

観測的宇宙論

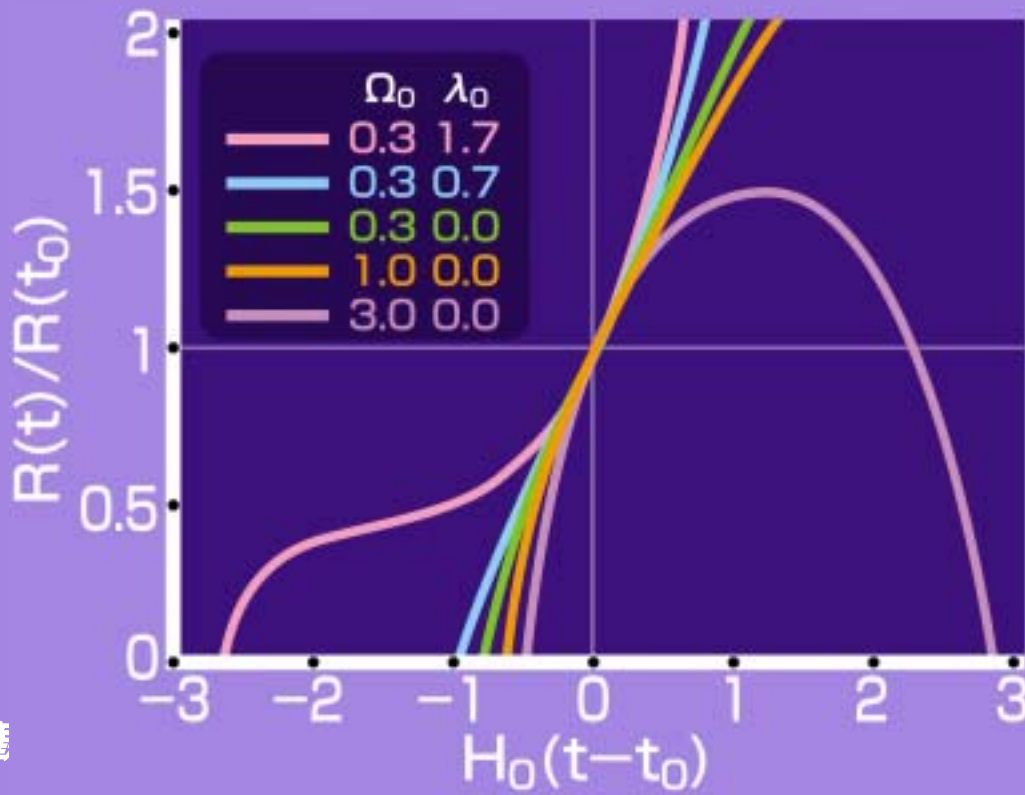
4. 20世紀宇宙論の到達点



2001年6月28日～29日
甲南大学大学院 特殊講義
須藤 靖

宇宙論パラメータ

- ハッブル定数に加えて、暗黒物質と宇宙定数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**)



暗黒物質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

$$\Omega_0 \equiv \frac{\rho_0}{\rho_c}$$

宇宙定数

$$\lambda_0 \equiv \frac{\rho_\Lambda}{\rho_c}$$

臨界密度 :

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

$$\Omega_0 \approx 0.3, \lambda_0 \approx 0.7(?)$$

宇宙論パラメータ一覧

- H_0 : ハッブル定数
- Ω_b : バリオン密度パラメータ
- Ω_0 : 質量密度パラメータ
- λ_0 : 宇宙定数
- k_0 : 宇宙の曲率 ($= \Omega_0 + \lambda_0 - 1$)
- σ_8 : 密度ゆらぎの振幅

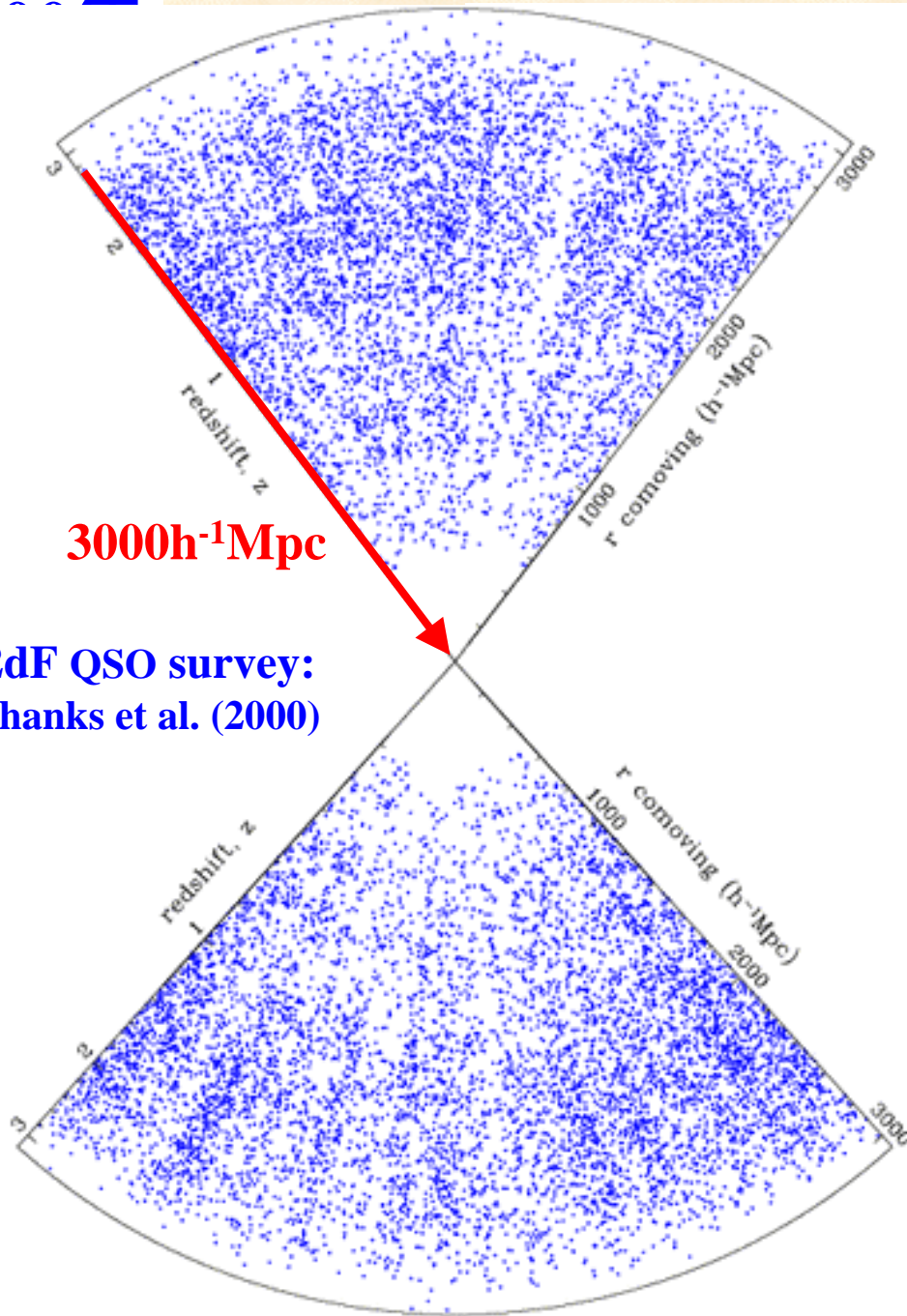
20世紀観測的宇宙論の成果

- ハッブル定数と宇宙の距離尺度
- 赤方偏移サーベイと宇宙の大構造
- CMB温度地図と原始密度ゆらぎの再構築
- 質量密度パラメータと宇宙定数
- 銀河系ダークマターとMACHOの発見
- 弱い重力レンズによる宇宙の質量(ダークマター)分布の直接マッピング
- 太陽系外惑星の発見

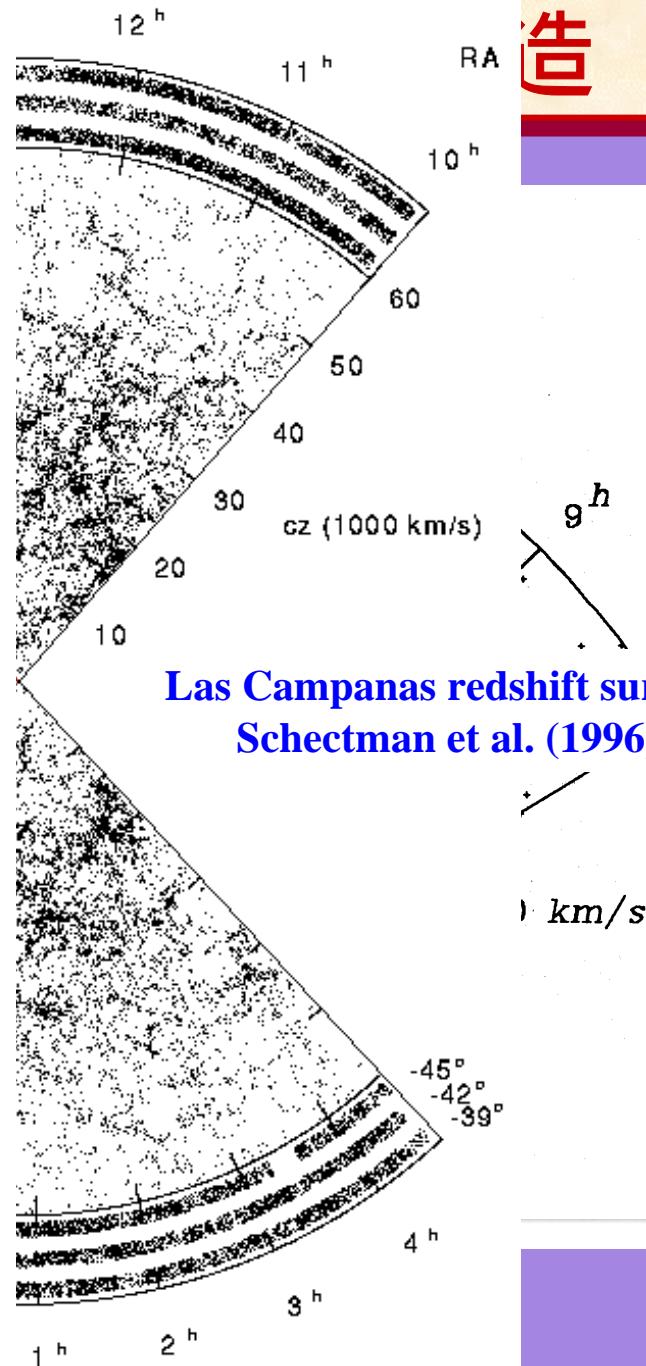
17^h

2dF QSO survey:
Shanks et al. (2000)

3000h⁻¹Mpc



Las Campanas redshift survey:
Schectman et al. (1996)



