

宇宙論の来し方行く末

須藤 靖

東京大学 大学院理学系研究科
物理学専攻・初期宇宙研究センター

2000年4月5日(水)
(日本天文学会春季年会)

Contents

1	宇宙論の“進歩”	2
2	観測的宇宙論研究のゴール	3
3	宇宙論研究を支える素朴な疑問	4
4	来し方	5
4.1	宇宙の年齢： H_0 の決定	5
4.2	銀河系内ダークマターの正体:重力マイクロレンズ	6
4.3	宇宙の3次元地図：銀河・QSO赤方偏移サーベイ	9
4.4	宇宙定数は存在するか?: 超新星サーベイ	11
4.5	ダークマターマッピング：弱い重力レンズ	14
4.6	原始密度ゆらぎの再構成：CMB温度地図	16
5	行く末: 精密宇宙論 ???	19
6	まとめと展望	21

1 宇宙論の“進歩”

E.Hubble (1929)

遠方天体の距離を1桁過小評価 ($h = 5.58 !$)。
しかし、結論 (ハッブルの法則) は変わらない。

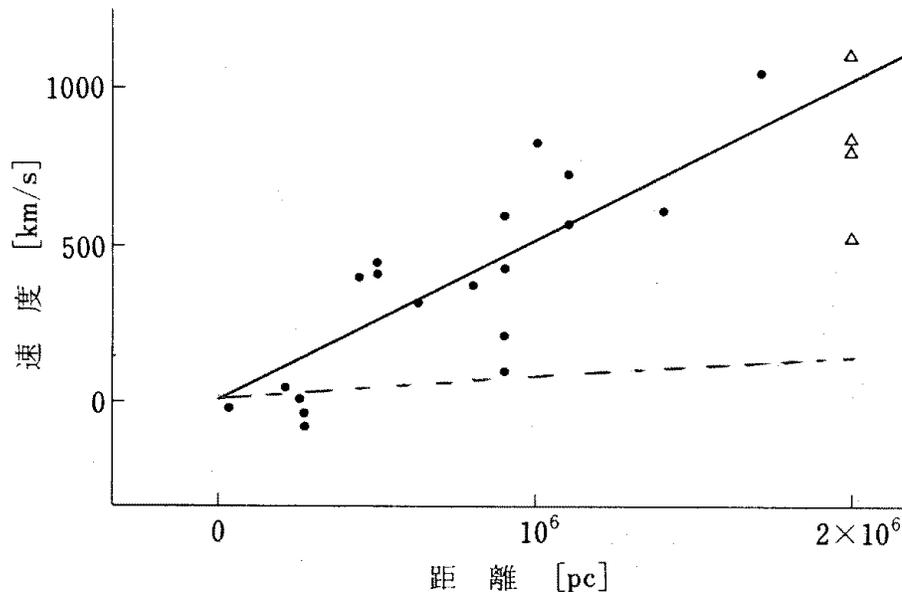


Figure 1: ハッブルの用いた距離–後退速度関係に、彼の推測した比例関係 ($h = 5.58 !$) を実線で、現在の推定値 ($h = 0.7$) を破線で描き入れたもの。

G.Gamow (19??)

10^{10} は 10^{-10} の間違い。しかし、結論は変わらない。

A.A.Penzias & R.W.Wilson (1965)

$$T_{\text{CMB}} = 3.5^\circ \pm 1.0^\circ \text{K}$$

J.C.Mather et al. (1999)

$$T_{\text{CMB}} = 2.725 \pm 0.002 \text{K}$$

W.Freedman (1999)

$$h = 0.71 \pm 0.03 \text{ (統計誤差)} \pm 0.07 \text{ (系統誤差)}$$

2 観測的宇宙論研究のゴール

宇宙論的 観測データ

↓ 理論モデル・計算機シミュレーション

宇宙の多様性の物理的理解

第一世代の天体: QSO、Pop.III stars

階層構造: 星・銀河・銀河団・超銀河団

物質密度と分布: バリオン・ダークマター

元素の起源: QSO 吸収線系、銀河・銀河団

宇宙の熱史 QSO、原始銀河・銀河団

宇宙の初期条件の再構築

宇宙論パラメータの決定

原始密度揺らぎのスペクトル

原始密度揺らぎの確率分布関数

“観測データが限られている場合稀な天体ほど先に発見される” → 天文学的興味からは重要だが、、、
宇宙論はごく平均的(地味)なものを対象とする
統計的均質性・信頼性・観測領域サイズがより重要
⇒ 宇宙のサーベイ観測

宇宙の3次元地図: 銀河・QSOの赤方偏移サーベイ

宇宙のダークマター分布: 重力レンズサーベイ

宇宙の距離測量地図: 超新星サーベイ

宇宙の温度地図: マイクロ波背景放射のゆらぎ

3 宇宙論研究を支える素朴な疑問

宇宙の誕生・起源

原始密度ゆらぎの関数形、振幅、 Ω_0, λ_0
マイクロ波背景輻射 (CMB) 温度ゆらぎ地図

宇宙の質量 (密度)

$\Omega_0 = 1$?
天体の力学的質量測定、ダークマターマッピング

宇宙を占める物質・元素の組成

$\Omega_0 > \Omega_b$?, $\lambda_0 > 0$?
太陽近傍の元素組成、QSO 吸収線の観測

宇宙の年齢

$H_0 = 50 \text{ km/sec/Mpc}$? $H_0 = 100 \text{ km/sec/Mpc}$?
セファイド型変光星の較正、大マゼラン星雲までの距離、近傍銀河の距離 (ハッブル宇宙望遠鏡 キープロジェクト)

宇宙の果て

最も遠方 (過去) の天体は ?
(現在の記録 : $z = 5.58$ の QSO, $z \sim 6$ の銀河)
ハッブルディープフィールド、すばるディープフィールド、遠方銀河・QSO の分布地図

宇宙の未来

$\Omega_0 = 1$? $\lambda_0 > 0$?
宇宙論パラメータの決定 (超新星サーベイ、CMB)

もちろんこのような問題意識はいつの時代にも存在したが、観測データに基づく定量的検証が可能になったのは、いずれも**わずかここ数年**のことである。

4 来し方

4.1 宇宙の年齢： H_0 の決定

HST(ハッブル宇宙望遠鏡) の観測から、18個の銀河の距離を求め、ハッブル定数を10パーセントの精度で決定する。

$$H_0 = 71 \pm 3 \text{ (統計誤差)} \pm 7 \text{ (系統誤差)} \text{ km/s/Mpc}$$

系統誤差: ± 5 (LMC) ± 3 ([Fe/H]) ± 3 (global) ± 4 (photometry)

方法	H_0 の推定値
近傍銀河のセファイド	73 \pm 7 \pm 9
表面輝度ゆらぎ	69 \pm 4 \pm 6
タリーフィッシャー関係	71 \pm 4 \pm 7
$D_N - \sigma$ 関係	78 \pm 7 \pm 8
Ia 型 超新星	68 \pm 2 \pm 5
II型 超新星	73 \pm 7 \pm 7
平均	71 \pm 3 \pm 7

