

宇宙論パラメータの 観測的決定

2001年度冬学期 東京大学物理学教室

宇宙物理学 須藤 靖

第12・13回講義 2002年1月18・25日

宇宙論パラメータとその決定法

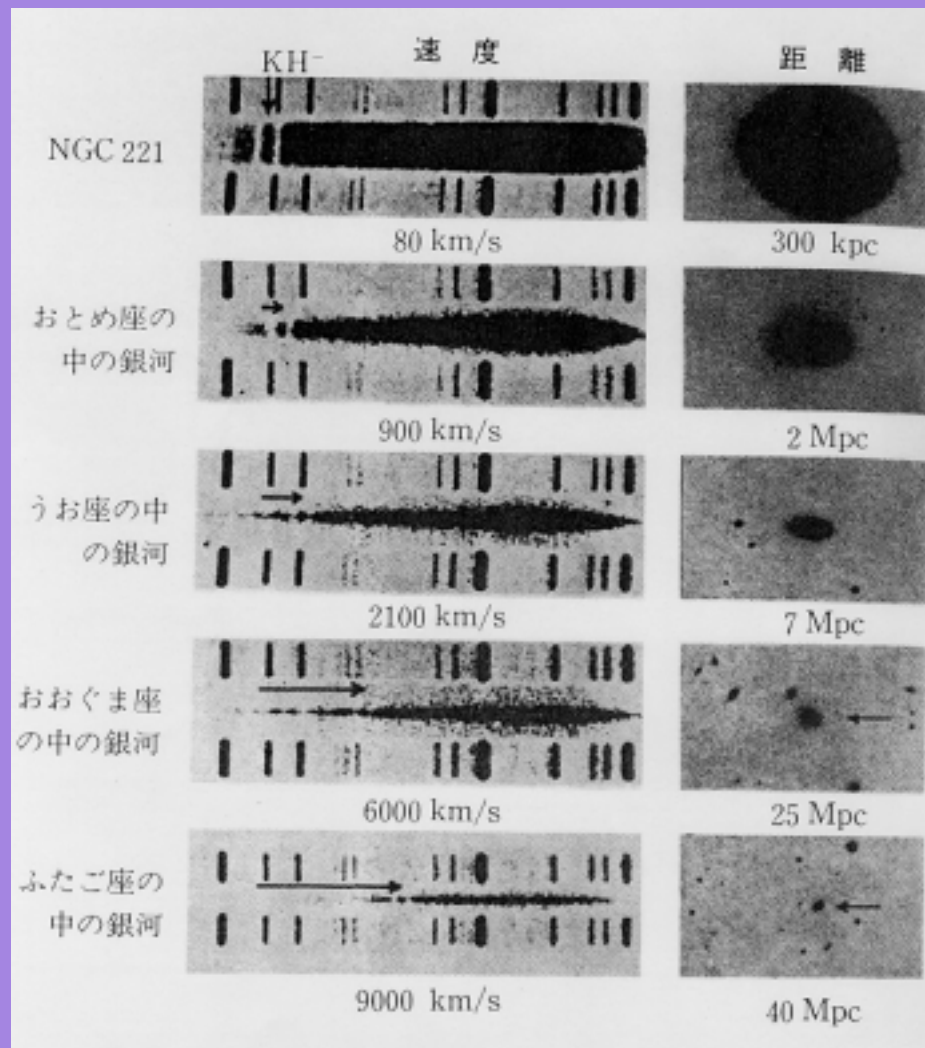
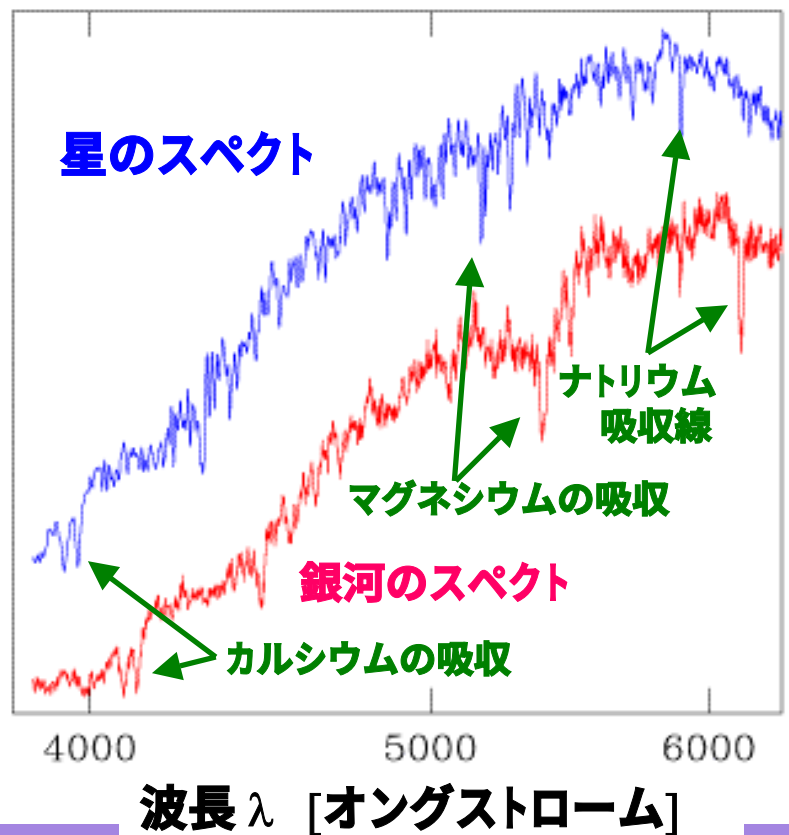
記号	意味	観測的決定法
H_0	ハッブル定数	HSTによるセファイド型変光星を用いた銀河距離指標の較正
Ω_b	バリオン密度パラメータ	ビッグバン元素合成理論予言値と軽元素存在量との比較
Ω_0	質量密度パラメータ	渦巻銀河の回転曲線、銀河団のビリアル質量、銀河団の個数密度
λ_0	宇宙定数	遠方のIa型超新星のハッブル図
k_0	宇宙の曲率 ($= \Omega_0 + \lambda_0 - 1$)	マイクロ波背景輻射の温度揺らぎの角度スペクトル

1. ハッブル定数

$$H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$$

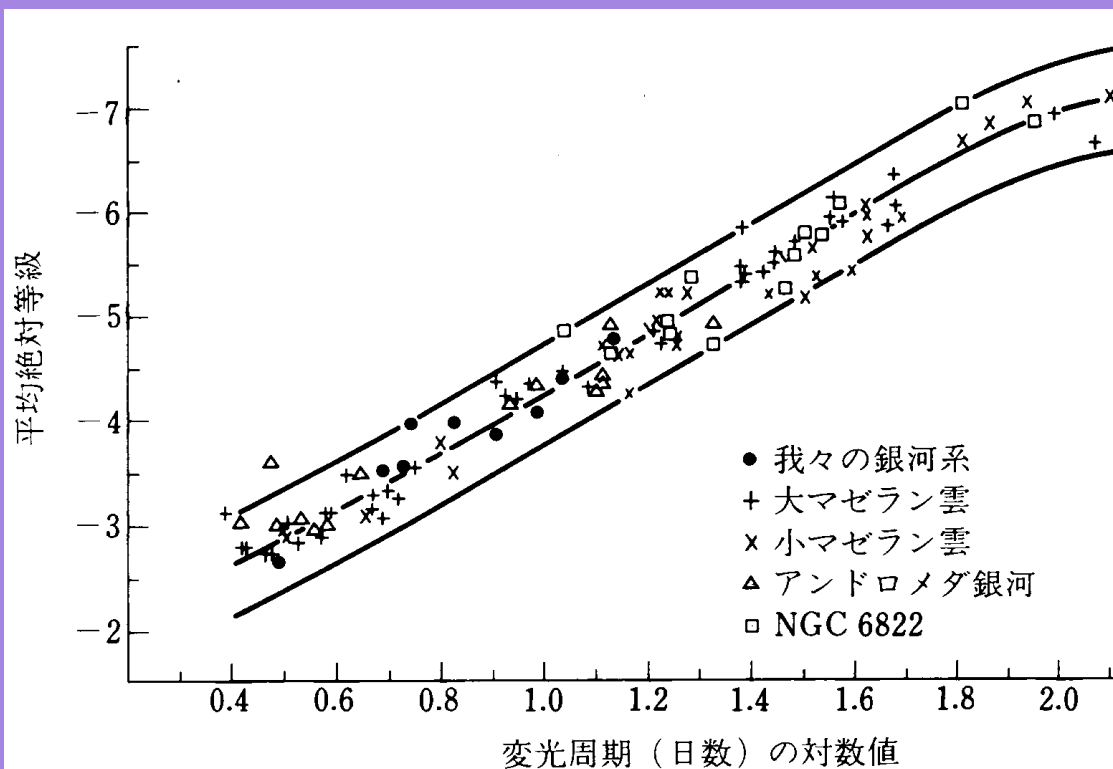
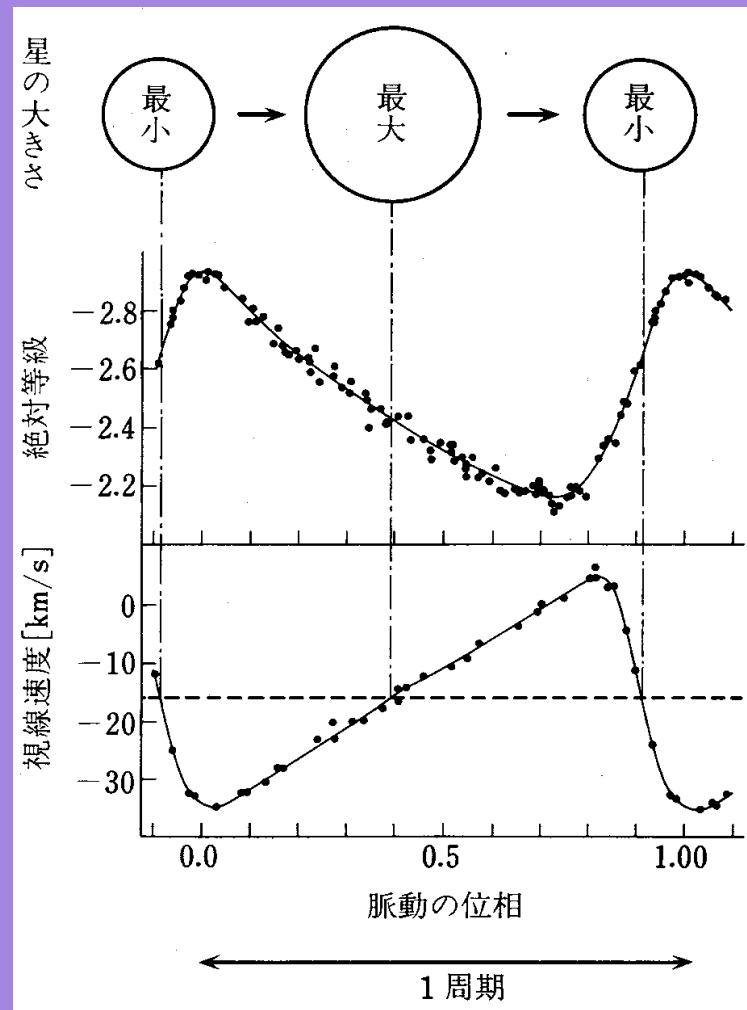
銀河の分光観測と後退速度

スペクトル強



セファイド型 変光星

■ 1日から100日程度の規則的な周期で半径が振動する変光星。その絶対強度と脈動周期の間に規則的な関係が知られており、周期から絶対光度が推定できる。遠方天体の距離指標として最も信頼されている。



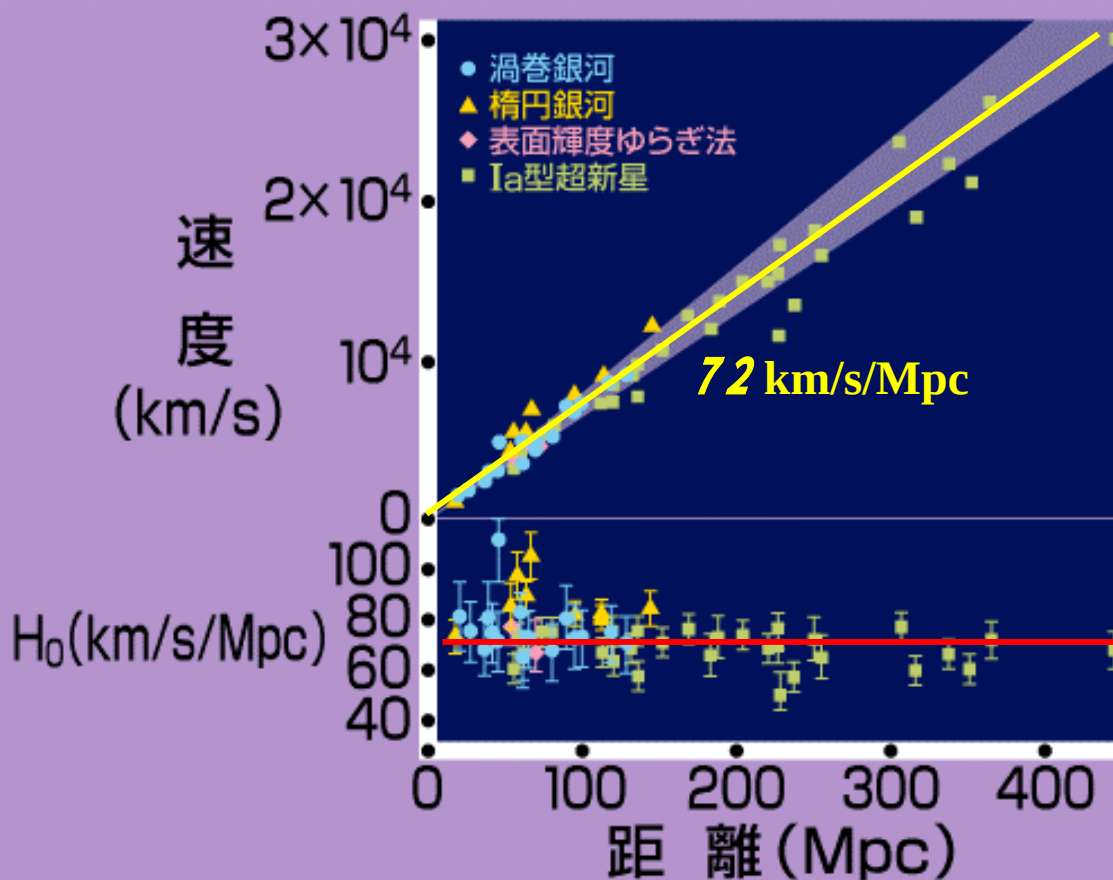
ハッブル宇宙望遠鏡

- 1990年4月24日に打ち上げられた、史上初の可視光宇宙望遠鏡（口径2.4m）。光学系の設計ミスでピンボケであったが、1993年12月2日に打ち上げられたスペースシャトルエンデバー号による修理ミッションの結果、当初の目的であった0.1秒角以下の解像度を達成。20世紀可視光天文学の金字塔である。



