

宇宙の組成を 探る

須藤 靖

東京大学大学院

理学系研究科

物理学専攻



Seldner, Siebers, Groth, and Peebles, 1977, AJ, 82, 249

上智大学理工学部 物理学科コロキウム

2005年4月28日 15:15~



宇宙論研究の目的

- 我々の来し方行く末をつらつらと考える
 - 宇宙の誕生・起源
 - 宇宙の質量
 - 宇宙の年齢
 - 宇宙の大きさ・果て
 - 宇宙の未来

このような問題意識はもちろん古くから存在したが、観測データに基づく定量的検証が可能になったのは1990年代以降のことである。

我々の世界をもっとよく知りたい

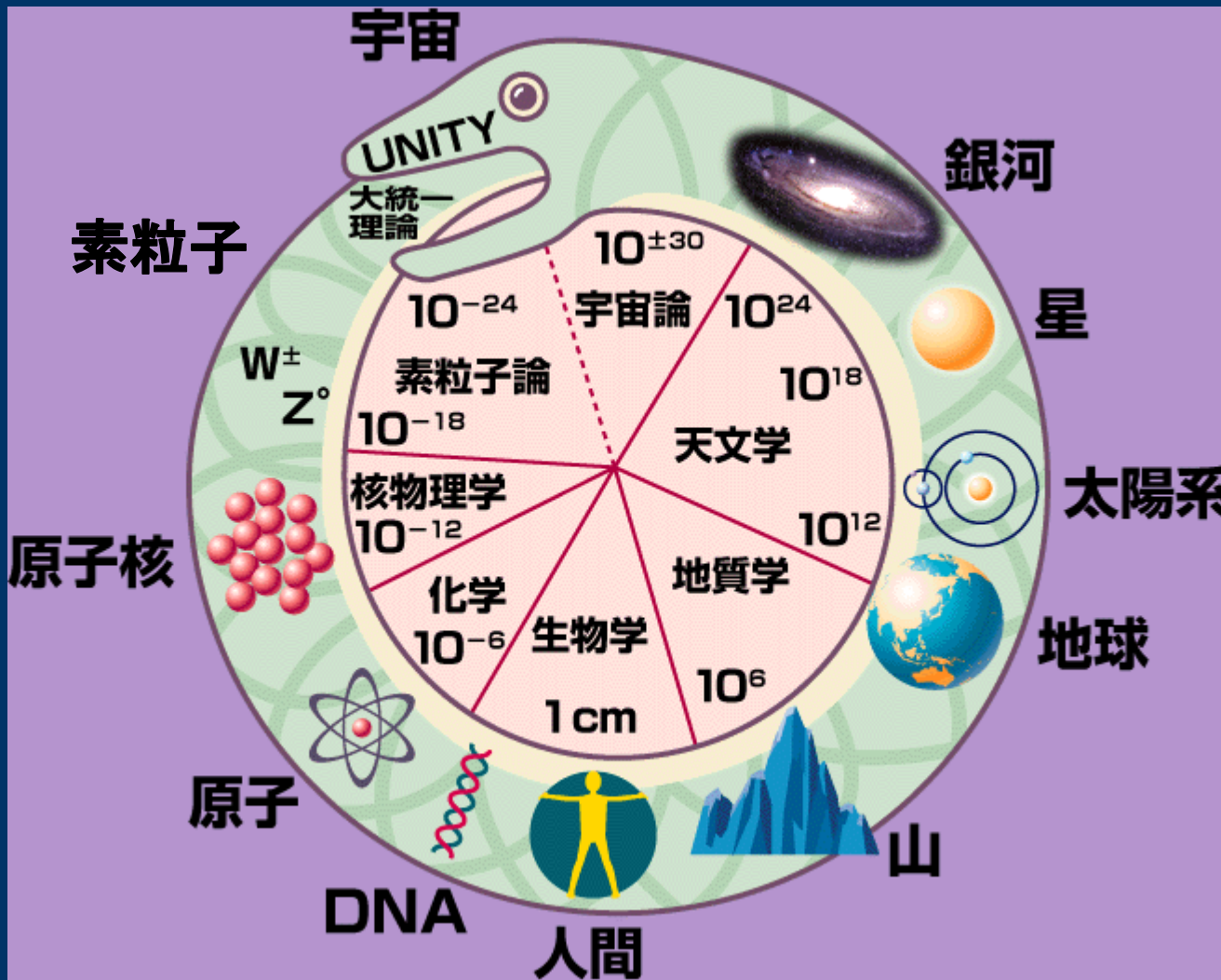
■ 微視的世界：物質は何からできているのだろうか？

- ものをどんどん分けていくとどうなるか？
- 分子⇒原子⇒原子核(バリオン)⇒素粒子(クォーク・レプトン)
- もはやこれ以上は分けることのできない最小構成要素が存在
- これ以外の物質(素粒子)は存在しないのか？

■ 巨視的世界：宇宙の果てには何があるのだろうか？

- 地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙の大構造
- 宇宙の大きさ(=年齢)はどのくらいだろう
- さらに遠く(=過去)の宇宙はどうなっているのだろう
- 宇宙を占めている物質は、我々がすでに知っている微視的世界の構成要素と同じなのだろうか

自然界の階層：ミクロとマクロをつなぐ



- 宇宙の大きさは約 10^{27} cm, すべての物質を形づくる素粒子の大きさは 10^{-24} cm以下
- この約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とが宇宙の研究を通じてより深く理解されつつある

シェルドン グラシヨー 著 ‘Interaction’ のなかの図をもとに作成

宇宙の歴史



量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成
銀河団の形成

宇宙の大構造

- $t \sim 10^{-40}$ 秒: インフレーション・量子ゆらぎの生成
- $t \sim 3$ 分: ヘリウム合成
- $t \sim 38$ 万年: 宇宙の中性化・宇宙の晴れ上がり
- $t \sim 2$ 億年: 第一世代天体の誕生
- $t \sim 8$ 億年: 宇宙の再電離ほぼ終了
- $t = 8$ 億年 \sim 137億年: 銀河形成、銀河団形成、宇宙の大構造
- $t \sim 137$ 億年: 現在

宇宙論研究の歴史年表

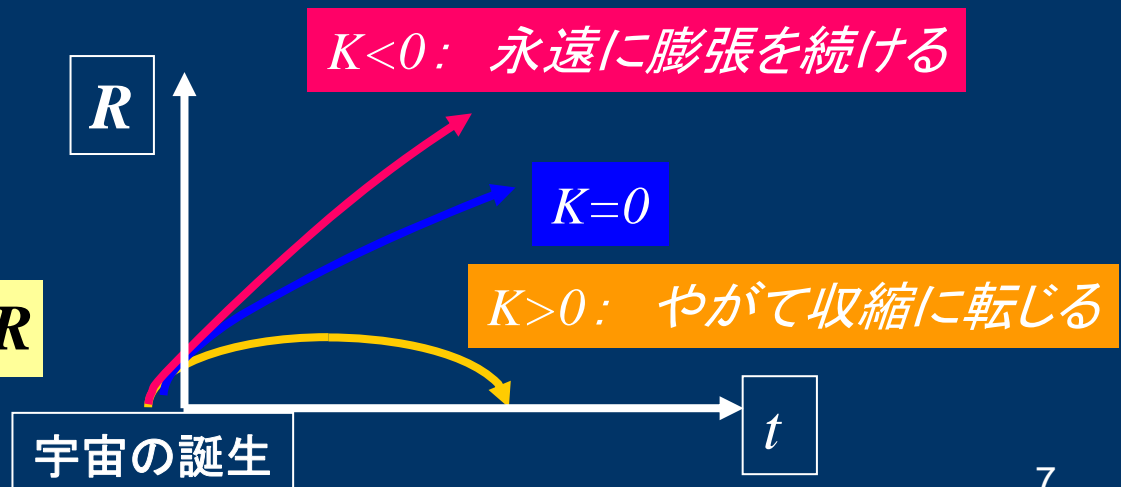
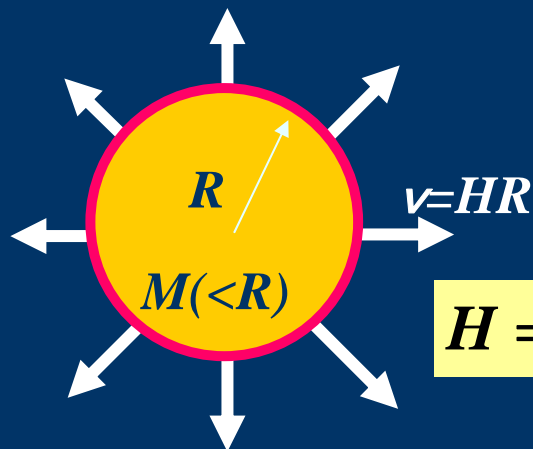
- 1916年～ 一般相対論的宇宙モデル
(アインシュタイン、フリードマン、ルメートル)
- 1929年 宇宙膨張の発見(ハッブル)
- 1946年～ ビッグバンモデルの提唱(ガモフ)
- 1965年 CMBの発見(ペンジアス、ウィルソン)
- 1980年～ 宇宙の大構造の発見
素粒子論的宇宙論の誕生
宇宙論的数値シミュレーション
- 1992年 CMB温度ゆらぎの検出(COBE)
- 1990年代後半～ 宇宙論パラメータの精密決定
平坦な宇宙、暗黒物質、宇宙定数(暗黒エネルギー)

ニュートン力学的宇宙モデル

- 一様密度球の“半径”の時間変化
- 解釈は別として一般相対論的一様等方宇宙モデルのフリードマン方程式と厳密に一致

$$\frac{\dot{R}^2}{2} - \frac{GM}{R} \equiv -\frac{K}{2}, \quad M = \frac{4\pi}{3} \rho R^3$$
$$\Rightarrow \dot{R}^2 + K = \frac{8\pi G}{3} \rho R^2$$

