



Cosmologia

Eduardo Cypriano

Definição

Definição de cosmologia:

O estudo do Universo como um todo

De modo menos formal podemos dizer que a cosmologia pretende responder algumas das questões mais fundamentais que temos, tais como:

Qual a origem do Universo ?

Como o Universo evolui ?

Qual será o fim do Universo ?

Definição

Ao longo da história muitas respostas foram dadas a essas questões, algumas religiosas outras científicas.

Nessa aula vamos nos focar na chamada “cosmologia moderna” que foi desenvolvida a partir de princípios do século XX.

Cosmologia no início do século XX

No início do século XX vivíamos o chamado “Grande debate”

- Nessa época a forma da Via-Láctea já era conhecida a grosso modo mas não suas dimensões



Cosmologia no início do século XX

No início do século XX vivíamos o chamado “Grande debate”

- Nessa época a forma da Via-Láctea já era conhecida a grosso modo mas não suas dimensões
- Uma das questões em aberto era se as “nebulosas” que eram observadas (em particular Andrômeda) eram parte da nossa galáxia ou outras galáxias comparáveis à Via-Láctea.



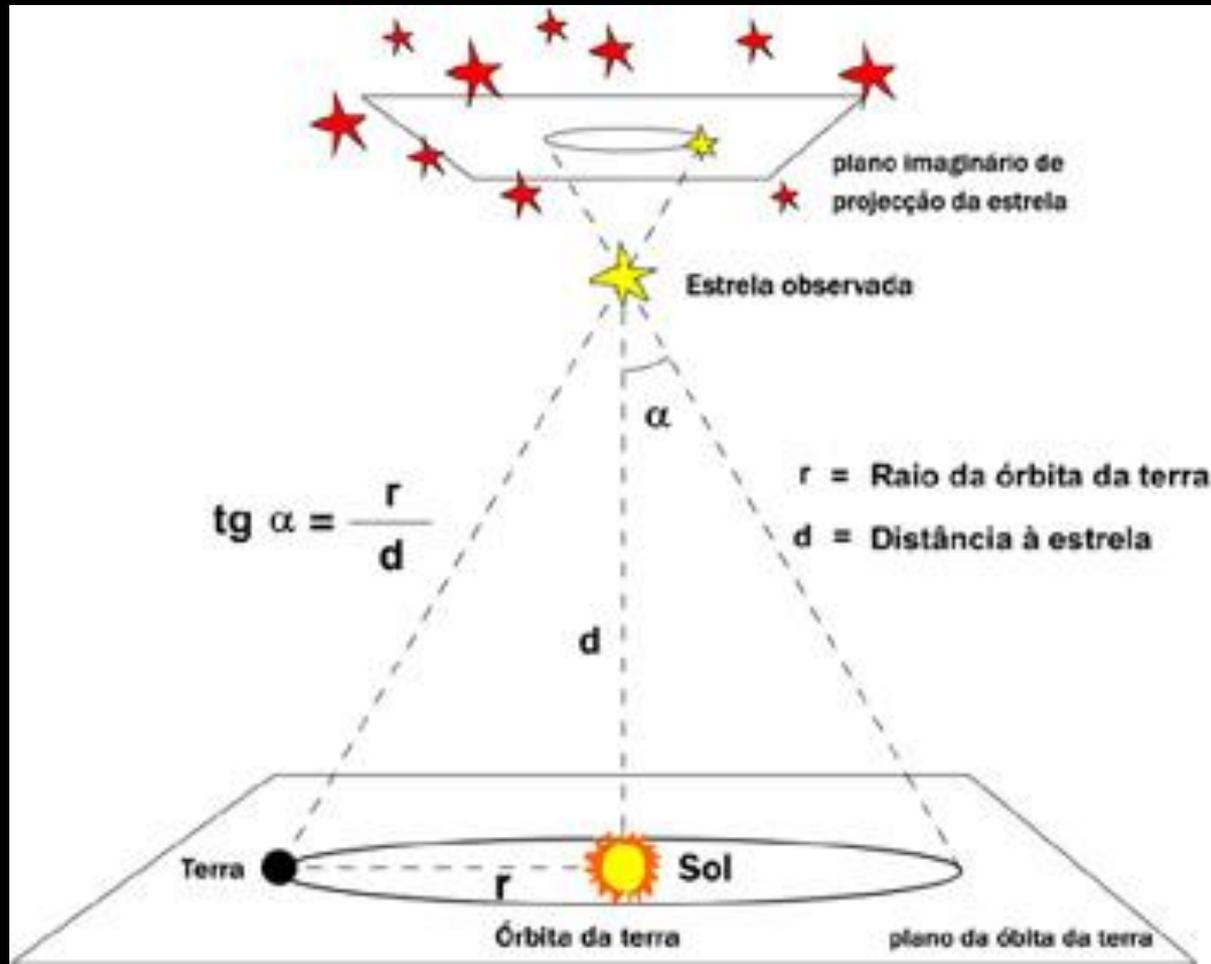
Cosmologia no início do século XX

No início do século XX vivíamos o chamado “Grande debate”

- Nessa época a forma da Via-Láctea já era conhecida a grosso modo mas não suas dimensões
- Uma das questões em aberto era se as “nebulosas” que eram observadas (em particular Andrômeda) eram parte da nossa galáxia ou outras galáxias comparáveis à Via-Láctea.
- A solução para essa questão passava por medir a distância de Andrômeda. Mas como isso pode ser feito?

Medidas de distância

Não era possível medir a Paralaxe Trigonométrica de andrômeda



Medidas de distância

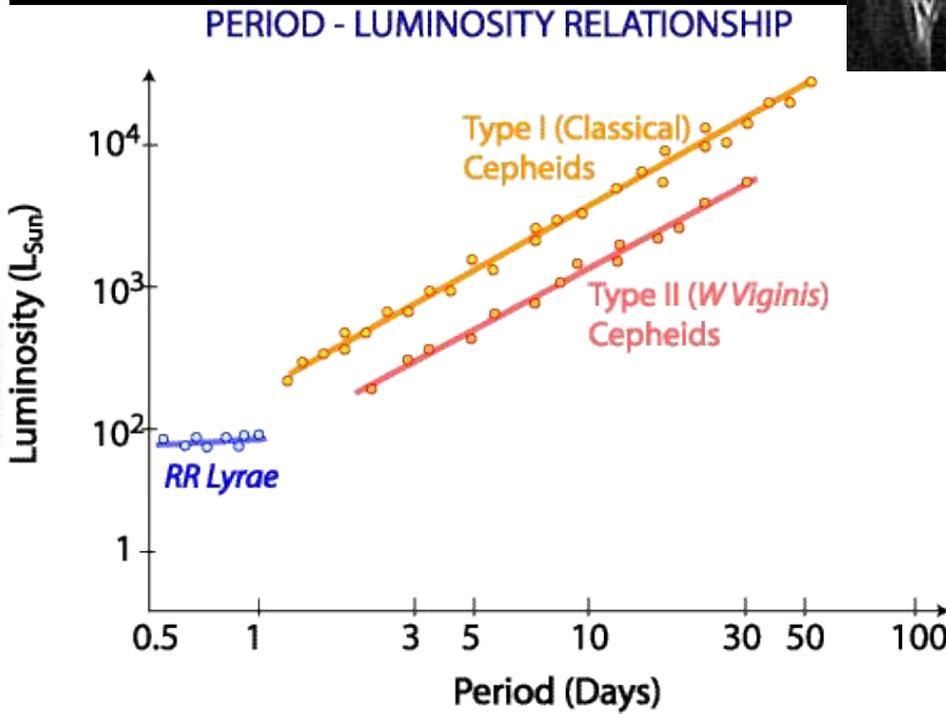
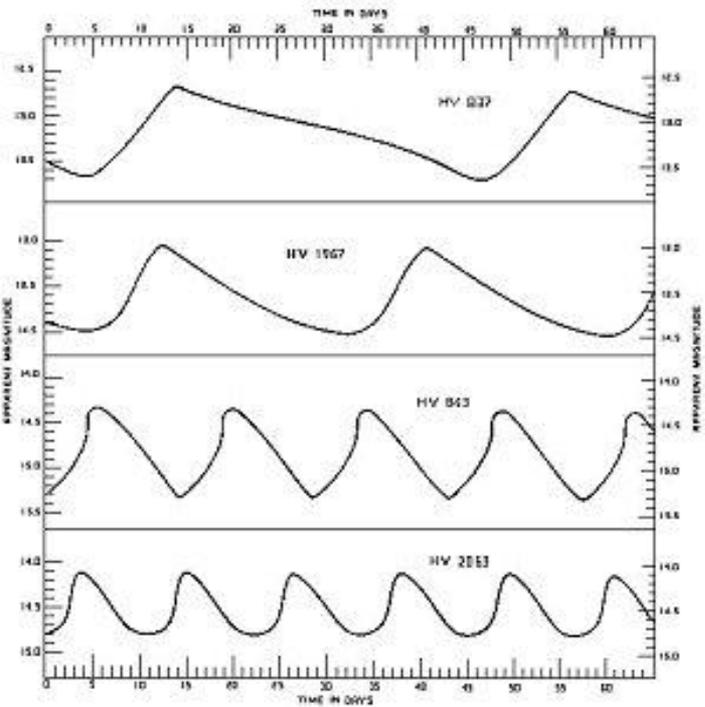
Não era possível medir a Paralaxe Trigonométrica de Andrômeda

Foi necessário a descoberta de um novo método para medir distâncias: **Estrelas Cefeidas**

Medidas de distância: Cefeidas

Em 1912 Henrietta Leavitt descobriu a relação período-luminosidade para as estrelas Cefeidas (da classe de δ Cephei)

Ao estudar centenas de estrelas variáveis nas nuvens de Magalhães ela descobriu que as cefeidas com períodos maiores também eram mais brilhantes

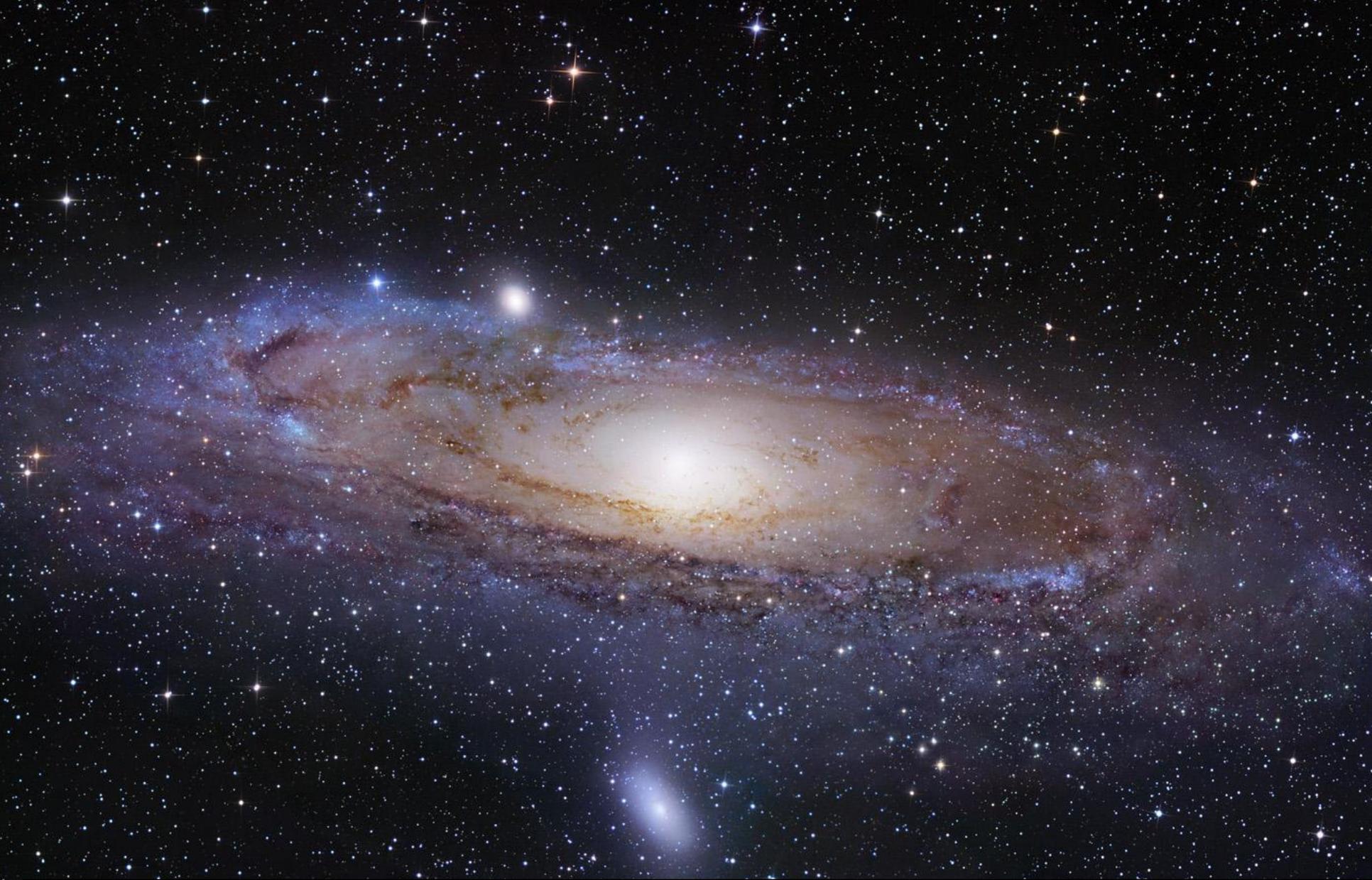


Medidas de distância: Cefeidas

A determinação do período de variabilidade de uma estrela cefeida não depende de sua distância, mas seu brilho observado ou aparente sim depende ($\text{fluxo} \propto d^{-2}$).



