

Cosmologia

**FIS02009 – Explorando o Universo – dos Quarks aos
Quasares**

Professor Allan Schnorr Müller

IF/UFRGS

Cosmologia

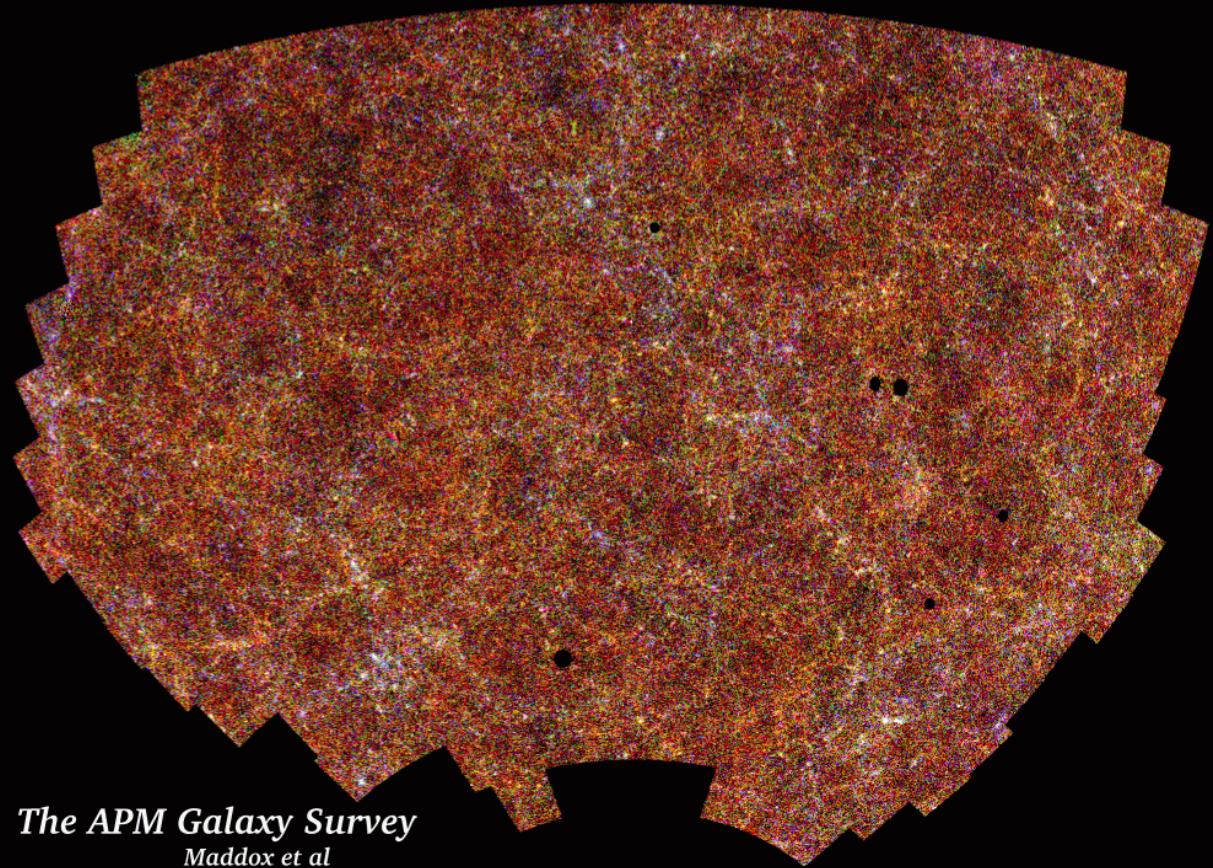
- Do grego *κόσμος*, mundo e *λογία*, estudo;
- A cosmologia é a ciência que estuda o Universo, sua origem, sua estrutura, sua evolução e seu eventual destino;
- Para esse fim, a cosmologia estuda a estrutura e a dinâmica do universo nas maiores escalas;
- A cosmologia moderna teve seu início com a publicação da teoria da relatividade geral em 1915.

Cosmologia

- Um modelo cosmológico precisa ser capaz de explicar as seguintes observações:
 1. O céu é escuro à noite (paradoxo de Olbers);
 2. Em grandes escalas angulares, galáxias fracas são uniformemente distribuídas no céu;
 3. Com exceção de poucas galáxias muito próximas, um desvio para o vermelho é observado nos espectros das galáxias - a maioria das galáxias está se afastando de nós e sua velocidade de afastamento aumenta linearmente com a distância (lei de Hubble);
 4. Em quase todos os objetos cósmicos, a fração de massa de hélio é de 25 a 30%;

Cosmologia

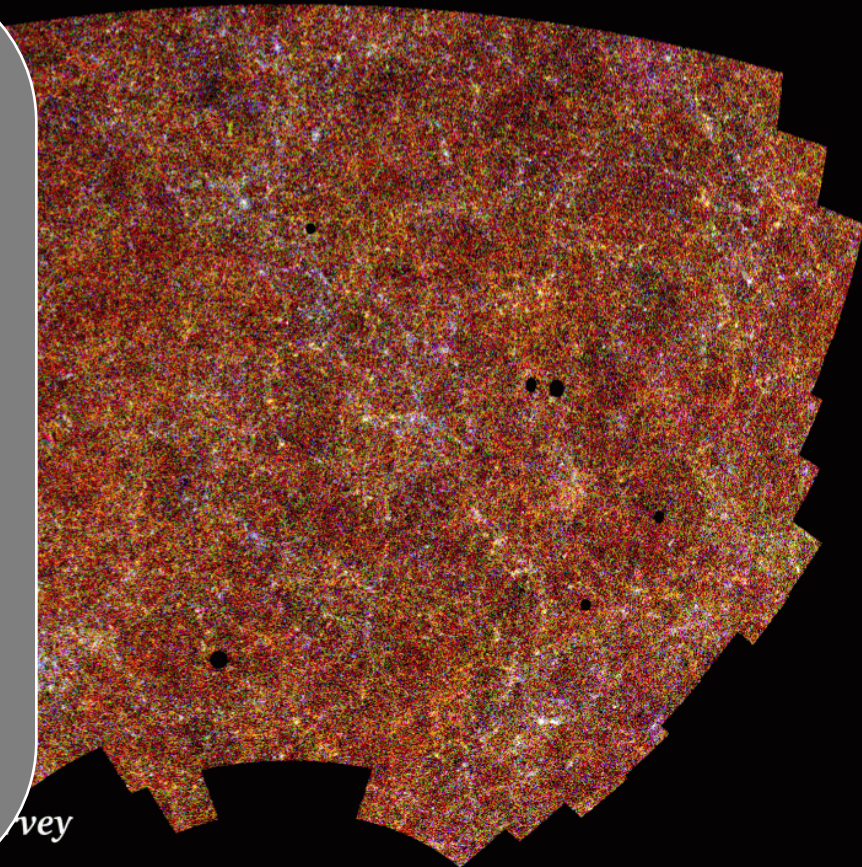
5. Os aglomerados estelares mais antigos da nossa Galáxia têm uma idade de ~ 12 Gyr;
6. Uma radiação de micro-ondas (radiação cósmica de fundo em micro-ondas, CMB) é observada, atingindo-nos de todas as direções. Essa radiação é isotrópica, exceto por flutuações muito pequenas, mas imensamente importantes, com amplitude relativa 10^{-5} ;
7. O espectro da CMB corresponde ao de um corpo negro perfeito, ou seja, uma radiação de Planck de uma temperatura de $T_0 = 2.728 \pm 0.004K$;



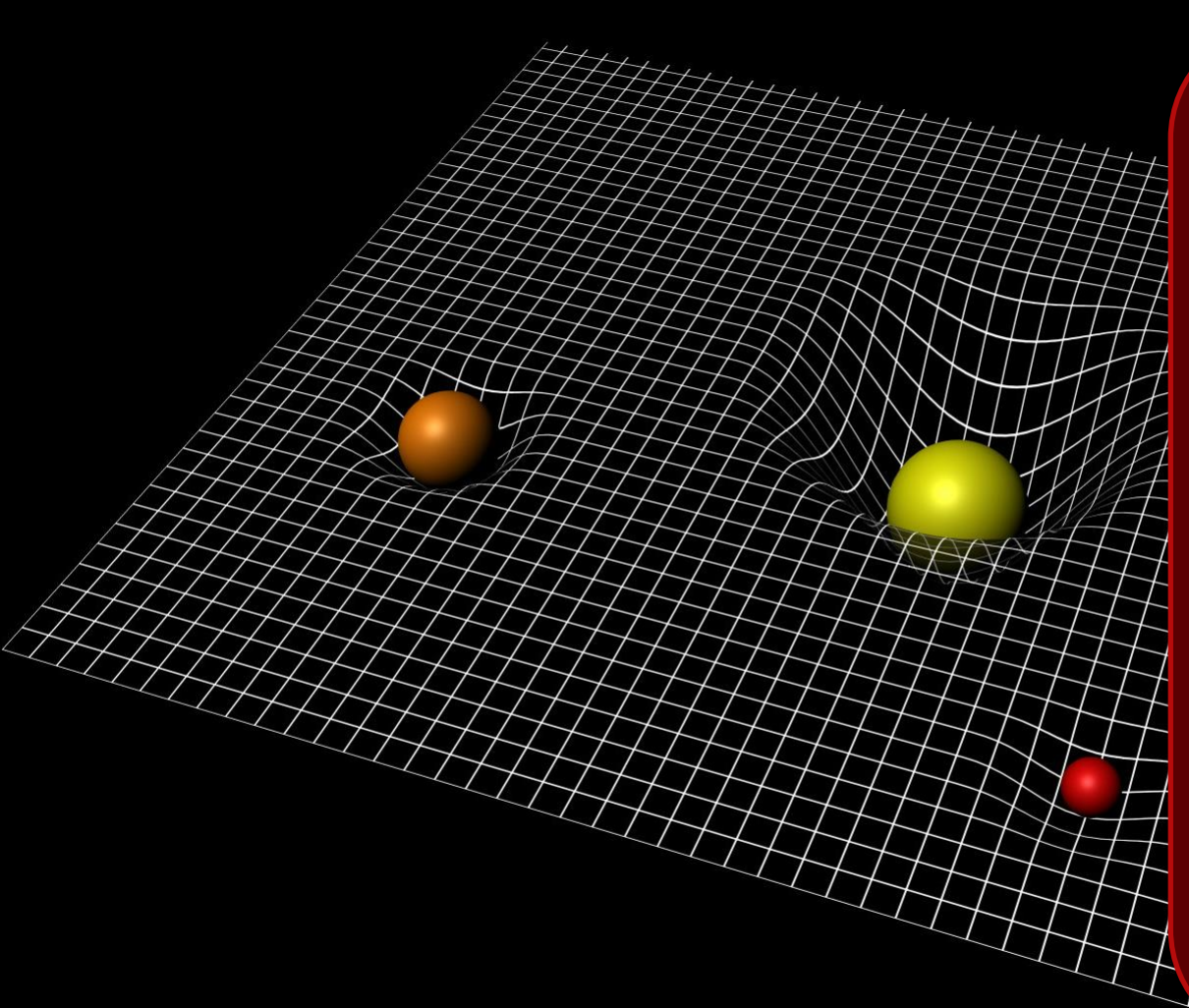
The APM Galaxy Survey
Maddox et al

Cosmologia

- O paradoxo de Olbers implica que o universo não pode ser infinito em ambos tempo e espaço, caso contrário, a esfera celeste estaria completamente coberta de luz estelar, já que qualquer linha de visada interceptaria uma estrela;
- A idade dos mais velhos aglomerados globulares implica que o universo não pode ser mais jovem que 12Gyr;
- A distribuição aparentemente isotrópica de galáxias em grande escalas e a isotropia do fundo cósmico de microondas implica que o universo é isotrópico localmente. Se assumirmos que não vivemos em um lugar espacial do Universo, como consequência, o universo deve ser isotrópico;
- Se o universo como um todo é isotrópico, ele deve, também, ser homogêneo;
- A combinação das hipóteses de homogeneidade e isotropia do universo é chamada de princípio cosmológico;
- Devido a finitude da velocidade da luz, não é possível testar observacionalmente a homogeneidade do Universo: como ao observarmos objetos mais distantes os vemos no passado, inhomogeneidades e evolução temporais são indistinguíveis.