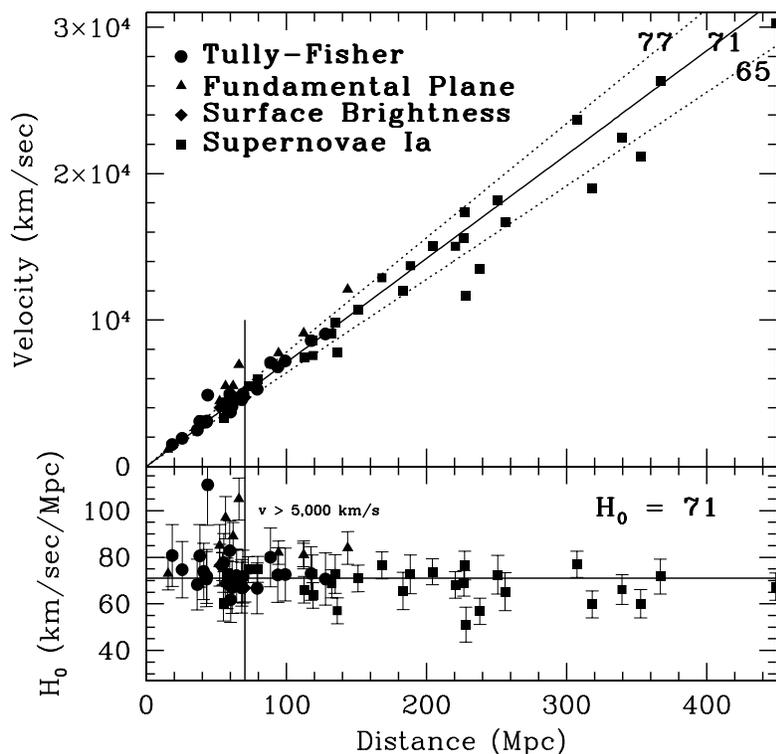


Figure 2: 銀河の距離と後退速度の関係 (ハッブル図)。この線の傾きがハッブル定数で、図の実線は 71 km/s/Mpc に対応。2次距離指標はすべて、HSTのセファイドで較正してある。
(W.L.Freedman astro-ph/9909076)

4.2 銀河系内ダークマターの正体:重力マイクロレンズ

銀河系ハロー内に存在する低質量天体 (MACHO:MAssive Compact Halo Objects) が遠方の星の前を横切る際、重力レンズ現象によって、(典型的には一ヶ月程度)、その星が増光する。マゼラン星雲の星の系統的モニター観測から、実際にMACHOが検出され、その存在量が推定されている。

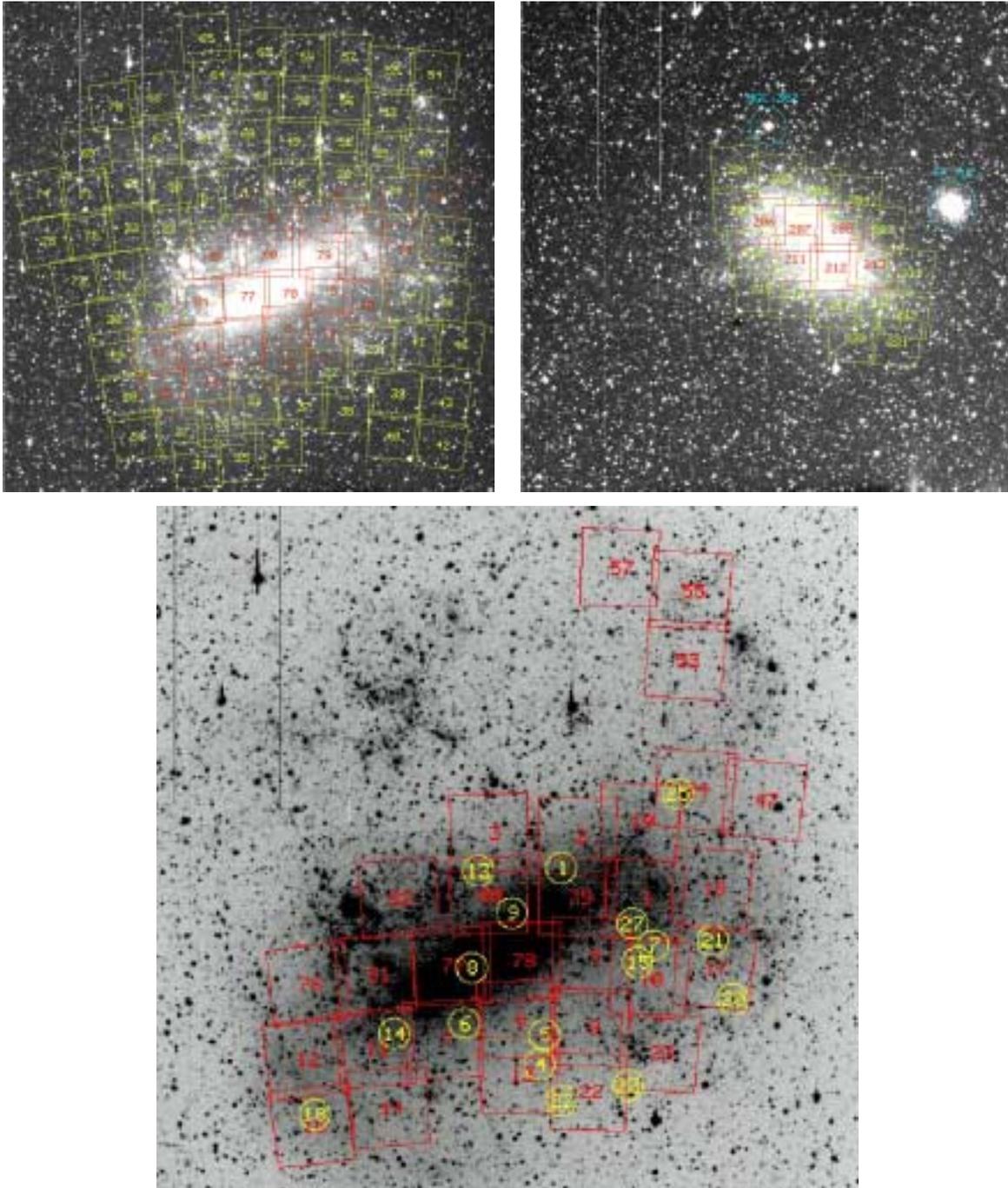


Figure 3: MACHO サーベイフィールド(左上: LMC, 右上: SMC)とレンズ候補の位置(下)