Temos então um método para determinar a distância dessas estrelas!



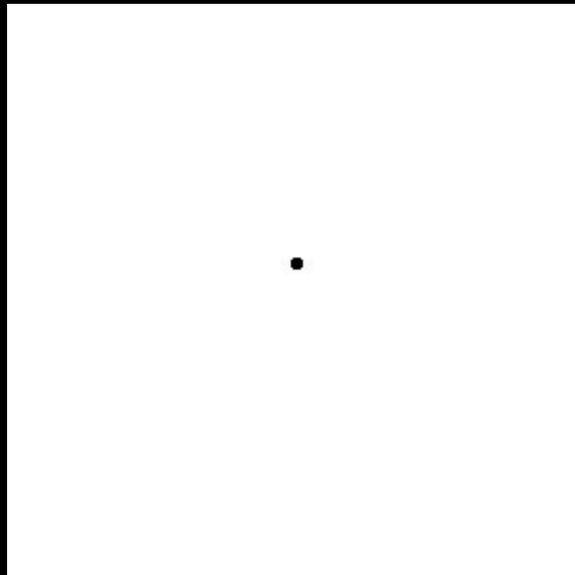
Nascia então o que hoje denominamos astronomia extra-galáctica

O efeito Doppler

Também, nos princípios do século XX, os astrônomos (Vesto Slipher em particular) detectaram a presença do efeito Doppler no espectro das “nebulosas espirais” ou galáxias

O que é o efeito Doppler ?

Quando uma fonte que emite ondas (sonoras ou de luz por exemplo) está em movimento, o comprimento de onda é menor na direção desse movimento e maior na direção oposta



O efeito Doppler

Exemplo: ambulância em alta velocidade

Quando a ambulância se aproxima de nós o som da sirene é mais agudo (comprimentos de onda menores) e torna-se mais grave (comprimentos de ondas maiores) quando esta se afasta

No caso da luz (também conhecido como efeito Doppler-Fizeau):

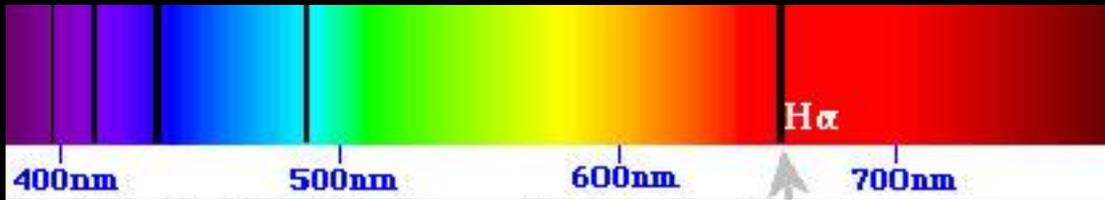
Azul → Comprimentos de onda menores → Objeto que se aproxima

Vermelho → Comprimentos de onda maiores → Objeto que se afasta

O efeito Doppler

Como o efeito Doppler pode ser medido no espectro de galáxias ?

A partir do deslocamento das linhas espectrais características dos elementos químicos



Galáxia em repouso

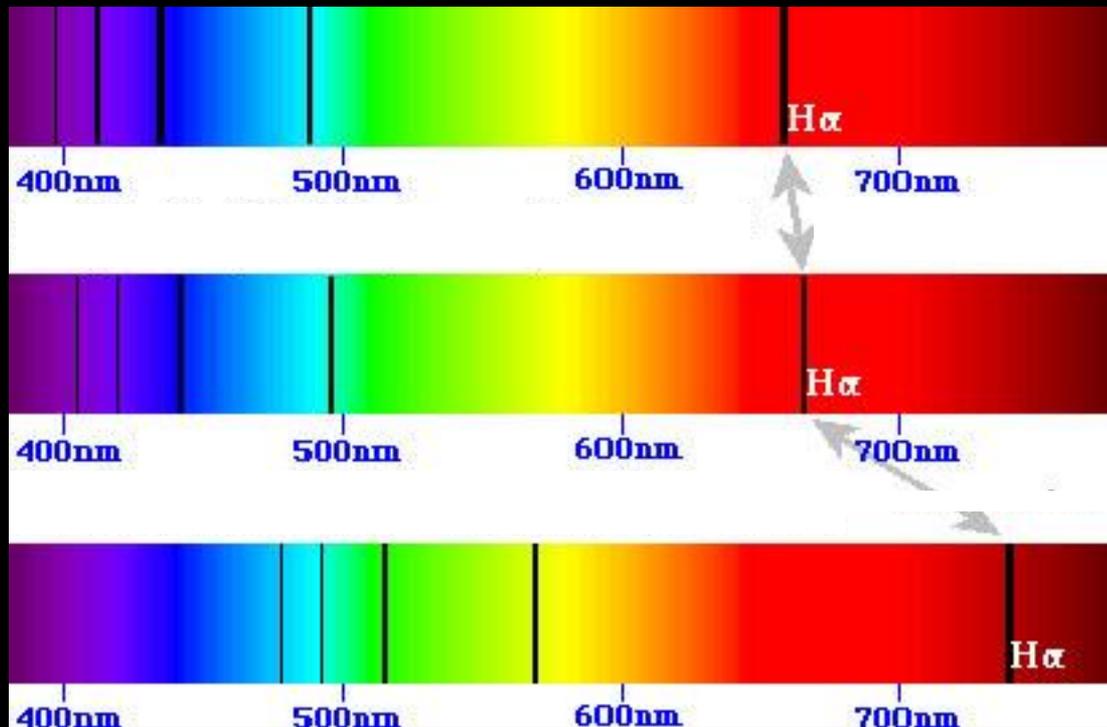
Galáxia que se afasta em baixa velocidade

Galáxia que se afasta em alta velocidade

O efeito Doppler

Assim sendo, a partir do efeito Doppler é possível medir a velocidade de uma galáxia (pelo menos na direção radial)

$$z \equiv \frac{(\lambda_{\text{observado}} - \lambda_{\text{repouso}}) / \lambda_{\text{repouso}}}{v/c} =$$



Galáxia em repouso

Galáxia que se afasta em baixa velocidade

Galáxia que se afasta em alta velocidade

A Lei de Hubble

Logo de princípio notou-se que a maioria das galáxias apresentavam desvios para o vermelho (*redshifts* em inglês), com algumas exceções como a própria galáxia de Andrômeda

Esse resultado foi surpreendente pois significava que **as galáxias**, em sua maioria, **estariam se afastando de nós**

A Lei de Hubble

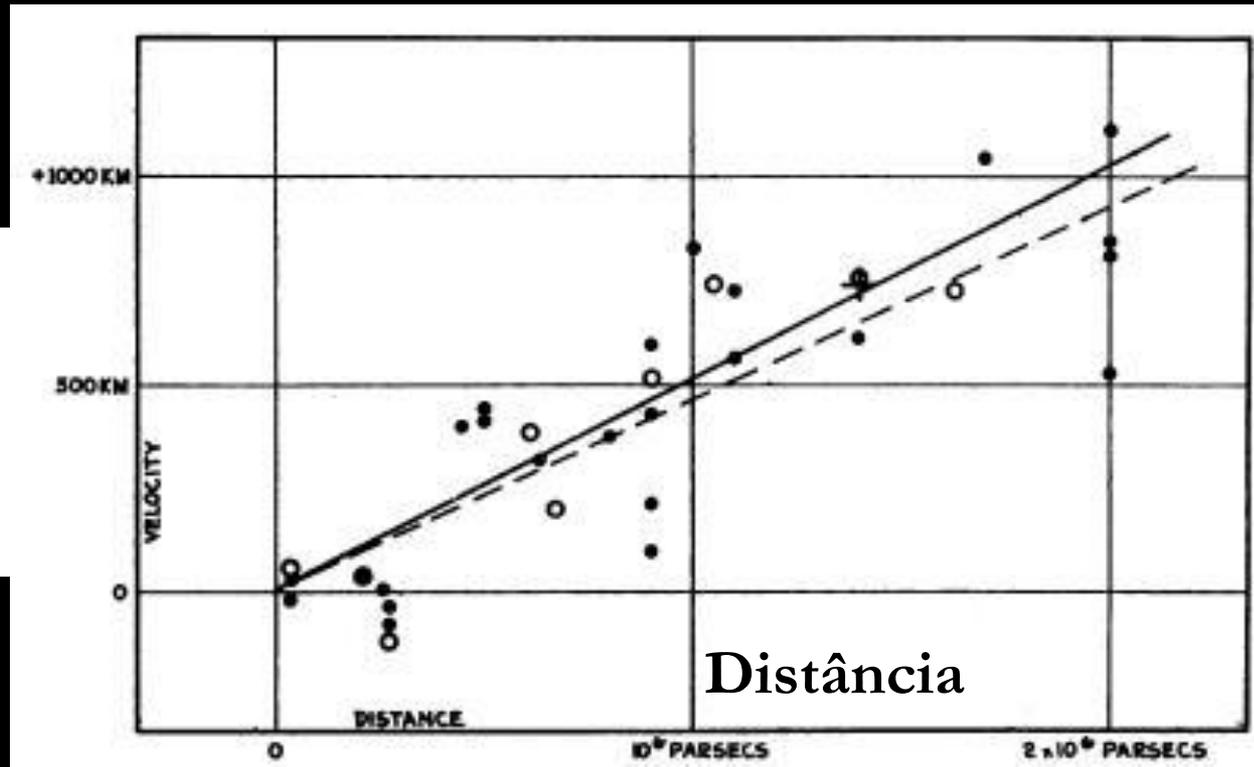
Em 1931 Hubble e seu colaborador Humason compilaram e mediram *redshifts* de várias galáxias e determinaram suas distâncias usando o método das Cefeidas

O resultado obtido foi que a velocidade de recessão das galáxias era diretamente proporcional às suas distâncias

Essa é a lei de Hubble:

$$v = H_0 d$$

Velocidade



Distância

A Lei de Hubble

$$\text{Lei de Hubble: } v = H_0 d$$

Uma das consequências da lei de Hubble é que encontra-se um novo método para medir a distância de galáxias através do seu *redshift*:

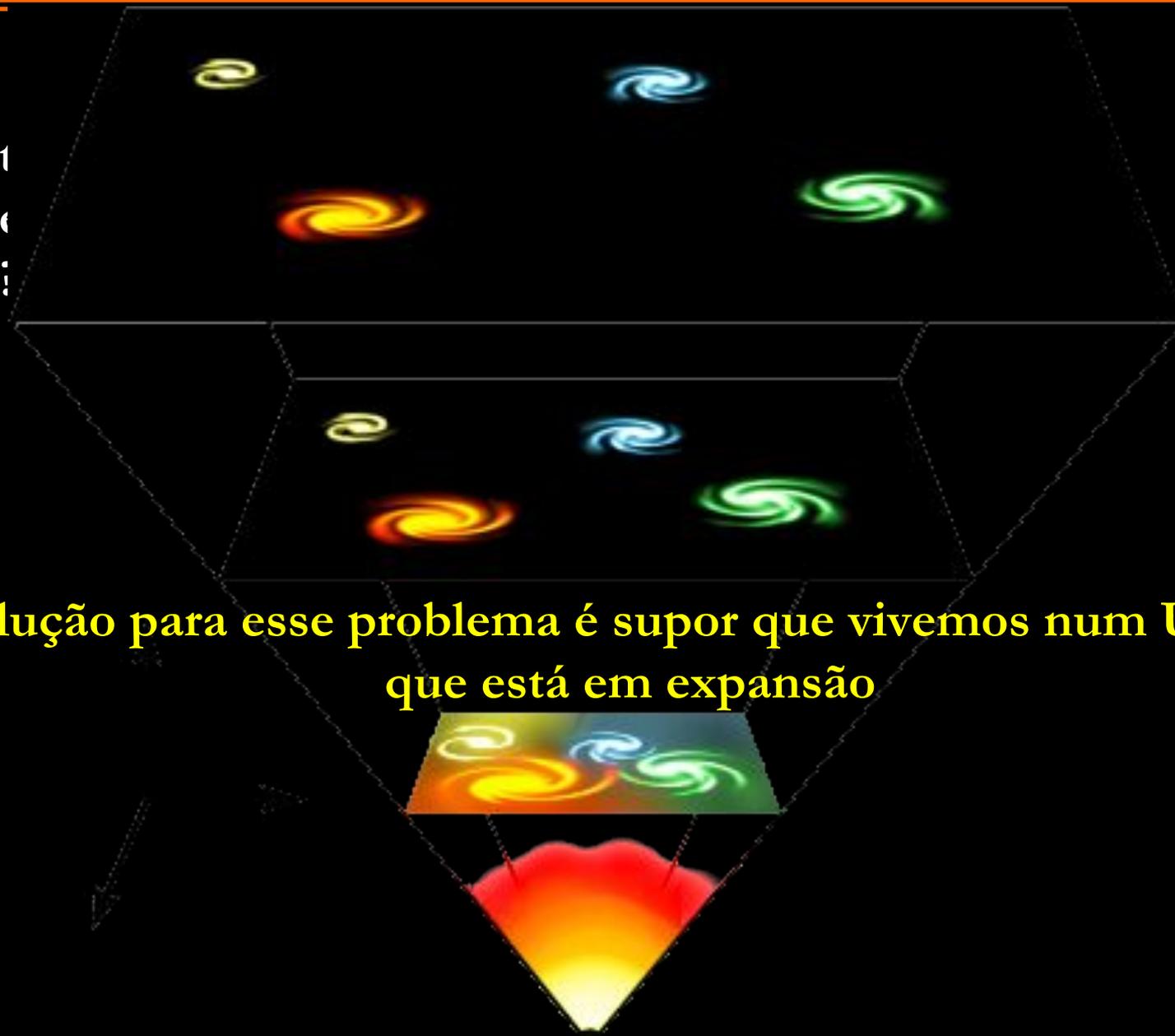
$$d = v/H_0 = z/(c H_0)$$

A Lei de Hubble

Por outro
afastaram-se
fazem:

galáxias se
afastaram do

**A solução para esse problema é supor que vivemos num Universo
que está em expansão**



O Universo em Expansão

Se o Universo está realmente em expansão é natural supor que no passado ele era menor que é atualmente.

