

宇宙のダークエネルギー

東京大学 大学院理学系研究科物理学専攻

須藤 靖

高エネルギー宇宙物理連絡会 第5回研究会
「高エネルギー天体物理学の新展開」

2004年10月1日 東京都立大学

宇宙定数の歴史

- 1916年：一般相対論
- 1917年：アインシュタインの静的宇宙モデル
- 1980年代以降：真空のエネルギー密度

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

宇宙定数 (時空の幾何学量)
移項
物質場 (真空のエネルギー密度?)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G \left(T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)$$

- 宇宙定数の自然な大きさ：プランク密度

$$\Lambda = \frac{c^5}{\hbar G} \approx 5.2 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3 \quad \Leftrightarrow \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \approx 10^{121}$$

- 観測的制限： $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$ 物理学史上最大の理論と観測の不一致！

ダークエネルギーの登場

- **理論と観測の120桁の違いを説明するには**
 - 宇宙論的観測の解釈がおかしく、やはり Ω_{Λ} の値は0
 - fine tuningを認める、あるいはそのようなモデルをでっちあげる
 - 人間原理に持ち込む
 - Λ は素粒子論的な起源をもつものではない
- アインシュタイン方程式の左辺にいる限り、エネルギー運動量保存則より、 Λ は定数しか許されない(宇宙定数)
- 一方、いったん、**右辺に移項してしまえば、定数である必然性はなくなる** (「時間変化する宇宙定数」 $\Lambda(t)$ 全くうけなかった)
- 超新星の観測によって、 Ω_{Λ} の値が0でない可能性が高くなると、単なる定数ではなく、宇宙を満たす物質の性質として特徴付けようという一般的な観点が格好よさげに見えてきた

ダークエネルギーと宇宙の状態方程式

■ 宇宙の状態方程式

- 圧力とエネルギー密度の比が w $p = w \rho$
- $w=0$: ダークマター、 $w=1/3$: 輻射、 $w=-1$: 宇宙定数
- 相対論では重力は

$$=4 \pi G (\rho + 3p) = 4 \pi G (1+3w) \rho \quad \text{なので}$$

$w < -1/3$ 万有斥力

- w が時間に依存しなければ $\dot{a}(t) = -3(w+1) a(t)$
- $-1 < w < 0$: (一般の)ダークエネルギー
- ここまでくると、 w が定数である理由すらなくなる

$$w = w(t)$$

ダークエネルギーとスカラー場

■ ダークエネルギーの最も簡単なモデル

$$L = -\frac{1}{2} g^{\mu\nu} \partial_{\mu} \phi \partial_{\nu} \phi - V(\phi)$$

$$\Rightarrow \rho_{\phi} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi), \quad p_{\phi} = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 - V(\phi)$$

普通は $w = -1$ となってしまうことに注意

■ 甦るエーテル？

■ quintessence (Paul Steinhardt):

- ギリシャの4元説(空気、土、火、水)に付け加える5番目

■ dark energy (Mike Turner)

- 実は「時間変化する宇宙定数」と同じものを指すのだが、しゃれた名前をつけることがしばしば物理そのものより重要である例

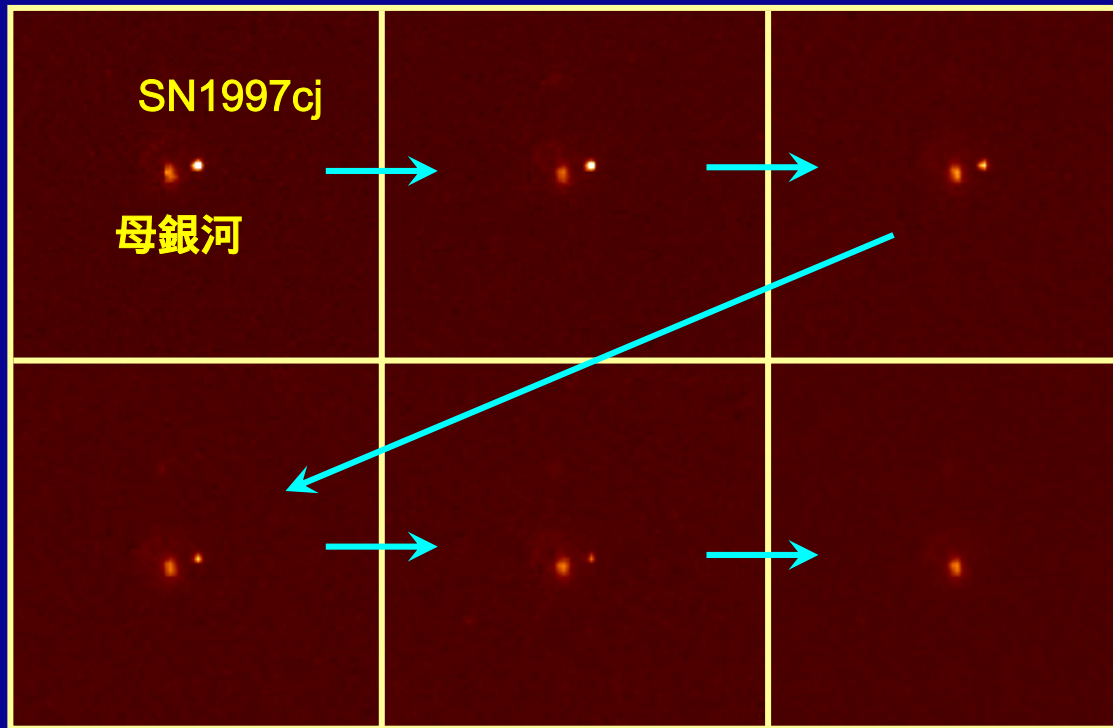
- このようにパラメータのとりうる範囲をいったん一般化しておきながら、観測的には $w = -1$ (宇宙定数) である、というのが現状でよく用いられるオチ

ダークエネルギー存在の観測的示唆

- 宇宙年齢(ハッブル定数) vs. 球状星団の年齢
- 審美眼期待
 - 宇宙の曲率は0であってほしい $\Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$
 - 宇宙の質量密度 $\Omega_m < 1$ $\Omega_\Lambda > 0$
- 遠方銀河のnumber count (N-m relation)
- Ia型超新星のハッブル図 (m-z relation)
- CMB温度ゆらぎスペクトル

