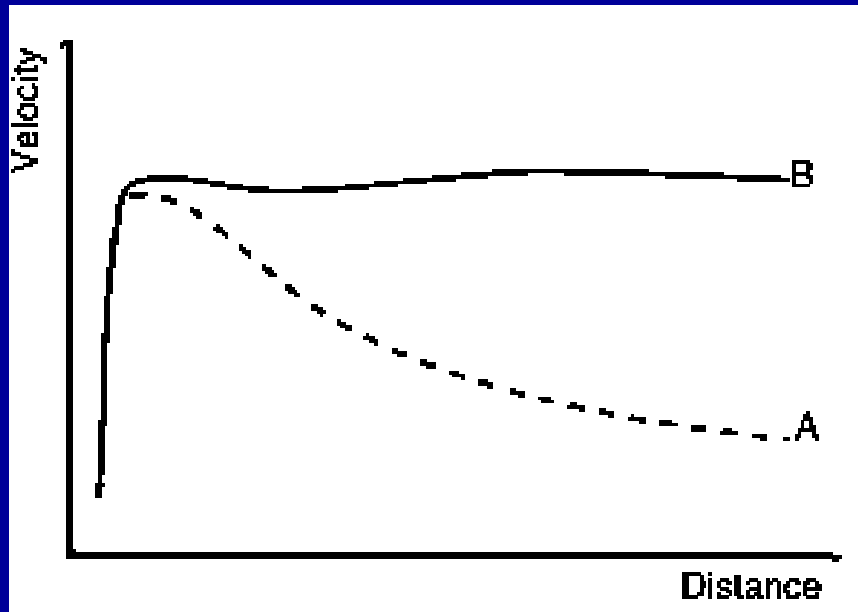


## Enxame de galáxias de Coma

O. Lopez-Cruz and I. K. Shelton (<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap971213.html>)

Estimou que a massa do enxame deveria ser cerca de 400 vezes superior ao observado a partir do brilho das suas galáxias. Esta questão ficou conhecida como o "*problema da massa em falta*". Essa massa em falta veio a designar-se por **matéria escura**.





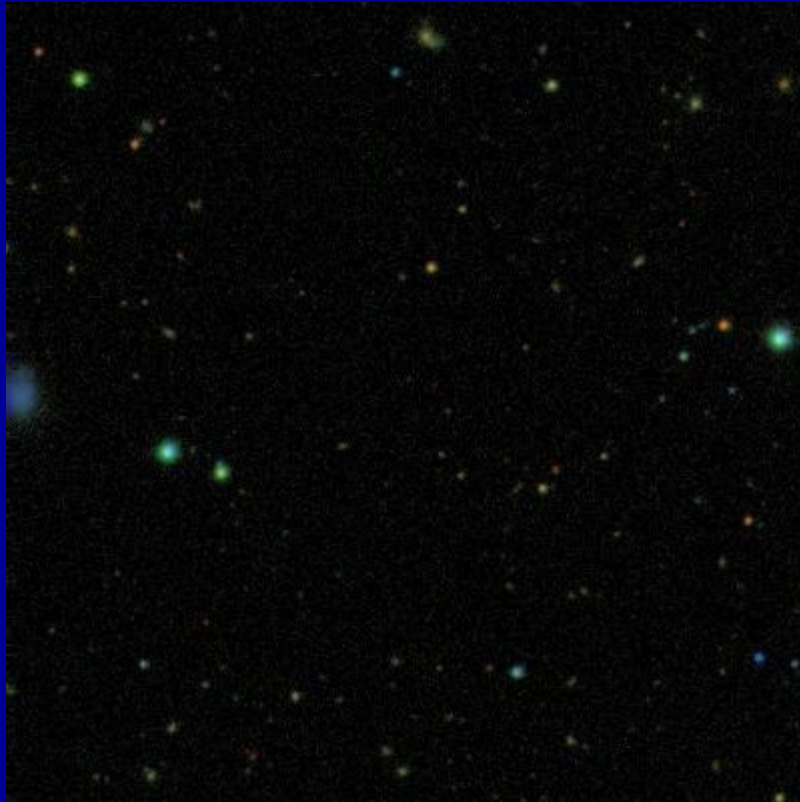
Em 1975 a astrónoma **Vera Rubin** descobriu que a maior parte das estrelas numa galáxia espiral orbitam em torno do núcleo galáctico praticamente à mesma velocidade independentemente da sua distância ao centro. Este resultado sugere que, ou a Teoria Newtoniana da gravidade não é Universal, ou mais de metade da massa das galáxias está contida no halo escuro sob a forma de matéria escura.



A quantidade de matéria escura numa galáxia pode ser inferida a partir da relação massa-luz para essa galáxia. Esta relação é dada por

$$\Psi = \frac{M_{\text{total}}}{M_{\text{luminosa}}}$$

Quanto maior este valor maior a percentagem de matéria escura nessa galáxia.



**VIRGOHI21**

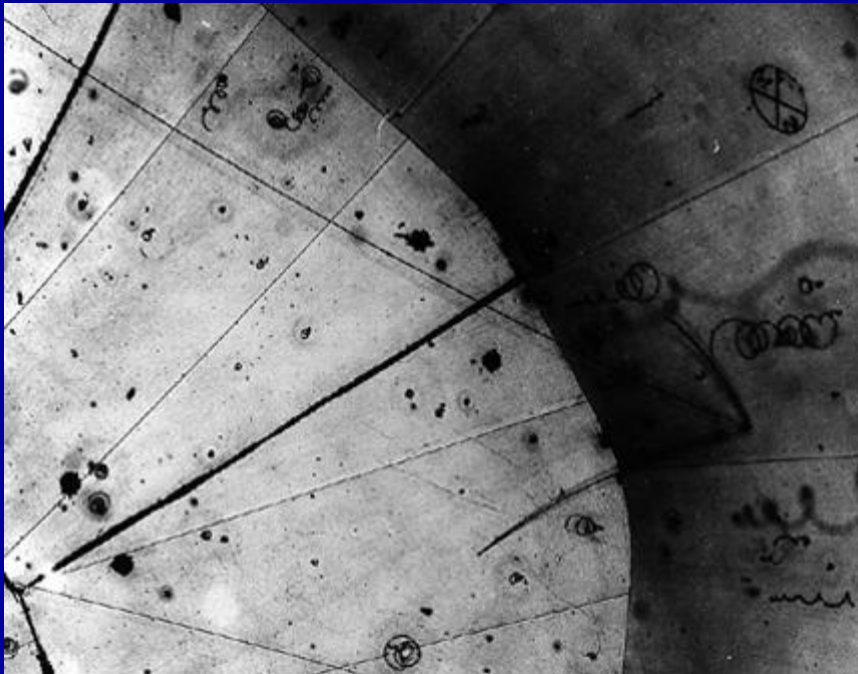
Sloan Digital Sky Survey

<http://www.sdss.org/iotw/archive.html>

Parece haver mais matéria escura numas regiões do que noutras. Por exemplo, nos enxames fechados observados nunca foi detectada matéria escura.