vey

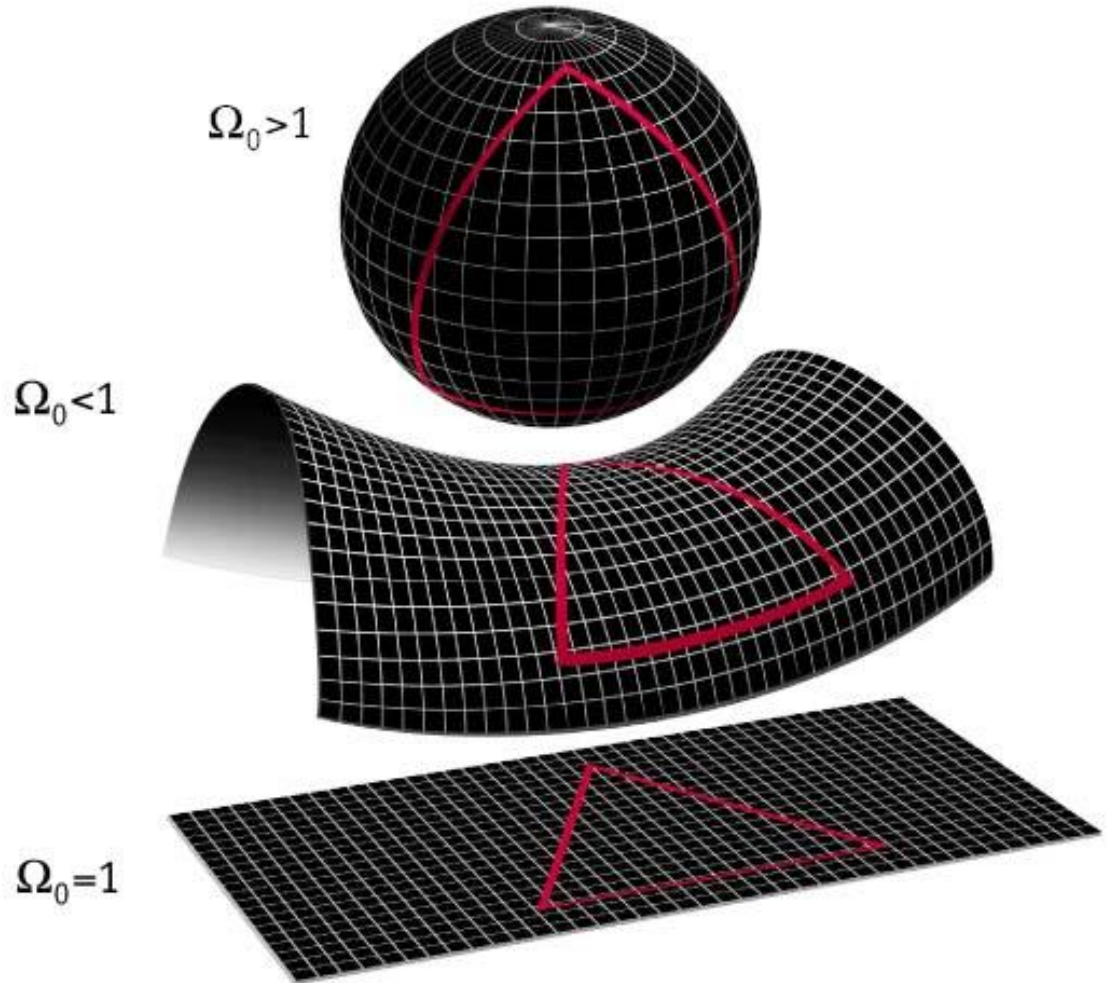


Teoria da Relatividade Geral

- É uma teoria geométrica da gravitação publicada por Albert Einstein em 1915;
- É um conjunto de hipóteses que fornece uma descrição unificada da gravidade como uma propriedade geométrica do espaço e do tempo, ou espaço-tempo;
- A "curvatura do espaço-tempo" está diretamente relacionada à energia e ao momento de qualquer matéria e radiação presente;
- É a descrição atual da gravitação na física moderna;
- A relatividade geral é a base dos atuais modelos cosmológicos de um universo sempre em expansão.

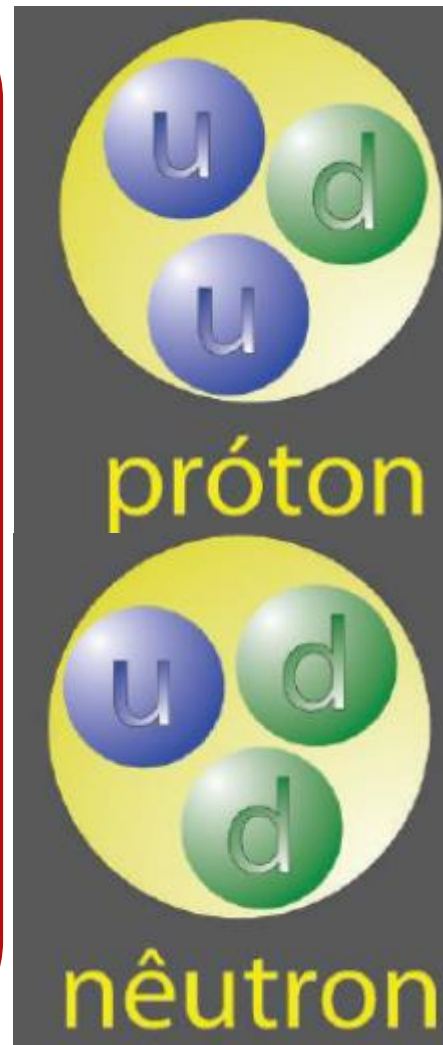
Teoria da Relatividade Geral

- A relatividade geral permite prever qual é a geometria do universo;
- O universo pode ser fechado ($\Omega_0 > 1$), aberto ($\Omega_0 < 1$) ou plano;
- Universos fechados são necessariamente finitos;
- Universos abertos e planos podem ser finitos ou infinitos;
- Universos fechados são necessariamente finitos.



Física de partículas

- Quarks e léptons são as famílias de partículas fundamentais;
- Prótons e Nêutrons são formados por combinações de Quarks do tipo Up e Down;
- A força nuclear forte é o que mantém quarks ligados: quarks trocam entre si glúons, partículas mediadoras da força forte;
- Partículas pesadas e instáveis, como múons, taus, quarks top e bottom, entre outros, decaem em partículas mais leves e estáveis, liberando energia
- Esse decaimento é causado pela força fraca;
- A força fraca também governa interações que transformam partículas.



Quarks

u up	c charm	t top
d down	s strange	b bottom
ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
e electron	μ muon	τ tau

Léptons

Exemplo de Lépton: o elétron

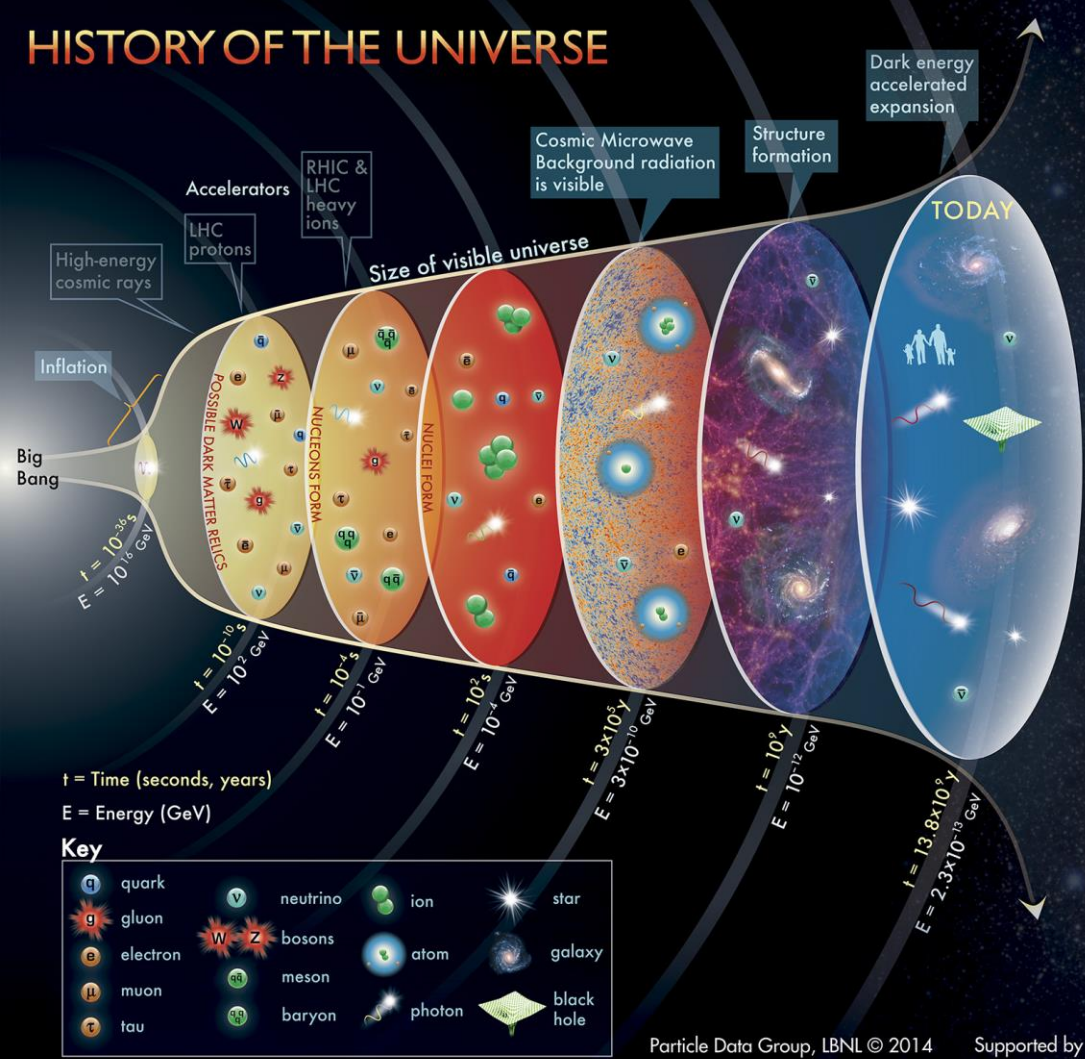
The four fundamental interactions of nature^[4]

Property/Interaction	Gravitation	Weak	Electromagnetic	Strong	
		(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:	Mass/Energy	Flavor	Electric charge	Color charge	Atomic nuclei
Particles experiencing:	All particles	All particles	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Not yet observed (Graviton hypothesised)	W^+ , W^- and Z^0	γ (photon)	Gluons	π , ρ and ω mesons
Strength at the scale of quarks:	10^{-41} (predicted)	10^{-4}	1	60	Not applicable to quarks
Strength at the scale of protons/neutrons:	10^{-36} (predicted)	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

Física de partículas: forças fundamentais

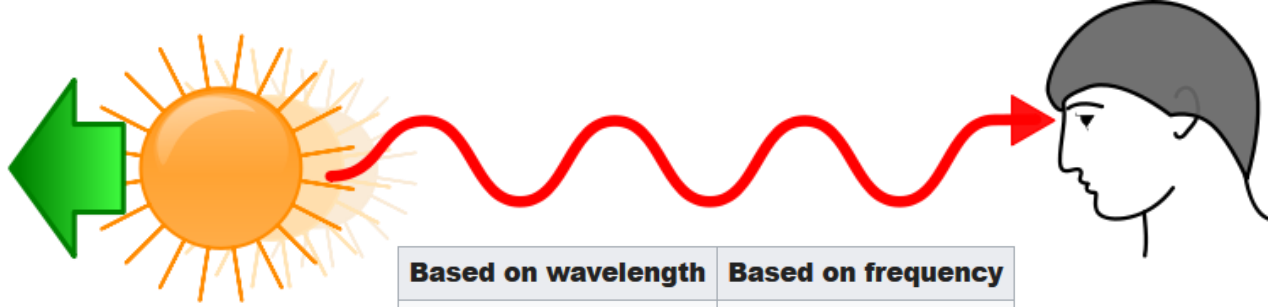
- Existem quatro forças fundamentais na natureza: força forte, força fraca, força eletromagnética e força gravitacional;
- No modelo padrão da física de partículas, a força forte, a força fraca e a força eletromagnética se tornam uma força só em altíssimas energias;
- Não se sabe se as demais forças se unem em energias mais altas (para isso, é necessário uma teoria da quântica da gravidade).