ハッブル定数と宇宙の距離尺度

■ 遠方銀河の距離推定 $\Rightarrow H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$



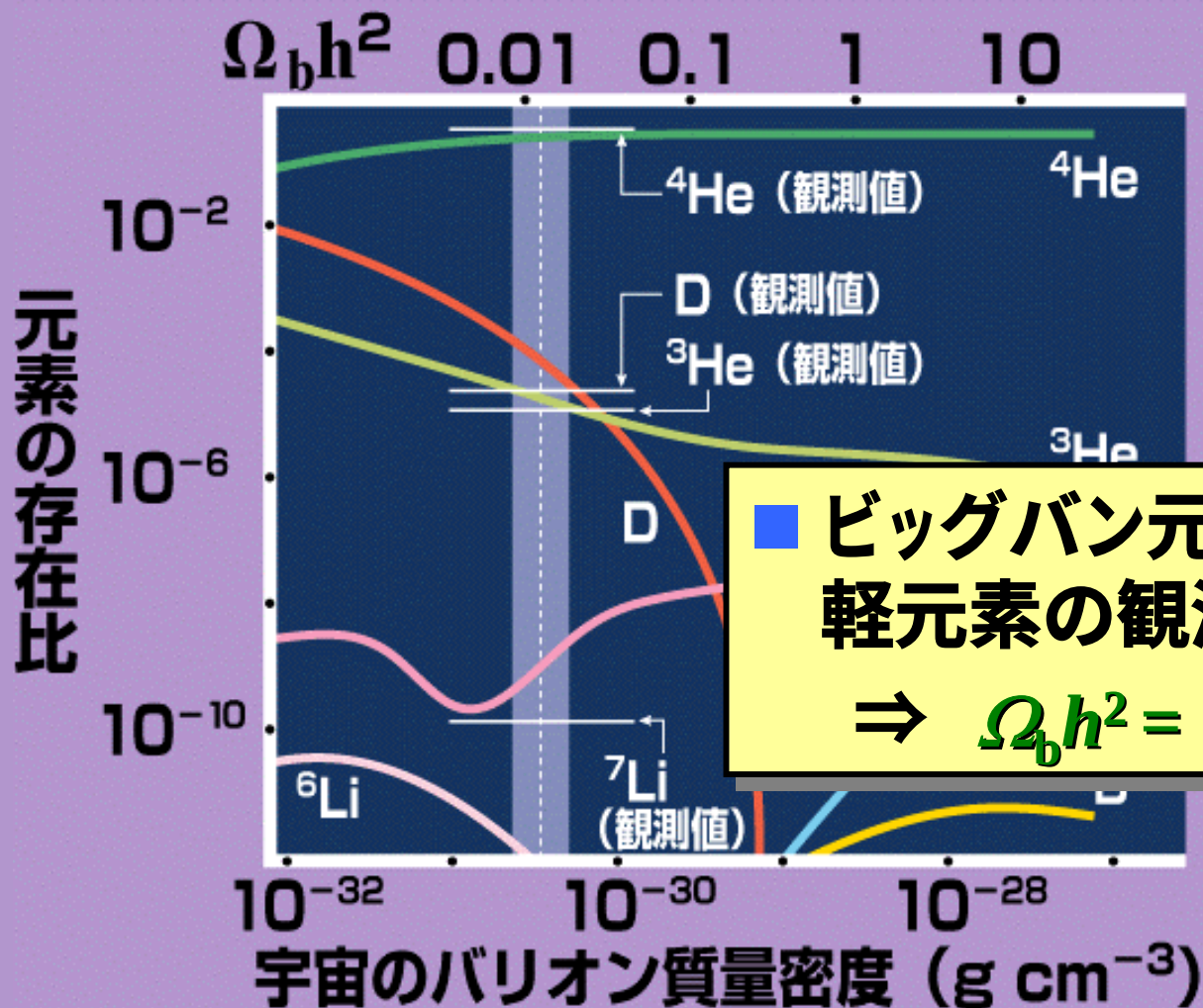
ハッブル宇宙望遠鏡によるセファイド変光星の観測から較正された銀河距離指標を用いて、ハッブル定数の値は約1割の精度で決定されている

W.L.Freedman:
Phys.Rep.333-334(2000)13

2. バリオン密度パラメータ

$$\Omega_b h^2 = 0.02$$

ビッグバン元素合成と バリオン密度パラメータ



■ ビッグバン元素合成理論予言と
軽元素の観測量の比較

$$\Rightarrow \Omega_b h^2 = 0.02$$

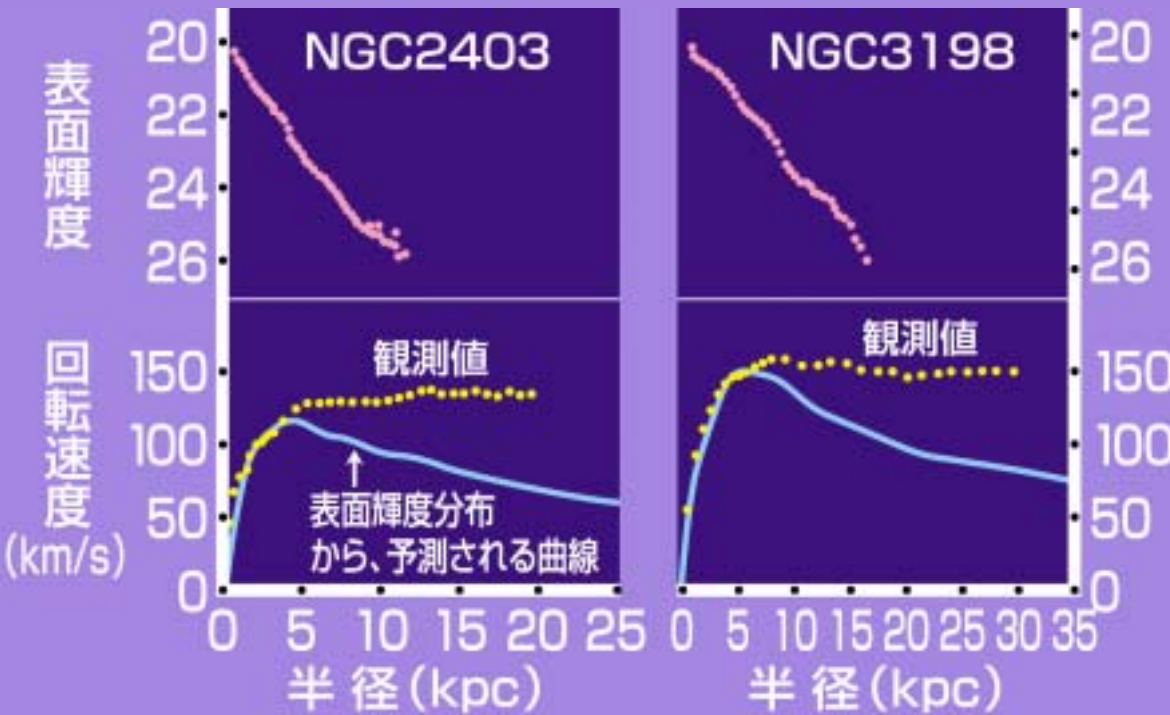
3. 質量密度パラメータ

$$\Omega_0 = 0.3$$

銀河に付随した暗黒物質

■ 銀河の平坦な回転曲線は暗黒物質の存在を示す

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

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

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

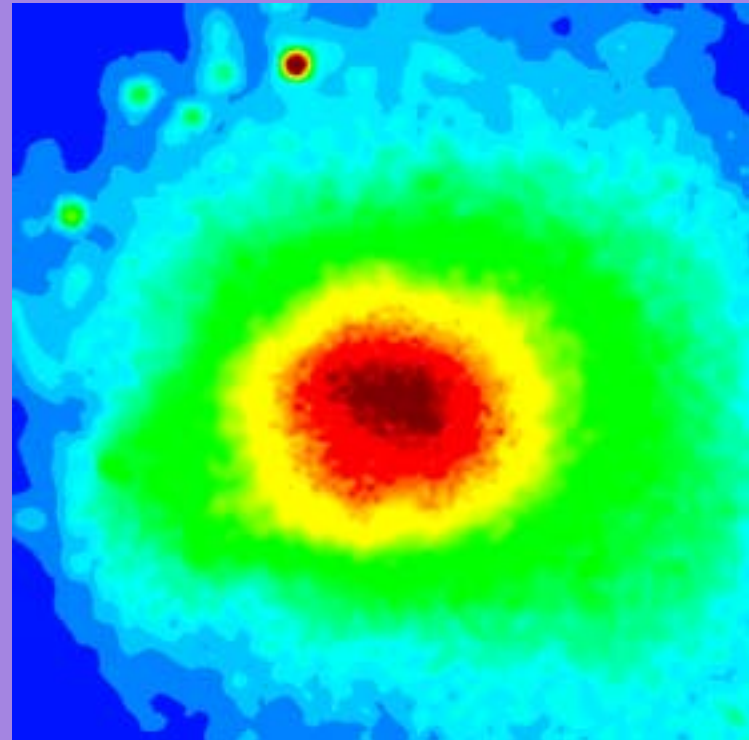
$$v(r) = \text{const.} \rightarrow M(<r) \propto r$$

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)**

銀河団に付随した暗黒物質

- 銀河団は、銀河、高温ガス、暗黒物質の3成分からなる
- 可視光、X線、電波、サブミリ波など、多波長観測が可能
- 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