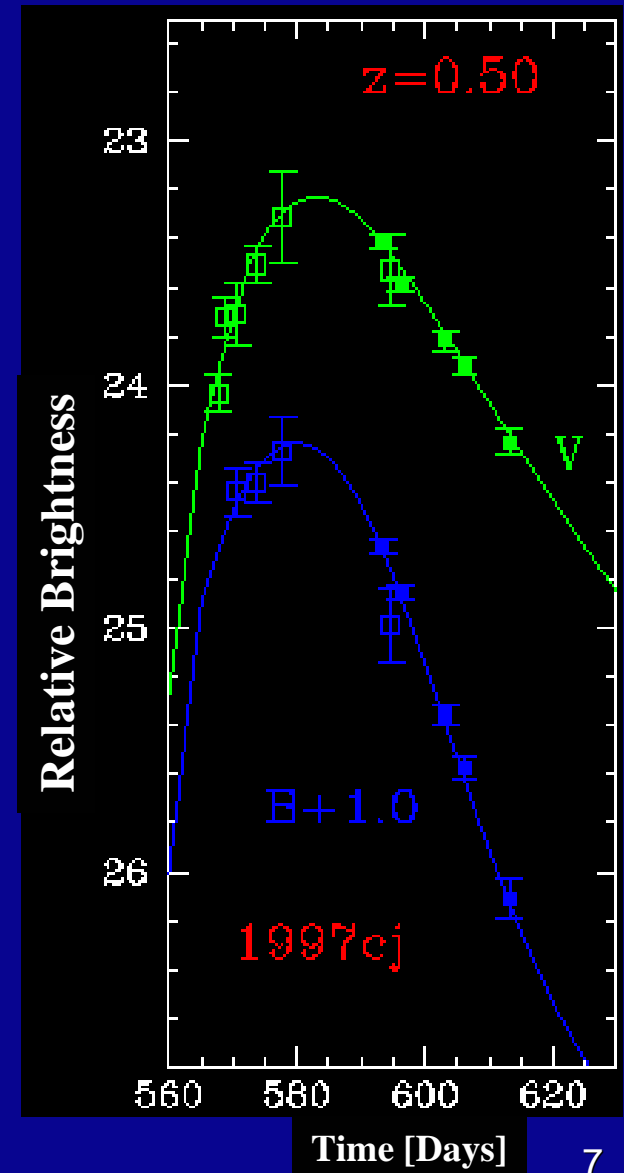
Ia型超新星の光度曲線の測定

- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる

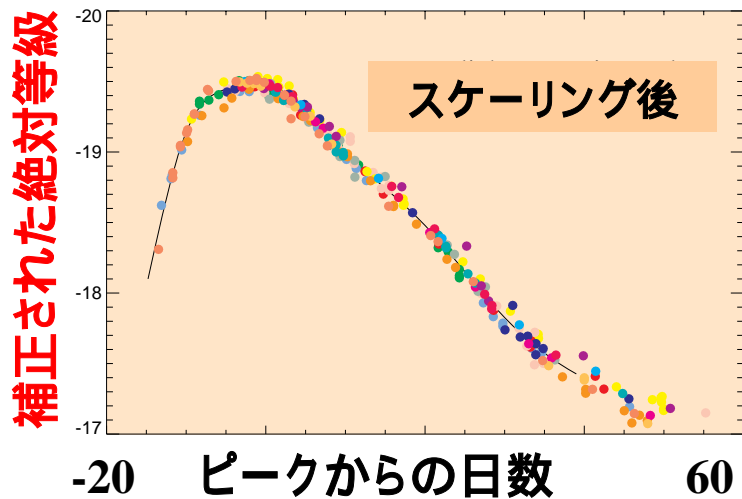
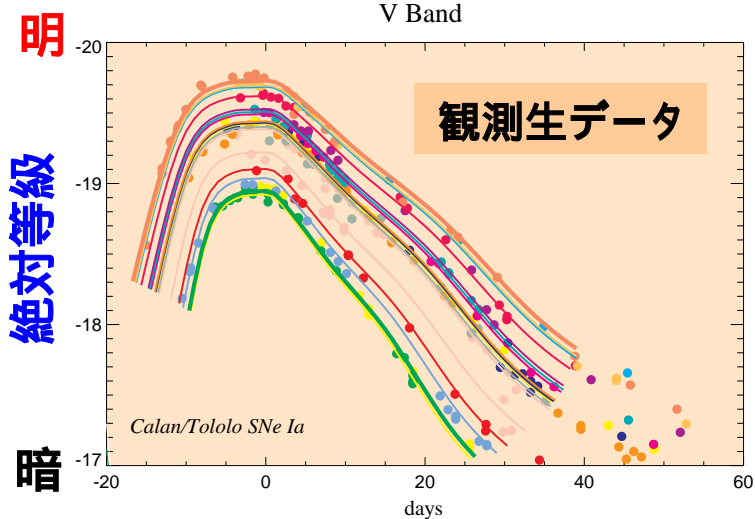


