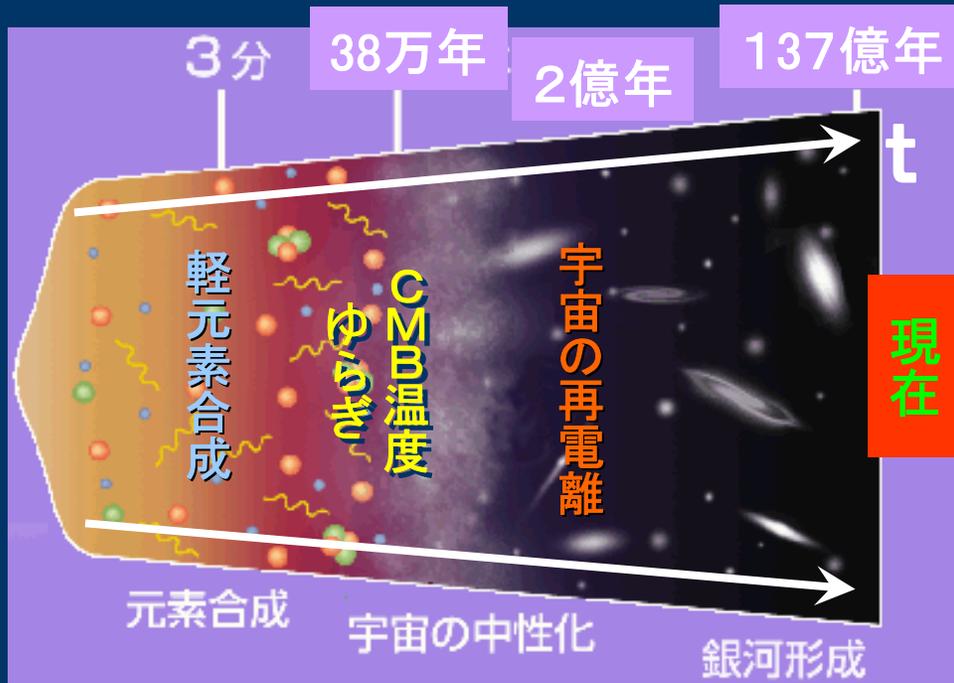


# 宇宙の組成を決める

2005年6月24日 東京大学理学部  
一般相対論講義(第10回)資料



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。

# 宇宙論研究の歴史年表

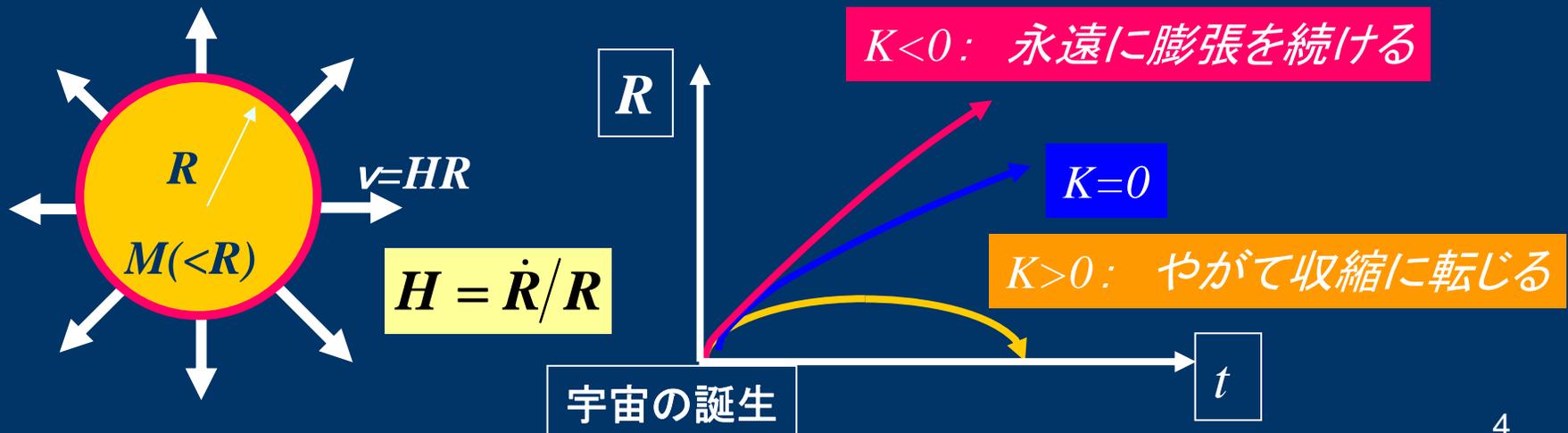
- 1916年～ 一般相対論的宇宙モデル  
(アインシュタイン、フリードマン、ルメートル)
- 1929年 宇宙膨張の発見(ハッブル)
- 1946年～ ビッグバンモデルの提唱(ガモフ)
- 1965年 CMBの発見(ペンジアス、ウィルソン)
- 1980年～ 宇宙の大構造の発見  
素粒子論的宇宙論の誕生  
宇宙論的数値シミュレーション
- 1992年 CMB温度ゆらぎの検出(COBE)
- 1990年代後半～ 宇宙論パラメータの精密決定  
平坦な宇宙、暗黒物質、宇宙定数(暗黒エネルギー)

# 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)  
 $\rho$ : 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

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

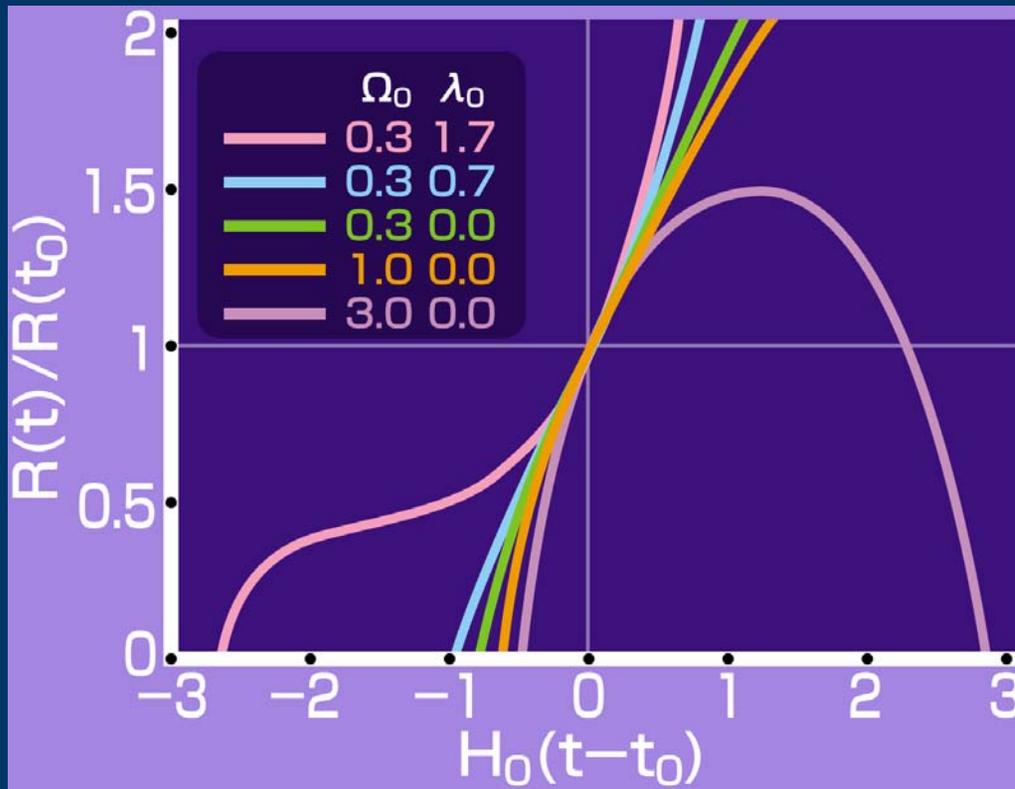
ハッブルパラメータ

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 :

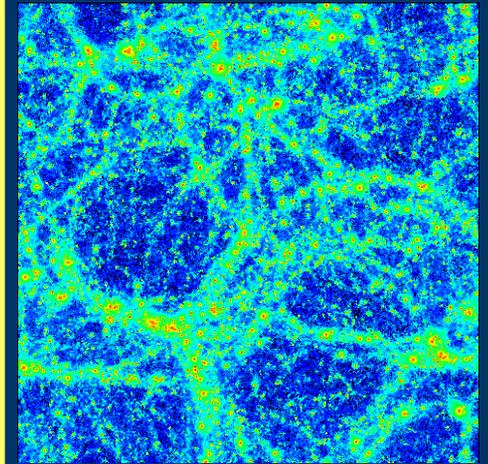
$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \times 10^{-29} h^2 \text{g/cm}^3$$