1h⁻¹Mpc

NASA/GSFC S.L.Snowden氏提供

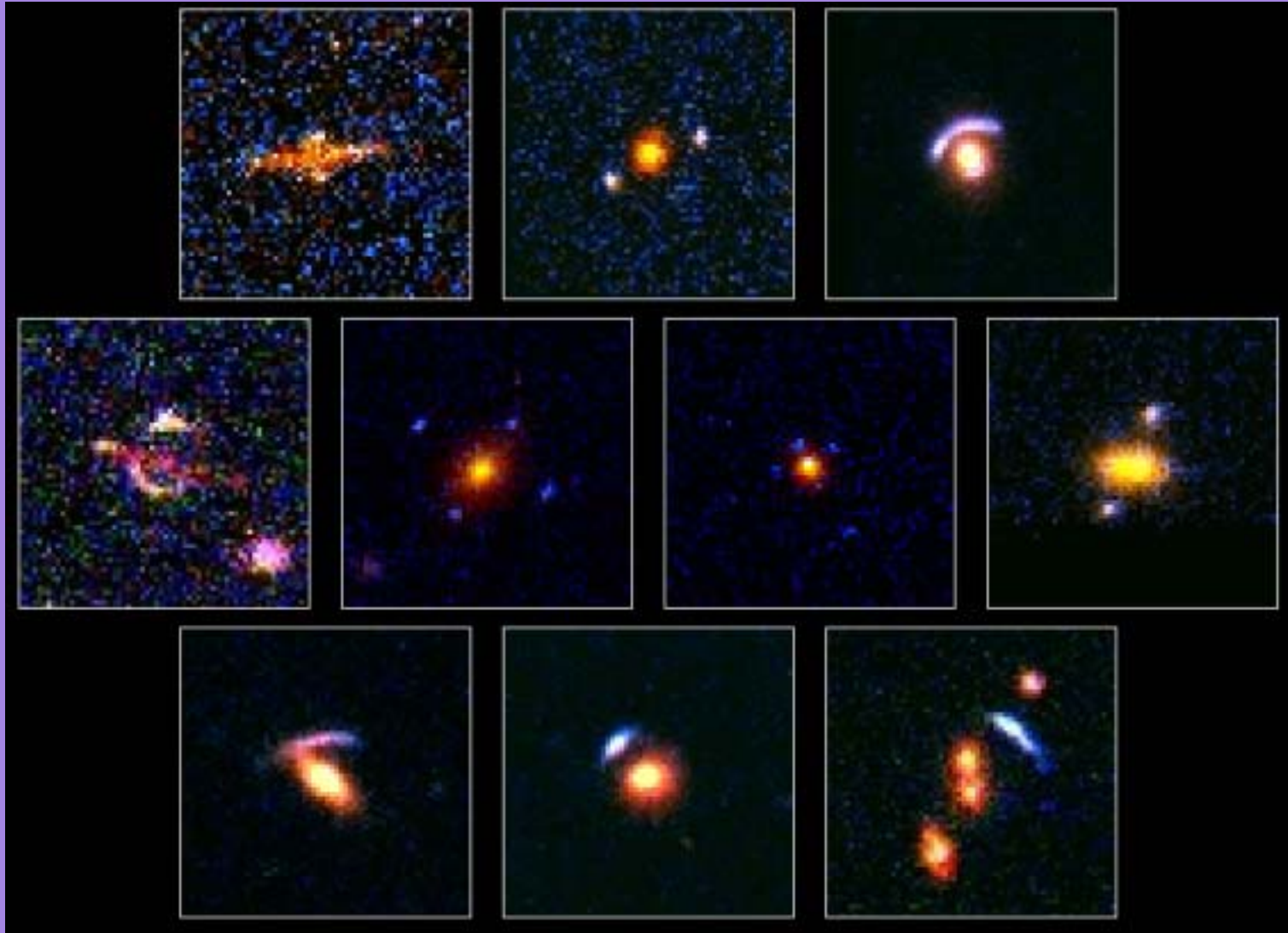
重力レンズの分類



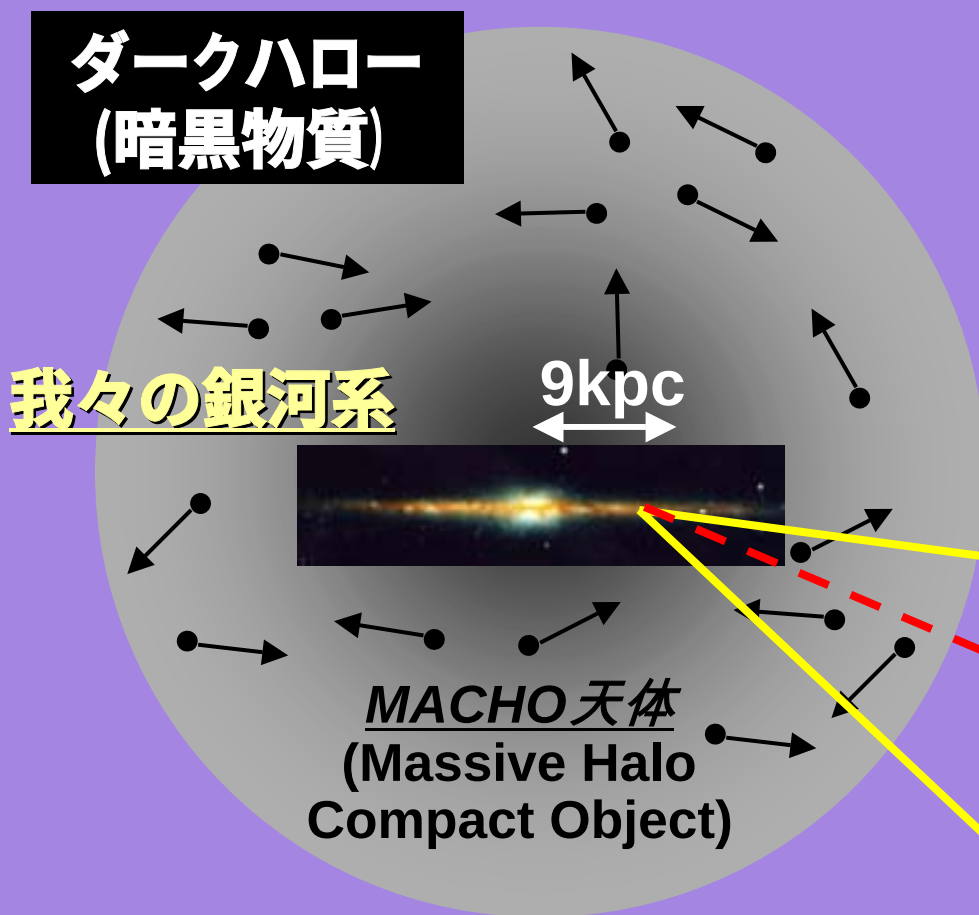
■ 光線は重力場によって曲げられる

- 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

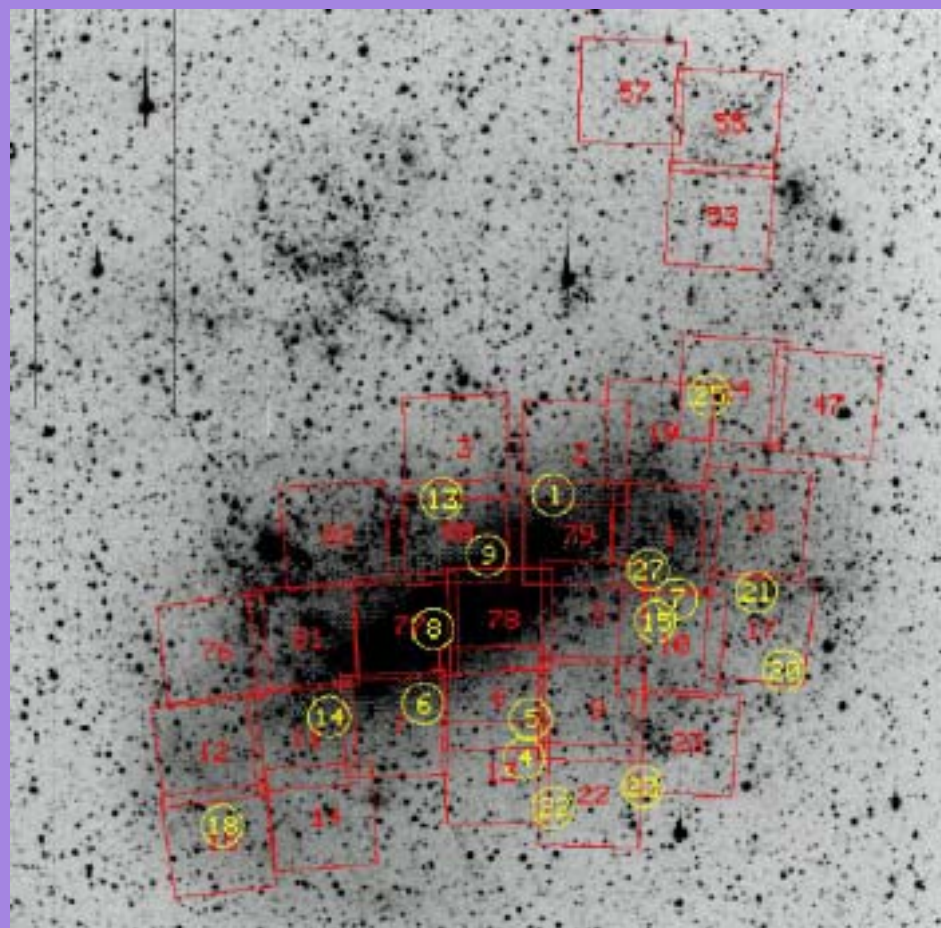
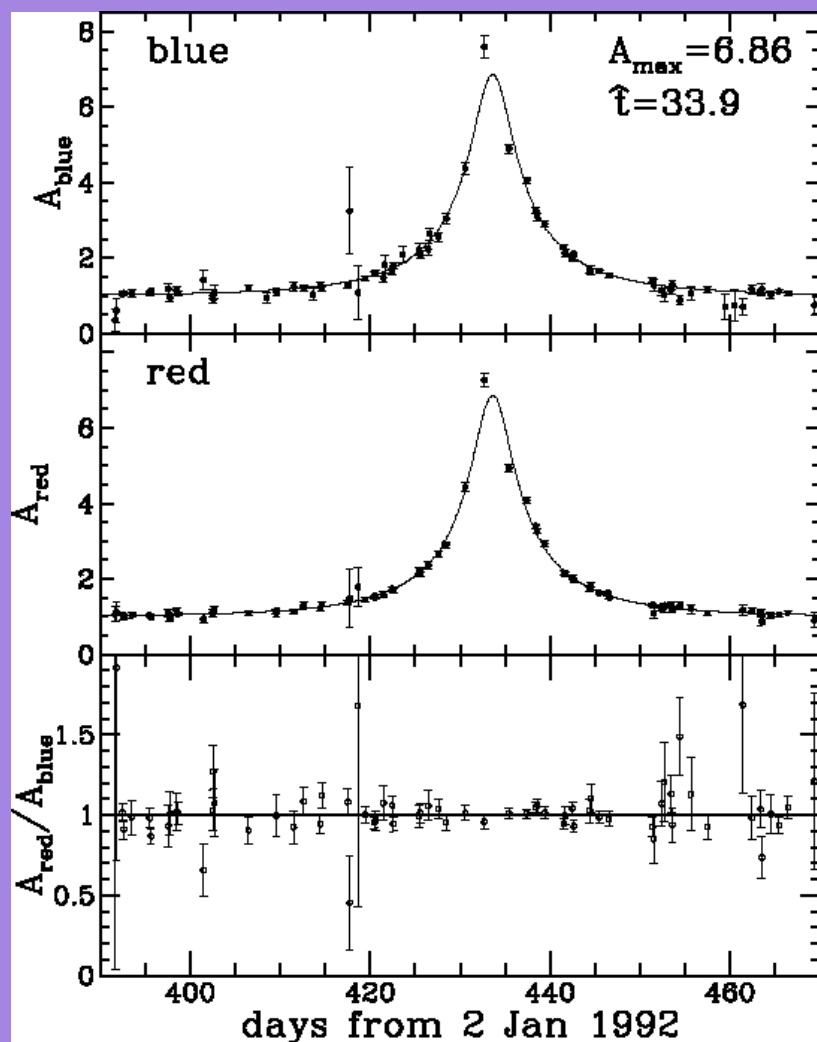


■ 銀河系ハローの
MACHO天体によ
る重力マイクロレン
ズ現象で大マゼラ
ン星雲の星が増光
する兆候を探す

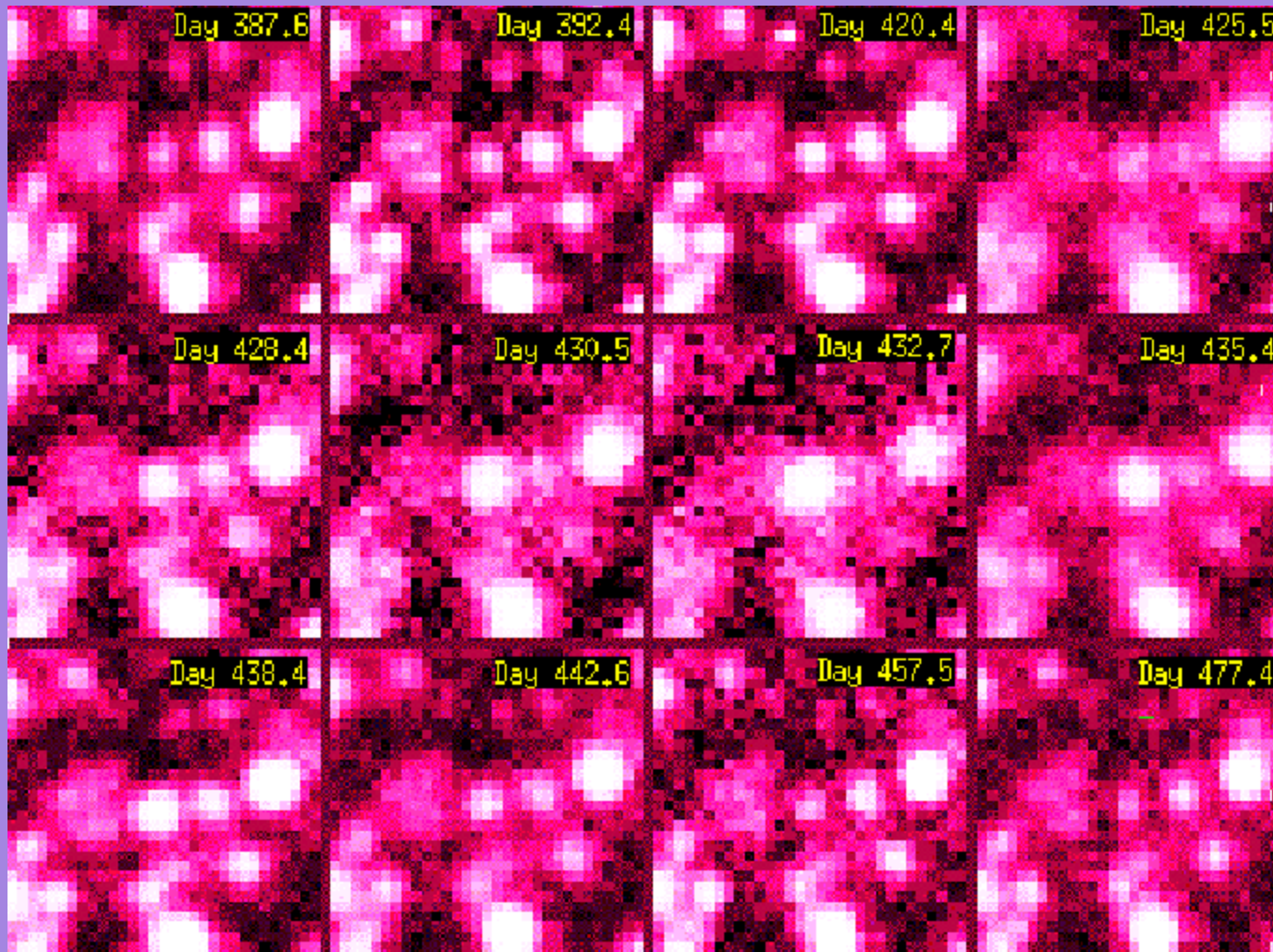
50kpc



MACHOイベントの光度曲線

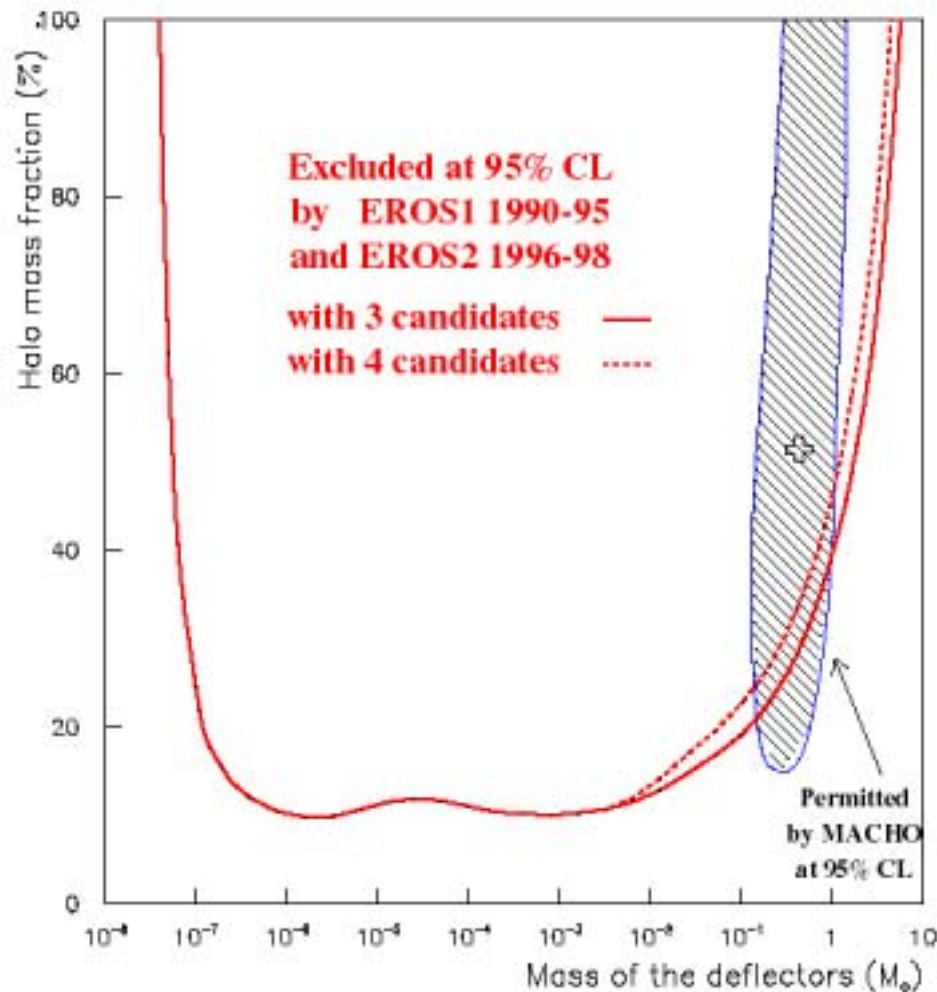


Massive Compact Halo Objectの発見



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

暗黒物質の候補

■ 天文学的暗黒物質

- 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く
- 宇宙の暗黒物質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)