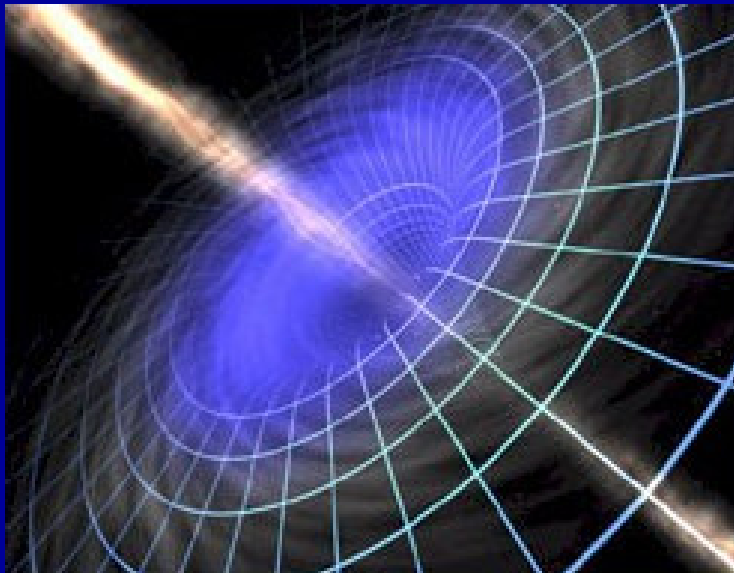
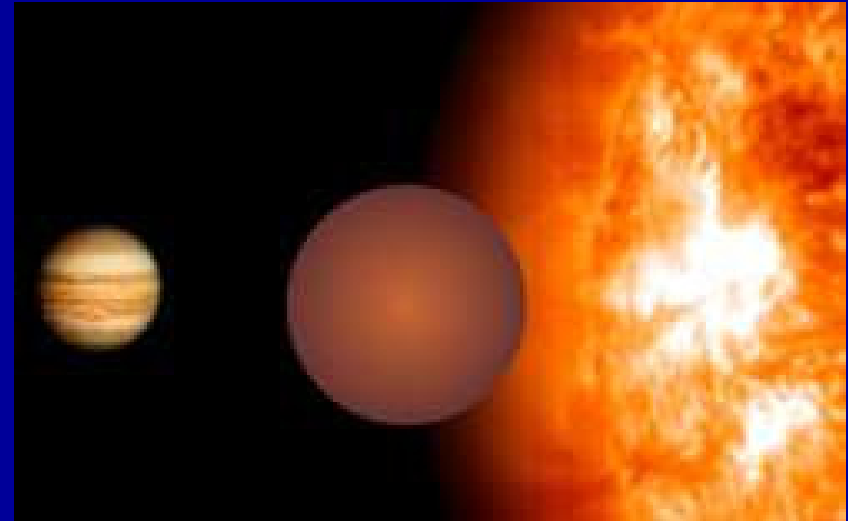
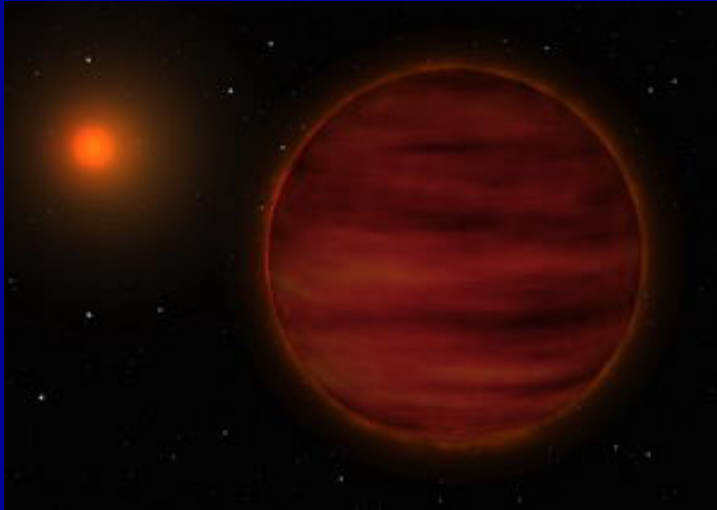
Por outro lado, a galáxia **VIRGOHI21**, recentemente detectada no enxame da Virgem a 50 milhões de anos luz parece ser **composta inteiramente por matéria escura**.

Nesta galáxia, detectada no rádio, não foram observadas quaisquer estrelas e foi medida uma massa escura cerca de 1000 vezes superior à do Hidrogénio (na Nossa Galáxia a matéria escura é apenas (!) 10 vezes superior à massa luminosa).