最初に検出されたMACHOの光度曲線

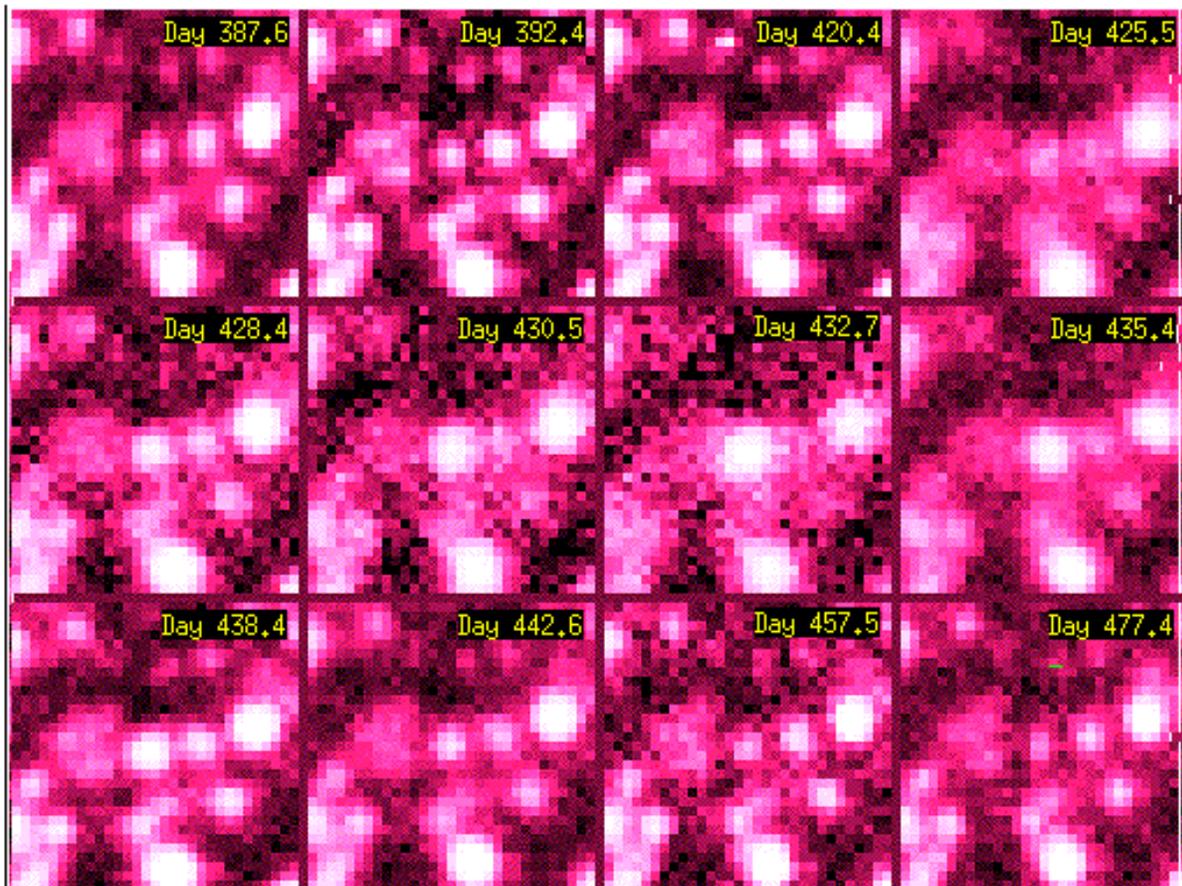
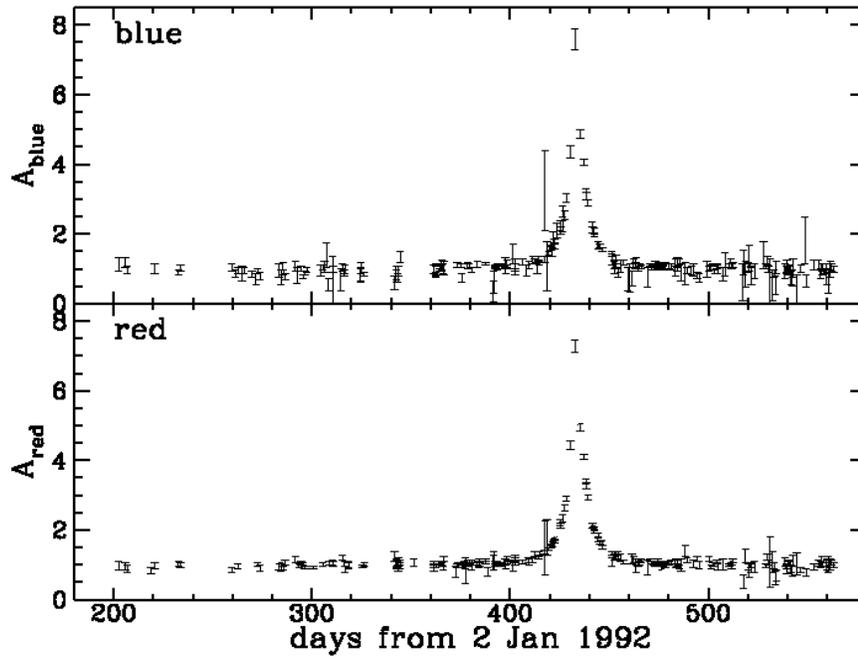


Figure 4: MACHO 1st event (Alcock et al. Nature 365, 1993, 621)

MACHO が銀河系ハローに占める質量の割合

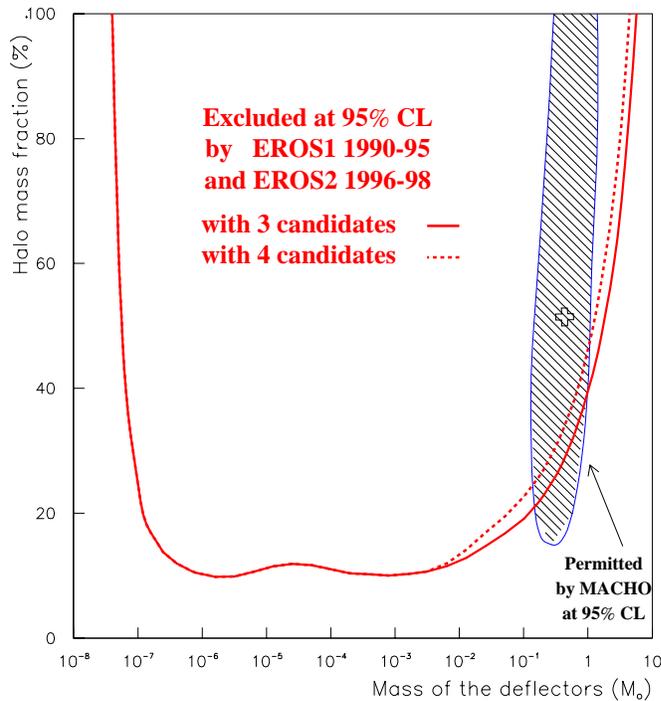


Figure 5: フランスの MACHO 探索プロジェクト EROS (Expérience de Recherche d'Objets Sombres) は、1990-1995 に LMC 方向に 1 つ、1996-1998 に LMC 方向 (17.5 million stars monitoring) に 2 つ、SMC 方向に 1 つの重力レンズ候補を検出。左は標準ハローモデル ($4 \times 10^{11} M_{\odot} < 50 \text{kpc}$) の場合の制限。(Lasserre et al. [astro-ph/0002253](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0002253))

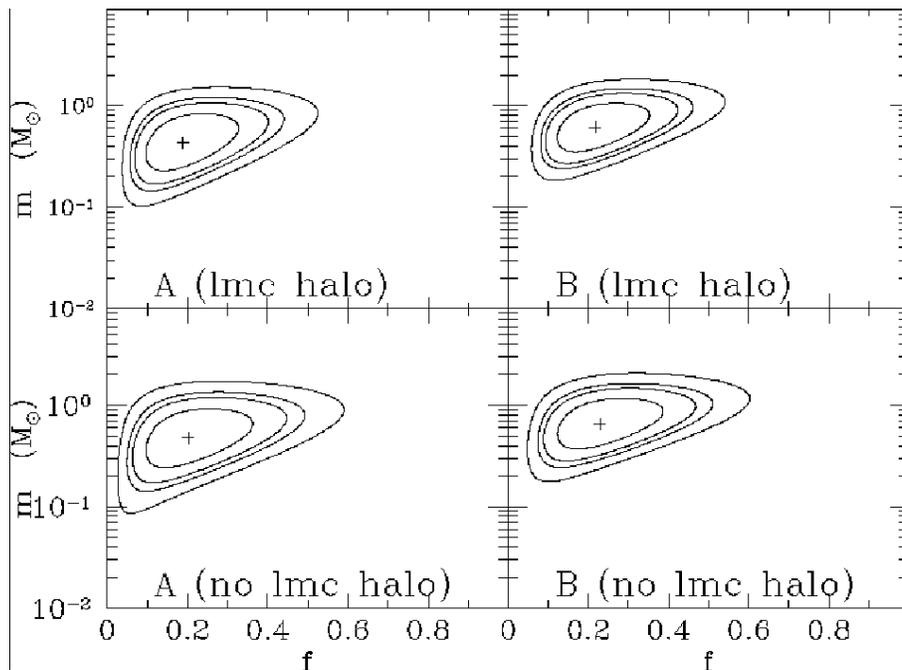


Figure 6: MACHO の 1992 年以来 5.7 年にわたる LMC 観測 (11.9 million stars monitoring) で、13 ~ 17 の重力レンズ候補を検出。MACHO 質量は $0.15 \sim 0.9 M_{\odot}$ 、銀河のハローに占める質量比は 20% (8% ~ 50%)。(Alcock et al. [astro-ph/0001272](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0001272))