Levando esse raciocínio ao extremo entenderemos que num dado momento no passado o Universo estava inteiramente concentrado numa singularidade primordial

O Universo em Expansão

O impacto dessas descobertas foi bastante grande, principalmente porque já haviam teorias que previam tais comportamentos

- Em 1922 Alexander Friedmann resolve as equações de Einstein (relatividade geral) e conclui que o Universo deveria estar em expansão ou contração
- Anos depois Georges Lemaître redescobre os resultados de Friedmann e cria o conceito de que no seu instante inicial o Universo deveria estar concentrado numa espécie de “átomo primordial”, a partir do qual se expandiria
- Posteriormente esse processo de expansão primordial do Universo foi chamado de *Big-Bang* (grande explosão) a fim de satirizar a teoria, mas o nome acabou se tornando popular e até hoje está em voga

O Universo em Expansão

Já nas décadas de 1930 e 1940 George Gamow fez previsões teóricas que, quando comprovadas, sedimentaram a teoria do Big-Bang

Usando analogias com a termodinâmica, Gamow entendeu que no passado, o Universo além de menor também deveria ser mais quente.

A partir desse ponto ele previu a existência de uma **radiação cósmica de fundo** e estimou a **abundância dos elemento químicos mais leves**, em particular o hélio, supondo que se formaram num processo de nucleossíntese primordial

Juntamente com a lei de Hubble essas evidências são o tripé que sustenta a teoria do big-bang

A história térmica do Universo

Para entendermos melhor as evidências do Big-Bang vamos recapitular brevemente a história térmica do Universo, desde o início extremamente quente e denso até os dias de hoje

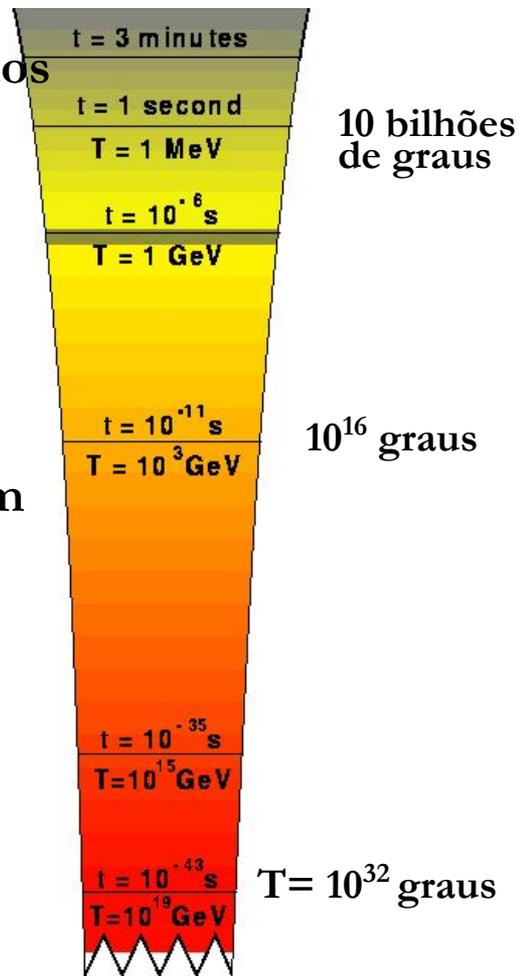
Nucleossíntese: Formação dos elementos leves: D, He, Li

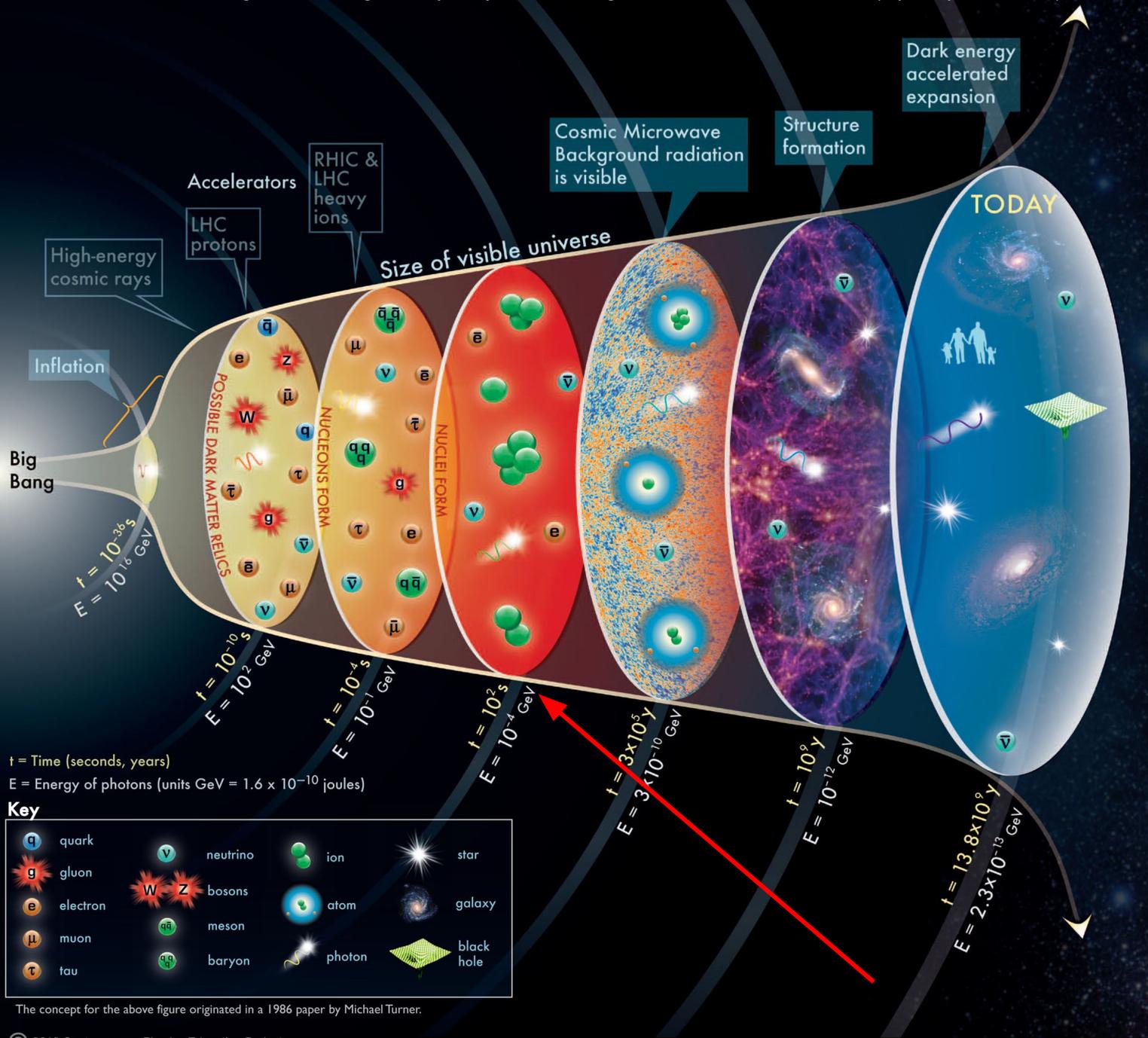
Formação de prótons e neutrons

Forças eletromagnéticas e nuclear fraca se desacoplam

Era da inflação

Era de Plank

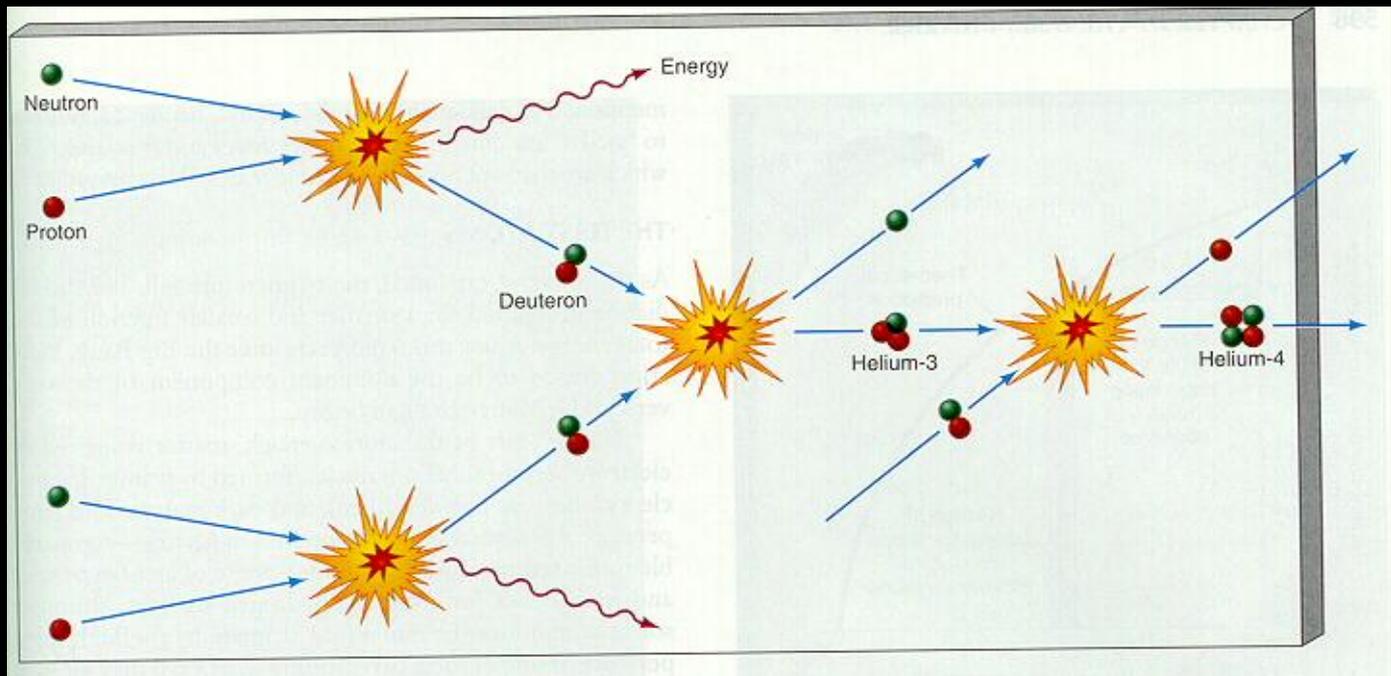




The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Nucleossíntese primordial

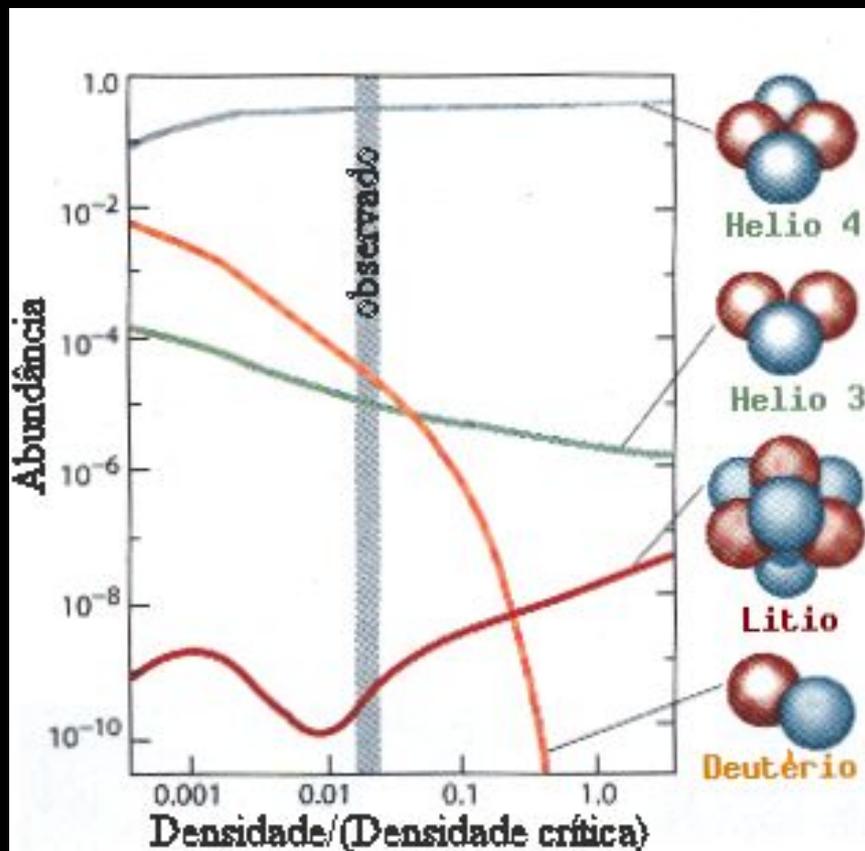
Quando o Universo tem cerca de 3 minutos, fusões nucleares ocorrem e se formam os primeiros núcleos atômicos além do Hidrogênio (próton)