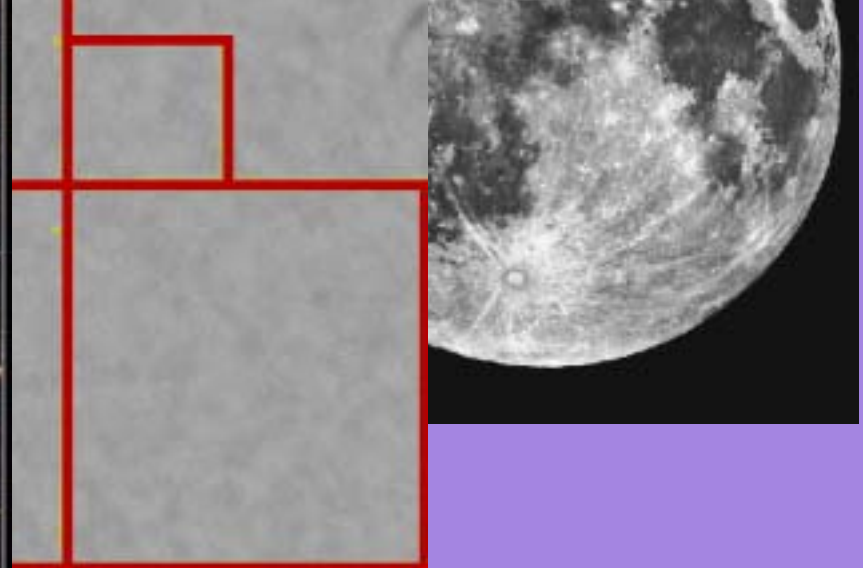
1 km/s

深宇宙: Hubble Deep Field



■ 遠方宇宙

過去の宇宙
宇宙の起源



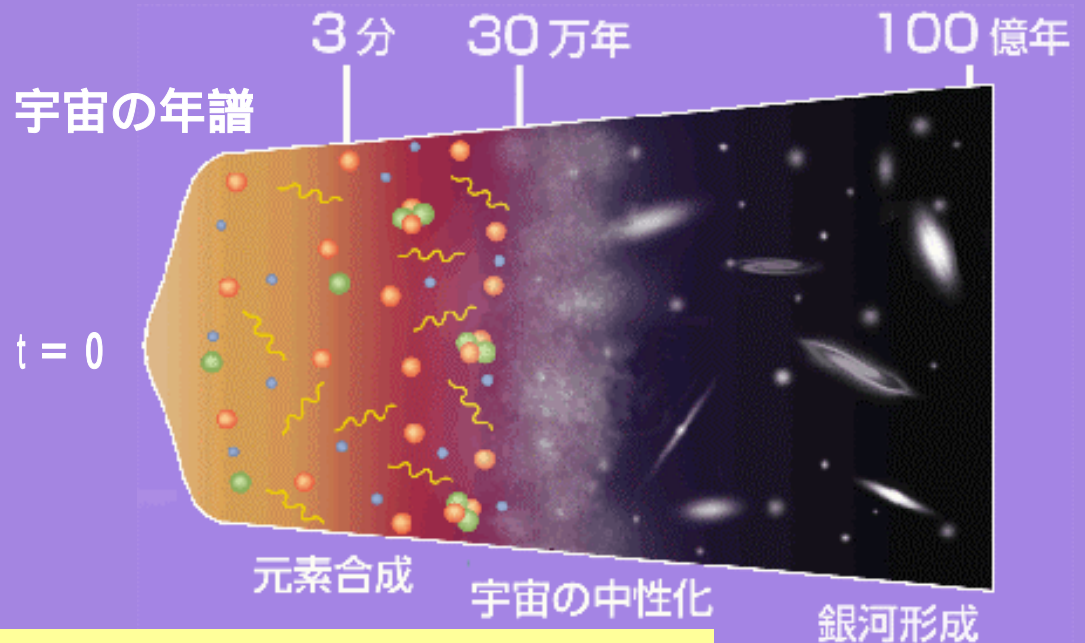
宇宙の晴れ上がりとCMB

■ 電子と陽子の再結合(宇宙の中性化)

それまで完全に電離していた宇宙は、温度が約3000度以下(宇宙誕生後約30万年)になると電子と陽子が結合して水素原子となる

■ 宇宙の晴れ上がり

その結果、電磁波(光)の直進を妨げていた電子が無くなり、宇宙は電磁波に対して透明となる

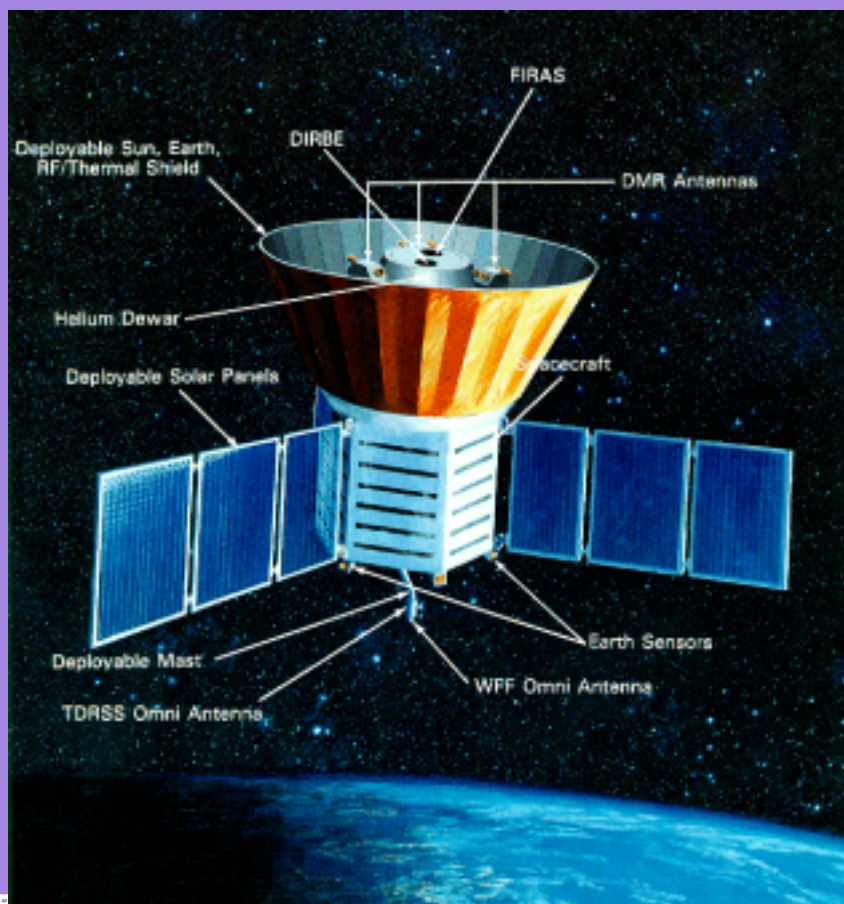


CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波(今から100億年以上も前の宇宙の光の化石)

CMB温度ゆらぎの観測

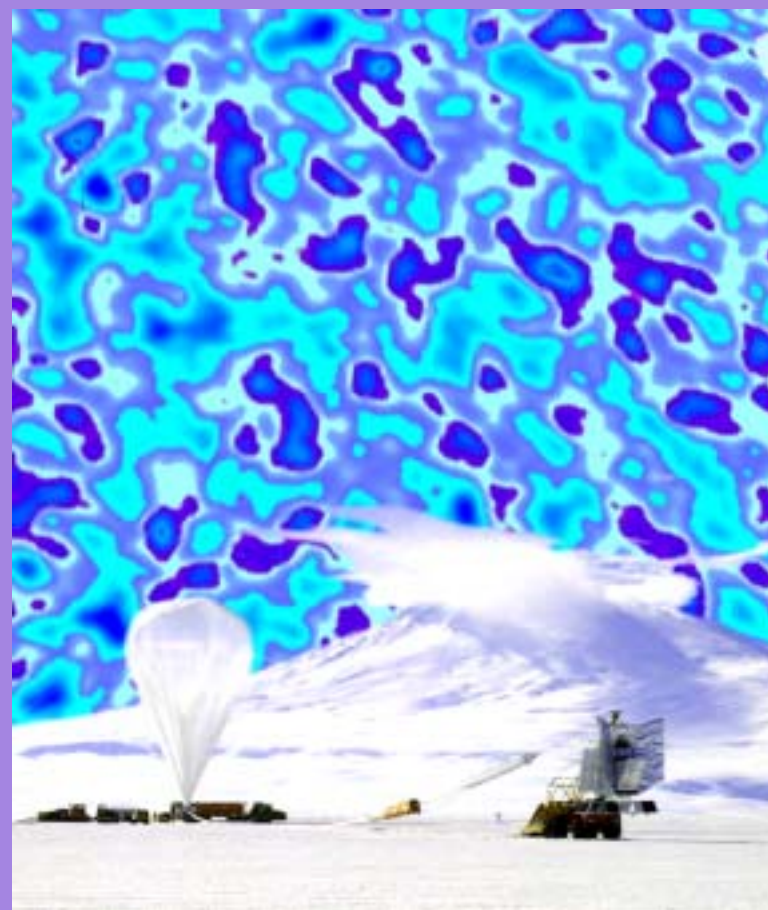
COBE 衛星

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



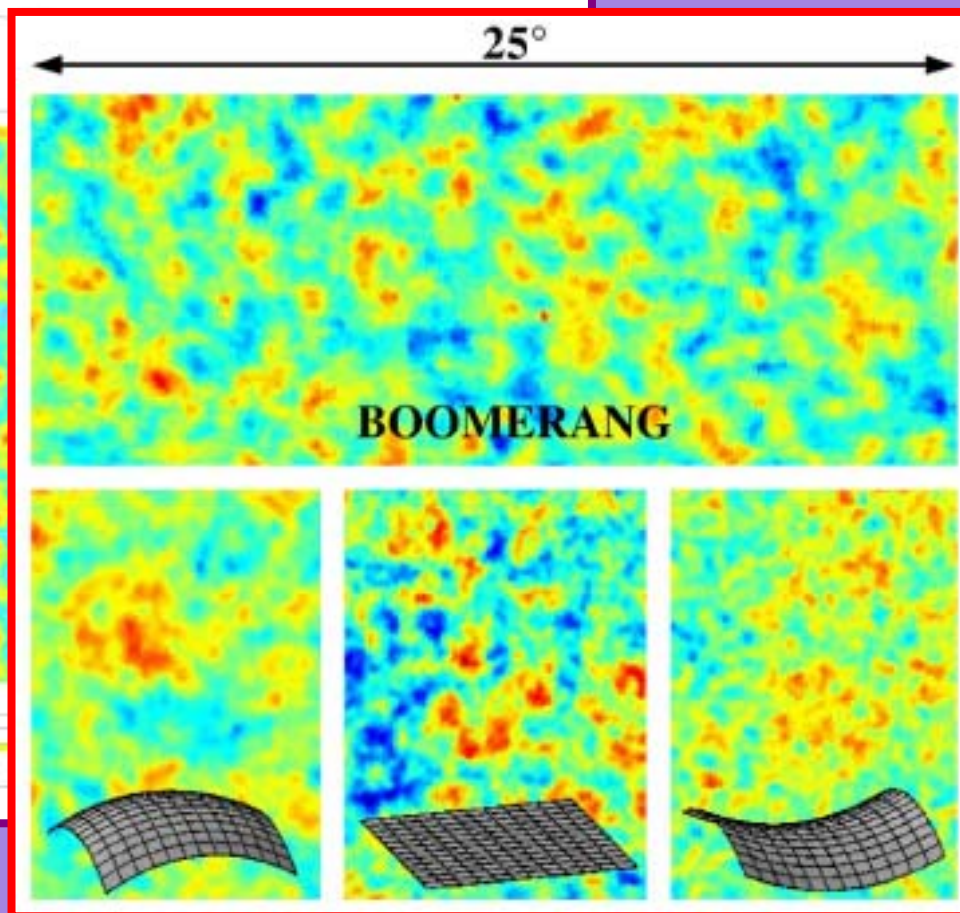
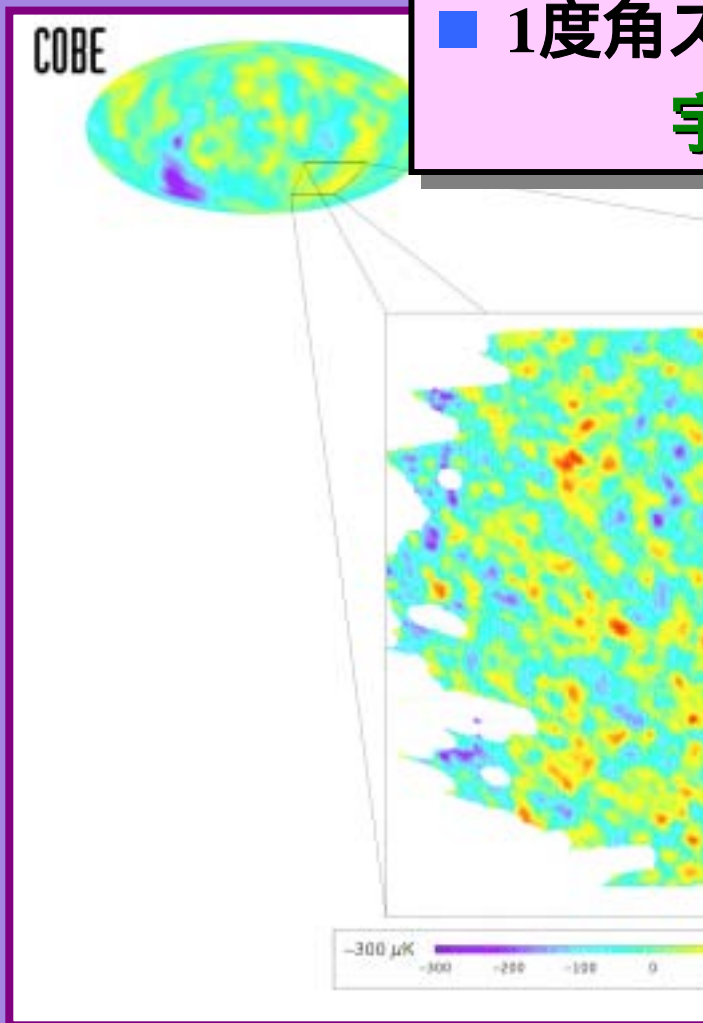
BOOMERanG 気球実験