HSTで測定したSN 1997cjの明るさの時間変化

ダークエネルギー



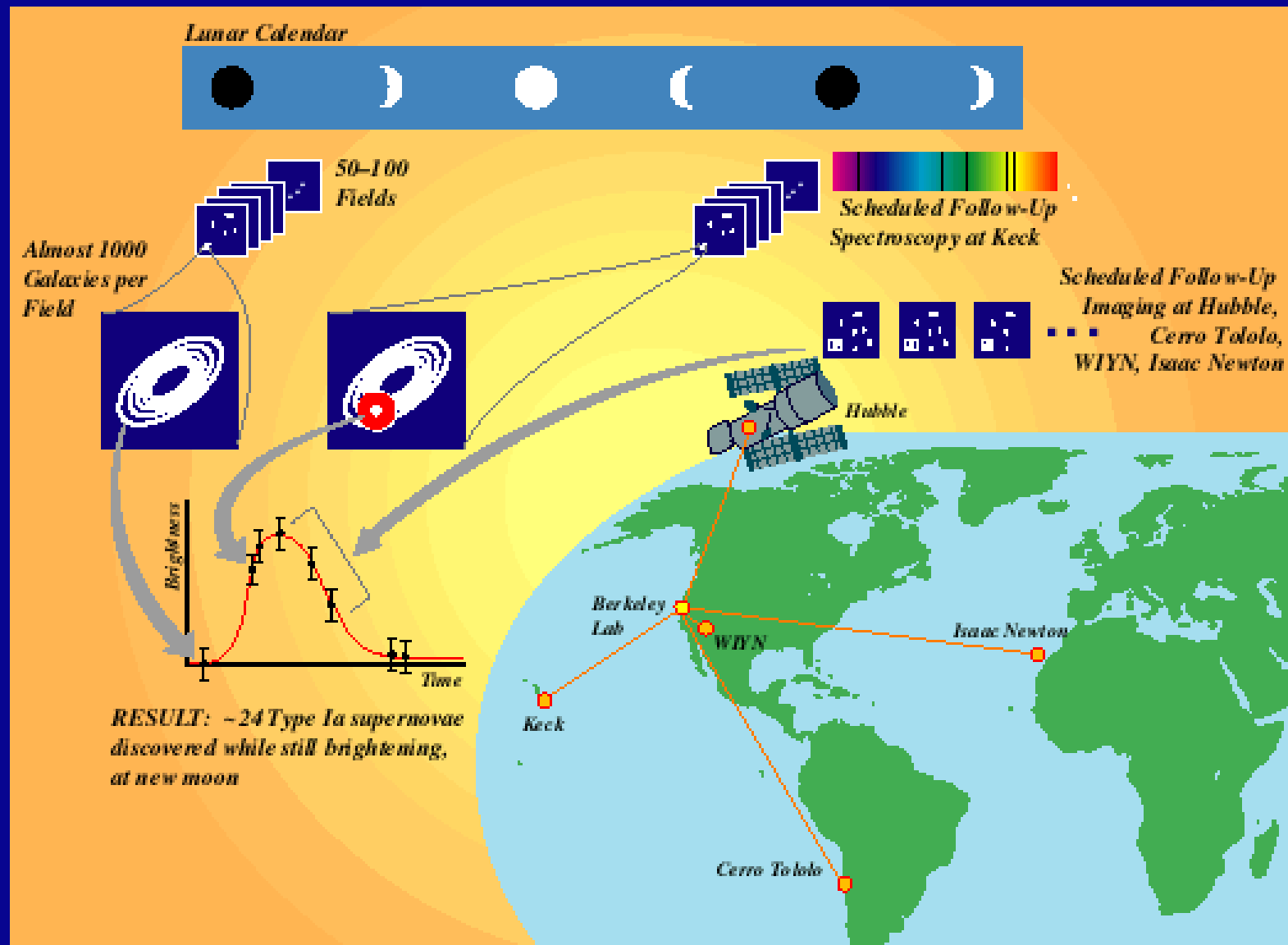
多波長光度曲線フィット法



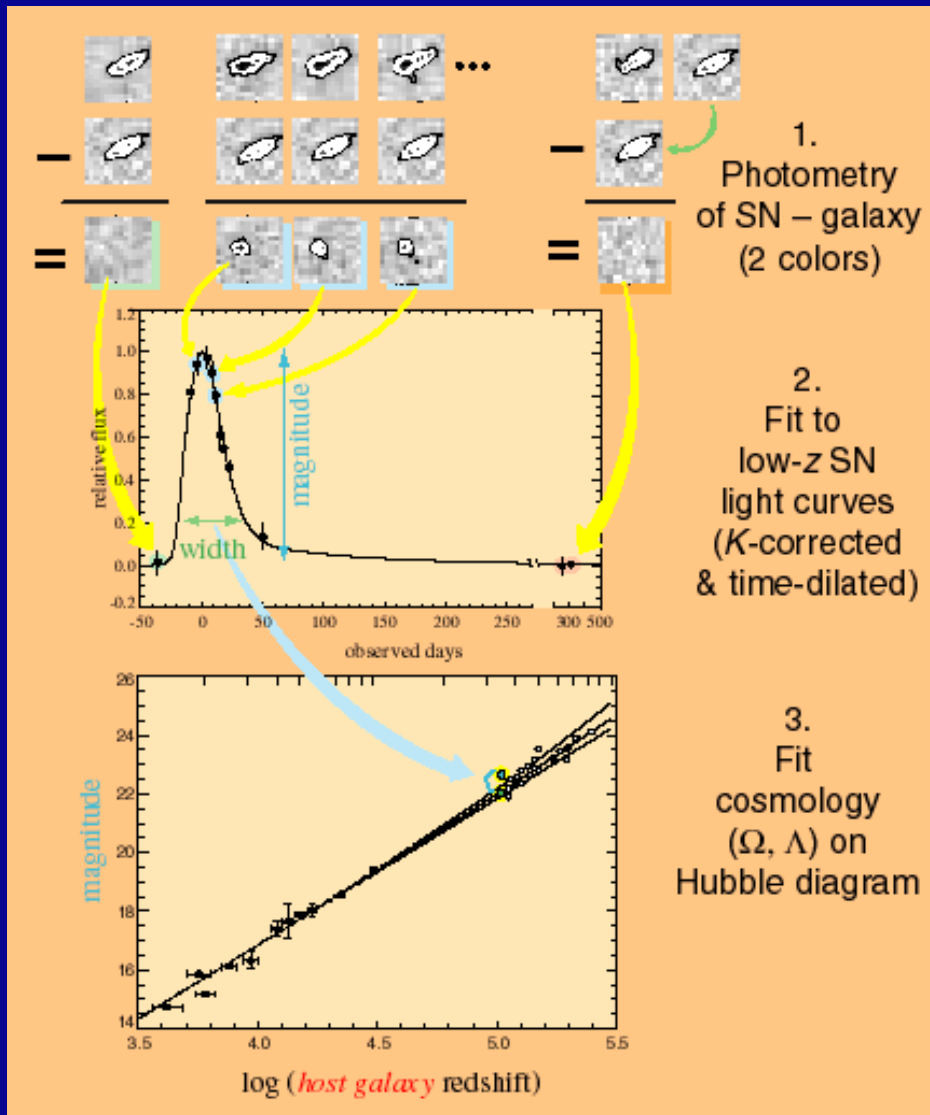
- ピーク光度が大きいIa型超新星ほど光度の時間的減少は緩やか
- 距離の知られている超新星については極めて良いスケールング則が成り立つ
- この経験式を用いて、高赤方偏移のIa型超新星の絶対光度のより正確な補正が可能

<http://www-supernova.lbl.gov/>
(Perlmutter 2004, Physics Today, April, p.53)

Supernova Cosmology Project: Strategy



Supernova Cosmology Project: analysis



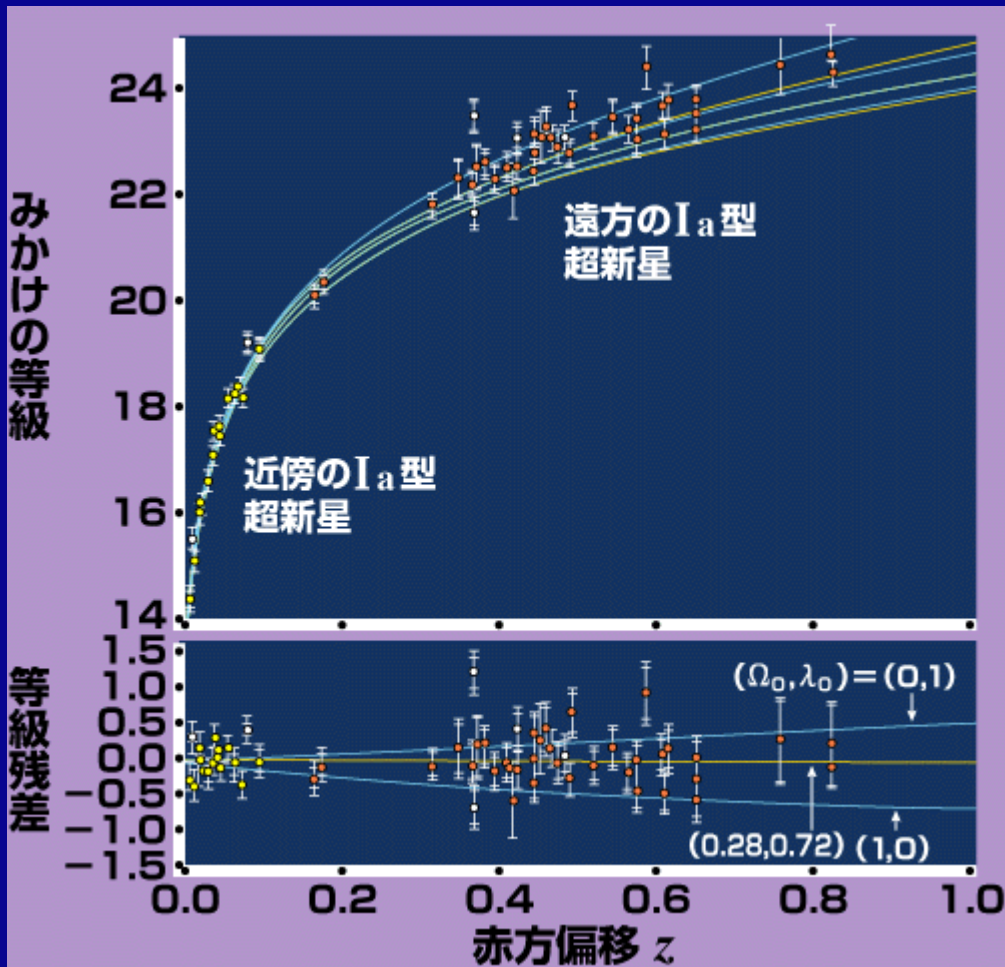
■ 検出方法

- deep images of regions on the sky
- do this again one month later
- compare two sets of images, looking for new “stars” superimposed on galaxies