4.3 宇宙の3次元地図：銀河・QSO 赤方偏移サーベイ

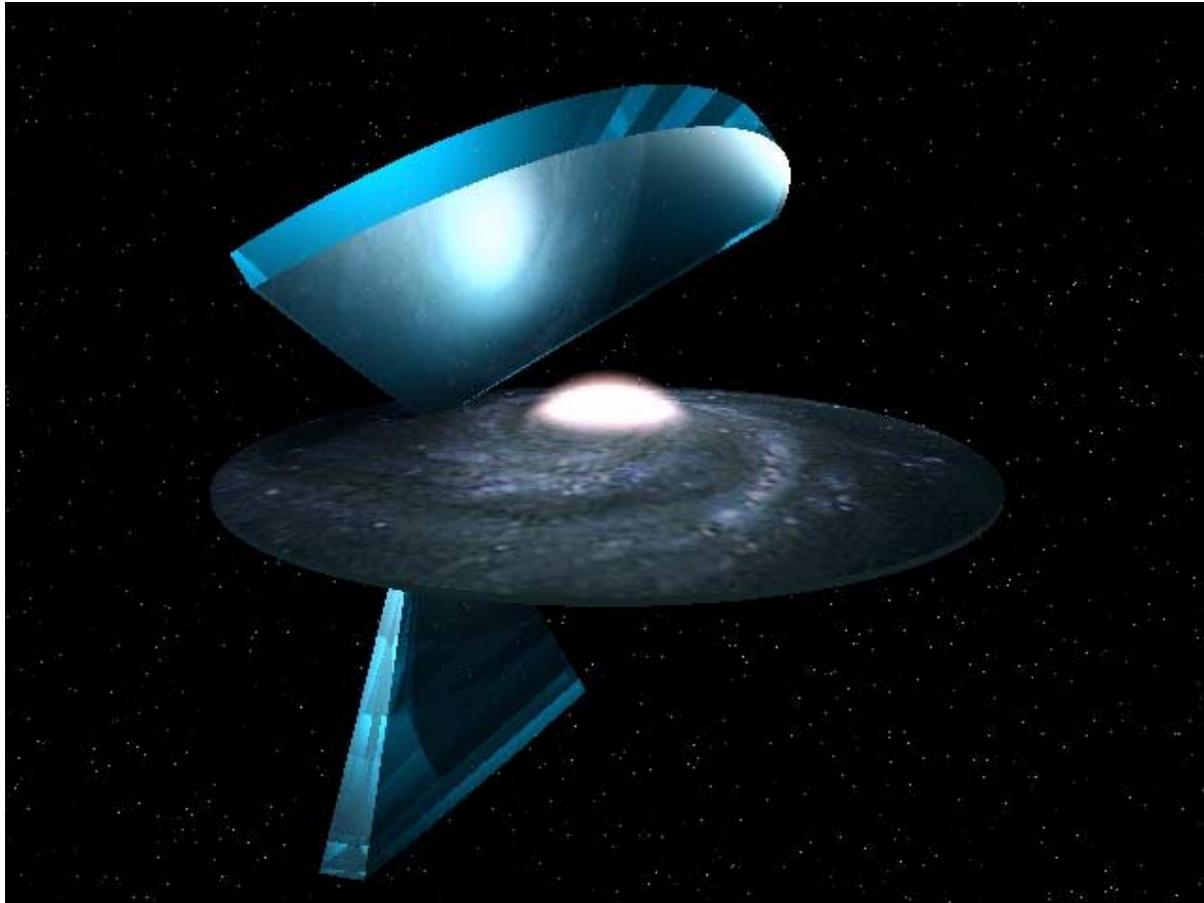


Figure 7: 2dFサーベイは、口径4mのアングロオーストラリア天文台望遠鏡に取り付けられた2dFと呼ばれる多天体分光器（400天体の同時分光が可能）を利用した英豪共同の銀河・クエーサー観測プロジェクト。 b_J バンドで19.5等級より明るい銀河25万個と、 R バンドで21等級より明るい銀河1万個、 $18.25 < b_J < 20.85$ のクエーサー2万5千個の分光観測を行う。1996年10月にファーストデータ、1997年10月から多天体分光サーベイ開始。

Folkes et al. astro-ph/9903456, Boyle et al. astro-ph/0003206
http://www.mso.anu.edu.au/~rsmith/QSO_Survey/qso_surv.html
<http://www.mso.anu.edu.au/2dFGRS/>