G : ニュートンの重力定数
 M : 半径 R 内の球の質量
 K : 系の全エネルギー(定数)
 ρ : 半径 R 内の平均質量密度



相対論的一様等方宇宙モデルの 運動方程式: フリードマン方程式

アインシュタイン方程式

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



フリードマン方程式

$$\underline{H^2(t)} = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)} \right)^2 = \frac{8\pi G}{3} \underline{\rho(t)} - \frac{\overbrace{K}^{\text{宇宙の曲率}}}{a^2(t)} + \frac{\underbrace{\Lambda}_{\text{宇宙定数}}}{3}$$

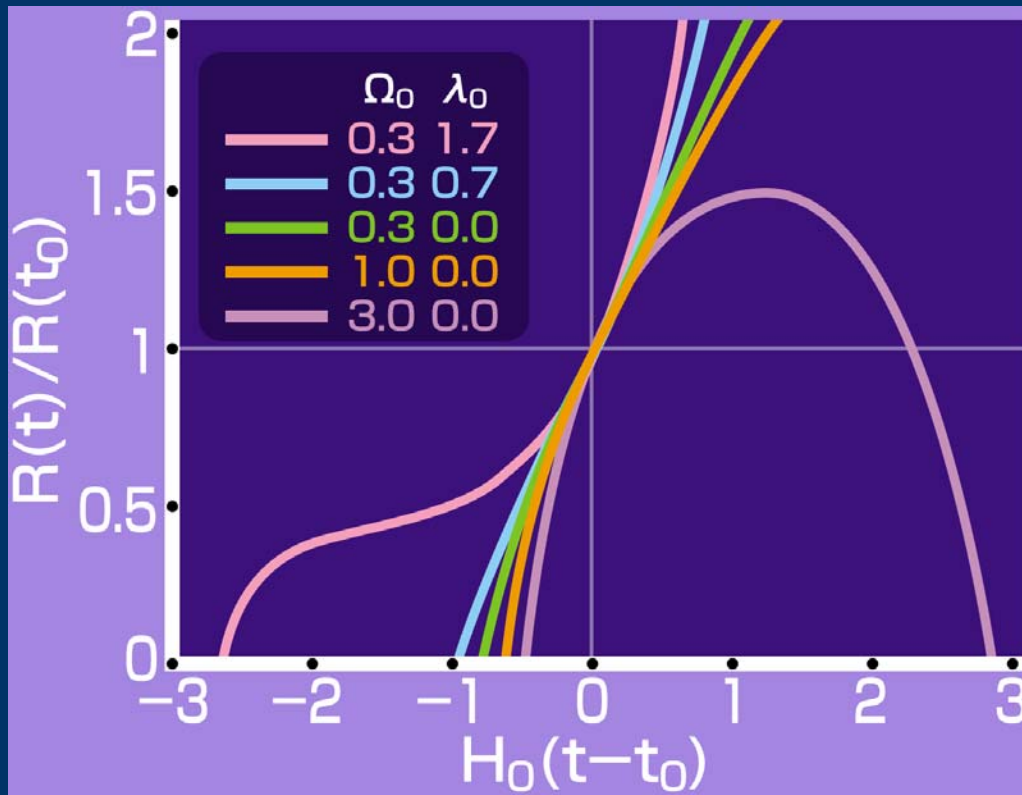
ハッブルパラメータ

スケールファクター

平均質量密度

宇宙論パラメータ

- ハッブル定数に加えて、ダークマターと宇宙定数（ダークエネルギー）の値が宇宙膨張を支配する
- 宇宙の構造とその進化の観測を通じてこれらの値が決定できる（**観測的宇宙論**）



ダークマターと宇宙定数の
量を表す無次元パラメータ

密度パラメータ

$$\Omega_m \equiv \frac{\rho_m}{\rho_c}$$

宇宙定数

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$$

臨界密度 :

$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \times 10^{-29} h^2 \text{g/cm}^3$$

$$\Omega_m \approx 0.3, \quad \Omega_\Lambda \approx 0.7$$

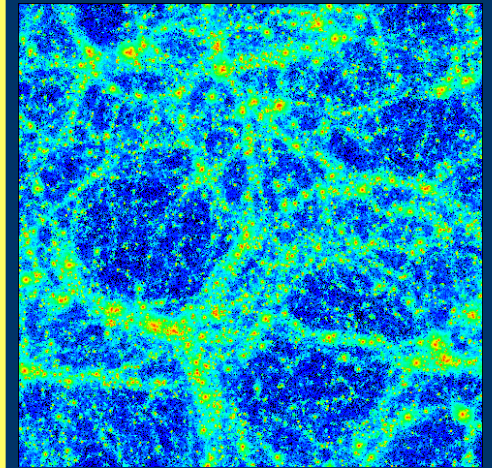
宇宙論パラメータとその決定法

記号	意味	観測的決定法
H_0	ハッブル定数	HSTによるセファイド型変光星を用いた銀河距離指標の較正
Ω_b	バリオン密度パラメータ	ビッグバン元素合成理論予言値と軽元素存在量との比較
Ω_m	質量密度パラメータ	渦巻銀河の回転曲線、銀河団のビリアル質量、銀河団の個数密度
Ω_Λ	宇宙定数	遠方のIa型超新星のハッブル図
Ω_K	宇宙の曲率 ($= \Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$)	マイクロ波背景放射の温度揺らぎの角度スペクトル

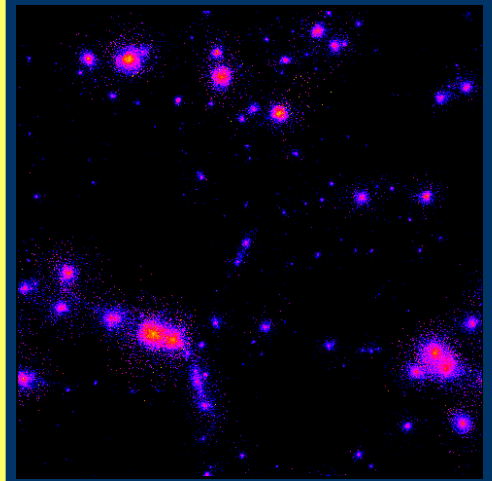
宇宙のダークマター

- 独立な数多くの宇宙観測データがその存在を支持
 - WMAP衛星、銀河の質量密度プロファイル、銀河団からのX線放射強度、銀河の3次元分布、など
- 宇宙の重力(質量)の大半を支配する
 - 宇宙の構造の起源はダークマターの重力
- すでに知られている物質(バリオン)がただ光っていないだけでは説明できない
 - その正体はまだわかっていない
 - ダークマターの直接検出実験は21世紀物理学に残された大きな課題
- 未知の新しい物理学を開拓する鍵

数値シミュレーションによる暗黒物質分布と明るいバリオンガス分布の比較例



暗黒物質



明るいバリオンガス

宇宙定数（≡ダークエネルギー）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

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

物質場
(真空のエネルギー密度?)

- 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 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」 \Rightarrow 全くうけなかった)
- 超新星の観測によって、 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

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 $\Omega_\Lambda = 0$ でないのか？
 - なぜ、 $\Omega_{DM} \doteq \Omega_\Lambda \doteq \Omega_b$ が成り立っているのか

ダークエネルギー存在の観測的示唆

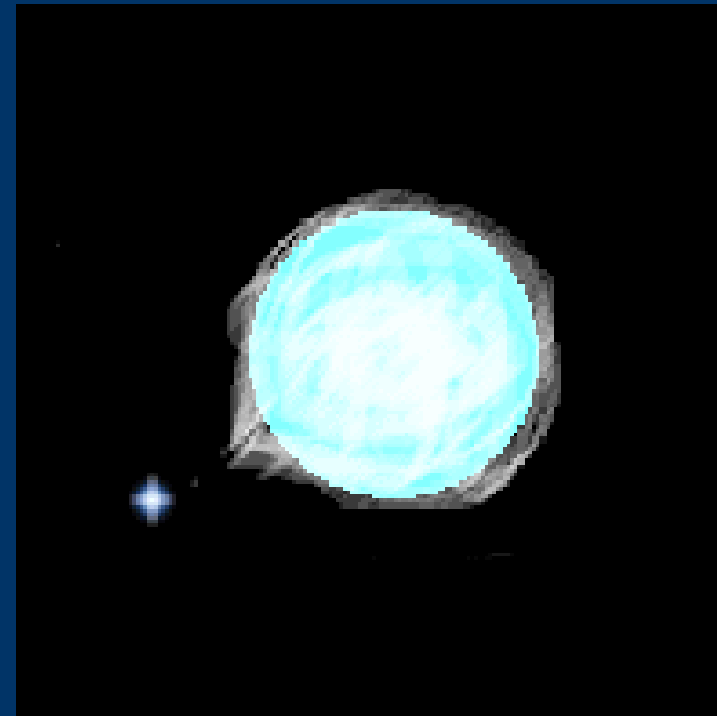
- 宇宙年齢(ハッブル定数) vs. 球状星団の年齢
- 審美眼期待
 - 宇宙の曲率は0であってほしい $\Leftrightarrow \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$
 - 宇宙の質量密度 $\Omega_m < 1 \Rightarrow \Omega_\Lambda > 0$
- 遠方銀河のnumber count (N-m relation)
- Ia型超新星のハッブル図 (m-z relation)
- CMB温度ゆらぎスペクトル

Ia型超新星とは

連星系にある白色矮星の終末

■ 白色矮星:

- 電子の縮退圧で自己重力支える
- チャンドラセカールの限界質量 (約1.4太陽質量) 越えると重力崩壊をし、超新星爆発すると考えられる



Ia型以外の超新星は大質量星(～8太陽質量)の終末(明るさのばらつき大)