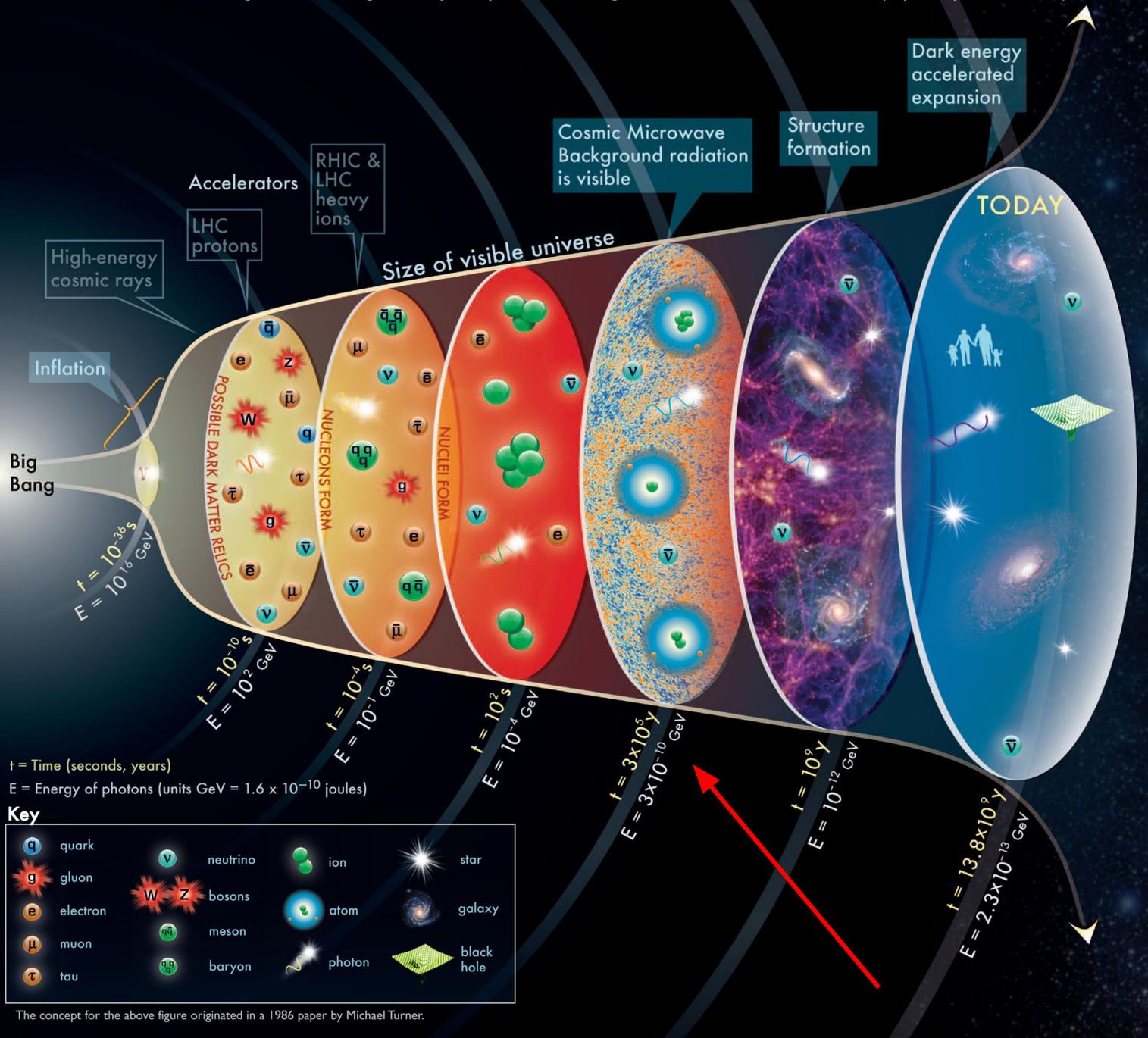
Como o Universo continua a se expandir logo ele se torna mais frio e menos denso, de modo que as reações nucleares cessam

Nucleossíntese primordial

A teoria do Bing-Bang prevê a abundância desses elementos em função da densidade de prótons e neutrons (bárions)



As abundâncias observadas do D, He^3 , He^4 , Li e Be são todas consistentes com a mesma densidade de bárions → **Sucesso da teoria do Big-Bang**



The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Formação dos átomos:
Recombinação

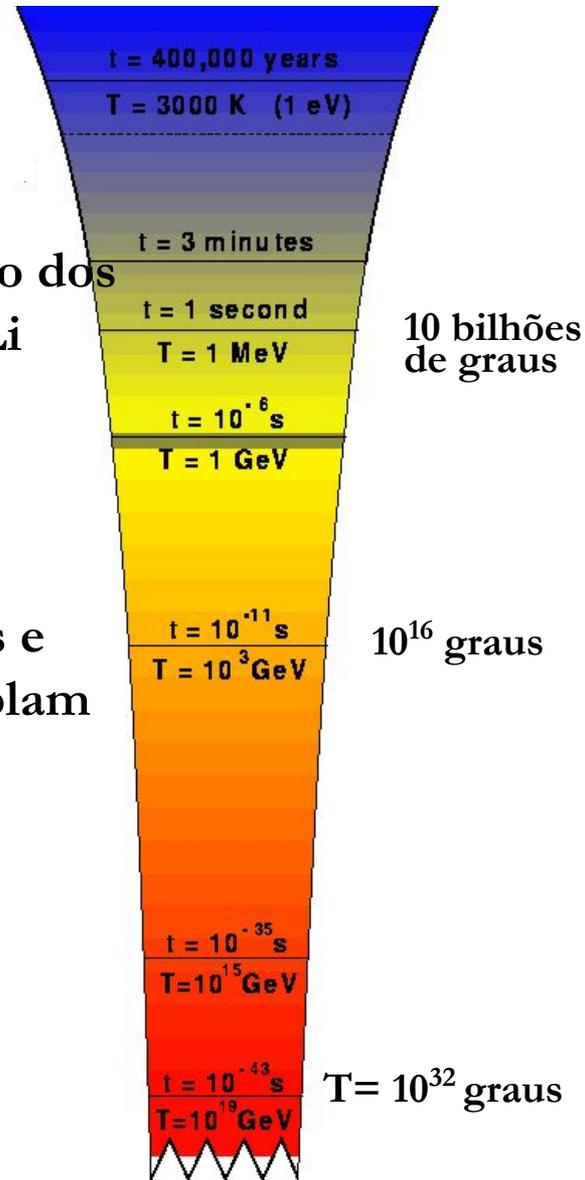
Nucleossíntese: Formação dos
elementos leves: D, He, Li

Formação de prótons e
neutrons

Forças eletromagnéticas e
nuclear fraca se desacoplam

Era da inflação

Era de Plank



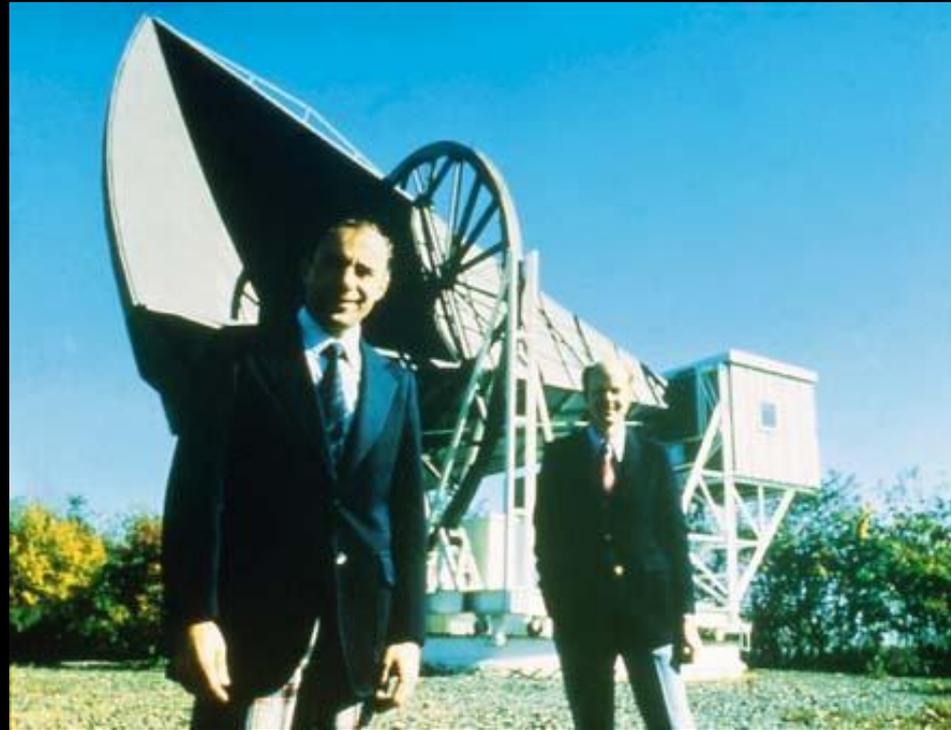
Recombinação

Os elétrons são capturados pelos núcleos atômicos: formam-se os primeiros átomos e **o Universo se torna transparente à radiação**

Gamow previu que poderíamos observar a radiação produzida nesse instante como uma radiação térmica (corpo negro) com ~ 5 K que viria de todas as direções no céu em forma de micro ondas, sendo chamada **radiação cósmica de fundo**

Radiação cósmica de fundo

Em 1964 Penzias e Wilson detectaram a radiação cósmica de fundo de modo acidental.

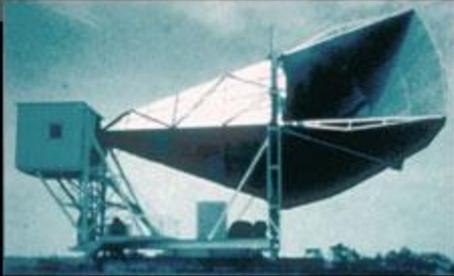


A temperatura da RCF é de 2,7K, muito próxima às previsões teóricas
→ **Sucesso da teoria do Big-Bang**

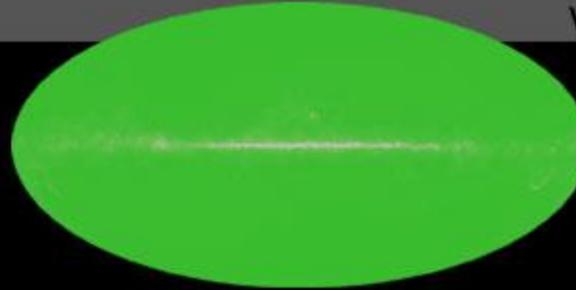
Radiação cósmica de fundo

Desde essa época até os dias de hoje a RCF vem sendo continuamente estudada e é uma das mais importantes fontes de informação para cosmologia