■ 分光観測

- Several types of supernovae
- SNe Ia have characteristic spectra

超新星と宇宙定数



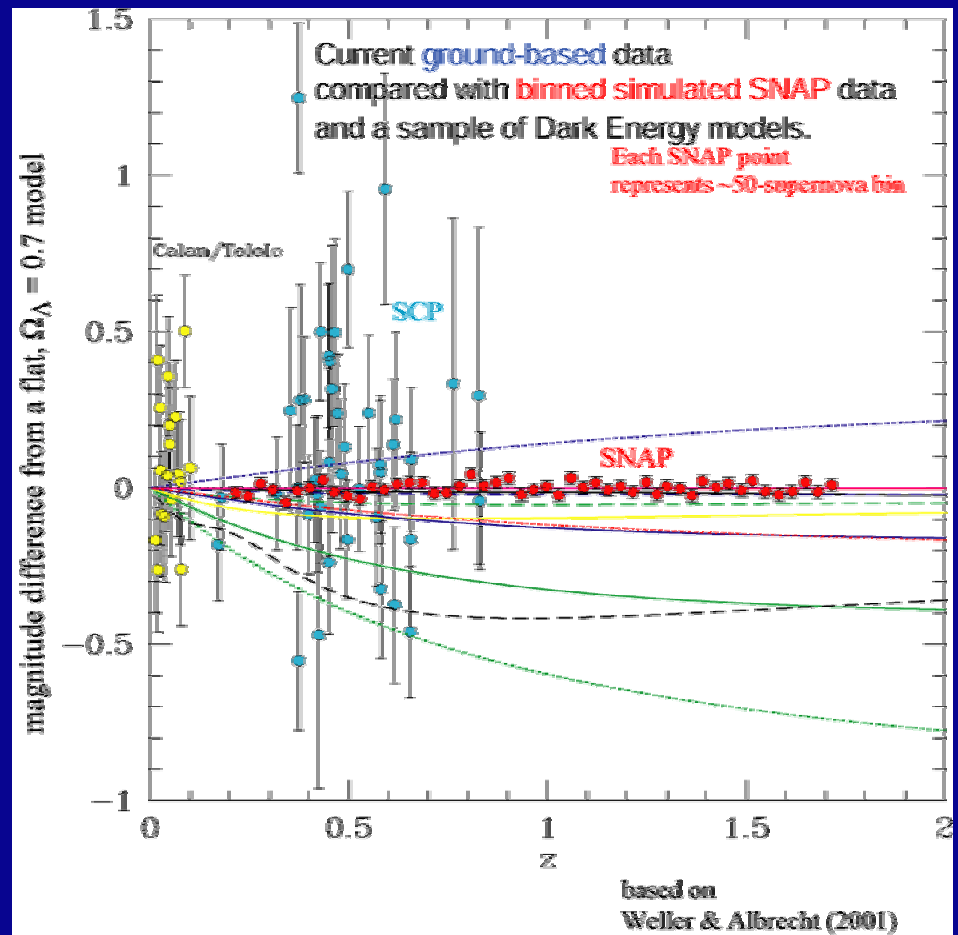
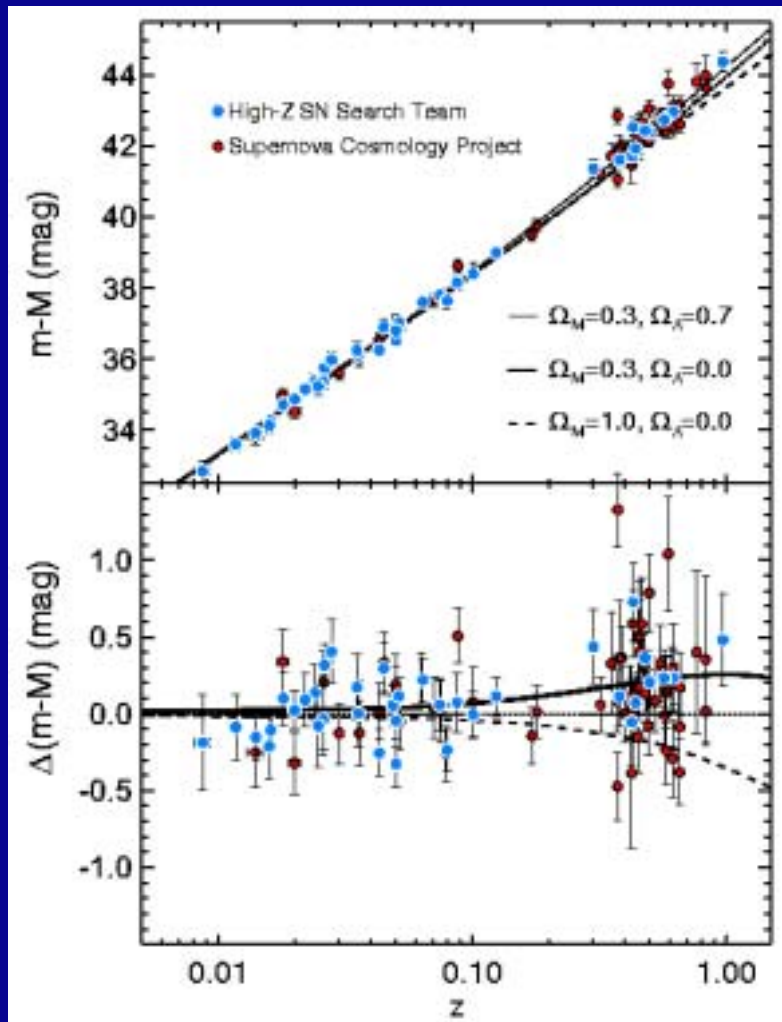
- 遠方超新星までの距離推定

$$\Omega_m = 1, \Omega_\Lambda > 0$$

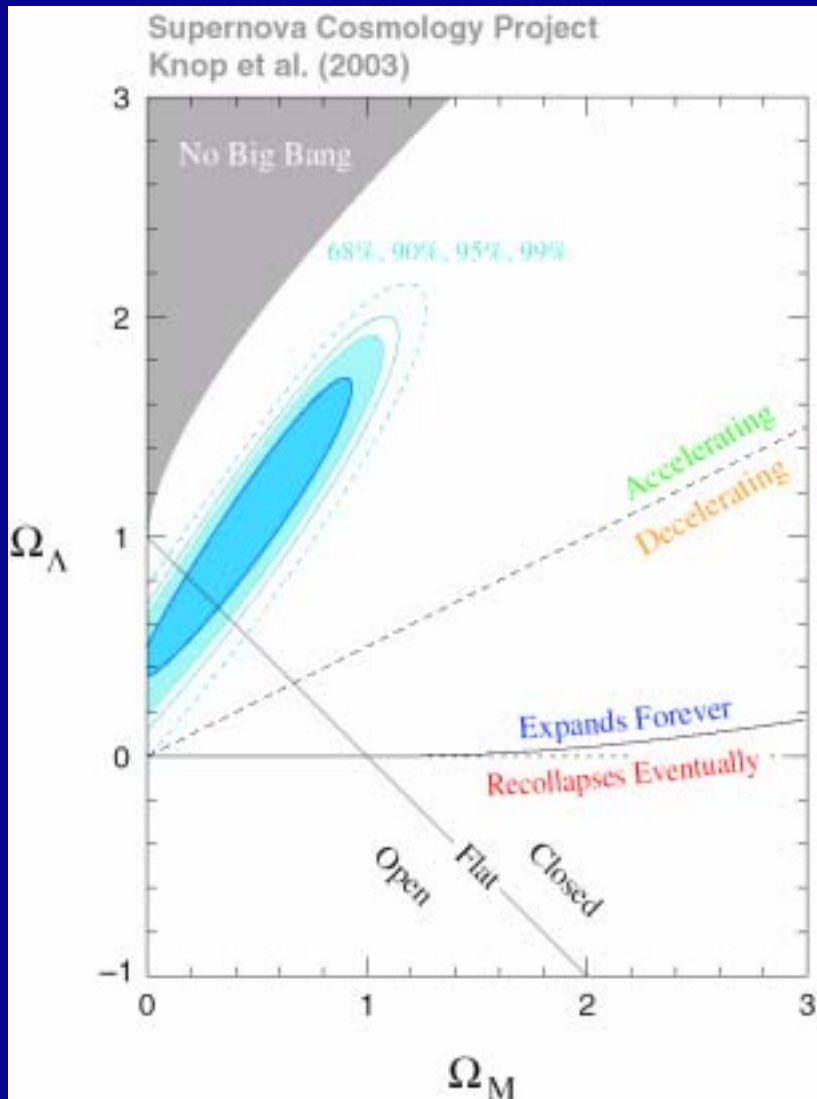
宇宙定数の存在！

Perlmutter et al. :
The Astrophysical Journal
517(1999)565

Ia型超新星ハッブル図



超新星と宇宙の加速膨張



- 超新星から得られた宇宙の質量密度と宇宙定数の値への制限
- 宇宙の膨張加速度

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

- 現在の宇宙では

$$\left. \frac{\ddot{a}}{a} \right|_0 = H_0^2 \left(\Omega_\Lambda - \frac{\Omega_m}{2} \right)$$