I型: **水素**なし Ia型: **シリコン**あり

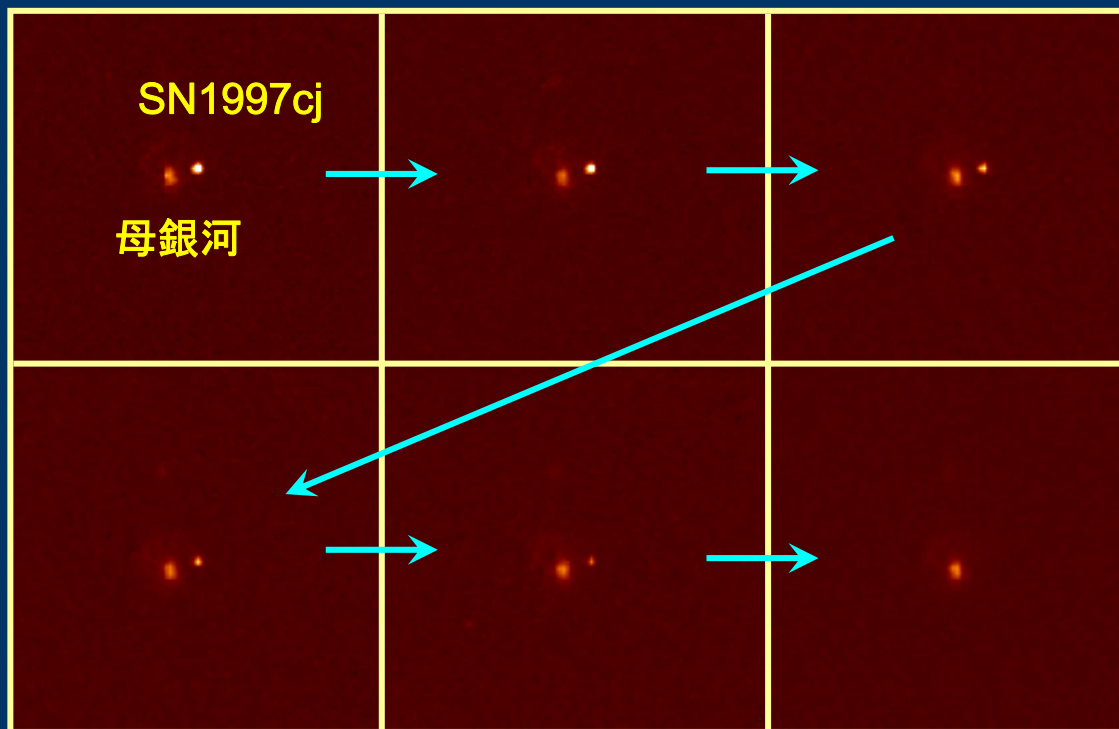
Ib型: **シリコン**なし・**ヘリウム**あり

Ic型: **シリコン**なし・**ヘリウム**なし

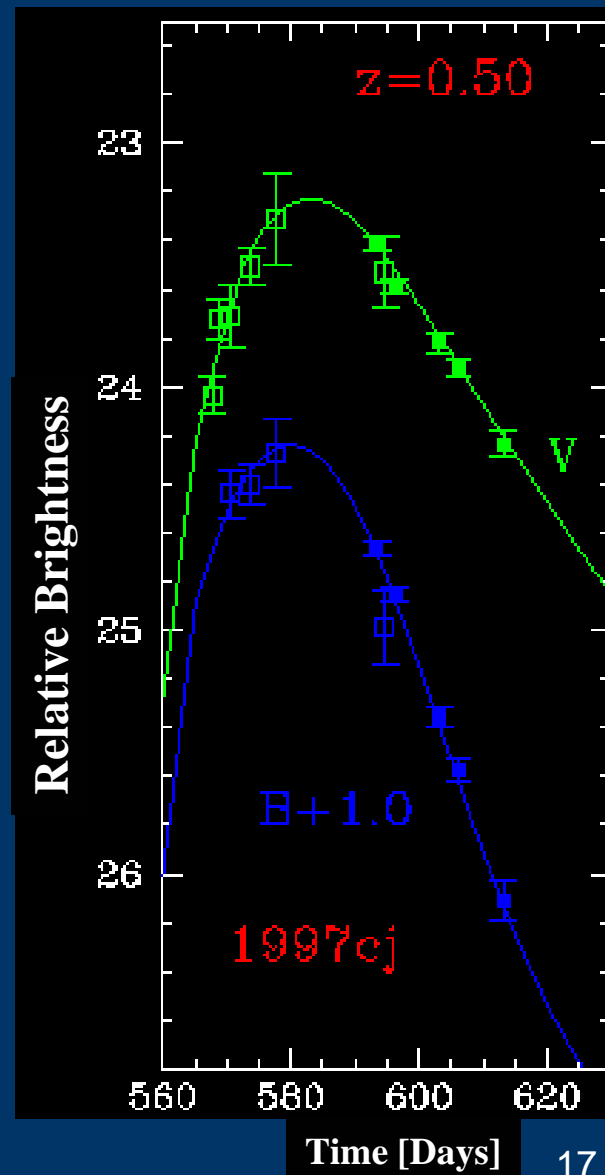
II型: **水素**あり

Ia型超新星の光度曲線の測定

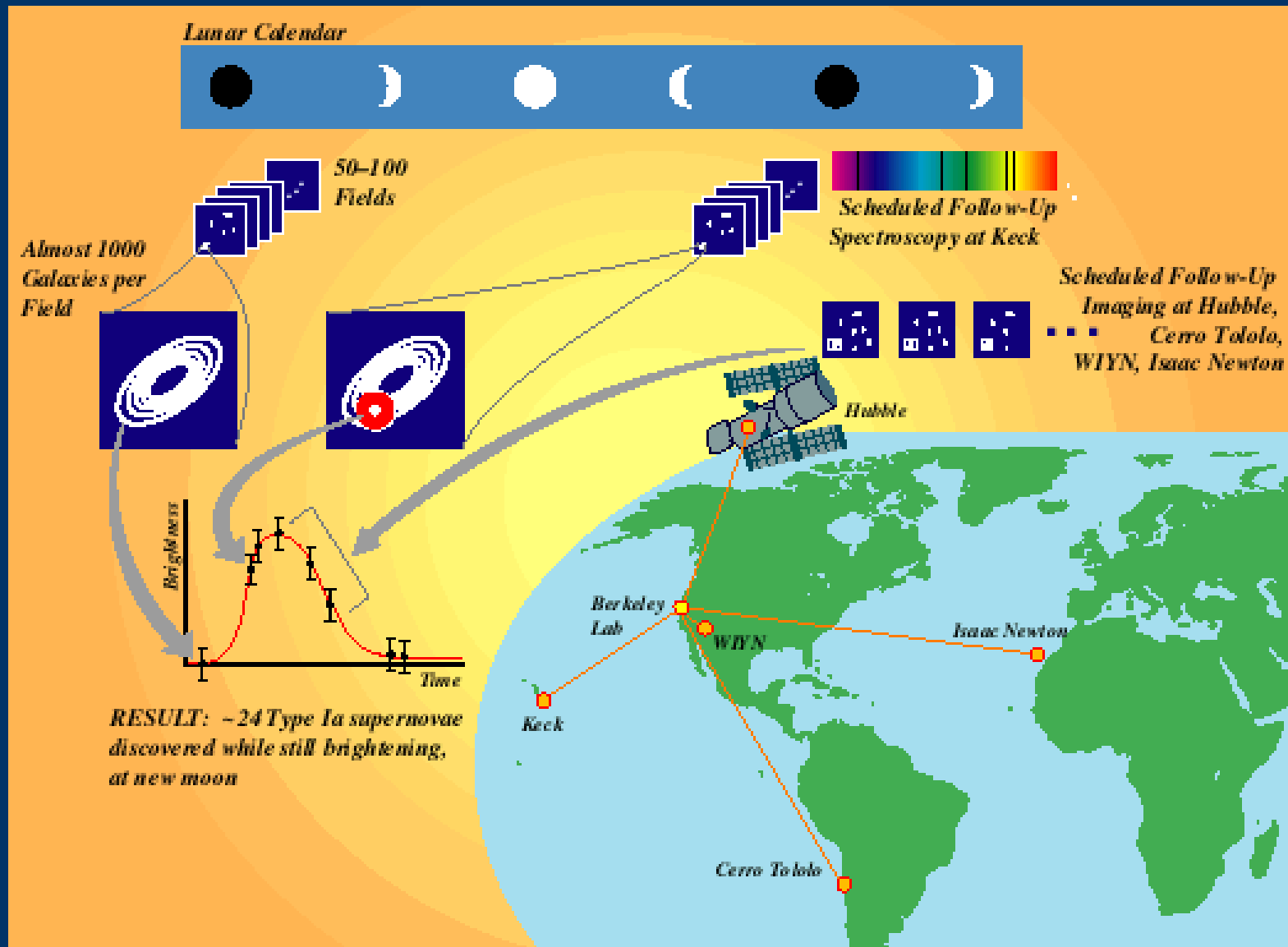
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