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



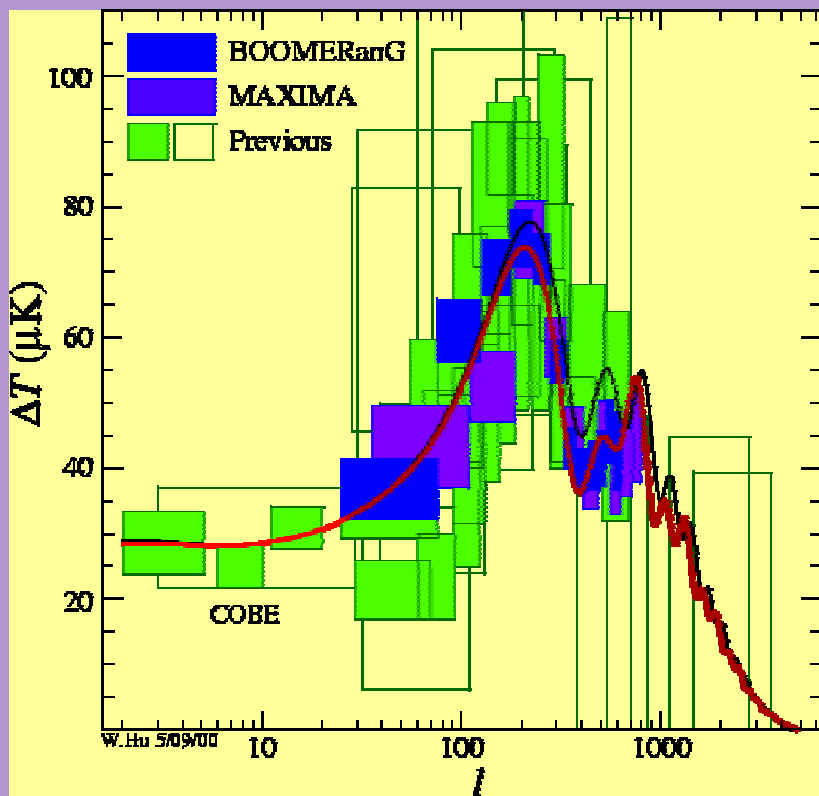
CMB温度地図と宇宙の曲率

- 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

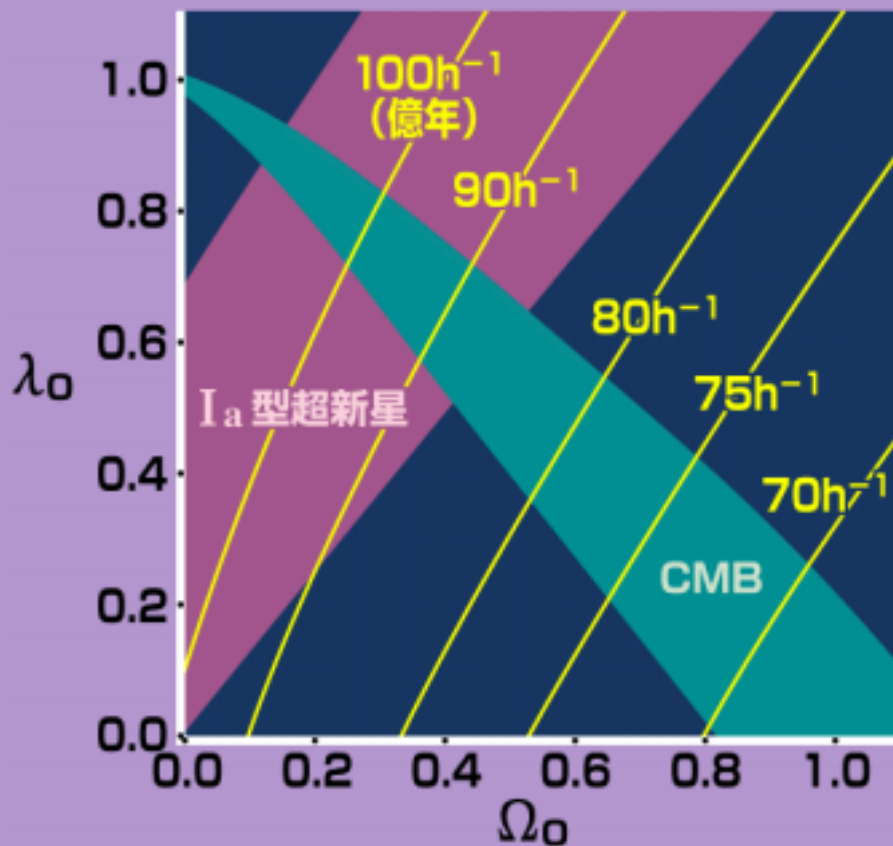


BOOMERanG 観測

CMB温度ゆらぎと宇宙論パラメータ



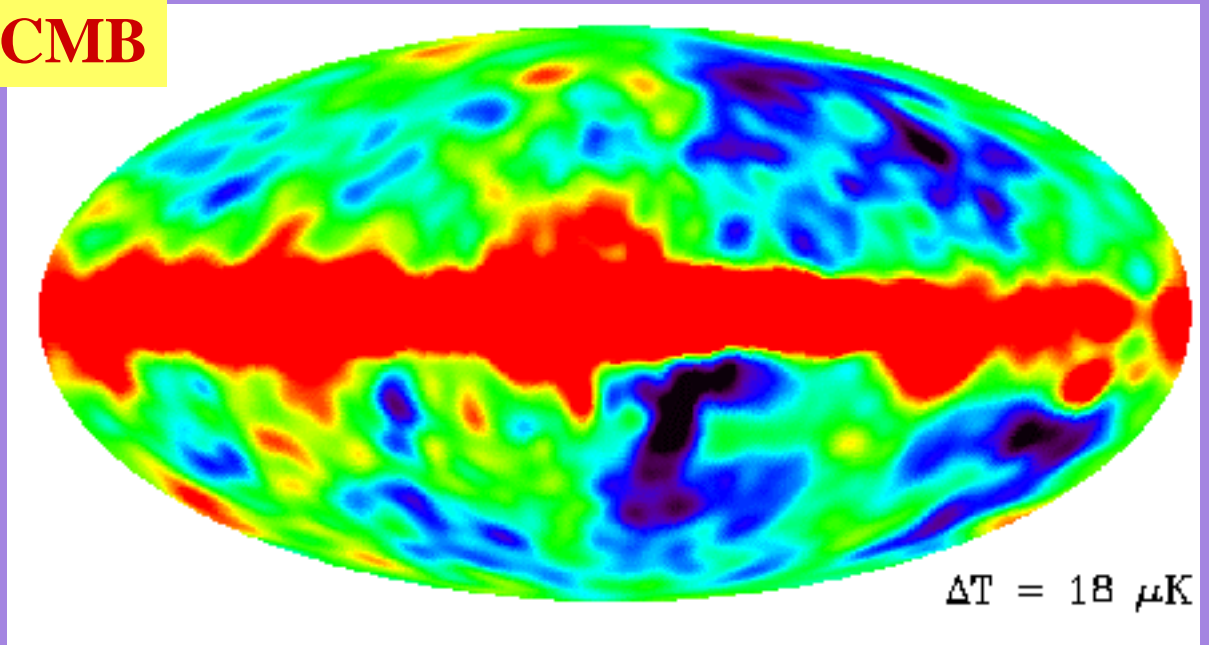
<http://background.uchicago.edu/~whu/cmbex.html>