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

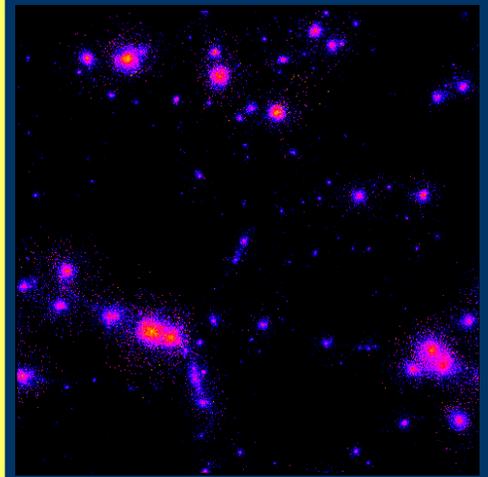
# 宇宙のダークマター

- 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

# ダークマターの候補

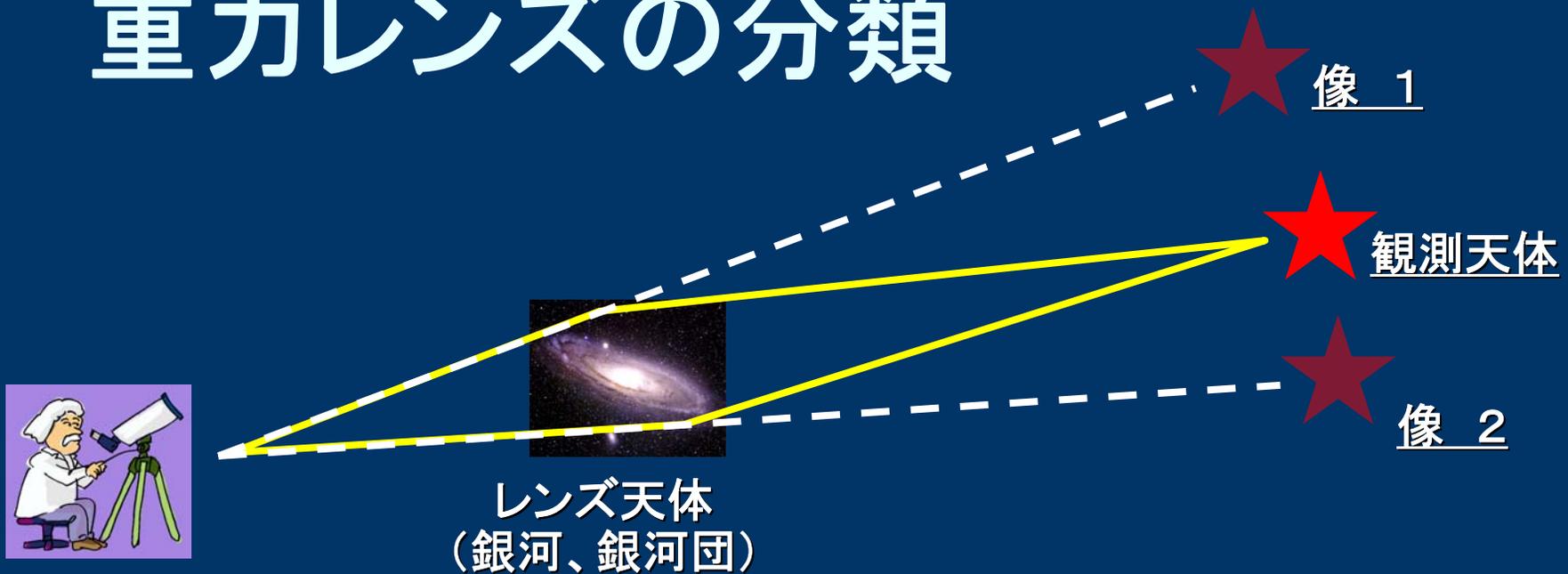
## ■ 天文学的ダークマター

- 重力レンズの観測により銀河系ハローの暗黒物質の一部は小質量天体であることがわかっている
- 宇宙のダークマターのすべてを説明することはできない(ビッグバン元素合成からの制限)

## ■ 素粒子論的ダークマター

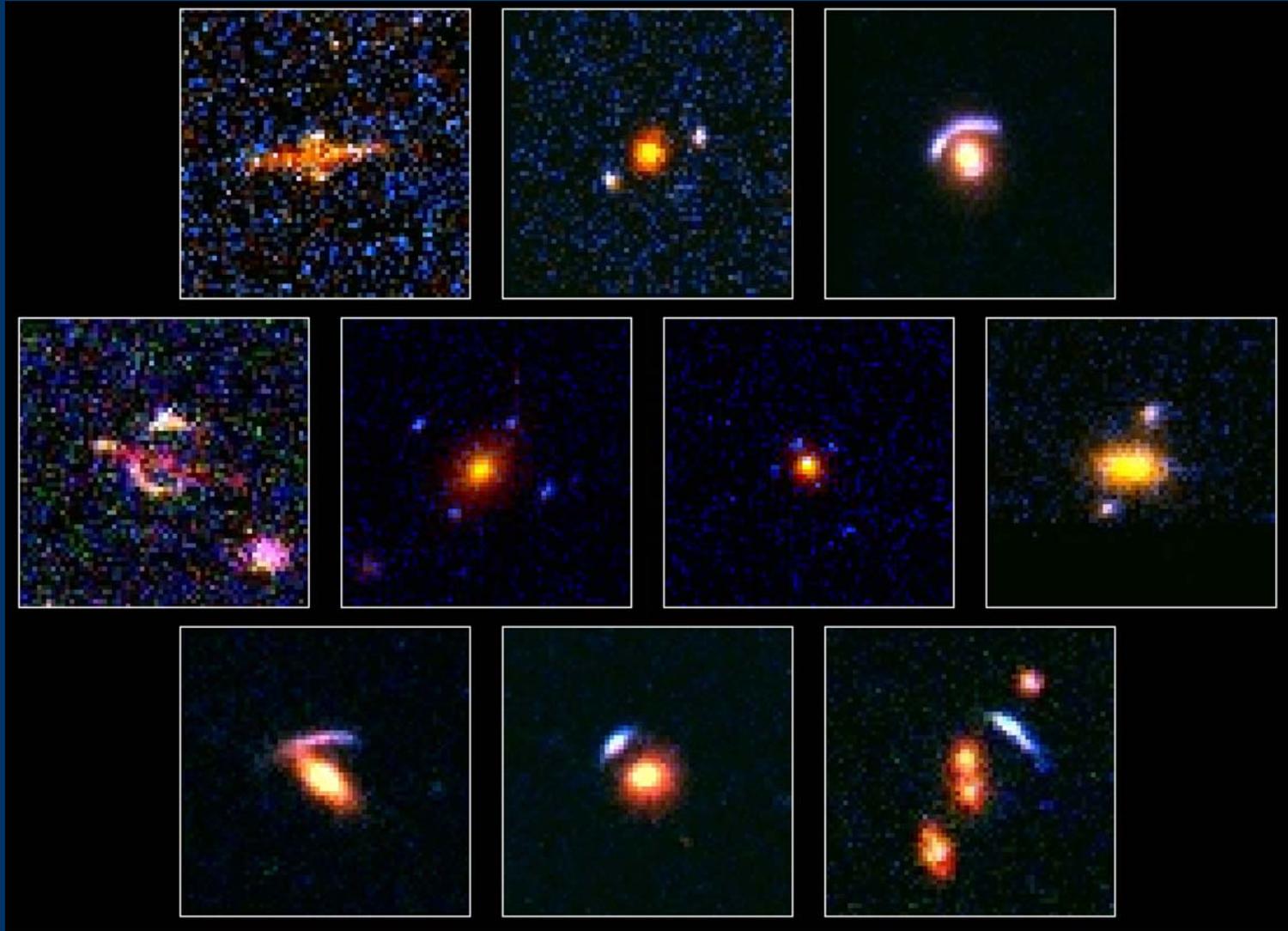
- ニュートリノ以外のダークマター粒子(冷たいダークマター: **Cold Dark Matter**)が必要
- 理論モデルは数多く提案されているが直接的な実験・観測からの裏づけはない

# 重力レンズの分類

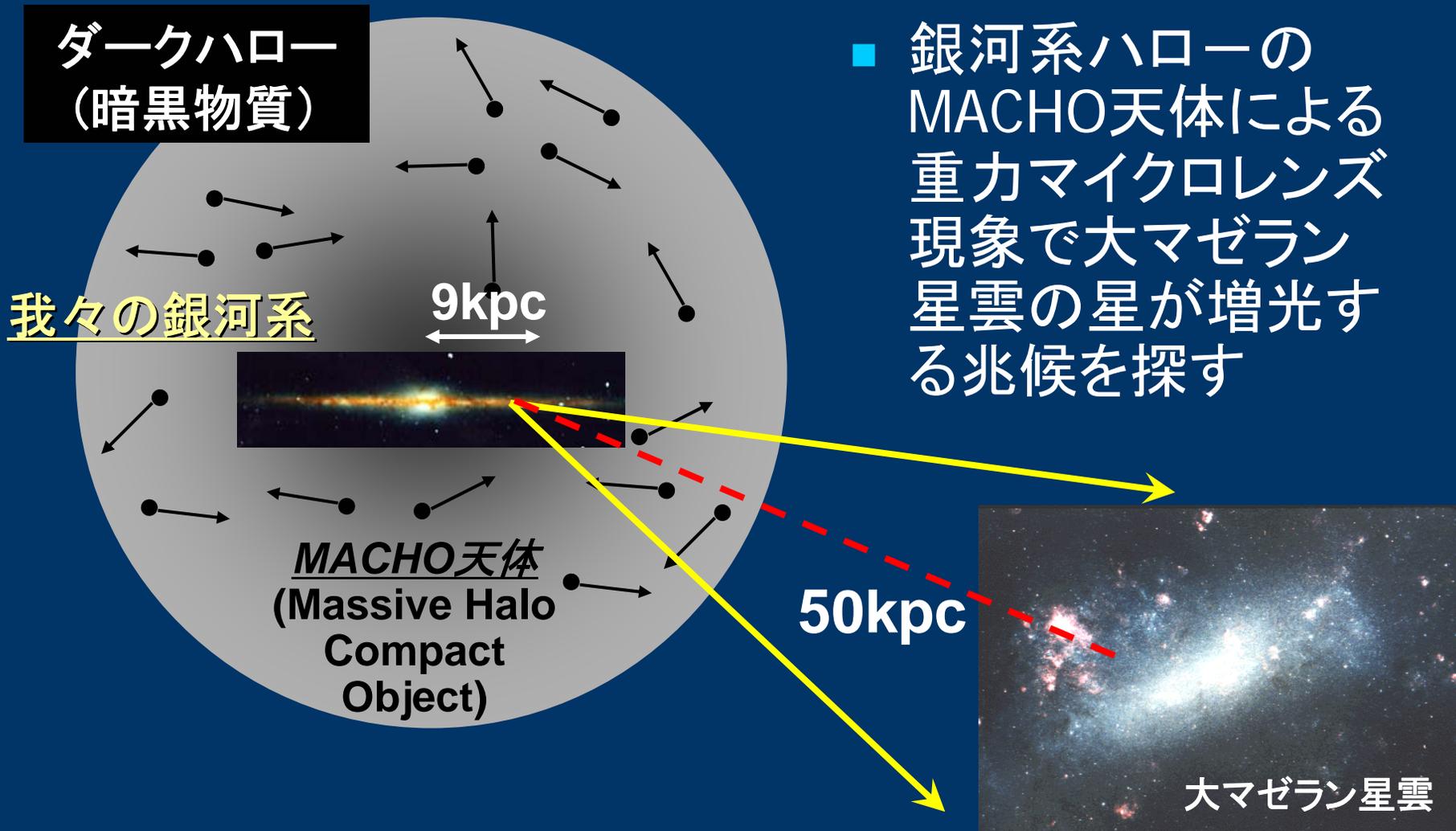


- 光線は重力場によって曲げられる
  - 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
  - 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
  - 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)

