

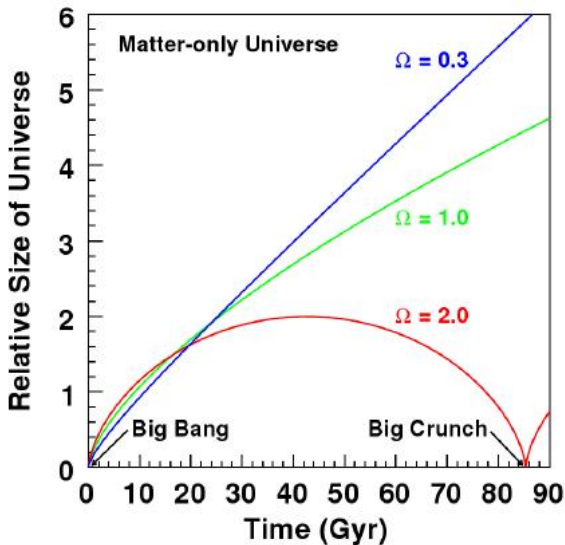
Supernovas e a Energia Escura

Eduardo Cypriano & Laerte Sodré Jr.

October 18, 2013

A cosmologia pré 1998

- Cosmologia Friedmann-Robertson-Walker



A cosmologia pré 1998

- ▶ modelo inflacionário:
 - ▶ Resolve o problema do horizonte
 - ▶ Cria naturalmente flutuações primordiais
 - ▶ Prevê Universo plano: $\Omega = 1$
- ▶ Evidências observacionais: $\Omega_M = 0.2 - 0.3$
- ▶ Alguns problemas do “modelo padrão” se $\Omega_M = 1$:
 - ▶ Problema da idade do Universo: mais jovem que alguns aglomerados globulares
 - ▶ Excesso de estruturas em “grandes” escalas ($l > 10h^{-1}$ Mpc; e.g. Efstathiou, Sutherland & Maddox 1990)
- ▶ 1998: observações de SN Ia sugerem que o Universo é dominado por uma “constante cosmológica”

Supernovas tipo Ia

- ▶ Determinação de parâmetros cosmológicos através da distância de luminosidade (diagrama de Hubble):
 $d_I = d_I(z, \Omega_M, \Omega_\Lambda)$
- ▶ Supernovas de tipo Ia são a melhor vela padrão conhecida
- ▶ Para determinar parâmetros cosmológicos a partir do diagrama de Hubble é necessário o uso de uma vela padrão que pode ser observada até grandes distâncias.
- ▶ Módulo de distância:

$$\mu(z) \equiv m - M = 5 \log(d_I/10pc) + K(z) + A$$

- ▶ se $\mathcal{M} = M + K(z) + A$,

$$m = 5 \log[d_I(pc)/10pc] + \mathcal{M} = 5 \log[d_I(Mpc)] + 25 + \mathcal{M}$$

onde \mathcal{M} é determinado apenas com objetos locais (“âncoras”)

Supernovas tipo Ia

Classification of Supernovae				
Type	Ia	Ib	Ic	II
Spectrum	No Hydrogen			Hydrogen
	Silicon	No Silicon		
		Helium	No Helium	
Physical mechanism	Nuclear explosion of low mass star	Core collapse of evolved massive star (may have lost its hydrogen or even helium envelope during red-giant evolution)		
Light curve	Reproducible	Large Variations		
Neutrinos	Insignificant	~ 100 × Visible energy		
Compact Remnant	None	Neutron star (typically appears as pulsar) Sometimes black hole ?		
Rate/h ² SNU	0.36 ± 0.11	0.14 ± 0.07		0.71 ± 0.34
Observed	Total ~ 2000 as of today (nowadays ~200/year)			

Georg Kattelt, Max-Planck-Institut für Physik (München)

Supernovas tipo Ia



SN1994d. SNe Ia podem ser tão brilhantes quanto galáxias inteiras:
 $M_B \sim -19.5$ mag.

Supernovas tipo Ia

- ▶ O modelo mais aceito para explicar a natureza das SNe Ia supõe que elas são anãs brancas com carbono e oxigênio que atingem o limite de Chandrasekhar por acréscimo de matéria de uma estrela companheira.
- ▶ Suas curvas de luz são sustentadas pela energia gerada pelo decaimento radioativo do ^{56}Ni (instantes iniciais) e ^{56}Co (depois de umas semanas). Desse modo a luminosidade do pico depende da quantidade de ^{56}Ni gerado
- ▶ Em uma SNe Ia que se consome totalmente espera-se que sejam gerados $\sim 0.6M_{\odot}$ de ^{56}Ni
- ▶ Por essa razão espera-se que SNe Ia tenham luminosidades de pico semelhantes.