- $\Omega_\Lambda > \Omega_m/2$ であれば現在の宇宙は加速膨張

WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

2001年6月30日 15:46:46

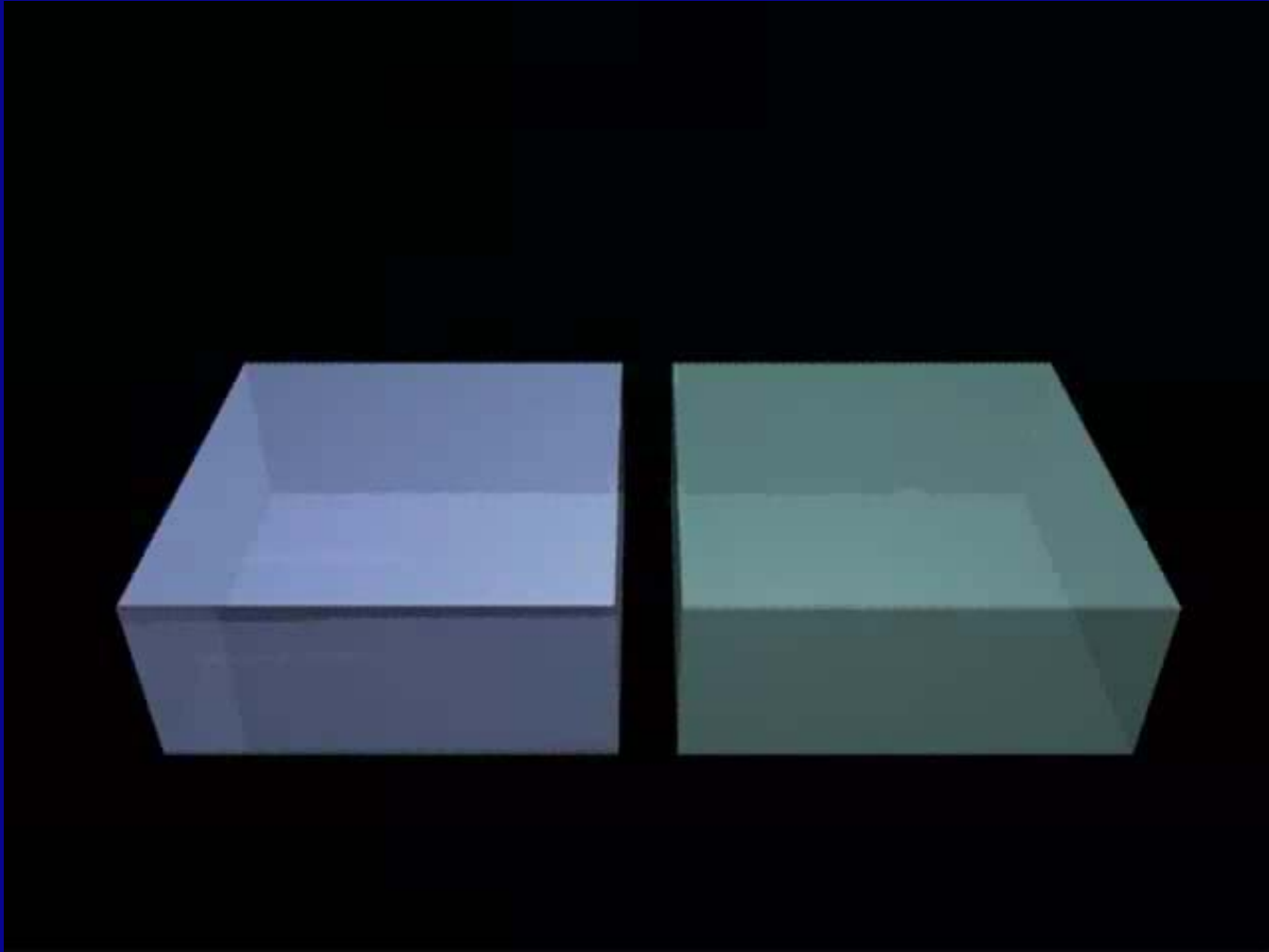
米国東海岸標準時間

打ち上げ



NASA/WMAP
サイエンスチーム提供

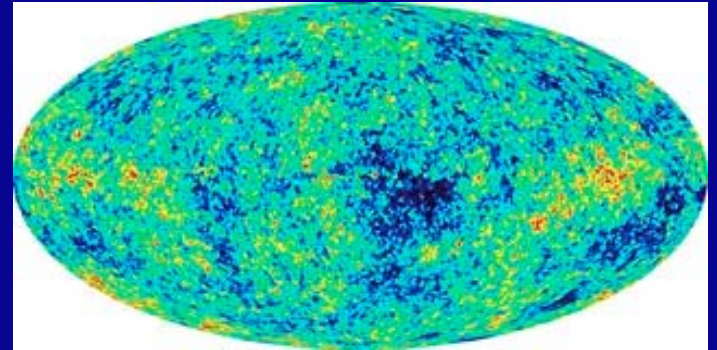
温度地図のゆらぎパターン=宇宙の音波振動



NASA/WMAP
Science Team

137億年前の古文書の解読方法

- 暗号化された状態の古文書
 - 宇宙マイクロ波全天温度地図



- 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l, m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

- 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

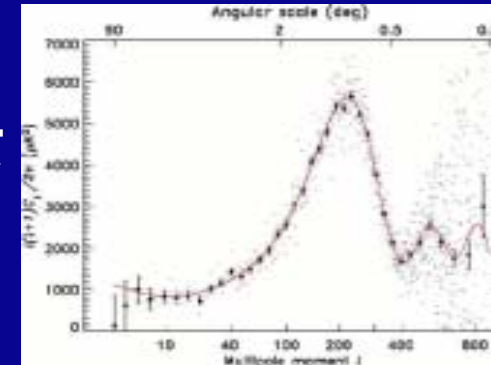
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

- この古文書の意味を理解するための文法

- 冷たい暗黒物質モデルの理論予言

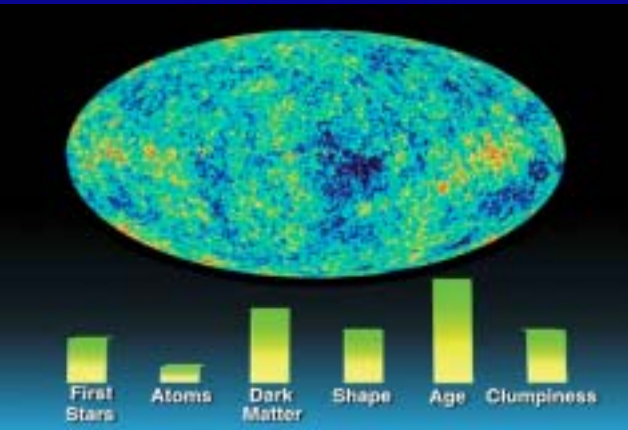
- 隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