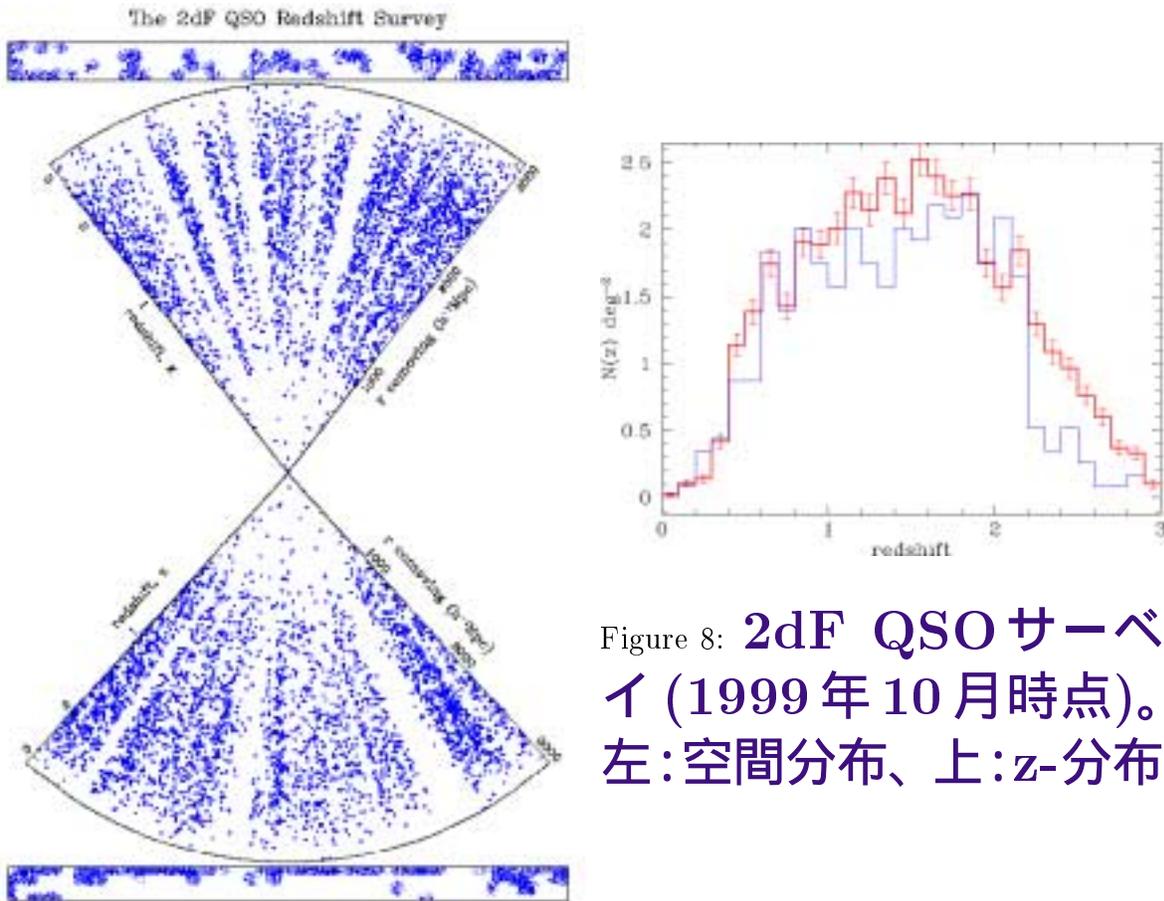


Figure 8: 2dF QSO サーベ
イ (1999 年 10 月時点)。
左:空間分布、上:z-分布

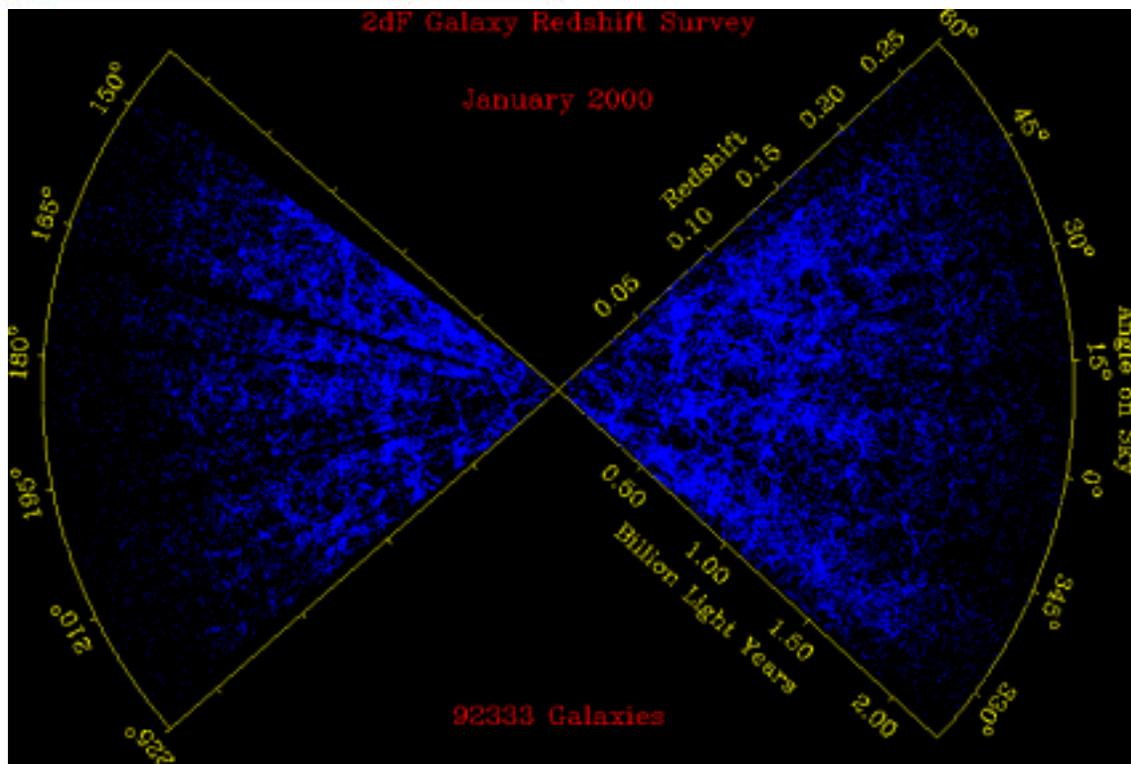


Figure 9: 2dF 銀河サーベ
イの空間分布 (2000 年 1 月時点)。

4.4 宇宙定数は存在するか?: 超新星サーベイ

Ia型超新星は、その最大光度がほぼ一定であることが知られており、いわゆる標準光源である。高赤方偏移にある銀河の中の超新星を見つけて、その銀河までの距離を決めることで、ハッブル定数や宇宙論パラメータを決定することを目的とする。

Supernova Cosmology ProjectとHigh-Z SN Searchの2つの観測グループがあり、どちらも0でない宇宙定数の存在を主張している(しかも、空間曲率が0、つまり $\Omega_0 + \lambda_0 = 1$ 、を支持していると解釈できる)。

4.4.1 Supernova Cosmology Project (<http://www-supernova.lbl.gov>)

ローレンスバークレー研究所を中心とした超新星サーベイ。

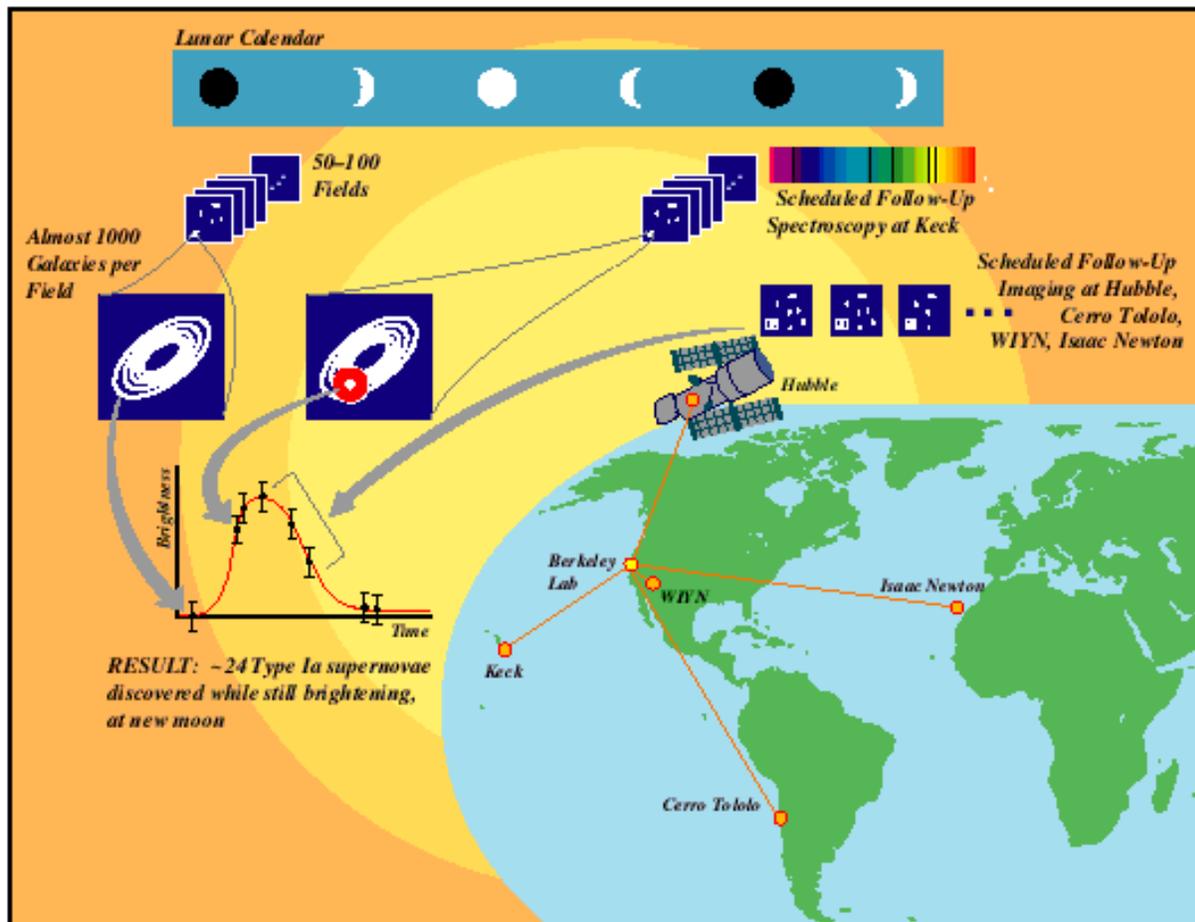


Figure 10: Supernova Cosmology Project 観測概略

4.4.2 High-Z SN Search

オーストラリア ストロムロ山天文台、ハーバード大学などを中心とした超新星サーベイグループ。

(<http://cfa-www.harvard.edu/cfa/oir/Research/supernova/HighZ.html>)