1965



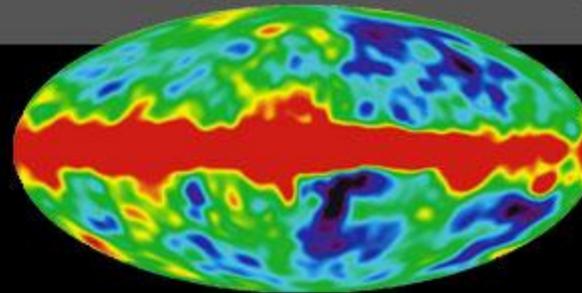
Penzias and
Wilson



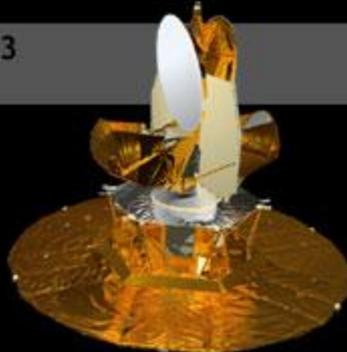
1992



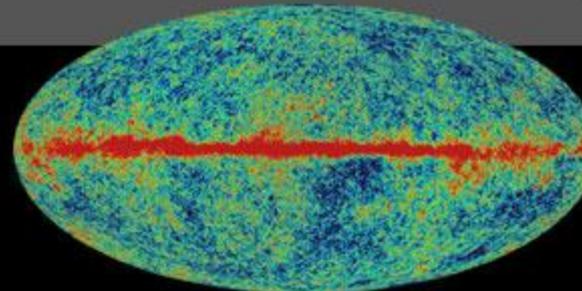
COBE



2003



WMAP



Formação dos átomos:
Recombinação

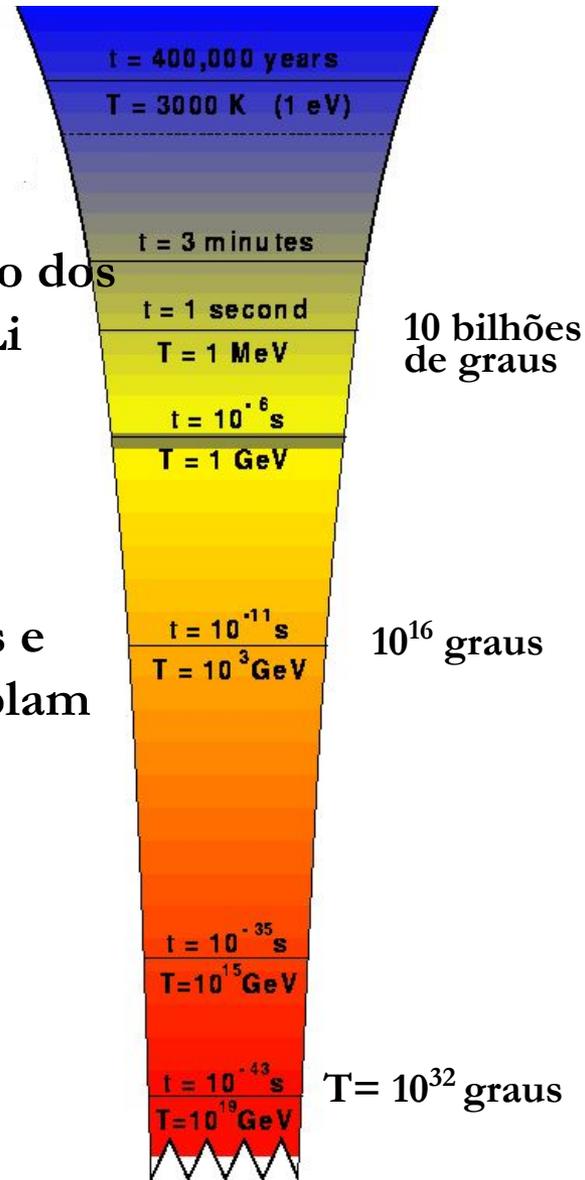
Nucleossíntese: Formação dos
elementos leves: D, He, Li

Formação de prótons e
neutrons

Forças eletromagnéticas e
nuclear fraca se desacoplam

Era da inflação

Era de Plank



Formação do sistema solar

Formação das galáxias

Formação dos átomos:
Recombinação

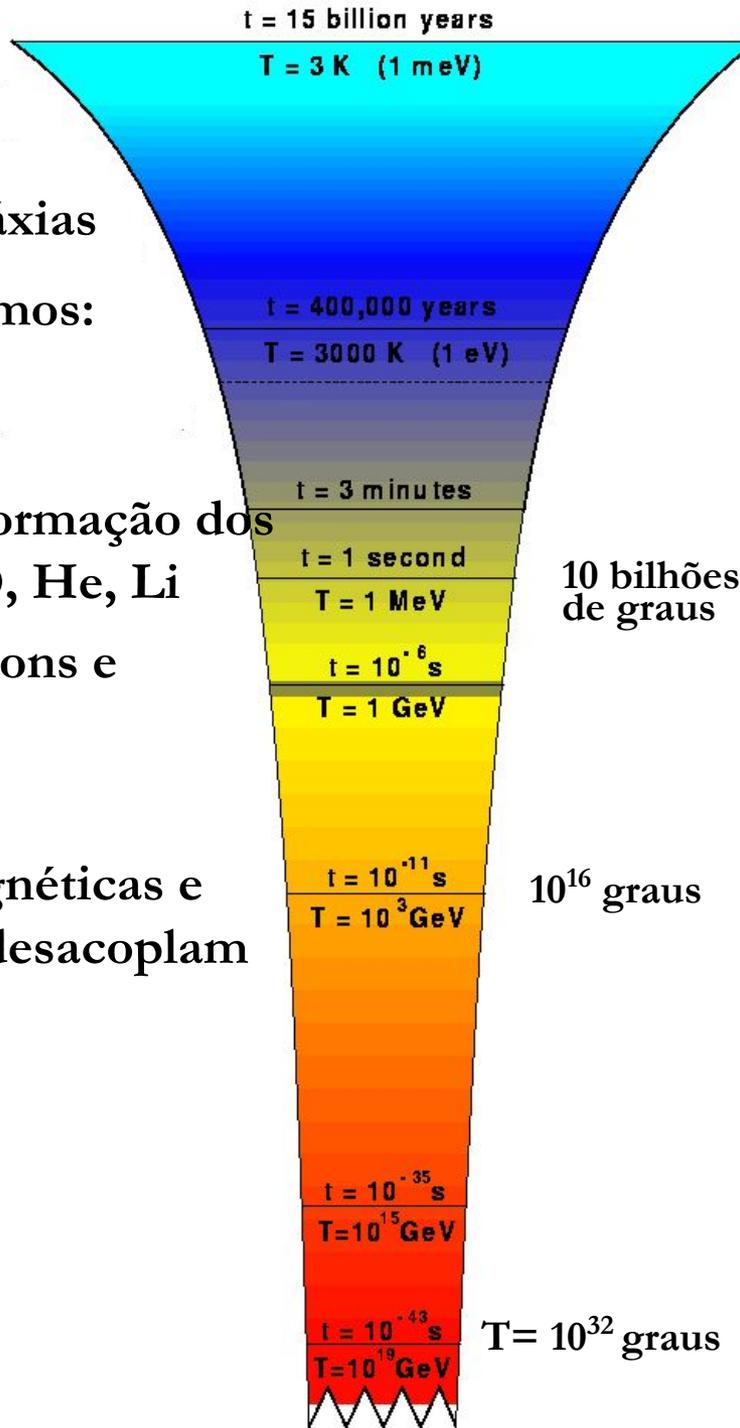
Nucleossíntese: Formação dos elementos leves: D, He, Li

Formação de prótons e neutrons

Forças eletromagnéticas e nuclear fraca se desacoplam

Era da inflação

Era de Plank

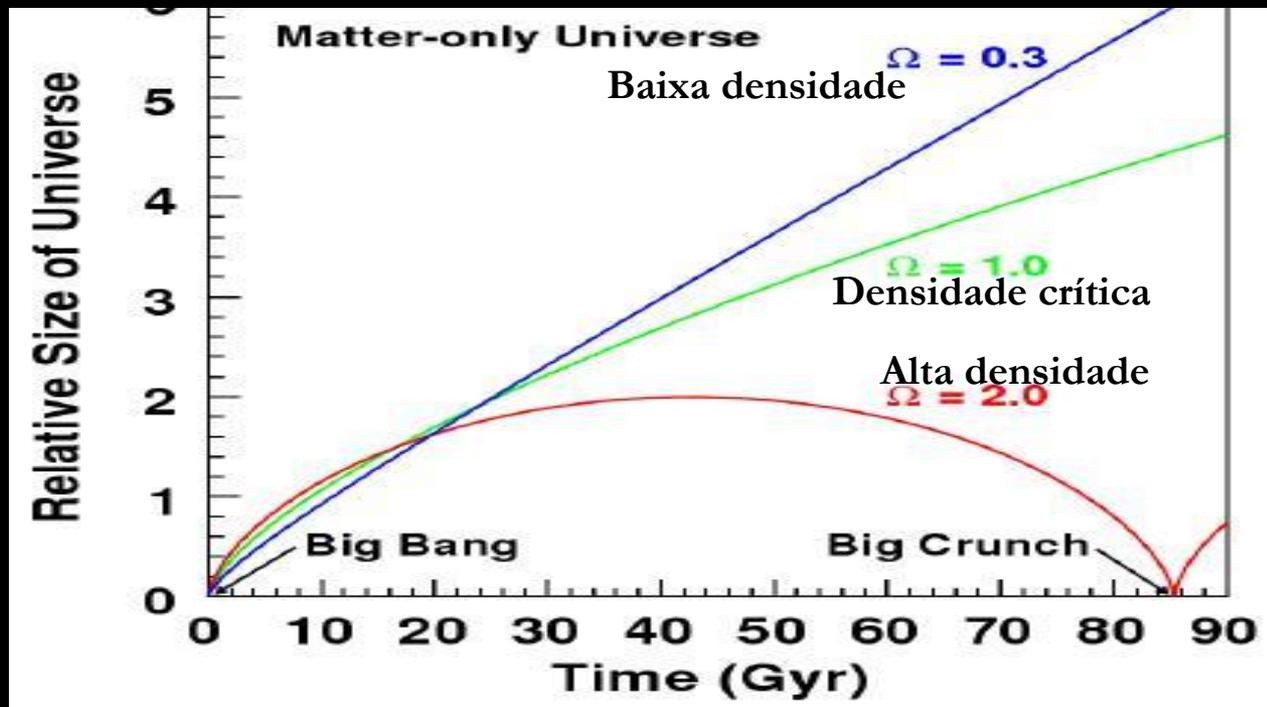


A dinâmica do Universo

Sabemos que Universo originou-se num Big-bang mas como ele evolui e qual será o seu destino ?

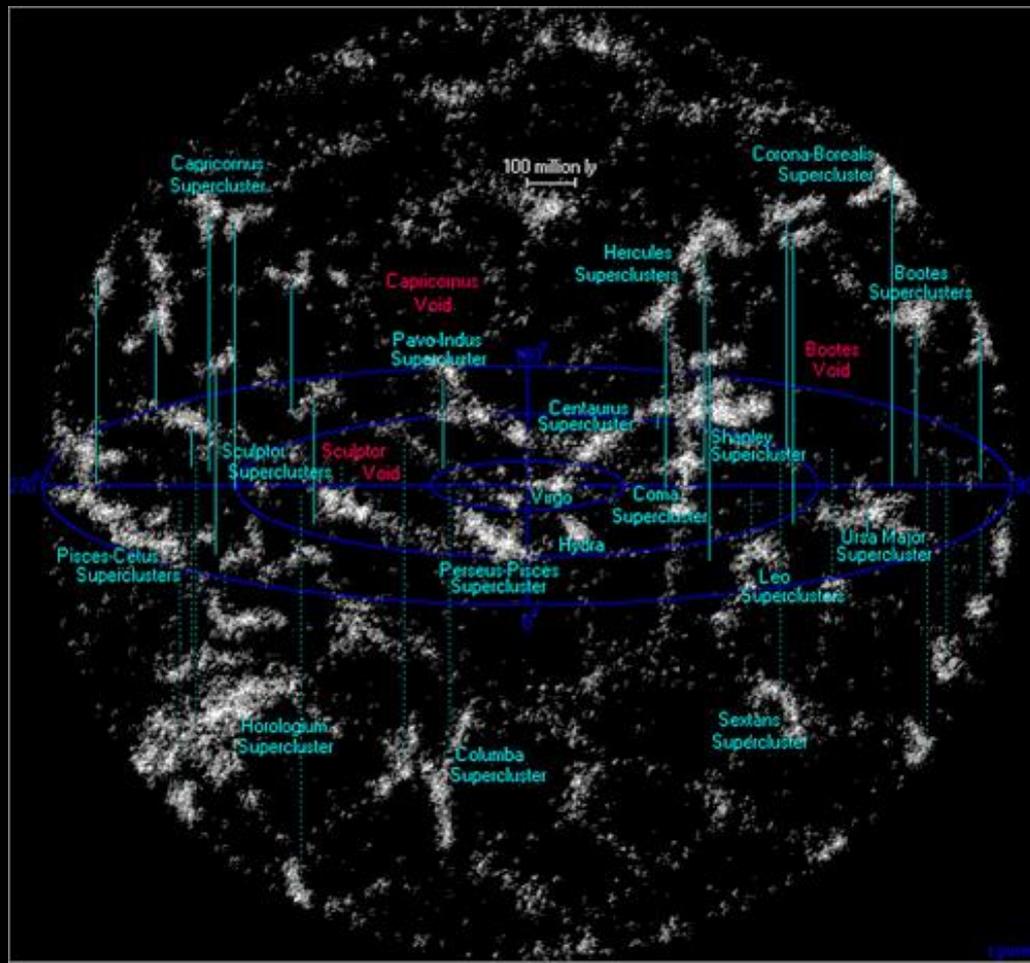
Segundo os modelos de Friedmann-Lamaître existem três opções que dependem da densidade de matéria do Universo

Para determinarmos o futuro do Universo é necessário determinar sua densidade total



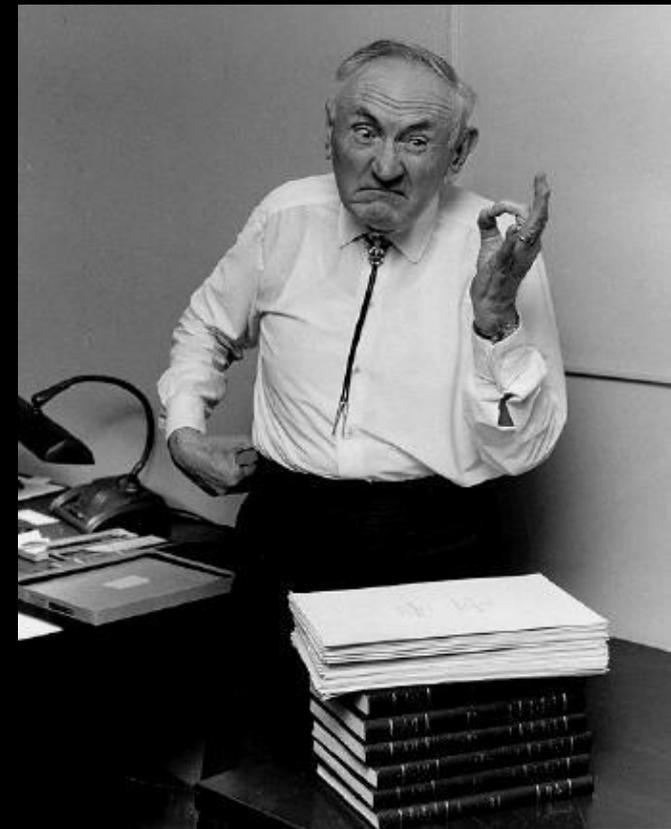
A densidade do Universo

O Universo é composto por diversas estruturas, desde galáxias de campo, que estão relativamente isoladas, até grupo e aglomerados de galáxias que pode conter centenas de galáxias