HISTORY OF THE UNIVERSE



Universo em expansão

- As equações da relatividade geral previam que o universo estava expandindo, ou contraindo (após um período de expansão), a depender da densidade média da matéria contida nele;
- Einstein acreditava em um universo estático, então acrescentou um termo adicional às suas equações, Λ (constante cosmológica), o que permitia como solução um universo estático, dependendo do valor de Λ ;
- Essa solução era instável, porém;
- O que isso significa? Somente um valor muito preciso de Λ resultava em um universo estático. Qualquer pequeno desvio desse valor resultava em uma expansão ou contração ainda mais rápida;



Based on wavelength	Based on frequency
$z = \frac{\lambda_{\text{obsv}} - \lambda_{\text{emit}}}{\lambda_{\text{emit}}}$	$z = \frac{f_{\text{emit}} - f_{\text{obsv}}}{f_{\text{obsv}}}$
$1 + z = \frac{\lambda_{\text{obsv}}}{\lambda_{\text{emit}}}$	$1 + z = \frac{f_{\text{emit}}}{f_{\text{obsv}}}$

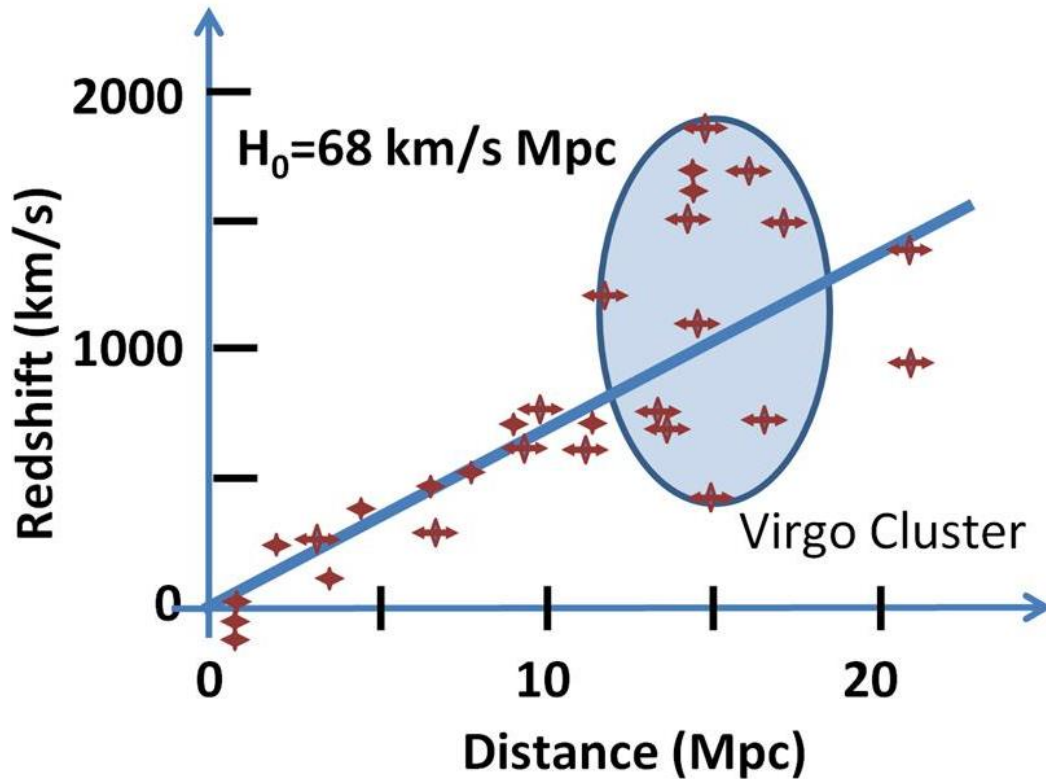


Desvio para o vermelho

- **Efeito Doppler:** comprimento de onda da luz emitida muda se um objeto está em movimento em relação ao detector. Quanto maior a velocidade, maior a mudança: $z \approx v/c$, onde c é a velocidade da luz;
- O comprimento de onda se torna maior (desvio para o vermelho) caso o objeto esteja se afastando e menor caso esteja se aproximando (desvio para o azul);
- **Expansão do espaço:** comprimento de onda da luz se torna mais longo porque o espaço onde a luz se propaga expande. Expansão do espaço causa um desvio para o vermelho.

Universo em expansão

- Em 1922, Alexander Friedmann resolveu as equações da relatividade geral (sem constante cosmológica) para um universo homogêneo e isotrópico e encontra que o universo está em expansão, podendo se expandir eternamente ou passar a se contrair a depender da densidade de matéria no universo;
- Independentemente, o padre e astrônomo belga Georges Lemaître resolve as equações de Einstein e propõe que o universo surgiu da explosão de um átomo primordial, dando origem a expressão *Big Bang*;
- Em 1929 Edwin Hubble mede a distância (Cefeidas) e a velocidade de várias galáxias fora do grupo local. Encontra que as galáxias estão se afastando (desvio para o vermelho): universo em expansão!

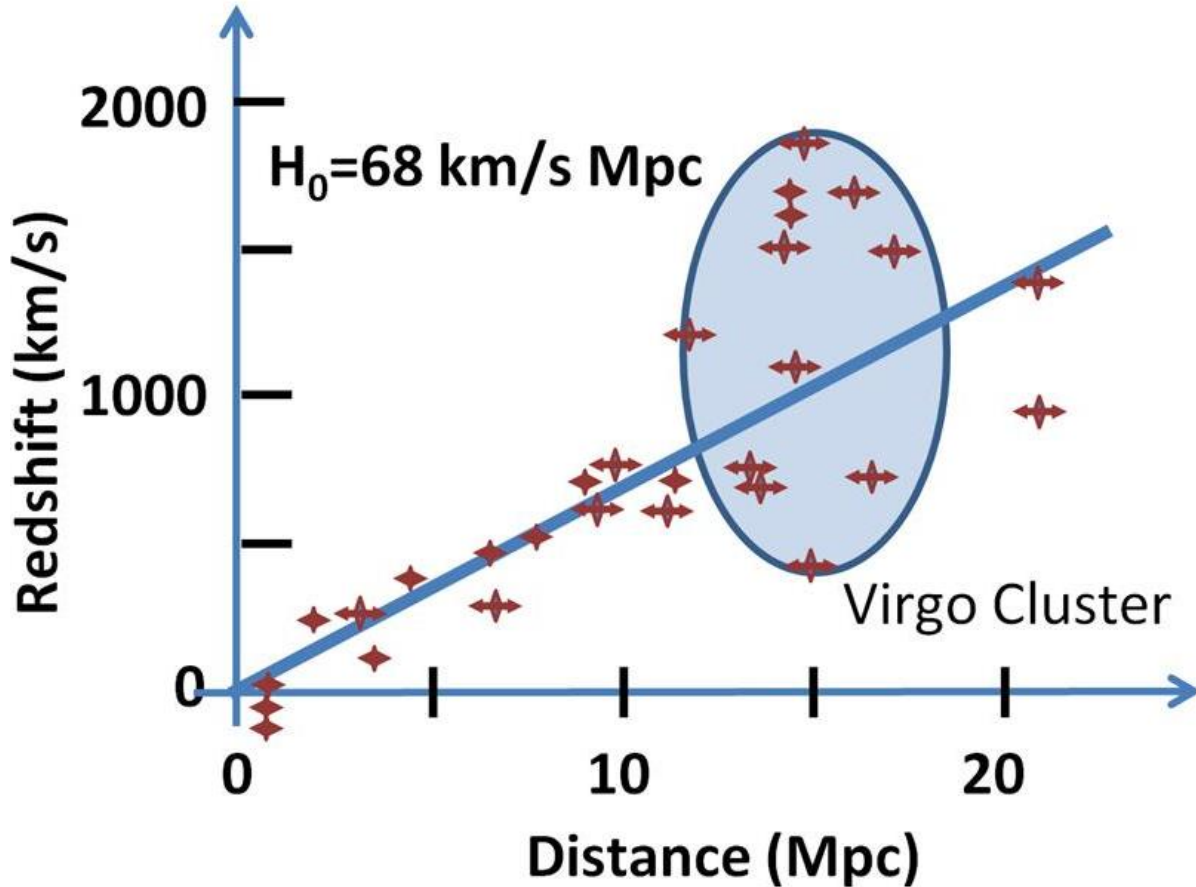


A lei de Hubble

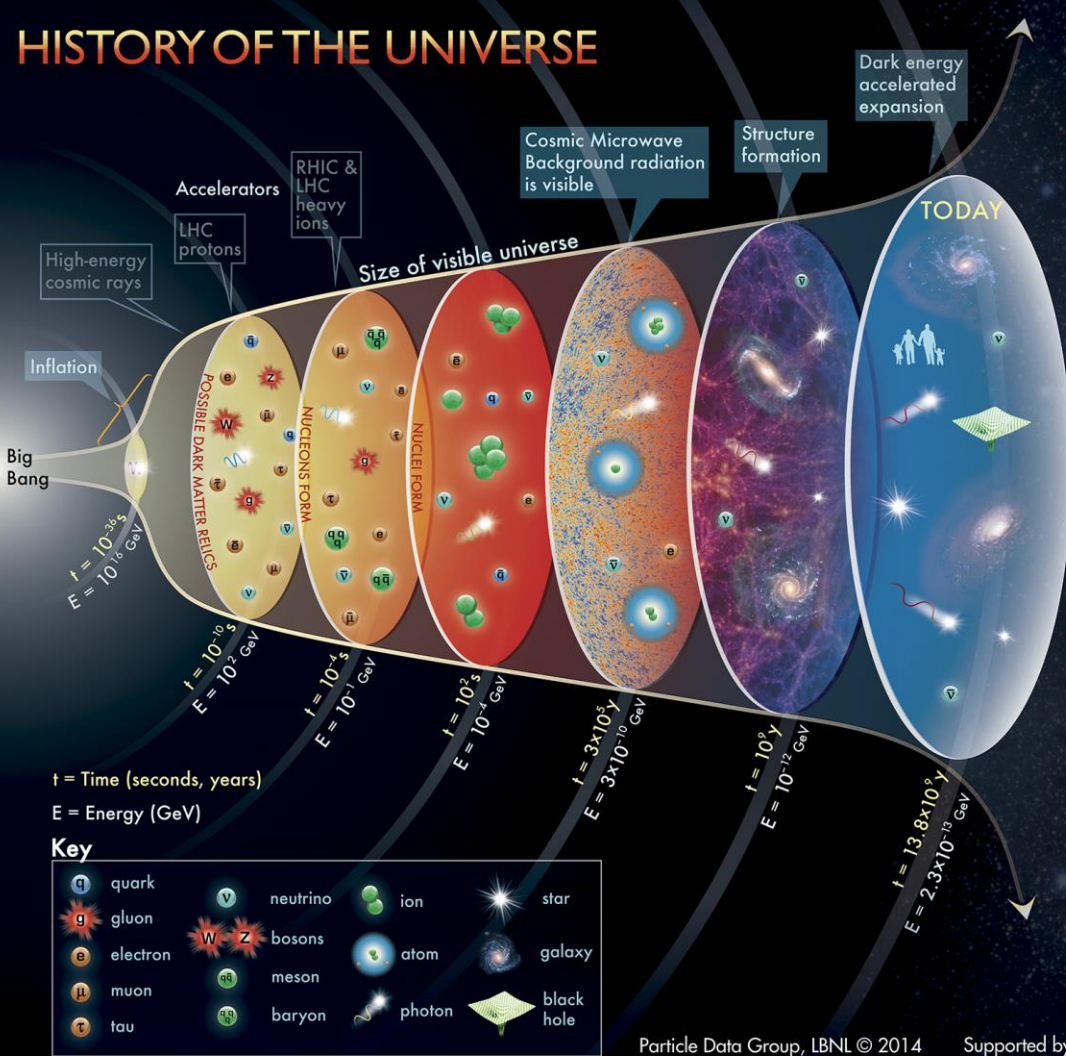
- Galáxias no universo profundo (distância maior que 10Mpc) têm sua luz desviada para o vermelho. Quanto maior a distância, maior a velocidade correspondente a esse desvio:

$$v = H_0 D$$

- v = velocidade correspondente ao desvio para o vermelho. H_0 = constante de Hubble (taxa de expansão no momento atual) e D é a distância até a galáxia;
- Valor atual de H_0 : 67.74 ± 0.46 .



HISTORY OF THE UNIVERSE

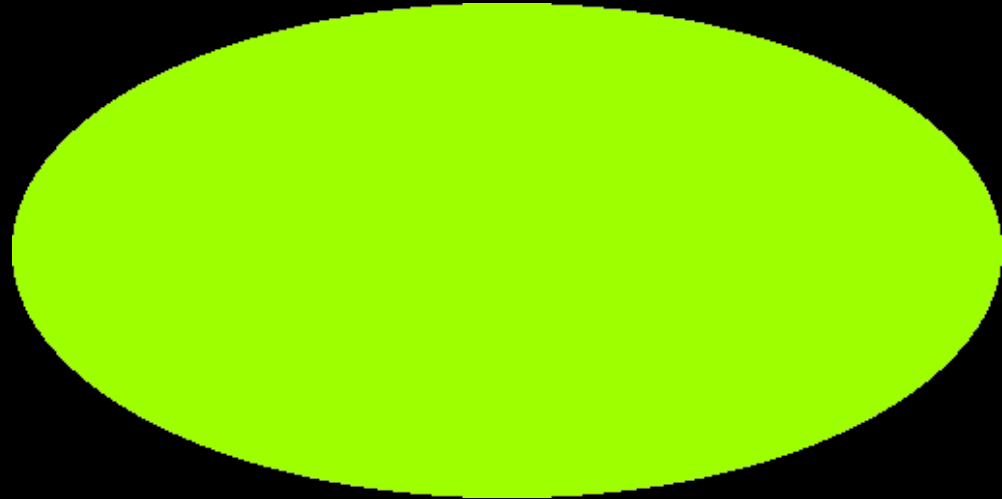


A teoria do Big Bang

- No início, toda matéria e energia do universo estavam concentrados em um único ponto;
- Nessa época, o universo era extremamente denso e quente;
- O universo se expande rapidamente e esfria;
- Por volta de 10^{-6} s, quarks e gluons se juntam para formar prótons e nêutrons;
- Por volta de 3 minutos após o Big Bang, prótons e nêutrons se combinam para formar núcleos de hélio e deutério. Prótons que não se combinaram formarão núcleos de hidrogênio;
- Elétrons, porém, ainda têm temperatura muito alta para se ligarem aos núcleos atômicos.