Descoberta do neutrino num acelerador de partículas

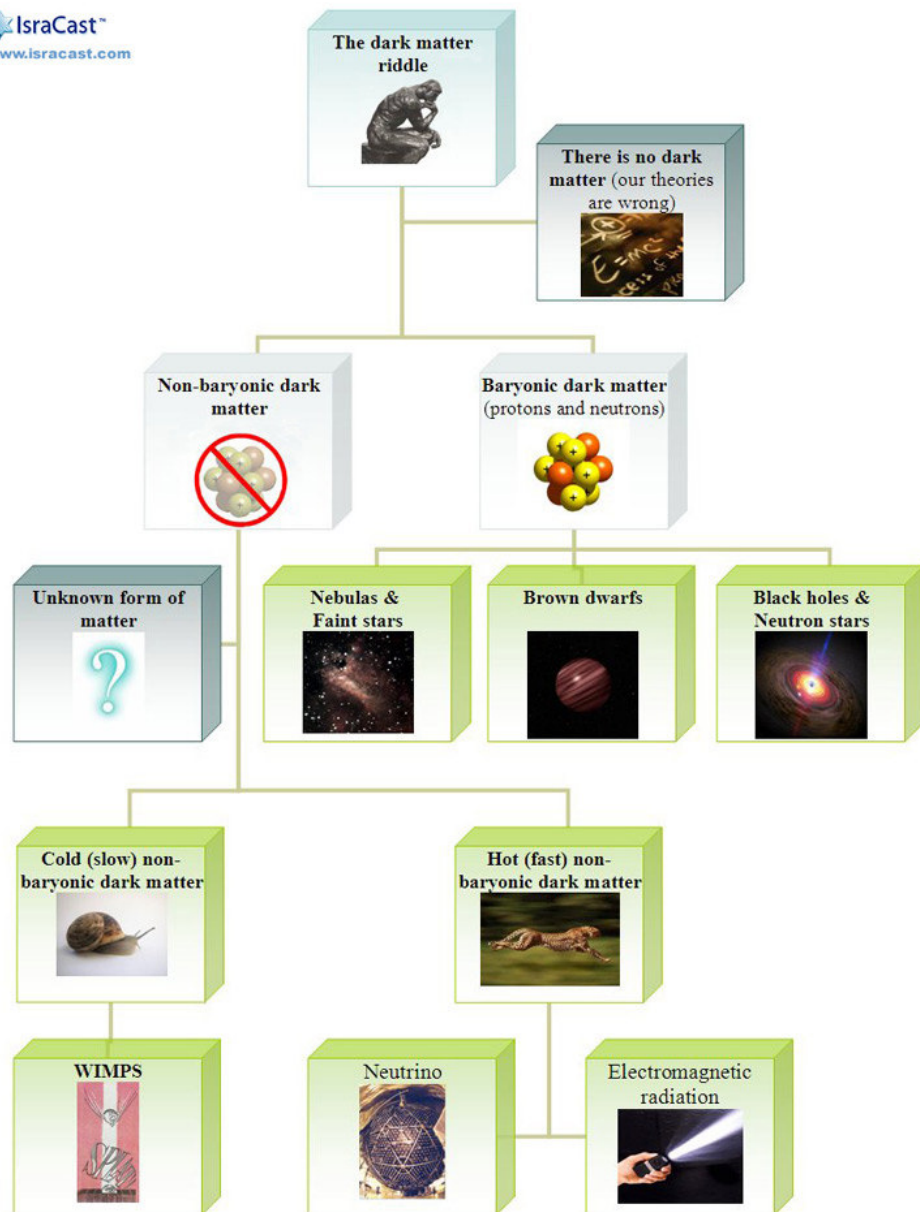
A **matéria escura quente** é composta por partículas que andam a velocidades próximas da da luz. Um exemplo conhecido deste tipo de matéria é o **neutrino**. Este preenche de facto o requisito de interagir com a força gravítica mas não com a força electromagnética. Contudo a contribuição total dos neutrinos para a densidade de matéria escura é irrisória. Além disso a matéria escura quente não é capaz de explicar a formação de galáxias a partir do Big Bang.



Fala-se então em **matéria escura fria**, isto é, matéria composta por partículas com velocidades muito inferiores à da luz. Parte desta é composta por **matéria bariónica** na forma de objectos pouco luminosos como: buracos negros, anãs brancas, estrelas de neutrões, anãs vermelhas, anãs castanhas e Júpiteres.



IsraCast™  
www.isracast.com



No entanto os estudos revelam que apenas uma pequena fracção da matéria escura se insere neste quadro. Assim a composição da maior parte da matéria escura ainda é uma incógnita para nós. Alguns dos candidatos em estudo são os **axiões** e as **WIMPs** (partículas que surgem apenas em extensões do modelo standard e que ainda não foram observadas).



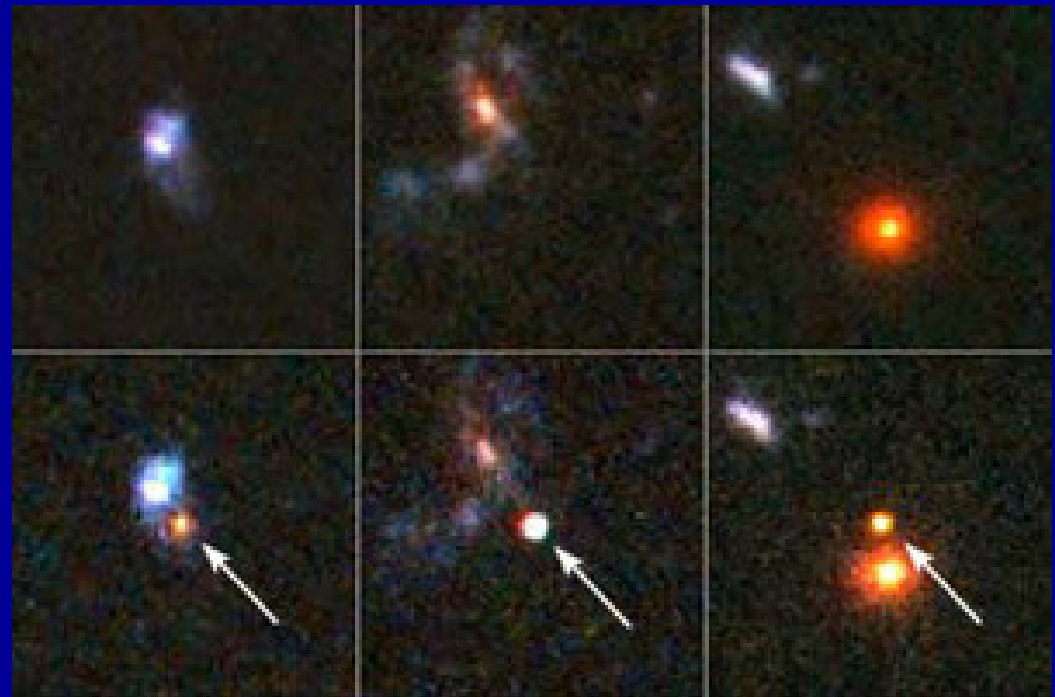
A matéria escura parece ser um ingrediente fundamental para a **formação de estrutura** no Universo. A formação de estrutura no Universo ocorre de forma hierárquica começando pelas estruturas menores que depois colapsam para originar galáxias e depois enxames de galáxias.

No momento da formação das primeiras estrelas, a matéria bariónica ordinária tem ainda uma temperatura muito alta pelo que necessita de um elemento compactador para que possa colapsar. Esse papel compactador pode ser desempenhado pela matéria escura fria.