A densidade do Universo

Em 1933 Fritz Zwicky realiza o inventário de massa no aglomerado de Coma através dos *redshifts* das galáxias membro



A densidade do Universo

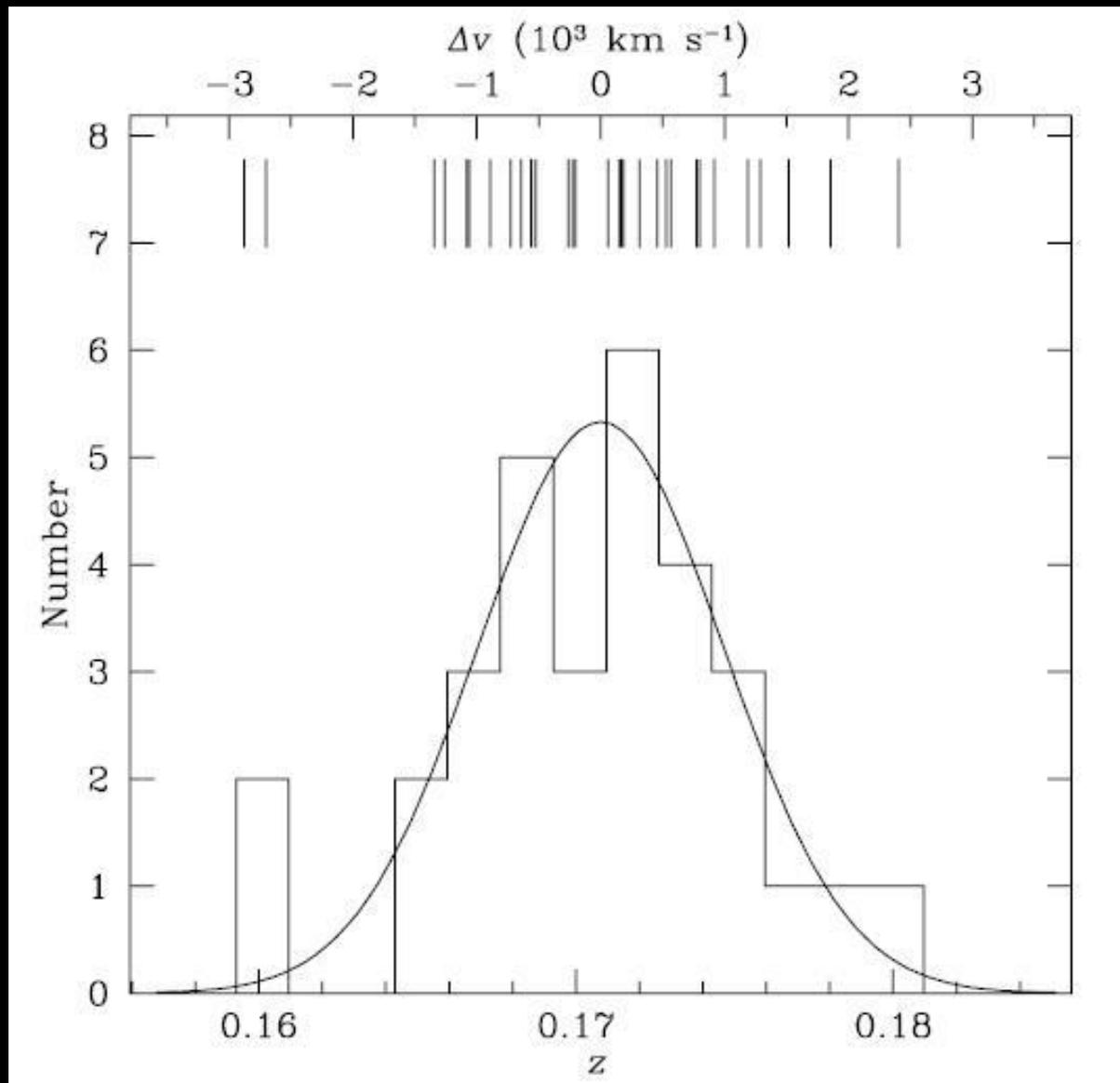
Em 1933 Fritz Zwicky realiza o inventário de massa no aglomerado de Coma através dos *redshifts* das galáxias membro

A média da velocidade das galáxias contém a informação da distância do aglomerado conforme a lei de Hubble

Por outro lado, se o aglomerado está em equilíbrio dinâmico a força da gravidade é contrabalançada pela dispersão das velocidades das galáxias membro

Desse modo, quanto maior a dispersão de velocidades maior será a massa gravitacional do aglomerado

A densidade do Universo

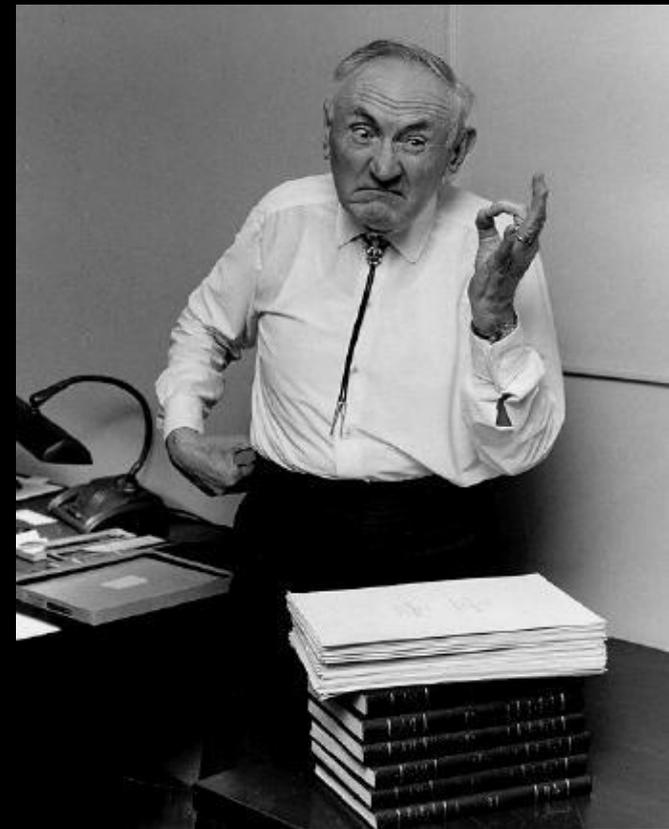


A densidade do Universo

Ao computar a massa gravitacional de Coma com a massa obtida somando todas as galáxias, Zwicky notou que a primeira excedia a segunda por um fator de 160

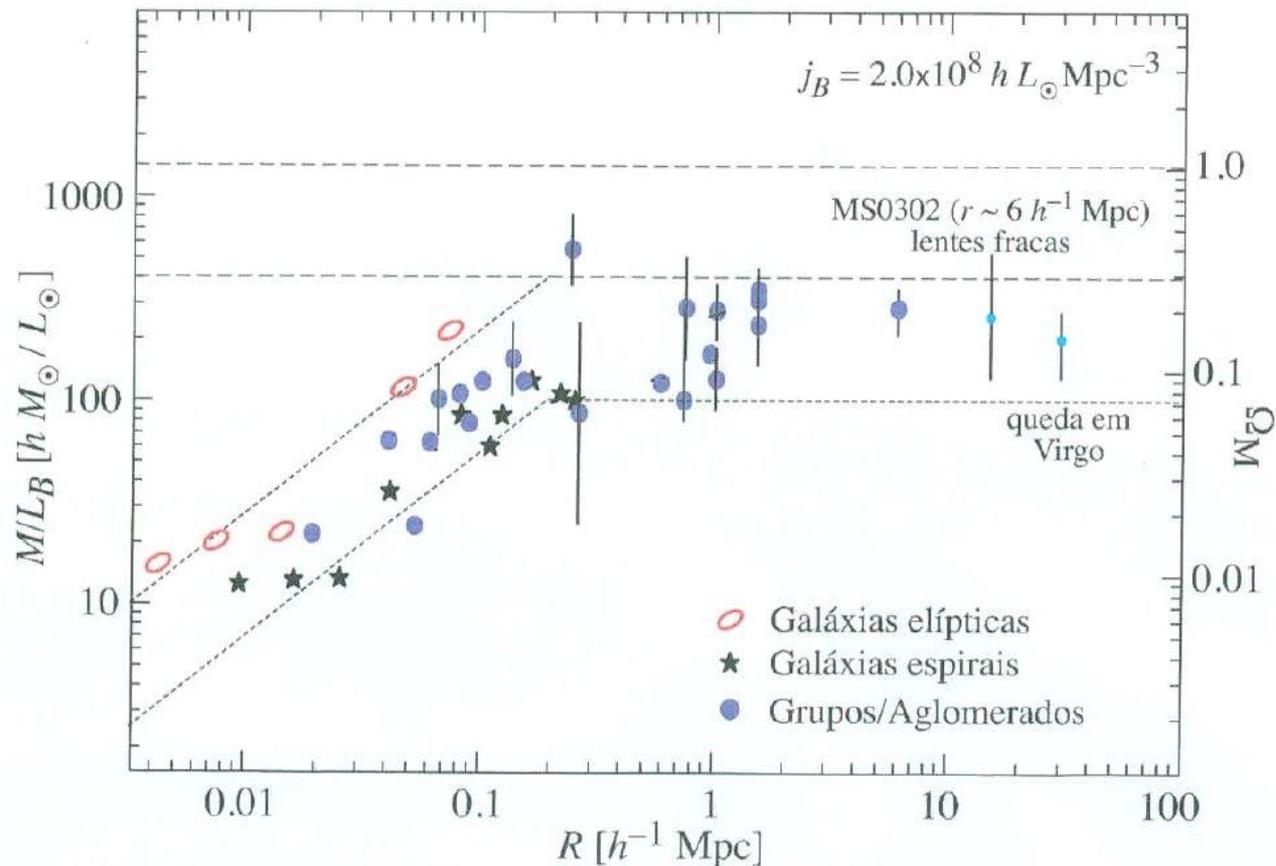
A essa diferença denominou-se “massa faltante” e posteriormente **Matéria Escura**

Posteriormente a matéria escura também foi detectada em galáxias e sistemas menores



A matéria escura

A razão massa/luminosidade foi medida para diversos sistemas e tudo leva a crer que o valor encontrado em aglomerados é representativo do Universo como um todo.



A matéria escura

As medidas mais recentes e precisas indicam que a densidade de matéria (luminosa+escura) no Universo é da ordem de 25-30% da densidade crítica.

A matéria escura

A densidade de matéria (luminosa+escura) no Universo é $\sim 25-30\%$ da densidade crítica.

Pelos dados da nucleossíntese primordial sabe-se que a densidade de bárions (matéria ordinária; átomos etc.) é de apenas 4% então a matéria escura deve ser composta de partículas cuja natureza desconhecemos

A natureza da matéria escura é um dos mais instigantes problemas em aberto da astrofísica contemporânea

A matéria escura

Tomando então a densidade de luz do Universo e multiplicando pela razão massa/luminosidade encontrada em aglomerados chega-se que **a densidade de matéria (luminosa+escura) no Universo é da ordem de 25-30% da densidade crítica.**

Por outro lado expectativas teóricas (teoria da inflação) indicavam que a densidade total deveria ser igual à densidade crítica

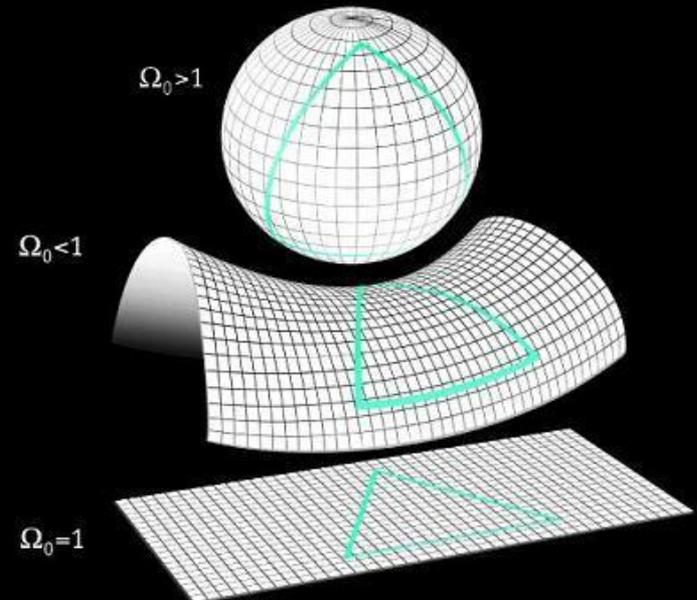
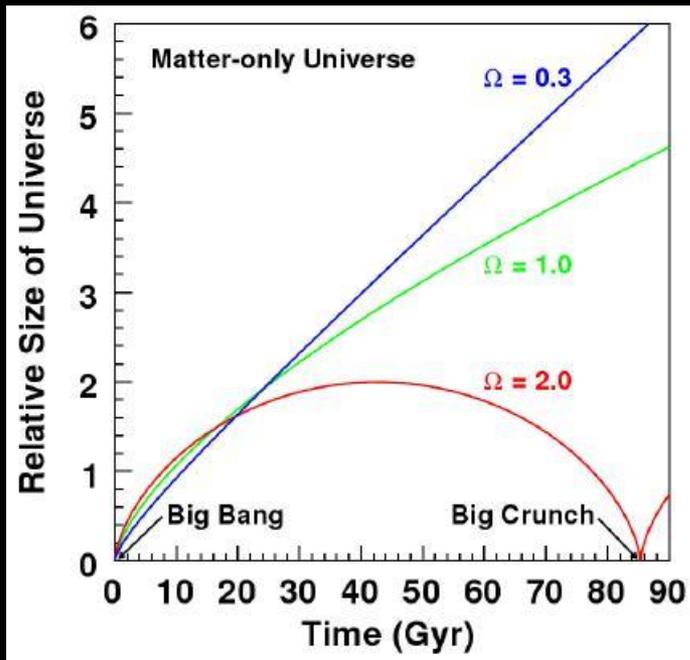
Ademais caso o valor da densidade fosse diferente da crítica ele deveria divergir rapidamente, então era difícil explicar o porque do valor ser tão próximo da unidade: *Problema do ajuste fino*

A geometria do Universo

No final do século XX procurava-se refinar ainda mais o valor da densidade do Universo.