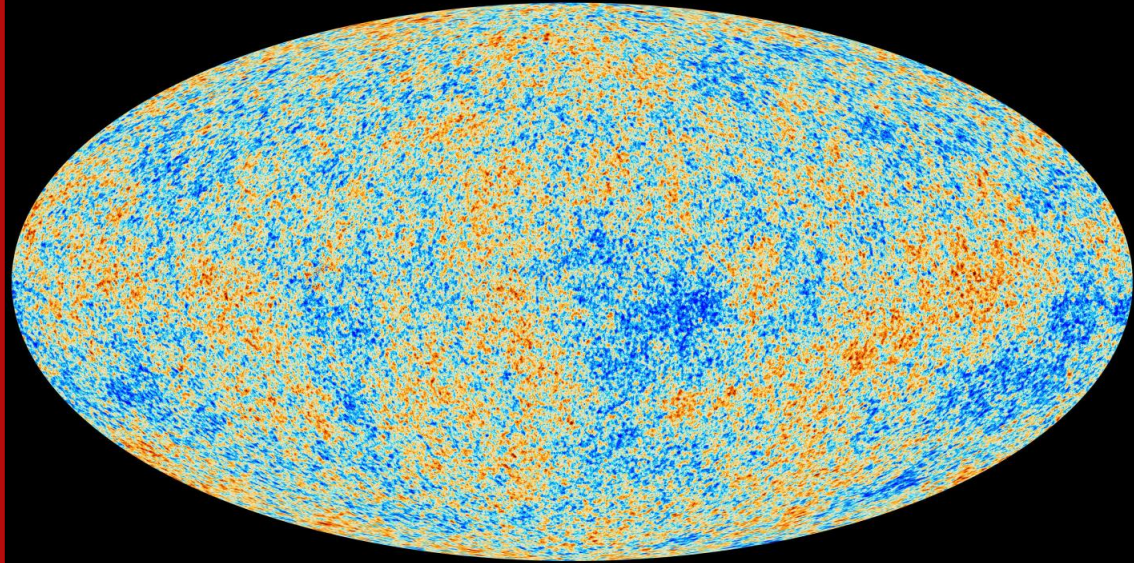
O fundo cósmico de Micro-ondas

- Por volta de 379.000 anos após o início da expansão, elétrons esfriam o suficiente para serem capturados por núcleos atômicos;
- Fótons também esfriam devido à expansão (comprimento de onda se torna mais vermelho => menor energia);
- Energia dos fótons remanescentes do Big Bang não é alta o suficiente para excitar elétrons em átomos: universo se torna transparente. Isto é, esses fótons não interagem mais com a matéria;
- Hoje, o comprimento de onda desses fótons "primordiais" foi desviado para o vermelho e está na faixa de micro-ondas;
- À esquerda: observação do fundo cósmico de micro-ondas, onde diferentes cores correspondem a diferentes temperaturas. Verde = 3K, vermelho = 4K e azul = 2K;



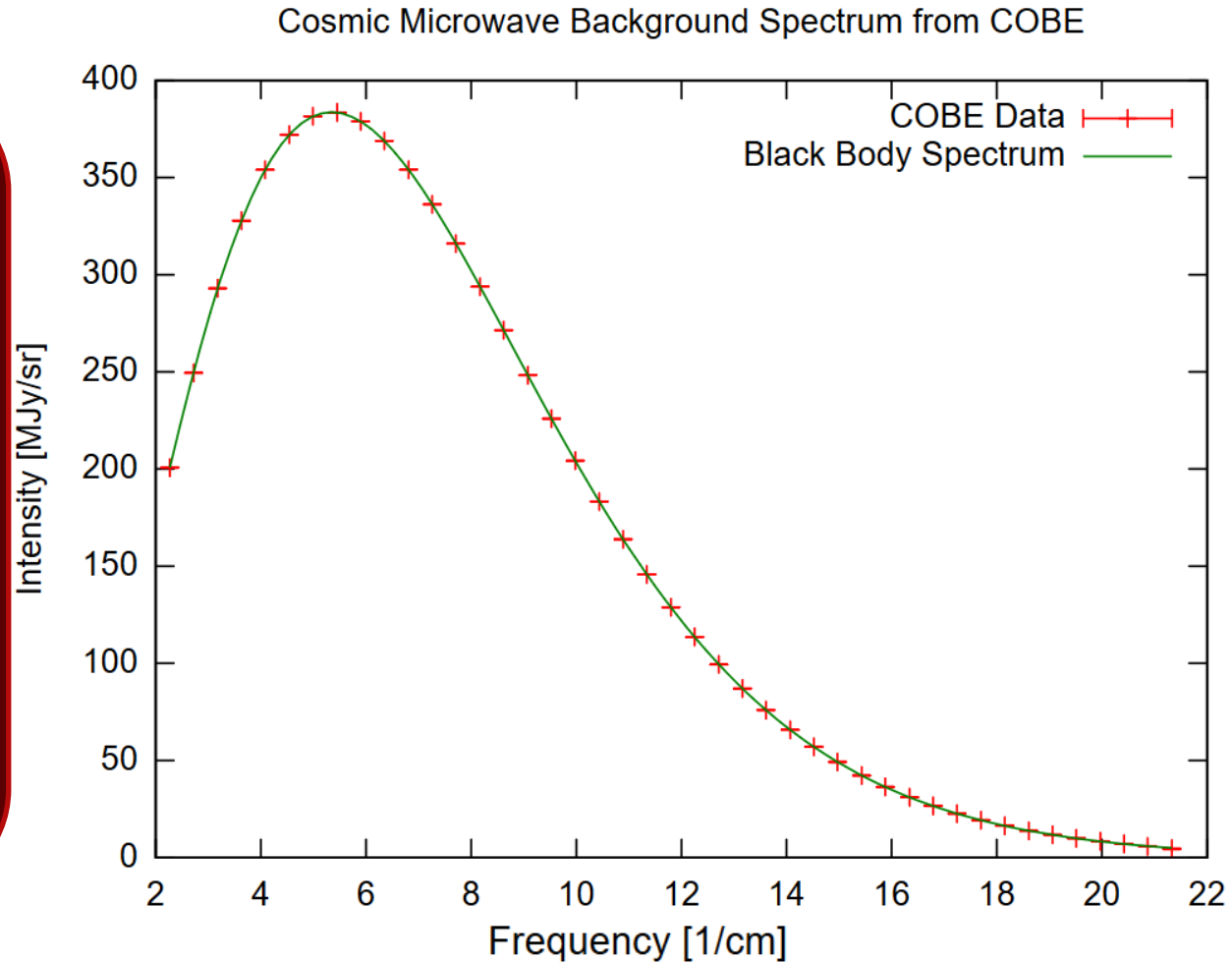
O fundo cósmico de Micro-ondas

- Detectamos esses fótons vindo de todo o espaço;
- Os fótons do fundo cósmico de micro-ondas (CMB na sigla em inglês) seguem uma distribuição de corpo negro com pico médio em $2.7260 \pm 0.0013\text{K}$;
- O CMB é incrivelmente uniforme. Regiões onde a temperatura desvia da média (azuis = mais frias e vermelhas = mais quentes) desviam por não mais que $18 \times 10^{-6}\text{K}$;
- O que as variações de temperatura significam? Temperaturas mais quentes implicam maior densidade de matéria e energia, temperaturas mais frias, uma menor densidade;
- Conclusão: universo é muito próximo de ser homogêneo e isotrópico.



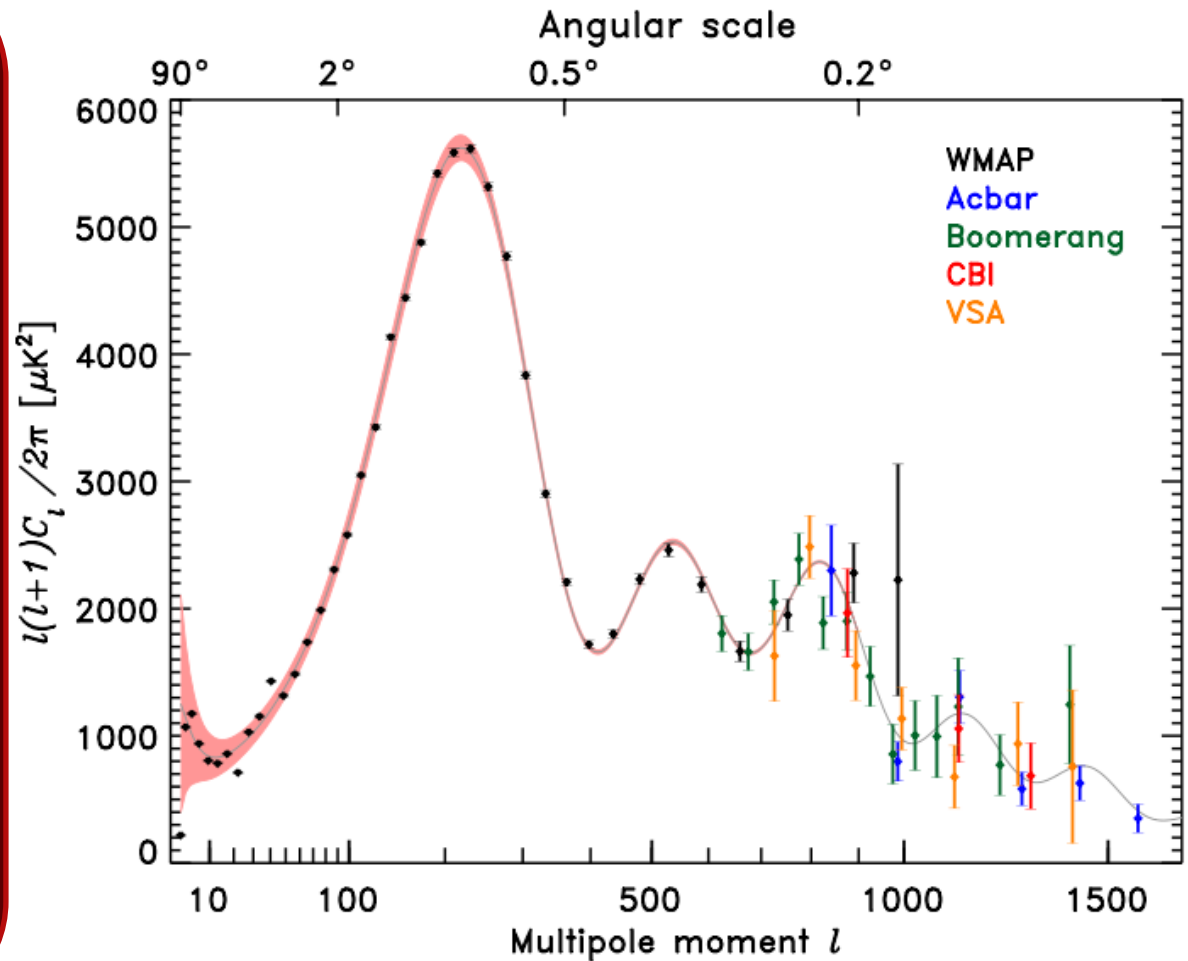
O fundo cósmico de micro-ondas

- À direita, é mostrado um gráfico de intensidade x frequência para a CMB;
- Como pode ser visto, uma curva de corpo negro com pico em $2.7260 \pm 0.0013\text{K}$ descreve muito bem as observações;
- Tão bem que o espectro da CMB é o melhor exemplo de corpo negro na natureza!
- Pequenos desvios de um espectro de corpo negro, porém, existem.