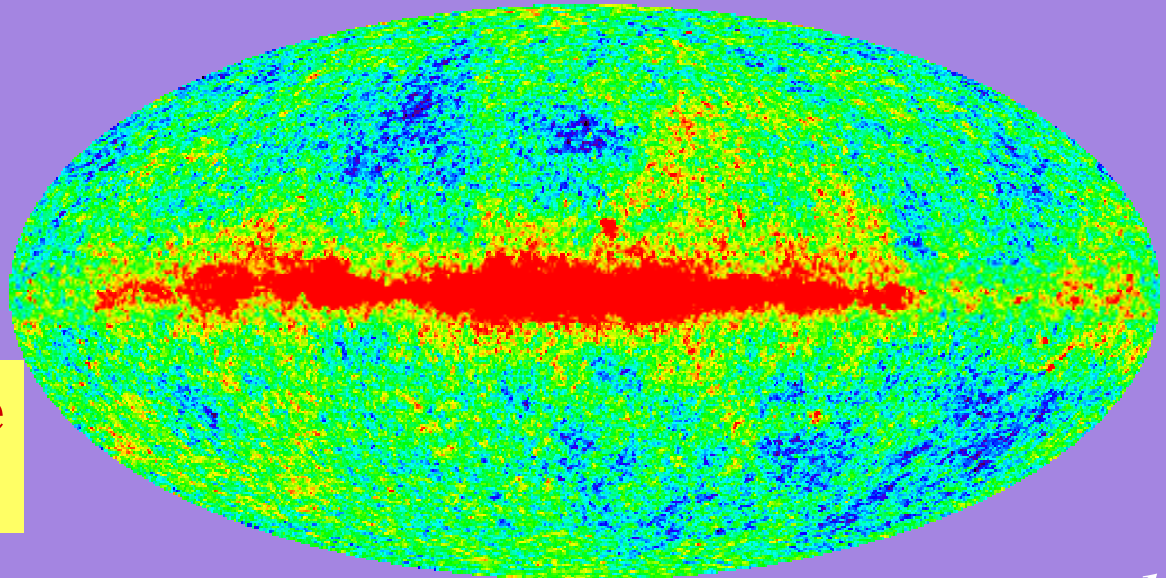
BOOMERanG 観測からの制限

COBE image of the CMB

**COBE
vs.
MAP**

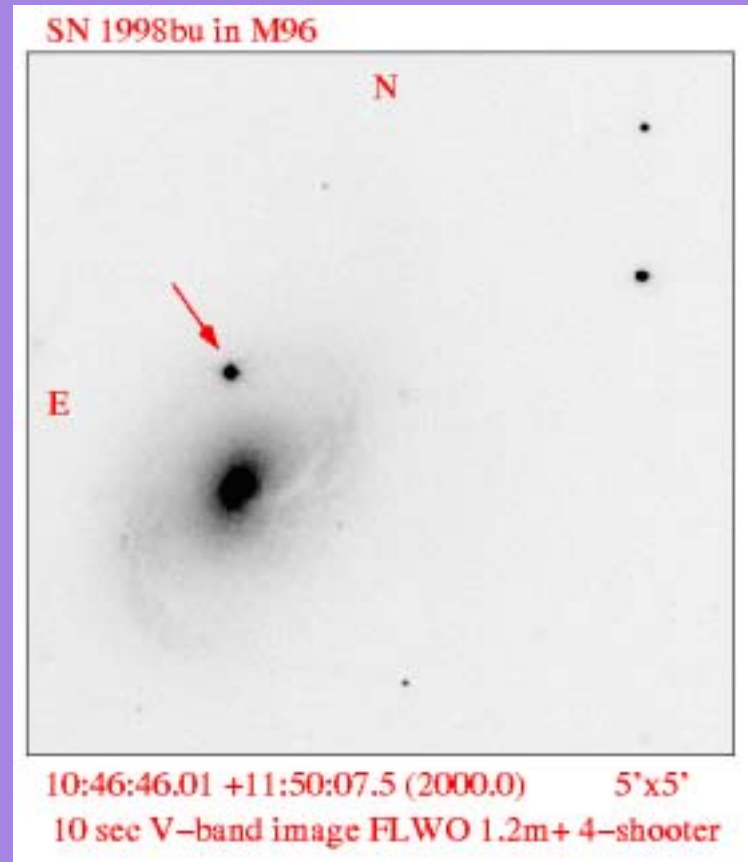


**Simulated MAP image
of the CMB**



M96内のIa型超新星 1998bu

Observations from the CfA Supernova Group: Kirshner, Garnavich, Challis and Jha

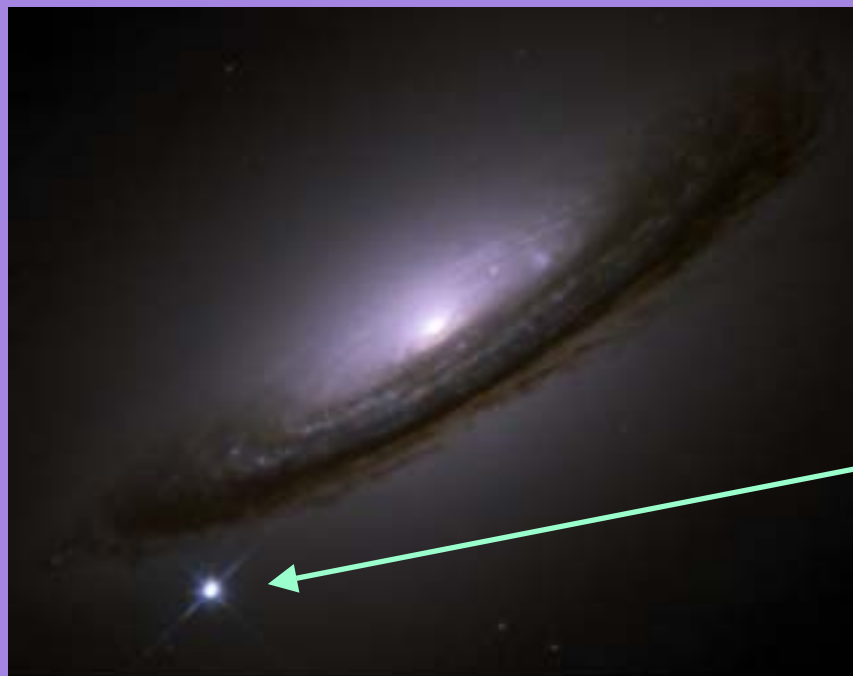


SNe look like bright stars superimposed on galaxies. They brighten toward maximum and then fade away over time as the hot material expands and cools.

Ia型超新星の観測

ground-based telescope

HST



SN94D observed on a ground based telescope and with the Hubble Space Telescope.

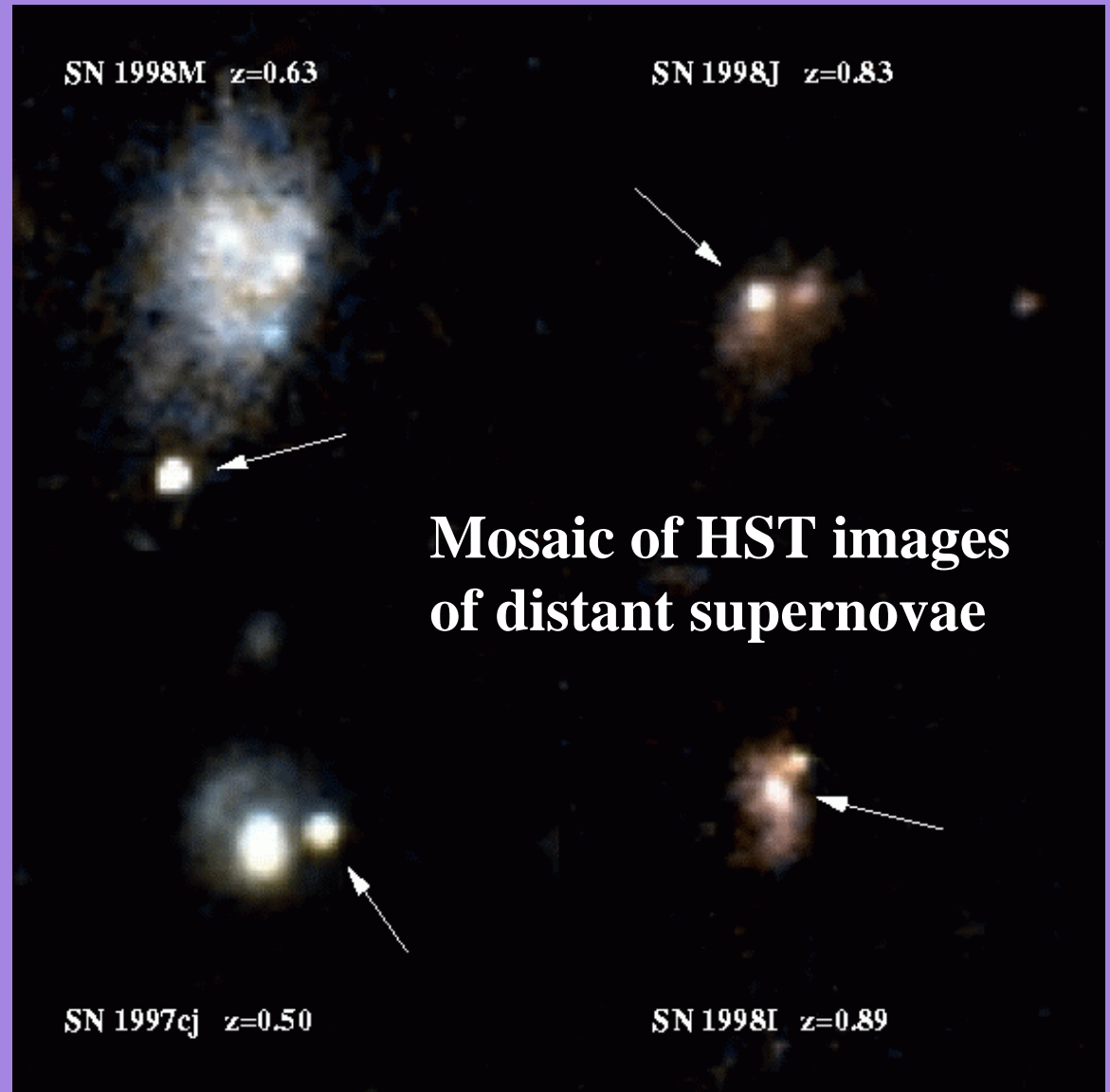
高赤方偏移でのIa型超新星

■ 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

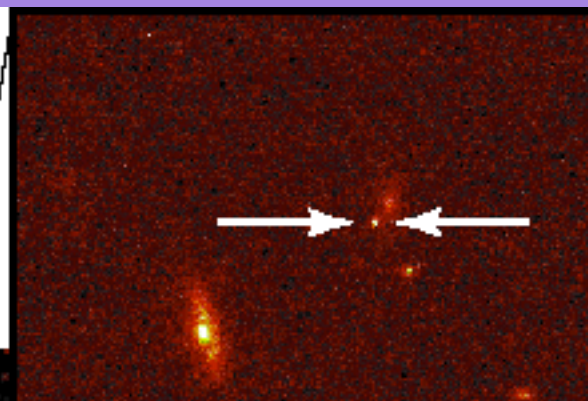
■ 分光観測

- Several types of supernovae
- SNe Ia have characteristic spectra

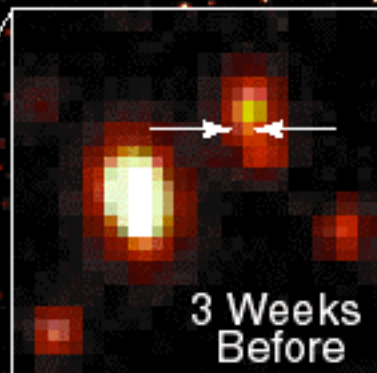


Ia型超新星の地上観測

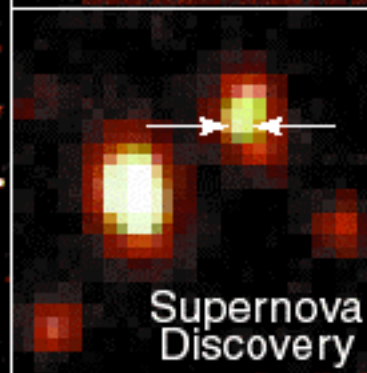
Supernova 1998ba
Supernova Cosmology Project
(Perlmutter, *et al.*, 1998)



(as seen from
Hubble Space
Telescope)

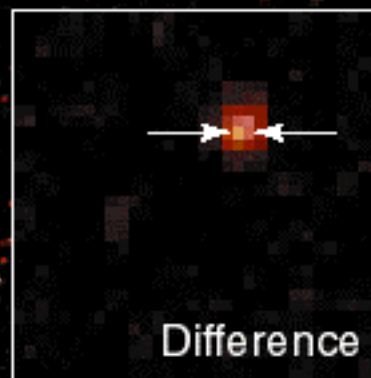


3 Weeks
Before



Supernova
Discovery

(as seen from
telescopes
on Earth)