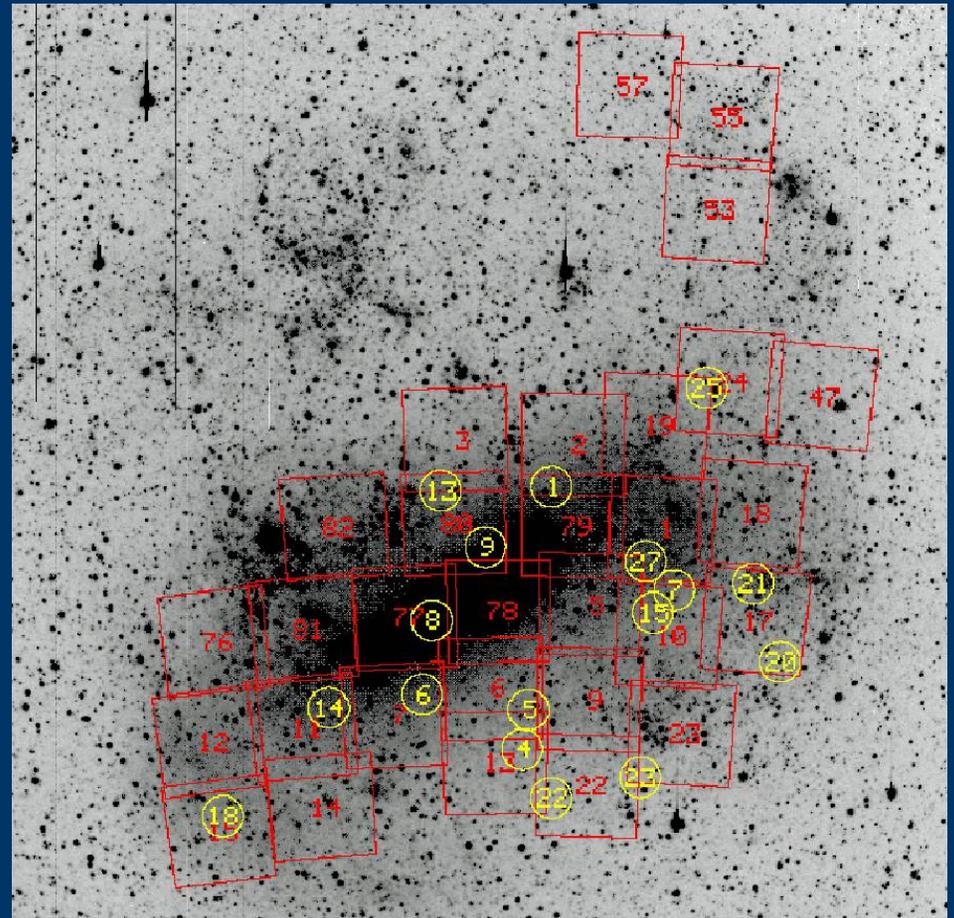
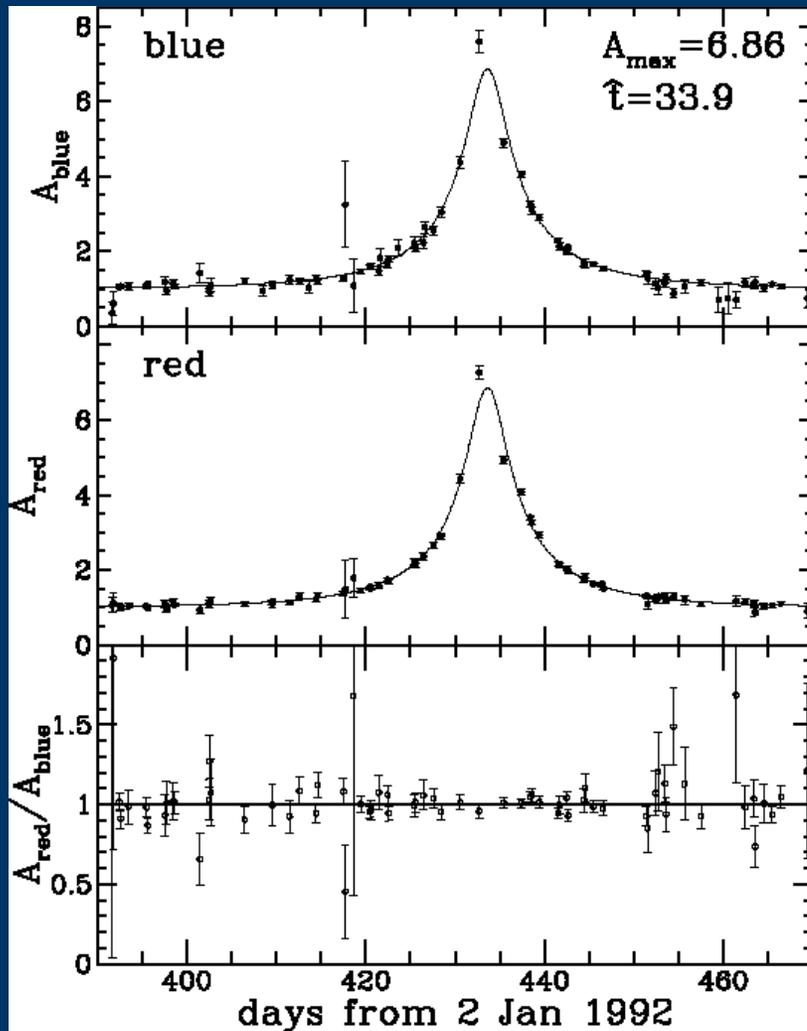
# HSTによる重カレンズギャラリー