Supernovas tipo Ia

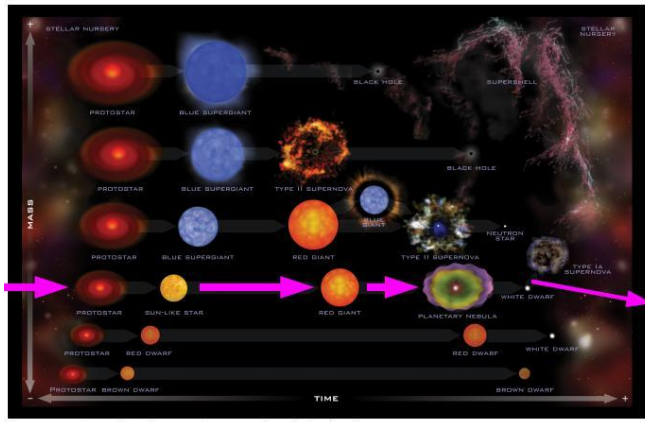
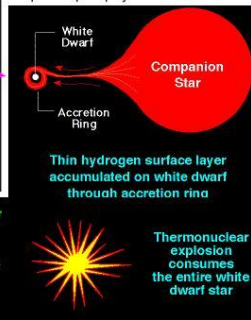


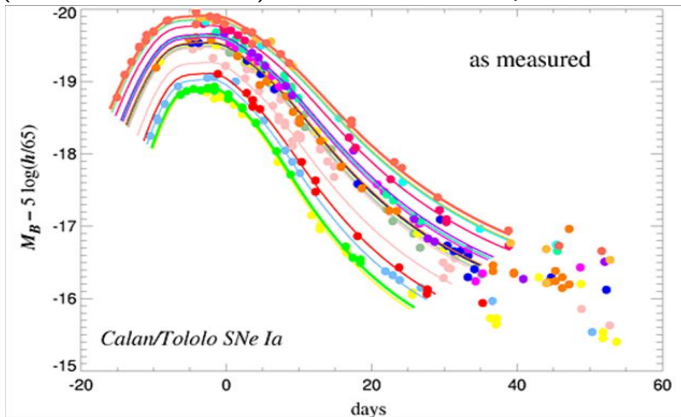
Image courtesy <http://www.siprep.org/faculty/aokeefe>

Figure courtesy
<http://csep10.phys.utk.edu/astr162>



Supernovas tipo Ia

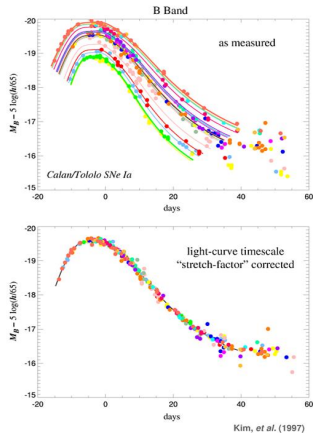
- Mas existe uma variação de 1 magnitude (2.5 em luminosidade) na luminosidade de pico das SNe Ia



Supernovas tipo Ia

- ▶ Phillipps (1993) demonstra que é possível padronizar SNe Ia: Supernovas menos brilhantes decaem mais rapidamente
- ▶ Supernovas (intrinsecamente) menos brilhantes são mais vermelhas. Provê um método para determinar o avermelhamento e portanto a extinção (A).
- ▶ Riess, Press & Kirshner (1996): *Multicolor light curve shapes* (MLCS) - Padroniza SN Ia baseado nas cores e curvas de luz - Método usa uma amostra de treino: SN Ia próximas com distâncias determinadas de modo independente e curvas de luz muito bem amostradas- as âncoras