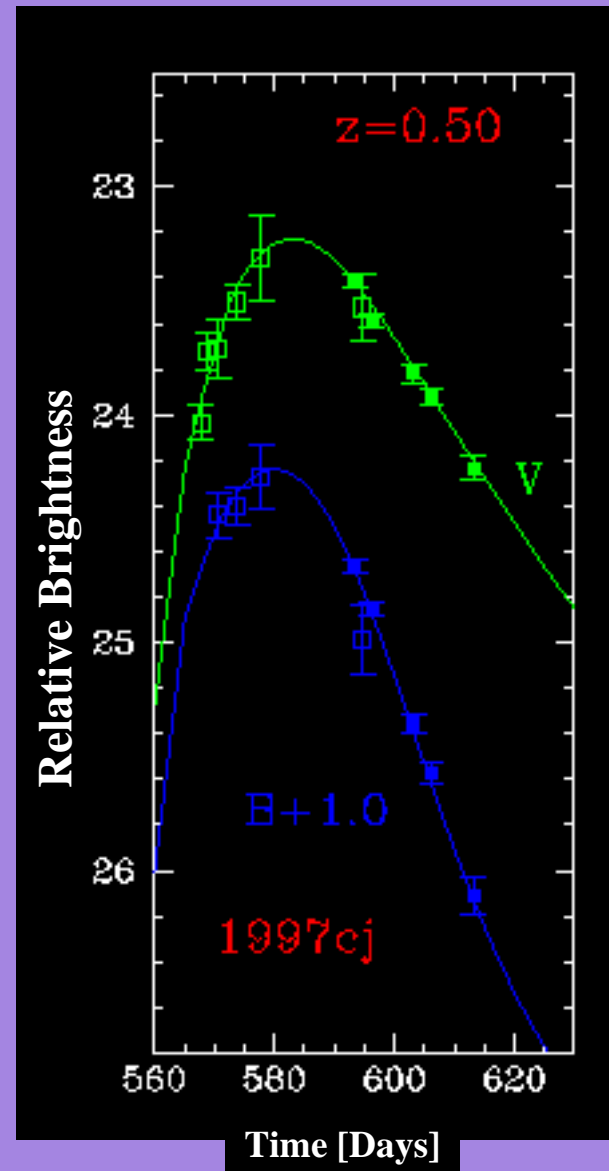


Difference

Measuring Peak Apparent Brightness

■ Peak brightnesses and the light curve

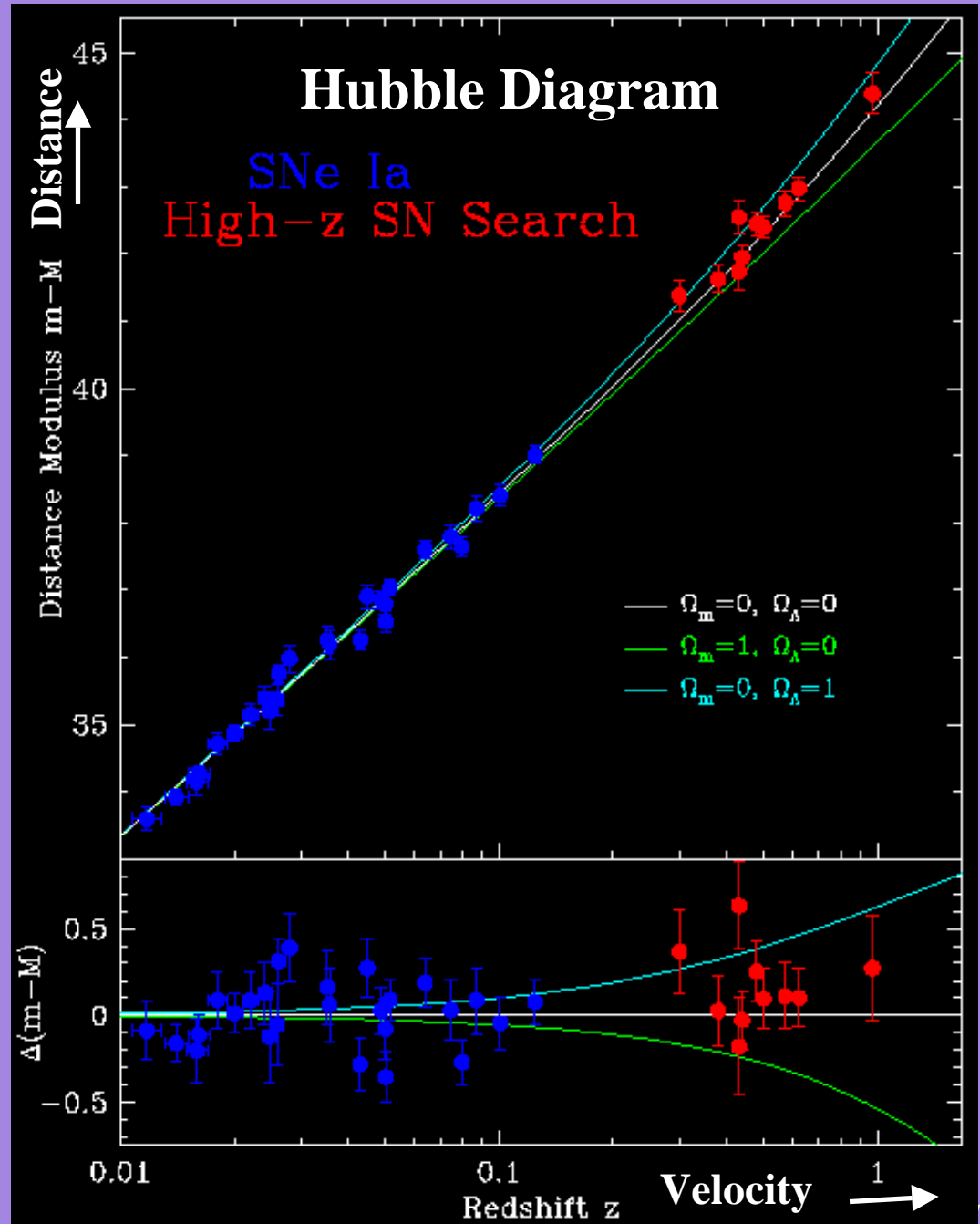
- All SNe Ia peak intrinsic brightnesses are the same to within $\sim 10\%$
- Must obtain series of images and measure the light curve



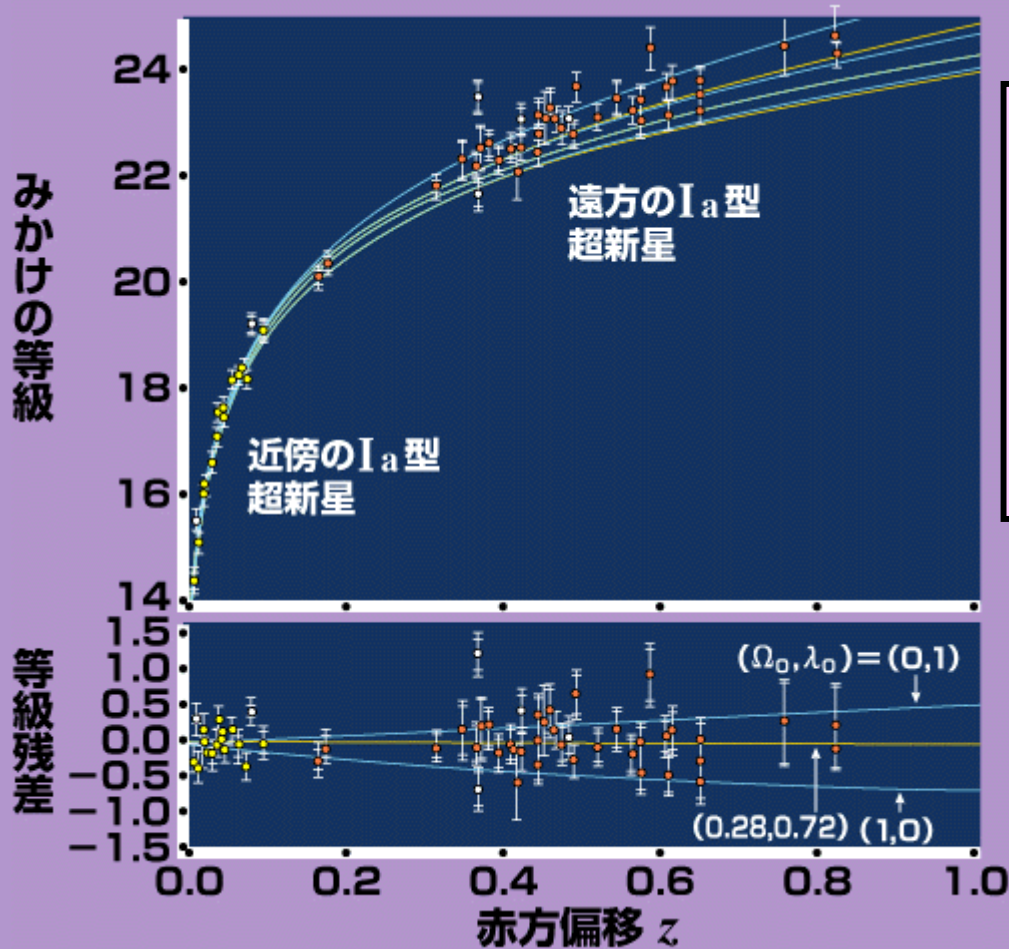
SN Ia Hubble Diagram

■ High redshift SNe Ia favor a universe which is entering an accelerating phase

- Two independent groups come to the same conclusion
- Latest results indicate that there is a cosmological constant
- acts as repulsive force, and will grow to dominate expansion more and more as time passes



