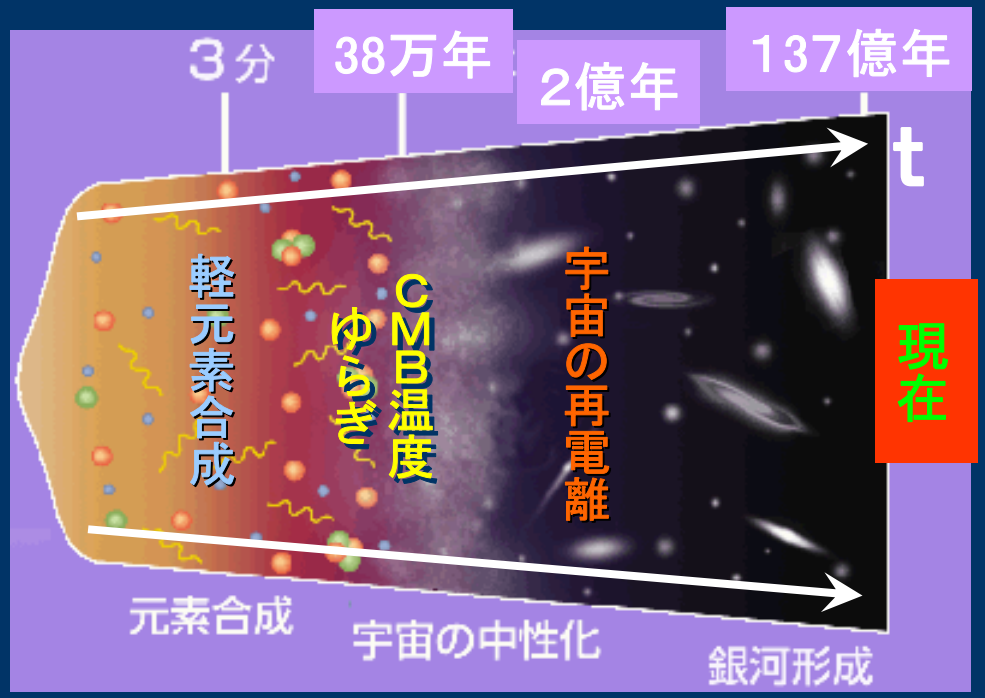
4. 宇宙論パラメータの決定



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

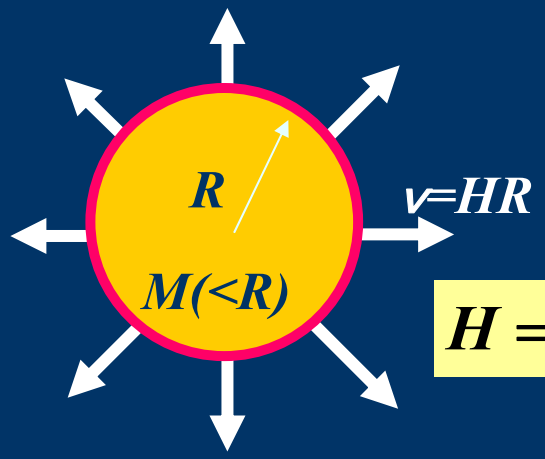
ニュートン力学的宇宙モデル

- 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

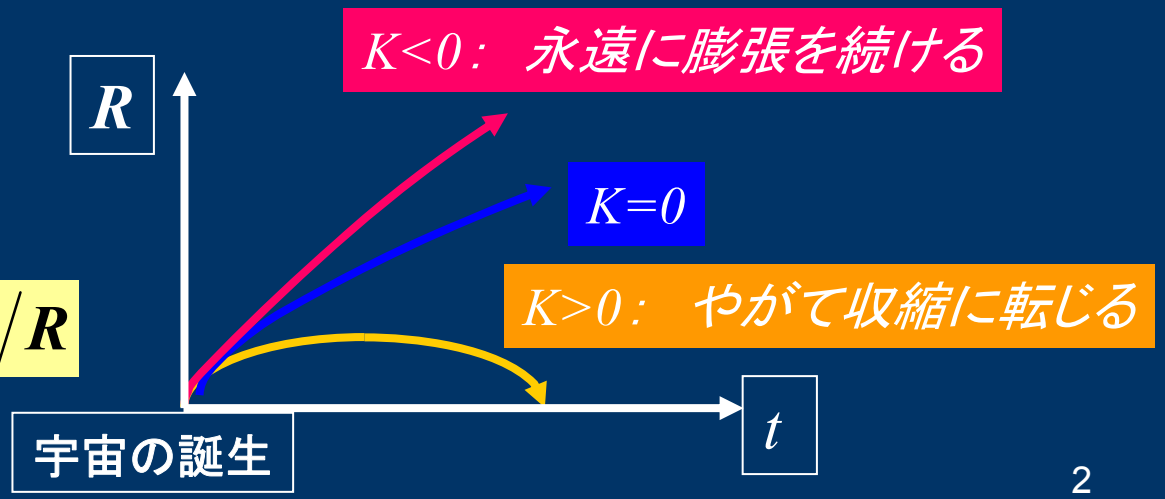
$$\frac{\dot{R}^2}{2} - \frac{GM}{R} \equiv -\frac{K}{2}, \quad M = \frac{4\pi}{3}\rho R^3$$

$$\Rightarrow \quad \dot{R}^2 + K = \frac{8\pi G}{3}\rho R^2$$

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



$$H = \dot{R}/R$$



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

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

フリードマン方程式

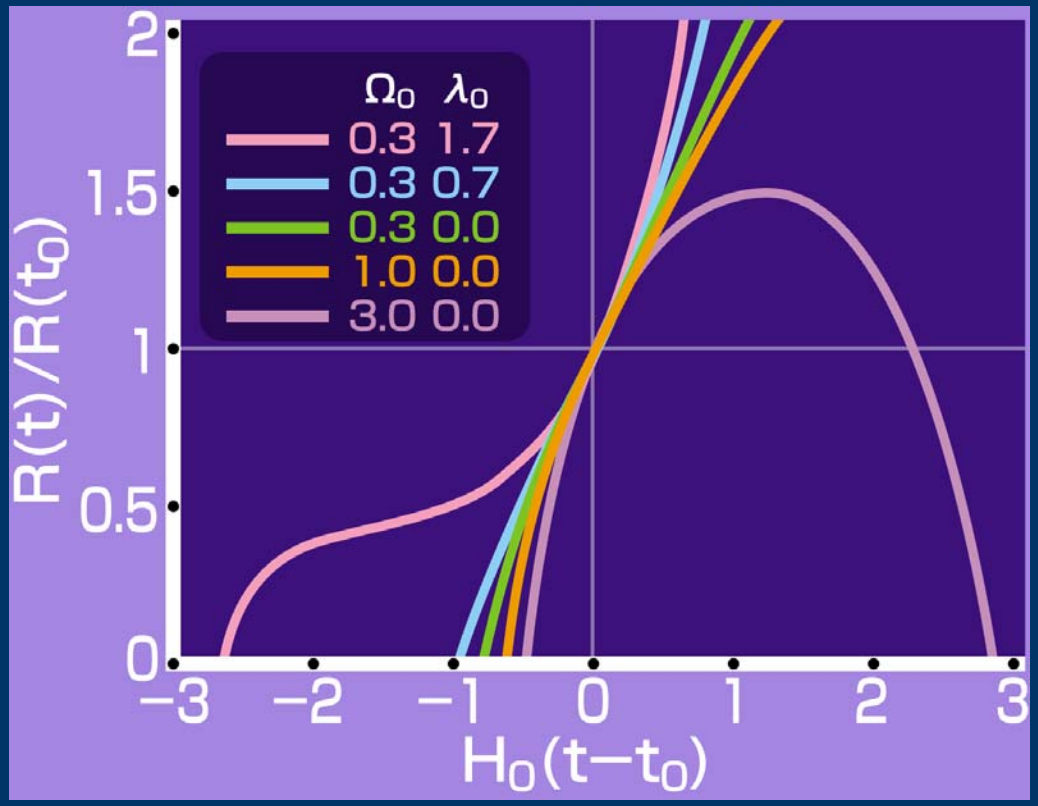
宇宙の曲率　宇宙定数

$$H^2(t) = \left(\frac{\dot{a}(t)}{a(t)}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}\rho(t) - \frac{K}{a^2(t)} + \frac{\Lambda}{3}$$

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　：

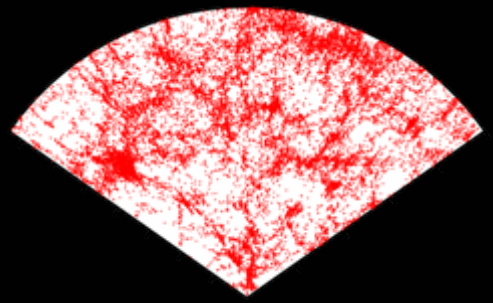
$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2\times 10^{-29}\, h^2 \mathrm{g/cm}^3$$

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

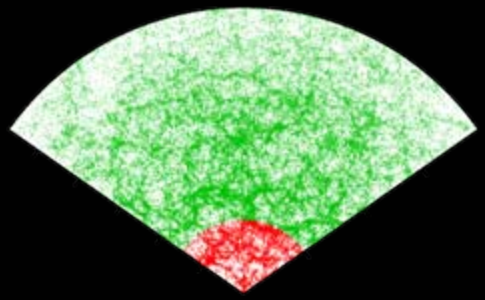
宇宙論パラメータとその決定法

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 (= $\Omega_m + \Omega_\Lambda - 1$)	マイクロ波背景輻射の温度揺らぎの角度スペクトル

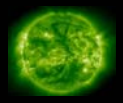
4-1 宇宙の大構造とダークマター

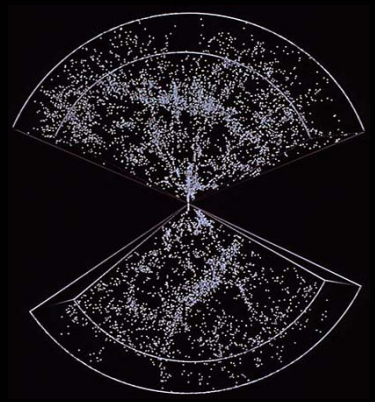


宇宙の階層構造

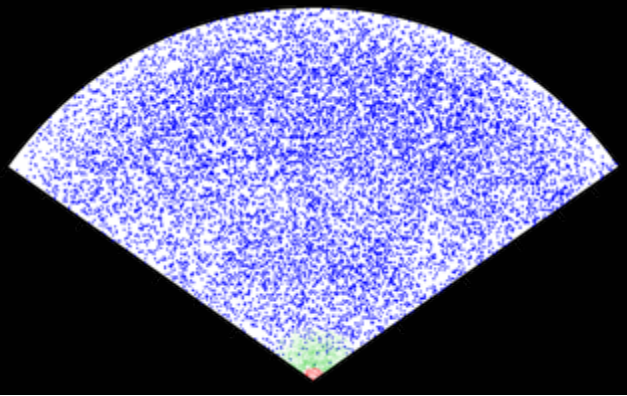


星　星団　銀河　銀河群　銀河団　宇宙の大構造





100万km　10光年　10万光年　100万光年　10億光年

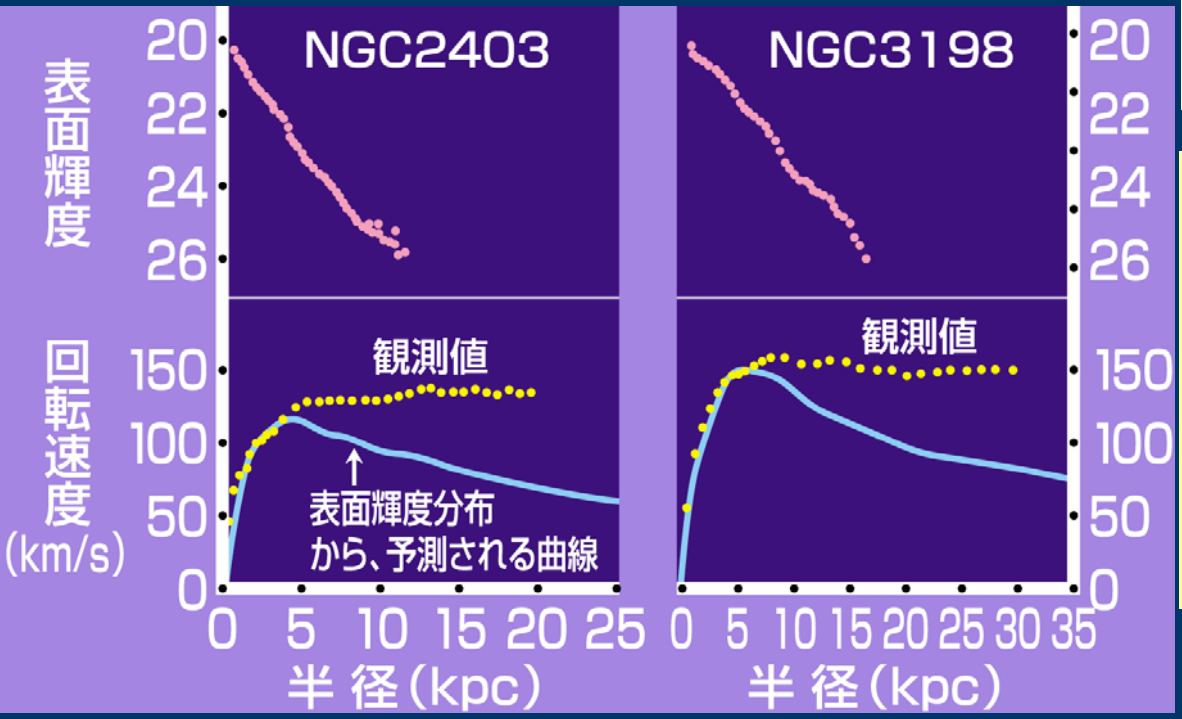


典型的大きさ

銀河に付随したダークマター

- 銀河の平坦な回転曲線⇒ダークマターの存在

van Albada & Sancisi (1986)



銀河の中心からrの距離を円運動する質量mの星の運動方程式

$$m\frac{v^2(r)}{r}=\frac{GmM(<r)}{r^2}$$

$$\Rightarrow \quad v(r)=\sqrt{\frac{GM(<r)}{r}}$$

$$v(r)=const. \rightarrow M(<r)\propto r$$

渦巻き銀河では、円盤半径の2倍以上の領域まで(見えない)質量が広がって分布している

暗黒物質ハロー(ダークハロー)