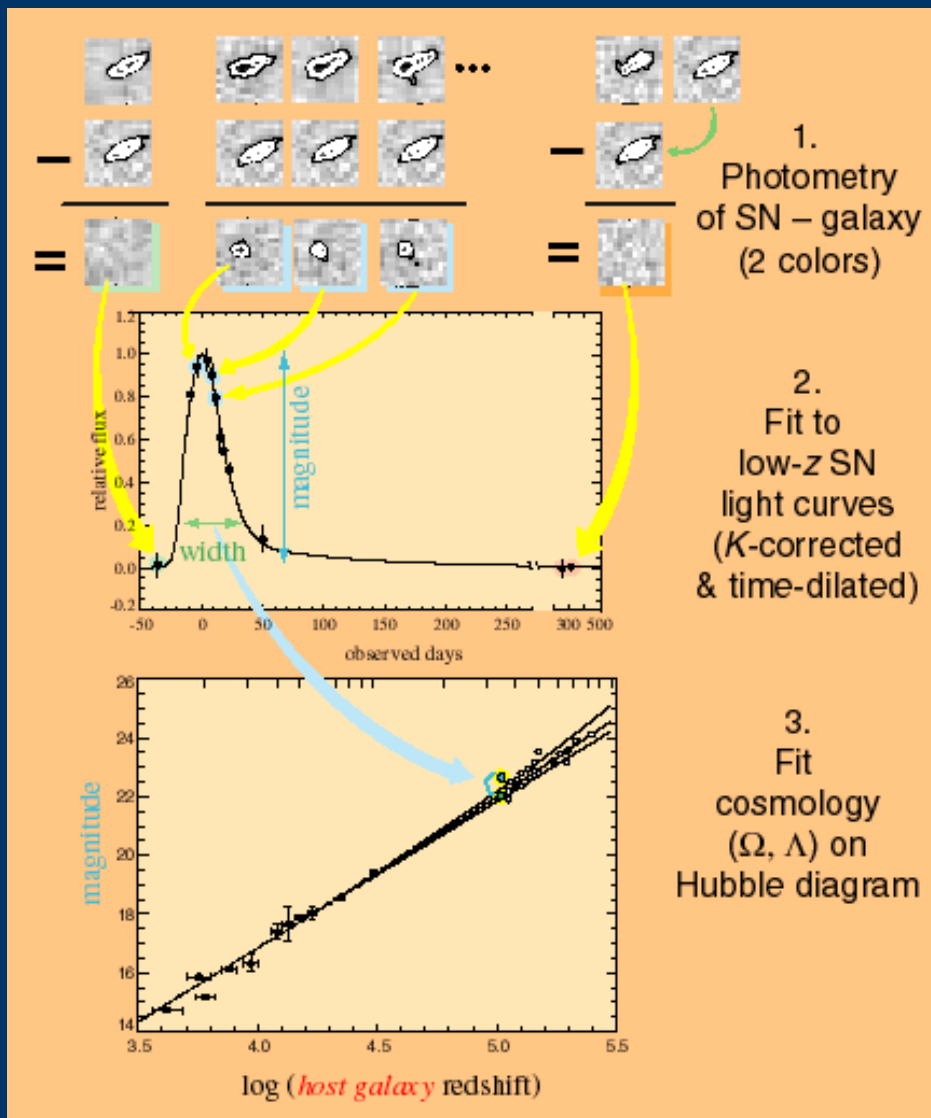
HSTで測定したSN 1997cjの明るさの時間変化



Supernova Cosmology Project: Strategy



Supernova Cosmology Project: analysis



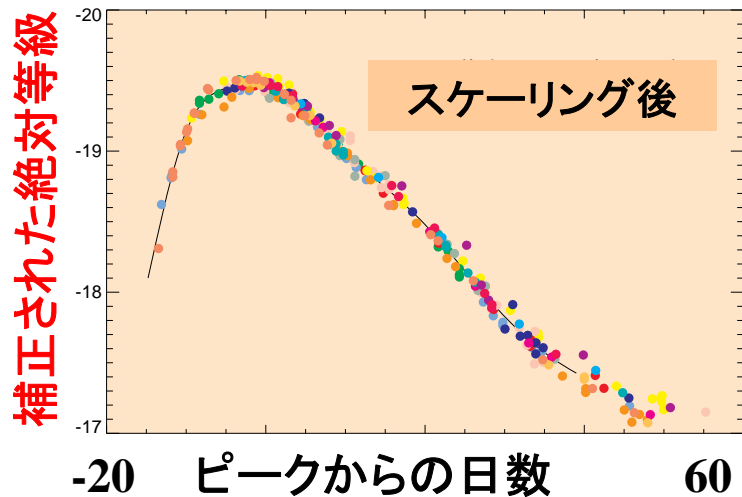
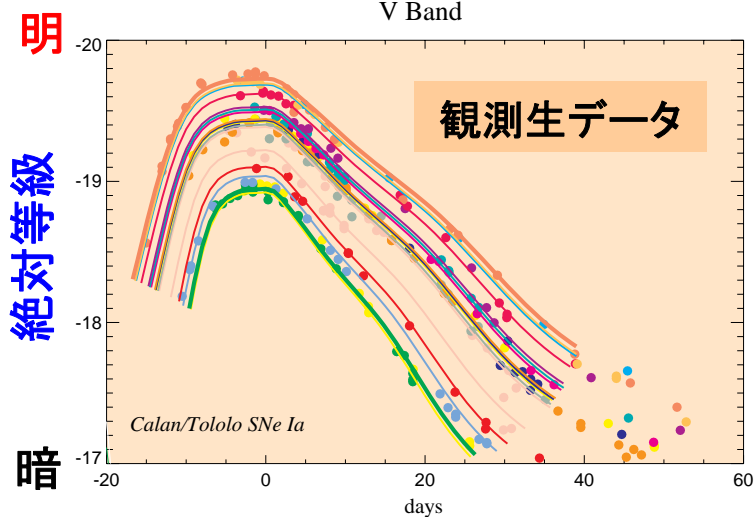
■ 検出方法

- 天球上の決めた場所を深く撮像
- 一月後に繰り返す
- 2つの画像を比べて明るく輝いた成分がないか探す

■ 分光観測

- 超新星のタイプを確定させる
- Ia型超新星: 水素のラインはなく、シリコンのラインはある

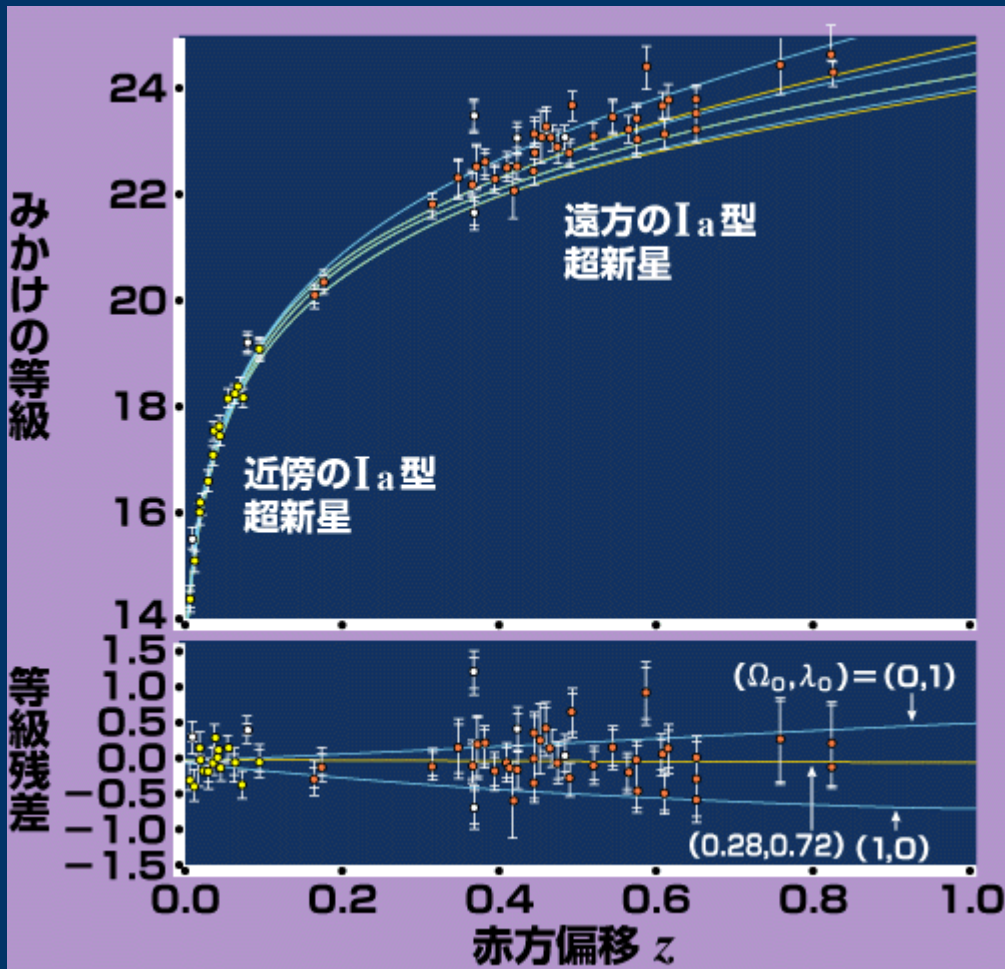
Ia型超新星多波長光度曲線フィット法



- 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)