超新星と宇宙定数



■ 遠方超新星までの距離推定

$$\Omega_0 = 1, \lambda_0 > 0$$

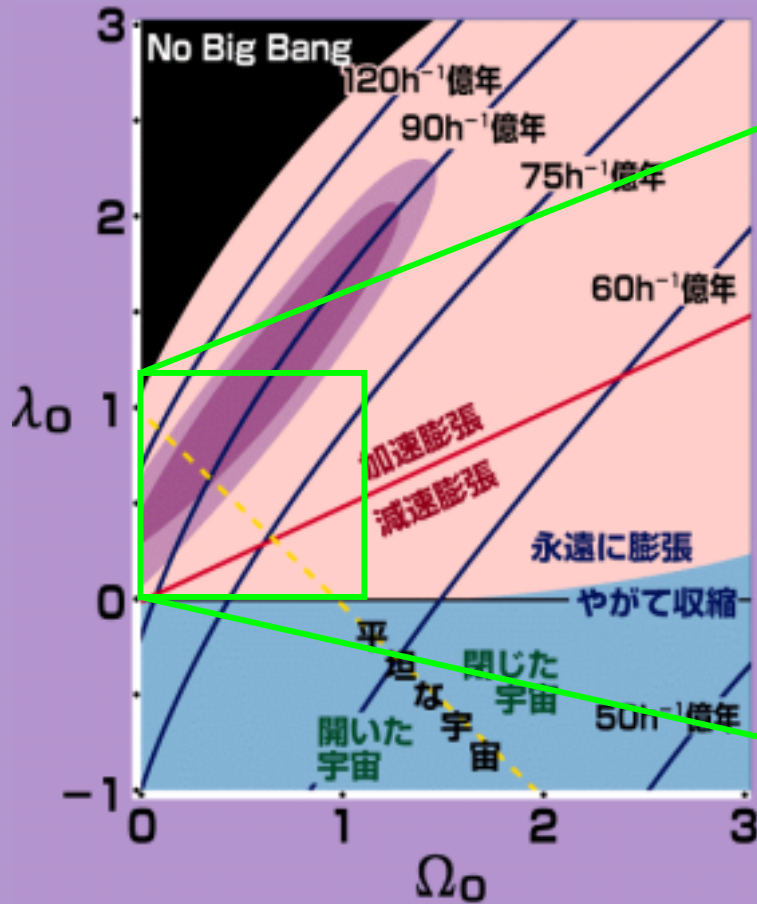
宇宙定数の存在！

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

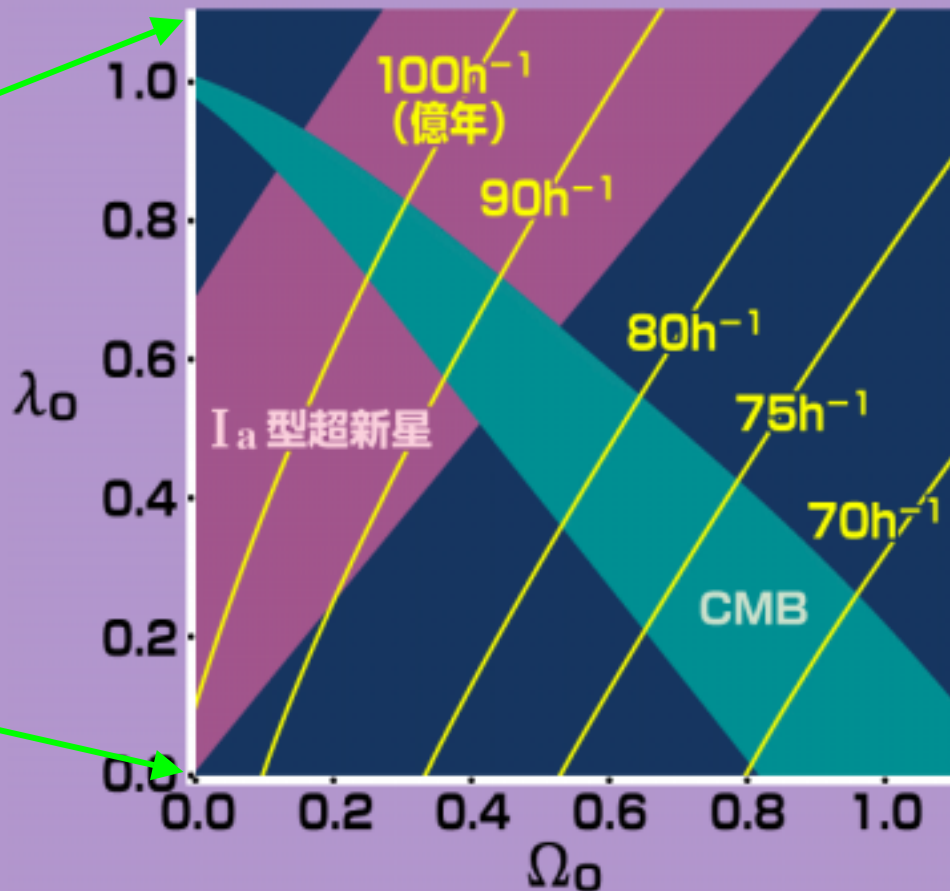
質量密度パラメータと宇宙定数

■ $\Omega_0=0.3, \lambda_0=0.7$

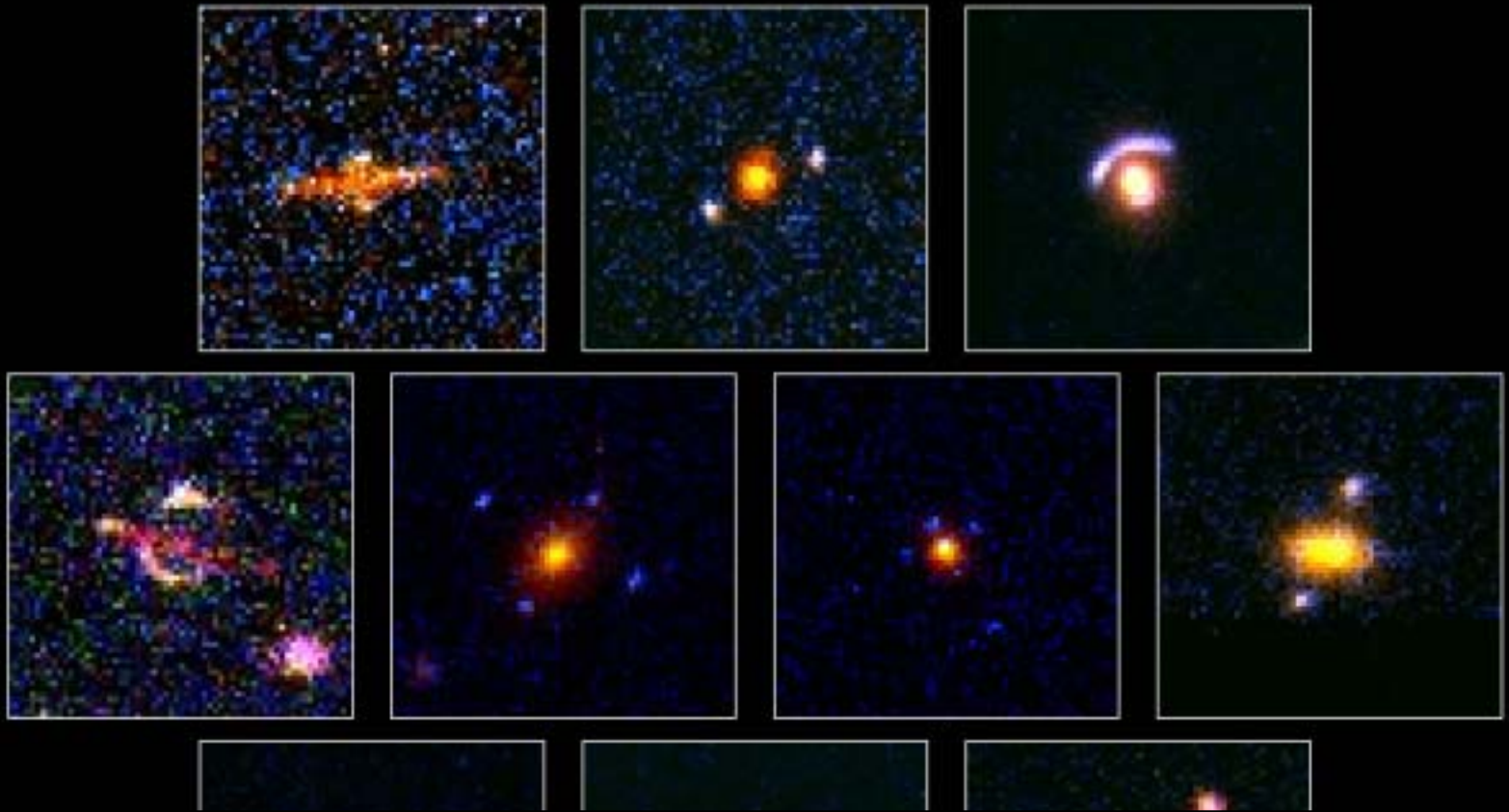
宇宙は平坦 ($k_0=0$) ?



Perlmutter et al. (1999)



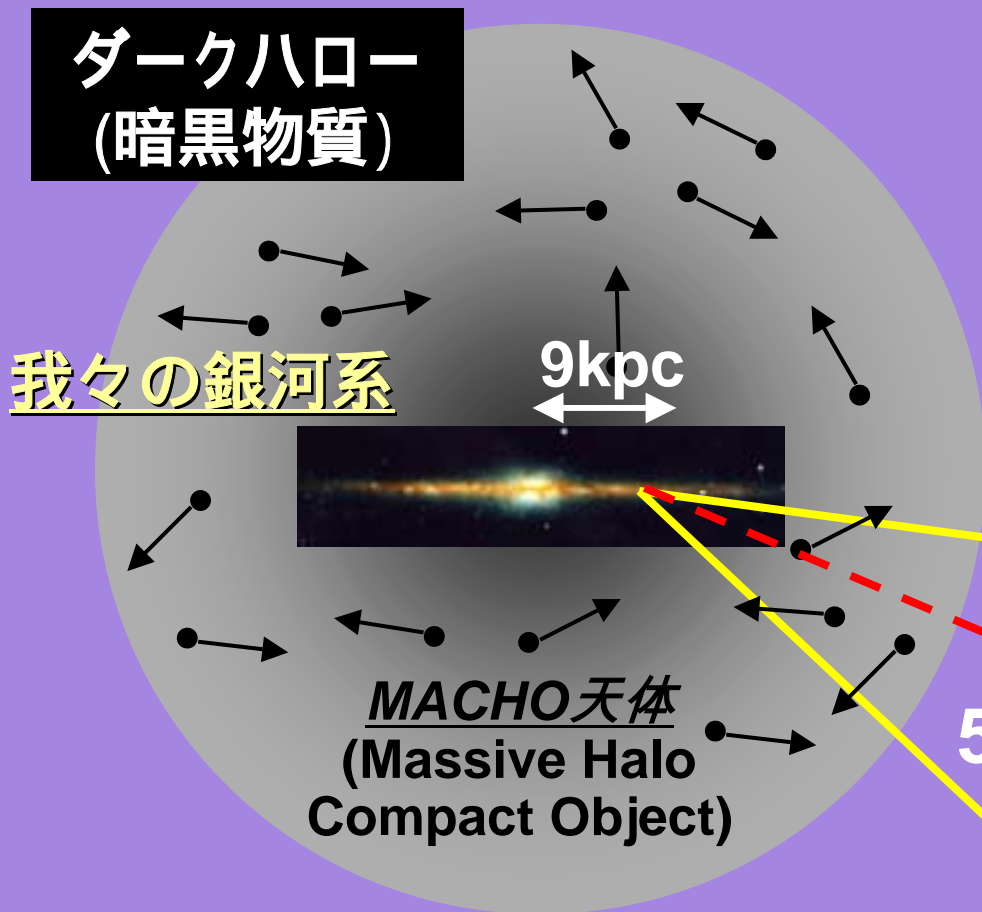
BOOMERanG 観測からの制限



■ 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)