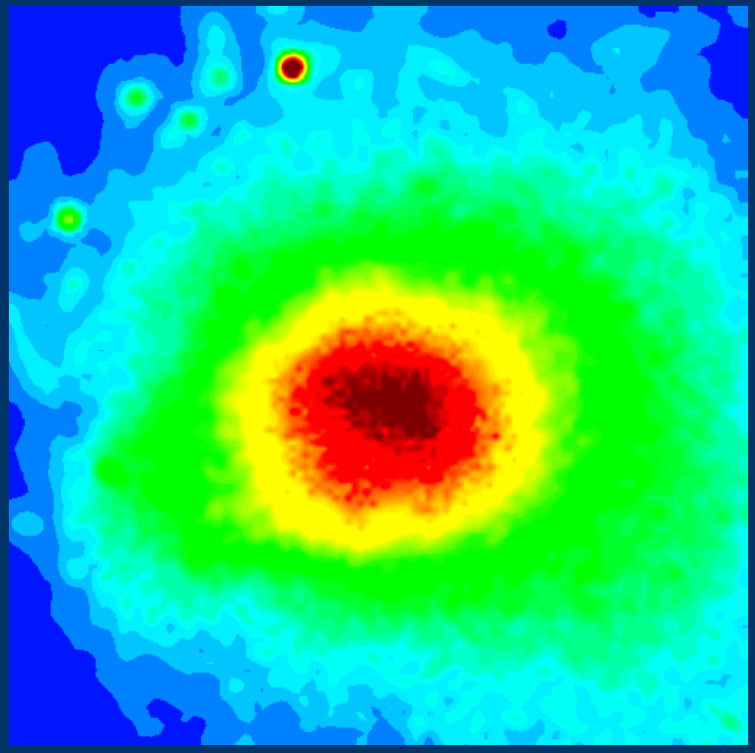
銀河団に付随したダークマター

- 銀河団は、銀河、高温ガス、暗黒物質の3成分からなる
- 銀河団の暗黒物質は、星と高温ガスの総質量の約10倍程度

可視光でみた銀河分布

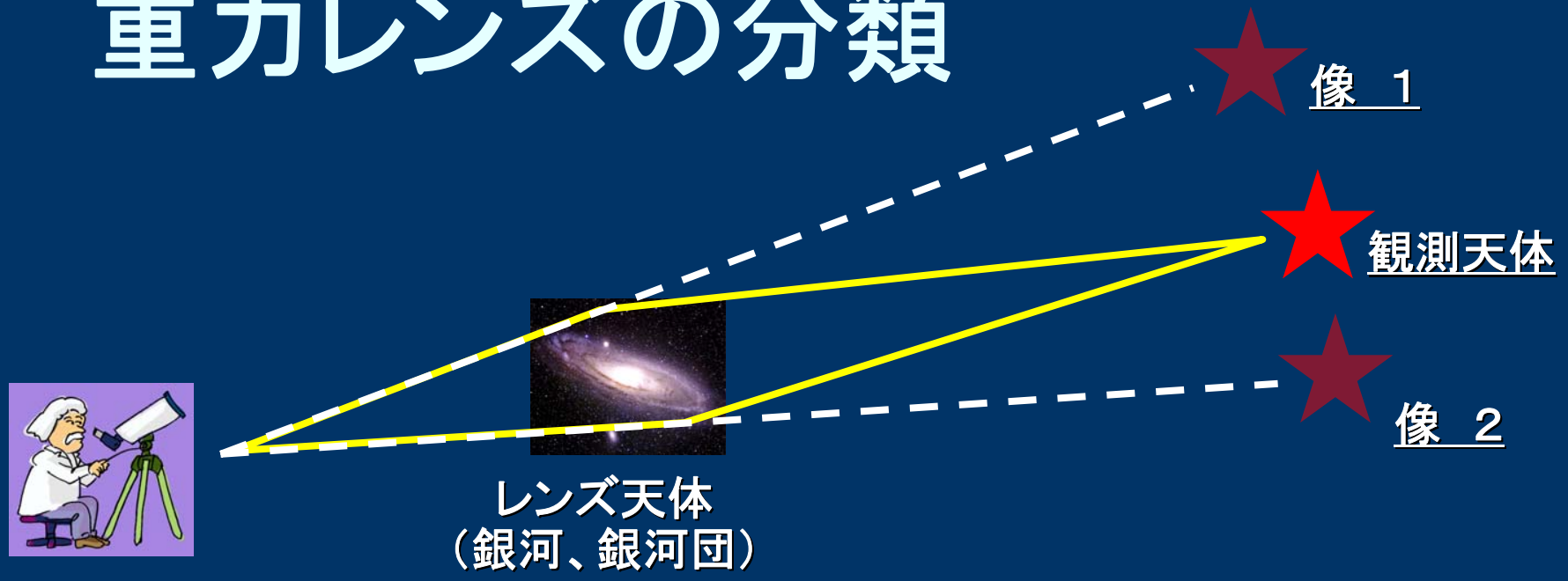
$1h^{-1}$Mpc

X線でみた高温ガス分布



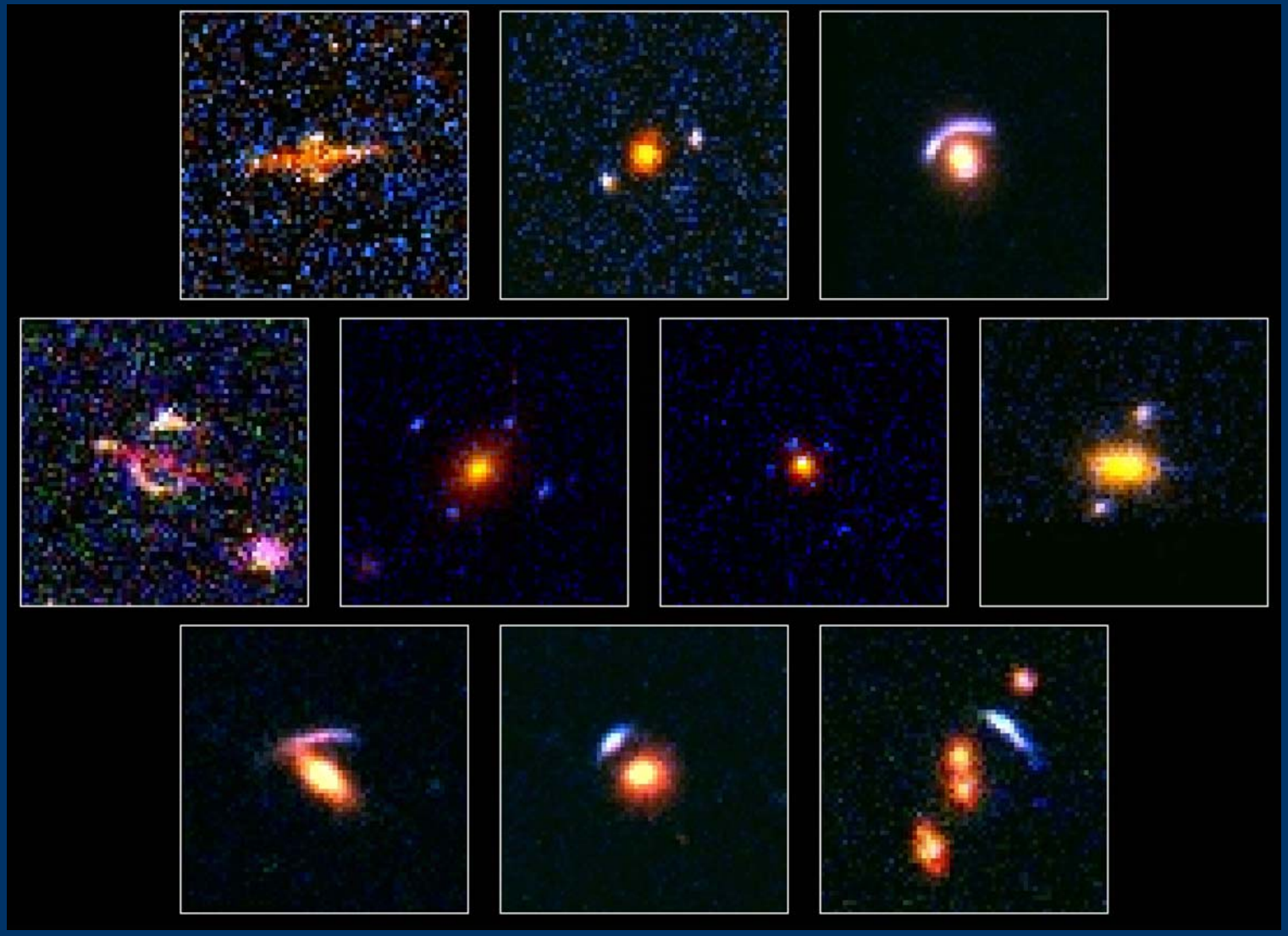
NASA/GSFC　S.L.Snowden氏提供

重力レンズの分類

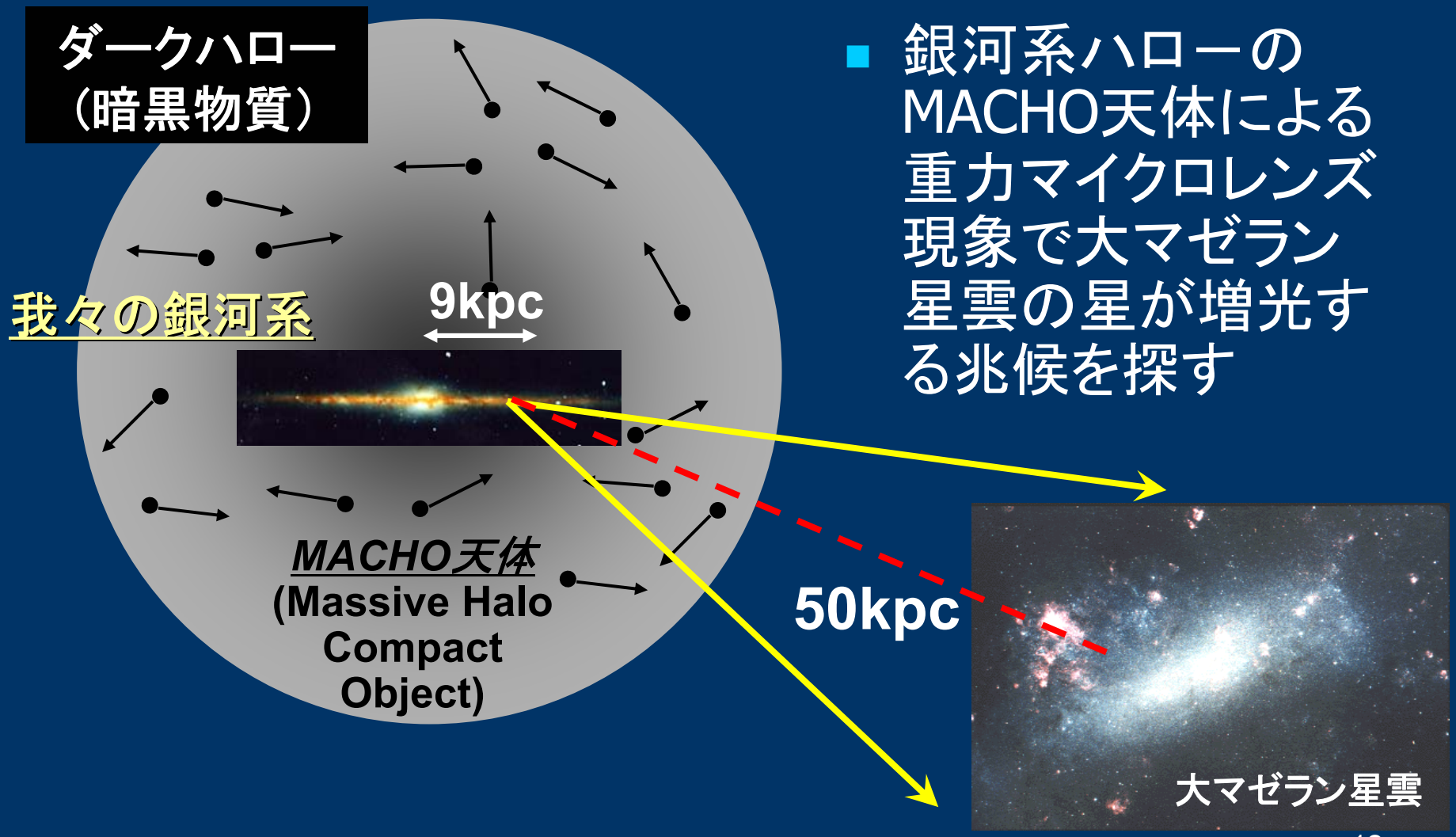


- 光線は重力場によって曲げられる
  - 天体が多重像をつくる（強い重力レンズ）
  - 天体の形状が変形を受ける（弱い重力レンズ）
  - 天体の見かけの明るさが増光する（マイクロレンズ）