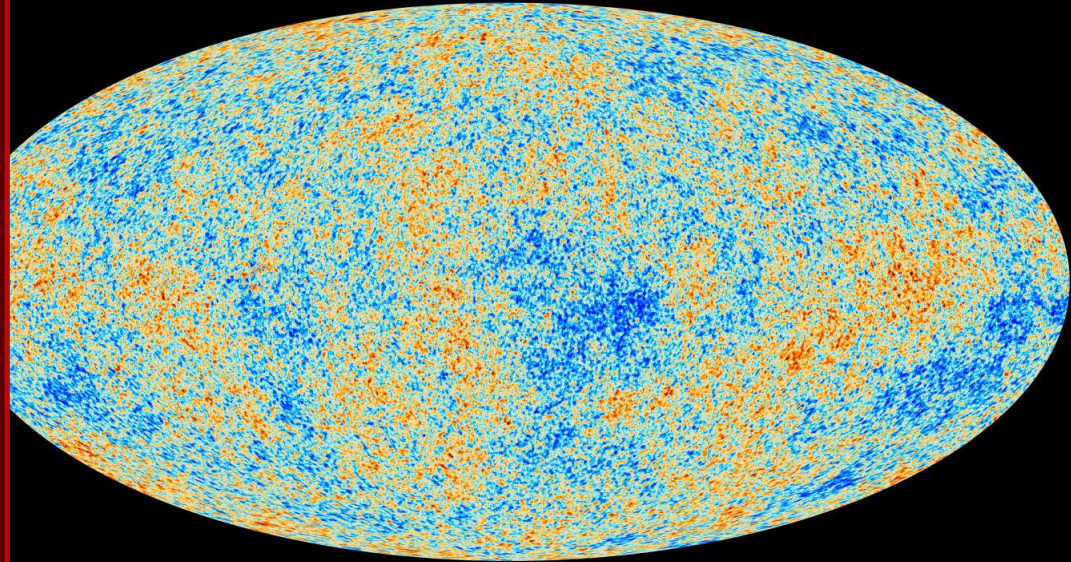
O fundo cósmico de micro-ondas

- À direita é mostrado um gráfico dos desvios do espectro do corpo negro em relação a uma curva de corpo negro. No eixo y é mostrada a intensidade do desvio, no eixo x o tamanho angular dele;
- Os picos na figura estão relacionados a diferentes efeitos que atuam sobre o espectro;
- 1º pico: curvatura do universo;
- 2º pico: densidade de energia da matéria bariônica;
- 3º pico: densidade de energia da matéria escura;
- Conclusões: universo é plano, 4,9% da densidade de energia é matéria comum e 26,8% é matéria escura.



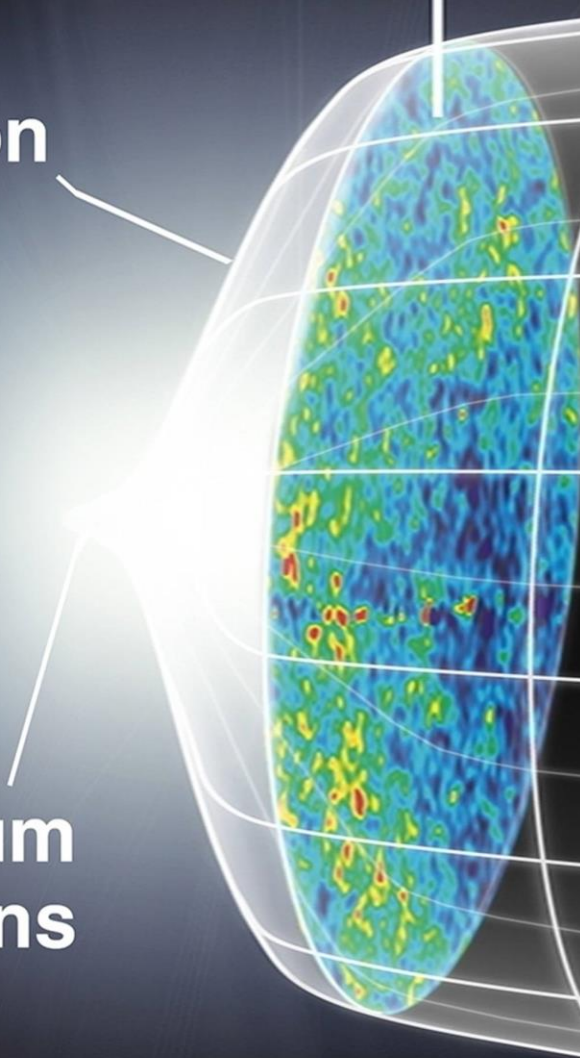
O fundo cósmico de Micro-ondas: implicações

- Apesar da observação do CMB ser uma forte evidência a favor da teoria do Big Bang, algumas propriedades do CMB não podem ser explicadas pela teoria como originalmente proposta;
- 1º problema: a homogeneidade e isotropia do universo. Dentre todas as configurações iniciais possíveis, um universo isotrópico e homogêneo é extremamente improvável;
- 2º problema: um universo plano ($\Omega_0=1$) também é extremamente improvável;
- 3º problema: a radiação vinda de diferentes regiões tem a mesma temperatura. Isso implica que o universo estava em equilíbrio térmico. Porém, devido à expansão, regiões distantes estão desconectadas e um equilíbrio térmico não poderia ser estabelecido entre elas!



Inflation

Quantum Fluctuations

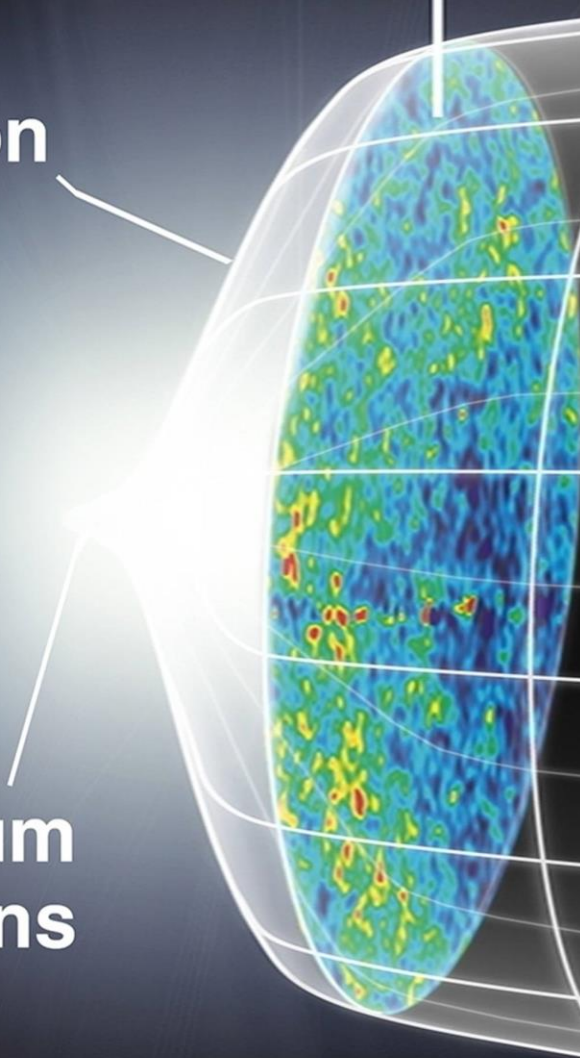


Inflação cósmica

- Teoria proposta por Alan Guth em 1979;
- Logo após o Big Bang, o universo passa a se expandir por um fator de mais de 10^{22} em um intervalo de tempo de 10^{-32} s, quando a expansão chega ao fim;
- Isto é, 1 metro => 10 milhões de anos luz;
- O modo como a expansão se dá é bem estabelecido, porém a origem de tal expansão ainda é desconhecida;
- Essa expansão é tão grande e tão rápida que transforma um universo curvo em plano;
- Essa expansão também explica porque o universo está em equilíbrio térmico: regiões hoje desconectadas estavam em contato antes da inflação!
- Essa rápida expansão também separa todas as partículas criadas pelo Big Bang por distâncias gigantescas: universo se torna “vazio”;

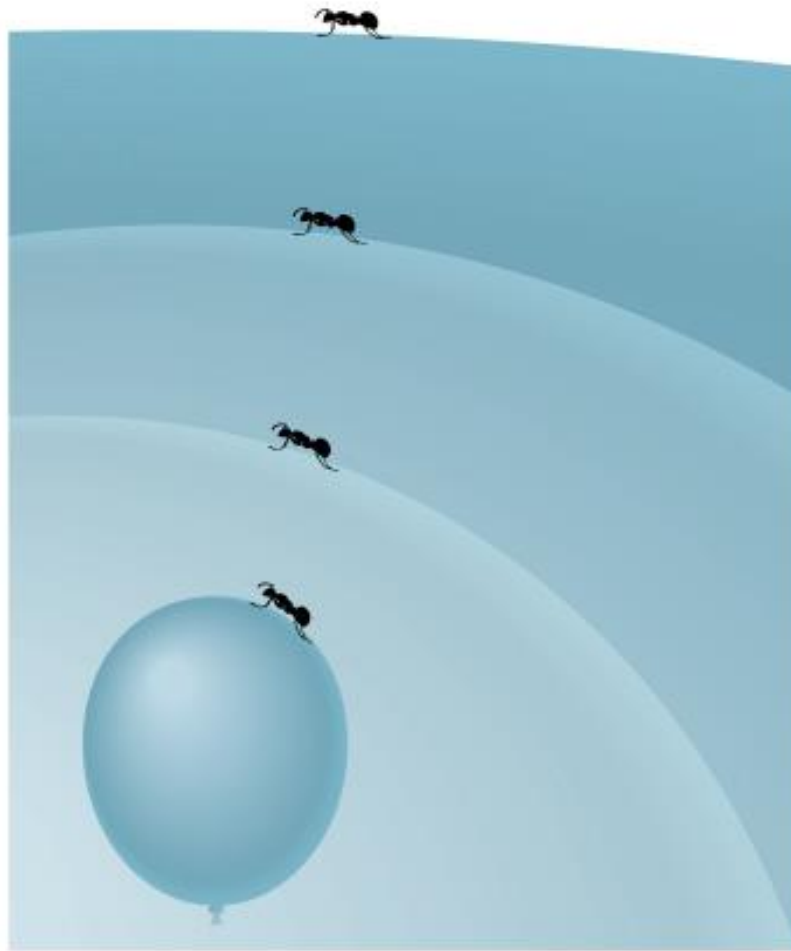
Inflation

Quantum Fluctuations

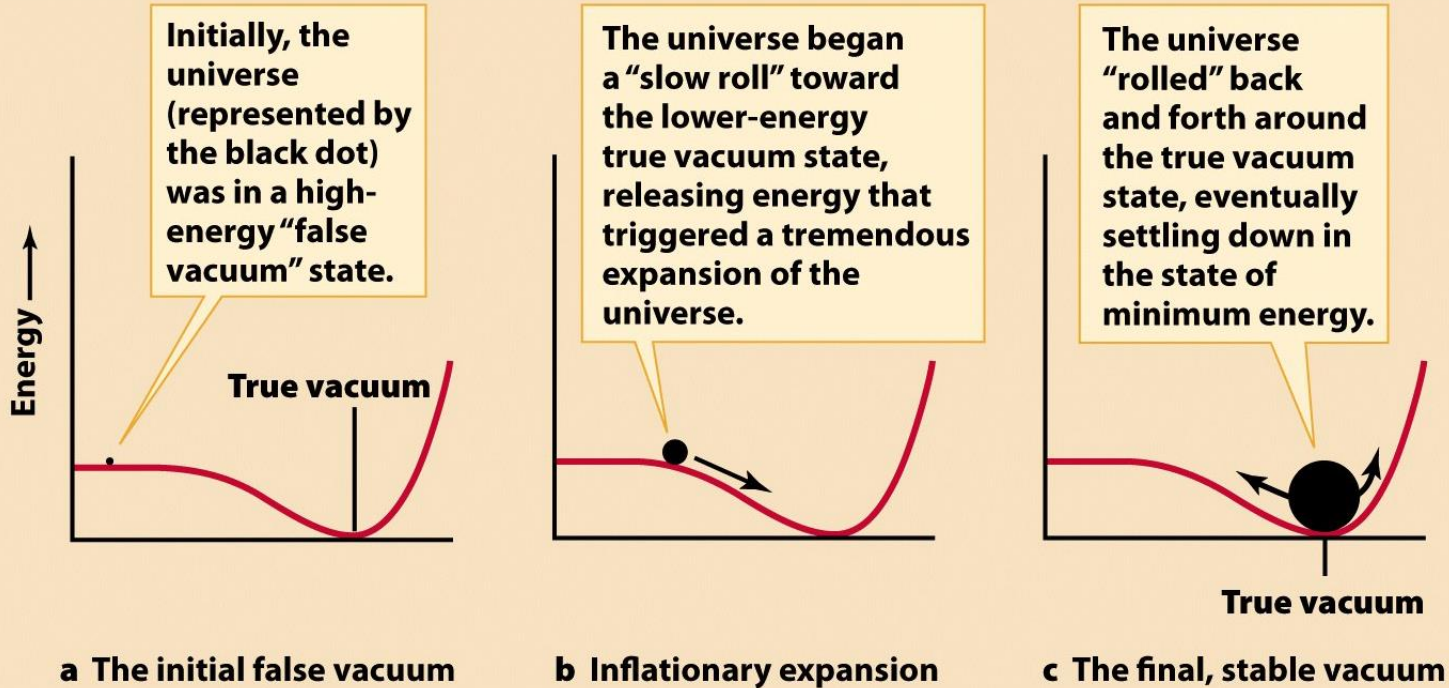


Inflação cósmica

- Ao fim da expansão, enormes quantidades de energia são liberadas. Essa energia gera novas partículas;
- A física quântica, porém, impõe certas condições quanto a quantidade de energia armazenada em cada ponto;
- De acordo com a física quântica, a quantidade de energia armazenada em cada ponto não é igual, mas difere aleatoriamente por quantidades minúsculas;
- Em resumo: as partículas que compõe o universo hoje foram criadas após o fim da inflação. A quantidade de energia transformada em partículas varia (minuscilmente) entre um ponto e outro;
- Isso explica porque o universo é aproximadamente isotrópico e homogêneo e porque as variações de temperatura (relacionadas a variações de densidade) no CMB são tão pequenas!