超新星と宇宙定数



- 遠方超新星までの距離推定

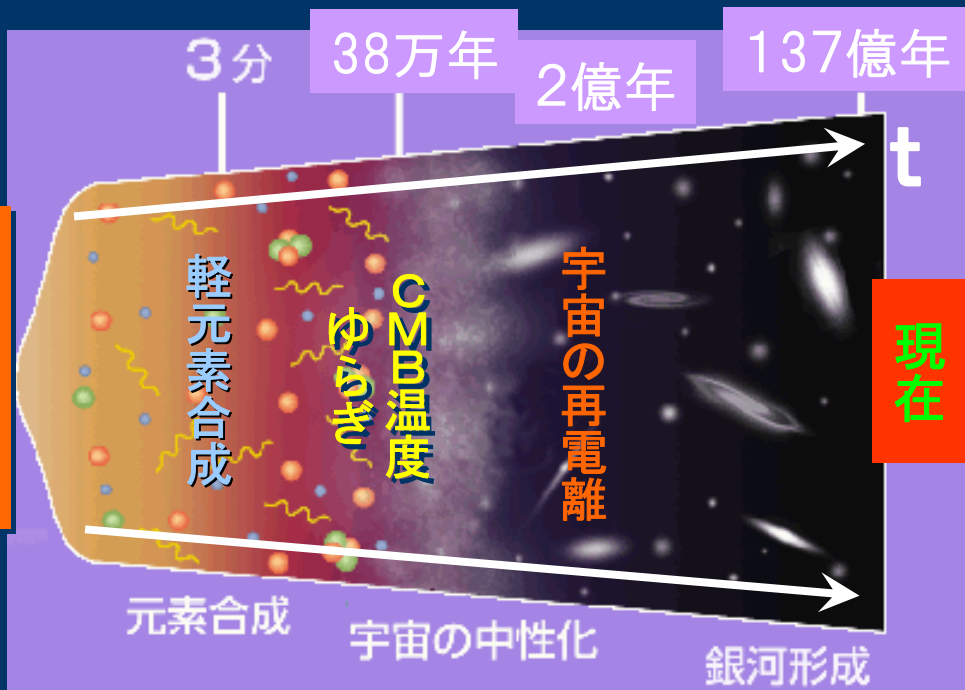
$$\Rightarrow \Omega_m \ll 1, \Omega_\Lambda > 0$$

宇宙定数の存在！

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

宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB)

CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波の名残り
(今から137億年前の宇宙の光の化石)



CMB:

Cosmic Microwave Background

■ 宇宙の晴れ上がり

- 誕生後約38万年で温度が3000度程度に下がった宇宙で、電子と陽子が結合して水素原子となる
- この宇宙の中性化により、宇宙は電磁波に対して透明となる

宇宙の誕生

軽元素合成

CMB温度ゆらぎ

CMB温度

宇宙の再電離

現在

元素合成

宇宙の中性化

銀河形成

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

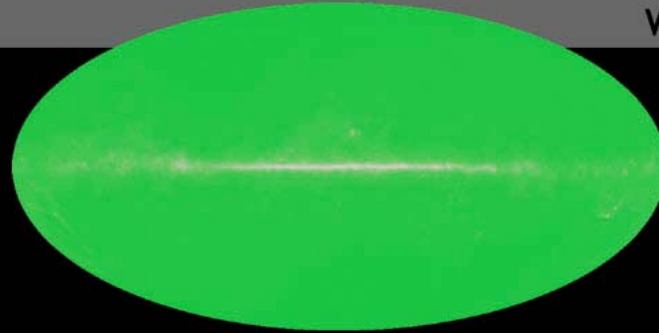
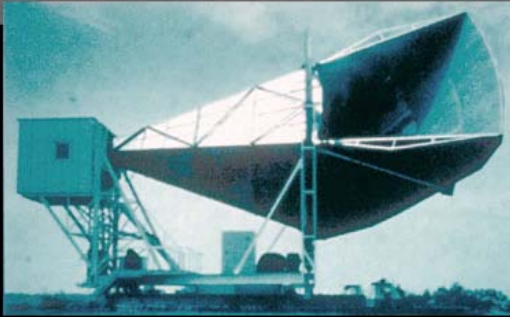
銀河団の形成

宇宙の大構造

CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

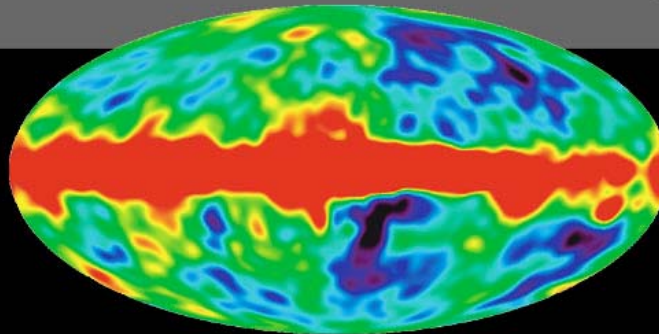
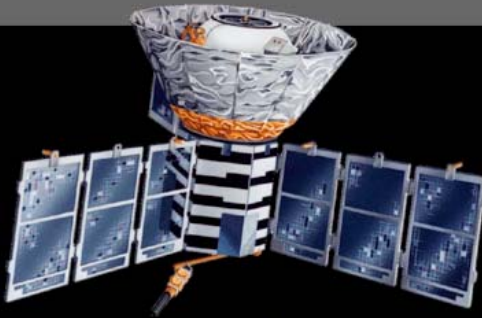
1965

Penzias and
Wilson



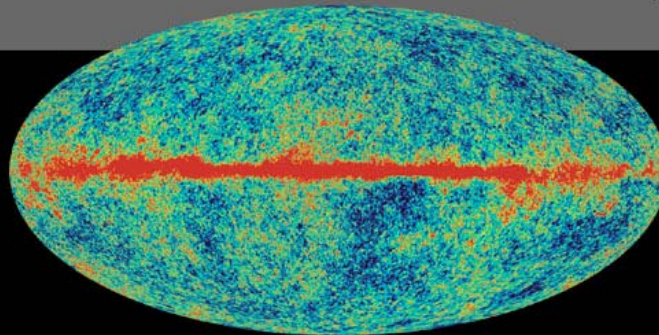
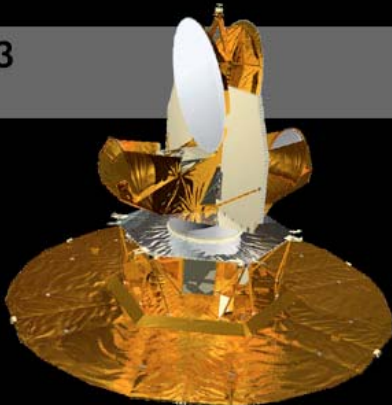
1992