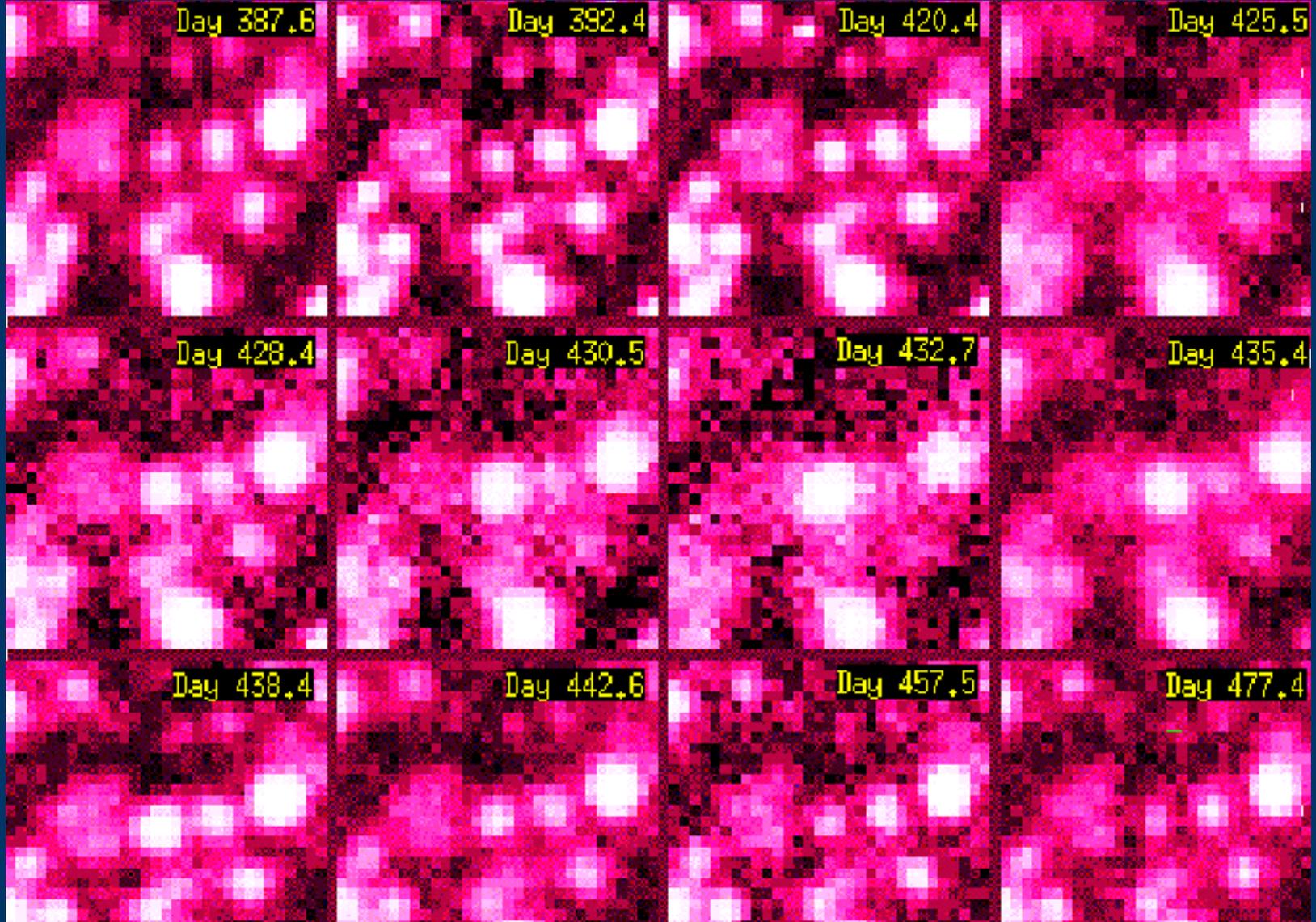
# 重カマイクロレンズによるMACHO探査



# MACHOイベントの光度曲線

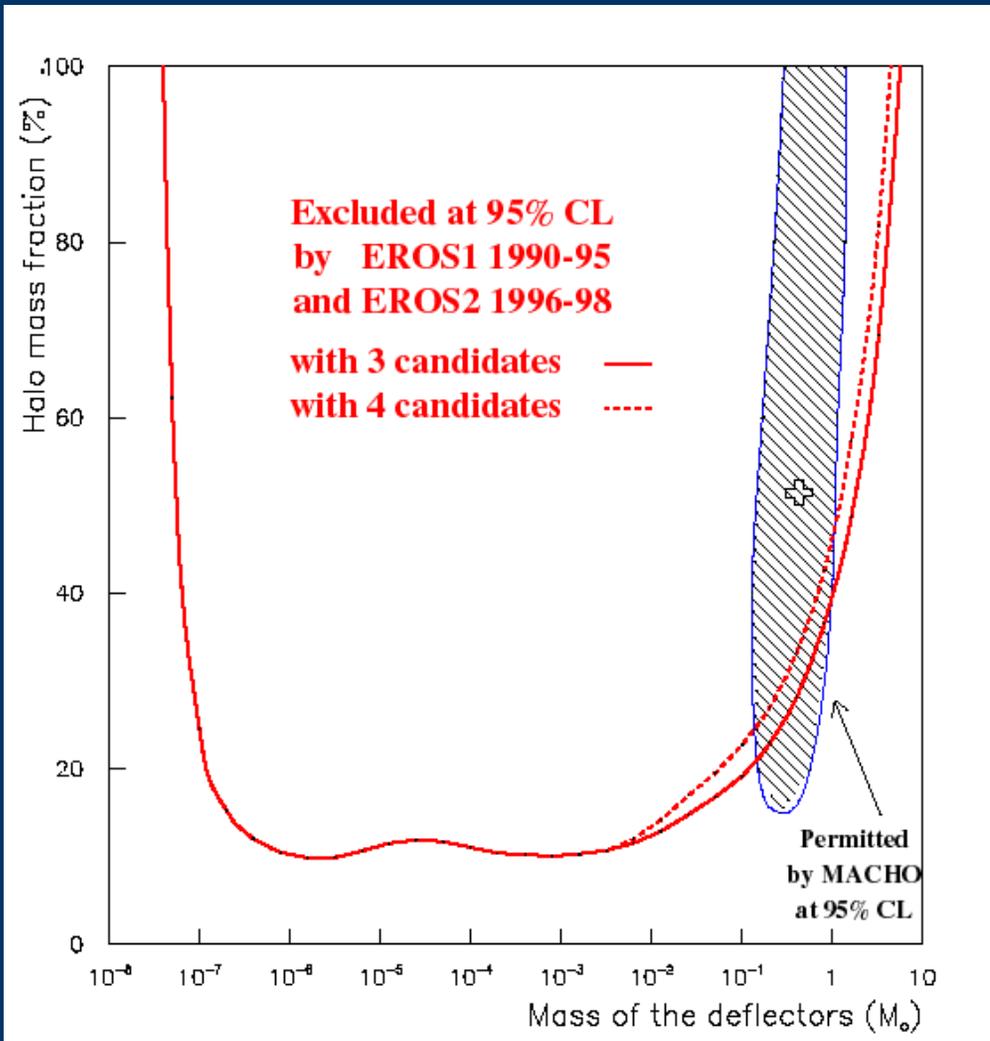


# Massive Compact Halo Objectの発見



最初に発見された重カマイクロレンズ現象 (Alcock et al. 1993)

# 銀河系ダークマターの組成



- 銀河系ハローには確かにMACHOが存在する
- 質量は太陽の0.1から1倍程度
- ハロー全体に占める質量は2割程度(つまり、それ以外のダークマターも存在する)

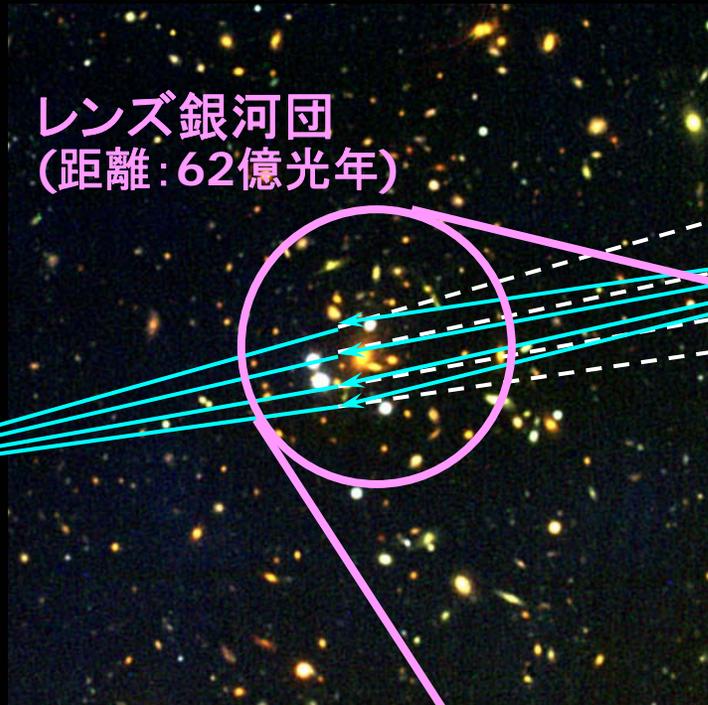
**MACHO mass fraction**  
**Lasserre et al. (2000):**  
**EROS collaboration**

# すばるが見た最大のクエーサー重力レンズ

すばる 8.2m  
望遠鏡



すばる望遠鏡の画像



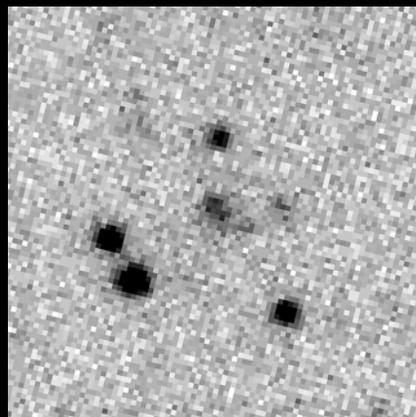
レンズ銀河団  
(距離: 62億光年)

稲田、大栗ほかSDSSグループ  
Nature 426 (2003) 810

クエーサー  
SDSS J1004  
(98億光年)

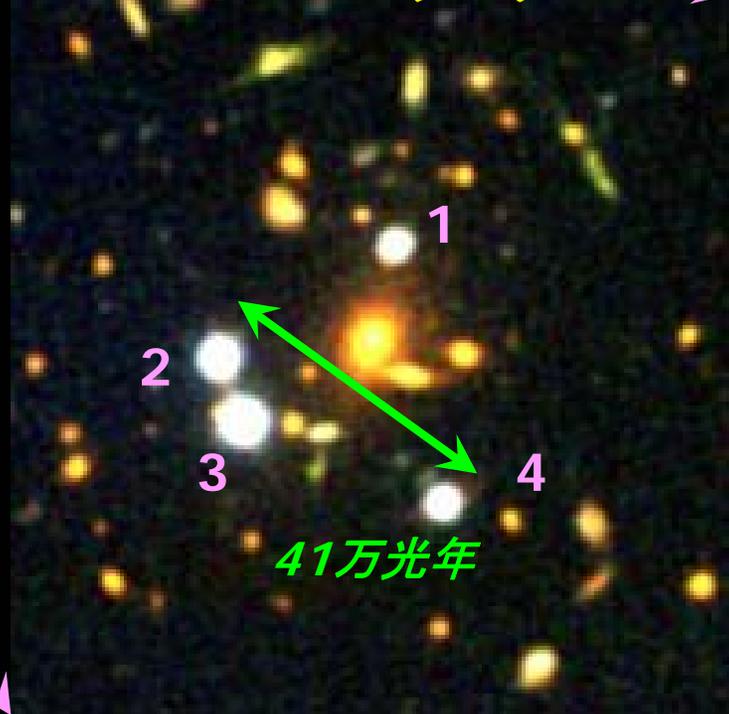


SDSS専用  
2.5m望遠鏡



SDSSの画像

すばる望遠鏡の画像(拡大)



41万光年

# 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      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 $\Lambda$ 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
  - $\Lambda$ 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、 $\Lambda$ 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、 $\Lambda$ 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

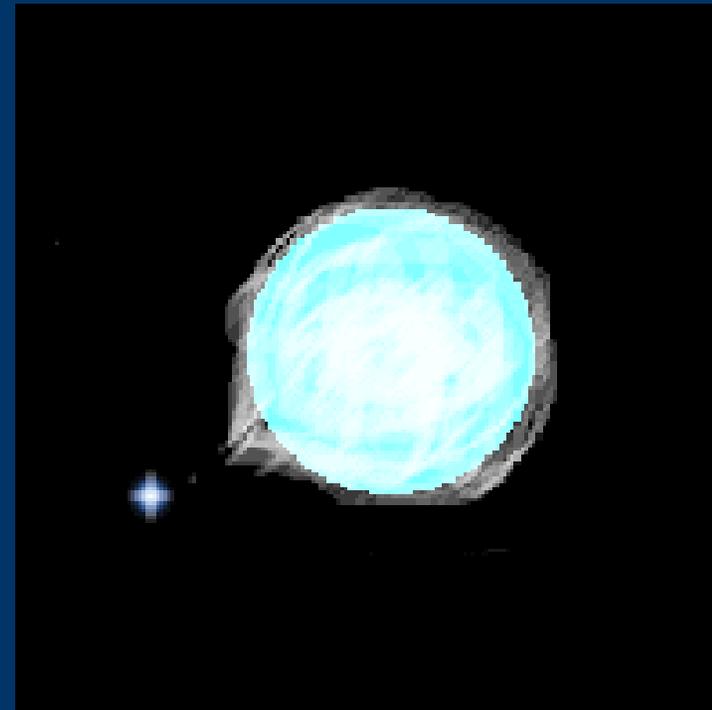
- 宇宙年齢(ハッブル定数) vs. 球状星団の年齢
- 審美眼期待
  - 宇宙の曲率は0であってほしい  $\Leftrightarrow \Omega_m + \Omega_\Lambda = 1$
  - 宇宙の質量密度  $\Omega_m < 1 \Rightarrow \Omega_\Lambda > 0$
- 遠方銀河のnumber count (N-m relation)
- Ia型超新星のハッブル図 (m-z relation)
- CMB温度ゆらぎスペクトル