Supernovas tipo Ia



Após a correção o espalhamento da magnitude do pico diminui para 0.15 mag

Supernovas tipo Ia

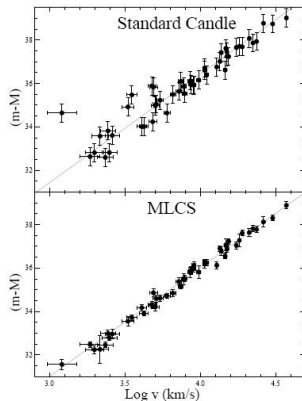


Figure: Hubble diagrams for SNe Ia (Riess et al. 96) with velocities (km s^{-1}) in the COBE rest frame on the Cepheid distance scale. The ordinate shows distance modulus, $m - M$ (mag). Top: The objects are assumed to be standard candles and there is no correction for extinction; the result is $\sigma = 0.42 \text{ mag}$ and $H_0 = 58 \pm 8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Bottom: The same objects, after correction for reddening and intrinsic differences in luminosity. The result is $\sigma = 0.15 \text{ mag}$ and $H_0 = 65 \pm 2$ (statistical) $\text{km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, subject to changes in the zero-point of the Cepheid distance scale. (Indeed, the latest results with SNe Ia favor $H_0 = 72 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$)

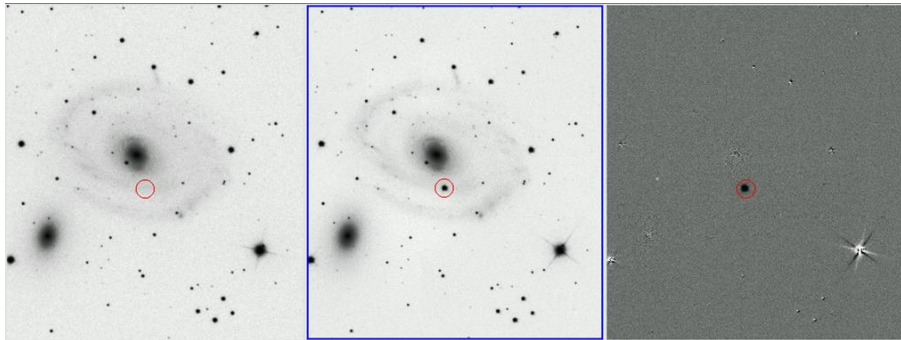
Buscas por supernovas Ia

Com base nessas conclusões foram organizadas várias buscas por Supernovas tipo Ia (e.g. High-Z Supernova Search Team, Supernova Cosmology Project)

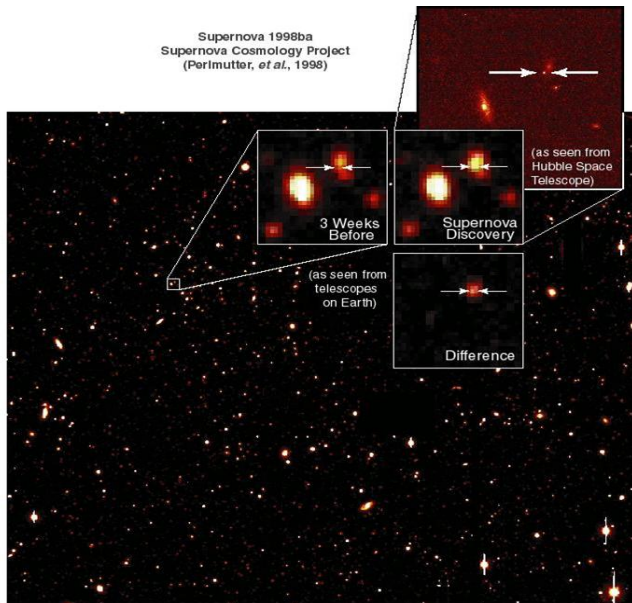
Metodologia para descoberta sistemática de SNe em altos (0.5-1.0) *redshifts*

1. Próximo ao período da Lua nova são tomados pares de imagens de regiões equatoriais com alta latitude galactica (primeira época; ~ 10 min. num telescópio de 4m.)
2. Outros pares de imagens das mesmas regiões são tomados 3-4 semanas depois (segunda época; os pares permitem a remoção de raios cósmicos e objetos do sistema solar).
3. SNe são identificadas através da subtração das imagens de segunda pelas de primeira época