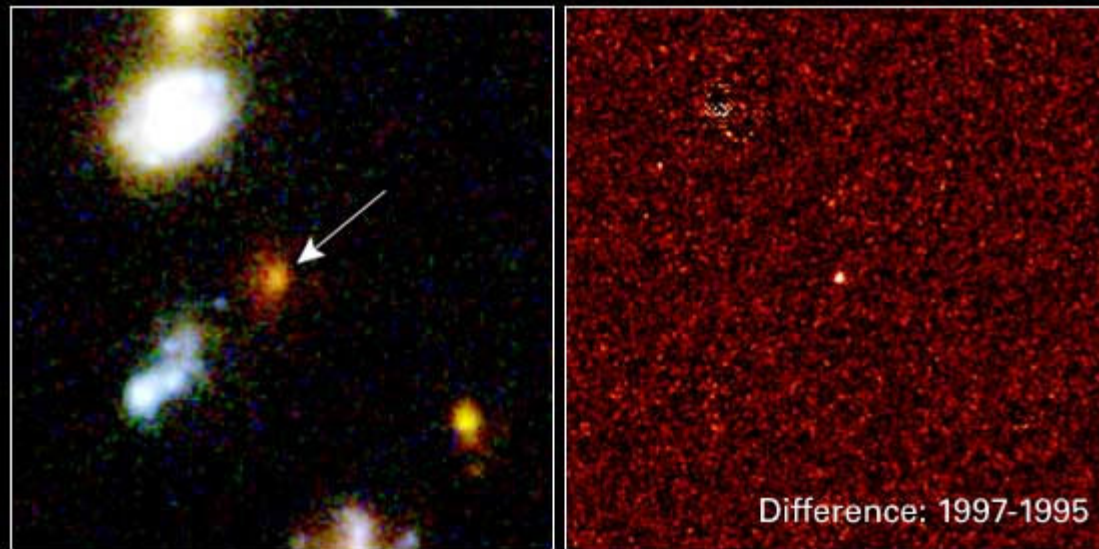
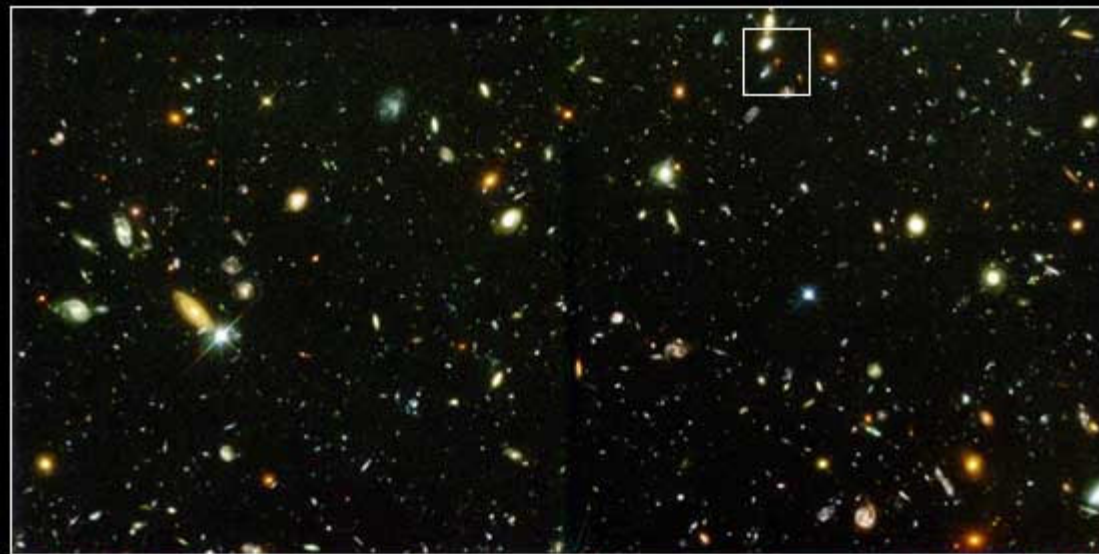


## 5 Energia Escura

Observações de **supernovas do tipo Ia** distantes, efectuadas no final dos anos 90, sugeriram que a **expansão do universo está acelerando** e não o contrário como era suposto.