# 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

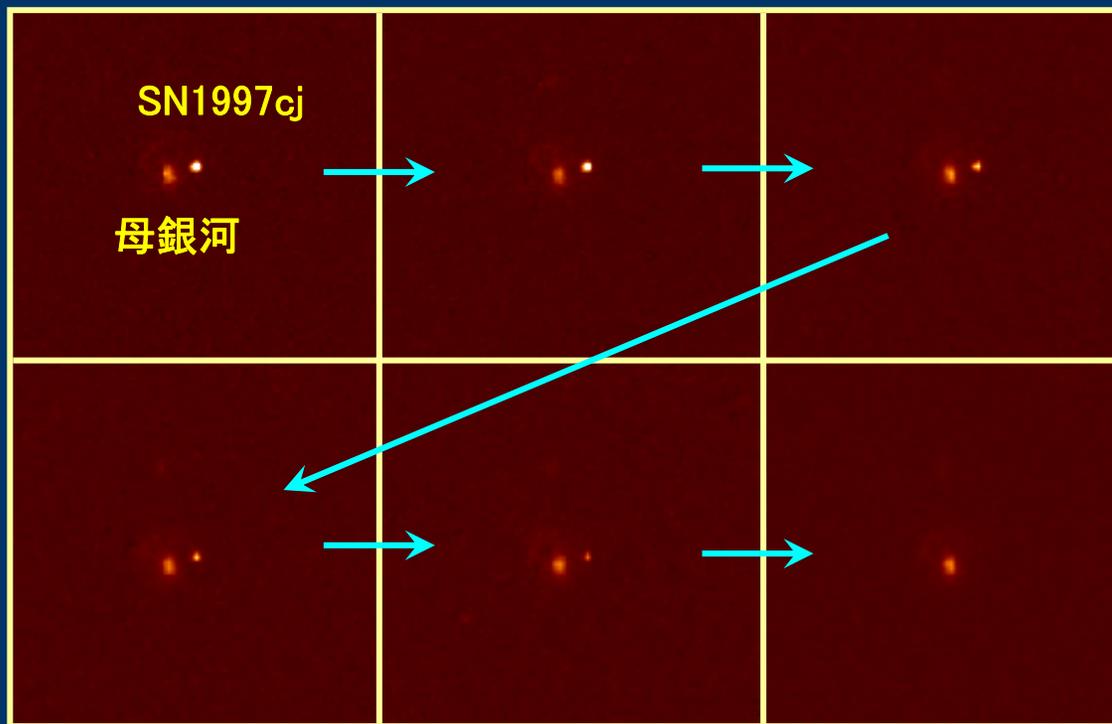
Ib型: **シリコン**なし・**ヘリウム**あり

Ic型: **シリコン**なし・**ヘリウム**なし

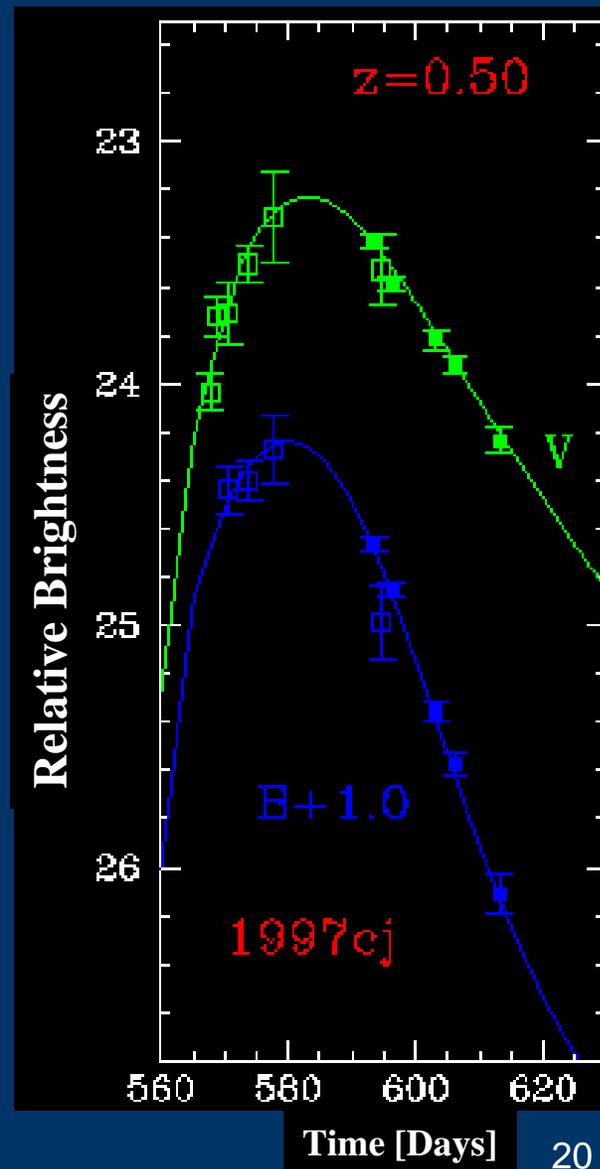
II型: **水素**あり

# Ia型超新星の光度曲線の測定

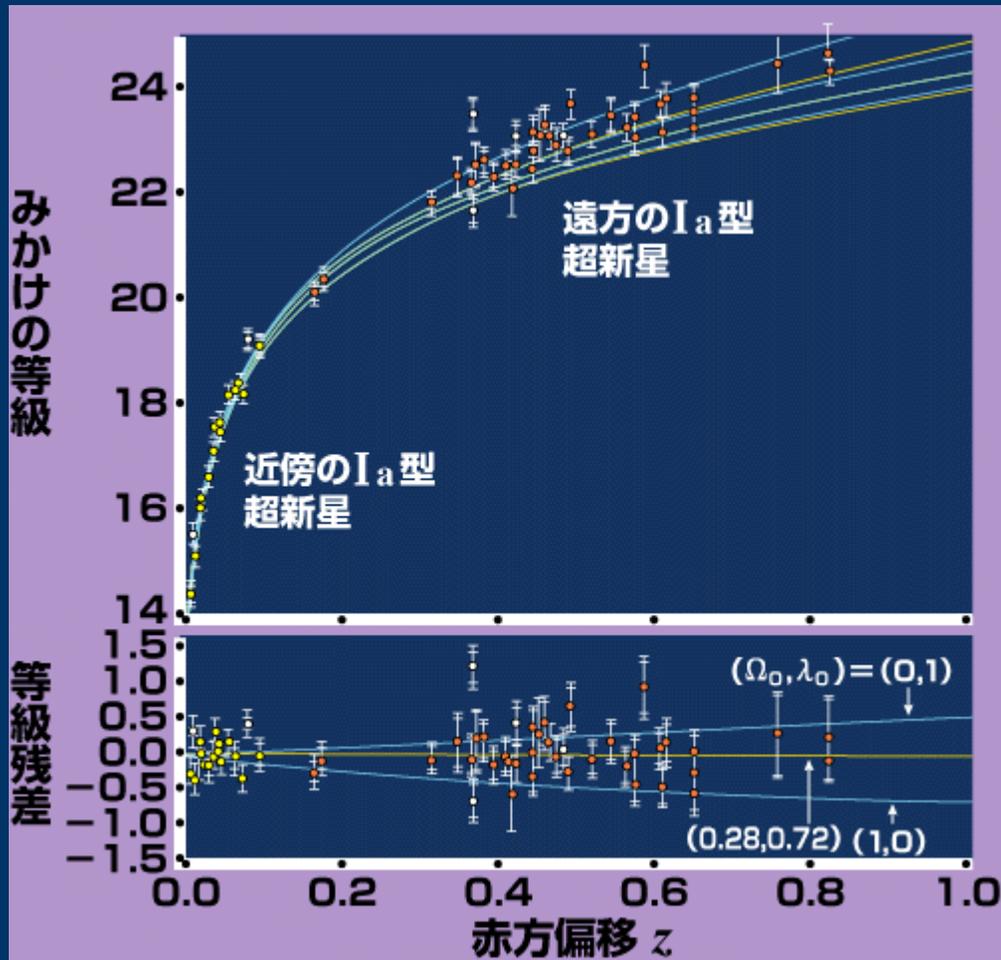
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