Buscas por supernovas Ia



Buscas por supernovas Ia

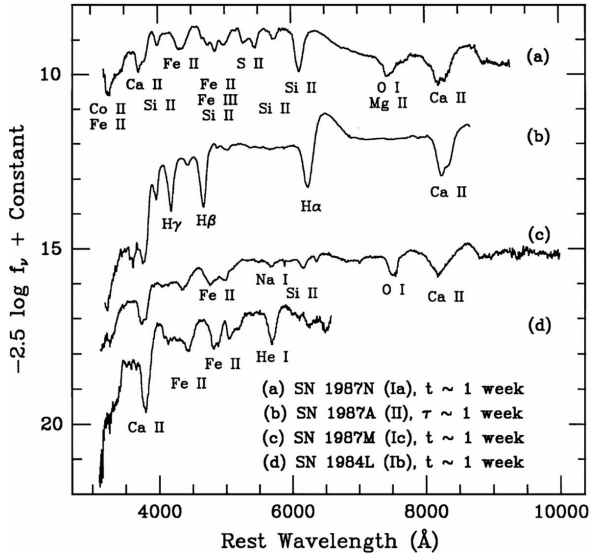


4. Espectroscopia

- ▶ confirmação do tipo de SNe
- ▶ determinação do *redshift*
- ▶ auxílio na determinação da idade da SNe Ia

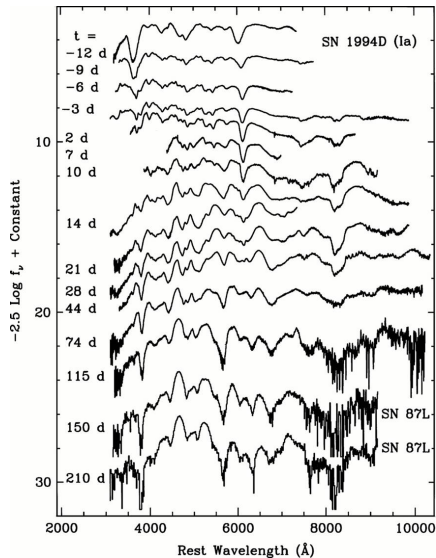
5. Fotometria intensiva em vários filtros

Buscas por Supernovas Ia



Espectro dos diversos tipo de supernovas

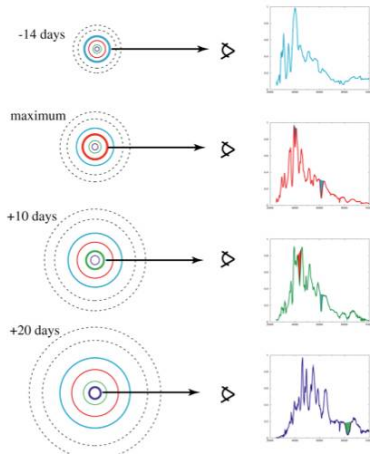
Buscas por Supernovas Ia



Espectros de SNe Ia em sucessivas épocas

Buscas por Supernovas Ia

The Time Series of Spectra is a “CAT Scan” of the Supernova



Estrutura química em camadas fornece pistas sobre a física da explosão da SNe Ia

Buscas por supernovas Ia

- ▶ De posse do *redshift* e para cada filtro usado na observação calcula-se a correção-K:

$$\mu(z) \equiv m - M = 5 \log (d_I/10pc) + K(z) + A$$

- ▶ A correção-K leva em consideração que devido ao *redshift* da SNe os fótons que são detectados dentro de uma certa banda fotométrica foram emitidos em regiões espectrais mais azuis



$$K(z) = M(z) - M(0) = 2.5 \log \frac{\int f(\lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int f(\frac{\lambda}{1+z}) R(\lambda) d\lambda} + 2.5 \log (1+z)$$

onde $f(\lambda)$ é o fluxo do objeto astronômico e $R(\lambda)$ a curva de resposta do filtro.

Buscas por supernovas Ia

- Por fim, de posse do *redshift* a curva de luz é corrigida pelo fator de dilatação do tempo cosmológico:

$$\Delta t_{obs} = \Delta t_e \times (1 + z)$$

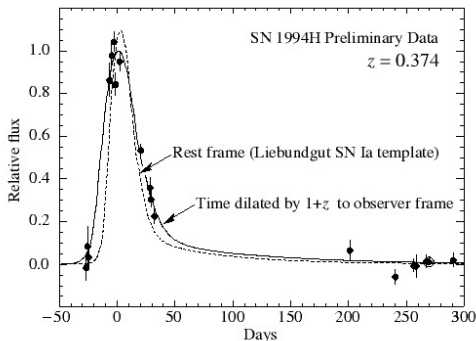
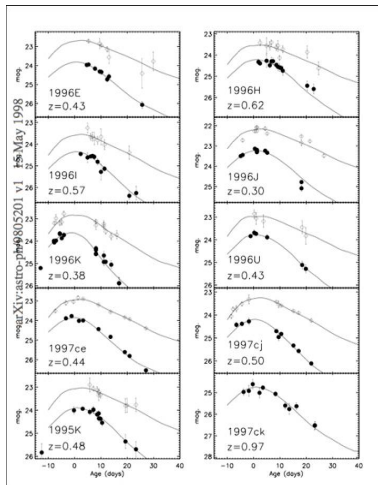


Figure 1. The best fit light curves for SN94H, under the hypothesis $d = 1$ dashed curve, and $d = 1 + z$, solid curve, where $z = 0.374$. The open circle corresponds to the reference image used.