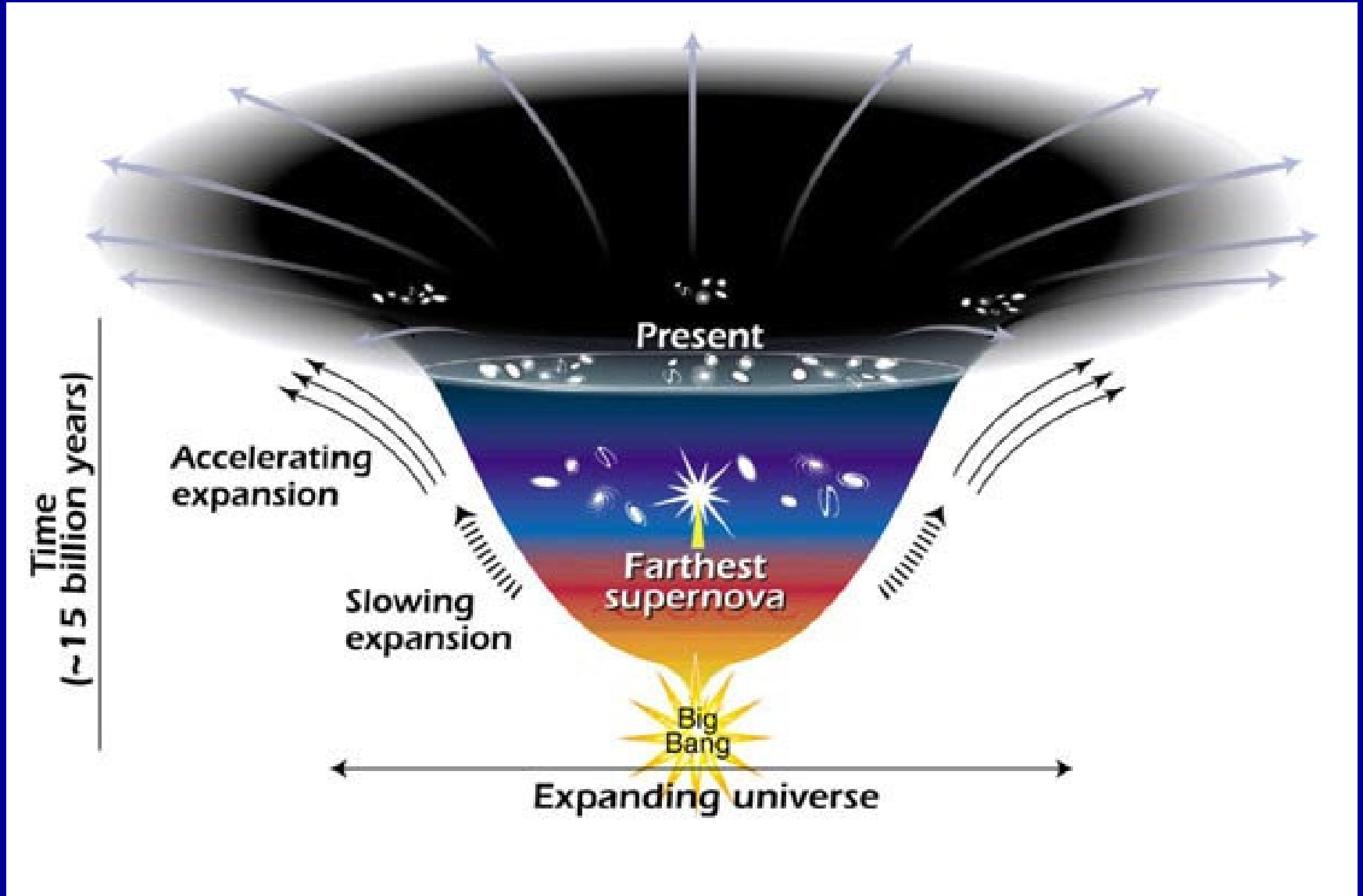






**Distant Supernova in the Hubble Deep Field** HST • WFPC2  
NASA and A. Riess (STScI) • STScI-PRC01-09

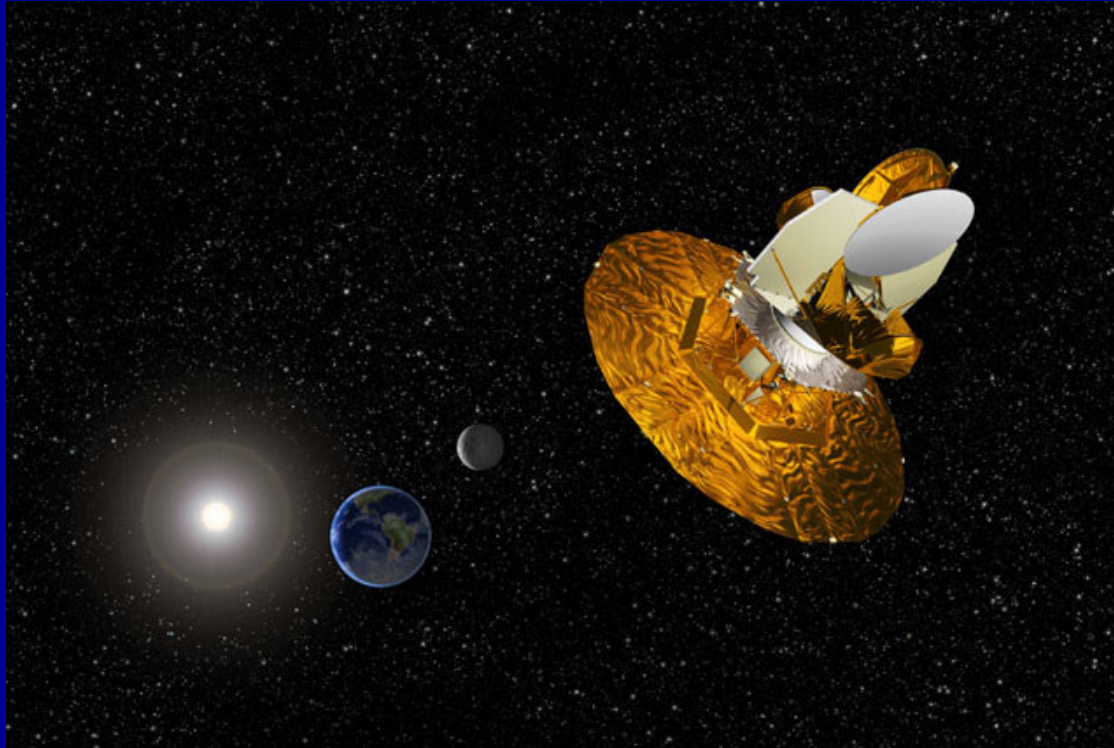
As observações sugerem a existência de uma energia com pressão negativa que actua contra a força de gravidade. Deu-se-lhe o nome de **energia escura**.





adaptado de <http://de.wikipedia.org/wiki/Bild:SNtypIa.jpg>

Uma **supernova do tipo Ia** ocorre quando uma estrela **anã branca** ganha massa de uma companheira e cresce até se tornar instável dando origem a violentas reacções nucleares e consequente explosão. Acontece que a massa limite para isso acontecer é bem conhecida (é o chamado **limite de Chandrasekhar** que corresponde a **1.44 massas solares**) e o brilho da explosão é também bem conhecido. Assim as **supernovas Ia são as melhores velas padrão que se conhecem** para observações cosmológicas.