■ 素粒子論的暗黒物質

- ニュートリノ以外の暗黒物質粒子 (冷たい暗黒物質: **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

宇宙の質量密度の内訳

総量 = 1 ± 0.2



ダークエネルギー (宇宙定数) 0.8 ± 0.2



全物質 0.4 ± 0.1



星

0.005 ± 0.002



バリオン

0.04 ± 0.005

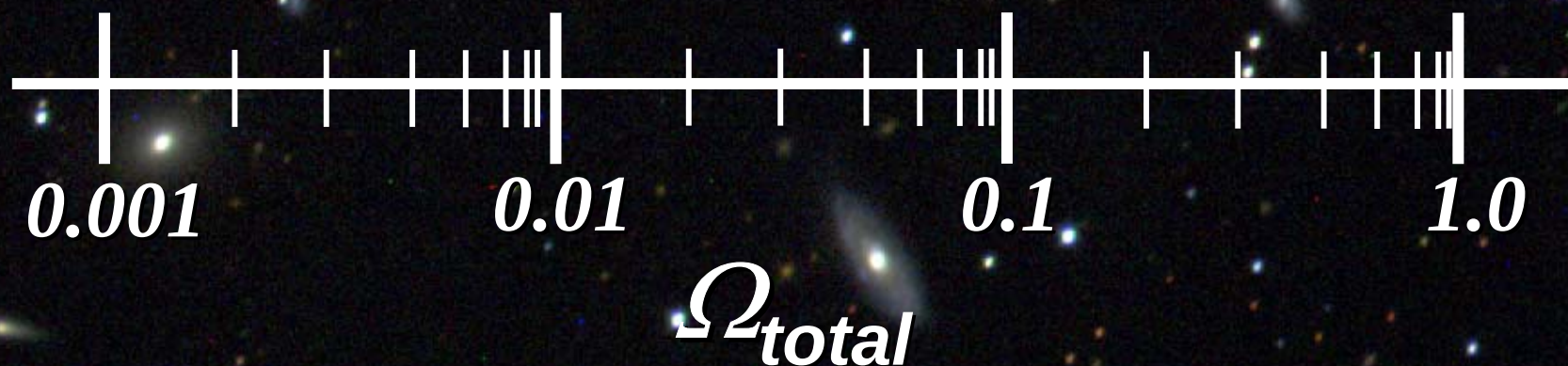


CDM

0.35 ± 0.1



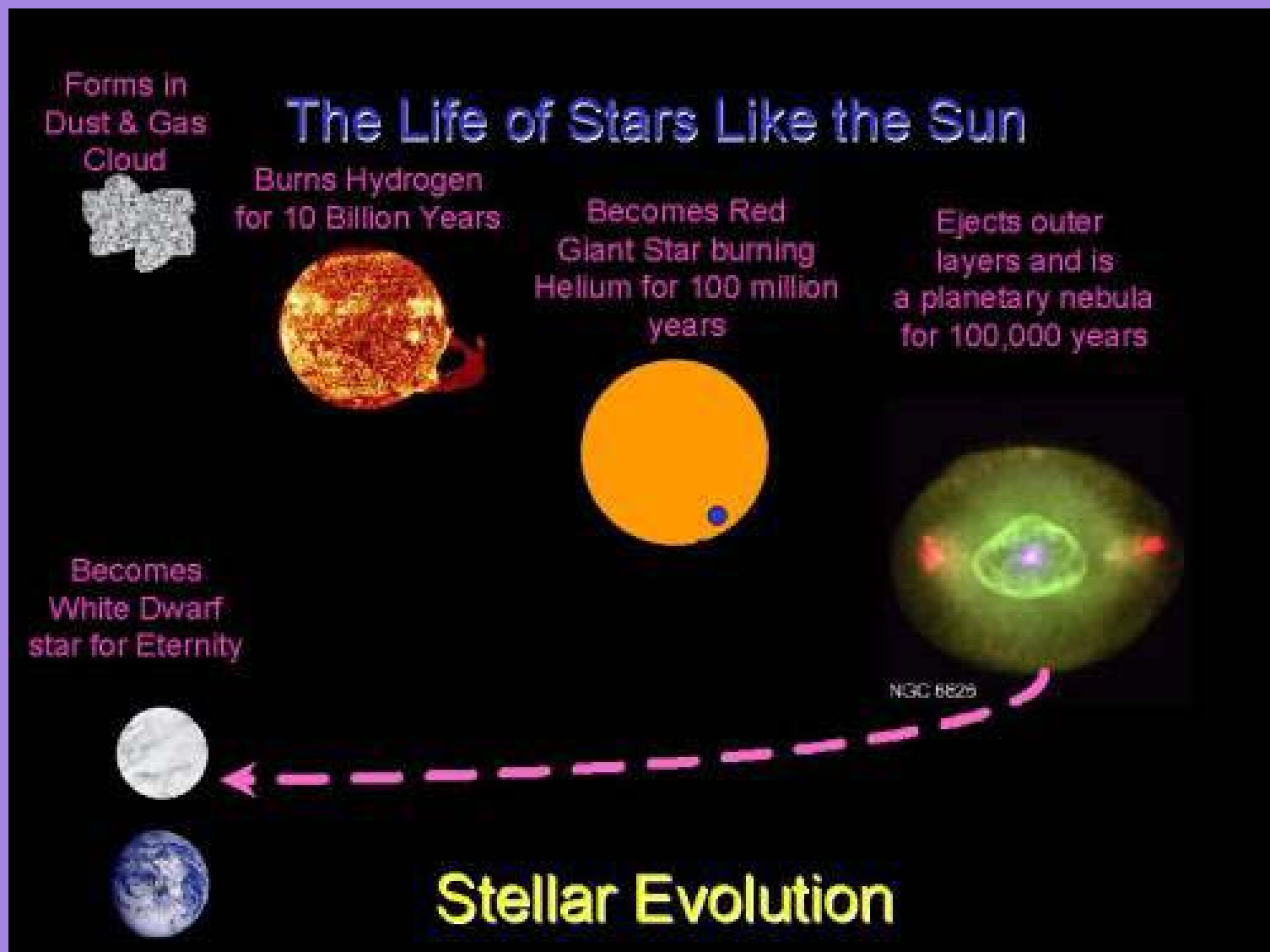
理論予言



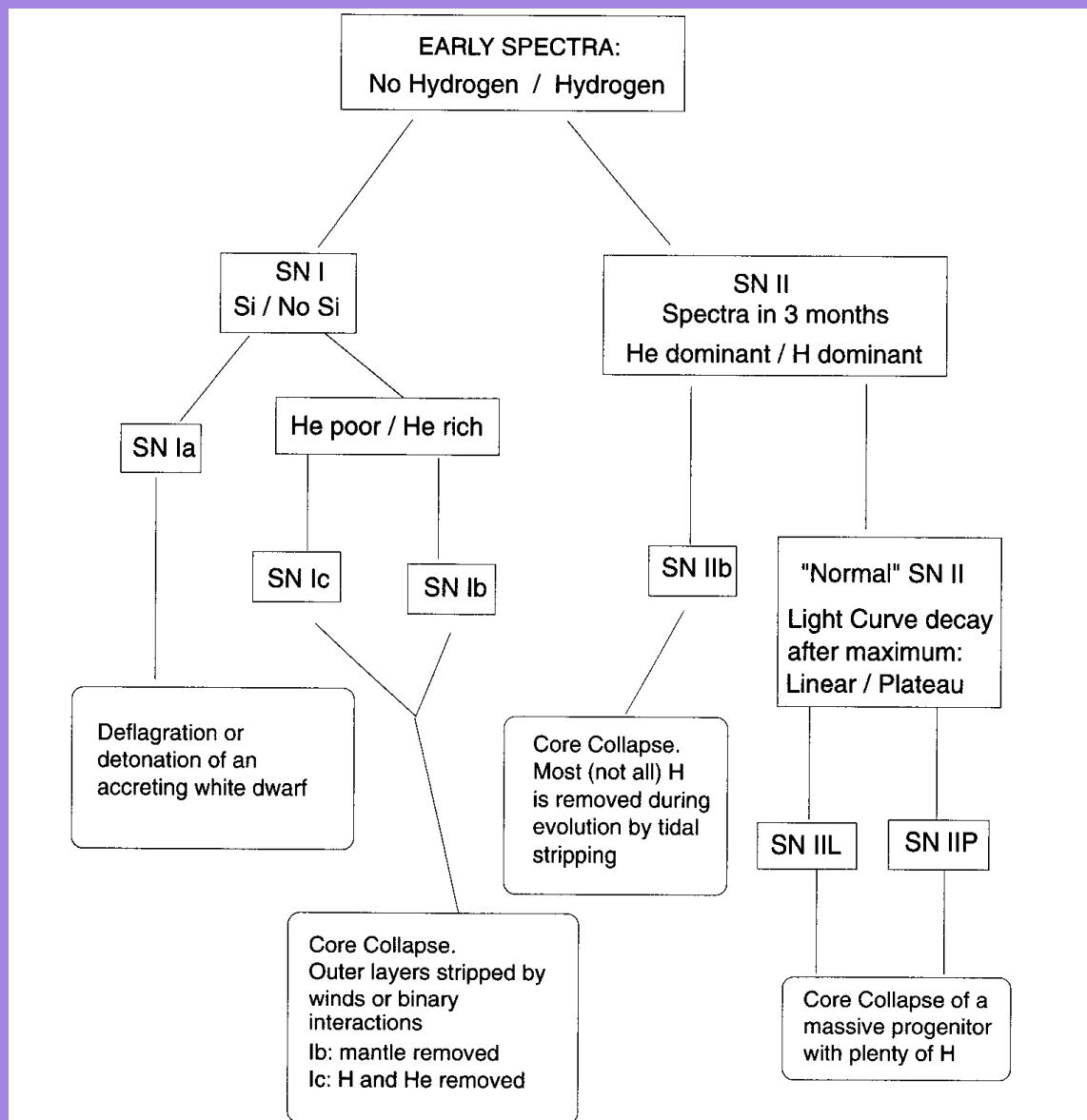
4. 宇宙定数（暗黒エネルギー）

$$\lambda_0 = 0.7$$

超新星爆発

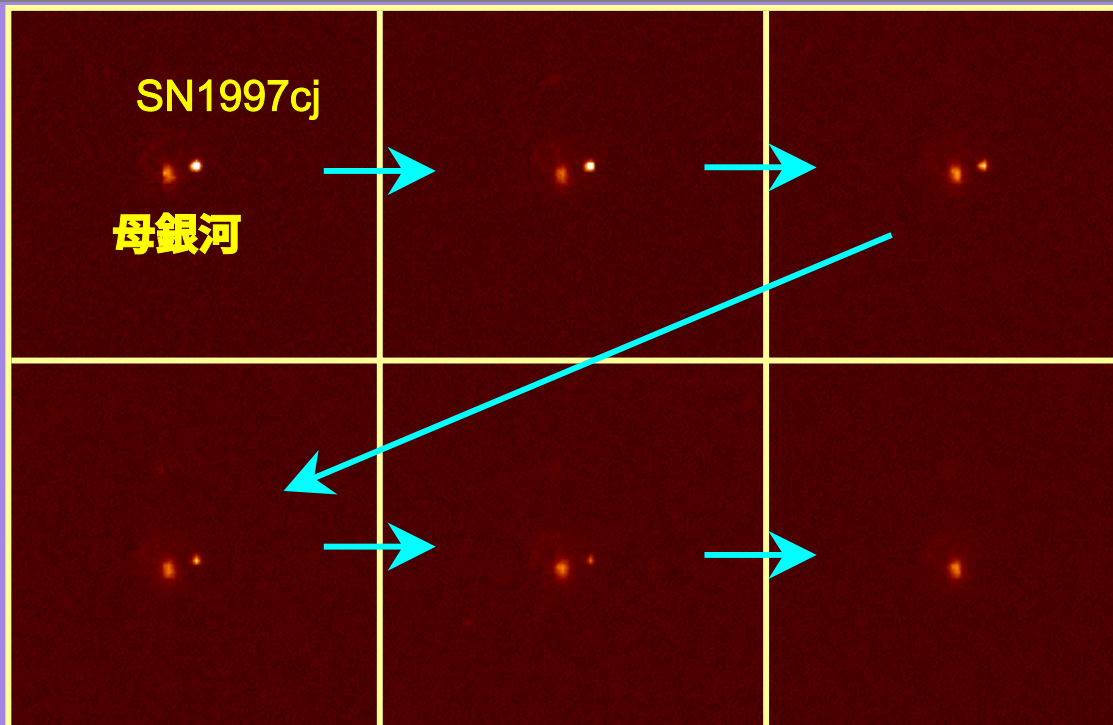


超新星の分類

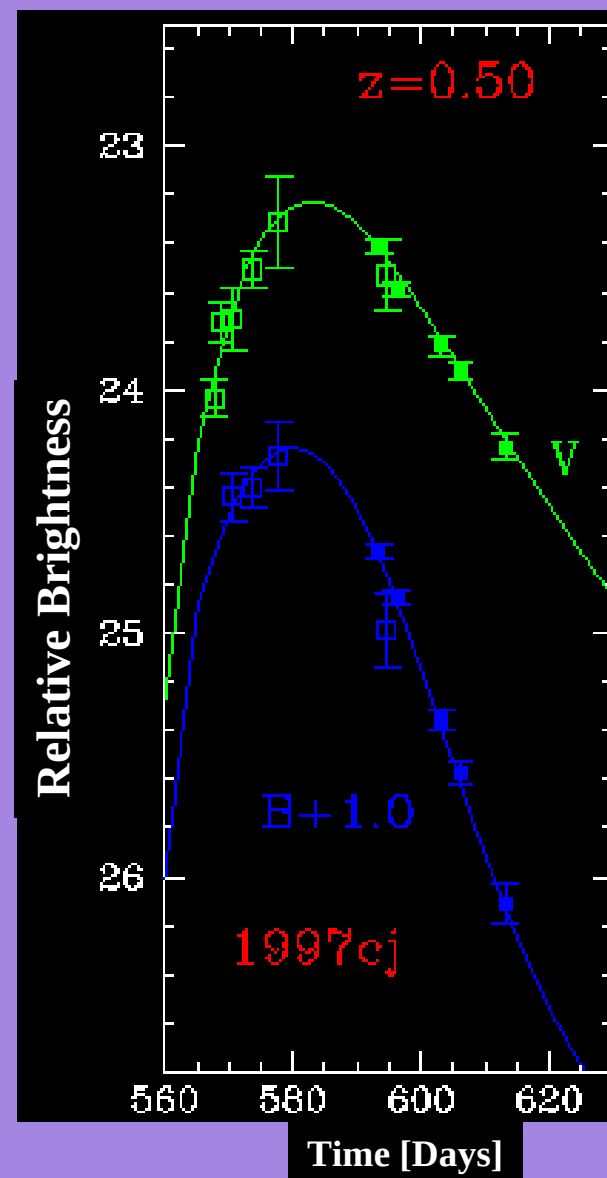


Ia型超新星の光度曲線の測定

- 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

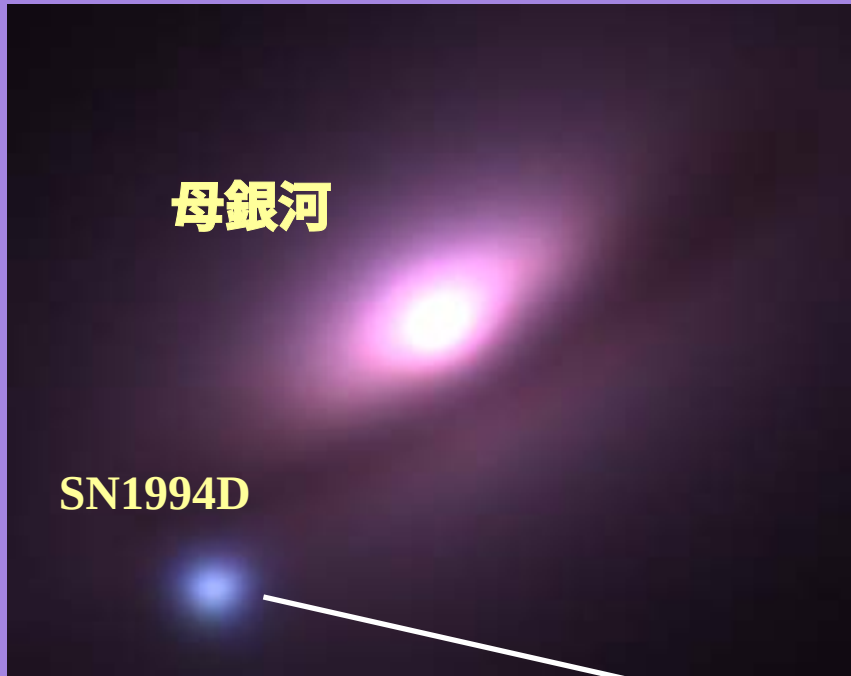


HSTで測定したSN 1997cjの明るさの時間変化



Ia型超新星1994D: 地上望遠鏡とHST

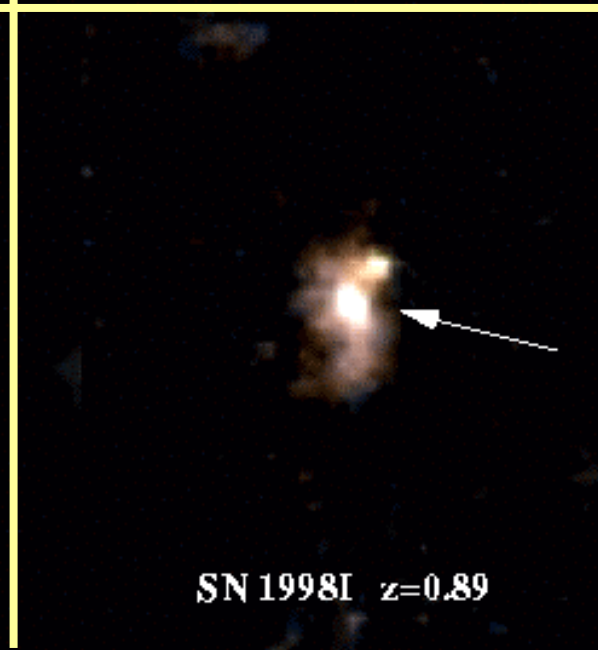
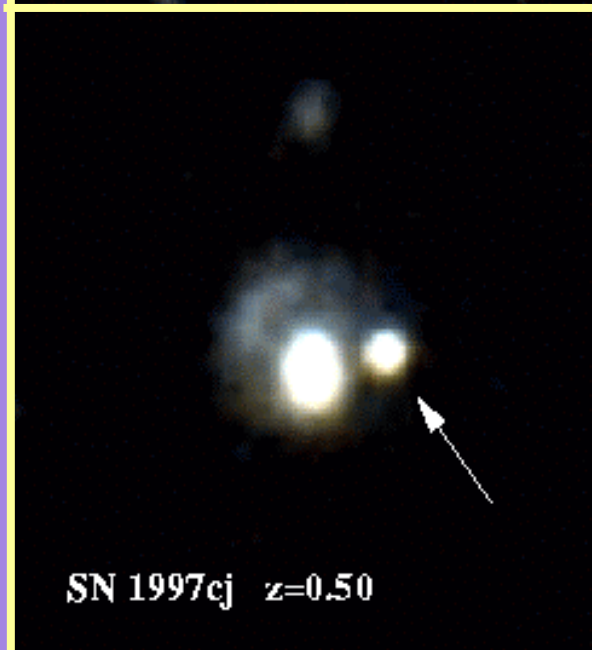
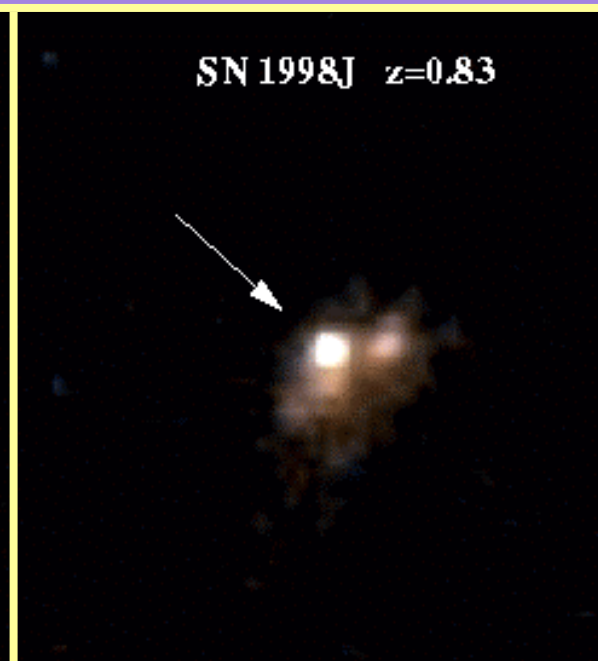
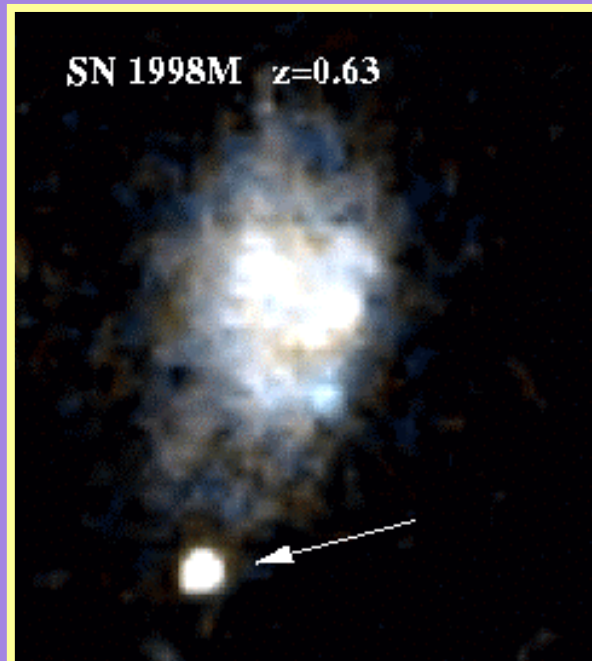
地上の望遠鏡