COBE



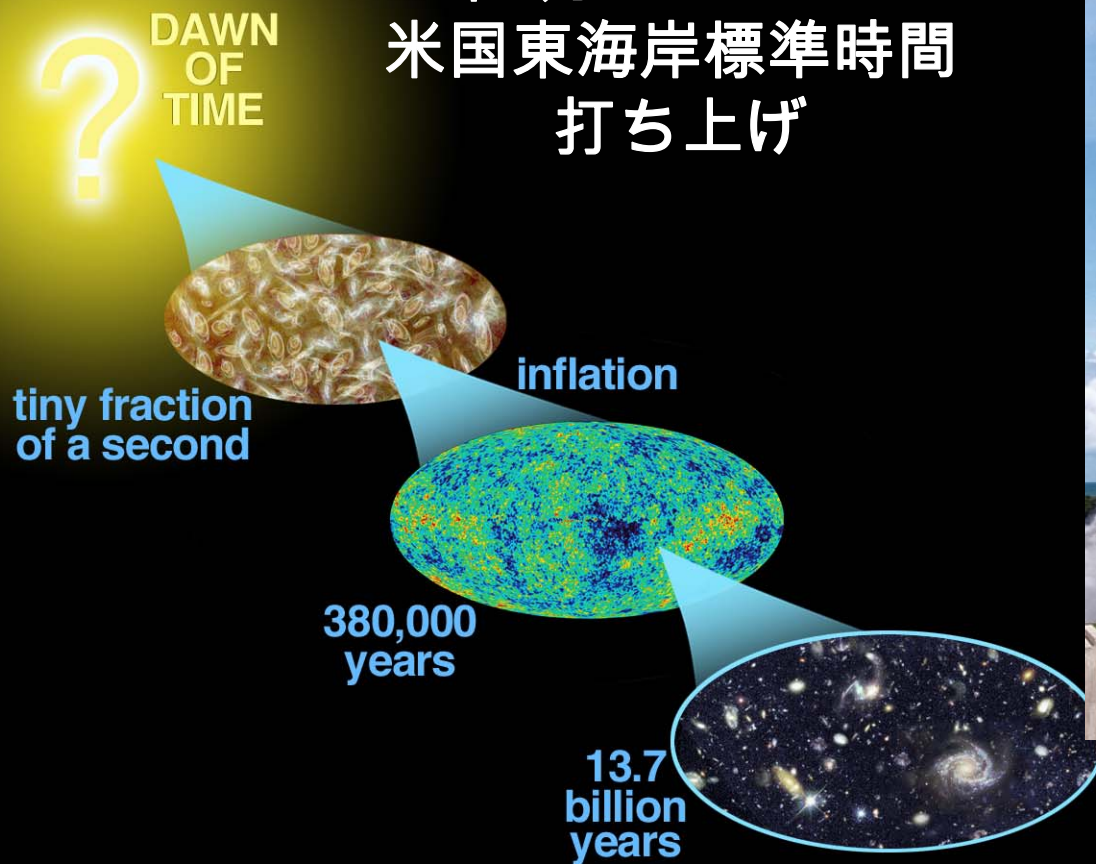
2003

WMAP



WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

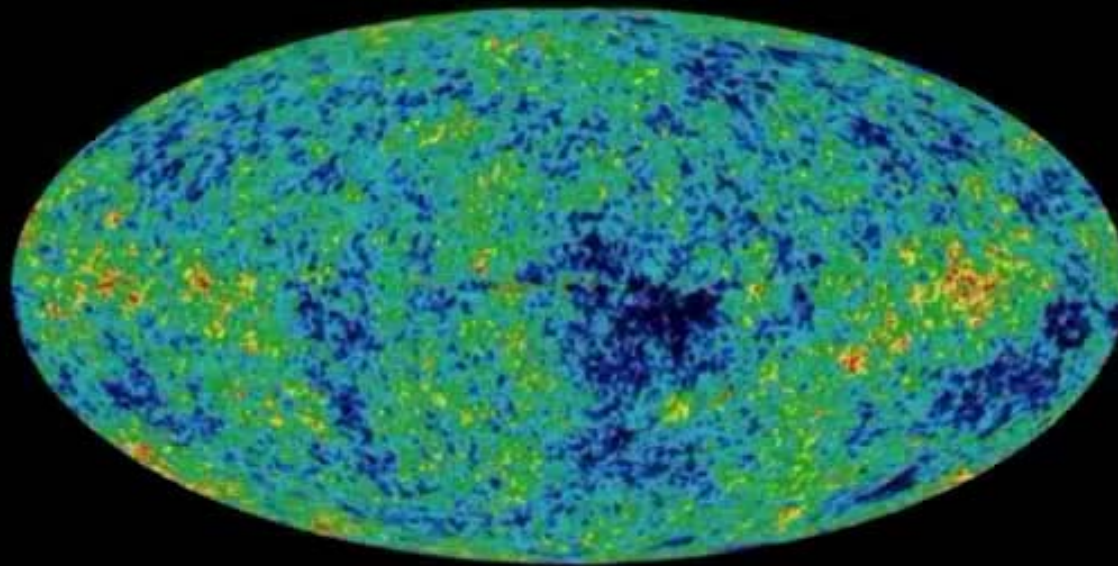
2001年6月30日 15:46:46
米国東海岸標準時間
打ち上げ



NASA/WMAP
サイエンスチーム提供

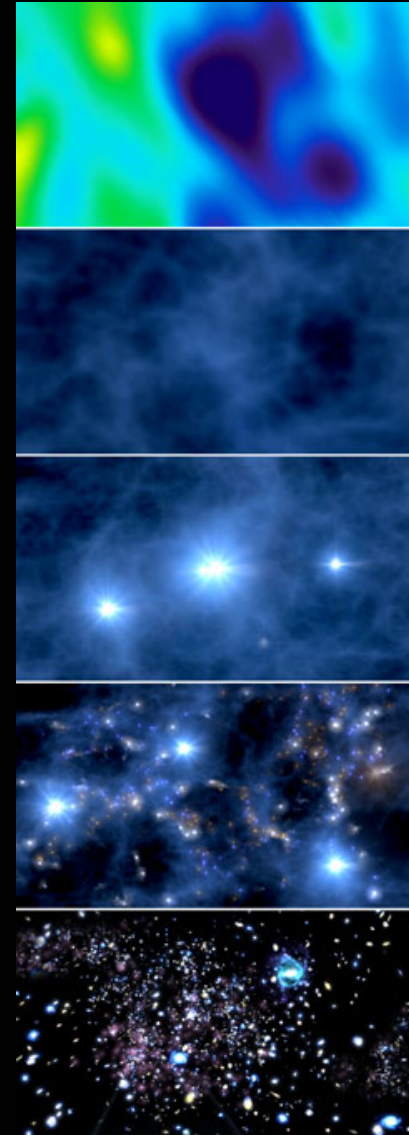
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

38万歳の宇宙から137億歳の現在へ

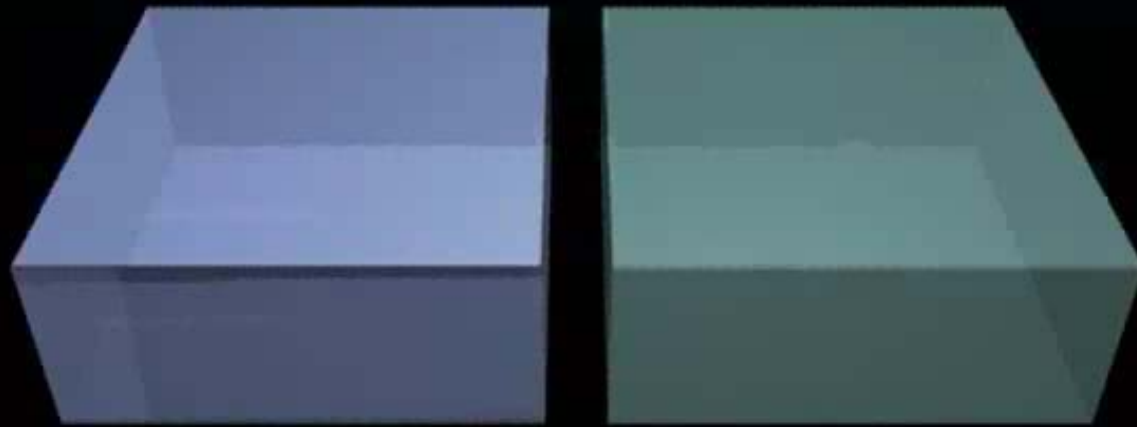


NASA/WMAP サイエンスチーム提供

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



温度地図のゆらぎパターン=宇宙の音波振動



NASA/WMAP
Science Team

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

CMBと宇宙の曲率

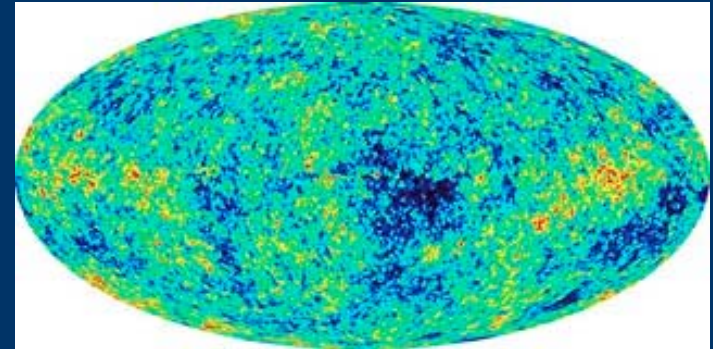
NASA/WMAP
Science Team

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

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

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

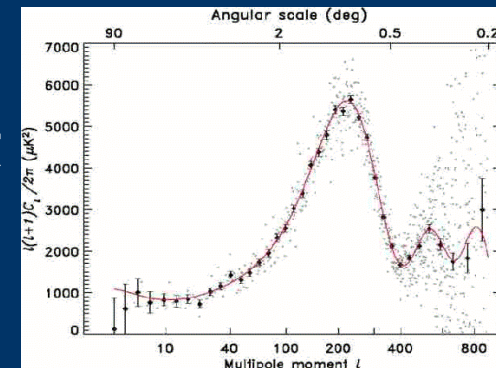
■ 解読された古文書内容

- 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

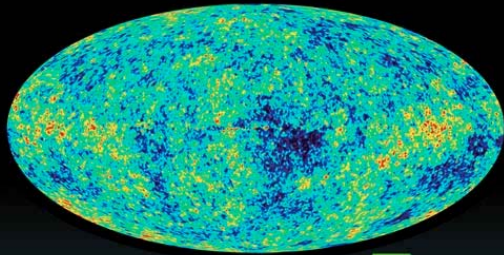


■ 隠されている情報

- 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

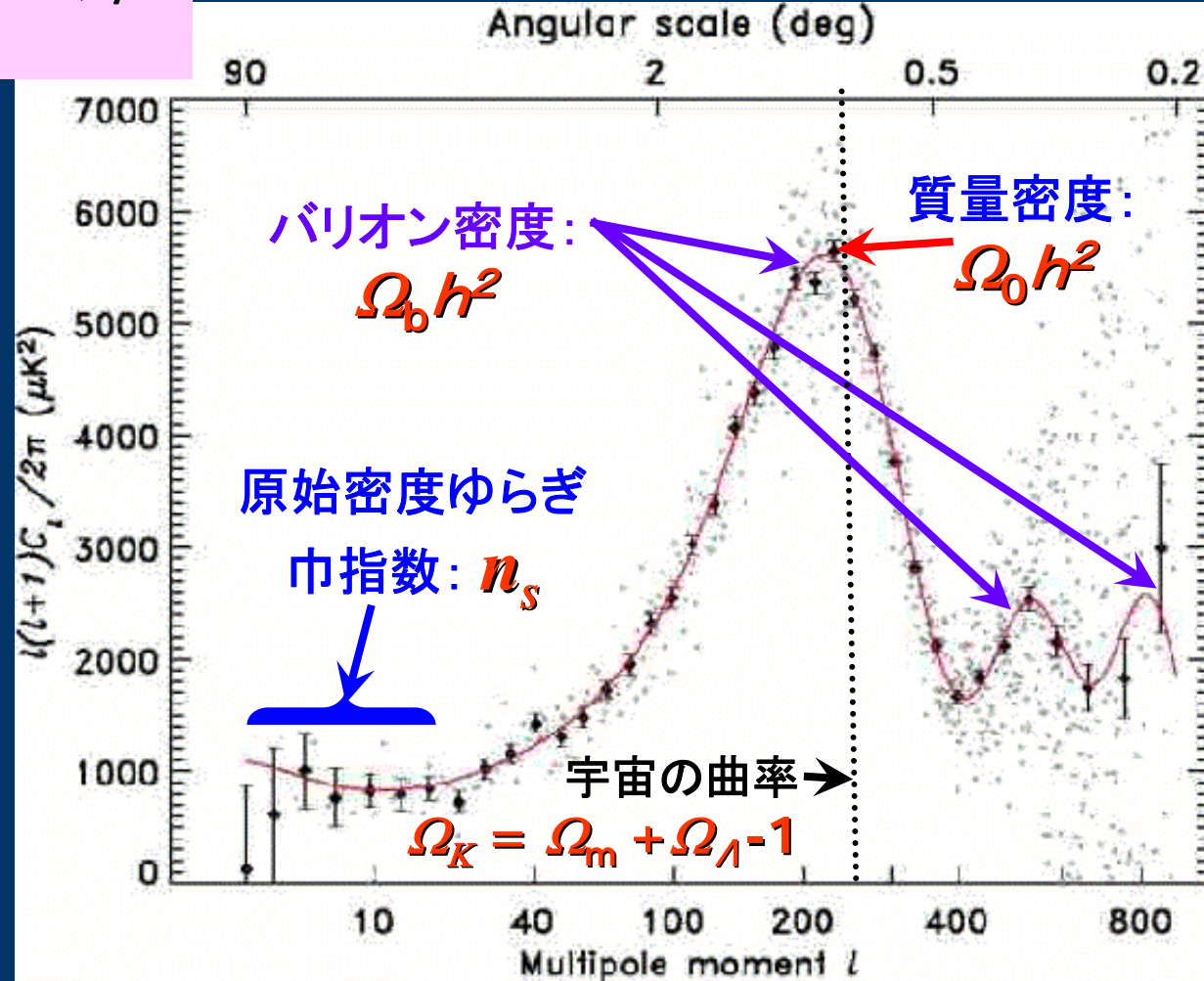
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