HSTによる重力レンズギャラリー

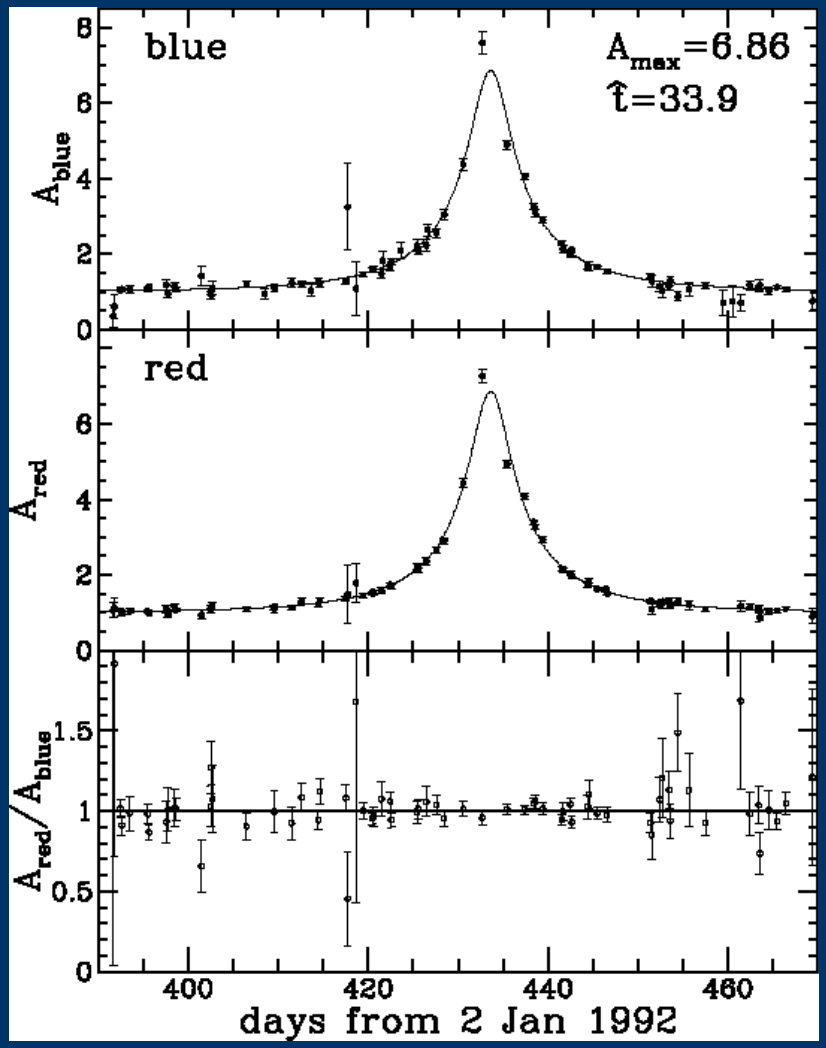


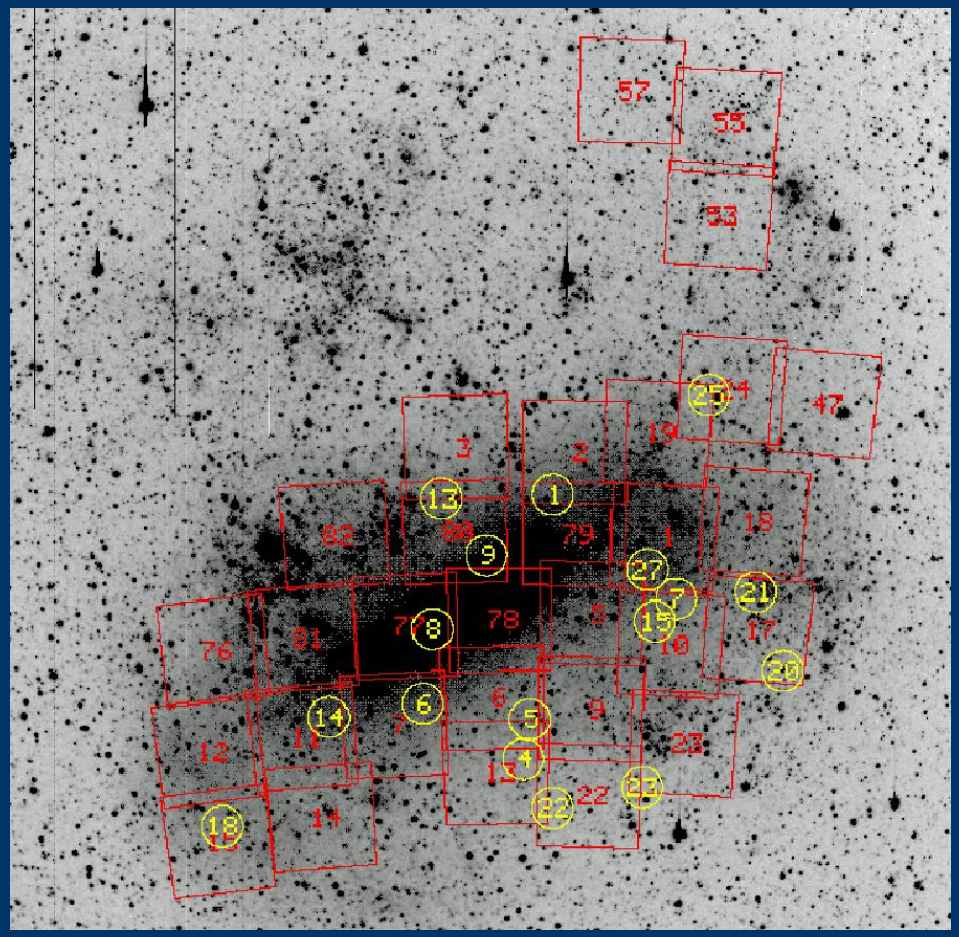
重力マイクロレンズによるMACHO探査



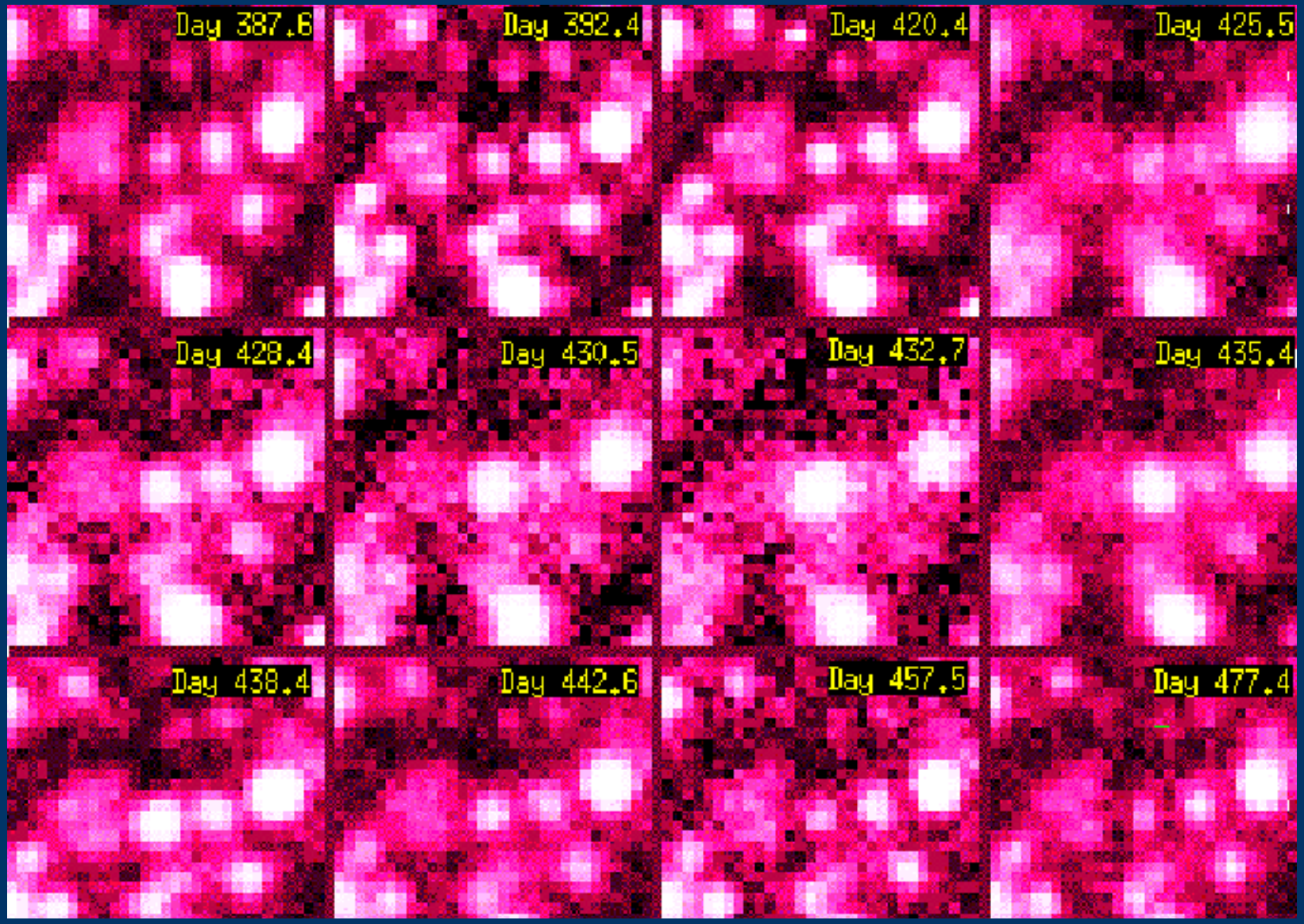
- 銀河系ハローのMACHO天体による重力マイクロレンズ現象で大マゼラン星雲の星が増光する兆候を探す

MACHOイベントの光度曲線



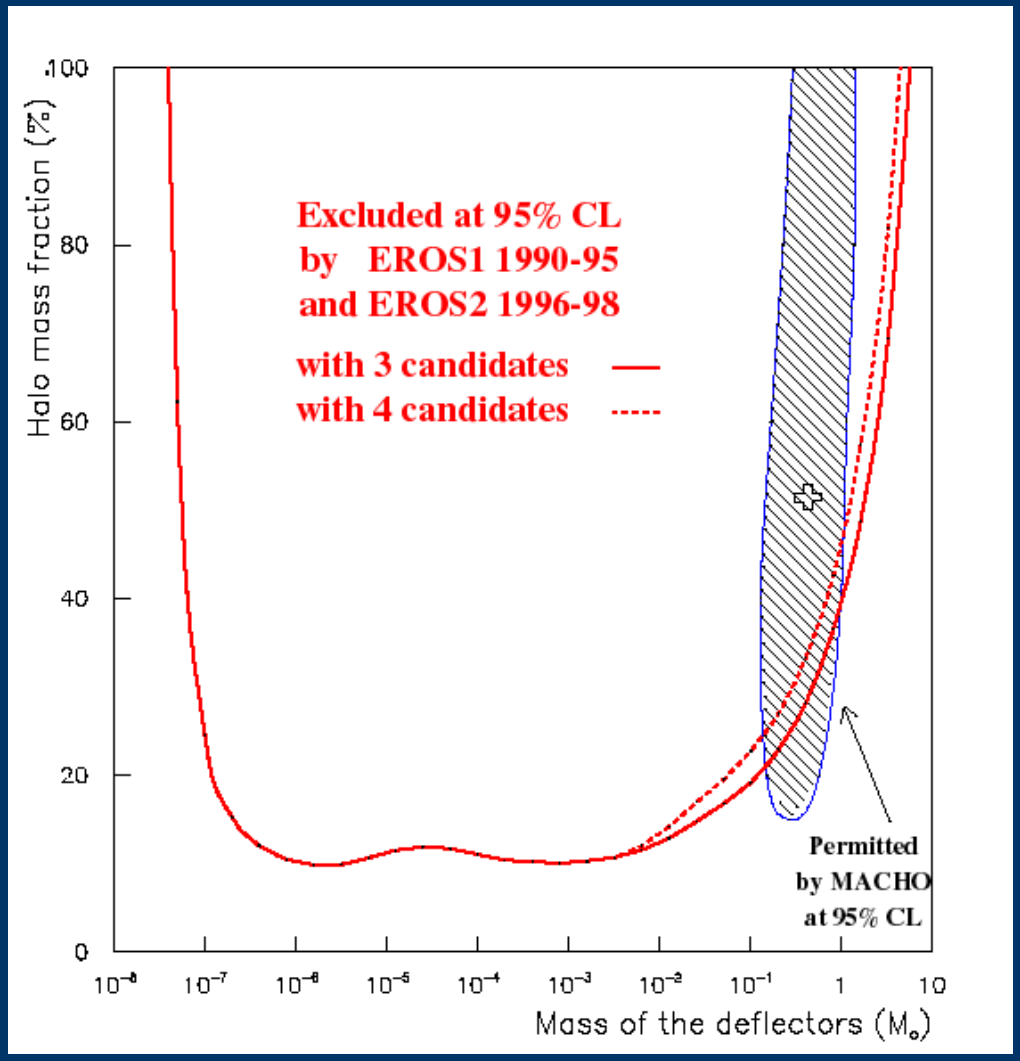


Massive Compact Halo Objectの発見



最初に発見された重力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）

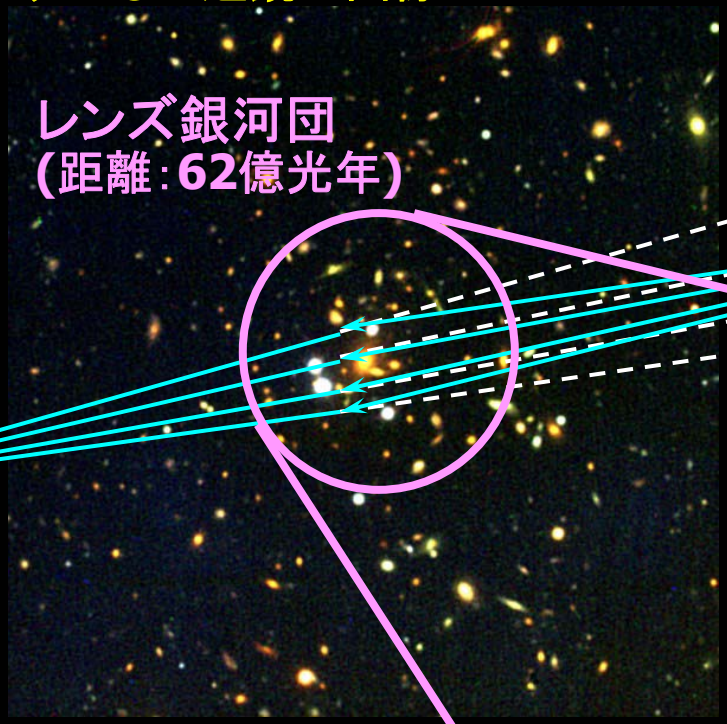
MACHO mass fraction
Lasserre et al. (2000):
EROS collaboration

すばるが見た最大のクエーサー重力レンズ

稲田、大栗ほかSDSSグループ
Nature 426 (2003) 810

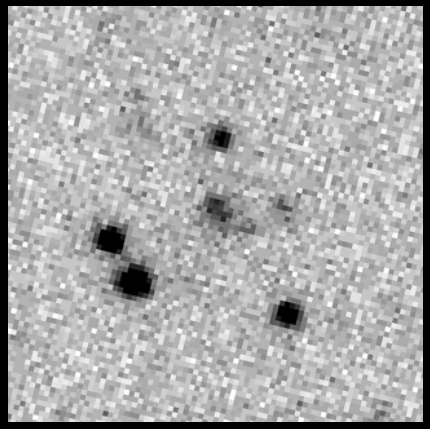
すばる 8.2m
望遠鏡

すばる望遠鏡の画像



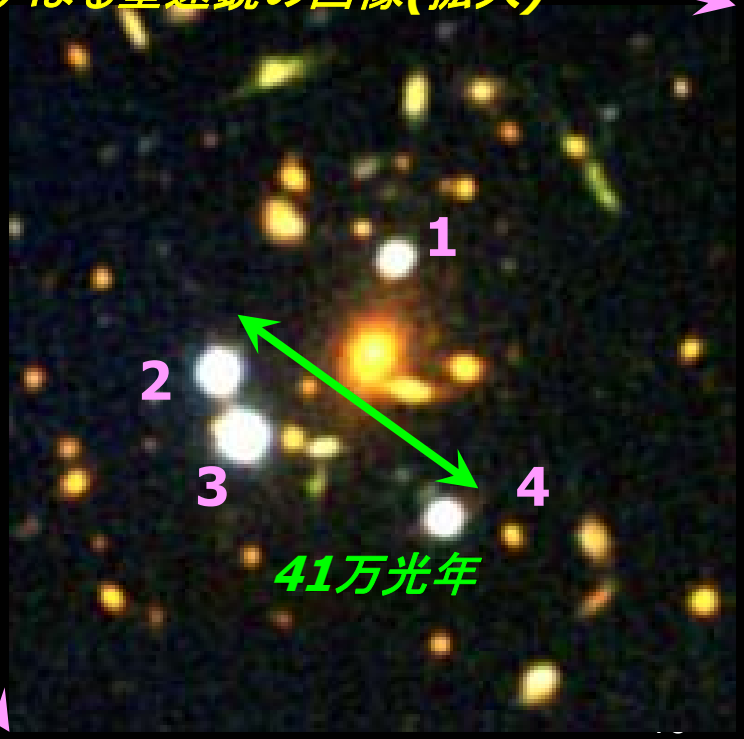
クエーサー
SDSS J1004
(98億光年)

SDSS専用
2.5m望遠鏡



SDSSの画像

すばる望遠鏡の画像(拡大)