The High-Z SN Search



Our Quest:
To Measure the Change of the
Rate of Expansion of the Universe

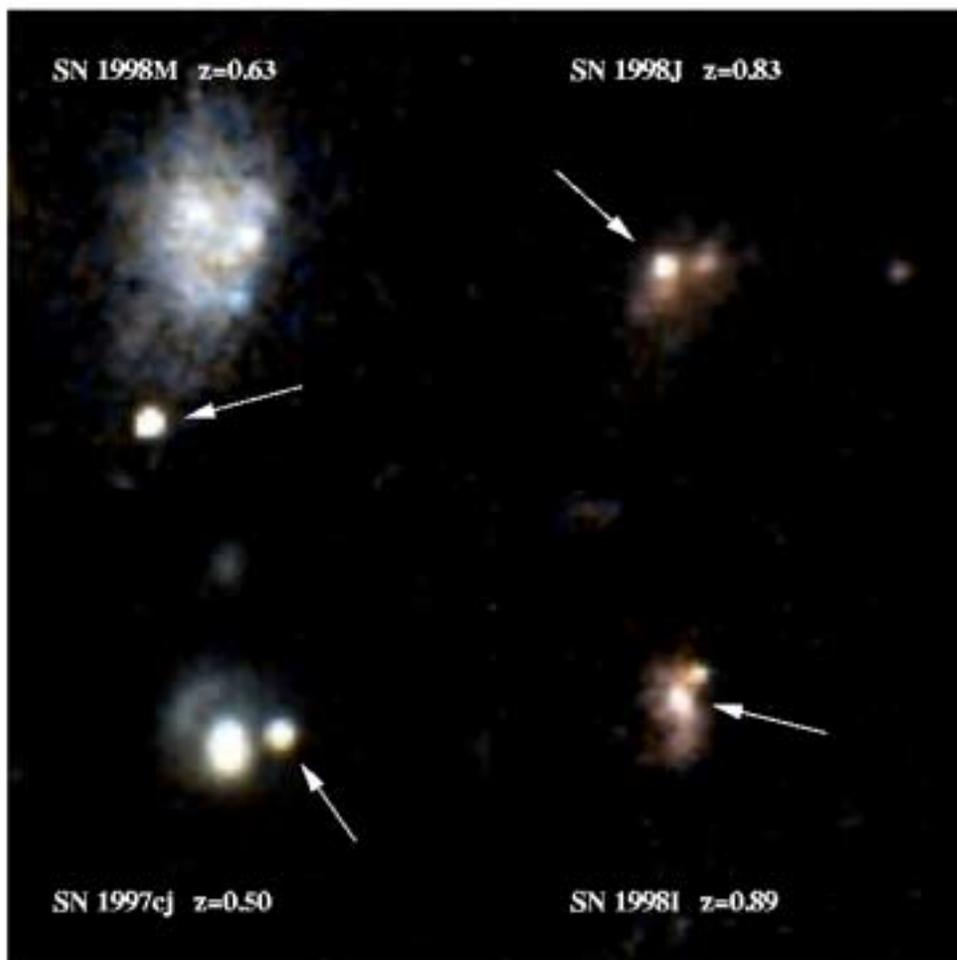


Figure 11: High-Z SN Search チームの検出した超新星の HST 画像例

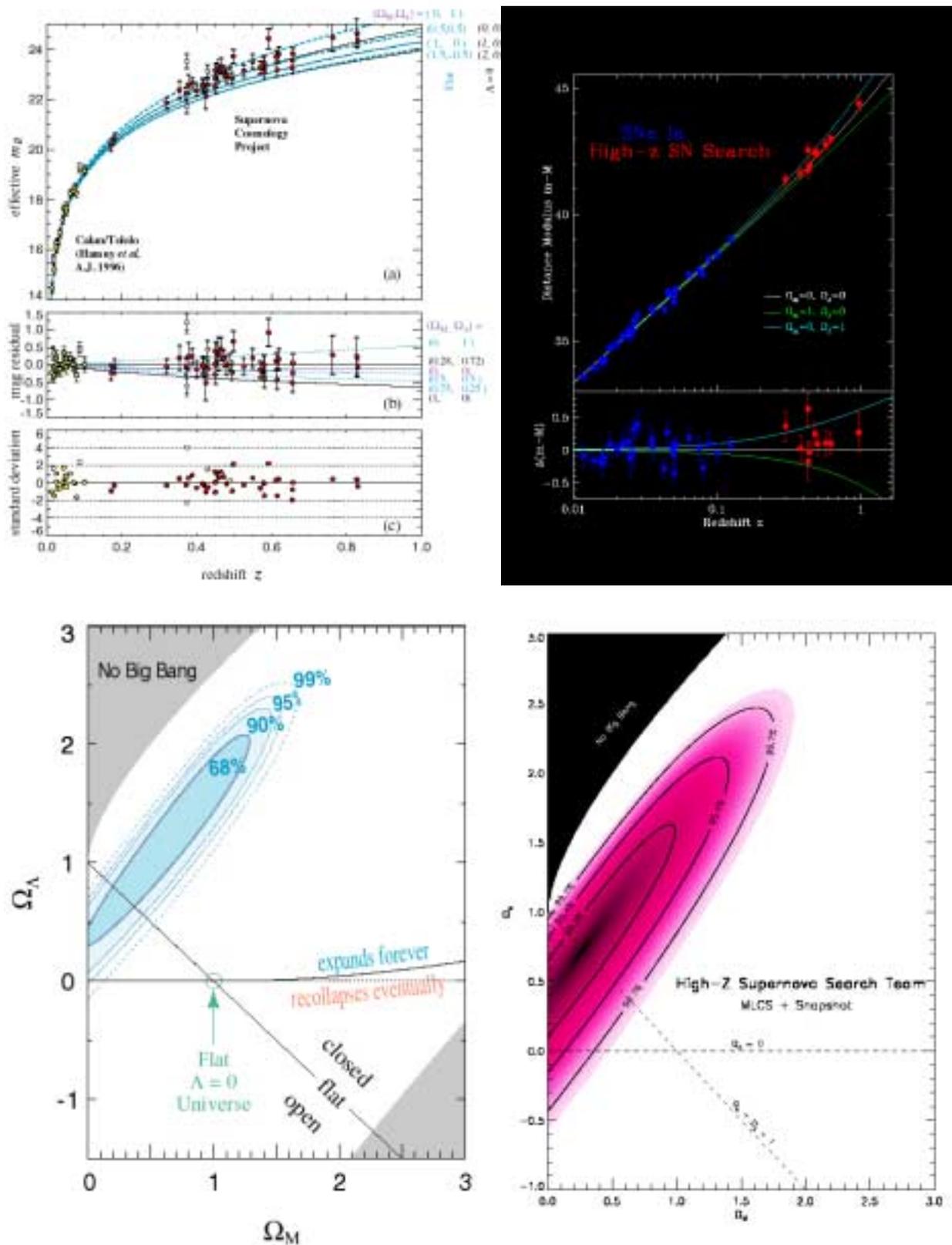
4.4.3 超新星サーベイによる宇宙定数 λ_0 の推定

Figure 12: Supernova Cosmology Project (左; Perlmutter et al. ApJ 517, 1999, 565) High-Z SN Search (右; Garnavich et al. ApJ 509, 1998, 74)

4.5 ダークマターマッピング：弱い重力レンズ

手前の銀河団や宇宙の大構造を通過する際に重力レンズ効果を受け、遠方銀河の像が系統的に歪んでしまう現象。これを利用した銀河団質量の決定はすでに数多くなされているが、先月4つのグループがほぼ同時に宇宙の大構造に起因する効果を初めて検出したと発表した。