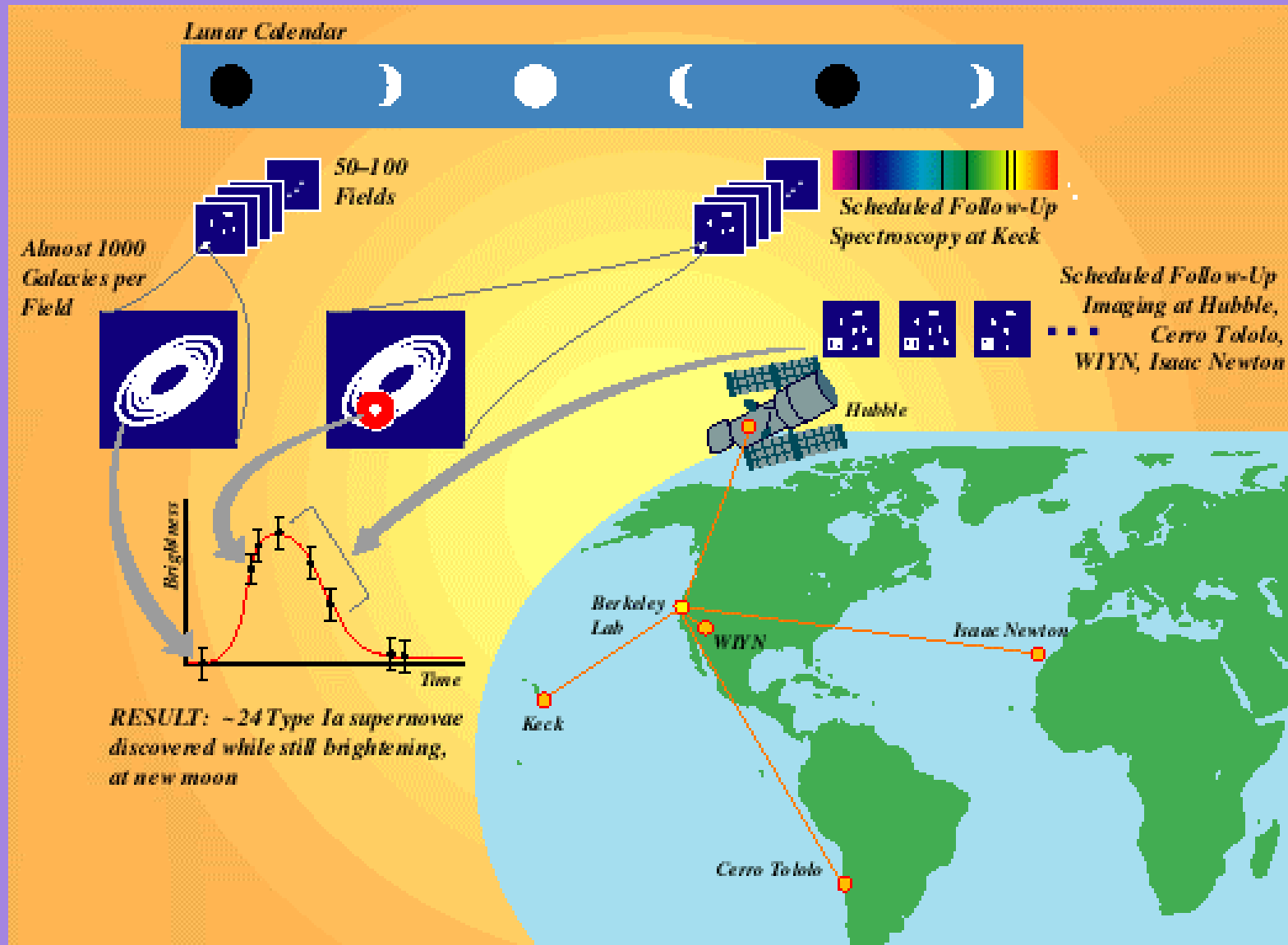
ハッブル宇宙望遠鏡



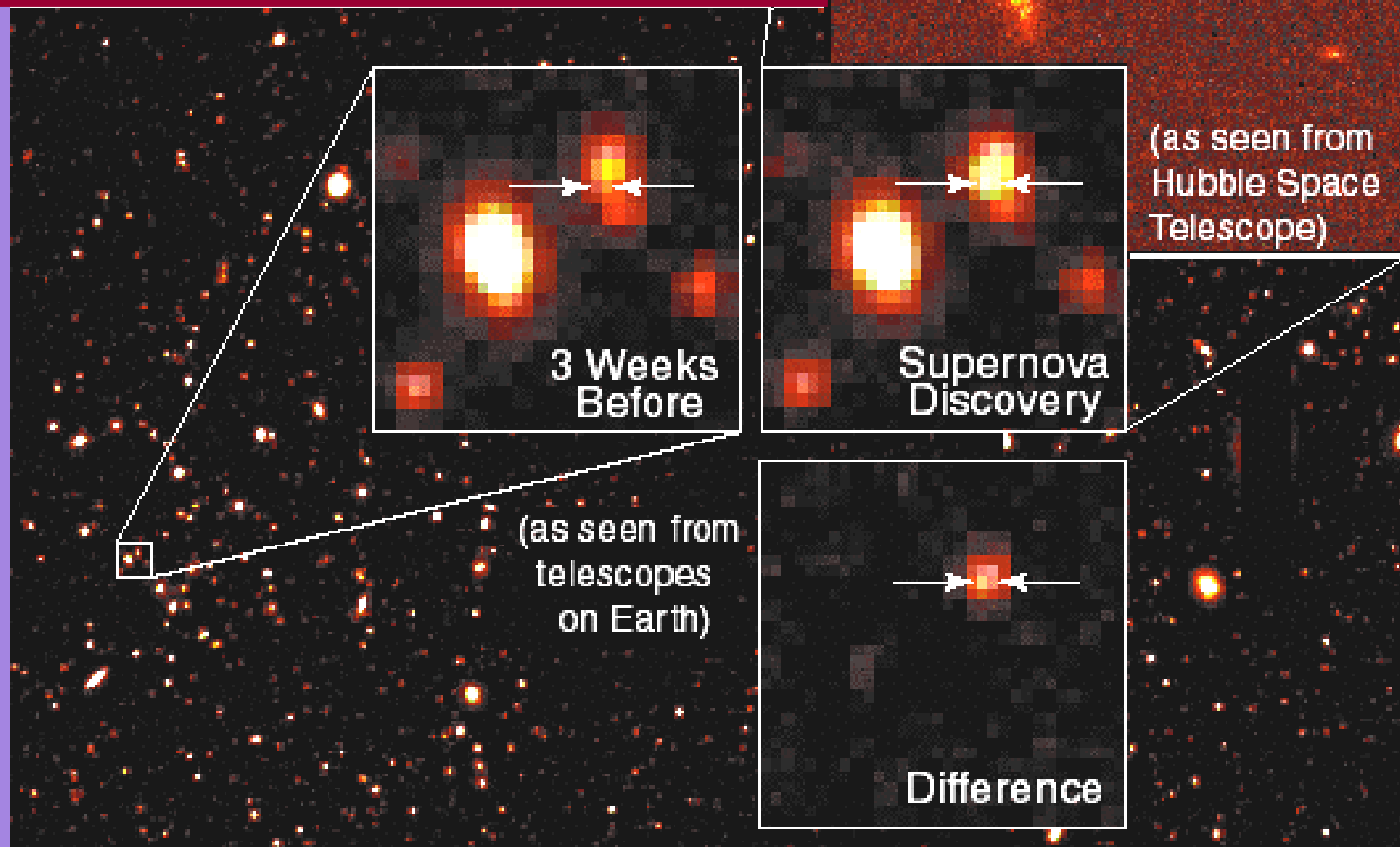
遠方のIa型 超新星の HST画像例



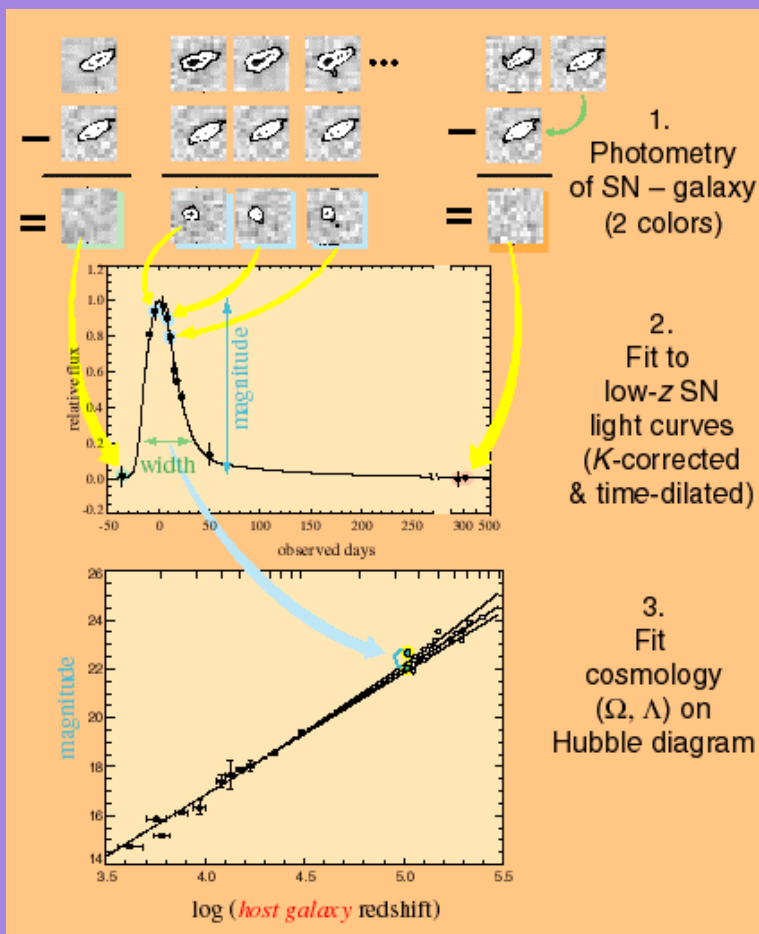
Supernova Cosmology Project: Strategy



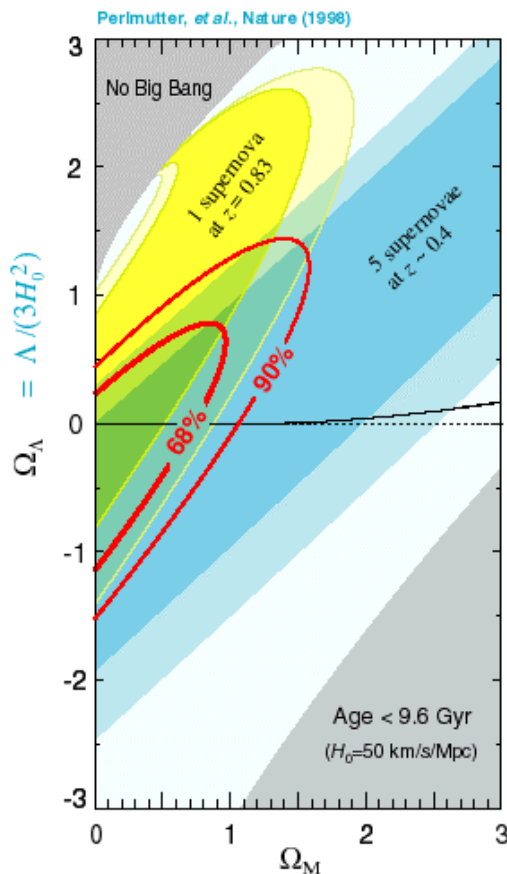
Supernova Cosmology Project : Ia型超新星1998baの観測