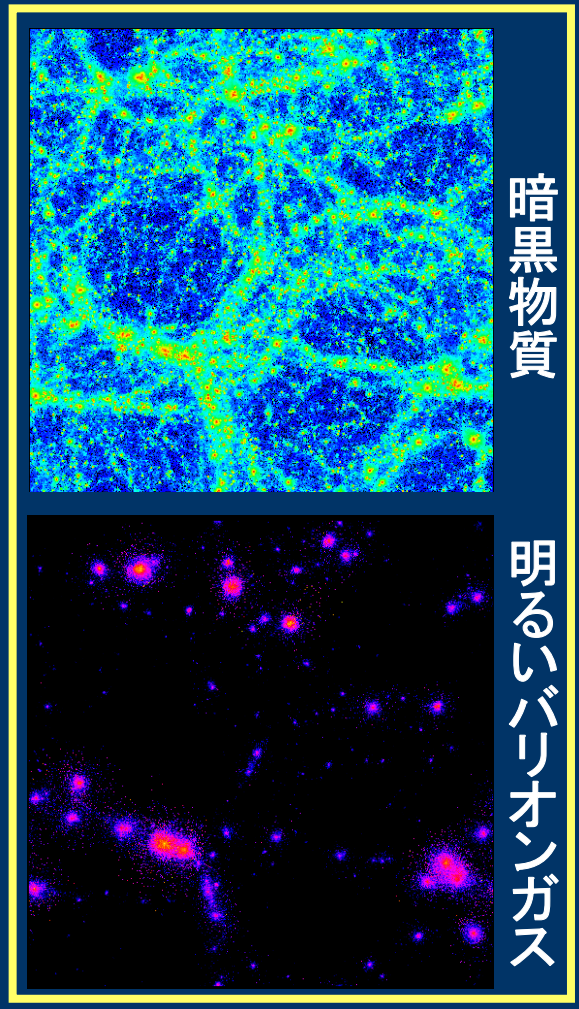
ダークマターの候補

- ***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

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

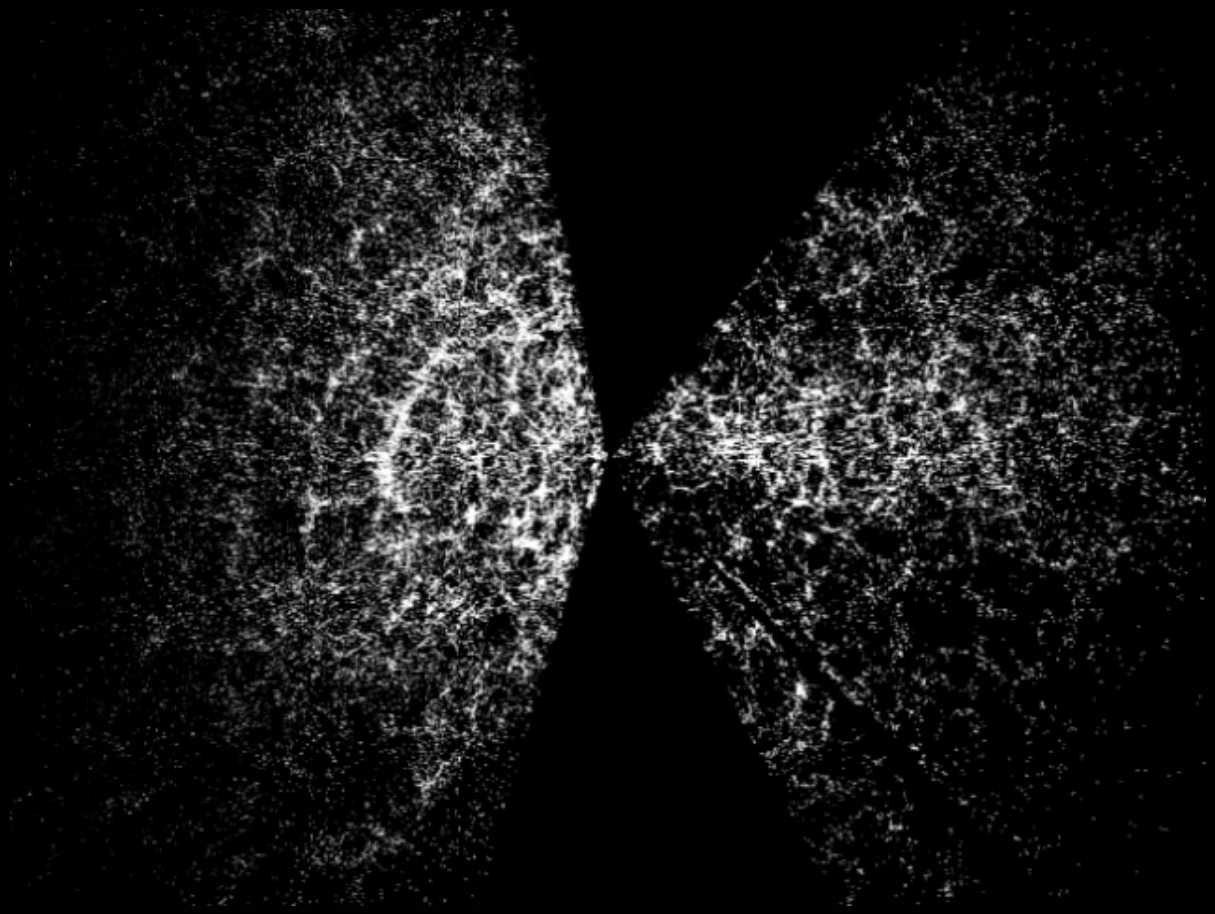
数値シミュレーションによる暗黒物質分布と明るいバリオンガス分布の比較例



史上最大の銀河地図作りをめざして:
日米独共同スローンデジタルスカイサーベイ

8千万個の銀河を観測、そのなかの80万個の銀河の3次元地図作り

http://www.sdss.org/dr1/

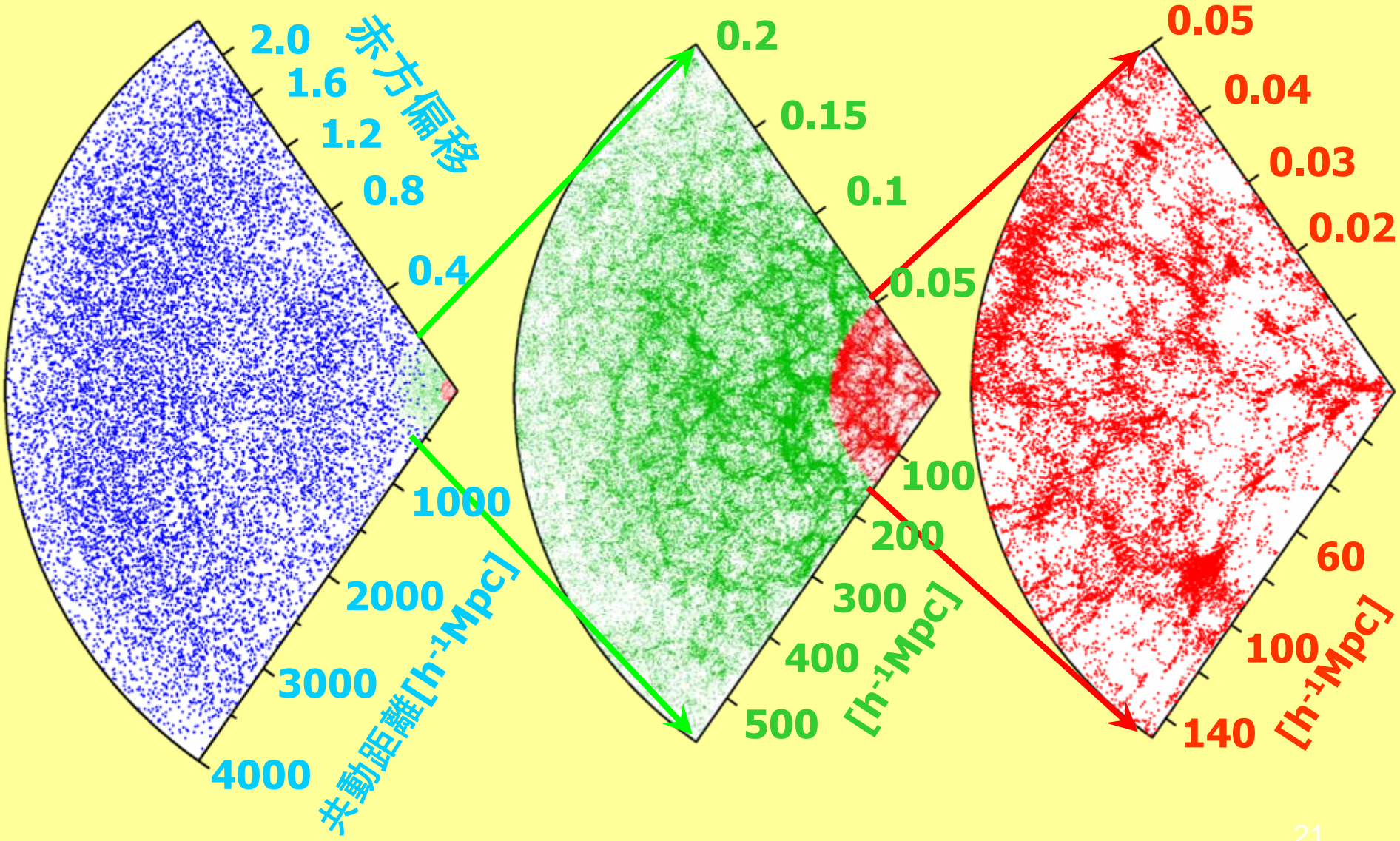


NHK教育　サイエンスZERO　2003年6月11日　0:00　放映

SDSS（スローンデジタルスカイサーベイ）
米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台

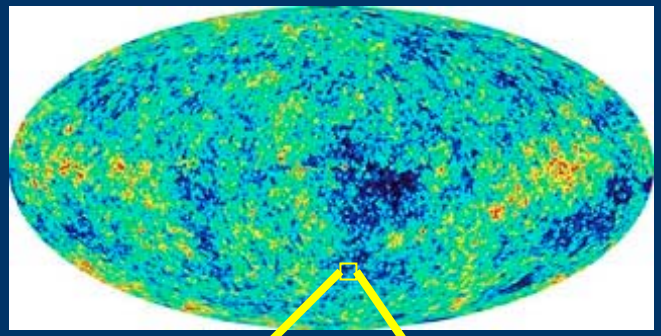
NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映

SDSSクエーサーと銀河の宇宙地図

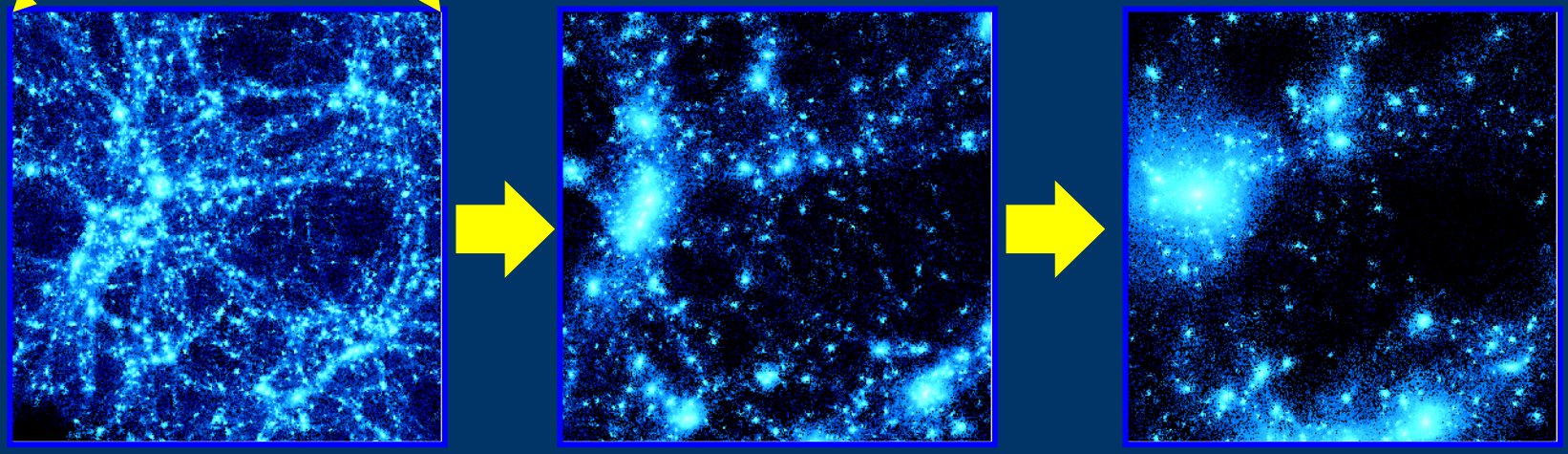


宇宙の構造形成標準理論

宇宙初期の空間ゆらぎ

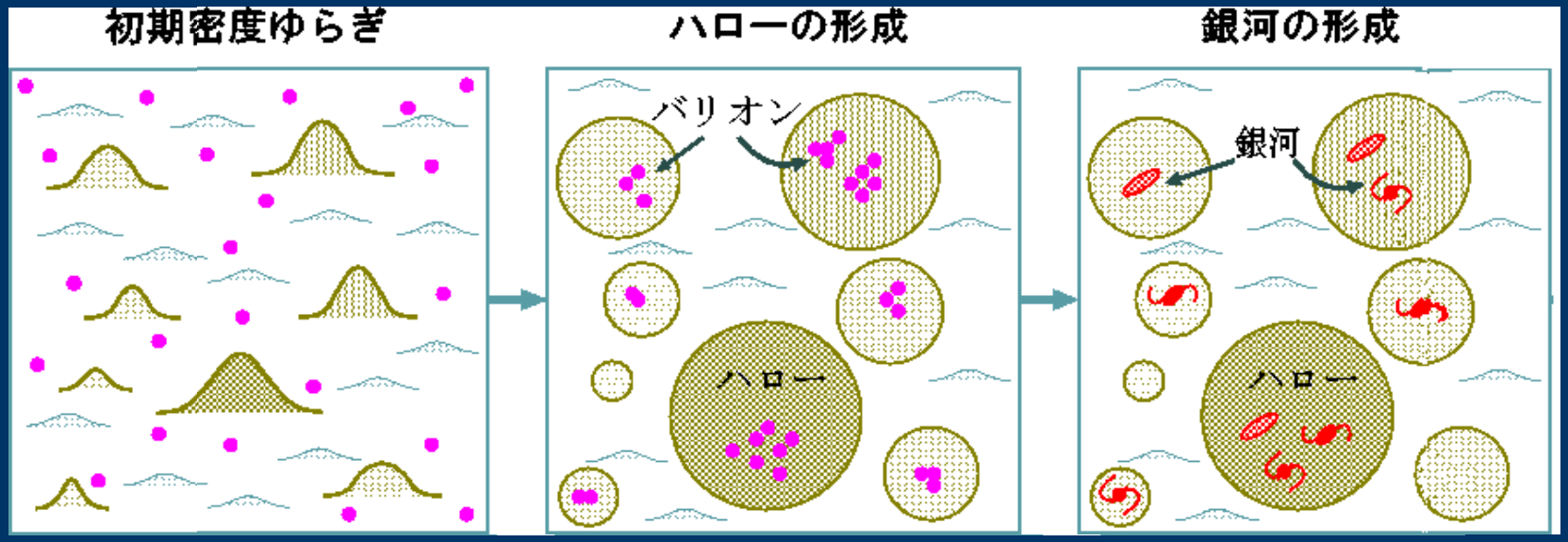


- 小さなスケールの構造ほど初期に形成される
- いったんできた構造が重力的に合体あるいは集団化することで、より大きなスケールの構造へと進化する



万有引力（重力）によってでこぼこ度合いがどんどん成長する

重力不安定による構造形成パラダイム



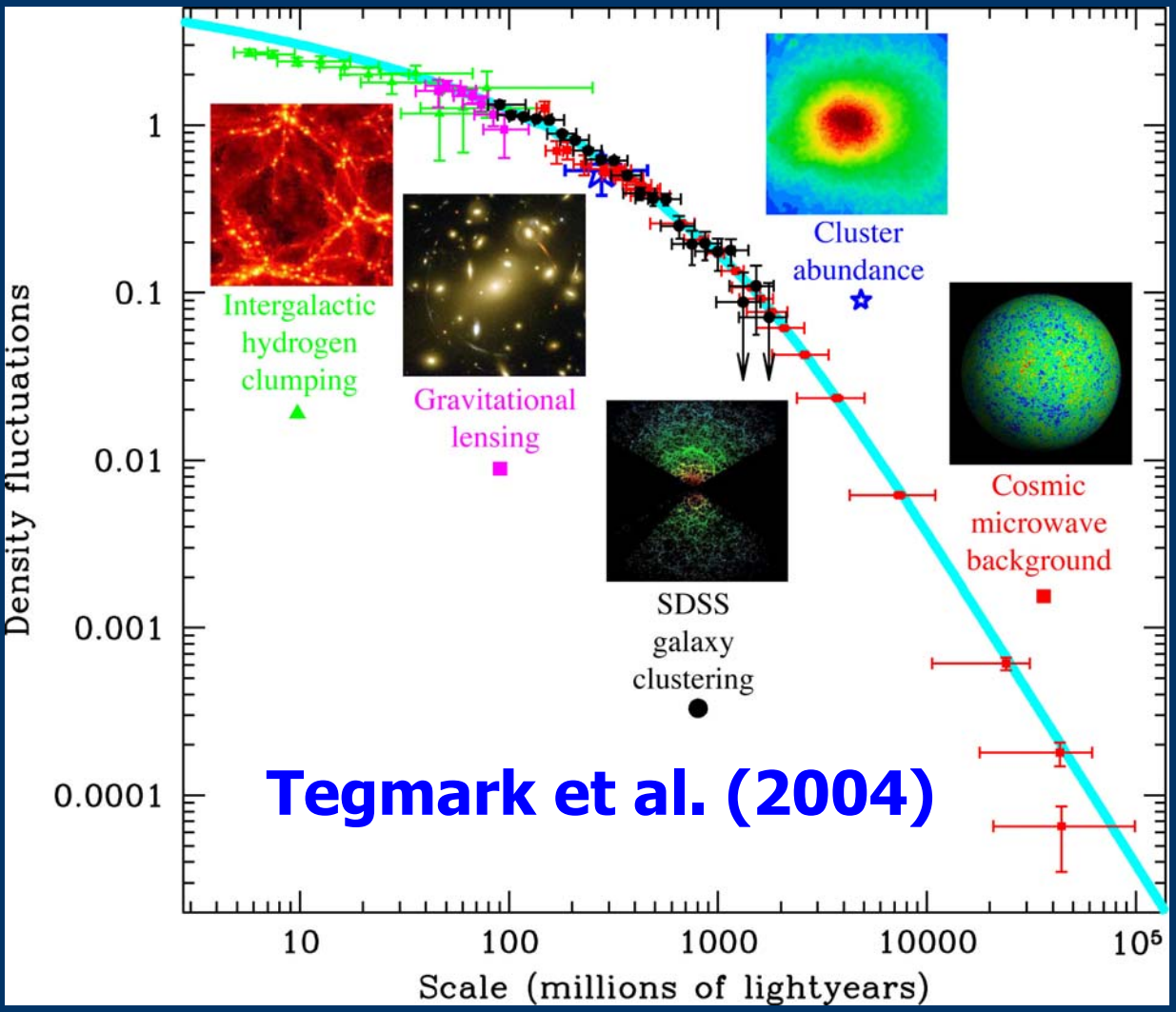
重力進化

ガスの冷却
輻射過程
星形成進化
…

樽家篤史（2001）日本物理学会誌

暗黒物質が自らの重力で塊となった系（ハロー）が
まず形成され、その中で光り輝く天体が誕生する

宇宙のダークマター密度ゆらぎスペクトル



- このダークマターゆらぎスペクトルによって、知られているすべての観測データが整合的・統一的に説明できる
  - 銀河分布
  - CMB温度揺らぎ
  - 銀河団個数密度
  - 重力レンズ歪み地図
  - Lyα雲分布