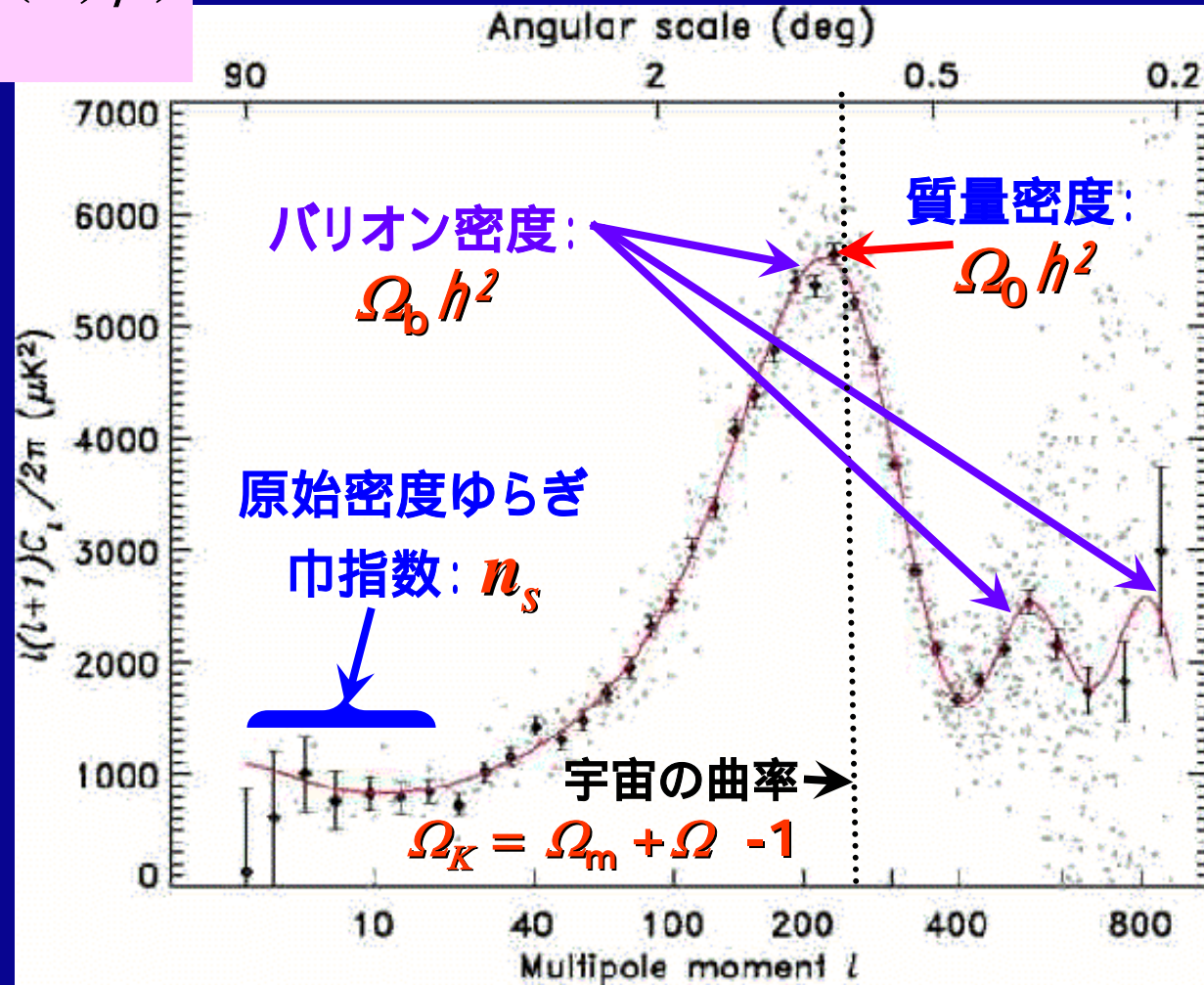
WMAPの観測した温度ゆらぎパワースペクトル

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

Spergel et al.
ApJS 148(2003)175



Cosmological parameters (WMAP+others)

$$\Omega_{\text{tot}} = 1.02^{+0.02}_{-0.02}$$

$$w < -0.78 \text{ (95\% CL)}$$

$$\Omega_{\Lambda} = 0.73^{+0.04}_{-0.04}$$

$$\Omega_b h^2 = 0.0224^{+0.0009}_{-0.0009}$$

$$\Omega_b = 0.044^{+0.004}_{-0.004}$$

$$n_b = 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$$

$$\Omega_m h^2 = 0.135^{+0.008}_{-0.009}$$

$$\Omega_m = 0.27^{+0.04}_{-0.04}$$

$$\Omega_\nu h^2 < 0.0076 \text{ (95\% CL)}$$

$$m_\nu < 0.23 \text{ eV (95\% CL)}$$

$$T_{\text{cmb}} = 2.725^{+0.002}_{-0.002} \text{ K}$$

$$n_\gamma = 410.4^{+0.9}_{-0.9} \text{ cm}^{-3}$$

$$\eta = 6.1 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$$

$$\Omega_b \Omega_m^{-1} = 0.17^{+0.01}_{-0.01}$$

$$\sigma_8 = 0.84^{+0.04}_{-0.04} \text{ Mpc}^{-1}$$

$$\sigma_8 \Omega_m^{-0.5} = 0.44^{+0.04}_{-0.05}$$

$$A = 0.833^{+0.086}_{-0.083}$$

$$n_s = 0.93^{+0.03}_{-0.03}$$

$$\frac{dn_s}{d \ln k} = -0.031^{+0.016}_{-0.018}$$

$$r < 0.71 \text{ (95\% CL)}$$

$$z_{\text{dec}} = 1089^{+1}_{-1}$$

$$\Delta z_{\text{dec}} = 195^{+2}_{-2}$$

$$h = 0.71^{+0.04}_{-0.03}$$

$$t_0 = 13.7^{+0.2}_{-0.2} \text{ Gyr}$$

$$t_{\text{dec}} = 379^{+8}_{-7} \text{ kyr}$$

$$t_r = 180^{+220}_{-80} \text{ Myr (95\% CL)}$$

$$\Delta t_{\text{dec}} = 118^{+3}_{-2} \text{ kyr}$$

$$z_{\text{eq}} = 3233^{+194}_{-210}$$

$$\tau = 0.17^{+0.04}_{-0.04}$$

$$z_r = 20^{+10}_{-9} \text{ (95\% CL)}$$

$$\theta_A = 0.598^{+0.002}_{-0.002}$$

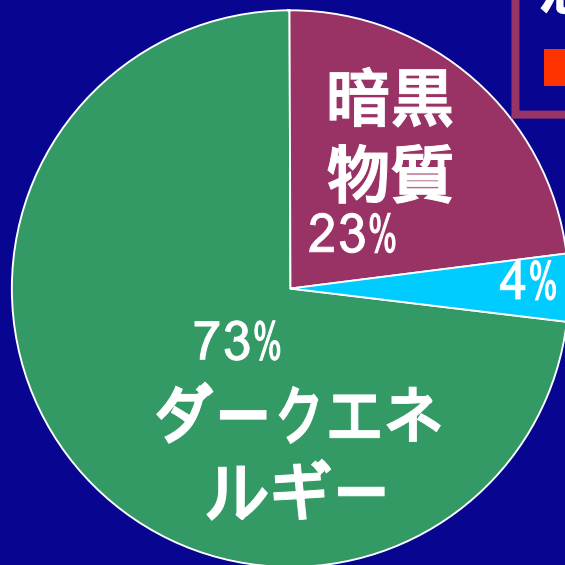
$$d_A = 14.0^{+0.2}_{-0.3} \text{ Gpc}$$

$$l_A = 301^{+1}_{-1}$$

$$r_s = 147^{+2}_{-2} \text{ Mpc}$$

解読結果：我々の宇宙は何からできている？

宇宙の組成



- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量をもつ
- 未知の素粒子が正体？

通常物質 (バリオン)

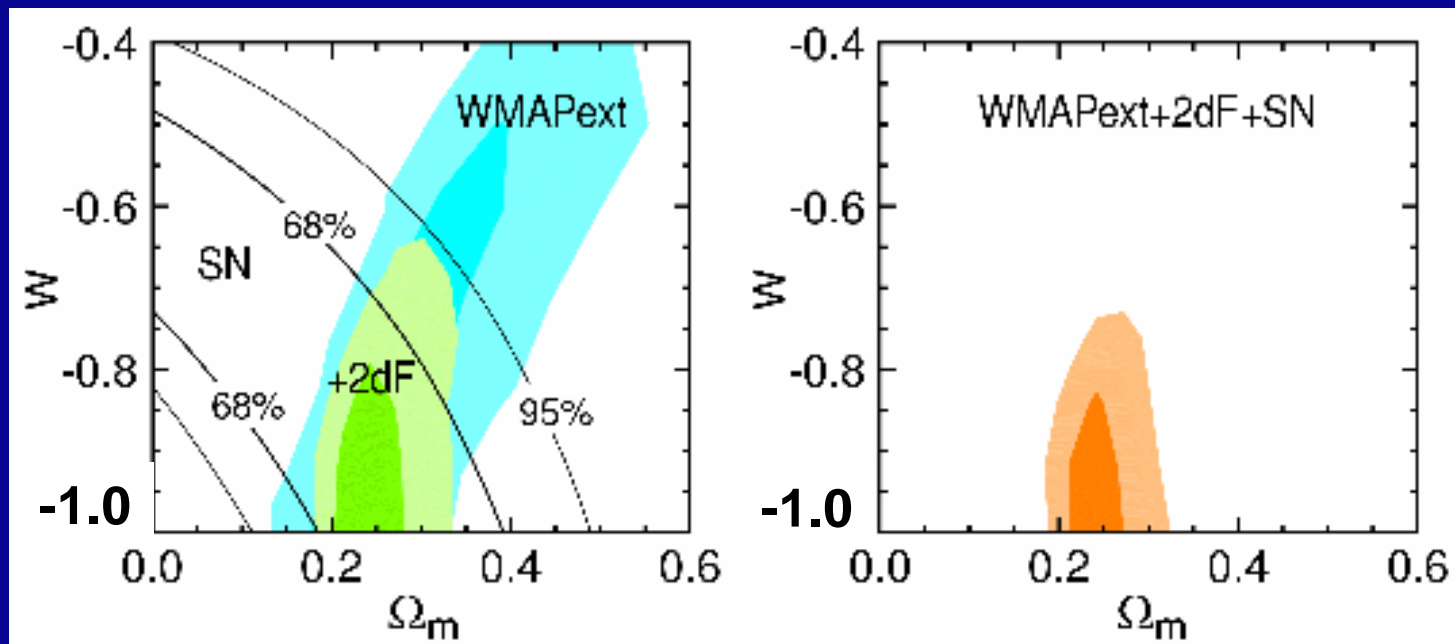
- 元素をつくっているもの (主に、陽子と中性子)
- 現時点で知られている物質 (の質量) は実質的にはすべてバリオン

- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力 (負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

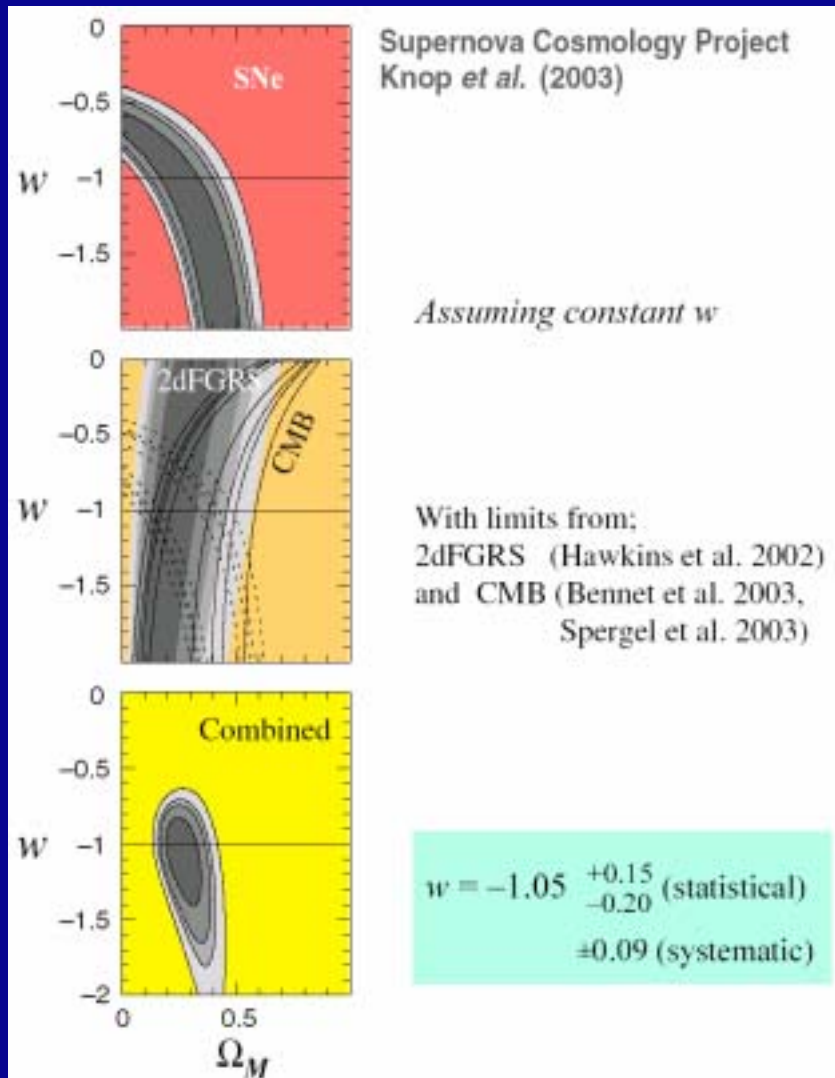
ダークエネルギーは宇宙定数か？

■ 宇宙の状態方程式

- $p=w\rho$ $\rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
- $w=-1$: 宇宙定数
- $-1 < w < 0$: (一般の)ダークエネルギー
- WMAP+others $w < -0.78$ (95%)



宇宙の状態方程式への制限



■ 宇宙の状態方程式

■ $p = w\rho$

$$\rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$$

■ $w = -1$: 宇宙定数

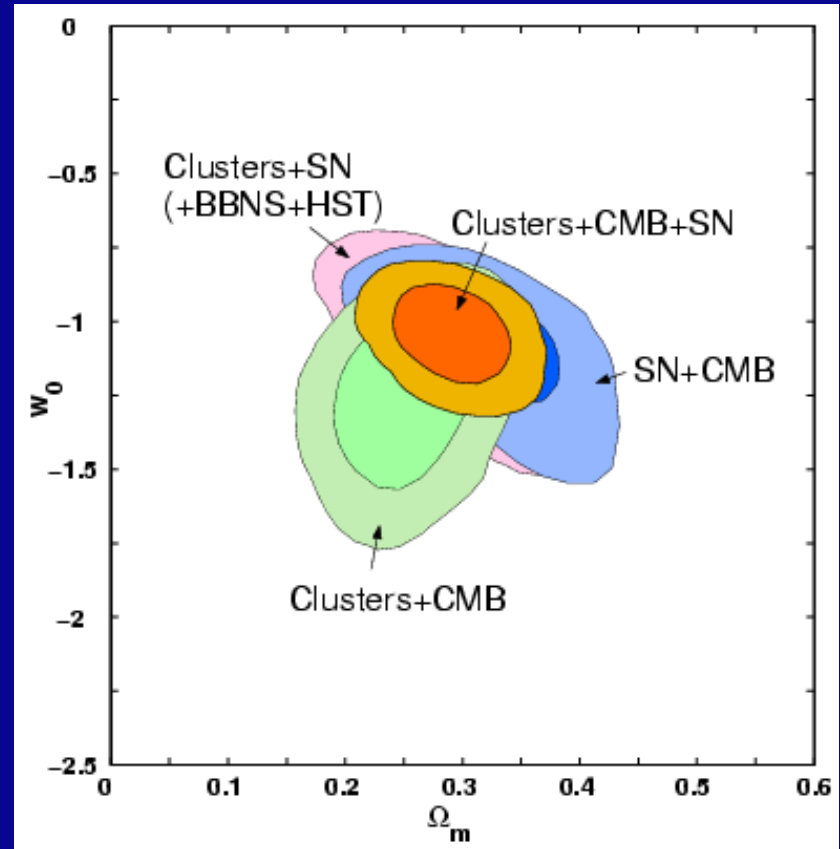
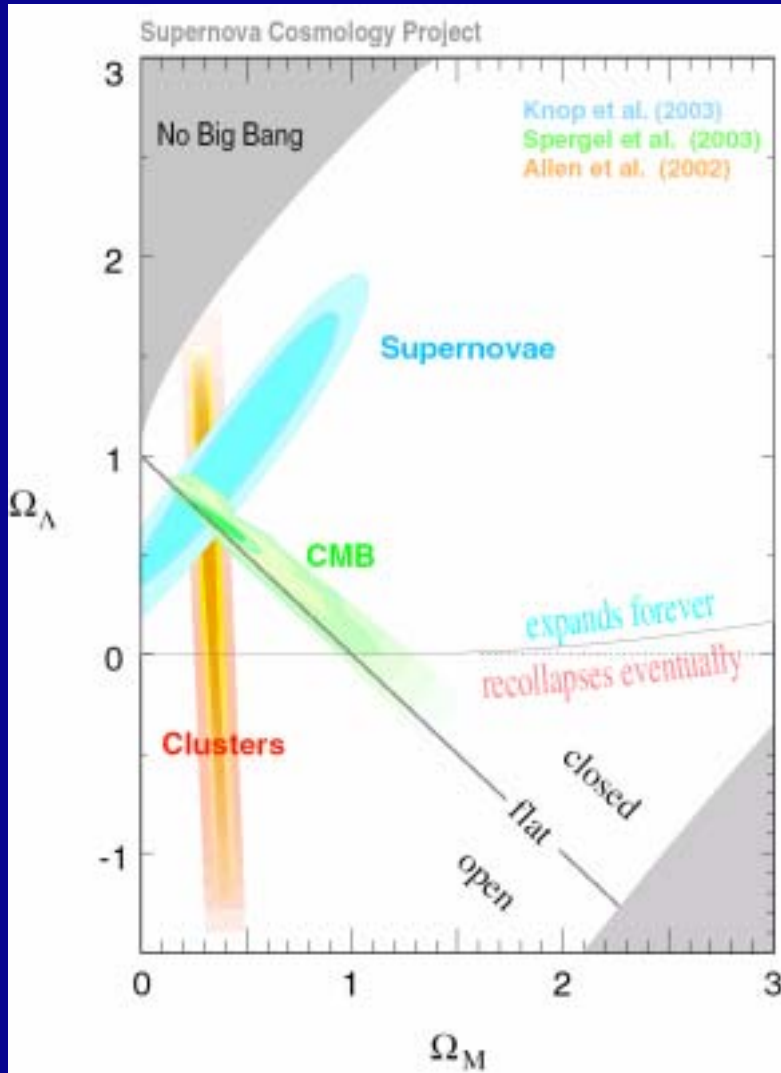
■ $-1 < w < 0$: (一般の) ダークエネルギー