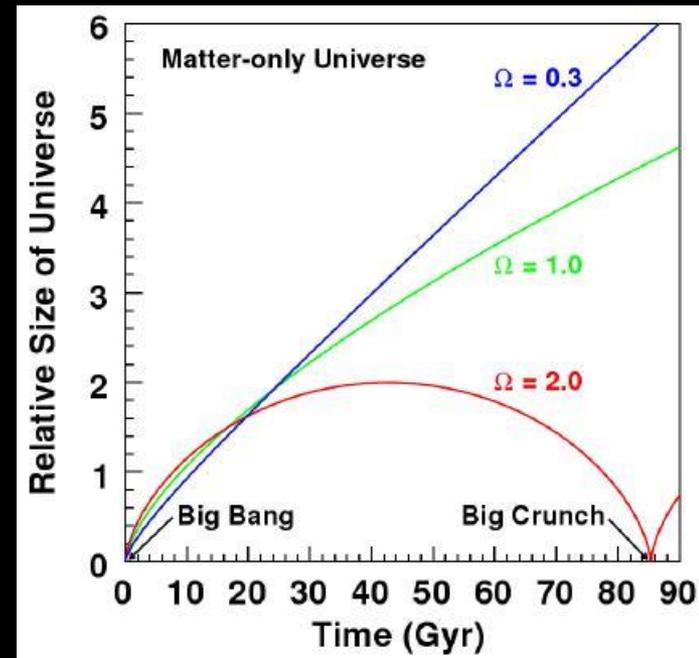
Entretanto, ao invés de usar a propriedade gravitacional da massa para determinar a densidade do Universo tentava-se determinar a sua geometria

Na teoria da relatividade geral, geometria e gravitação estão intimamente ligados e no caso da cosmologia cada modelo de Friedmann-Lemaître corresponde a uma alternativa



A dinâmica do Universo

Uma das maneiras de testar a dinâmica do Universo é medir a variação do brilho (ou tamanho) de um objeto conhecido como função da sua velocidade de recessão cosmológica (*i.e.* seu *redshift*)



Para isso é necessário encontrar uma vela padrão (ou régua padrão) que seja observável a grandes distâncias (as cefeidas não são brilhantes o suficiente)

A melhor alternativa encontrada foram as Supernovas do tipo Ia

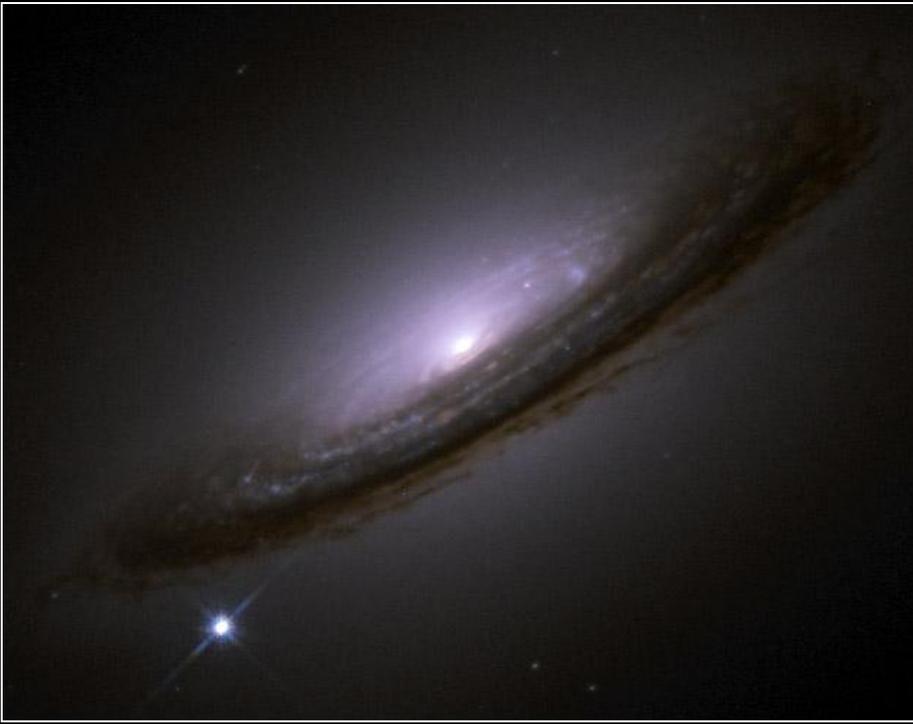
A dinâmica do Universo

As supernovas tipo Ia são, provavelmente, anãs brancas que acretam matéria de uma companheira até alcançarem o limite de Chandrasekhar, o que desencadeia uma forte explosão

Durante a explosão a SN pode tornar-se tão brilhante quanto a própria galáxia hospedeira



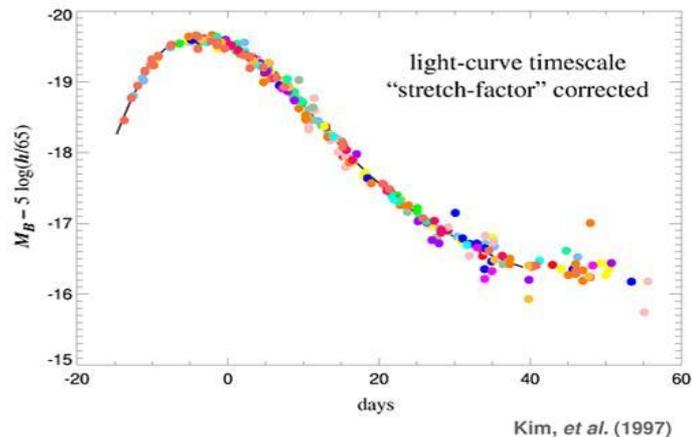
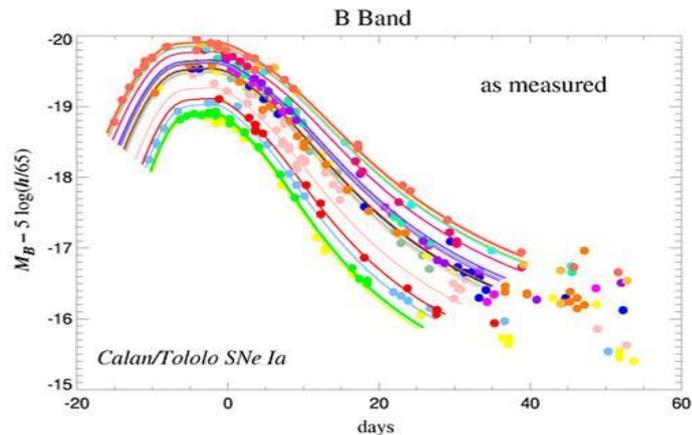
As SN Ia também são velas padrão (padronizáveis de fato)



A dinâmica do Universo

Devido a sua natureza as SN Ia tem massas semelhantes ao explodir (massa de Chandrasekhar) e, portanto, o brilho máximo que atingem é semelhante.

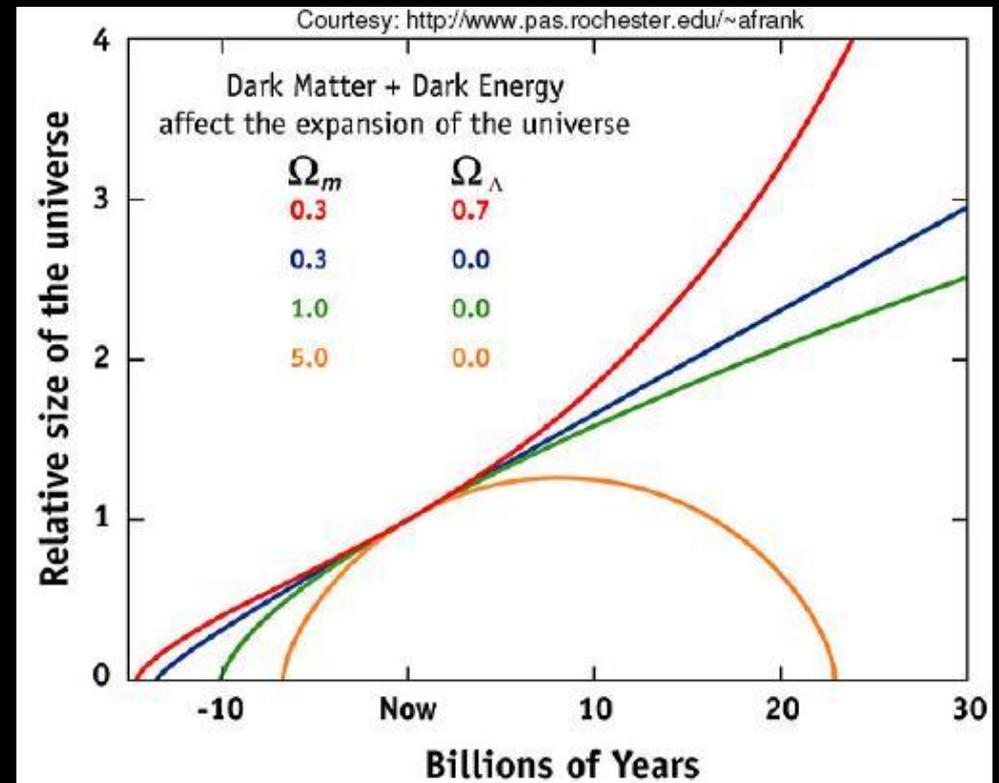
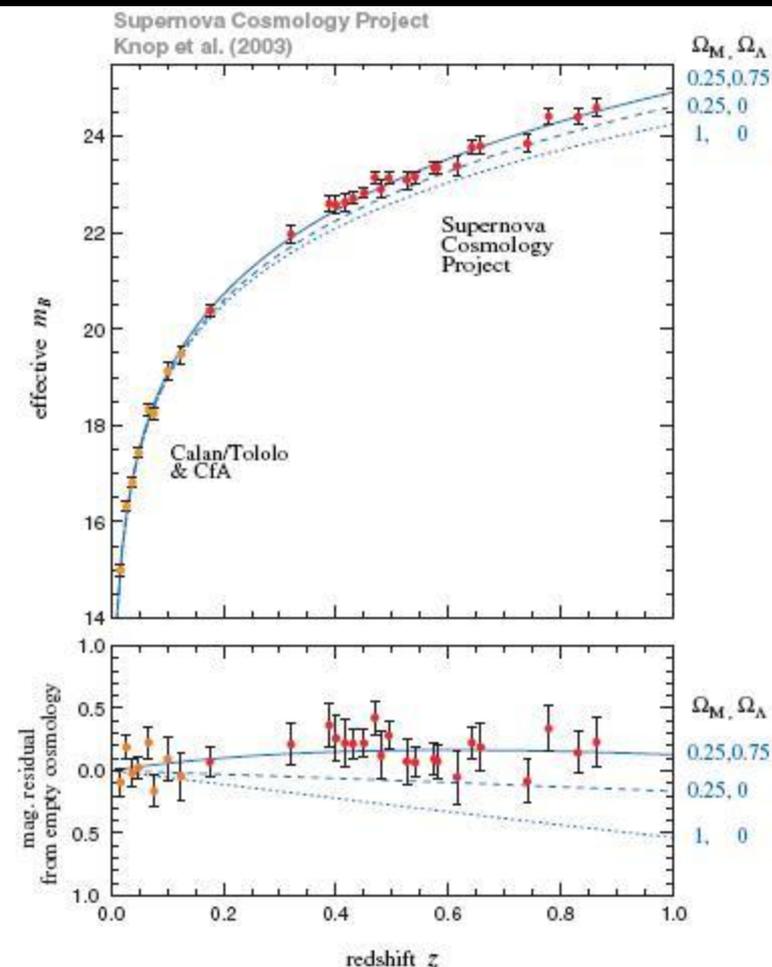
Em 1990 Phillips descobriu uma relação entre o tempo que a SN Ia leva para esmaecer e sua luminosidade máxima tornando possível, então, o seu uso como velas padrão



A dinâmica do Universo

Os primeiros estudos com SN Ia em altos *redshifts* foram publicados em 1998-1998 (Riess et al. e Perlmutter et al.) e chegaram ambos a uma conclusão surpreendente:

O Universo está acelerando sua expansão!