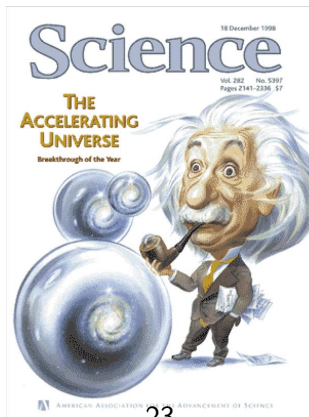
Buscas por Supernovas Ia



Exemplo de curvas de luz de SNe Ia após as correções-K e por dilatação do tempo

Descoberta da energia escura

Em 1998 Riess et al. (High-z Supernova Search Team) e em 1999 Perlmutter et al. (Supernova Cosmology Project) publicam seus diagramas de Hubble baseados em SNe Ia e ambos os grupos chegam a mesma conclusão: as SN Ia em altos redshifts são menos brilhantes do que o previsto por modelos FRW, o que pode ser explicado se **o Universo estiver acelerando sua expansão**



Descoberta da energia escura

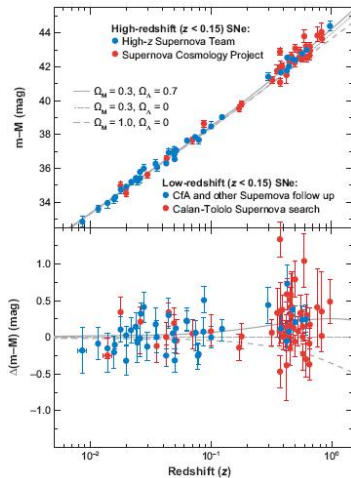


Diagram de Hubble de SNe Ia: Dados do descobrimento da energia escura

Descoberta da energia escura

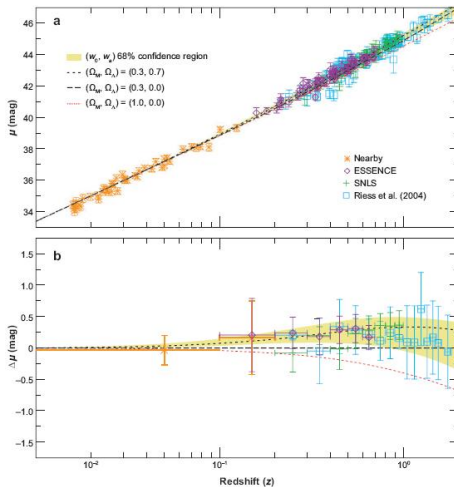
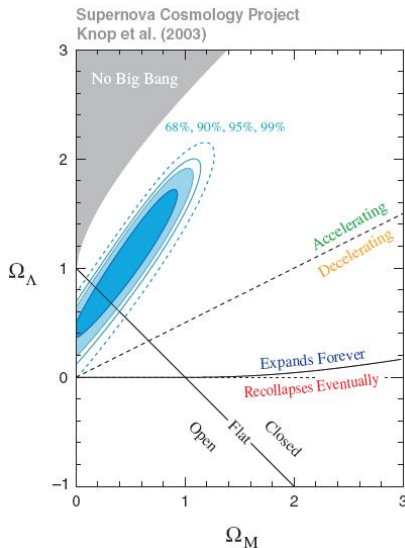