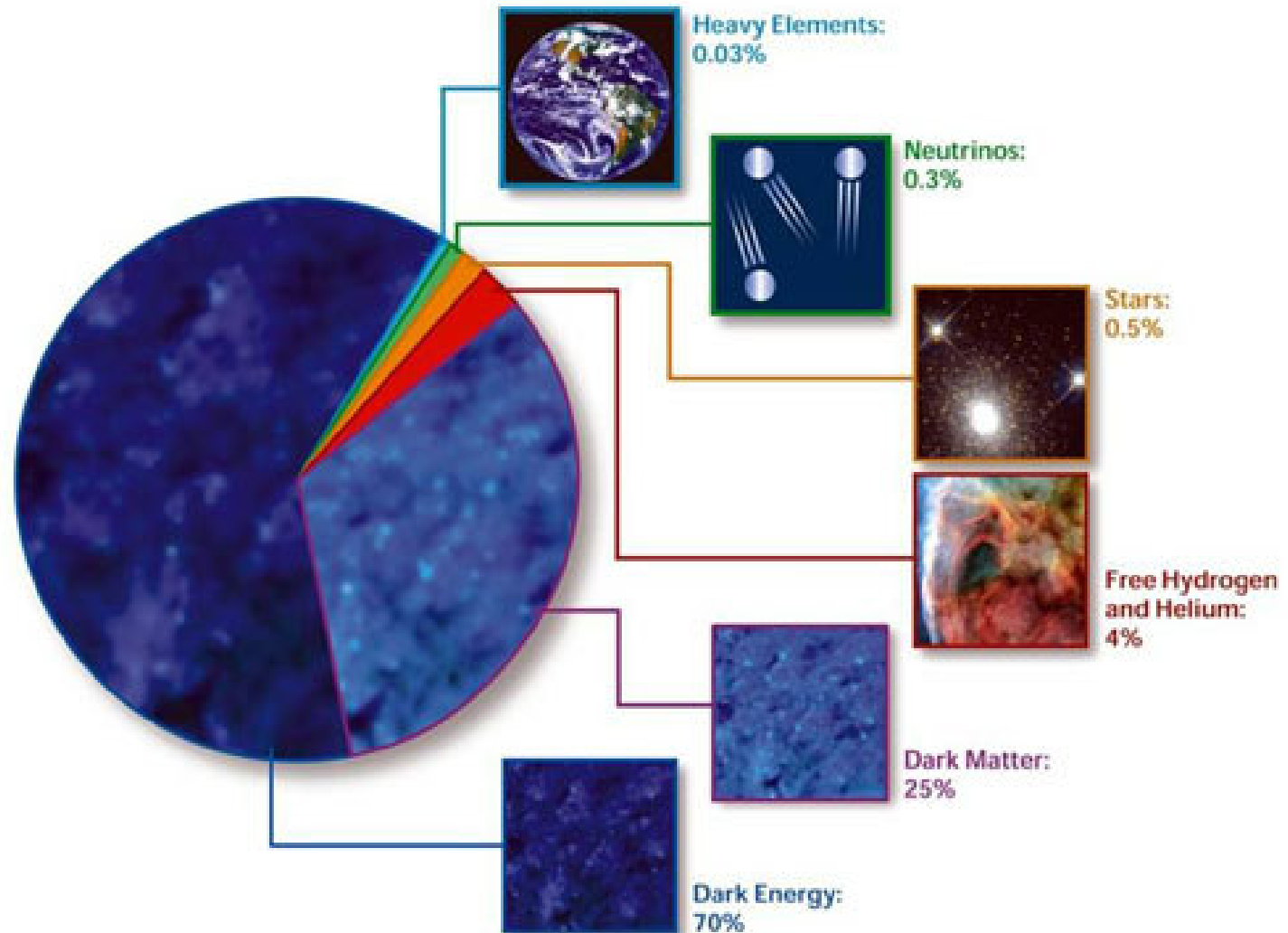
Observações recentes do satélite *WMAP* revelam um **universo praticamente plano**, ou seja, um universo onde

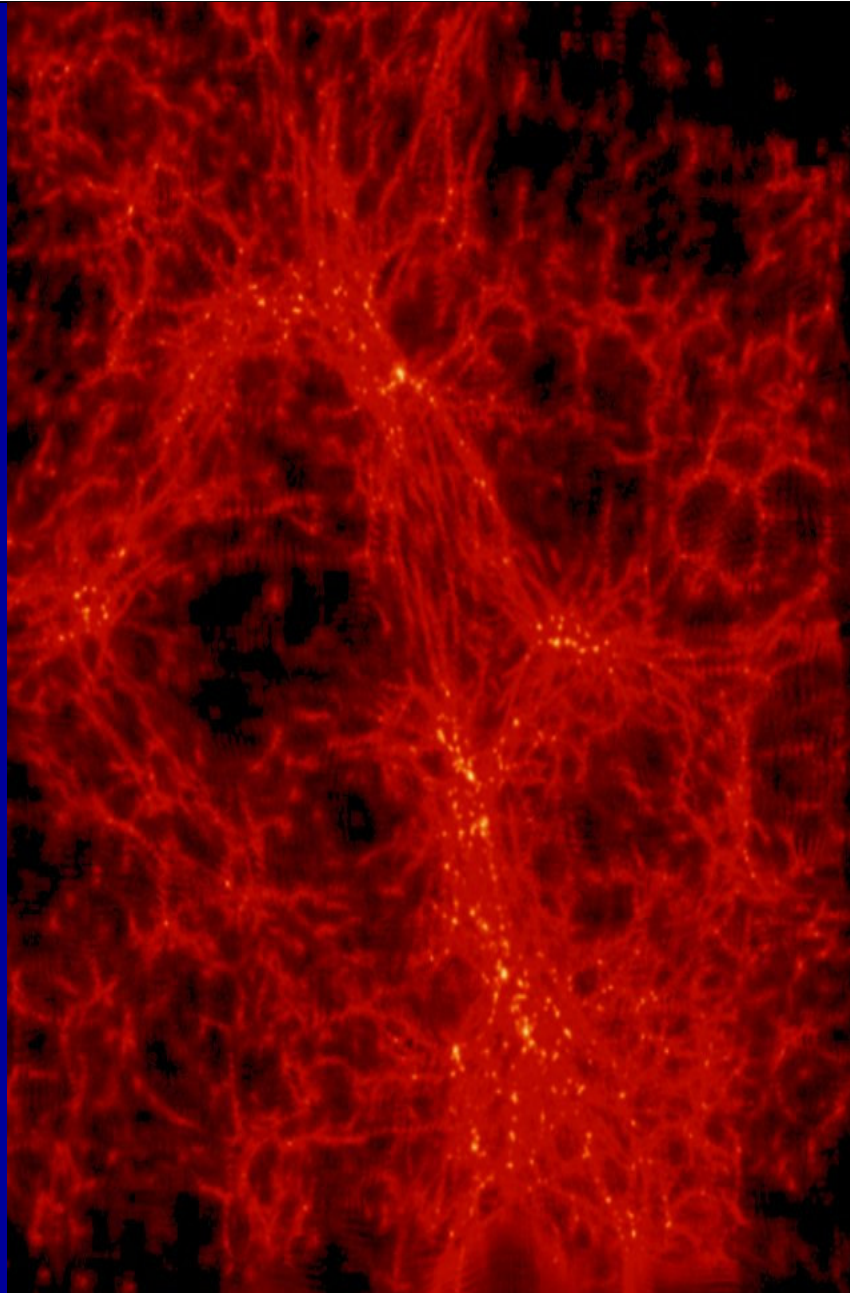
$$\Omega = 1$$

Diversos estudos indicam que a totalidade da matéria (luminosa e escura) apenas contribui com aproximadamente 0.3 para o valor de Omega. Assim, **a maior parte da densidade do universo resulta da energia escura.**