A energia escura

Os modelos de Friedmann-Lamître sempre predizem uma desaceleração do Universo porque este está dominado pela força da Gravitação, que é atrativa.

Para explicar como o Universo pode estar acelerando sua expansão é necessário introduzir uma nova componente que tenha uma pressão negativa.

A essa nova componente chamou-se de **Energia Escura**



The Nobel Prize in Physics 2011

Saul Perlmutter, Brian P. Schmidt, Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011

Nobel Prize Award Ceremony

Saul Perlmutter

Brian P. Schmidt

Adam G. Riess



Photo: U. Montan

Saul Perlmutter



Photo: U. Montan

Brian P. Schmidt



Photo: U. Montan

Adam G. Riess

The Nobel Prize in Physics 2011 was divided, one half awarded to Saul Perlmutter, the other half jointly to Brian P. Schmidt and Adam G. Riess "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae".

ember 1998

e

12 No. 5397
2141-2336 \$7



A descoberta
foi o grande
astronômico
século XX

A energia escura

A descoberta da energia escura foi o grande evento científico da astronomia na última década do século XX

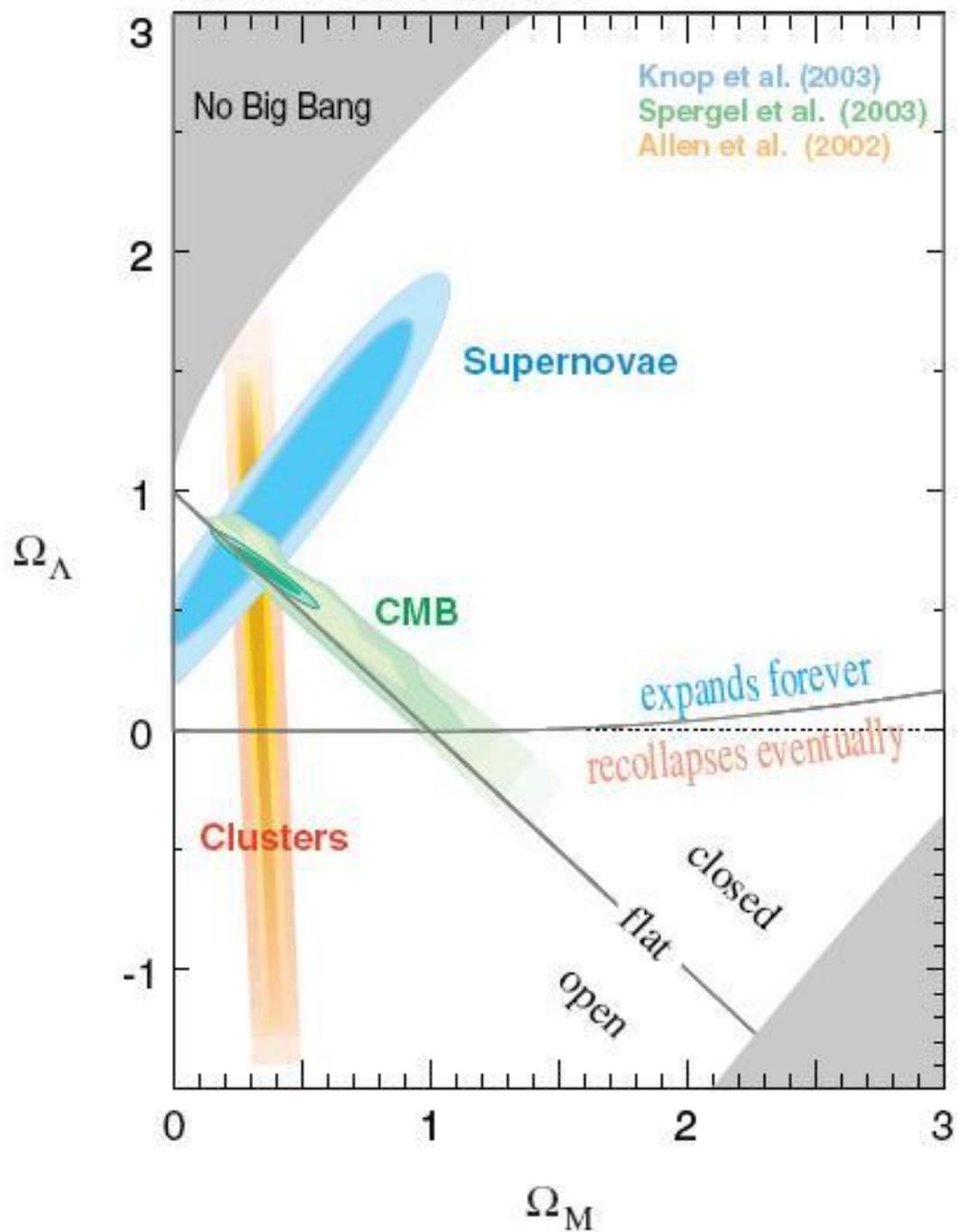
A energia escura

Quase nada se conhece a respeito da natureza da energia escura.

Especula-se que ela pode estar associada a uma energia do vácuo constante (simulando assim o efeito de uma constante cosmológica) ou que varia com o tempo (modelo conhecido como quintessência)

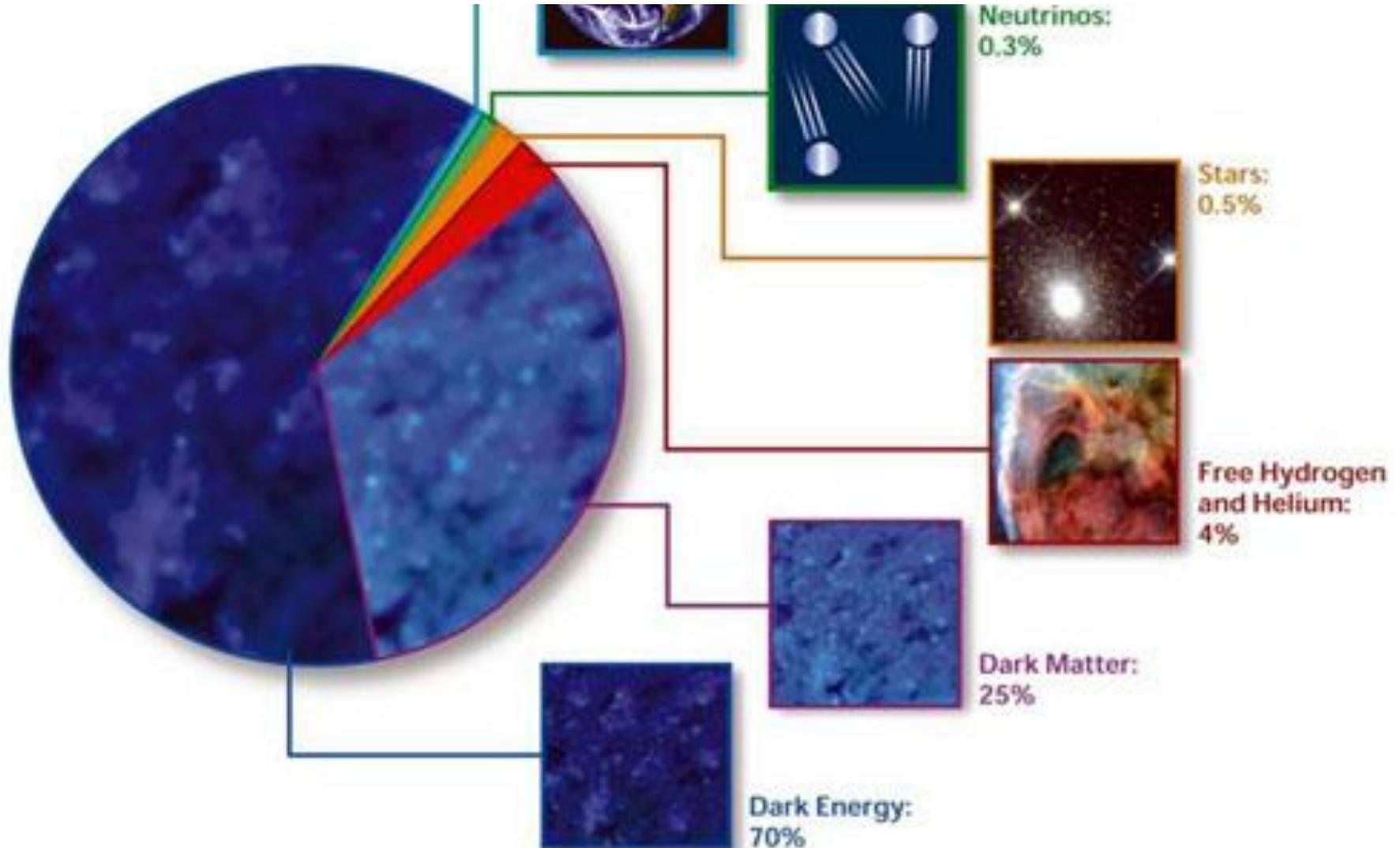
Ironicamente, apesar de não conhecermos quase nada a respeito da natureza da energia escura, podemos determinar sua contribuição para a densidade total do Universo de modo preciso.

Supernova Cosmology Project



COMPOSITION OF THE COSMOS

Em suma, nós apenas conhecemos a natureza de cerca de 5% do Universo



O futuro do Universo

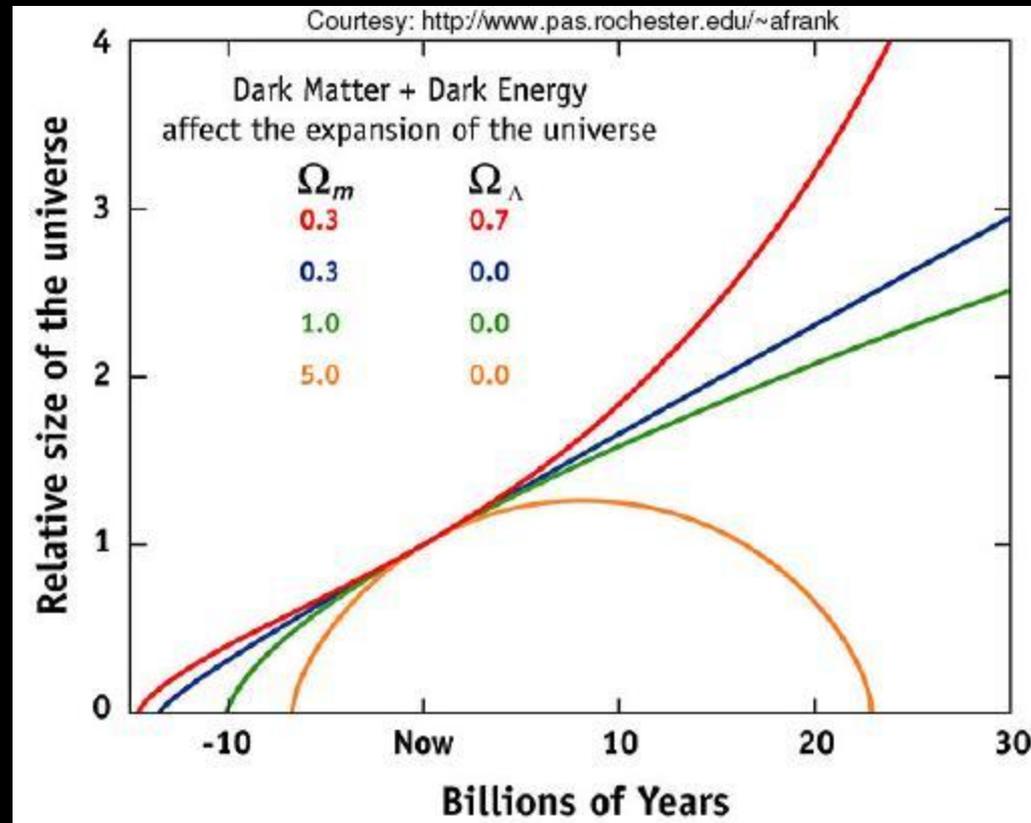
Big Freeze:

Eventualmente todas as fontes de energia se esgotam e o universo se torna totalmente frio

Big Rip:

Em certos modelos a energia escura pode se tornar tão intensa de modo a superar todas as demais forças e portanto acabar por destruir todo tipo de partícula existente no Universo

Expansão eterna



O futuro da cosmologia

A cosmologia é um campo em franco crescimento dentro da astronomia

Projetos de vários milhões de dolares estão sendo implementados/projetados para determinar a natureza da energia escura a partir do estudo da geometria do Universo, da radiação cósmica de fundo e da taxa de crescimento de suas estruturas.

A maioria desses projetos implica no imageamento de frações enormes do céu em diversos comprimentos de onda e/ou espectroscopia de milhões de galáxias do solo e do espaço

Esses projetos deixarão, portanto, um legado inestimável para todas as áreas da astronomia

O futuro da cosmologia

**Seguramente com essa avalanche de
novos dados novas surpresas nos
aguardam !**