■ $w = -1.05^{+0.15}$

$- 0.20$

± 0.09

超新星、CMB、銀河団からの制限



Rapetti, Allen & Weller (2004)
astro-ph/0409574

宇宙のダークエネルギー

- 暗黒物質とは異なり、空間的に局在しているようなものではない
 - 例えば、本来何もないはずの真空自体が持っているエネルギーのように、宇宙全体を一様にみたくしている
- その重力は、実効的に「万有斥力」
 - 1917年にアインシュタインが(全く異なる理由から)導入した宇宙定数に対応
 - 暗黒物質以上にその正体は不明
- ダークエネルギーは、いまだ理解していない新たな物理学を探る重要な道しるべかもしれない
 - なぜ $\Omega_A = 0$ でないのか？
 - なぜ、 Ω_{DM} Ω_A Ω_b が成り立っているのか

“著名”な物理学者の発言からの引用

- *“Our main achievement in understanding dark energy is to give it a name” - Michael Turner*
- *“Right now, not only for cosmology but for elementary particle theory this is the bone in the throat” - Steven Weinberg*
- *“Would be number one on my list of things to figure out” - Edward Witten*
- *“In string theory, to get $\Lambda > 0$ but extremely small is impossible” - Edward Witten*
- *“Maybe the most fundamentally mysterious thing in basic science” - Frank Wilczek*

「宇宙を見る新しい目」(日本評論社)

日本物理学会編:2004年3月刊



- 1章 宇宙マイクロ波背景輻射で見る宇宙...小松英一郎
- 2章 X線で見る宇宙...大橋隆哉
- 3章 ガンマ線で見る宇宙...谷森達
- 4章 重力波で見る宇宙...三尾典克
- 5章 最高エネルギー宇宙線...手嶋政廣
- 6章 コンピュータシミュレーションから見る宇宙...吉田直紀
- 7章 超新星で測る宇宙膨張とダークエネルギー...土居守
- 8章 ニュートリノと素粒子物理...梶田隆章
- 9章 超新星ニュートリノで見る宇宙...佐藤勝彦
- 10章 究極の宇宙論:太陽系外惑星探査...須藤靖

古文書解読手順 その1

本当はかなり複雑なパラメータフィットを行っており、厳密に言えば以下のように単純ではなく互いに絡み合っている。それでも近似的には解読原理は次のように要約できる。

1. 宇宙晴れ上がりの時期 z_{dec} を推定する

- a. 理論モデルを用いて観測されているCMB温度地図の宇宙時刻(宇宙が中性化・晴れ上がった時)を計算
- b. これは、赤方偏移パラメータにして $z_{\text{dec}}=1089 \pm 1$
- c. 宇宙の大きさが現在の $1/(1+z_{\text{dec}}) \sim 1/1089$ の時期に対応。(宇宙モデルを仮定して)時刻に換算すれば $t_{\text{dec}}=37.2 \pm 1.4$ 万年

2. この時期までにゆらぎの振動が伝わる距離 r を計算する

- a. 空間的な重力的密度のゆらぎは、その時期の宇宙の媒質中を音波として伝わる
- b. この音波振動が、CMB温度ゆらぎスペクトルの山や谷をつくる
- c. 主として放射からなる媒質の場合、音速は光速の $1/3^{1/2}$
- d. これらを総合すると、距離は(現在の宇宙での値に換算して)
 $r=147\text{Mpc}$

古文書解読手順 その2

3. 理論モデルとの比較から宇宙の曲率がわかる

- a. この長さを現在の宇宙から見込む角度がCMB温度ゆらぎスペクトルの最初のピーク的位置に対応(さらに右のピークはその高調波)
- b. WMAPの観測結果より、 $l \sim 220$ 、これは角度に換算して $\theta \sim \pi/l \sim 0.8^\circ$
- c. 実はこの値はほとんど宇宙の曲率(幾何学、空間の曲がり具合)だけで決まる
- d. 上の結果より、宇宙の曲率はほとんど0、つまり、我々の宇宙はピタゴラスの定理が成り立つようなユークリッド空間(平坦な宇宙)に極めて近いことが示された: 曲率 $=0.02 \pm 0.02$

4. 空間の曲率は宇宙に存在する物質の総量と結びついている

- a. アインシュタインの一般相対論
- b. 時空のゆがみはその中に存在する物質の量(=重力の強さ)で決まる
- c. 無次元化した物質の総量 $\Omega_{\text{tot}} = \text{曲率} + 1 = 1.02 \pm 0.02$

5. r の値が、遠方のものさしの目盛りの役割をする

- a. CMB温度地図の宇宙時刻(宇宙の晴れ上がり)から現在までの距離は、 $d = r / \theta \sim 14\text{Gpc}$

古文書解読手順 その3

6. 現在の宇宙年齢の推定

- a. 宇宙の晴れ上がりから現在までの距離 d が決まったので(宇宙の曲率がほとんど0であることを利用すれば)、その時点から現在までの経過時間が精度よくわかる
- b. 宇宙の晴れ上がりでの時刻は $t_{\text{dec}} = 37.2 \pm 1.4$ 万年だったから、上で得られた時間は現在の宇宙年齢そのもの
- c. $t_0 = 137 \pm 2$ 億年

7. バリオン存在量の推定

- a. CMB温度ゆらぎスペクトルの奇数番目のピーク(振動の圧縮モードに対応)と偶数番目のピークとの振幅の比が、バリオン密度(と放射密度の比)に依存して変化することを利用
- b. 結果は、 $\Omega_b h^2 = 0.0224 \pm 0.0009$

8. 暗黒物質存在量の推定

- a. バリオンと暗黒物質の総量(通常重力を及ぼす)と放射エネルギー量との比の値によって、第1番目のピークの高さが変化する
- b. これより、 $(\Omega_{\text{DM}} + \Omega_b) h^2 = 0.135 \pm 0.009$

古文書解読手順 その4

9. ハッブル定数の推定

- a. 宇宙の晴れ上がりから現在までの距離 d と、ピークの高さの値と異なるピークの高さの比とを組み合わせる
- b. $h=0.71 \pm 0.04$

10. ダークエネルギー存在量の推定

- a. 物質の総量から引き算する
- b. 総量: $\Omega_{\text{tot}}=1.02 \pm 0.02$
- c. バリオン+ 暗黒物質 : $\Omega_b=0.29 \pm 0.04$
- d. 残り: 0.73 ± 0.04
- e. この正体不明のエネルギーは、ダークエネルギーと呼ばれているが、1917年にアインシュタインが導入した宇宙定数というパラメータと同じものなのではないかと考えられている