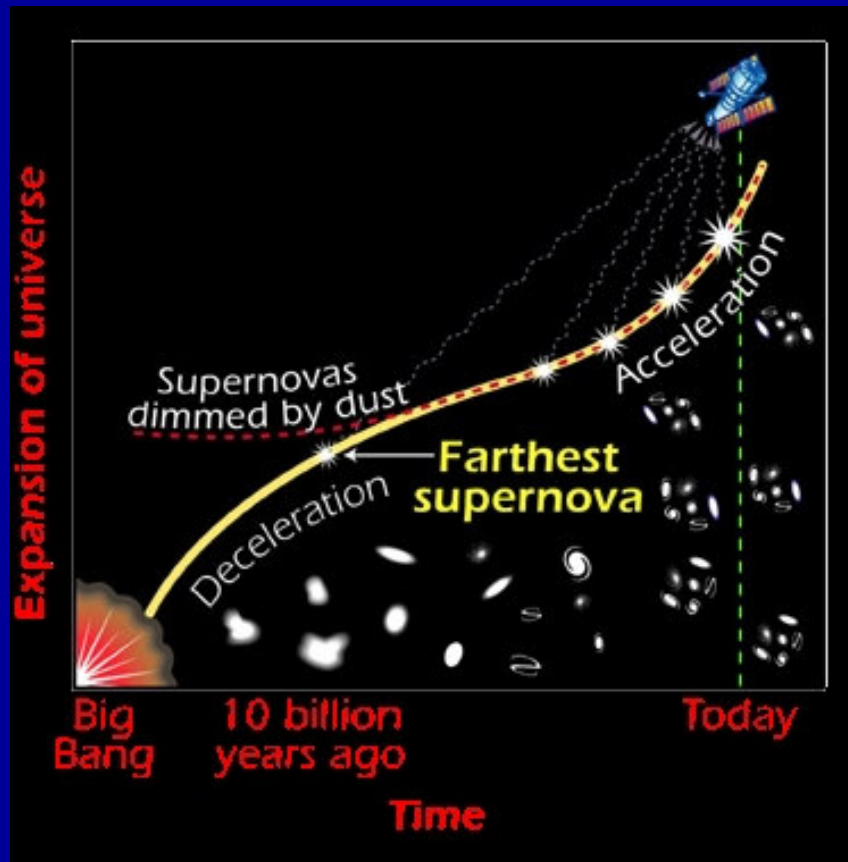
## COMPOSITION OF THE COSMOS





A natureza da energia escura é **completamente desconhecida** e a sua detecção directa afigura-se também, para já, muito complicada. Existem vários modelos do Universo que incluem a energia escura. O mais simples é provavelmente o **Modelo da Constante Cosmológica** designado por modelo  **$\Lambda$ -CDM**.

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**. Essa energia é incluída na Constante Cosmológica .



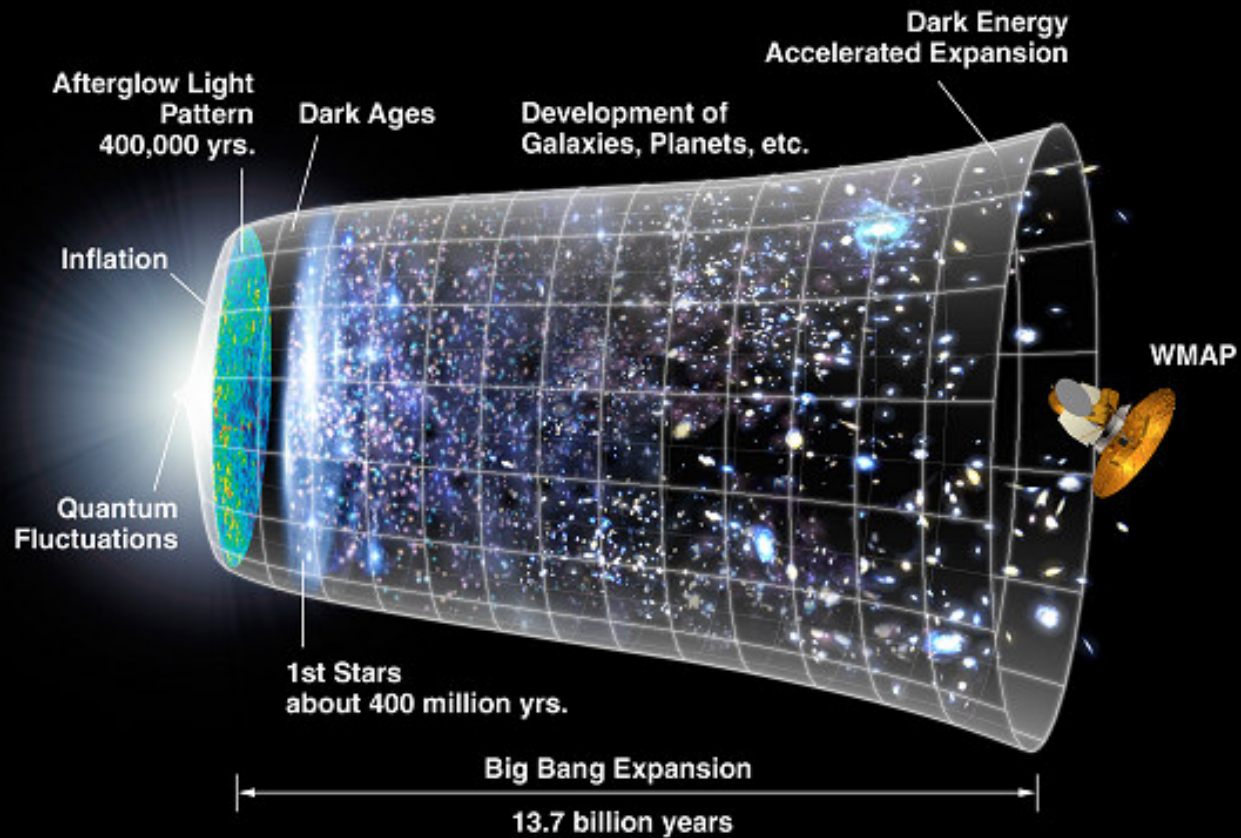
Pensa-se que a aceleração iniciou-se há cerca de 5 a 10 biliões de anos. Antes dessa data a expansão do Universo estava em desaceleração dada a influência atractiva da matéria escura e luminosa.