4-2 超新星と
ダークエネルギー

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

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

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？)

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

- 宇宙定数の自然な大きさ: プランク密度

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

- 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」 ⇒ 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

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
    $\Delta\phi = 4\pi G(\rho + 3p) = 4\pi G\rho(1+3w)$ なので
    $w < -1/3$ ⇒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≧−1となってしまうことに注意

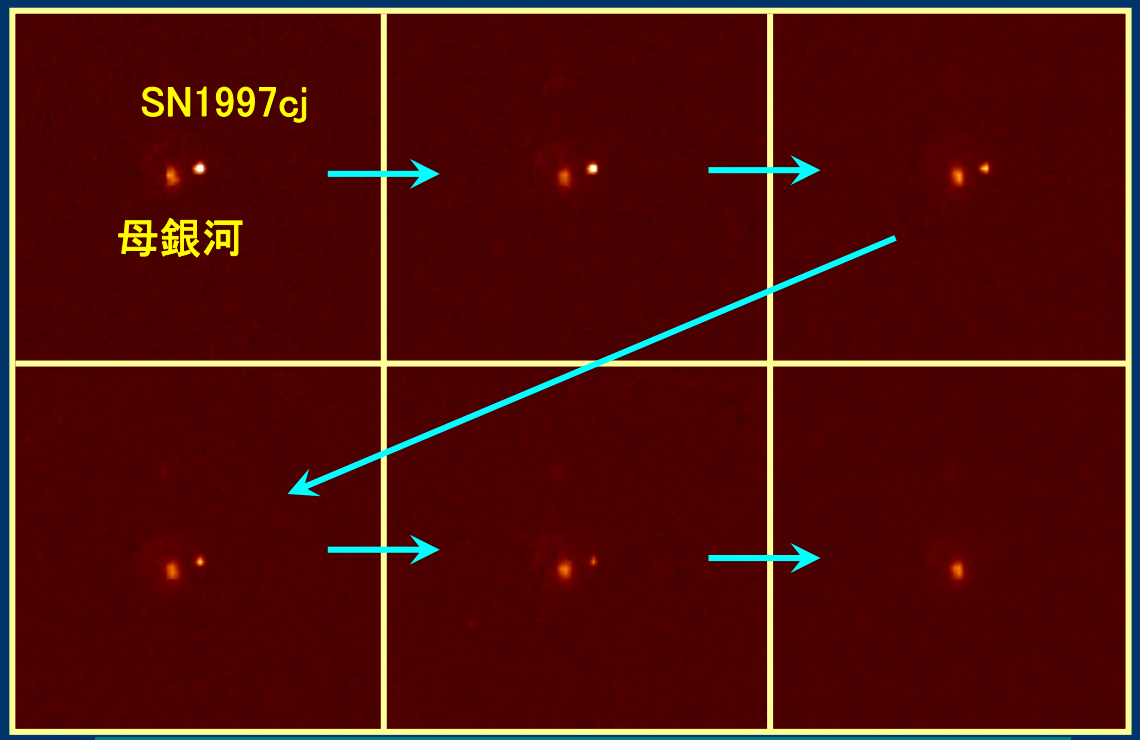
- 甦るエーテル？
  - quintessense (Paul Steinhardt):
    - ギリシャの4元説（空気、土、火、水）に付け加える5番目
  - dark energy (Mike Turner)
    - 実は「時間変化する宇宙定数」と同じものを指すのだが、しゃれた名前をつけることがしばしば物理そのものより重要である例
- このようにパラメータのとりうる範囲をいったん一般化しておきながら、観測的にはw=-1（宇宙定数）である、というのが現状でよく用いられるオチ

ダークエネルギー存在の観測的示唆

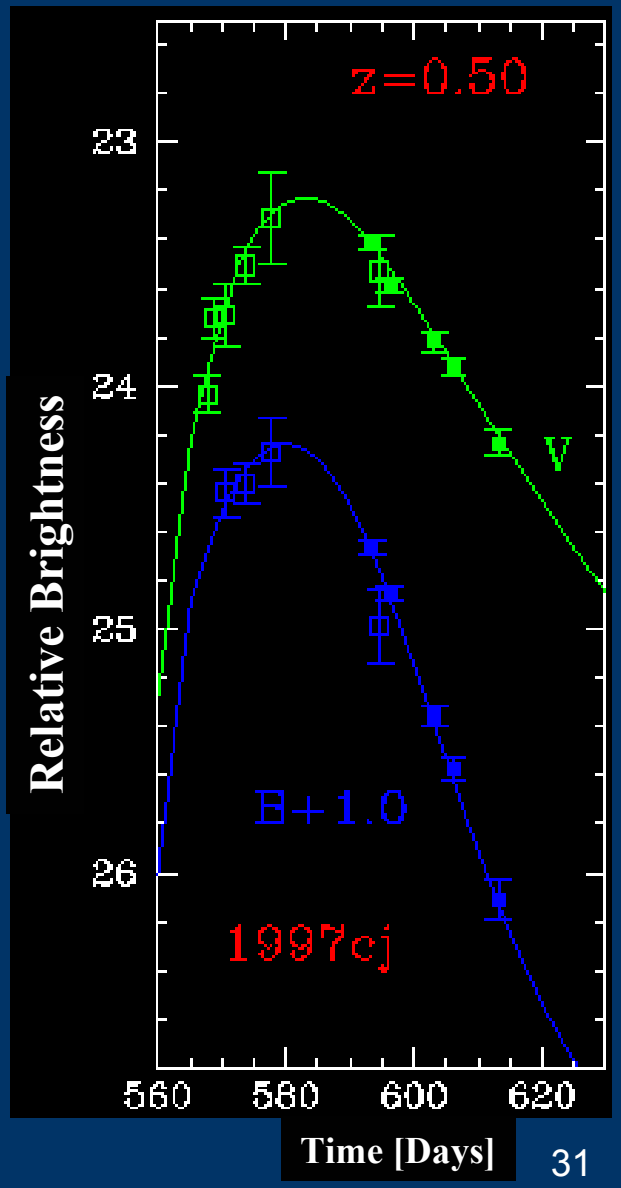
- 宇宙年齢（ハッブル定数） vs. 球状星団の年齢
- **審美眼期待**
  - 宇宙の曲率は0であってほしい ⇔ $\Omega_m+\Omega_\Lambda=1$
  - 宇宙の質量密度$\Omega_m<1$ ⇒ $\Omega_\Lambda>0$
- 遠方銀河のnumber count (N-m relation)
- **Ia型超新星のハッブル図 (m-z relation)**
- **CMB温度ゆらぎスペクトル**

Ia型超新星の光度曲線の測定

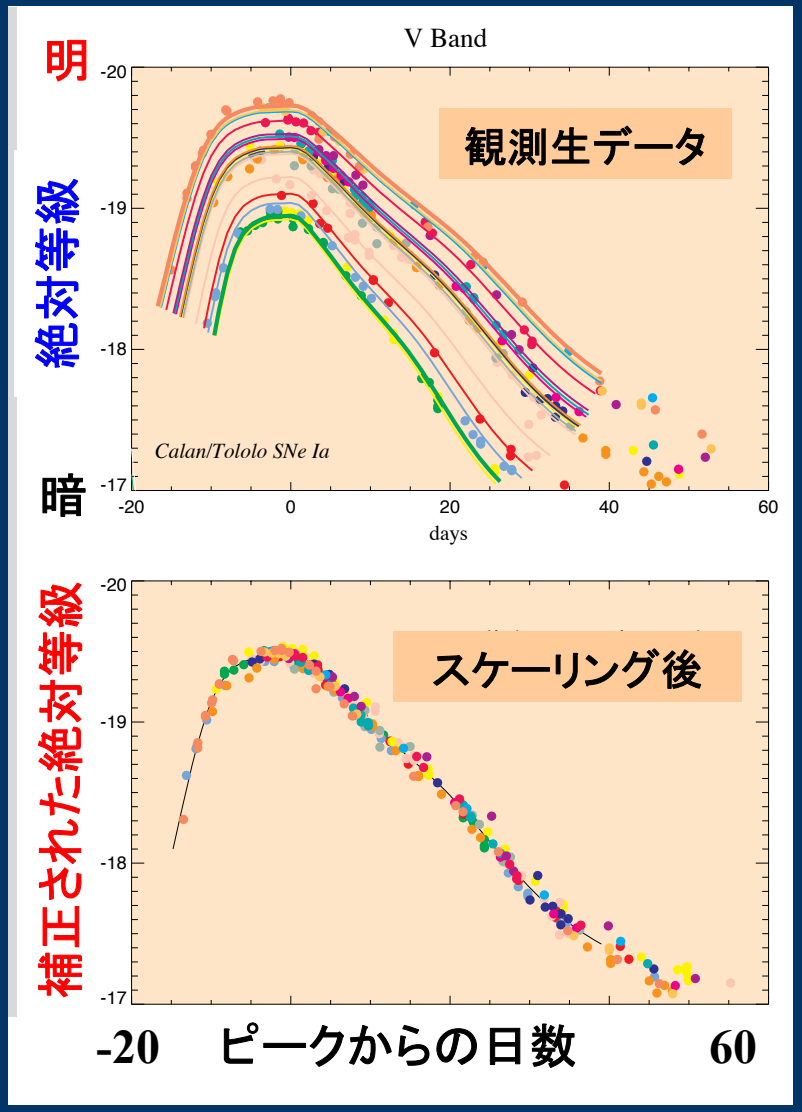
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



HSTで測定したSN 1997cjの明るさの時間変化



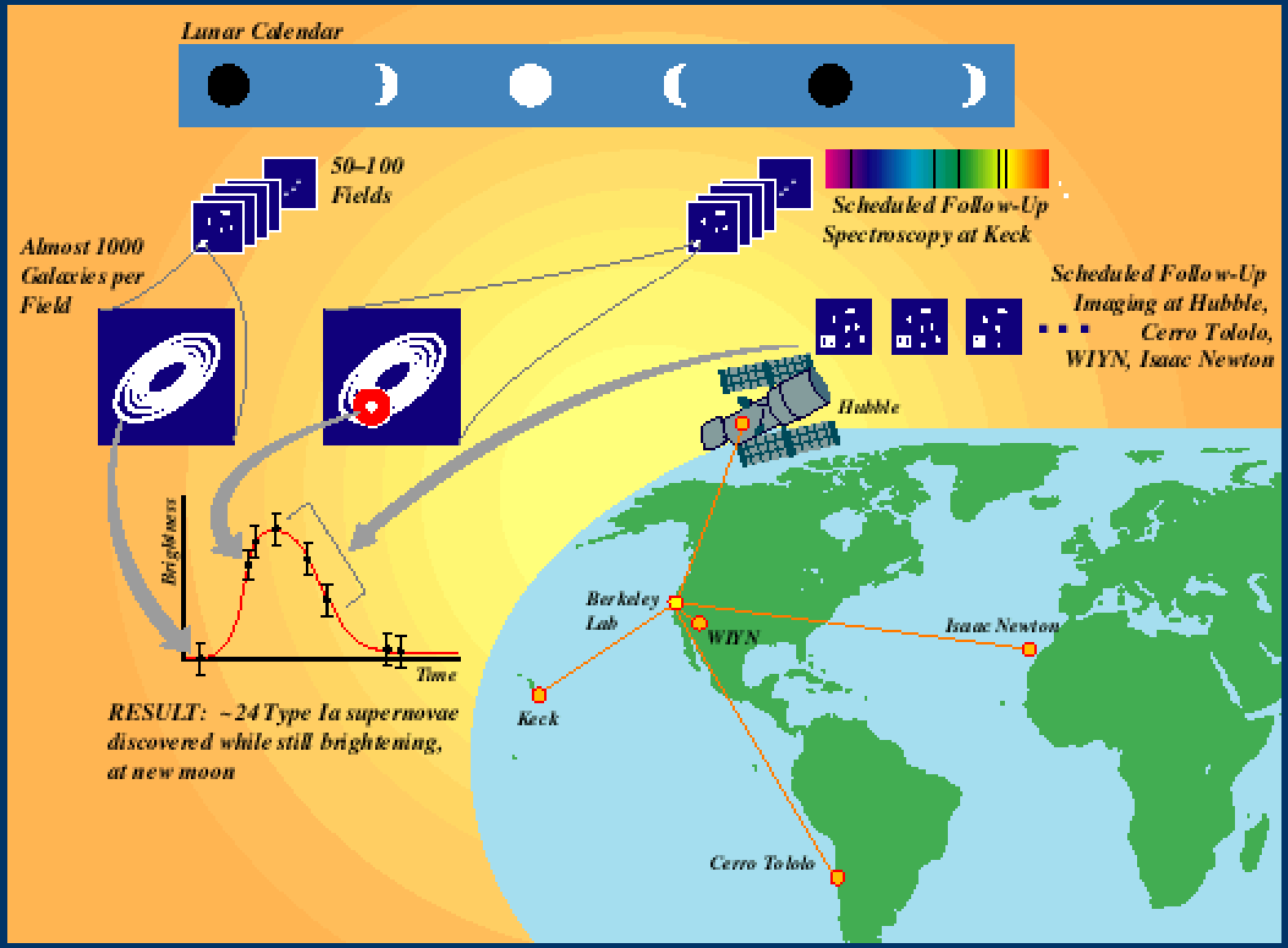
Ia型超新星多波長光度曲線フィット法



- 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リング則が成り立つ
- 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

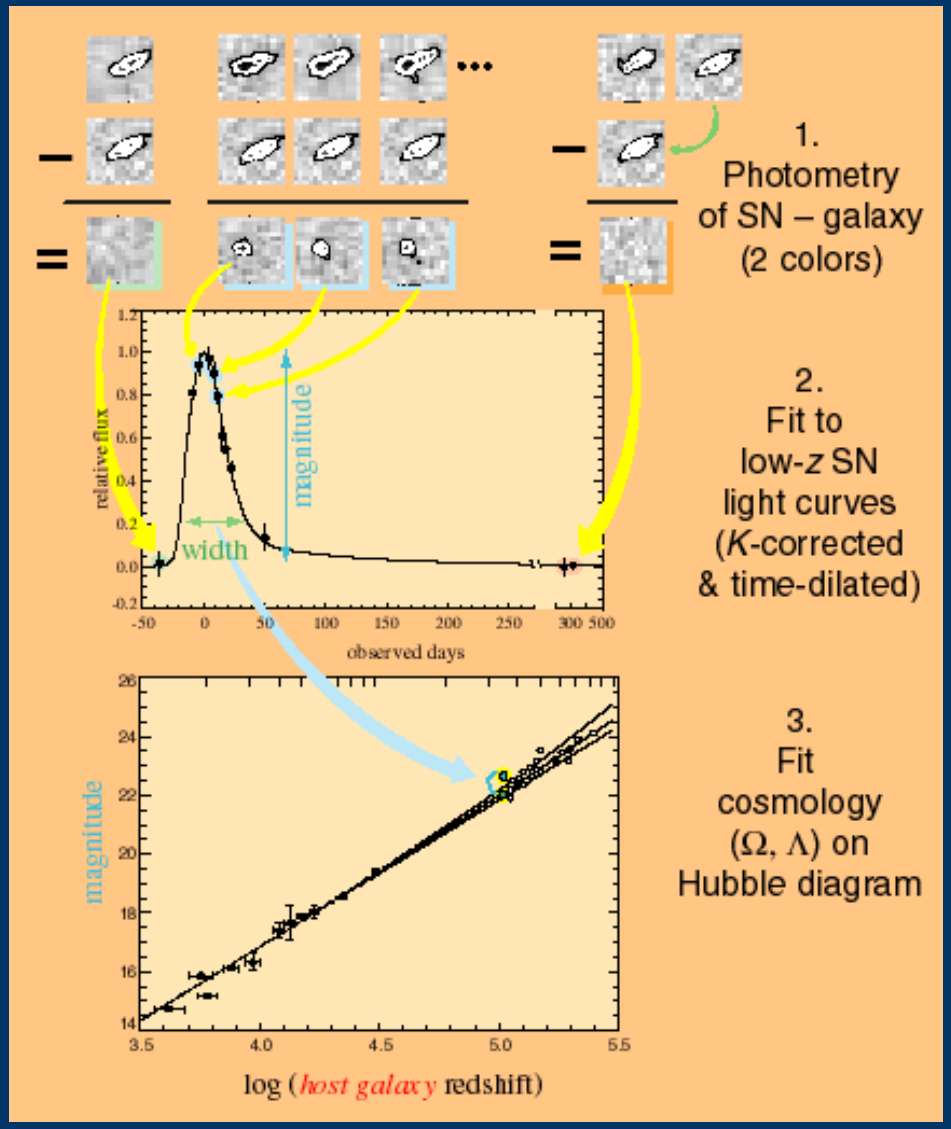
http://www-supernova.lbl.gov/
(Perlmutter 2004, Physics Today, April, p.53)