Exemplo de como a inflação pode tornar o universo plano.



Causa da inflação cósmica

- Em física quântica, energia pode estar armazenada no espaço vazio. Falso vácuo é um estado em que a energia armazenada não é a mínima possível. Acredita-se que a inflação cósmica teve origem porque o universo estava em um estado de falso vácuo;
- Ao transicionar para o estado de mínima energia, a energia armazenada foi sendo liberada;
- Essa energia deve estar relacionada a um processo físico, porém. Esse processo é desconhecido;
- Possibilidade: campo de Higgs?

O fundo cósmico de Micro-ondas: implicações

- 1º problema: o universo é homogêneo e isotrópico em grande escala, mas as configurações de matéria e radiação em um universo primordial homogêneo é extremamente irregular.
- 2º problema: o universo é plano ($\Omega_0=1$) também é improvável;
- 3º problema: a existência de diferenças de temperatura em partes do universo está em equilíbrio térmico. Além disso, devido à expansão, regiões distantes estão desconectadas e um equilíbrio térmico não poderia ser estabelecido entre elas!



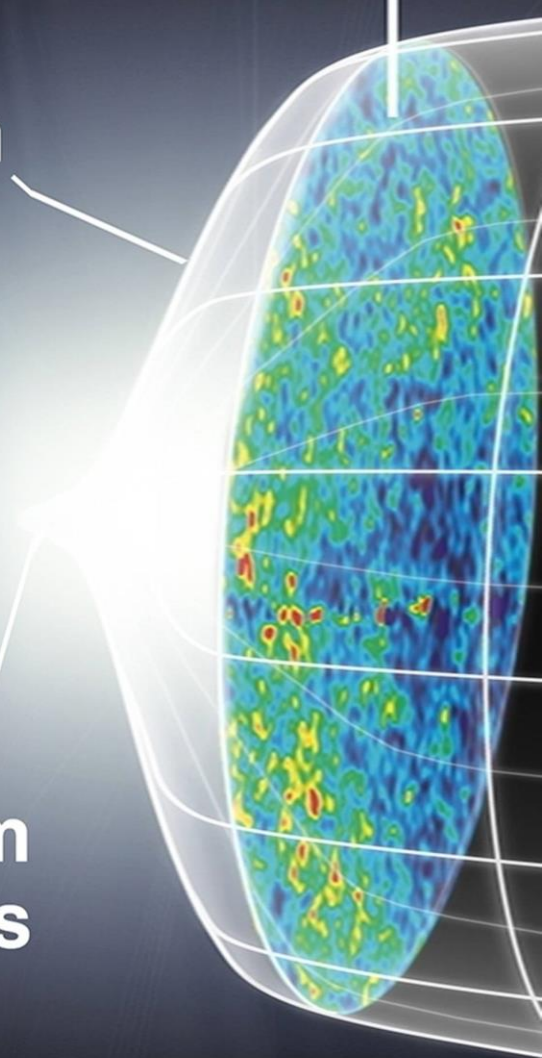
Inflação explica propriedades do CMB!

A teoria do Big Bang (revista)

- No início, toda matéria e energia do universo estavam concentrados em um único ponto;
- Nessa época, o universo era extremamente denso e quente;
- Após um período de 10^{-37} s, um período de rápida inflação tem início;
- Universo cresce por um fator de mais de 10^{22} em um intervalo de tempo de 10^{-32} s.
- Ao fim da inflação, universo é plano, isotrópico, homogêneo e está em equilíbrio térmico;
- O universo se expande e esfria;

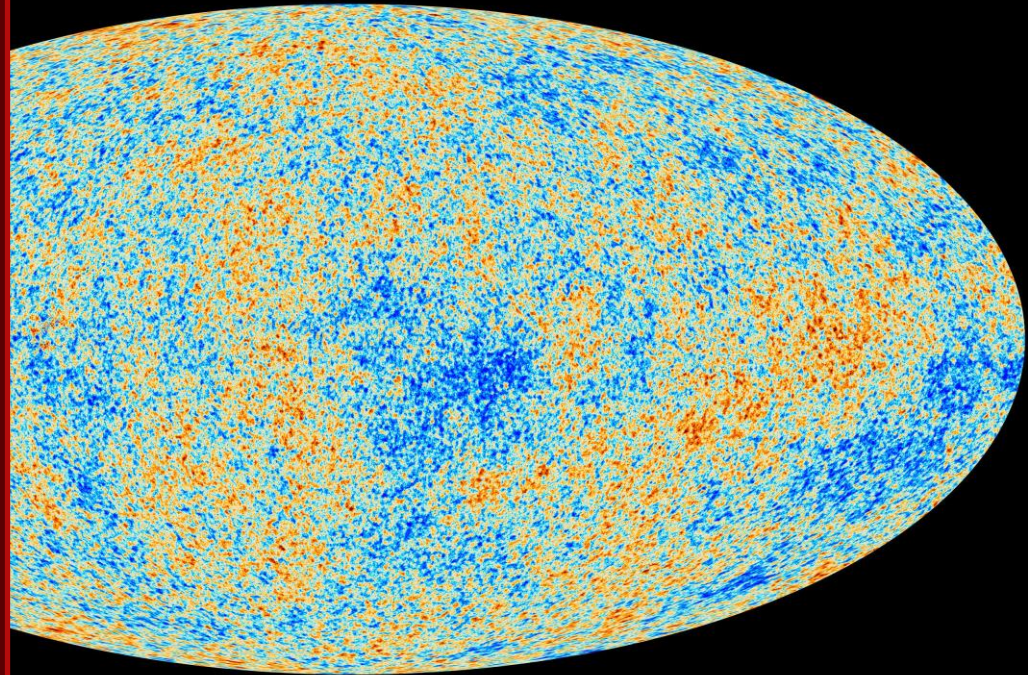
Inflation

**Quantum
Fluctuations**



A recombinação

- Por volta de 10^{-6} s, quarks e gluons se juntam para formar prótons e nêutrons;
- Por volta de 3 minutos após o Big Bang, prótons e nêutrons se combinam para formar núcleos de hélio e deutério. Prótons que não se combinaram formarão núcleos de hidrogênio;
- Elétrons, porém, ainda têm temperatura muito alta para se ligarem aos núcleos atômicos;
- Por volta de 379.000 anos após o início da expansão, elétrons esfriam o suficiente para serem capturados por núcleos atômicos;
- Fótons também esfriam devido à expansão (comprimento de onda se torna mais vermelho => menor energia);
- Energia dos fótons remanescentes do Big Bang não é alta o suficiente para excitar elétrons em átomos. Ou seja, esses fótons não interagem mais com a matéria: universo é transparente;



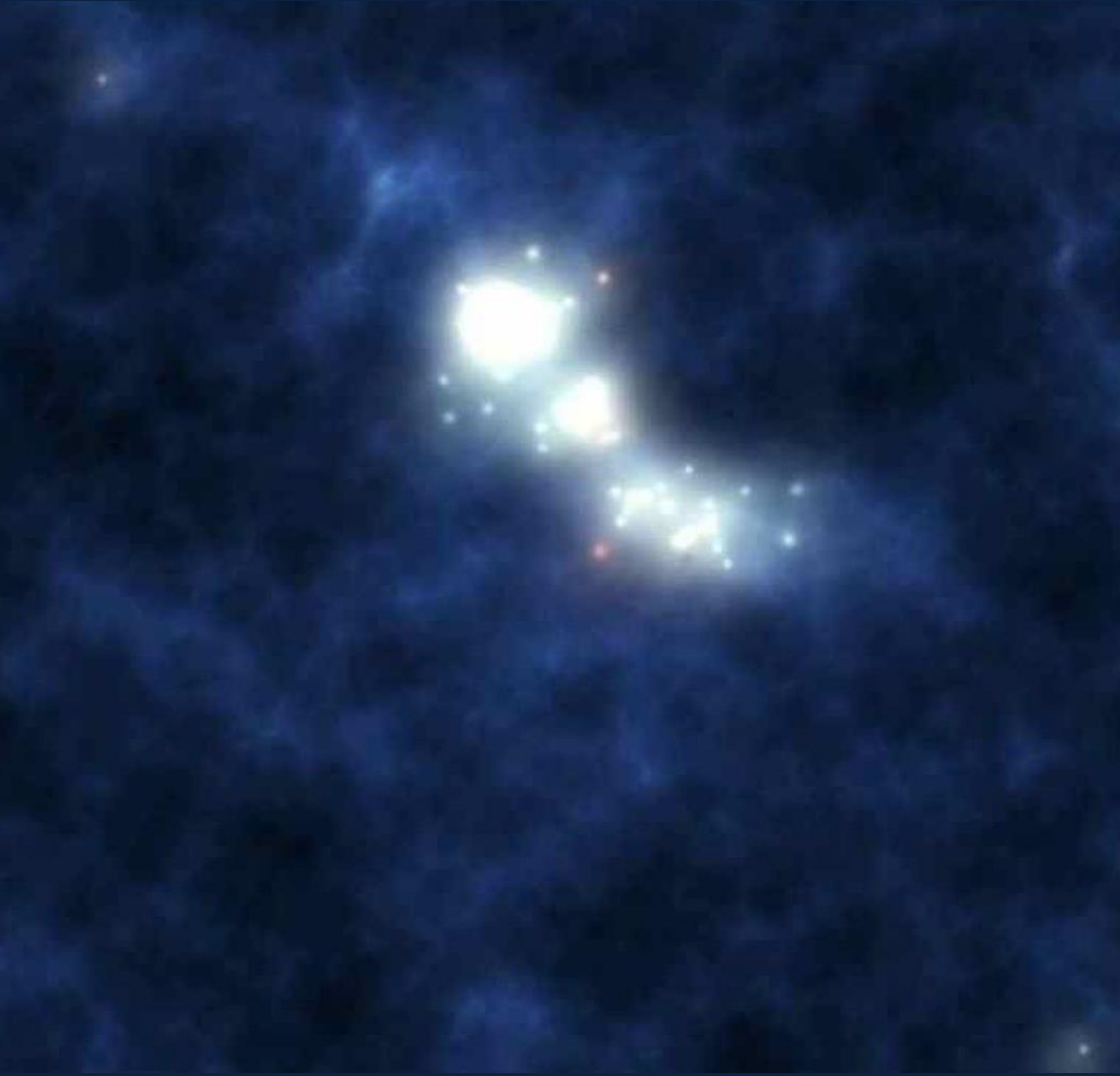
A era das Trevas

- Por volta de 379.000 anos após o início da expansão, elétrons esfriam o suficiente para serem capturados por núcleos atômicos;
- Esse processo é chamado recombinação: elétrons se combinam com núcleos atômicos para formar átomos;
- Após a recombinação, o universo entra numa idade das trevas. Até a formação das primeiras estrelas, não há nenhuma estrutura que emite luz;