重力マイクロレンズによるMACHO探査

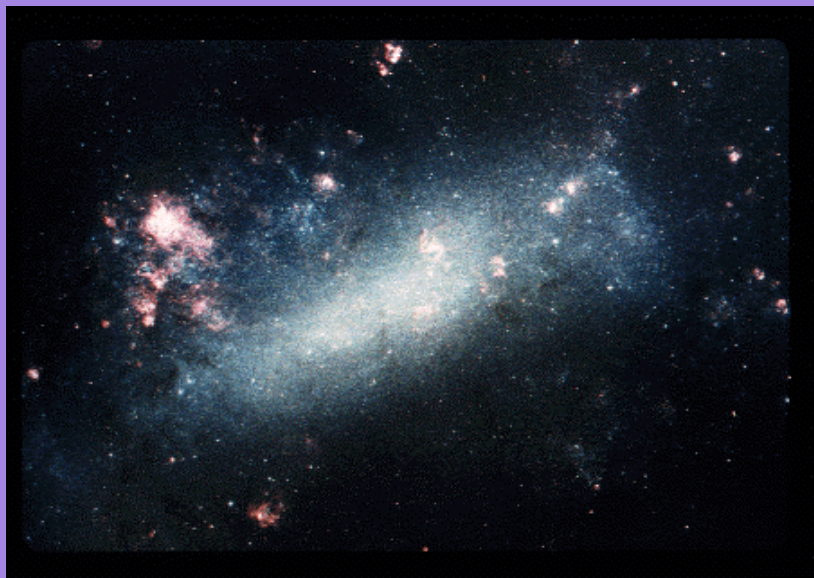


■ 銀河系ハロー - の MACHO天体による重力マイクロレンズ現象で大マゼラン星雲の星が増光する兆候を探す

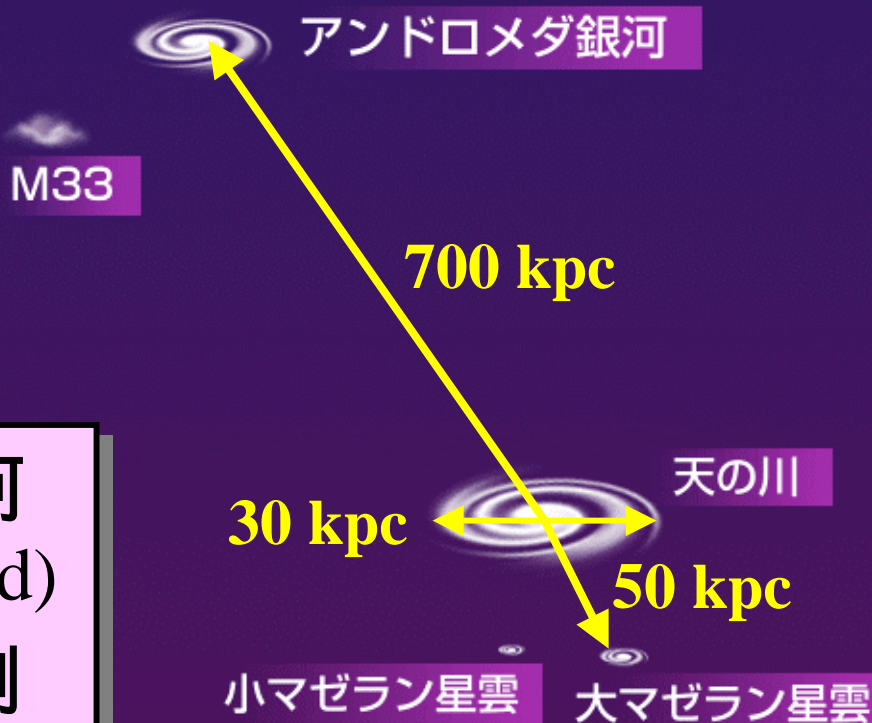
50kpc



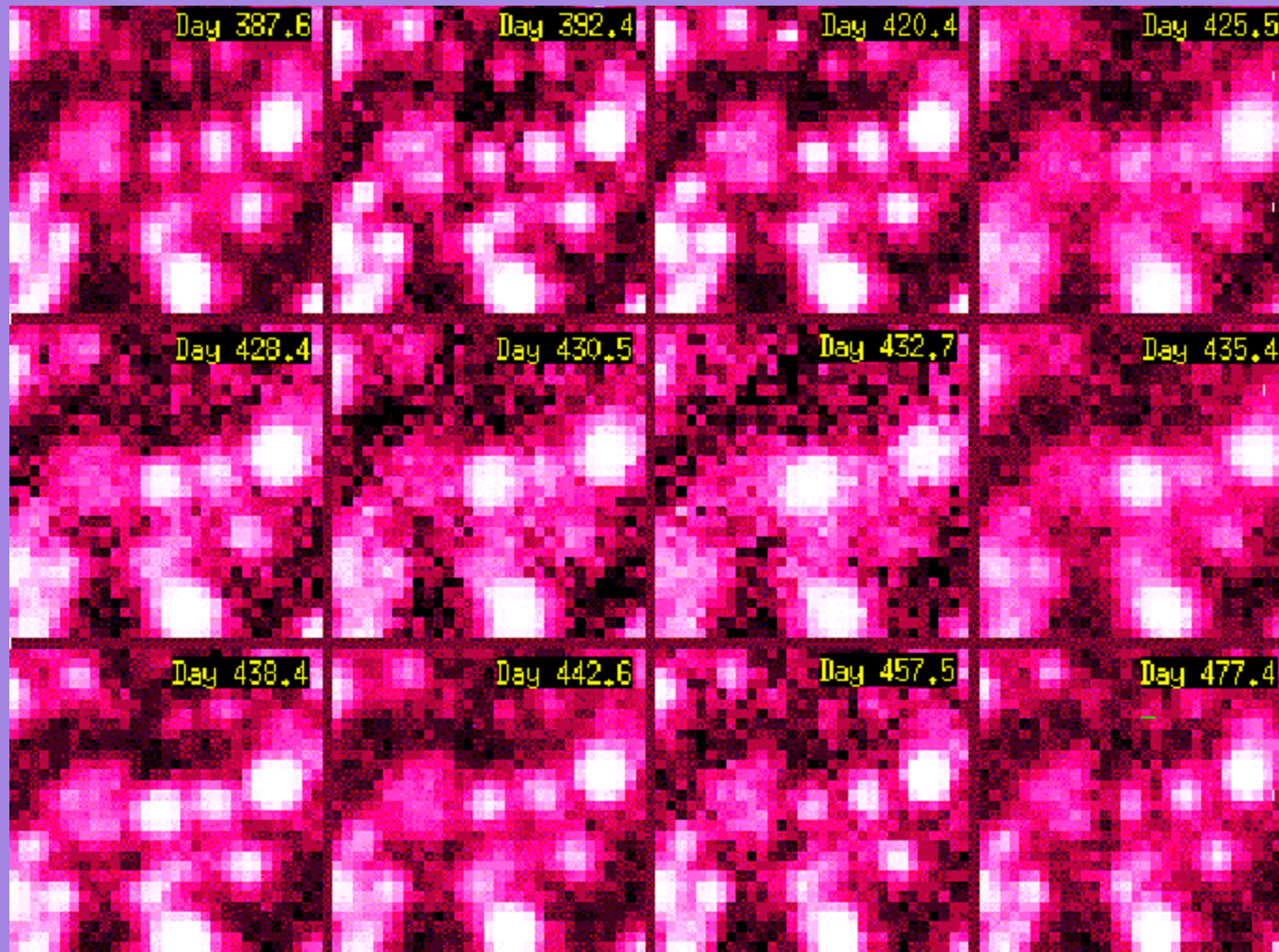
大マゼラン星雲



- 我々の銀河系の伴銀河 (Large Magellanic Cloud)
- 1987年に超新星が観測された

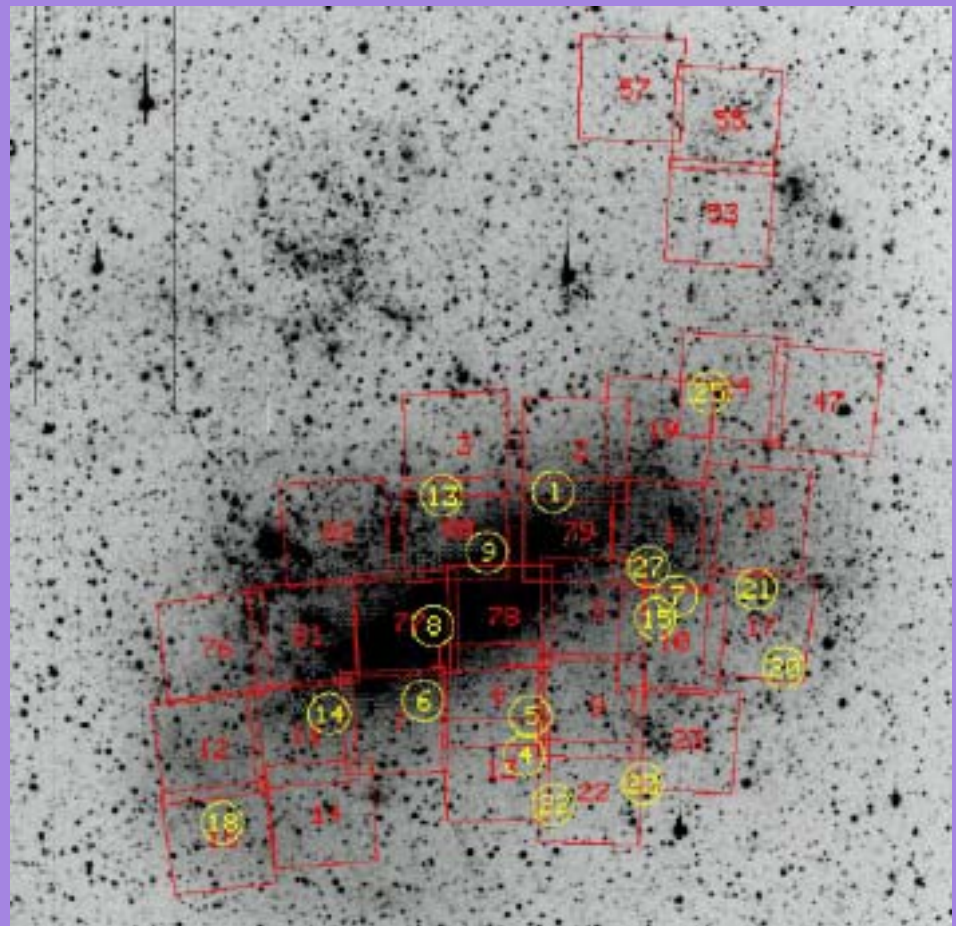
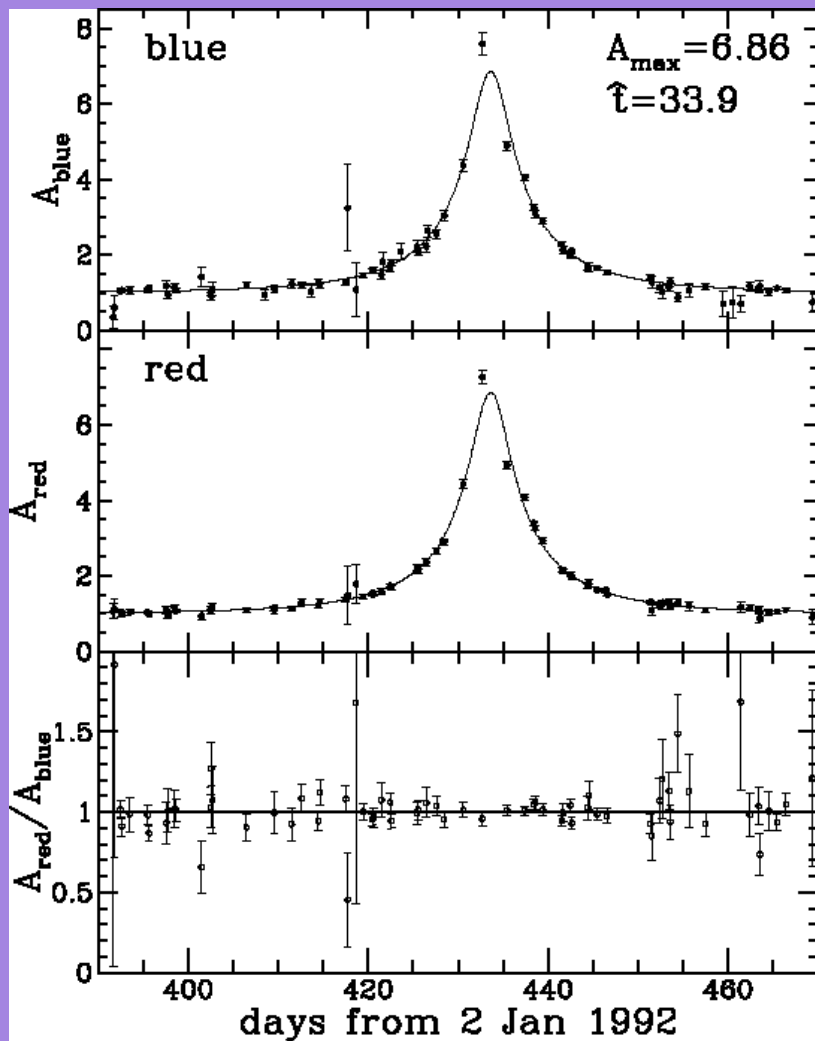