HSTで測定したSN 1997cjの明るさの時間変化



# 超新星と宇宙定数



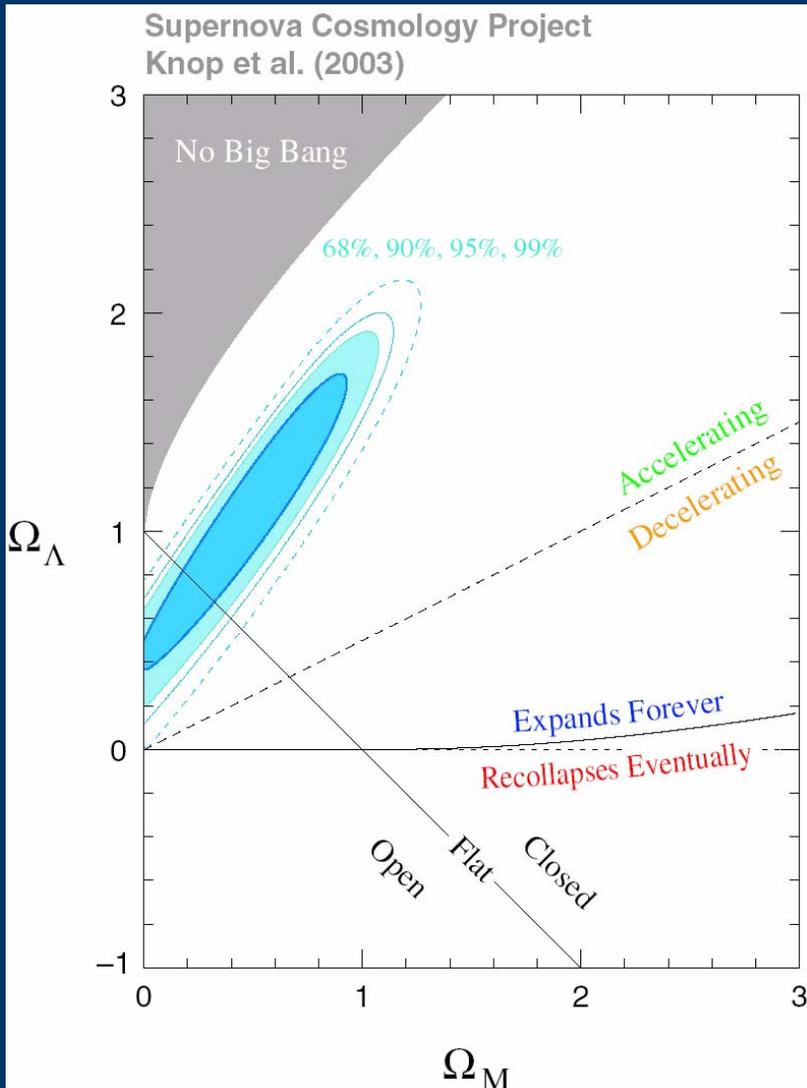
- 遠方超新星までの距離推定

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

宇宙定数の存在！

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

# 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

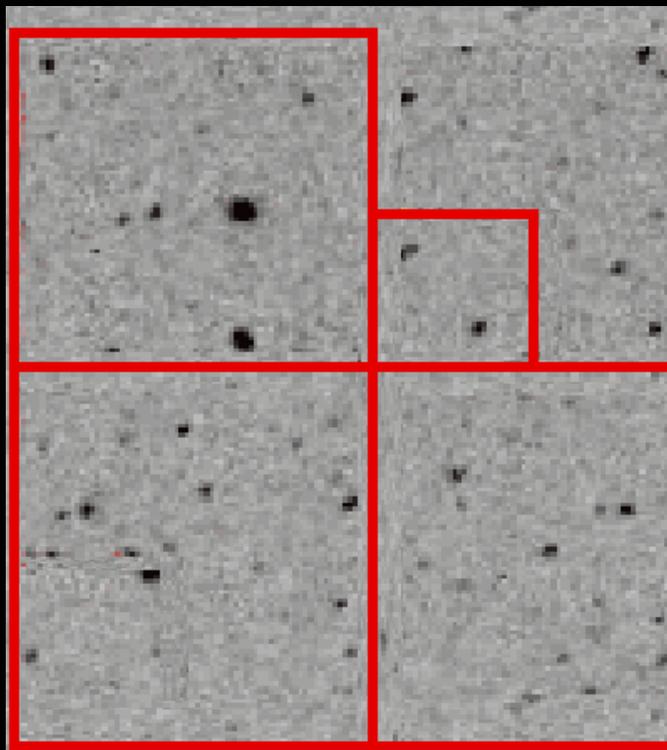
$$\frac{\ddot{a}}{a} = -\frac{4\pi G}{3}(\rho + 3p) + \frac{\Lambda}{3}$$

- 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

# 宇宙を見る “目”の進歩



地上4m望遠鏡+CCD  
100×写真乾板



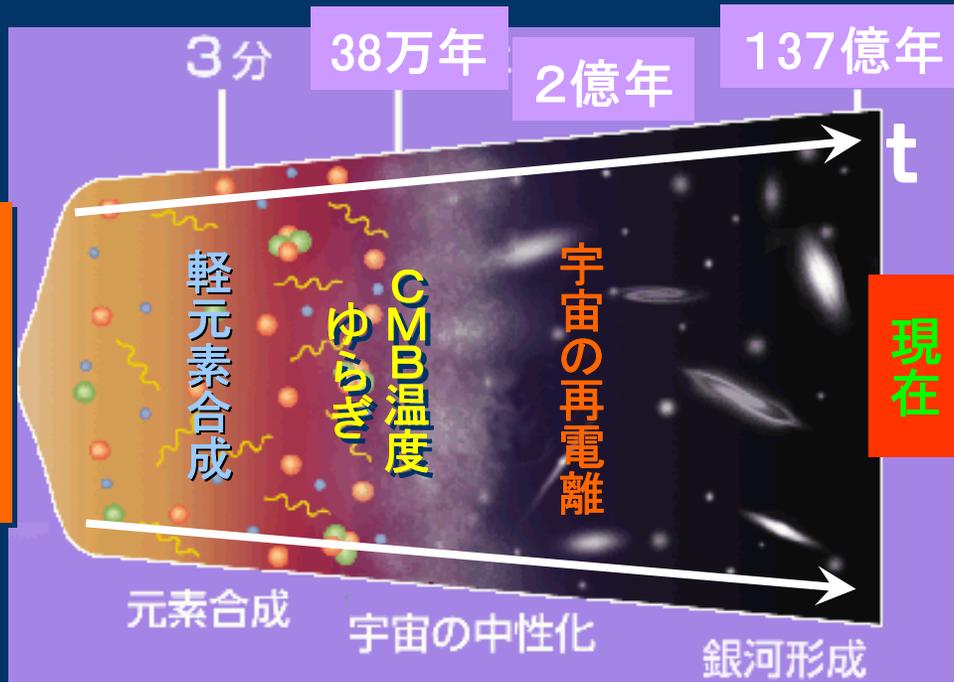
Hubble Deep Field  
ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

HST WFPC2

ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:1000×  
地上望遠鏡

# 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

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

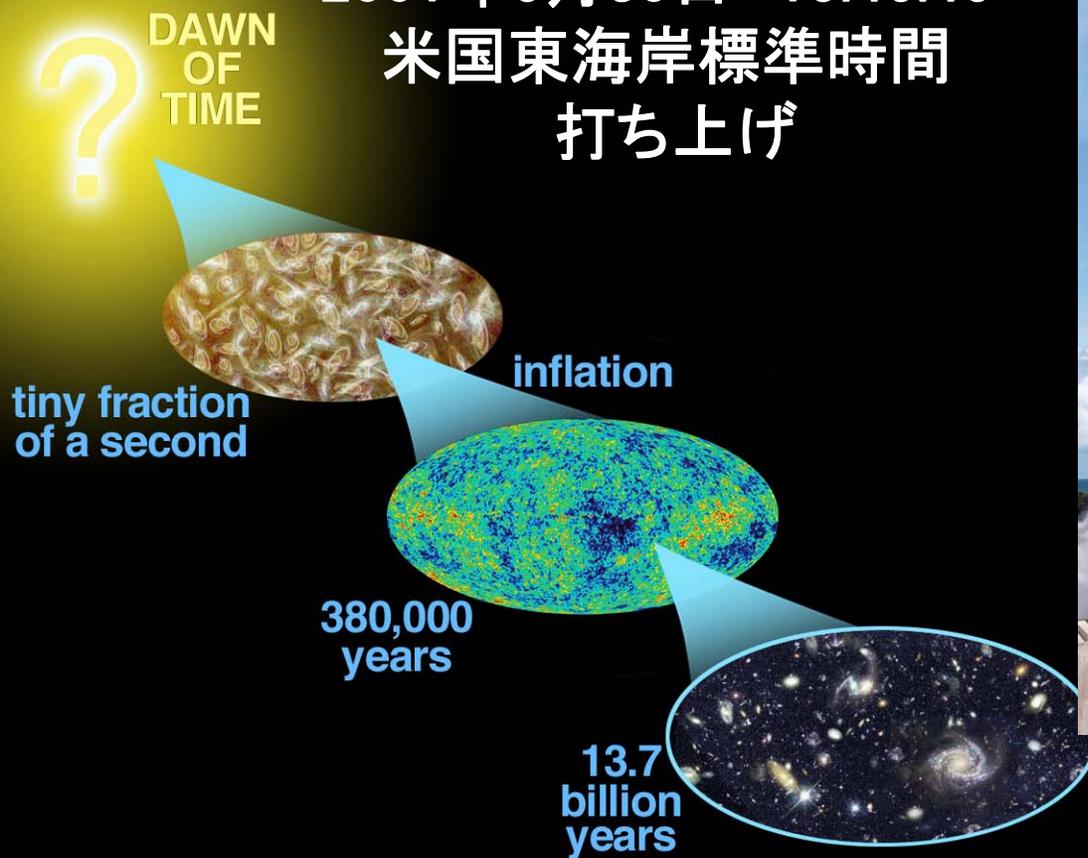
銀河の形成

銀河団の形成

宇宙の大構造

# WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

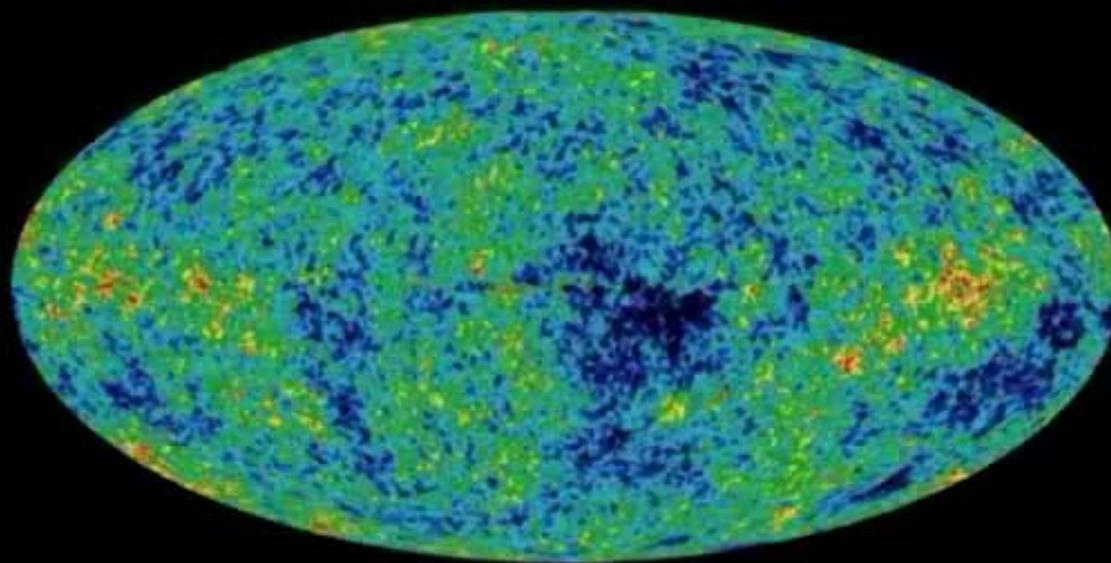
2001年6月30日 15:46:46  
米国東海岸標準時間  
打ち上げ



**NASA/WMAP**  
サイエンスチーム提供

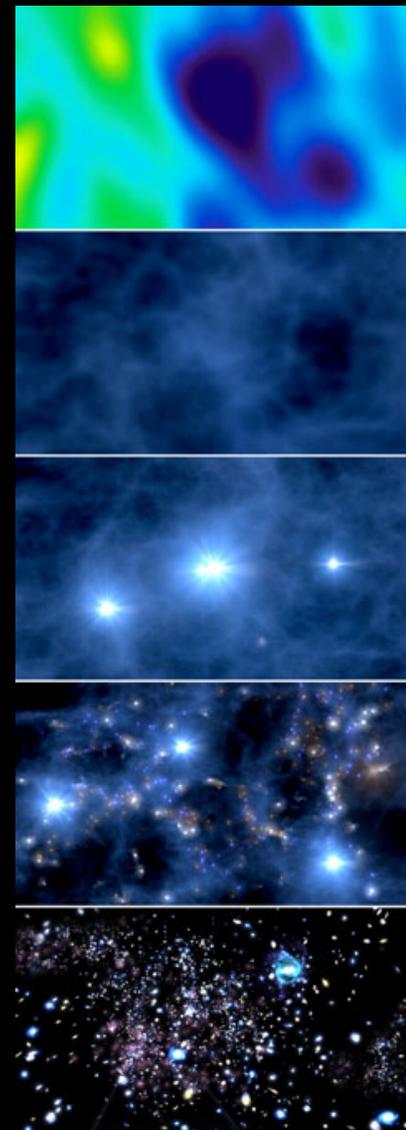
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