Supernova Cosmology Project: Strategy



http://www-supernova.lbl.gov/

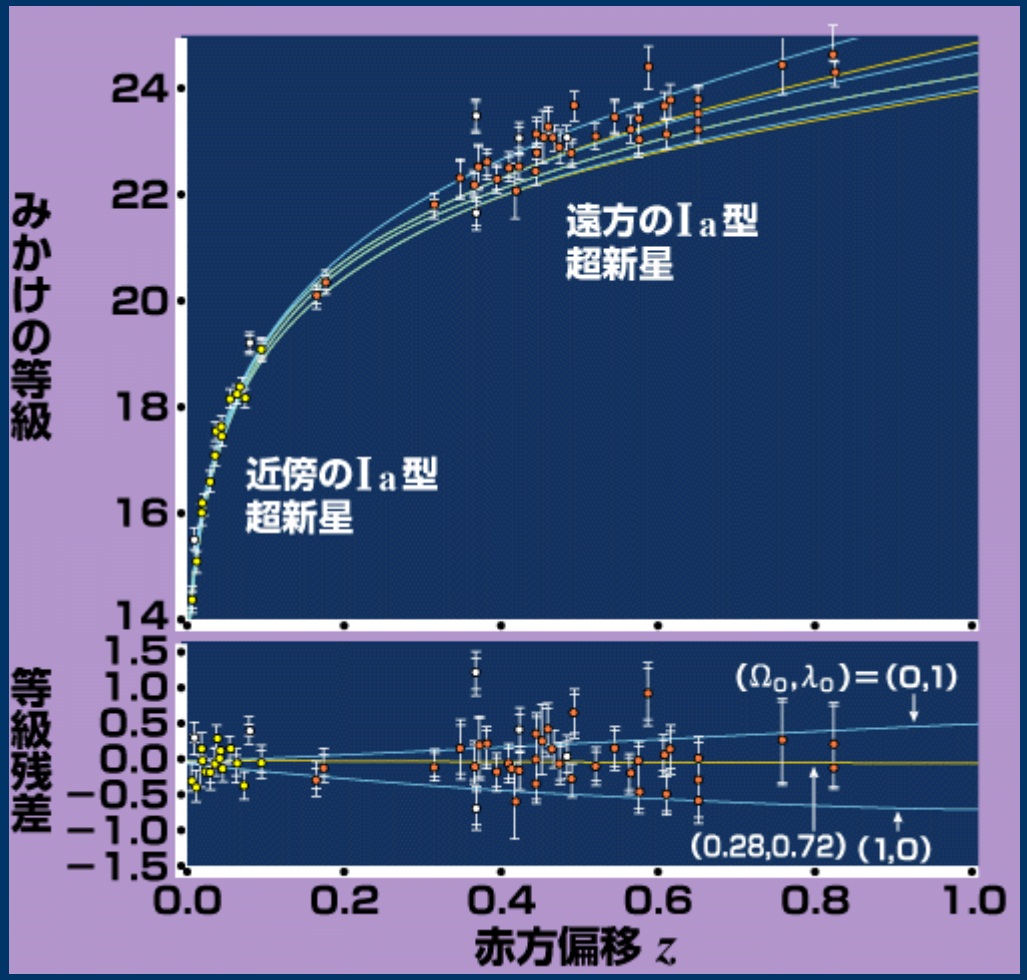
Supernova Cosmology Project: analysis



- 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

http://www-supernova.lbl.gov/

超新星と宇宙定数



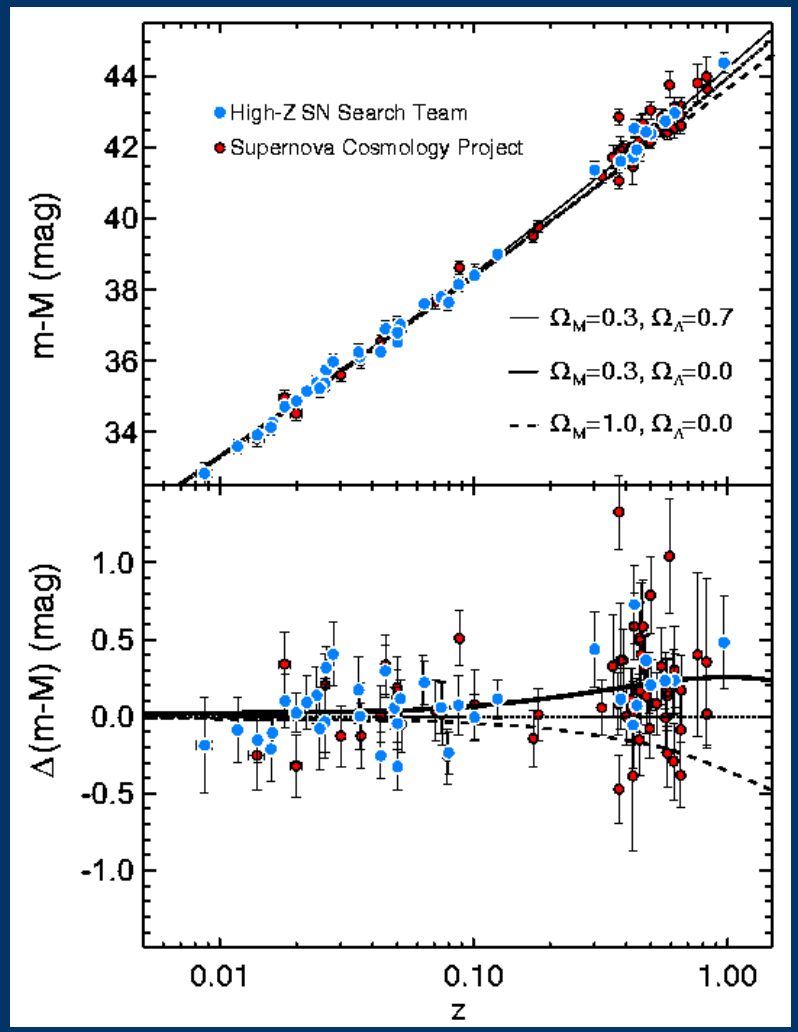
- 遠方超新星までの距離推定

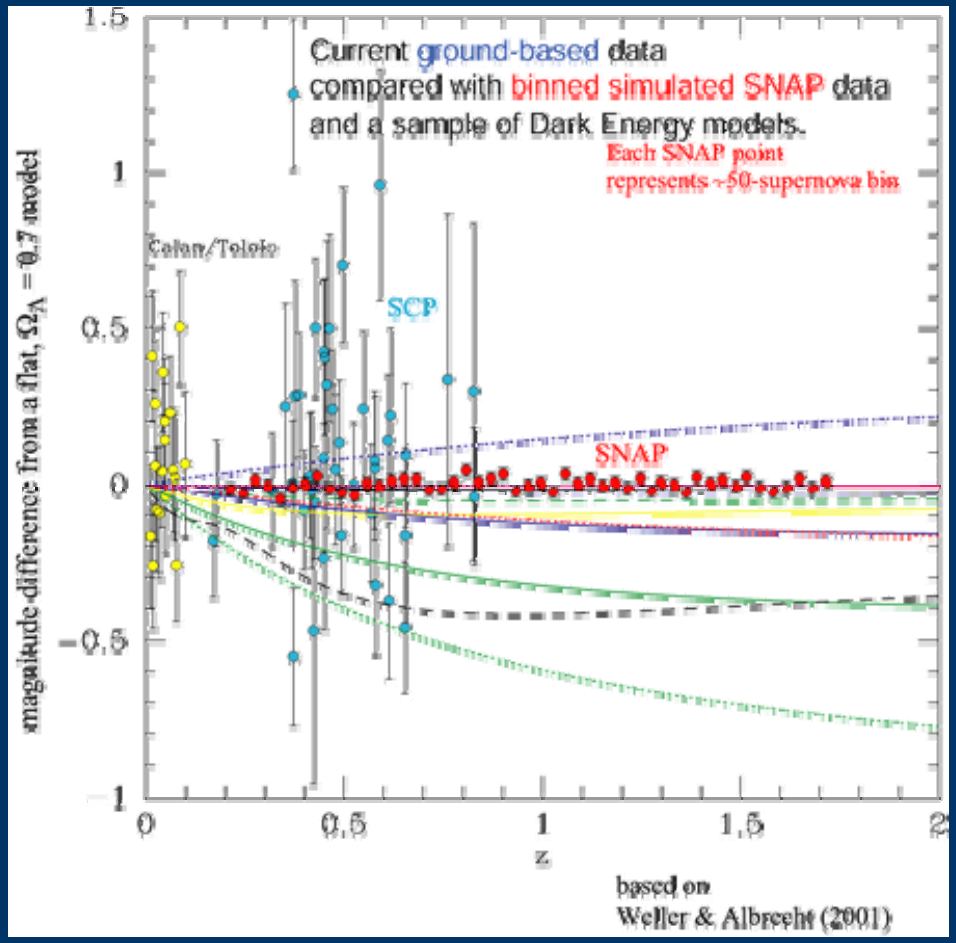
$\Rightarrow$ $\Omega_m \ll 1$, $\Omega_\Lambda > 0$

宇宙定数の存在！

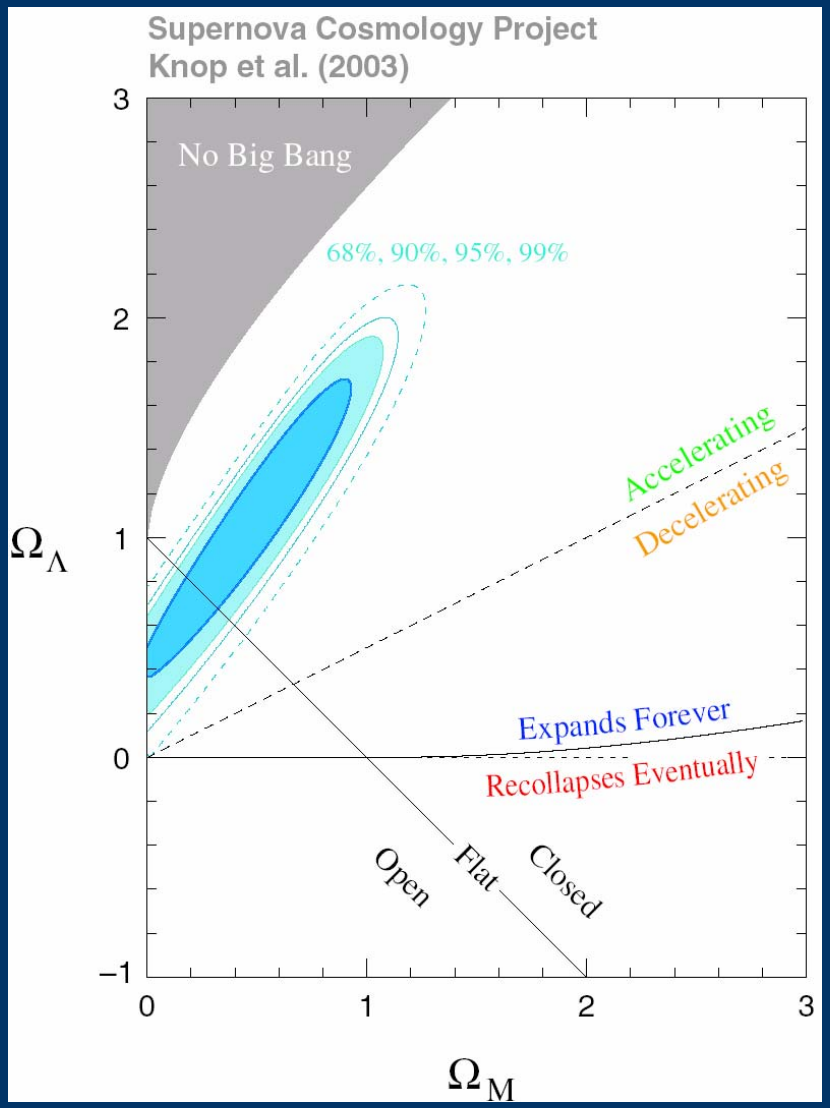
Perlmutter et al. :
The Astrophysical Journal
517(1999)565

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

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

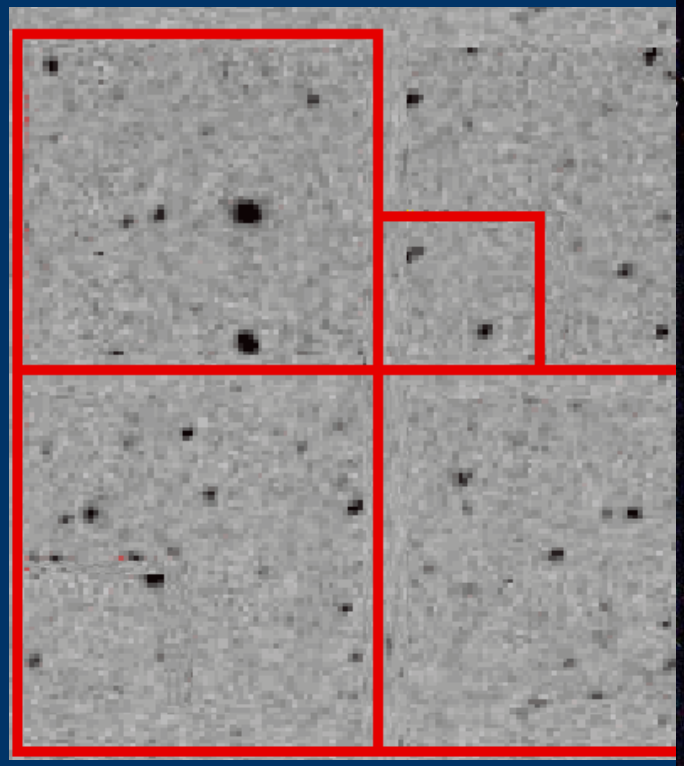
- $\Omega_\Lambda > \Omega_m/2$であれば現在の宇宙は加速膨張