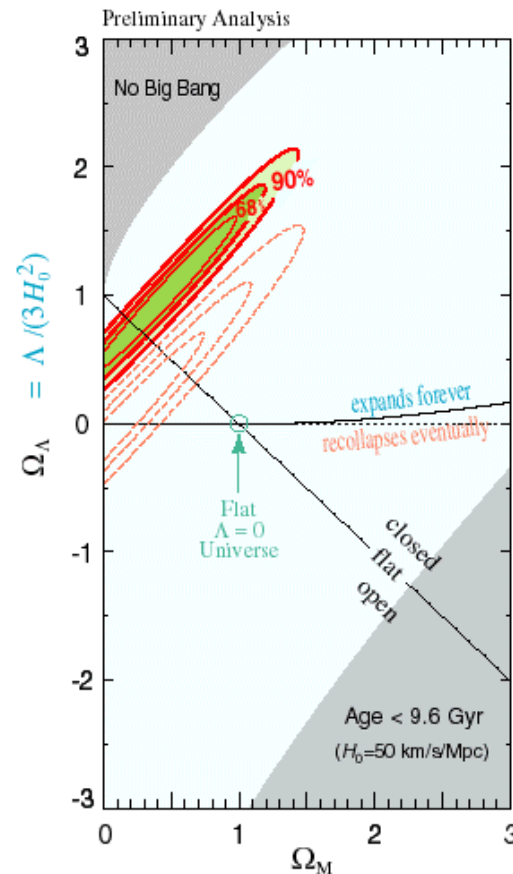
Supernova Cosmology Project: procedure



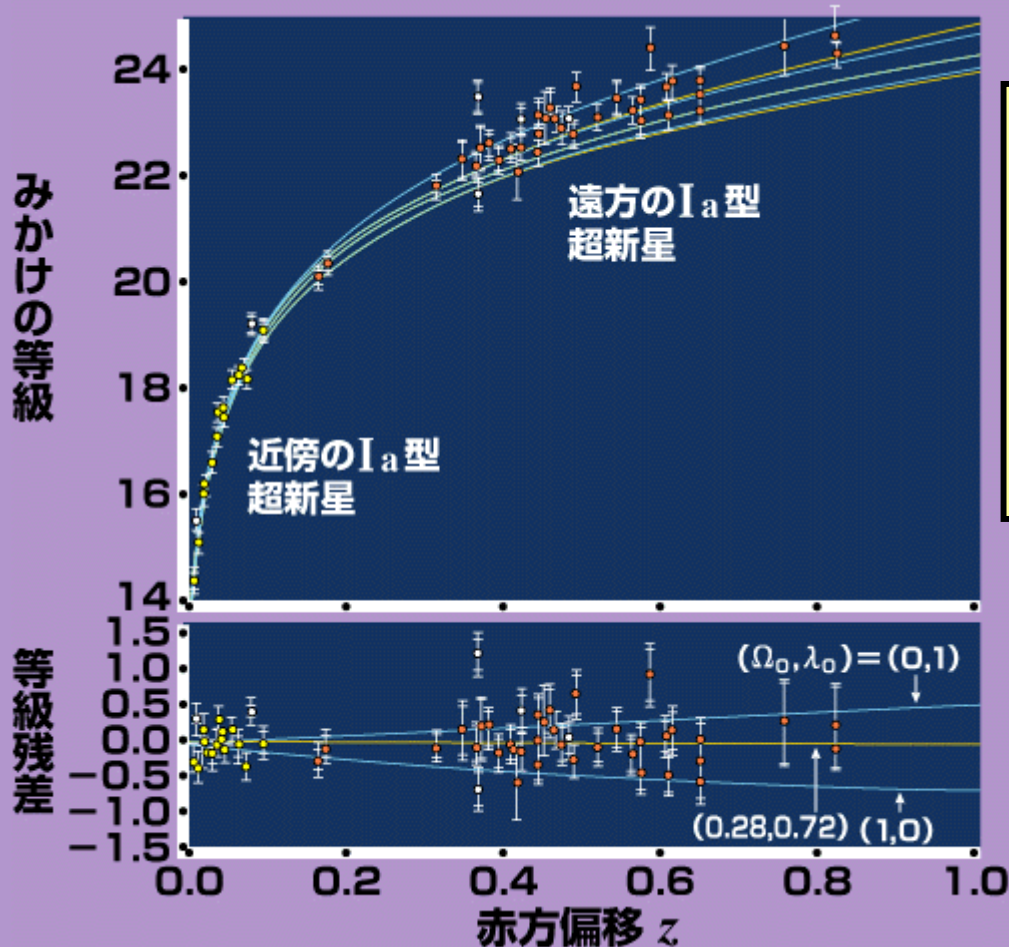
Results: Ω vs Λ
from 6 supernovae



Results: Ω vs Λ
from 40 supernovae



超新星と宇宙定数



■ 遠方超新星までの距離推定

$$\Rightarrow \Omega_0 \ll 1, \lambda_0 > 0$$

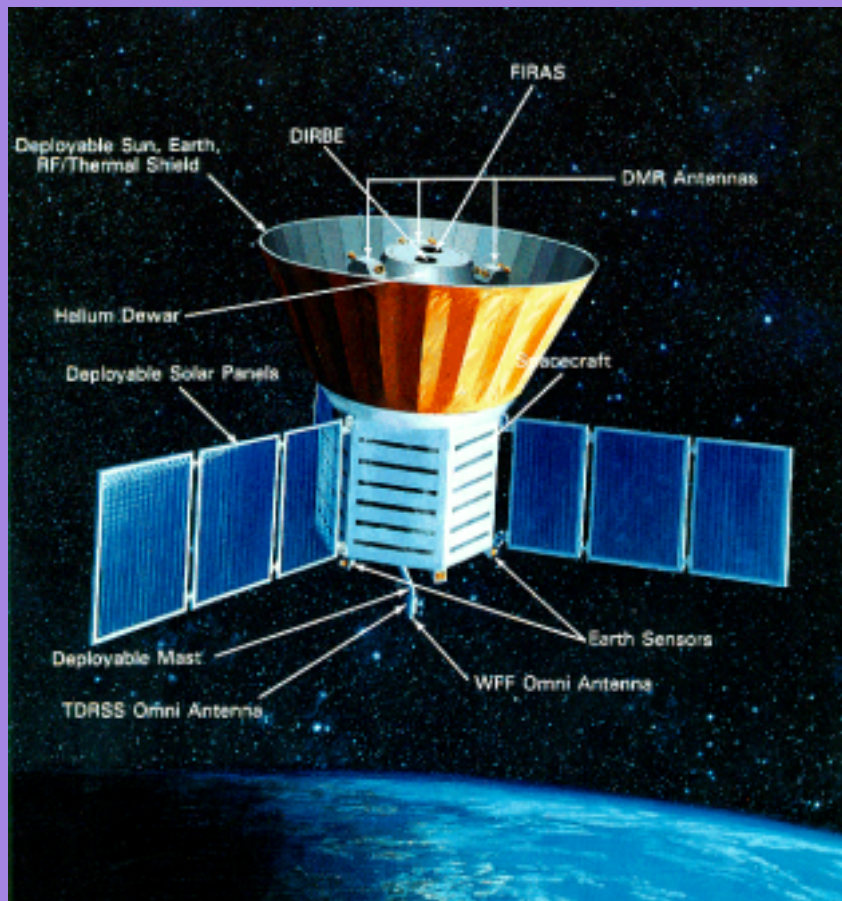
宇宙定数の存在！

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

CMB温度ゆらぎの観測

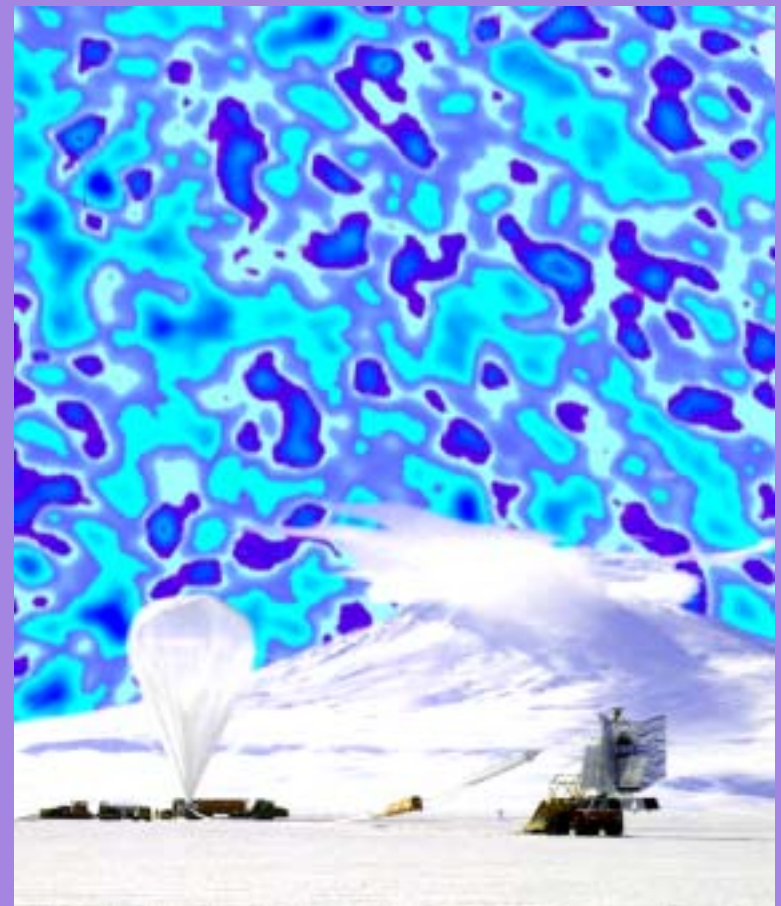
COBE 衛星