# 38万歳の宇宙から137億歳の現在へ

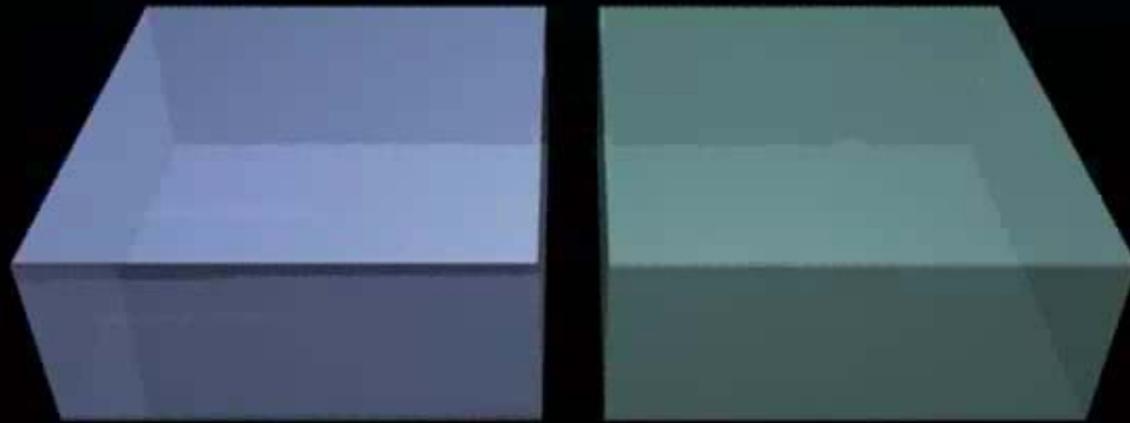


NASA/WMAP サイエンスチーム提供

<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

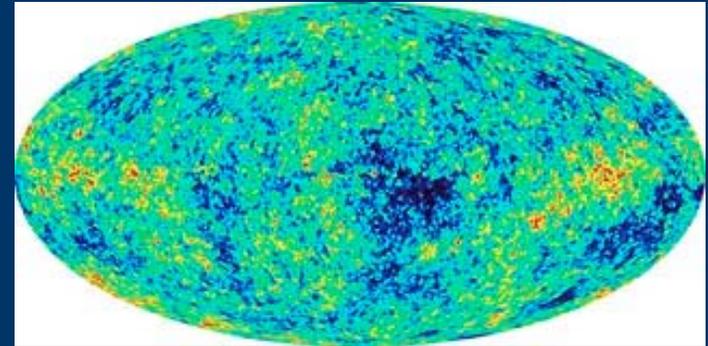
NASA/WMAP  
Science Team

<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

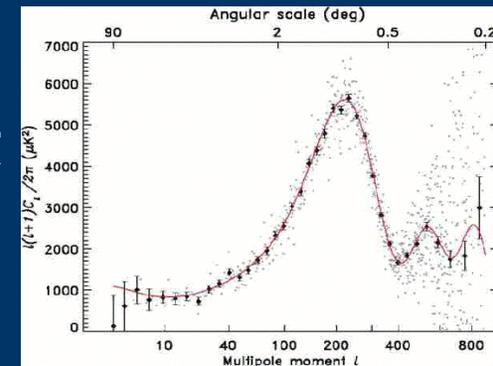
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

- 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

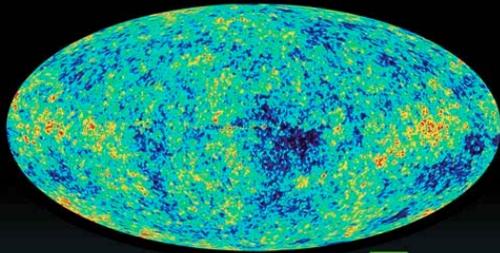
- 隠されている情報

- 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

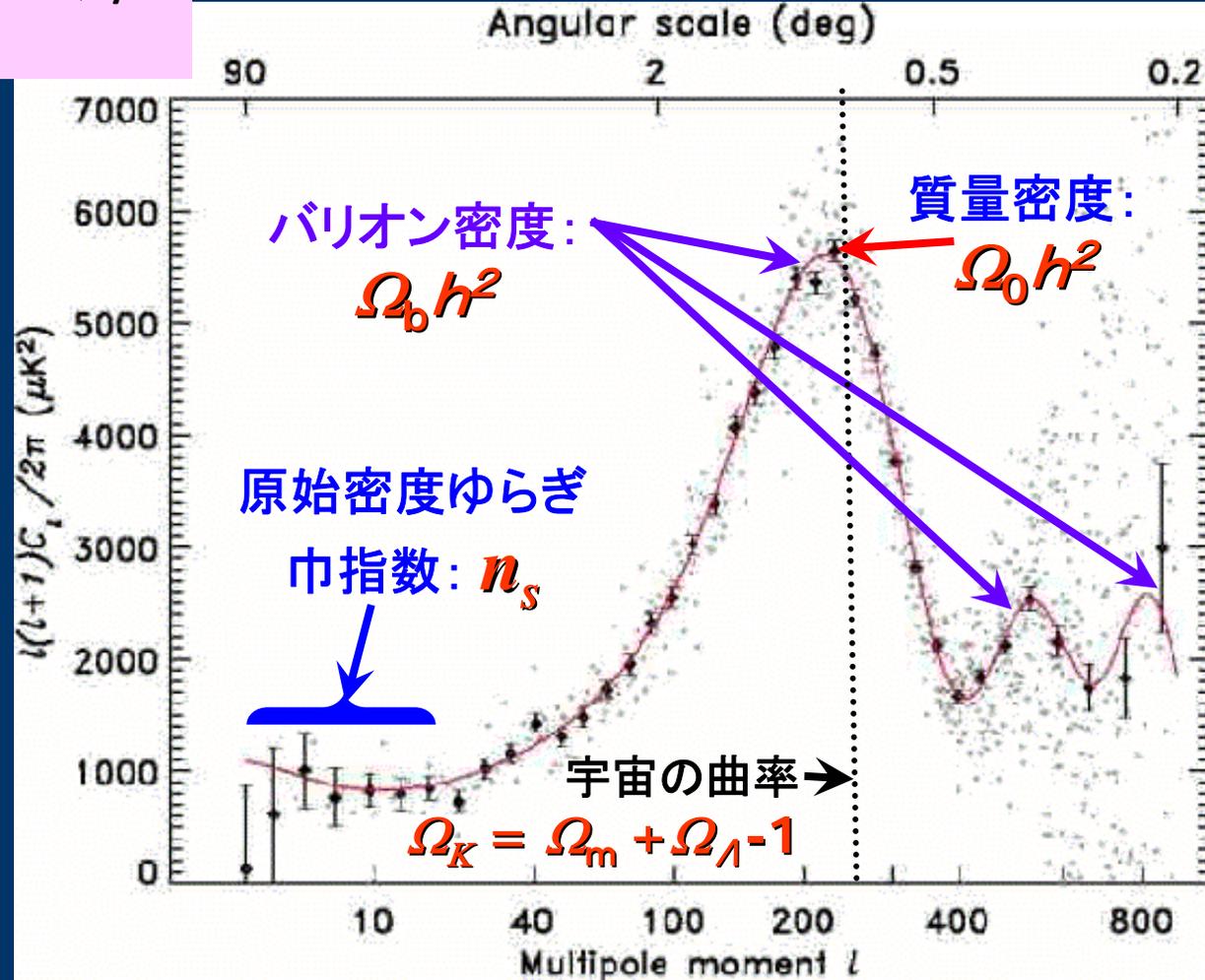
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



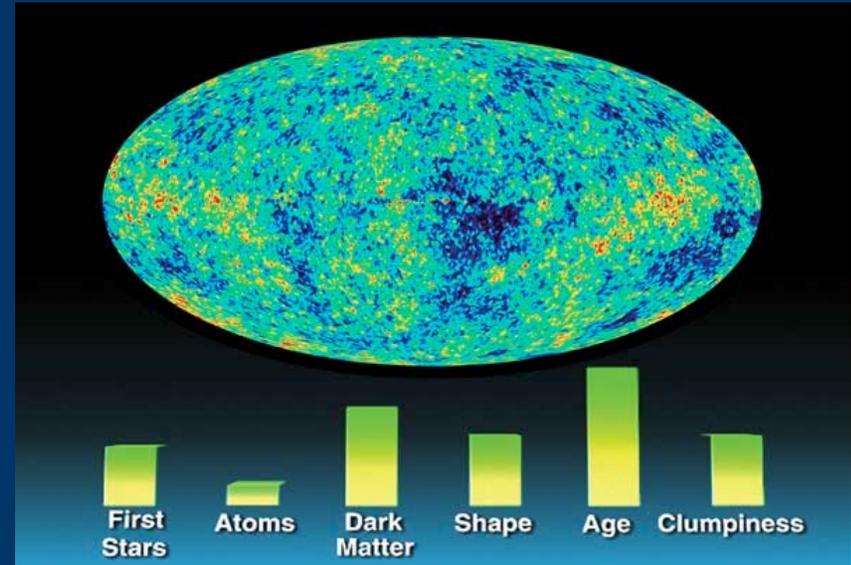
First Stars   Atoms   Dark Matter   Shape   Age   Clumpiness