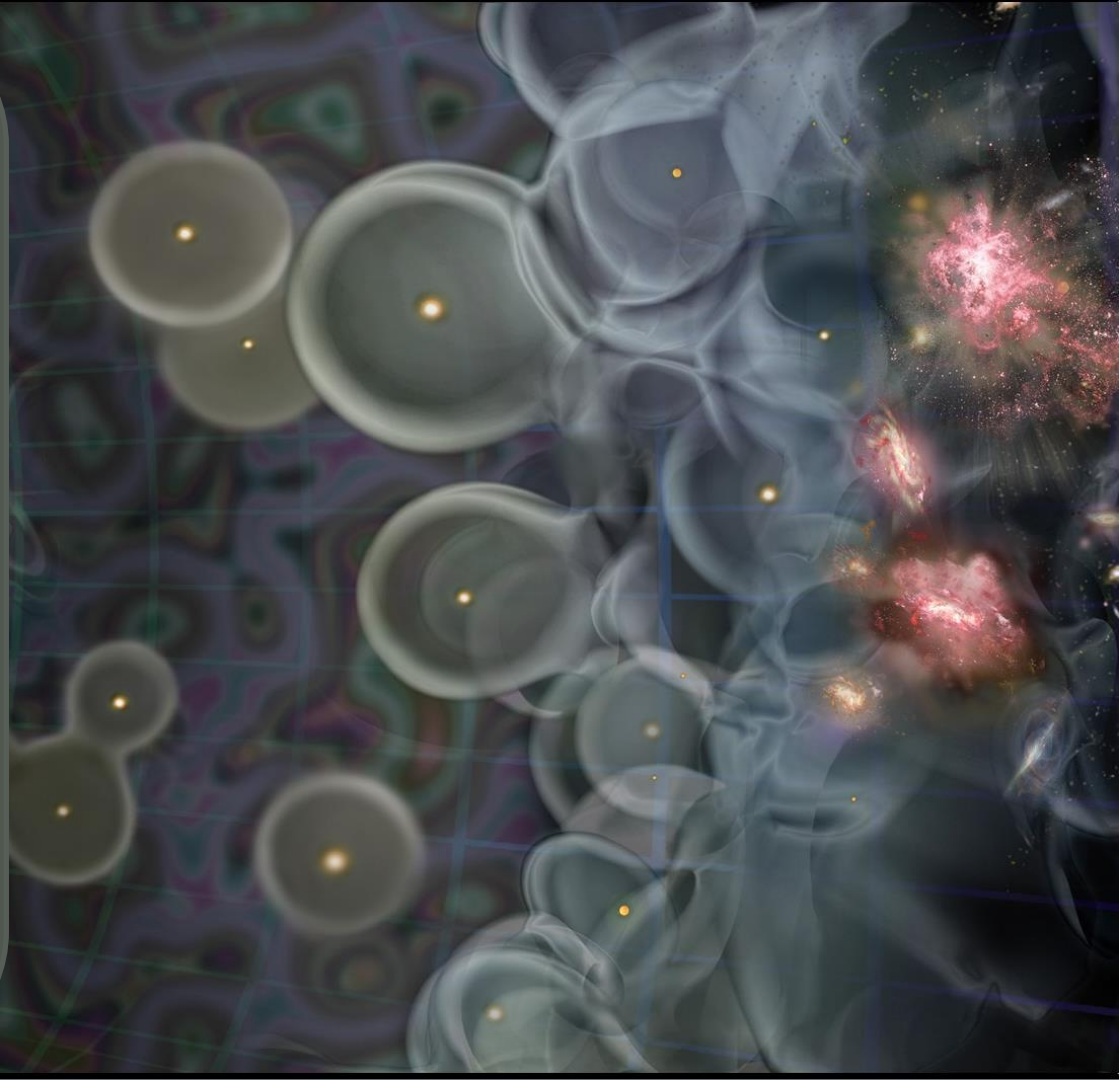
As primeiras estrelas

- Por volta de 700 milhões de anos após o Big Bang, a idade das trevas começa a chegar ao fim com a formação das primeiras estrelas;
- Formadas apenas por Hidrogênio e Hélio, essas estrelas eram muito massivas (podendo chegar a $100M_{\text{sol}}$) e chegavam ao fim de sua vida em alguns poucos milhões de anos;
- Essas estrelas são chamados de estrelas de população III;
- Os primeiros metais foram formados do núcleo dessas estrelas;
- Até hoje, estrelas de população III não foram observadas. Tudo o que sabemos sobre essas estrelas é baseado em simulações de computador de sua formação e evolução.



A reionização

- Inicialmente, o universo é opaco: energia emitida pelas estrelas é absorvida por elétrons em átomos de hidrogênio;
- Lentamente, no entanto, a energia emitida pelas estrelas ioniza os átomos de hidrogênio;
- Bolhas de hidrogênio ionizado se formam no entorno das galáxias, onde a luz não é absorvida;
- Conforme mais estrelas e galáxias se formam, mais hidrogênio é ionizado: mais bolhas se formam, bolhas existentes crescem;
- Por volta de 1 bilhão de anos após o Big Bang, o hidrogênio no meio intergaláctico foi completamente ionizado;
- No meio intergaláctico, elétrons não estão ligados aos núcleos atômicos, como ocorria antes da recombinação: o universo foi reionizado.



JADES-GS-z14-0: a galáxia mais distante já observada, vista 290 milhões de anos após o Big Bang. Está a uma distância de 33,900 bilhões de anos luz.

JADES-GS-z14-0





**Energia escura e expansão acelerada
do Universo**

Expansão acelerada do universo

- Até o fim dos anos 90, acreditava-se que a velocidade de expansão do universo estava desacelerando;
- Observações de supernovas do tipo Ia mudaram essa visão;
- Supernovas do tipo Ia são velas padrão e ao mesmo tempo extremamente brilhantes: visíveis em galáxias distantes;
- Observações mostraram que as supernovas Ia eram mais fracas que o esperado;
- Isso implica que as distâncias até as galáxias onde as supernovas ocorreram eram maiores que o esperado no caso de um universo em aceleração;
- As distâncias medidas eram consistentes com um universo em que a velocidade da expansão vem aumentando desde 9,8 bilhões de anos após o Big Bang;
- O que isso significa?

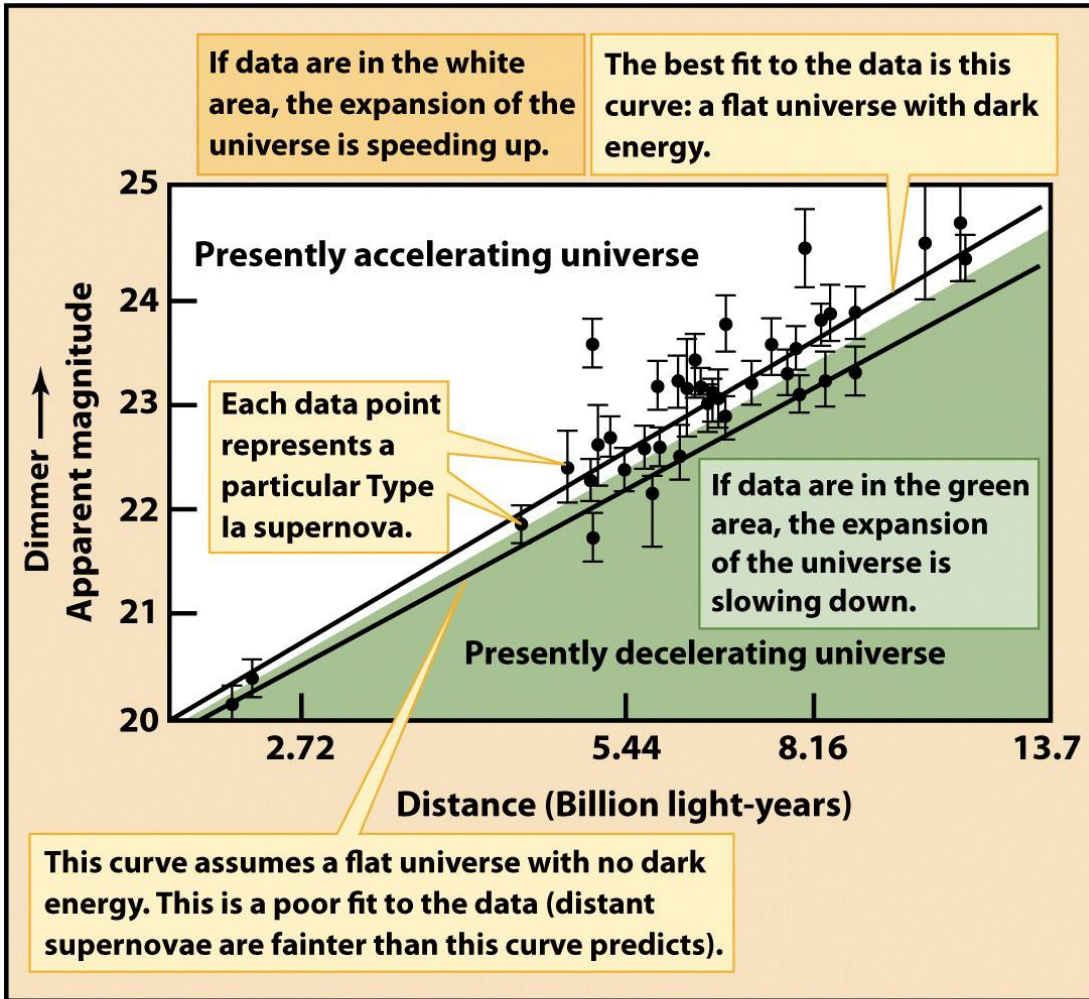
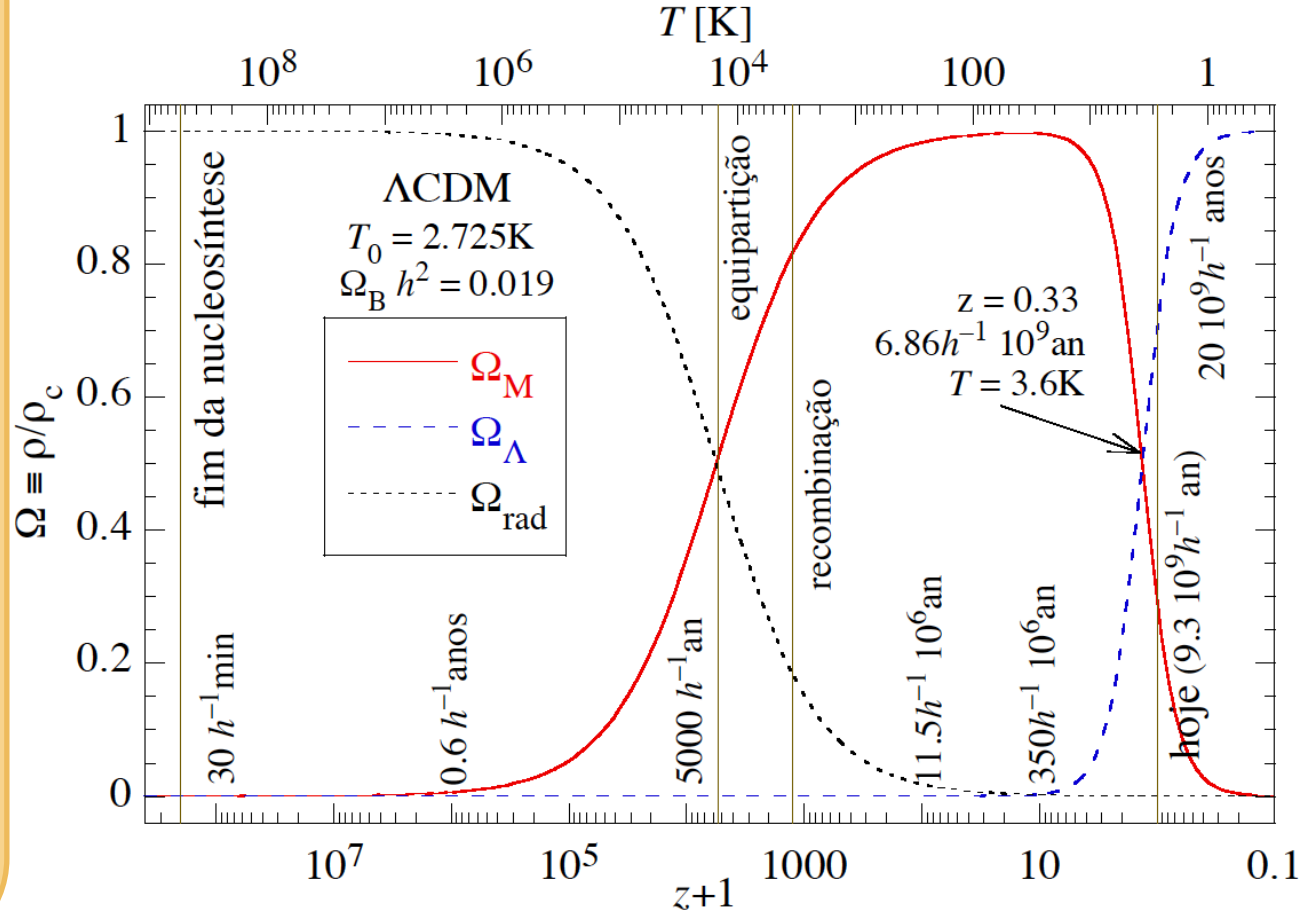


Figure 18-23b
Discovering the Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