http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed_resources.html



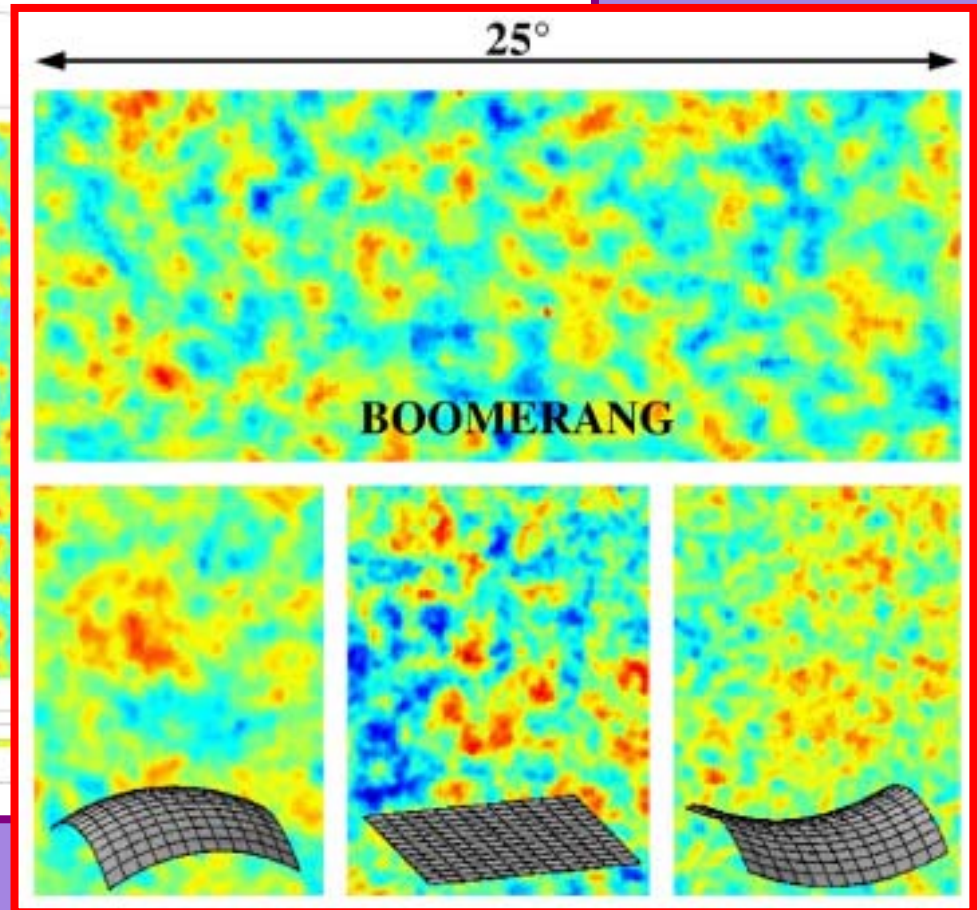
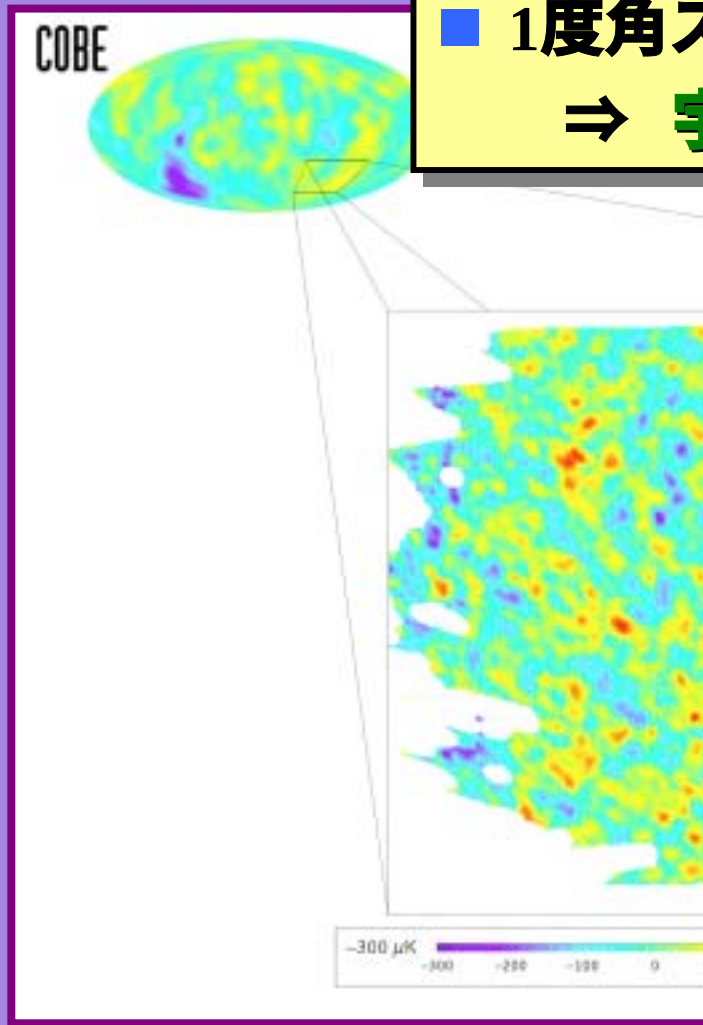
BOOMERanG 気球実験

<http://www.physics.ucsb.edu/~boomerang>



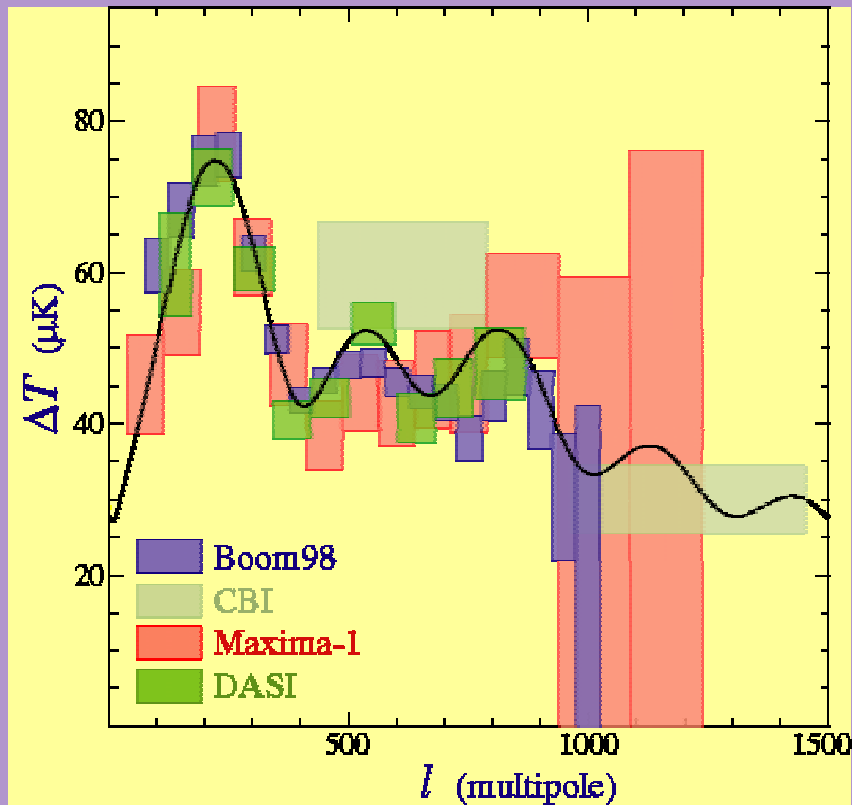
CMB温度地図と宇宙の曲率

- 1度角スケールでのCMB温度ゆらぎ
⇒ 宇宙の曲率 = $\Omega_0 + \lambda_0 - 1$ に敏感

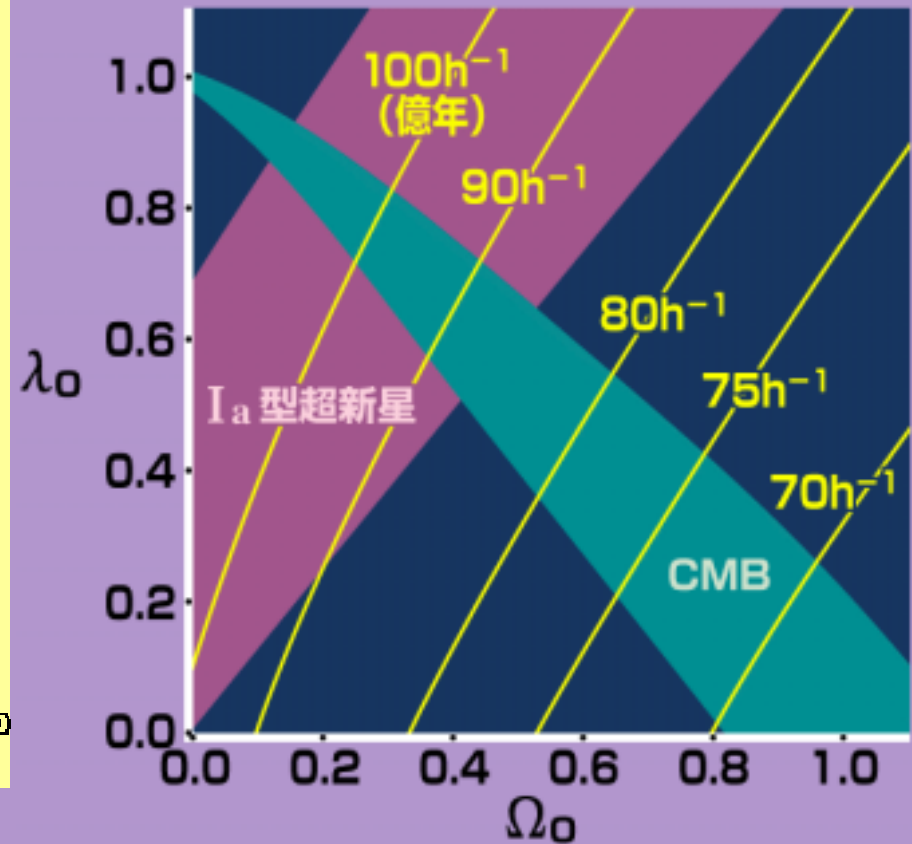


BOOMERanG 観測

CMB温度ゆらぎと宇宙論パラメータ



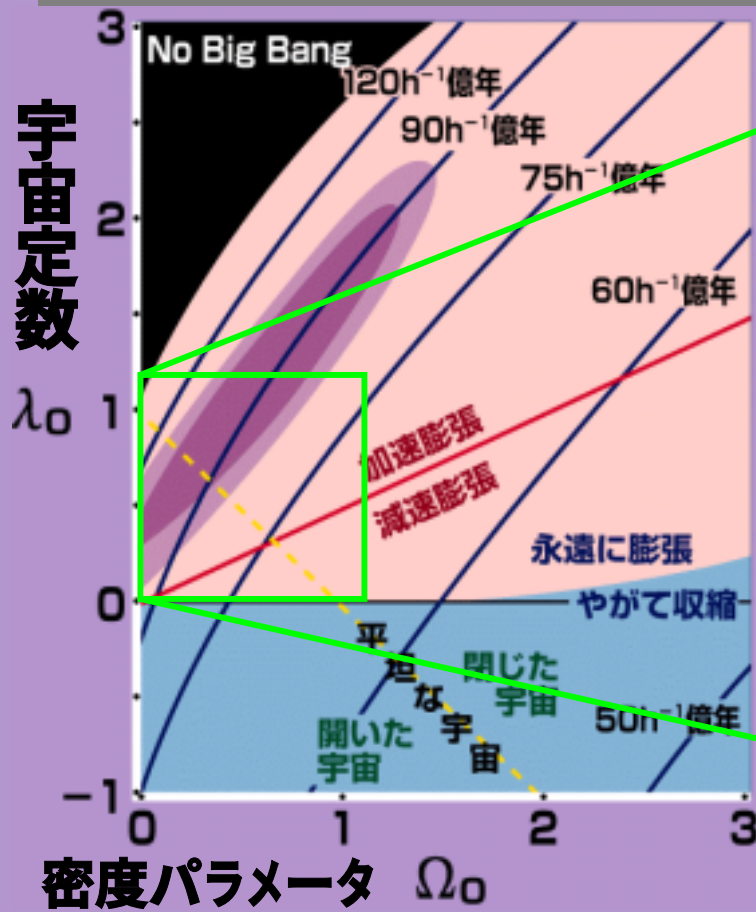
<http://background.uchicago.edu/~whu/cmbex.html>