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

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

$\Omega_{\text{tot}}$	$1.02 \pm 0.02$	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)
$\Omega_{\Lambda}$	$0.73 \pm 0.04$	ダークエネルギー密度パラメータ
$\Omega_b h^2$	$0.0224 \pm 0.0009$	バリオン密度パラメータ
$\Omega_b$	$0.044 \pm 0.004$	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
$\Omega_m$	$0.27 \pm 0.04$	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)
$\eta$	$6.1^{+0.3}_{-0.2} \times 10^{-10}$	バリオンフォトン比
$\Omega_b / \Omega_m$	$0.17 \pm 0.01$	全物質中のバリオンの割合
$\sigma_8$	$0.84 \pm 0.04$	半径 $8h^{-1}$ Mpc の球のゆらぎの値
$n_s$	$0.93 \pm 0.03$	$k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ 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)
$z_{\text{eq}}$	$3233^{+194}_{-210}$	物質と輻射のエネルギー密度が等しくなる時期
$z_{\text{dec}}$	$1089 \pm 1$	脱結合時の赤方偏移
$\Delta z_{\text{dec}}$	$195 \pm 2$	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
$t_0$	$137 \pm 2$ 億年	現在の宇宙年齢
$t_{\text{dec}}$	$37.9^{+0.8}_{-0.7}$ 万年	脱結合時の宇宙年齢
$t_{\text{r}}$	$1.8^{+2.2}_{-0.8}$ 億年	再イオン化時の宇宙年齢
$z_{\text{r}}$	$20^{+10}_{-9}$	再イオン化時の赤方偏移
$\tau$	$0.17 \pm 0.04$	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  $w \geq -1$  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

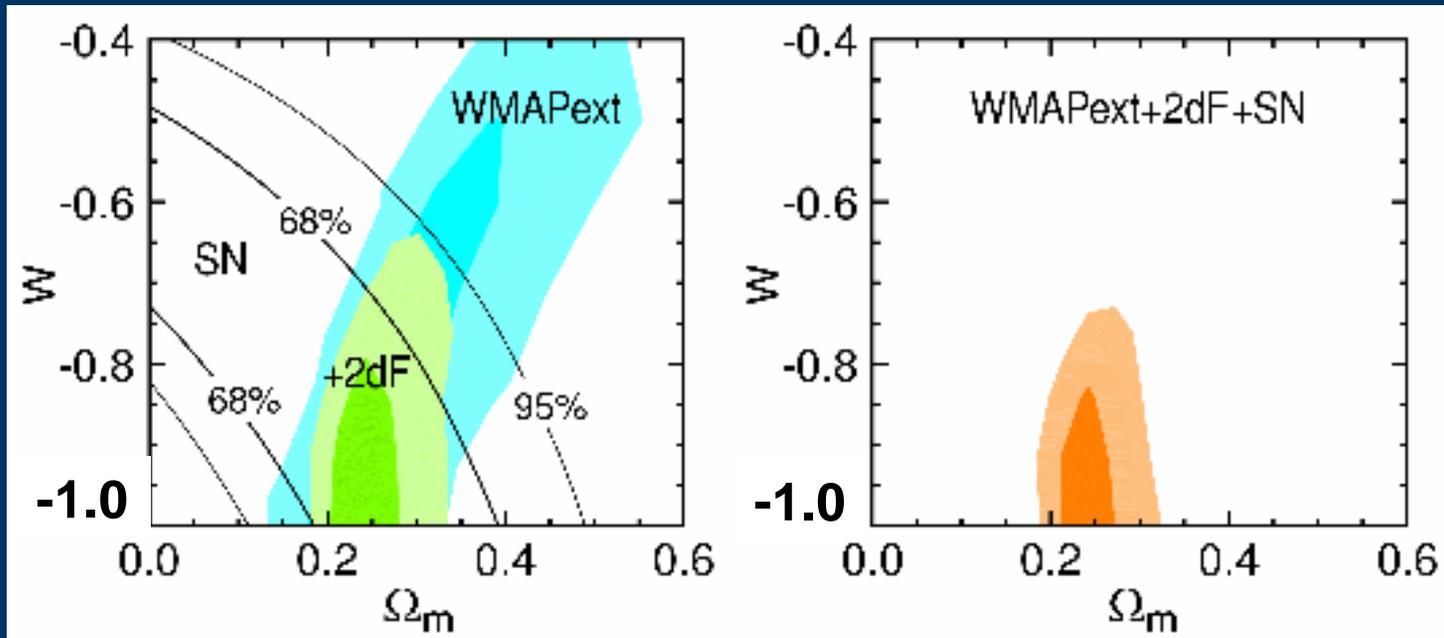
# 宇宙のダークエネルギー

- 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？

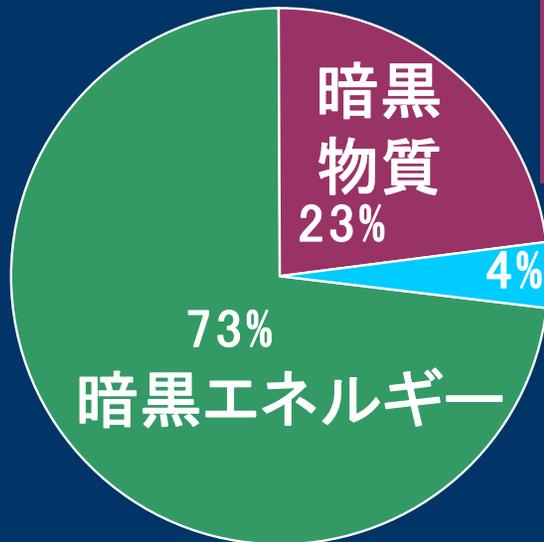
## ■ 宇宙の状態方程式

- $p=w\rho \Rightarrow \rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
- $w=-1$ : 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？

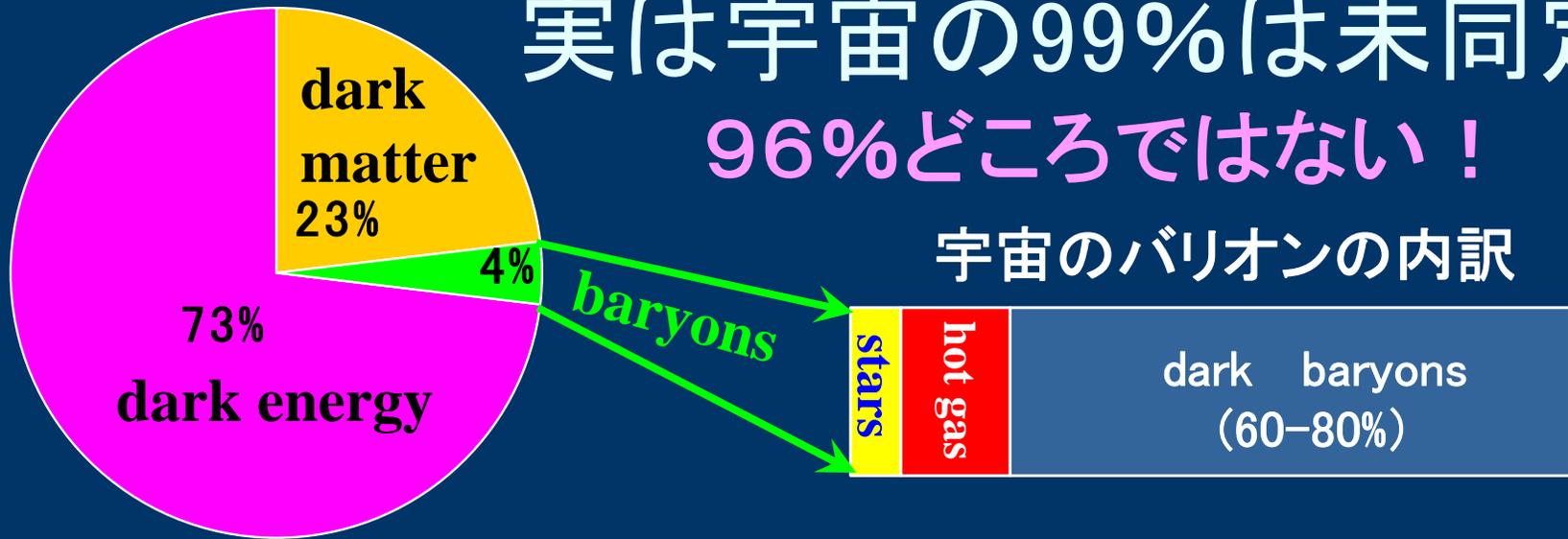
## 通常物質 (バリオン)

- 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？

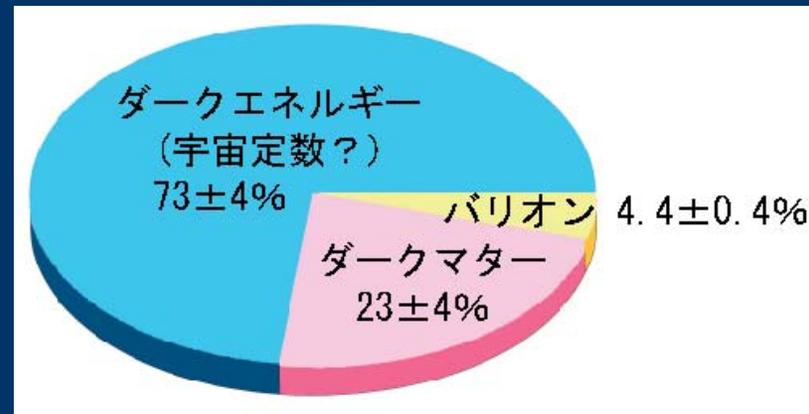
# 実は宇宙の99%は未同定 96%どころではない！

## 宇宙のバリオンの内訳



Component	Central	Maximum	Minimum	Grade <sup>a</sup>
<b>Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan &amp; Peebles: ApJ 503 (1998) 518</b>				
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、20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

# 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)