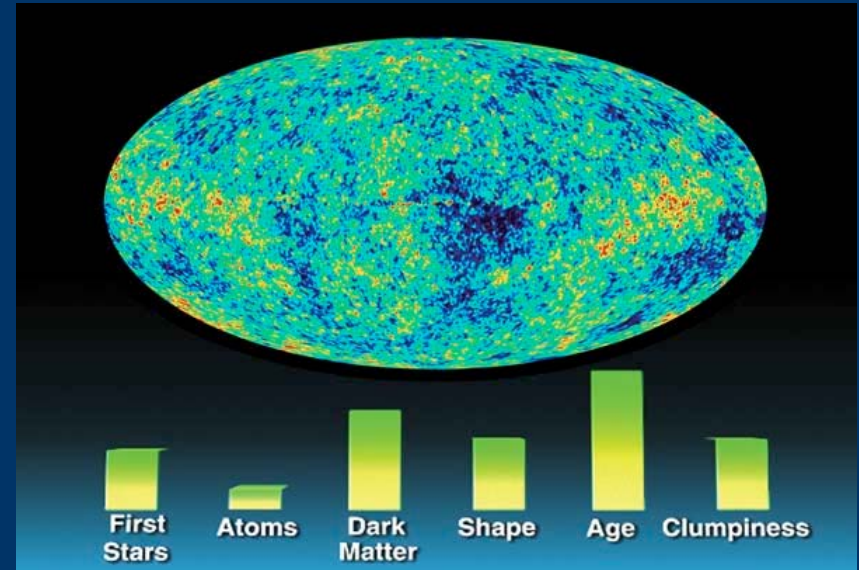
First Stars Atoms Dark Matter Shape Age Clumpiness

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

Spergel et al.
ApJS 148(2003)175



宇宙の古文書が 教えてくれたこと



- 宇宙の年齢は137億年
- 宇宙は曲率が0(平坦:ユークリッド幾何)
- 「最初の星」が宇宙が生まれて2億年後に誕生
- 宇宙の「物質」のほとんどは「暗黒物質」
- 実はさらに、「暗黒エネルギー」が宇宙を支配

WMAPと他の データの 組み合わせ て決定され た宇宙論パ ラメータの値

Ω_{tot}	1.02 ± 0.02	全エネルギー密度パラメータ
w	< -0.78	ダークエネルギーの圧力と密度の比 (95%信頼度での上限値)
Ω_{Λ}	0.73 ± 0.04	ダークエネルギー密度パラメータ
$\Omega_b h^2$	0.0224 ± 0.0009	バリオン密度パラメータ
Ω_b	0.044 ± 0.004	バリオン密度パラメータ
$n_b [\text{cm}^{-3}]$	$(2.5 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	バリオン個数密度
$\Omega_m h^2$	$0.135^{+0.008}_{-0.009}$	全物質密度パラメータ
Ω_m	0.27 ± 0.04	全物質密度パラメータ
$\Omega_\nu h^2$	< 0.0076	ニュートリノ質量密度パラメータ (95%信頼度での上限値)
η	$6.1^{+0.3}_{-0.2} \times 10^{-10}$	バリオンフォトン比
Ω_b / Ω_m	0.17 ± 0.01	全物質中のバリオンの割合
σ_8	0.84 ± 0.04	半径 $8h^{-1}$ Mpc の球のゆらぎの値
n_s	0.93 ± 0.03	$k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ でのゆらぎのスペクトル指数
$dn_s / d \ln k$	$-0.031^{+0.016}_{-0.018}$	$k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ でのゆらぎのスペクトル指数の微係数
r	< 0.9	$k_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$ でのテンソルスカラー比 (95%信頼度)
z_{eq}	3233^{+194}_{-210}	物質と輻射のエネルギー密度が等しくなる時期
z_{dec}	1089 ± 1	脱結合時の赤方偏移
Δz_{dec}	195 ± 2	脱結合時の赤方偏移範囲 (FWHM)
h	$0.71^{+0.04}_{-0.03}$	ハッブル定数
t_0	137 ± 2 億年	現在の宇宙年齢
t_{dec}	$37.9^{+0.8}_{-0.7}$ 万年	脱結合時の宇宙年齢
t_{r}	$1.8^{+2.2}_{-0.8}$ 億年	再イオン化時の宇宙年齢
z_{r}	20^{+10}_{-9}	再イオン化時の赤方偏移
τ	0.17 ± 0.04	光学的深さ

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

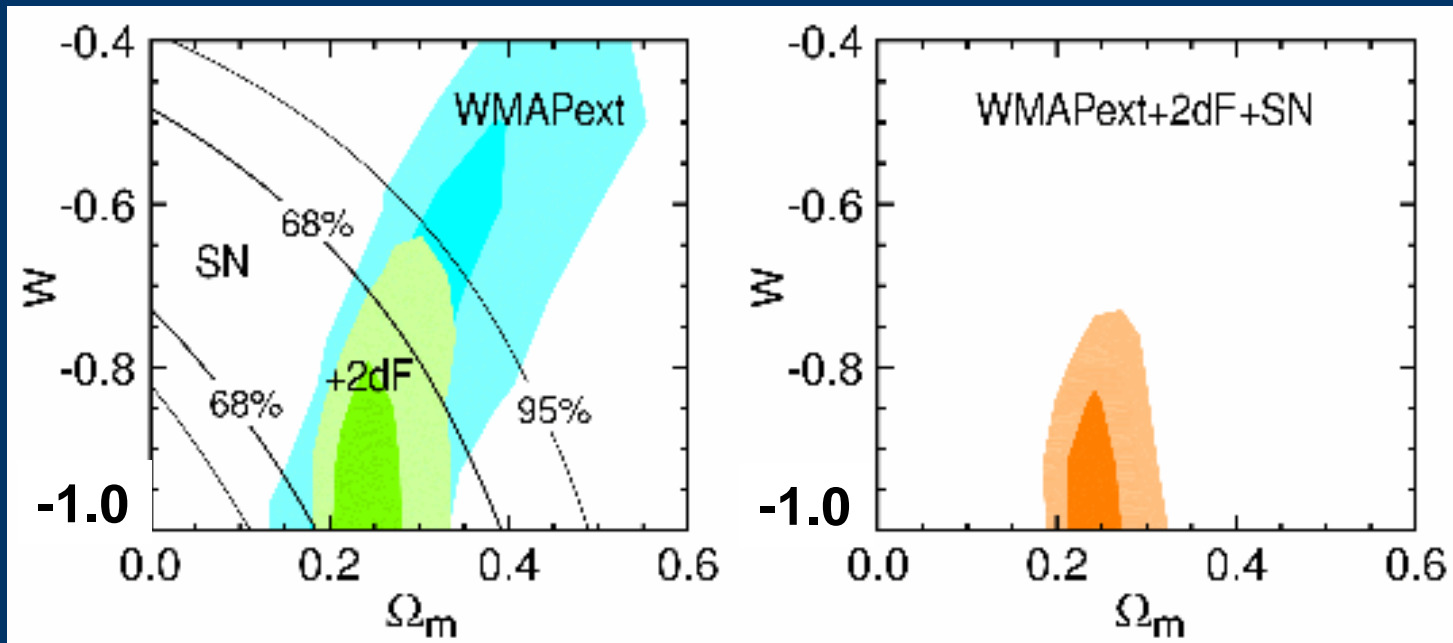
- 圧力とエネルギー密度の比が $w \Rightarrow p = w \rho$
 - $w=0$: ダークマター、 $w=1/3$: 輻射、 $w=-1$: 宇宙定数
 - 相対論では重力は
 $\Delta \phi = 4 \pi G (\rho + 3p) = 4 \pi G \rho (1 + 3w)$ なので
- $w < -1/3 \Rightarrow$ 万有斥力**
- w が時間に依存しなければ $\rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
 - $-1 < w < 0$: (一般の)ダークエネルギー
 - ここまでくると、 w が定数である理由すらなくなる