Massive Compact Halo Objectの発見

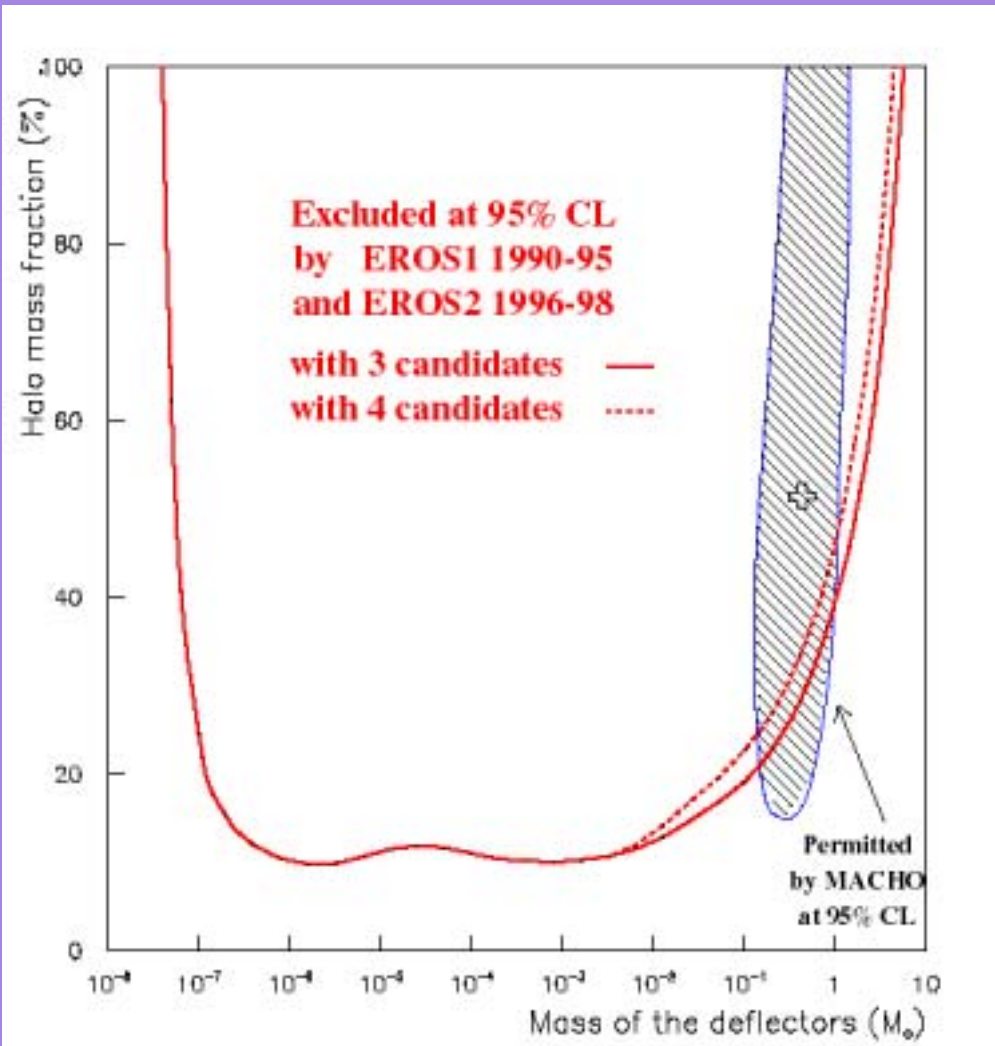


最初に発見された重力マイクロレンズ現象 (Alcock et al. 1993)

MACHOイベントの光度曲線



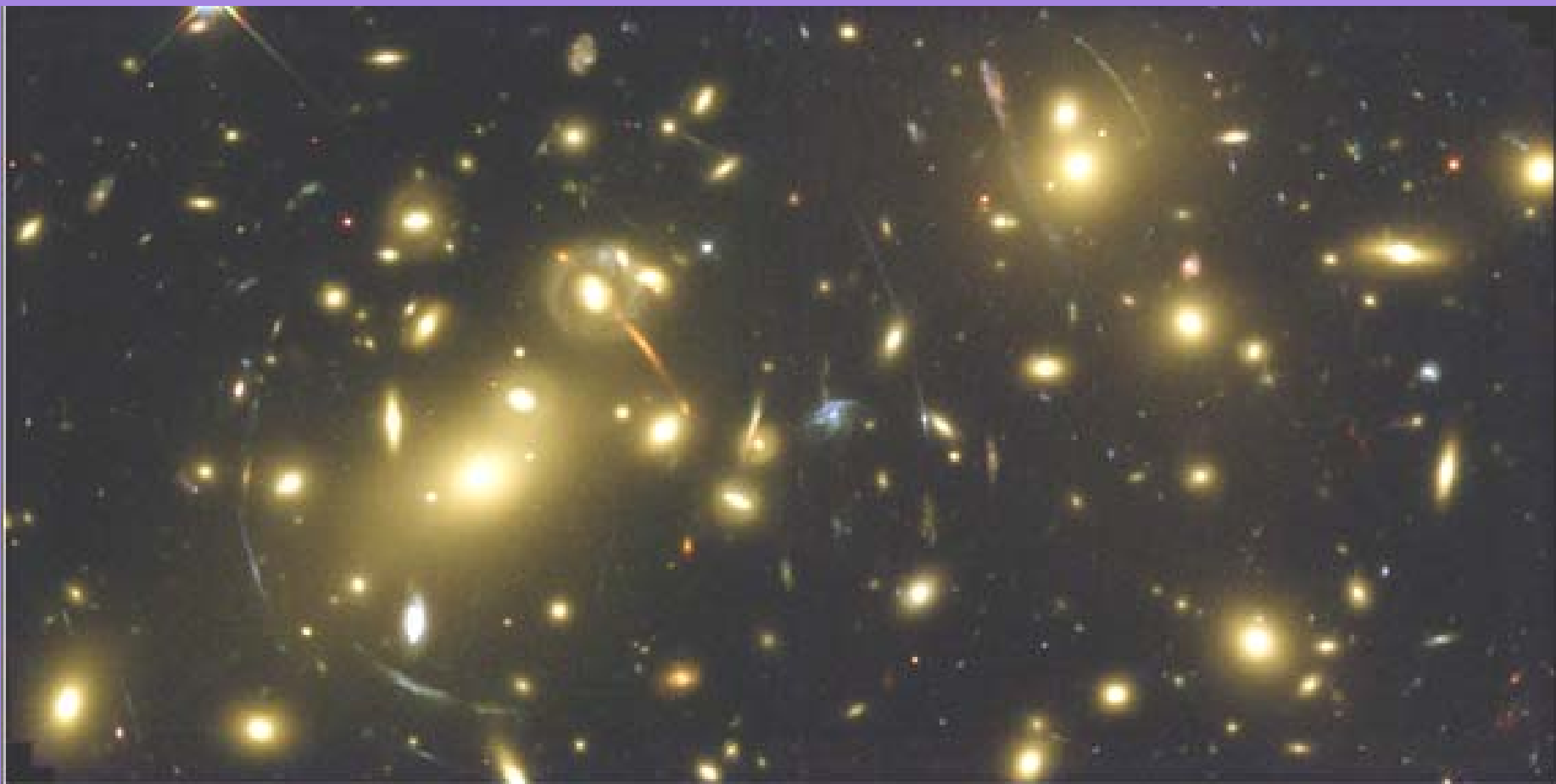
銀河系ダークマターの組成



- 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)

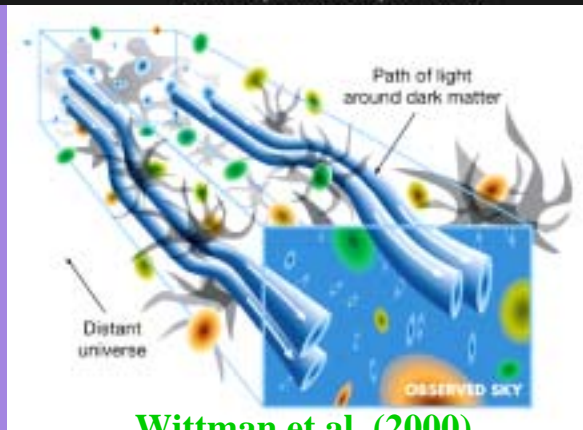
MACHO mass fraction
Lasserre et al. (2000):
EROS collaboration

銀河団による重力レンズアークの形成



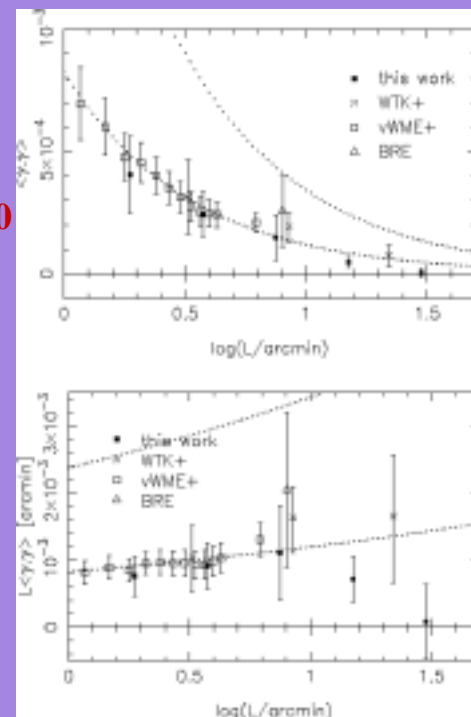
Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

弱い重力レンズによる ダークマター分布地図



Kaiser et al. astro-ph/0003338
Wittman et al. astro-ph/0003014
Bacon et al. astro-ph/0003008
van Waerbeke et al. astro-ph/0002500

銀河団の重力ポテンシャルによって遠方の銀河の像が歪んで見える例は数多く知られていたが、2000年になって4つのグループがほぼ同時に、宇宙の大構造に起因する重力レンズ効果の検出を発表した



宇宙の質量(ダークマター)分布を直接マッピングすることが可能な時代に突入した

広・深・多：新たな展開を求めて

広く



SDSS 望遠鏡

深く



すばる望遠鏡とSDF画像



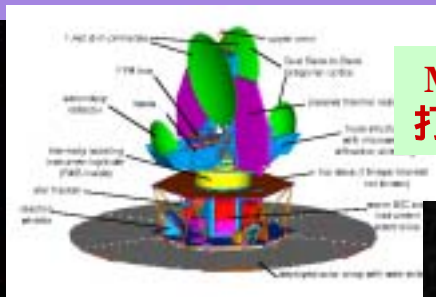
多波長で



LMSA



Astro-F (IRIS)



MAP(2001年
打ち上げ予定)

PLANCK (2007年
打ち上げ予定)



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

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
...		

宇宙論研究はまだ始まったばかり！