No entanto a densidade da matéria, num universo em expansão, decresce mais rapidamente do que a da energia escura pelo que esta última passou a dominar a expansão do universo.

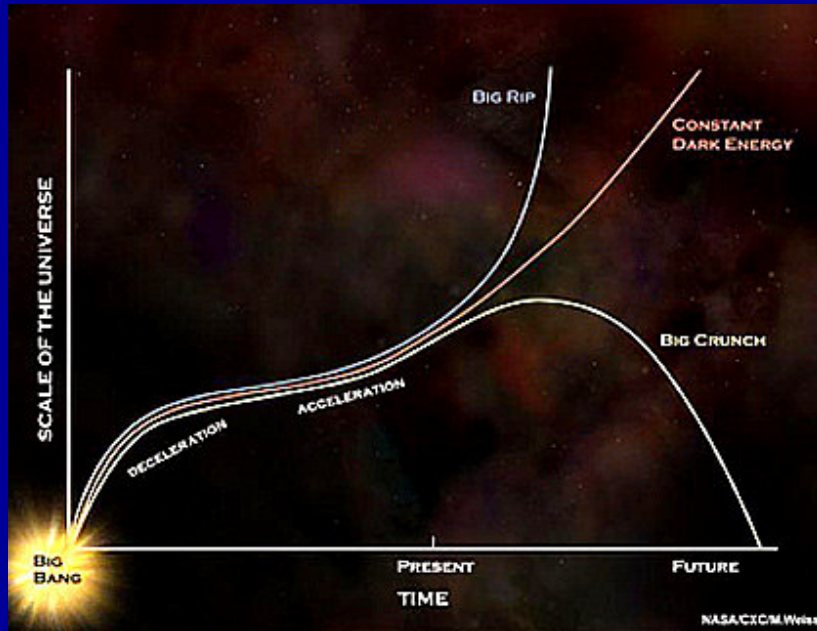


# Universidade da Madeira

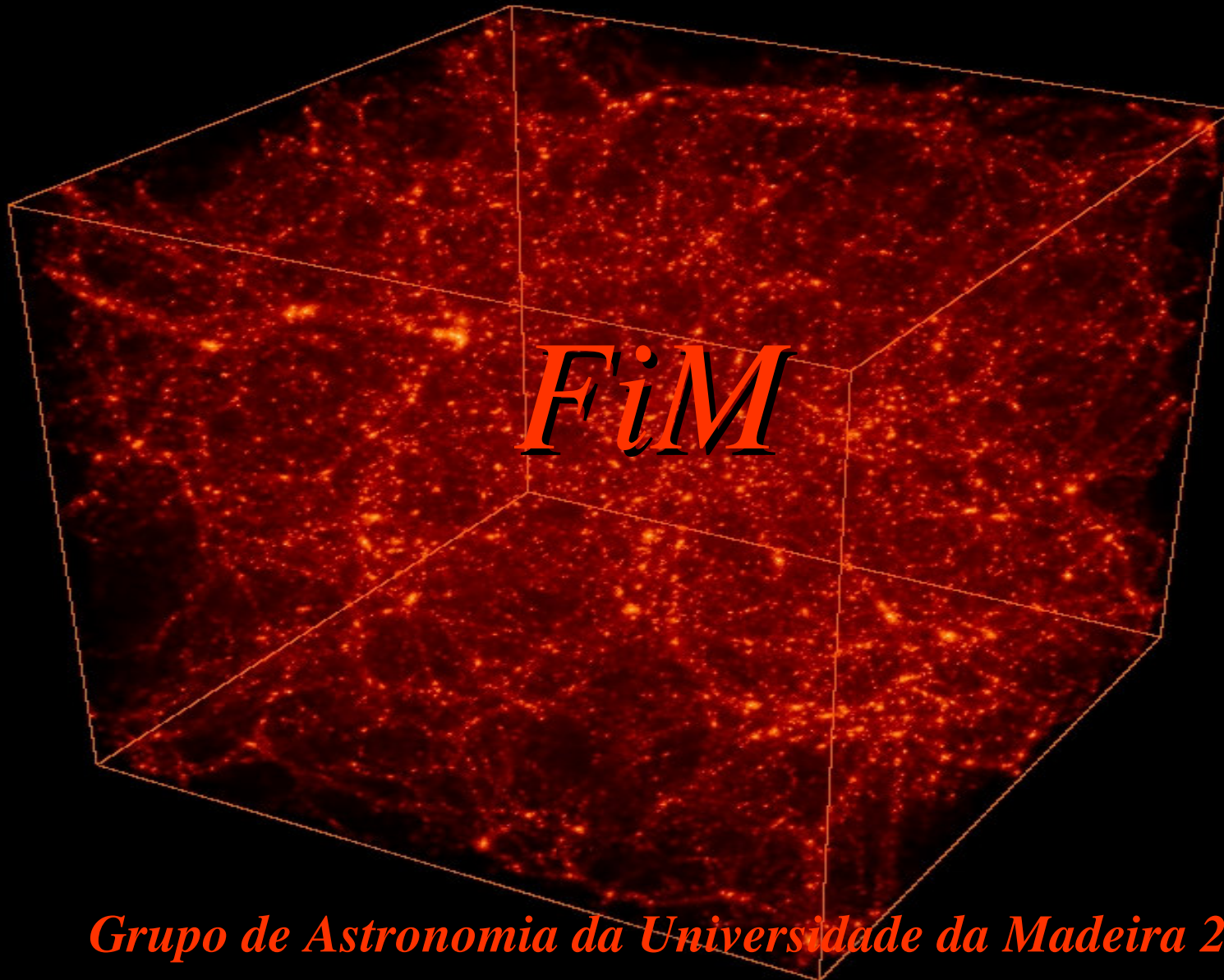
*Grupo de Astronomia*







A continuar assim as galáxias fora do super enxame local vão sair do nosso horizonte deixando de ser visíveis. Por outro lado se a energia escura se tornar atractiva no futuro então o universo poderá contrair-se dando origem ao **Big Crunch**. Se a energia escura acabar por dominar todas as outras forças então tudo o que existe no Universo será despedaçado dando origem a um **Big Rip**. Neste momento todas estas ideias são pura especulação.



*Grupo de Astronomia da Universidade da Madeira 2006*