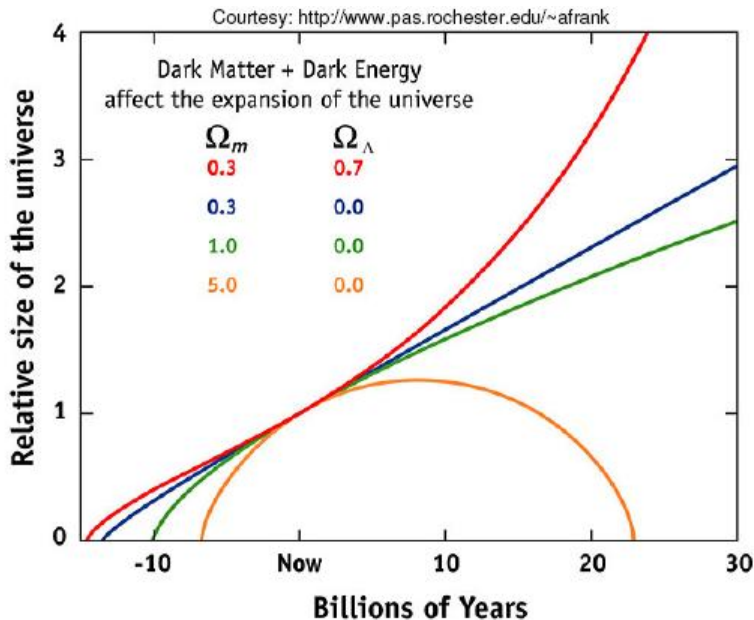
Diagram de Hubble de SNe Ia: Dados mais recentes

Descoberta da energia escura



Contornos de verossimilhança

Descoberta da energia escura



Descoberta da energia escura

Poderia a diminuição do brilho das SNe Ia ser devido a uma poeira cinza (absorve a luz mas não causa avermelhamento no óptico) ?

- ▶ Pró: Grãos grandes ($> 0.1\mu m$) ejetados no meio intergaláctico surtiriam o efeito desejado
- ▶ Contra: Um aumento na dispersão da magnitude do pico não é observado
- ▶ Contra: As cores das SNe Ia não evoluem com z
- ▶ Contra: Os grãos deveriam reirradiar no infra-vermelho distante. Isso não é detectado
- ▶ Contra: Exacerbação do efeito com z não é notado.

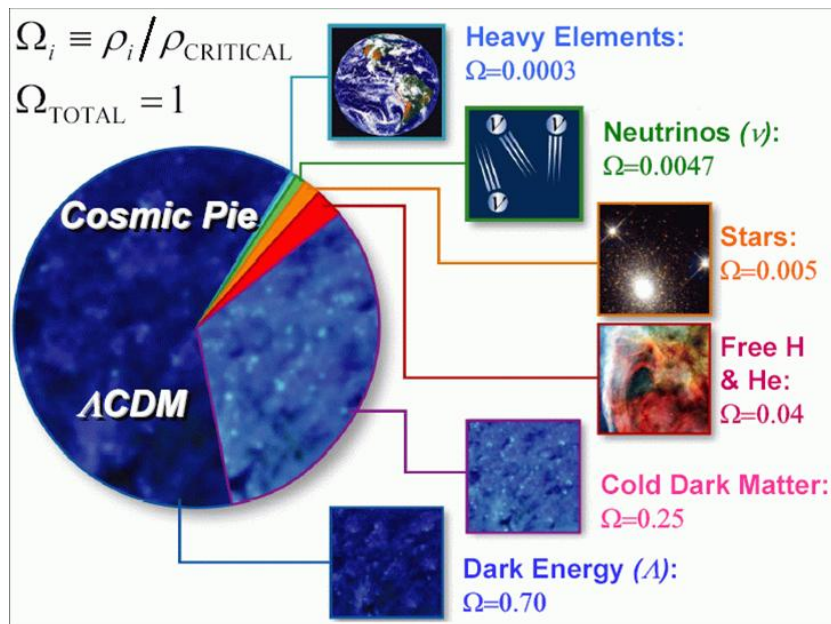
Descoberta da energia escura

- ▶ A componente exótica que seria responsável pela aceleração do Universo foi nomeada de **Energia Escura**
- ▶ Essa componente deve possuir pressão negativa
- ▶ Equação de estado da energia escura:

$$\omega_{DE} = p_{DE}/\rho_{DE}$$

- ▶ Se $\omega = -1$ então a energia escura se comporta como uma constante cosmológica.
- ▶ A energia escura reconciliou o Universo plano da teoria da inflação com as medidas de densidade de massa subcríticas e resolveu o problema da idade do Universo.

Descoberta da energia escura



1. Quanto um erro em magnitude, δM , corresponde em distância? Examine os erros relativos em distância esperados para as SNe Ia.
2. Compare a idade do universo em um universo aberto só com matéria com a de um de curvatura nula com matéria e energia escura.