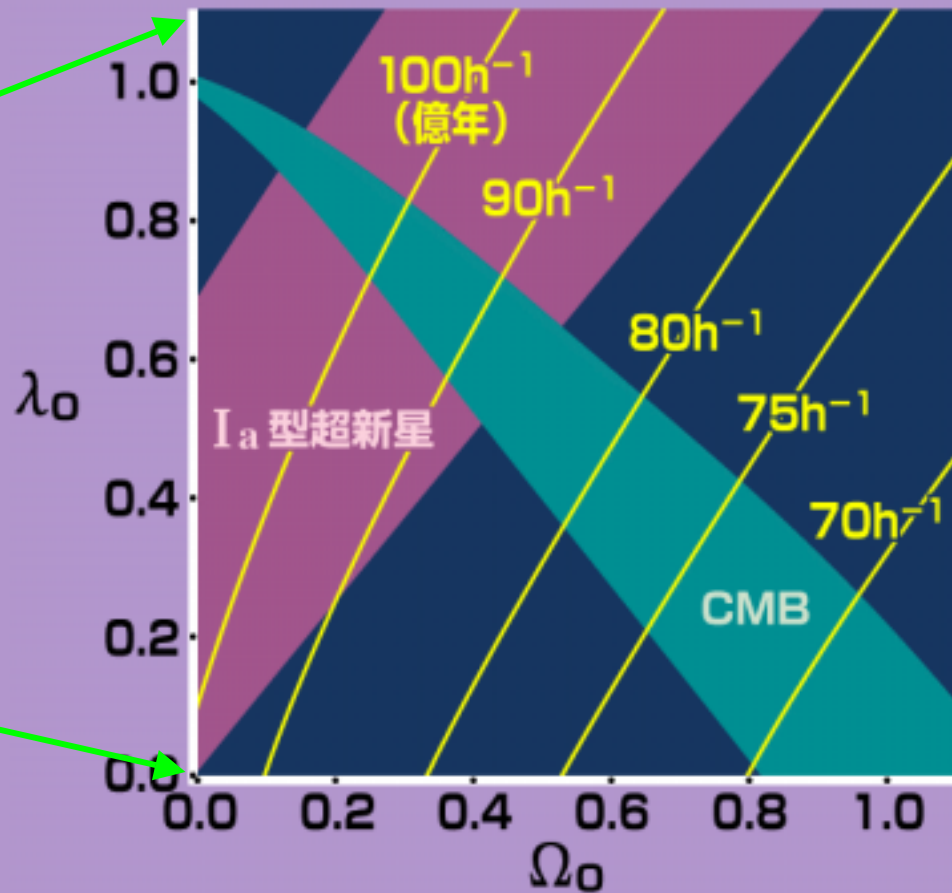
BOOMERanG 観測からの制限

質量密度パラメータと宇宙定数

■ $\Omega_0=0.3, \lambda_0=0.7 \Rightarrow$ 宇宙は平坦 ($k_0=0$) ?



超新星観測からの制限



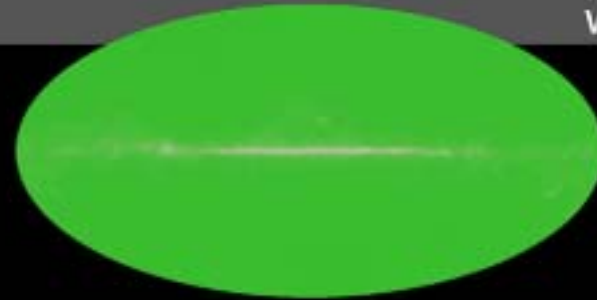
CMB 観測からの制限

MAP (~~M~~icrowave ~~A~~nisotropy ~~P~~robe)衛星

1965



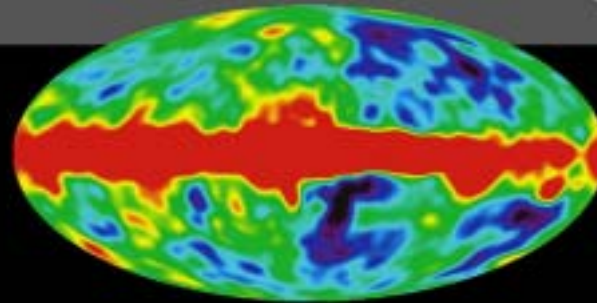
Penzias and
Wilson



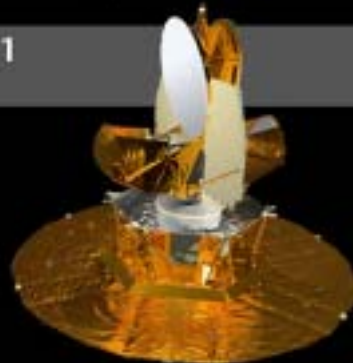
1992



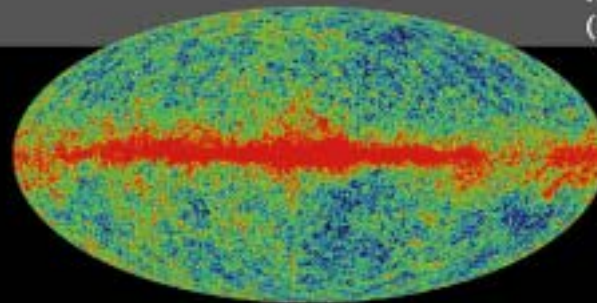
COBE



2001

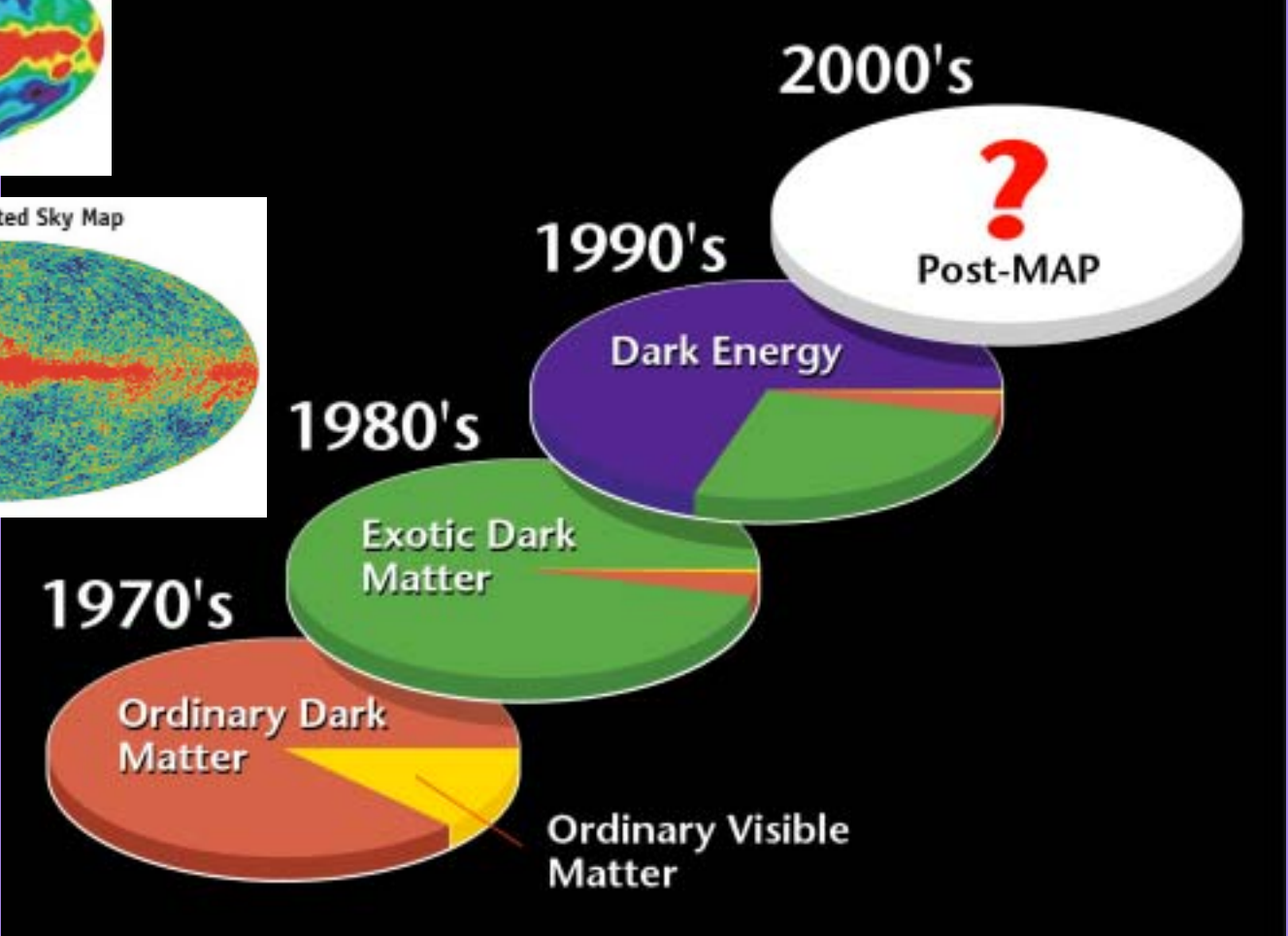
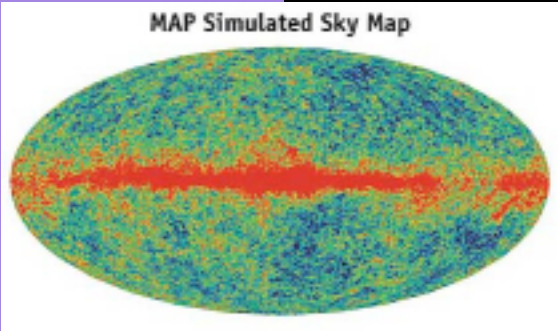
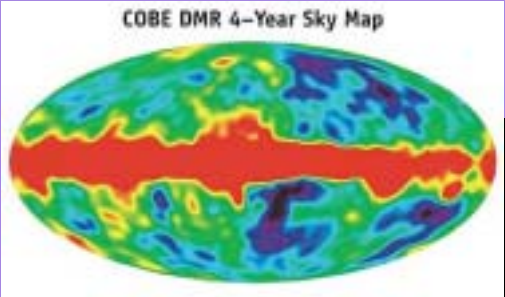
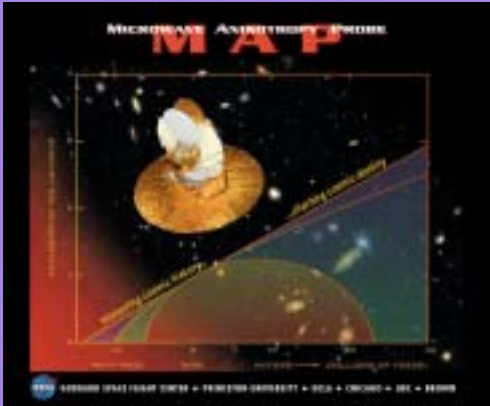


MAP
(Simulated)





MAP Science



20世紀宇宙論の総括

- 1980年代以降、宇宙論は急速に進歩
 - 暗黒物質の存在が決定的
 - マイクロ波背景輻射の温度ゆらぎ発見
 - ハッブル定数が10%の精度で決定される
 - 銀河系内MACHOの検出
 - 宇宙定数が存在する可能性
 - 素粒子論的宇宙論による初期条件
- 物理学として十分成熟・発展を遂げた

21世紀宇宙論の展望

- 20世紀最後の数年間で急速に進展した宇宙を特徴付けるパラメータの値をさらに確定
⇒ **精密宇宙論の時代へ**
- 宇宙の起源の理論的解明
⇒ **量子宇宙論の完成へ**
(素粒子論の進展を待つしかない、、、)
- さらなる謎・未知の領域を探る
⇒ **第一世代の原始天体
生命誕生の環境としての宇宙**

研究の漸近的振る舞い？

The historical record here and in other physical sciences suggests that as the puzzles and conundrums we know about are laid to rest, they will be replaced by still more interesting ones.

宇宙論界の重鎮： P.J.E.Peebles (1993)

“Principles of Physical Cosmology” p.683

Expanding the *expanding* universe

0th order	一様等方宇宙モデル	宇宙論パラメータ
1st order	密度揺らぎの線形摂動論	宇宙の大構造 マイクロ波背景輻射
2nd order	非線型重力進化	ダークマターの構造形成
3rd order	バリオンガスの進化	第一世代天体と元素の起源
4th order	銀河、星、惑星の形成進化	光り輝く銀河宇宙の誕生
...		
L-th order	生命の起源・進化	宇宙論的生物発生学
M-th order	知的生命体への進化	宇宙論的生物進化学
N-th order	文化・文明・宗教	宇宙論的社会学
...		

栄枯盛衰：研究の花道のパターン

- **パターン I**：すべての重要な問題に答を見つけて栄誉ある終焉を迎える
- **パターン II**：徐々にではあるが着実に理論的進歩を遂げることで少しずつ歴史的な難問を解決しながら半永久的に発展を続ける
- **パターン III**：重要な問題を多く残しているながら、観測的にも理論的にも新たなブレークスを見出すことができず、もはや普通の問題意識とは遊離した重箱の隅をつつくような研究に終始するオタク集団としてほそぼそと生きながらえていく

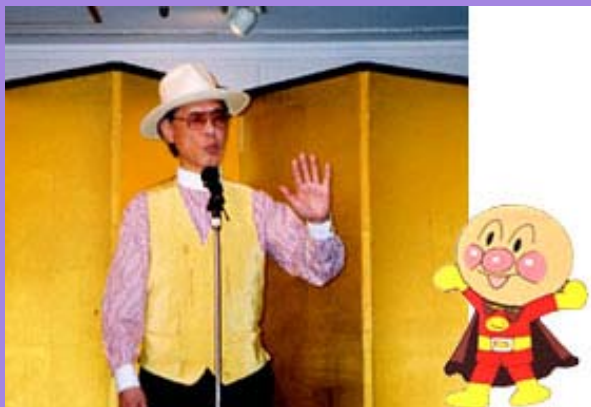
アンパンマン オープニングテーマ



■ 作詞：やなせたかし
なんのために生まれて
なにをして生きるのか
こたえられないなんて
そんなのは いやだ！



やなせたかし



ぼくらは
みんな
生きている
生きている
かなしいんだ
るひらを
太陽に
すかして
まっかに
ぼくの血
潮

<http://www.i-kochi.or.jp/hp/anpanman-m/>

1919: 高知県香北町生まれ。東京高等工芸学校図案科 (現千葉大) 卒業。

1947: 三越百貨店宣伝部にグラフィックデザイナーとして勤務。

1953: 退社。漫画家としての活動始める。

1973: 「アンパンマン」の最初の絵本を刊行。詩誌「詩とメルヘン」が創刊され、編集長となる。

1988: 「アンパンマン」の絵本の人気が高まり、ついにアニメ化。出版点数200点以上、総発行部数2000万部以上。

アンパンマン エンディングテーマ

■ 作詞：やなせたかし
もし自信をなくして
くじけそうになったら
いいことだけ
いいことだけ
思い出せ