$$w = w(t)$$

ダークエネルギーは宇宙定数か？

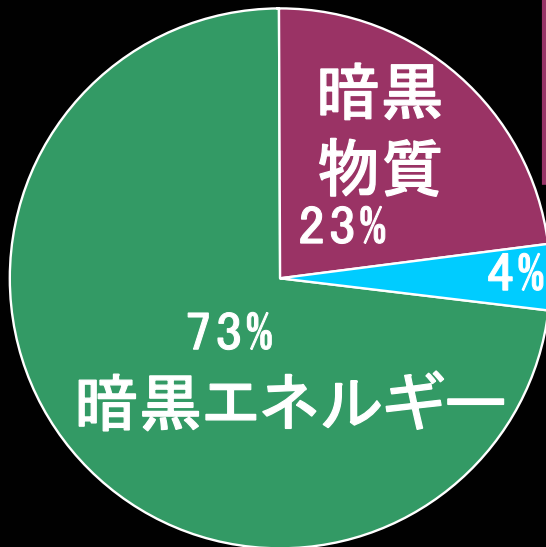
■ 宇宙の状態方程式

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



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？

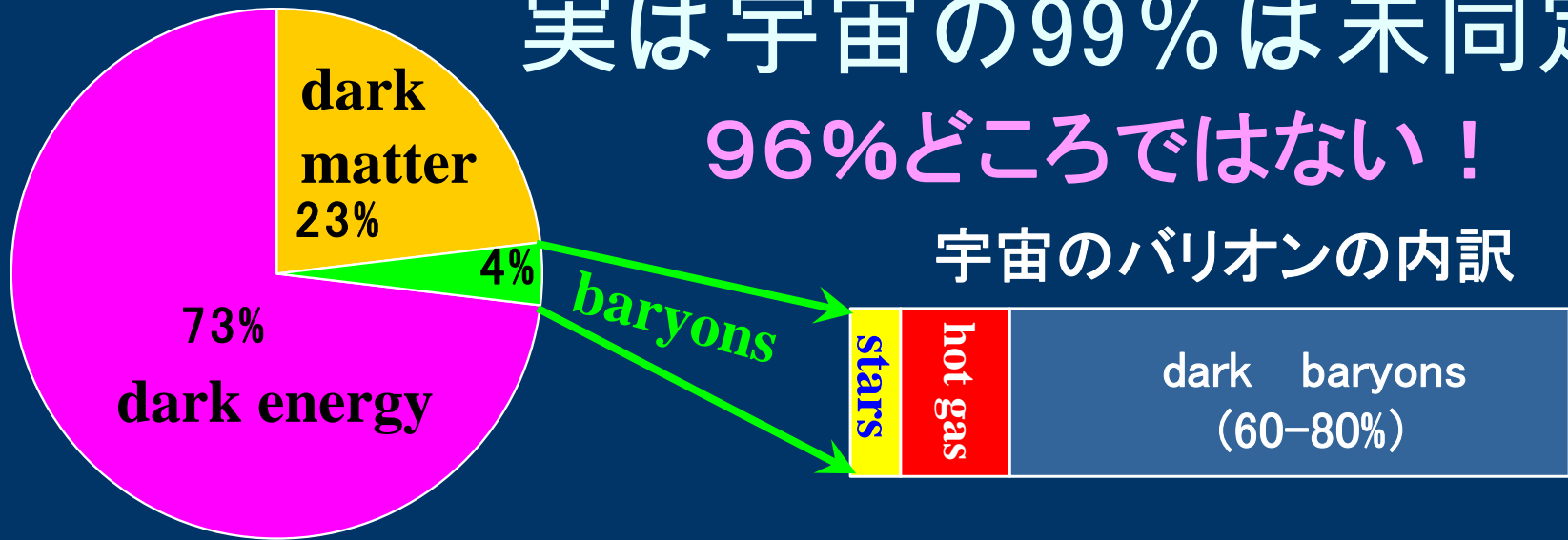
通常物質 (バリオン)

- 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？

- 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

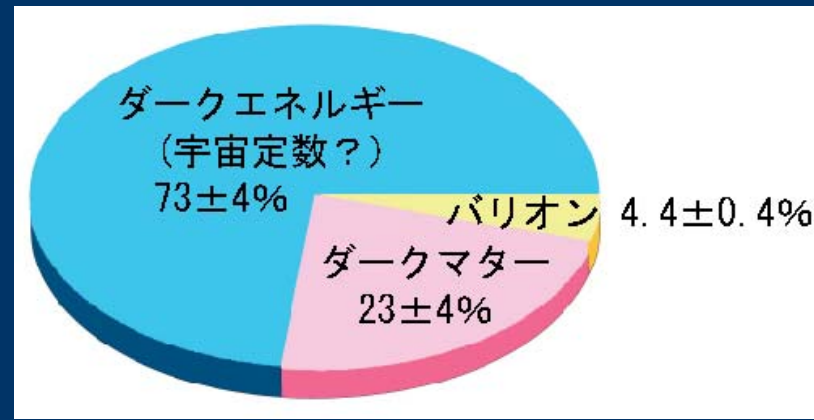
実は宇宙の99%は未同定 96%どころではない！

宇宙のバリオンの内訳



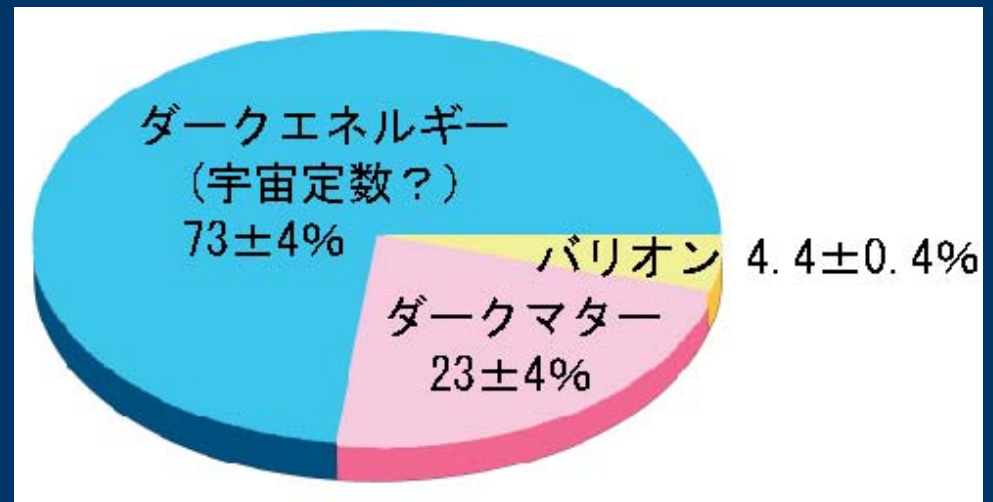
Component	Central	Maximum	Minimum	Grade ^a
Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan & Peebles: ApJ 503 (1998) 518				
1. Stars in spheroids	0.0026 h_{70}^{-1}	0.0043 h_{70}^{-1}	0.0014 h_{70}^{-1}	A
2. Stars in disks	0.00086 h_{70}^{-1}	0.00129 h_{70}^{-1}	0.00051 h_{70}^{-1}	A-
3. Stars in irregulars	0.000069 h_{70}^{-1}	0.000116 h_{70}^{-1}	0.000033 h_{70}^{-1}	B
4. Neutral atomic gas	0.00033 h_{70}^{-1}	0.00041 h_{70}^{-1}	0.00025 h_{70}^{-1}	A
5. Molecular gas	0.00030 h_{70}^{-1}	0.00037 h_{70}^{-1}	0.00023 h_{70}^{-1}	A-
6. Plasma in clusters	0.0026 $h_{70}^{-1.5}$	0.0044 $h_{70}^{-1.5}$	0.0014 $h_{70}^{-1.5}$	A
7a. Warm plasma in groups	0.0056 $h_{70}^{-1.5}$	0.0115 $h_{70}^{-1.5}$	0.0029 $h_{70}^{-1.5}$	B
7b. Cool plasma	0.002 h_{70}^{-1}	0.003 h_{70}^{-1}	0.0007 h_{70}^{-1}	C
7'. Plasma in groups	0.014 h_{70}^{-1}	0.030 h_{70}^{-1}	0.0072 h_{70}^{-1}	B
8. Sum (at $h = 70$ and $z \simeq 0$).....	0.021	0.041	0.007	...

まとめ： 研究の進展 によって、ますます謎 が深まってしまった



- 20世紀物理学の飛躍的進展は、「通常の物質」の構成要素については極めて深い理解をもたらした
- 一方、21世紀最後の数年間の宇宙観測によって、この「通常の物質」は、宇宙全体のわずか4%でしかないことが判明
 - 宇宙の果てを見ることで微視的世界の新しい階層が明らかとなった
 - 宇宙全体の約23%は暗黒物質、約73%は暗黒エネルギー
- **我々は宇宙の96% (99%?)を全く理解していなかった**
- 暗黒物質の直接検出、暗黒エネルギーの正体の理解は、21世紀科学の単なる一課題にとどまらず、新しい自然法則を探り当てる上での本質的な鍵

どこが違うのだろうか？



⇒ やはり間接的でなくより直接的な証拠が欲しい

ダークマター探索

- 歴史的には、天文観測がダークマター存在確認に唯一寄与したことは事実
 - 逆に言えば、いまや、天文学的にできることはほぼやりつくした
- 次は直接検出をめざすべきで、すでに天文学から巢立ったと考えるべき
 - 測定技術・感度もそれなりに現実的なレベルに到達しつつある
 - 5-10年で何らかのブレイクスルーがあってもおかしくない
- 同定すれば、(素粒子)物理学に与える意義は計り知れない
 - ハイリスク・ハイリターンなので自分でやる勇気はないが、個人的にはこれが一番有望だと思っていたりする

ダークエネルギー探査

- 「アインシュタインが予言した」という修飾句がつけられるので、大衆受けを狙いやすい
 - 市民が意義を理解したと誤解してもらえるテーマは、同レベルの官僚あるいは本当に賢い官僚のどちらにも受け入れられてもらいやすい
- まずは大量に存在するものから調べるべきなのは当然
 - しかし幸いなことに、直接検出は極めて時期尚早
 - 理論的にも何一つわかっておらず、直接検出など100年スケールの話なので、物理関係とは競合しない
- 逆に言えば、まだまだ天文観測から攻めることを正当化できる
 - 「宇宙の状態方程式を探る」とかいう受けやすいキャッチフレーズの下に、超新星サーベイ、重力レンズマッピング、高赤方偏移銀河サーベイと絡めて、数多くの計画が提案されている(特にアメリカ)