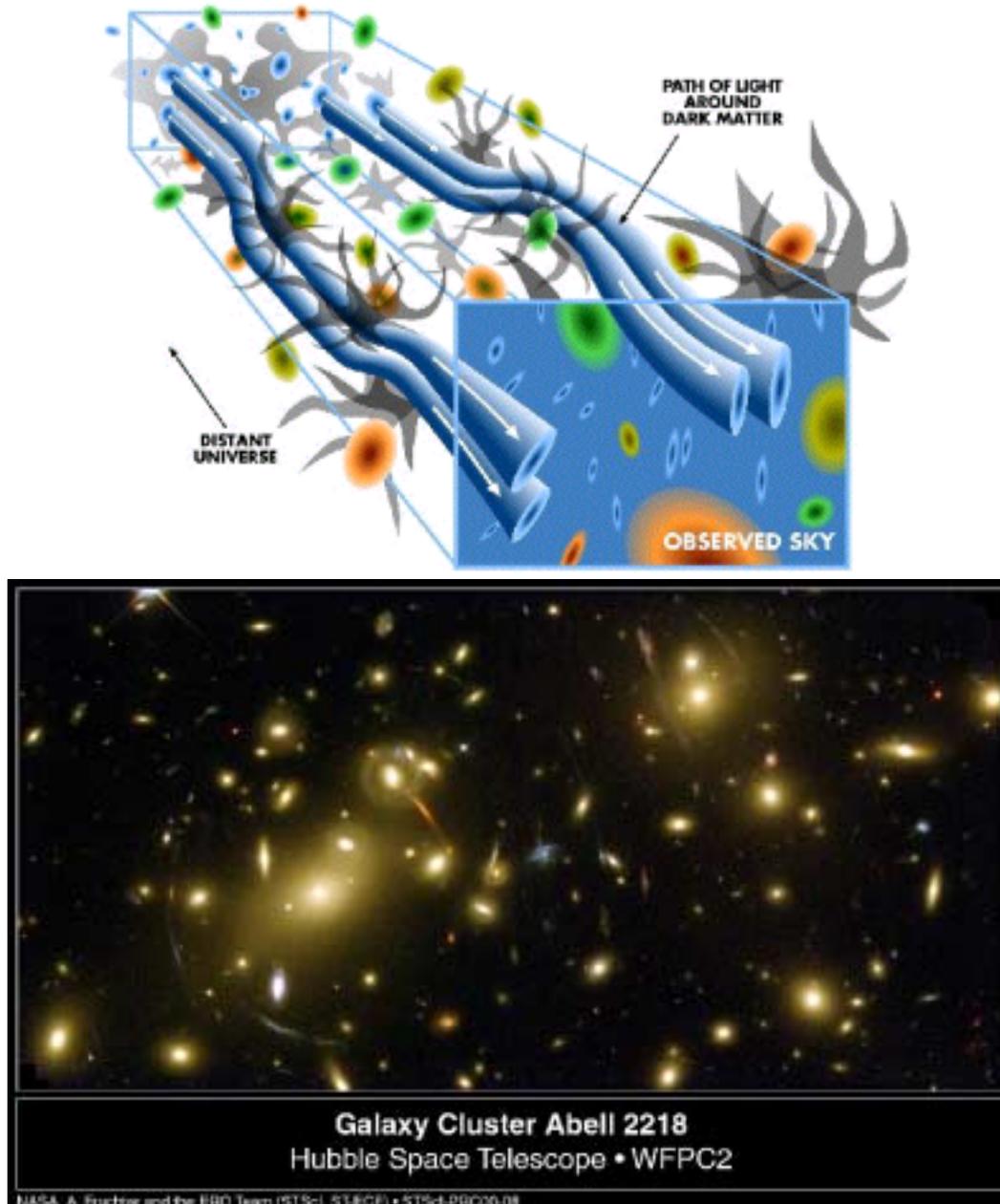


Figure 13: 上：弱い重力レンズの概念図 (Wittman et al. [astro-ph/0003014](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0003014))。下：HSTによる銀河団 A2218 のまわりの弱い重力レンズを受けた銀河の画像

宇宙の大構造に起因する弱い重力レンズの検出

this work: Kaiser, Wilson & Luppino (astro-ph/0003338)

WTK+: Wittman et al. (astro-ph/0003014)

vWME+: van Waerbeke et al. (astro-ph/0002500)

BRE: Bacon, Refregier, & Ellis (astro-ph/0003008)

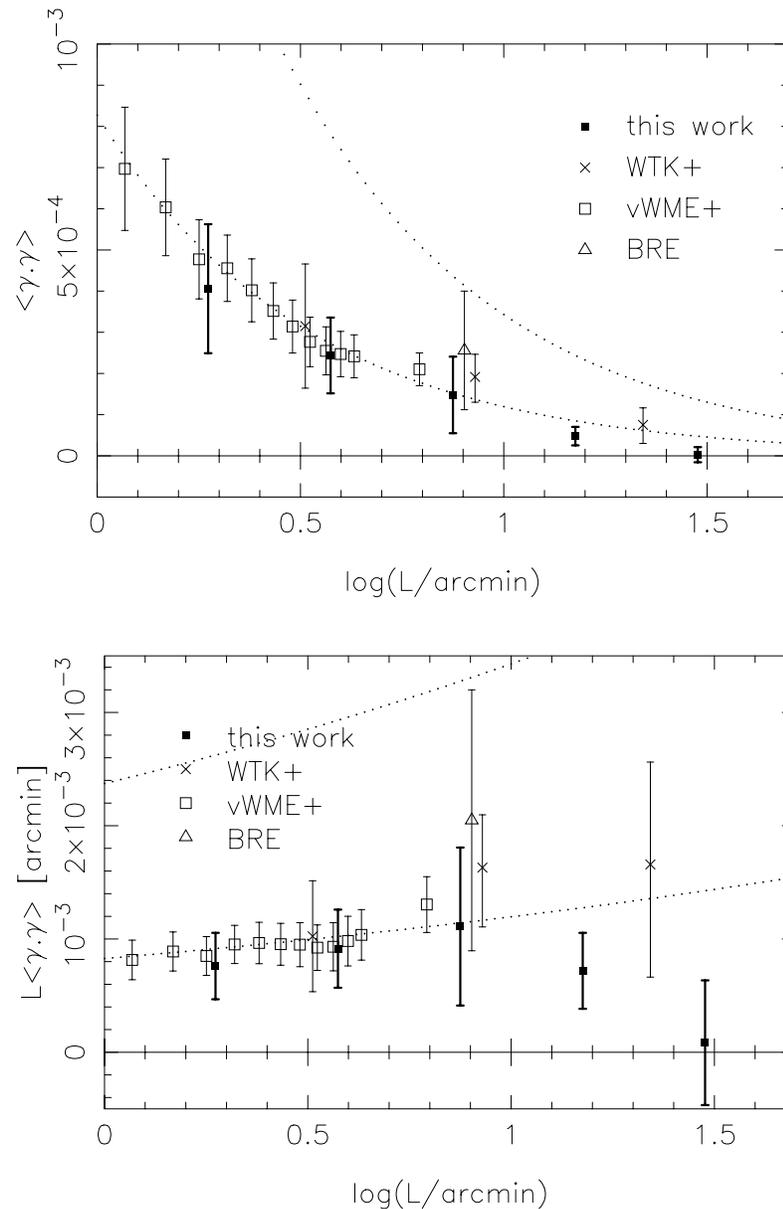


Figure 14: 4つのグループによって検出された弱い重力レンズの振幅 (cosmic shear) の比較。点線は、 $\Omega_0 = 0.3$, $\lambda_0 = 0.7$, $\Gamma = 0.25$ モデルで、銀河が $z = 2$ (上) と $z = 1$ (下) にあった場合の理論予言。