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

4-3　CMBと宇宙の組成

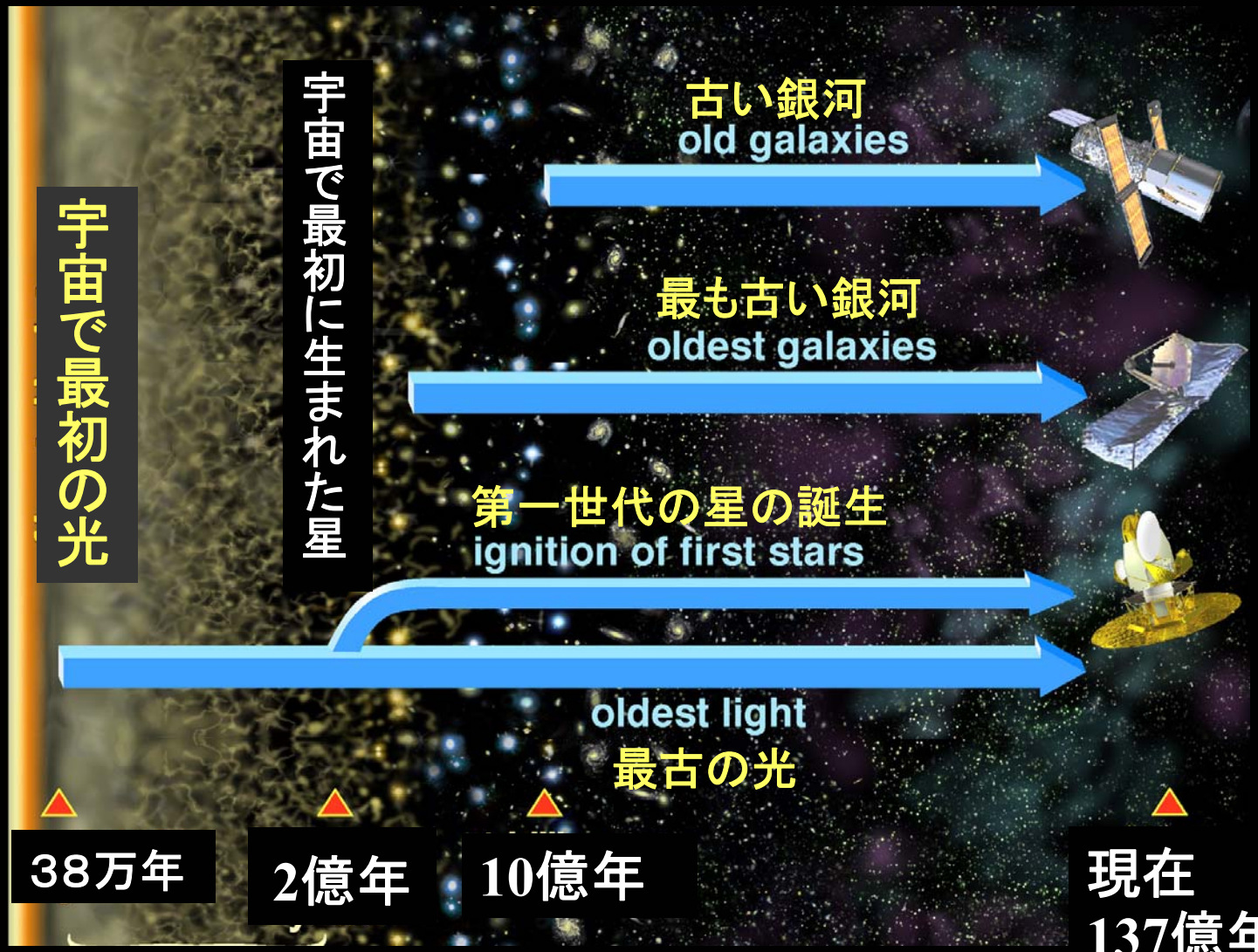
宇宙を見る“目”の進歩



地上4m望遠鏡＋CCD
100×写真乾板

ハッブル宇宙望遠鏡＋CCD：1000×
地上望遠鏡

衛星によってさらなる宇宙の果てを見る



ハッブル
宇宙望遠鏡

次世代
宇宙望遠鏡

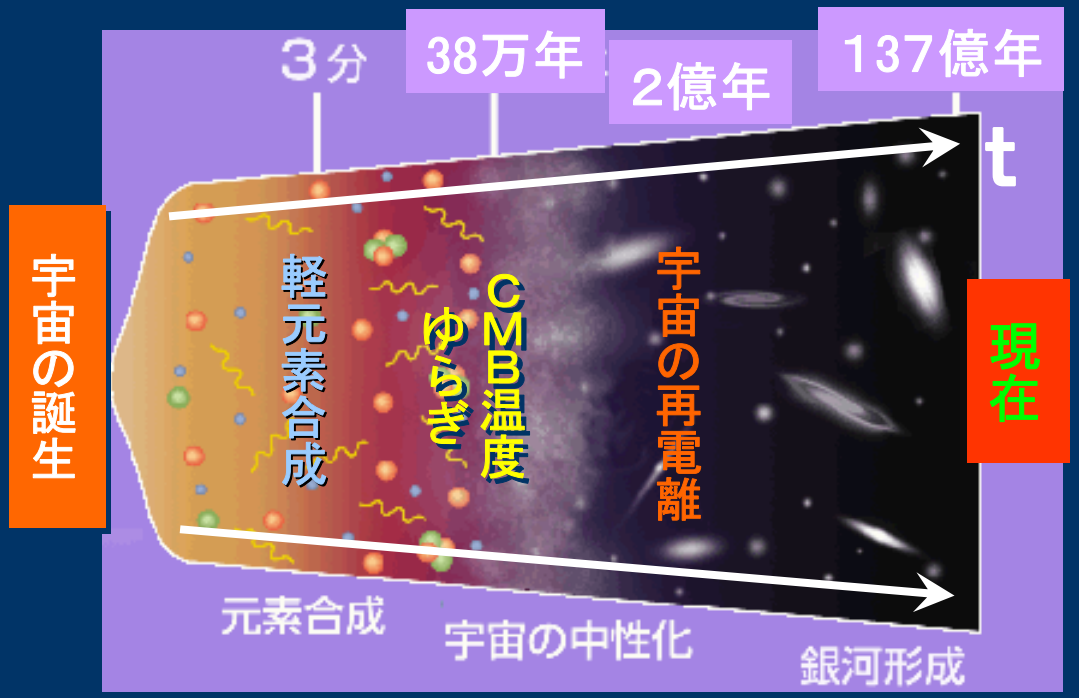
WMAP衛星
（電波）

NASA/WMAP
サイエンス
チーム 提供

http://lambda.gsfc.nasa.gov

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）



量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

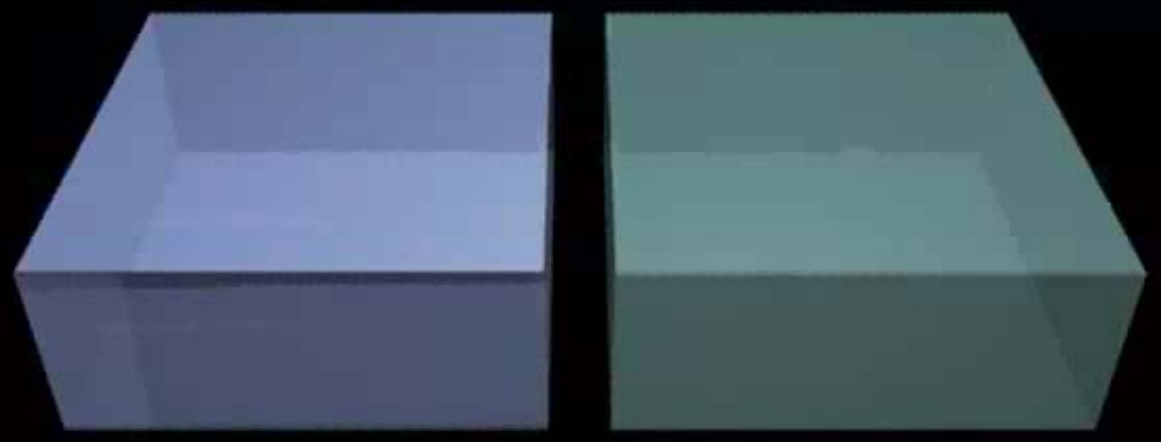
銀河団の形成

宇宙の大構造

CMB:
Cosmic Microwave Background

- <u>宇宙の晴れ上がり</u>
  - 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

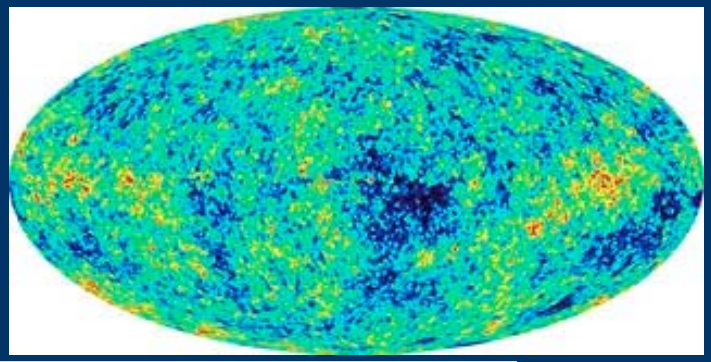
温度地図のゆらぎパターン=宇宙の音波振動



NASA/WMAP
Science Team

http://lambda.gsfc.nasa.gov

137億年前の古文書の解読方法

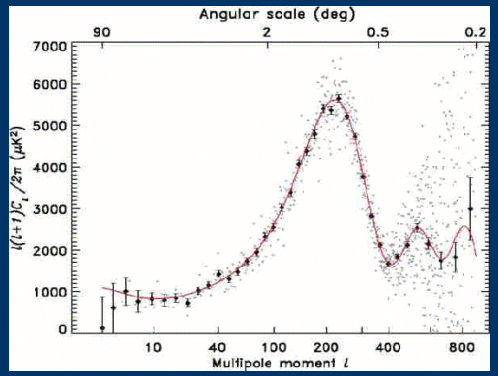


- 暗号化された状態の古文書
  - 宇宙マイクロ波全天温度地図
- 暗号を解く鍵
  - 球面調和関数展開

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

- 解読された古文書内容
  - 温度ゆらぎスペクトル

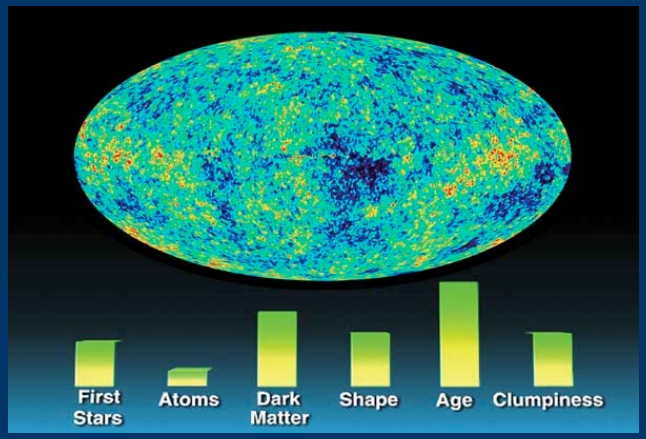
$$C_l = \left\langle a_{lm} a_{lm}^* \right\rangle$$



- 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、、、

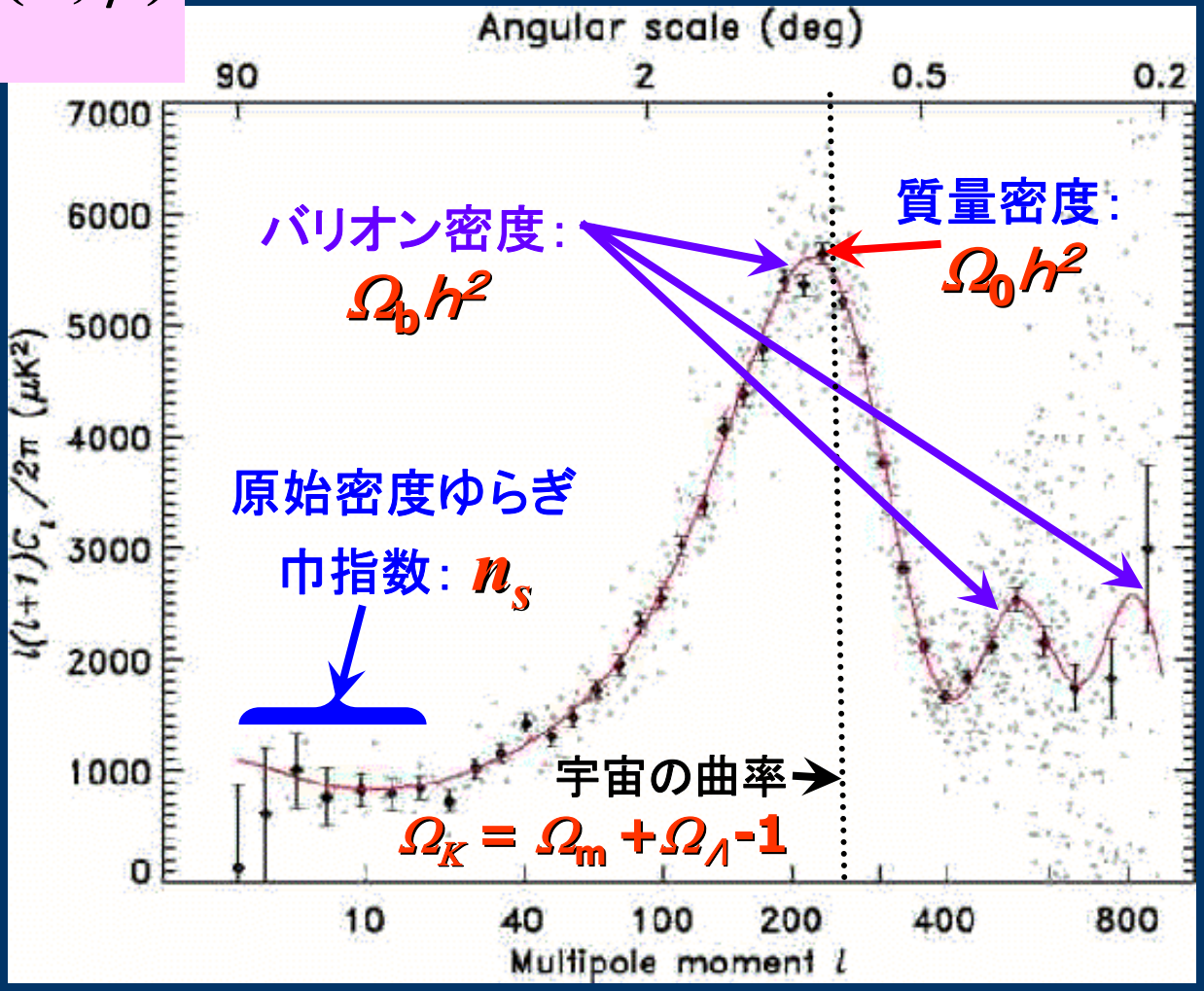
WMAPの観測した温度ゆらぎパワースペクトル

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



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

Spergel et al.
ApJS 148(2003)175



CMBと宇宙の曲率

NASA/WMAP
Science Team

http://lambda.gsfc.nasa.gov

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_{dec}=1089±1
   c. 宇宙の大きさが現在の$1/(1+z_{dec})$～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_{dec}=37.2±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=147Mpc

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の位置に対応（さらに右のピークはその高調波）
   b. WMAPの観測結果より、l～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±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Ω_{tot}=曲率+1=1.02±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、$d=r/\theta \sim 14$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_{dec}=37.2±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±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±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(通常の重力を及ぼす)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、$(\Omega_{DM}+\Omega_b)h^2$=0.135±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. $h=0.71\pm0.04$
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: $\Omega_{tot}=1.02\pm0.02$
   c. バリオン+ 暗黒物質：$\Omega_b=0.29\pm0.04$
   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

Cosmological parameters (WMAP+others)

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

$w < -0.78$ (95% CL)