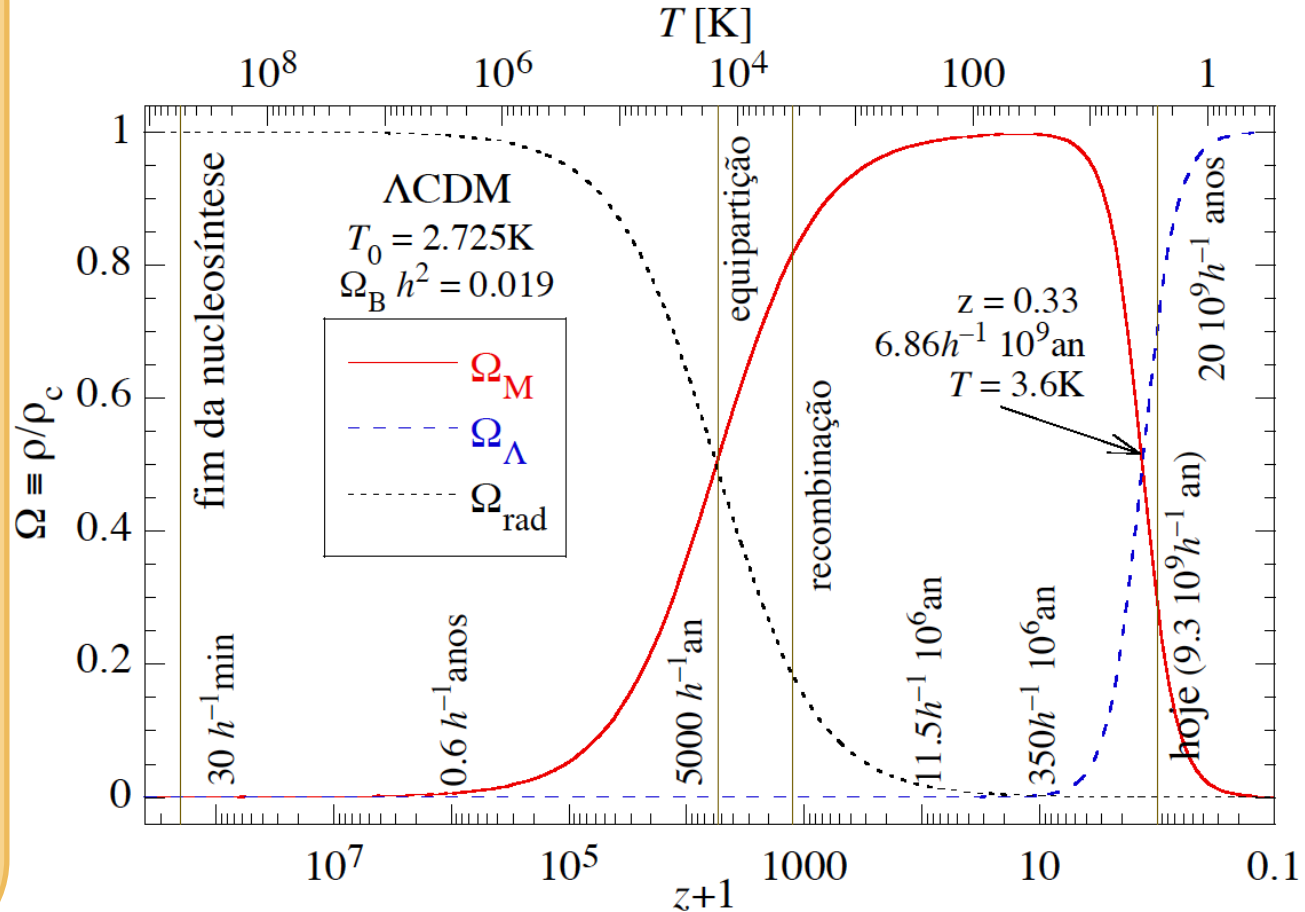
Expansão acelerada do universo

- A velocidade de expansão/contração do espaço é ditada pela composição do universo;
- Conforme o espaço cresce, a densidade de energia da matéria cai, pois o número total de partículas no universo é constante;
- A densidade de energia da radiação (fótons) cai mais rápido que a da matéria, pois os fótons perdem energia com a expansão devido ao desvio para o vermelho que sofrem (comprimentos de onda mais vermelhos são menos energéticos);



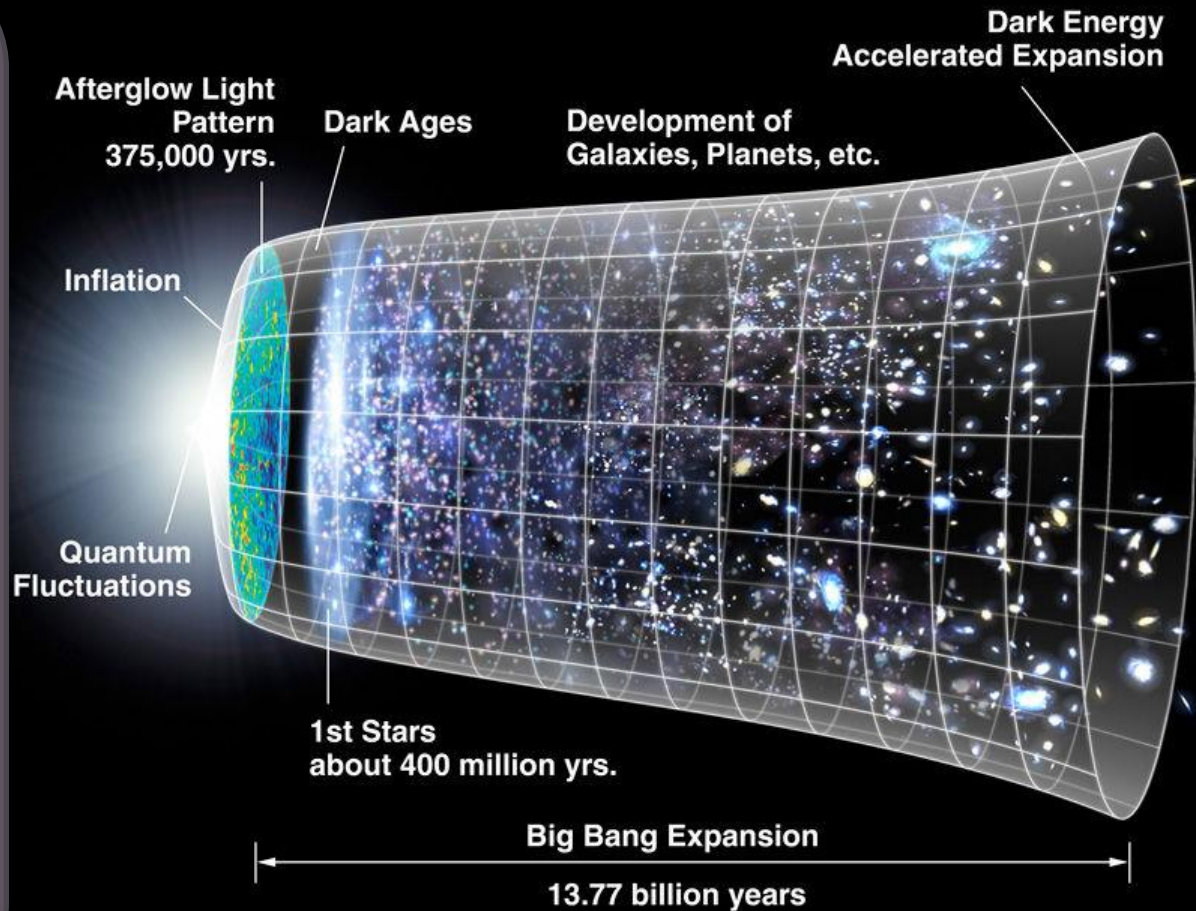
Expansão acelerada do universo

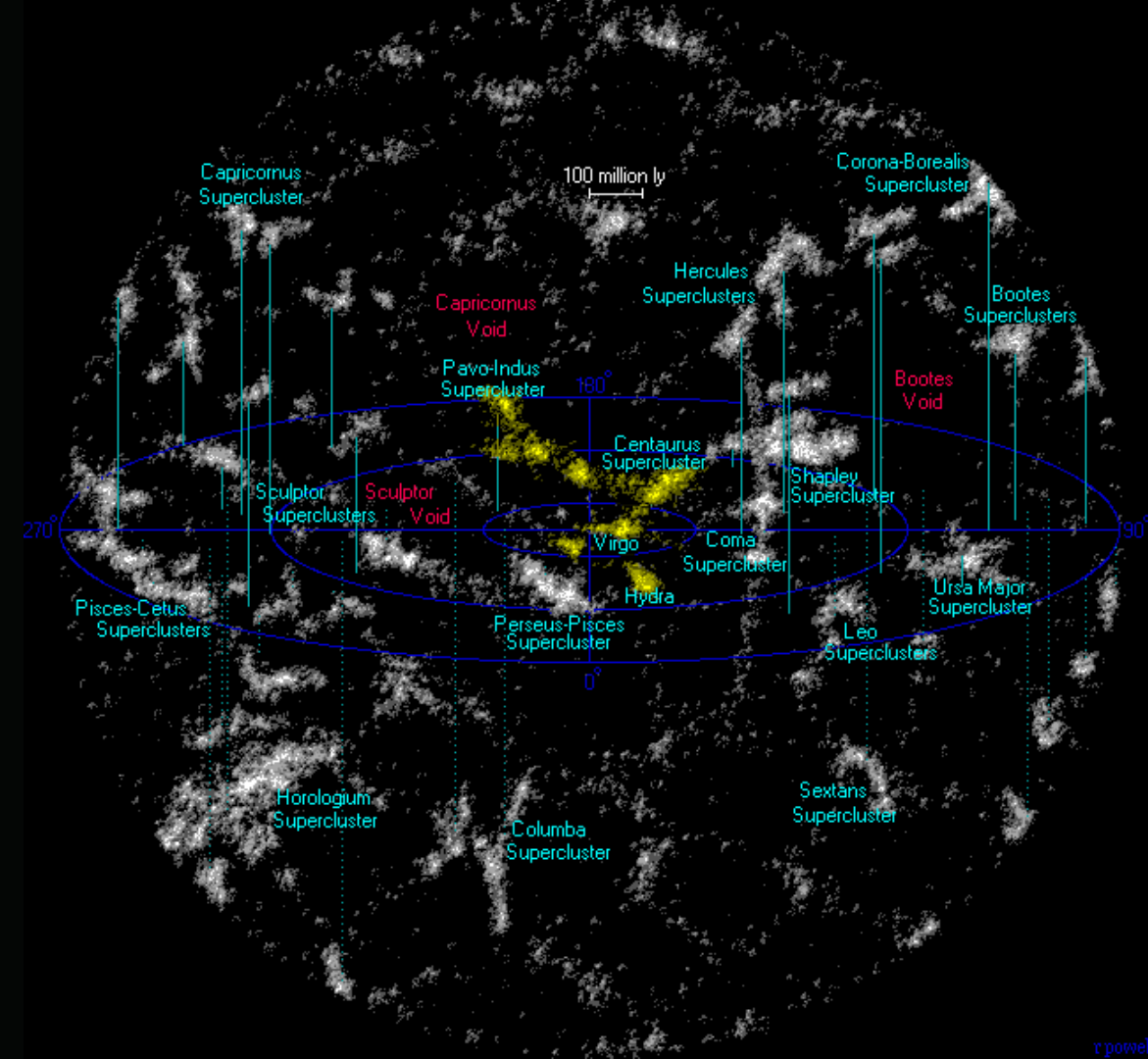
- Inicialmente a densidade de energia é dominada pela radiação;
- Conforme o universo expande, a matéria passa a dominar;
- Em um universo dominado pela matéria com $\Omega_0=1$, a velocidade de expansão tende a diminuir com o tempo;
- Se a expansão está acelerando, outra componente deve existir;
- O único tipo de componente que causaria uma expansão acelerada seria uma energia repulsiva contida no espaço vazio: energia escura.



Energia escura

- A energia escura é responsável por 68,3% da densidade de energia do universo, enquanto 4,9% da densidade de energia é matéria comum e 26,8% é matéria escura;
- Como a energia escura está contida no espaço, e o espaço está crescendo com a expansão do universo, a quantidade de energia escura no universo é cada vez maior;
- Sua densidade, porém, se mantém constante;
- A natureza da energia escura é desconhecida;
- Sua existência só é conhecida pelo seu efeito na expansão do universo e porque uma terceira componente é necessária para que $\Omega_0=1$.





O destino do universo

- Caso a expansão acelerada continue, qual o destino do universo?
- Em 100 bilhões de anos, velocidade de expansão será maior que a da luz;
- Todas as estruturas não ligadas gravitacionalmente se tornarão desconectadas;
- Partes não ligadas de super-aglomerados se desmancharão;
- Grupo local estará desconectado do restante do universo: nenhuma estrutura fora do grupo local será visível no céu.

Questões ainda em aberto

- **Desigualdade matéria/antimatéria:** em laboratório, matéria e antimatéria são criadas em quantidades iguais. Porém, o universo é dominado por matéria, a quantidade de antimatéria é insignificante. Teoricamente, foram propostos processos atuantes logo após o Big Bang que poderiam criar matéria em maiores quantidades que antimatéria (1 parte em 1 bilhão) , mas ainda não é possível testar essas hipóteses em laboratório;
- **Natureza da energia escura:** a matéria escura é realmente energia do vácuo, ou é algum outro tipo de energia?
- **Natureza da inflação:** a inflação realmente aconteceu? Qual origem da energia que causou a inflação?
- **Composição da matéria escura:** quais são as partículas da qual a matéria escura é composta?
- **O que acontece durante o Big Bang? Existia algo antes dele?:** a fim de responder essas questões, uma teoria quântica da gravidade é necessária;
- **Porque as leis de física têm a forma observada?**
- **Qual é o destino do universo:** a expansão acelerada continuará indefinidamente?

First Stars and Reionization Era