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

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

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

$n_b = 2.5 \times 10^{-7}{}^{+0.1\times10^{-7}}_{-0.1\times10^{-7}}$ cm^{-3}

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

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

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

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

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

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

$\eta = 6.1 \times 10^{-10}{}^{+0.3\times10^{-10}}_{-0.2\times10^{-10}}$

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

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

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

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

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

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

$r < 0.71$ (95% CL)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

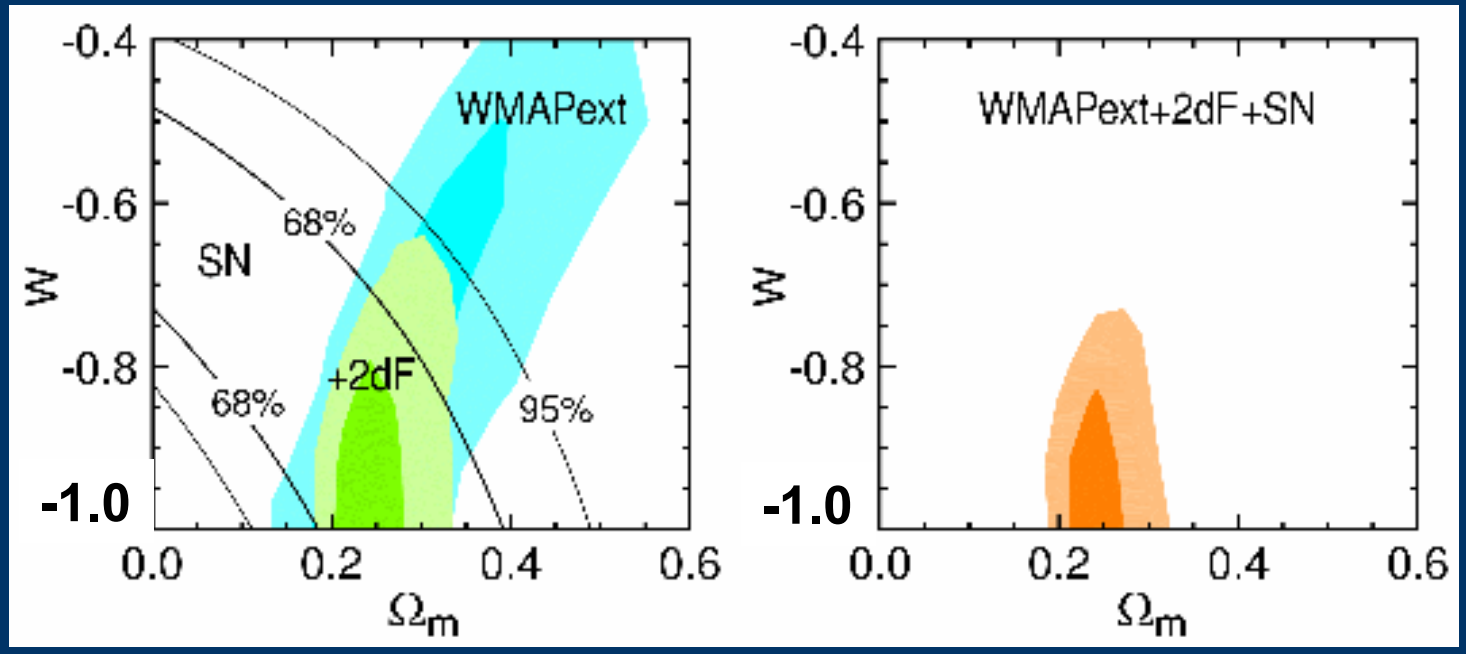
$l_A = 301^{+1}_{-1}$

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

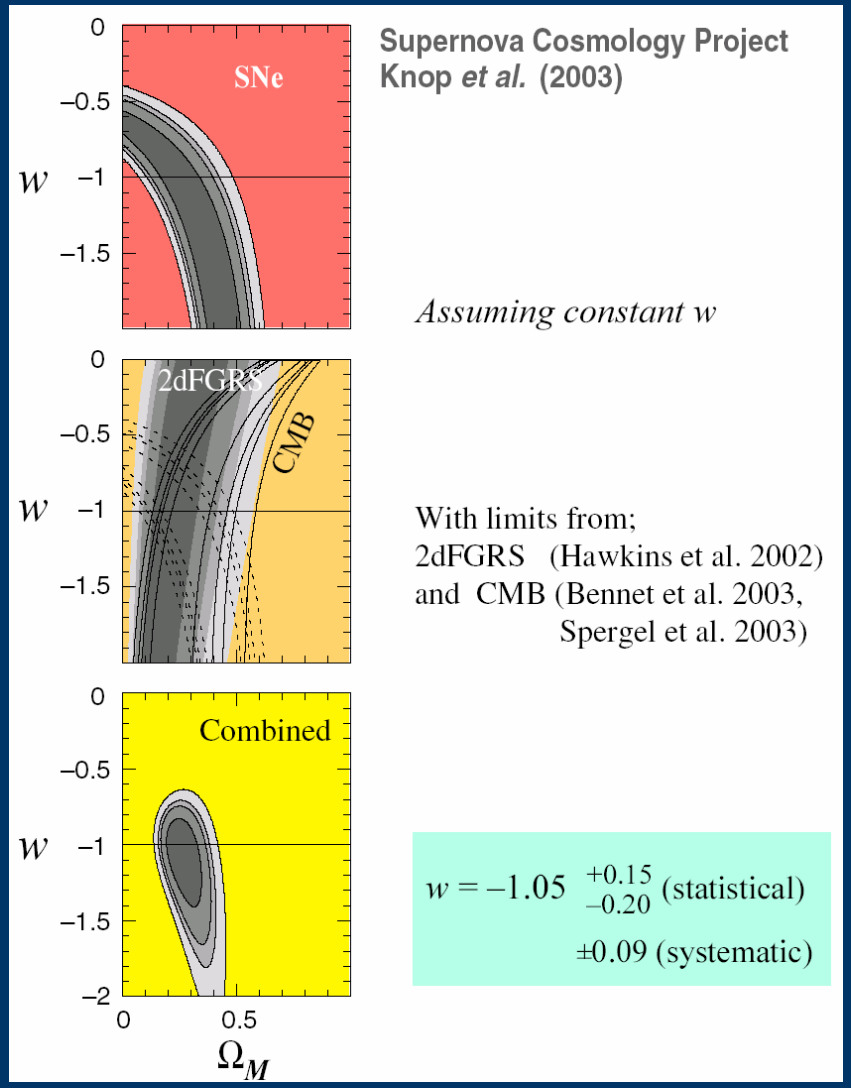
NASA/WMAP Science Team

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 ⇒ w<-0.78 (95%)



宇宙の状態方程式への制限

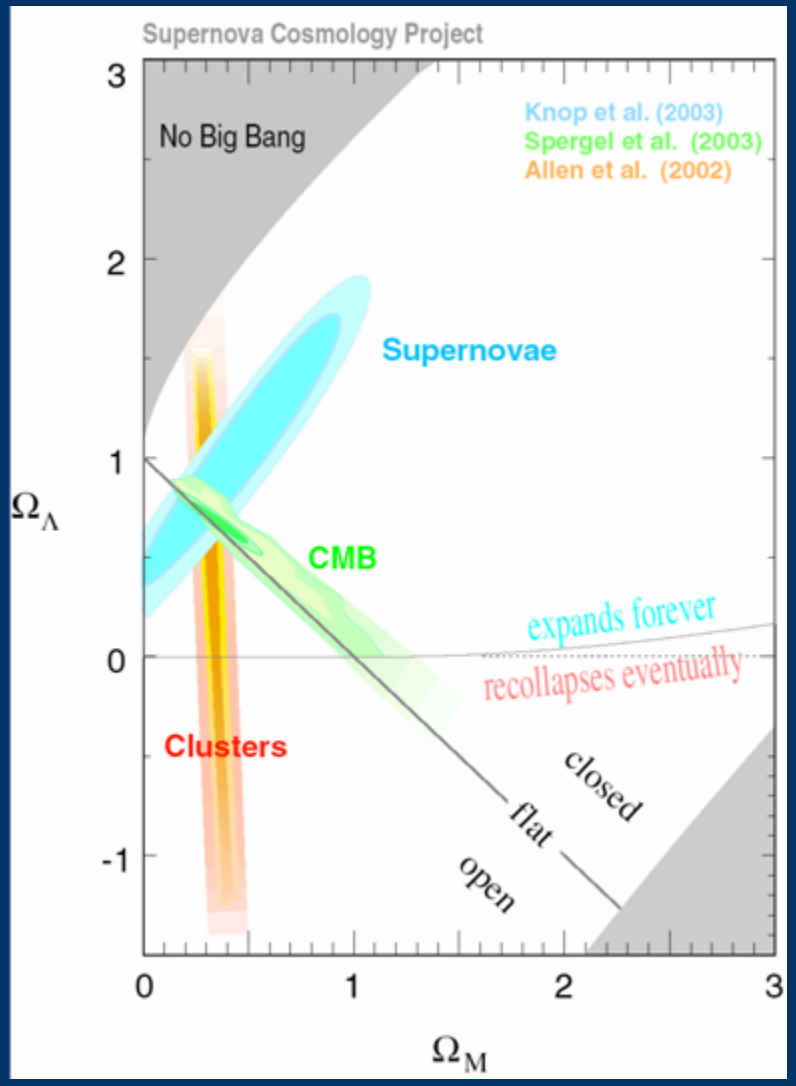


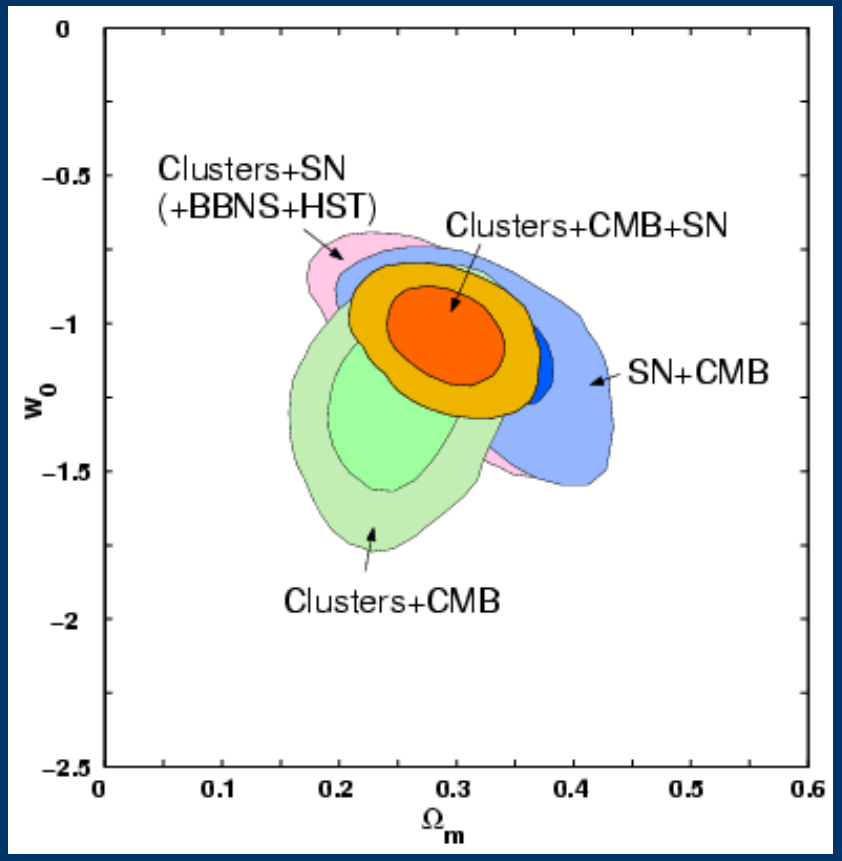
- 宇宙の状態方程式
  - $p = w\rho$

    $\Rightarrow \rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
  - $w=-1$: 宇宙定数
  - $-1<w<0$: （一般の）ダークエネルギー
- $w = -1.05 \begin{smallmatrix} +0.15 \\ -0.20 \end{smallmatrix}$

  ± 0.09

超新星、CMB、銀河団からの制限

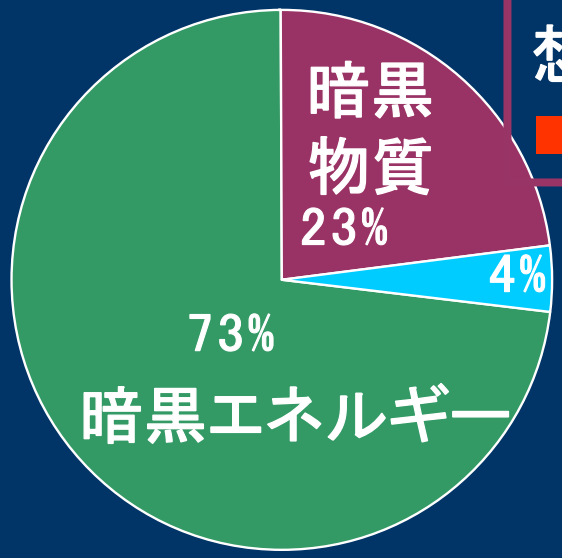




Rapetti, Allen & Weller (2004)
astro-ph/0409574

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？

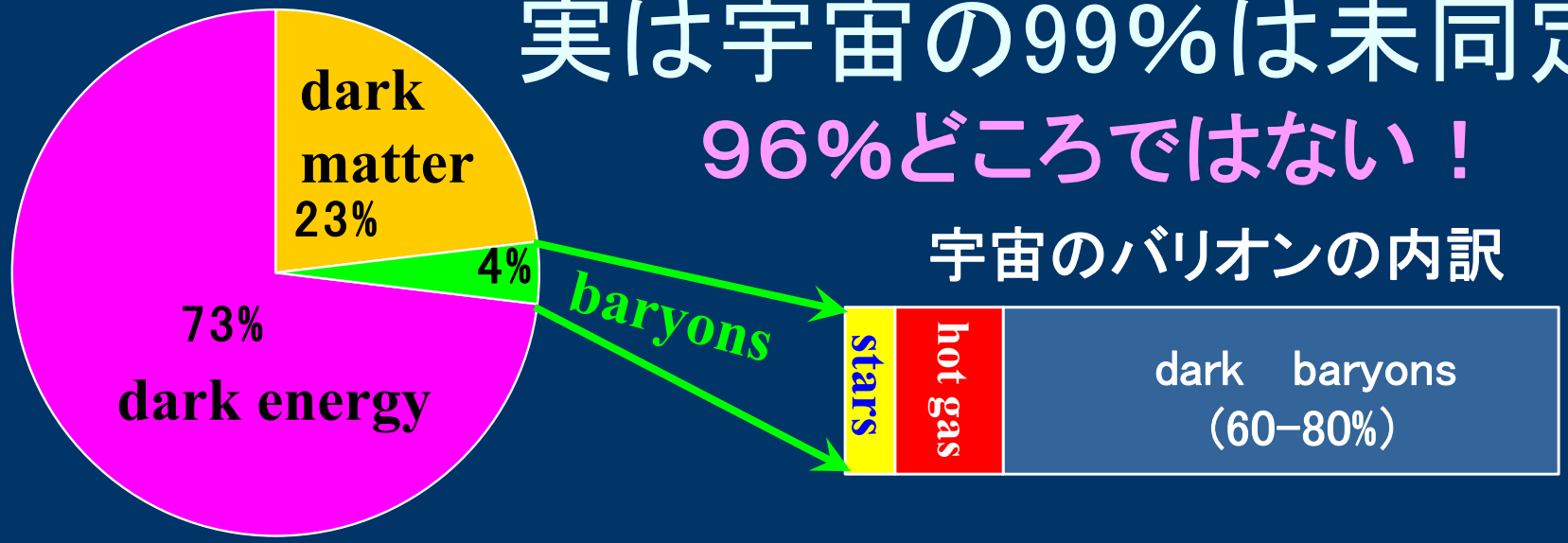
通常の物質（バリオン）

■ 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？

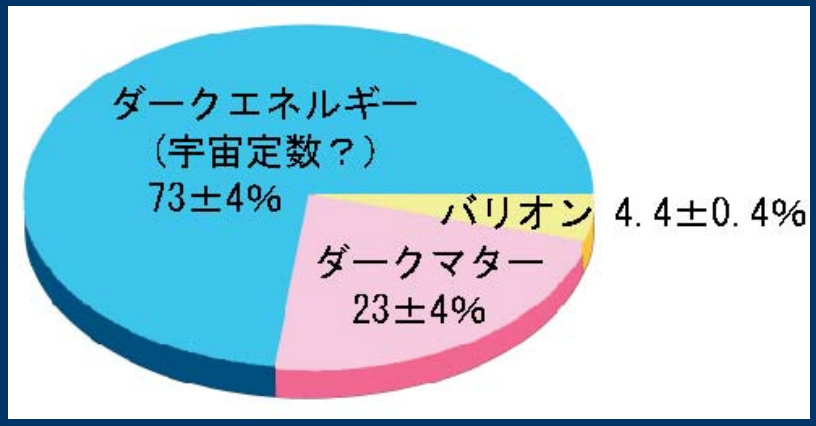
実は宇宙の99%は未同定

96%どころではない！



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