4.6 原始密度ゆらぎの再構成：CMB 温度地図

4.6.1 1992 年温度ゆらぎ発見：COBE 以前とその後

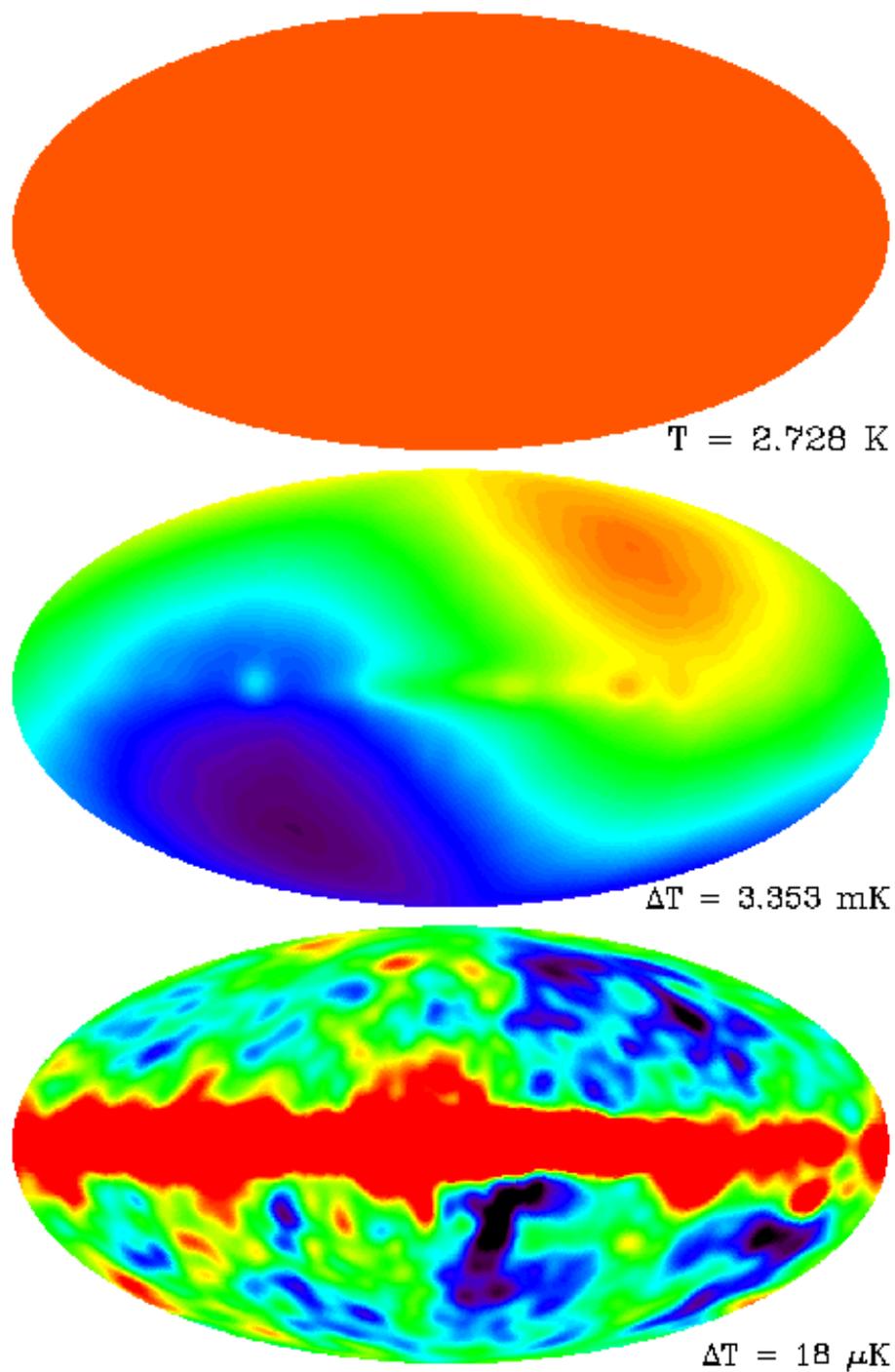


Figure 15: COBE によるマイクロ波輻射温度ゆらぎ全天地図

4.6.2 CMB 温度ゆらぎ研究の来し方行く末

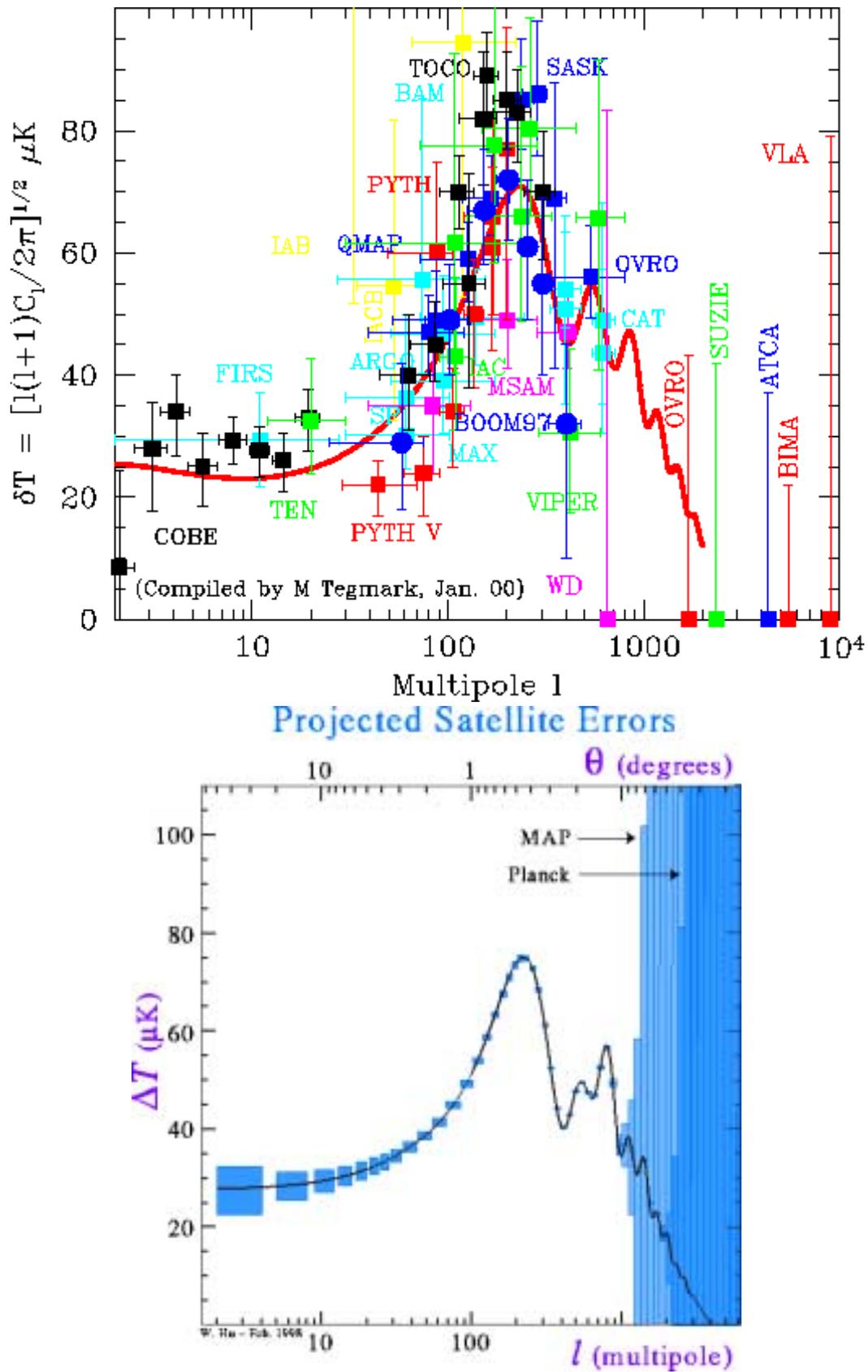


Figure 16: CMB 温度角度相関関数の来し方(上) 行く末(下)

4.6.3 宇宙の曲率 $\Omega_K \equiv \Omega_0 + \lambda_0 - 1$

CMB 温度ゆらぎの角度相関関数のピーク位置は、宇宙の曲率、 $\Omega_K \equiv \Omega_0 + \lambda_0 - 1$ に最も強く依存し、幾何学的テストに最適。

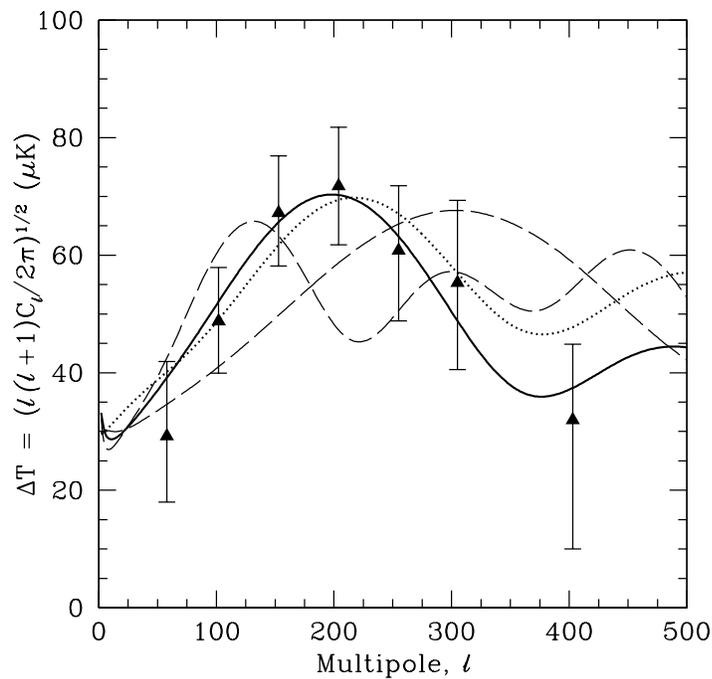


Figure 17: 伊米英の気球実験 (BOOMERANG) の NA(北米) テストフライト (1997 年 8 月 25 日 6 時間飛行) のデータ。 $\Omega_K \sim 0$ を示唆している。本飛行 (1998 年 12 月 29 日 ~ 1999 年 1 月 8 日) もすでに終了しており、259 時間のデータが取得済である。(Mauskopf et al. astro-ph/9911444)

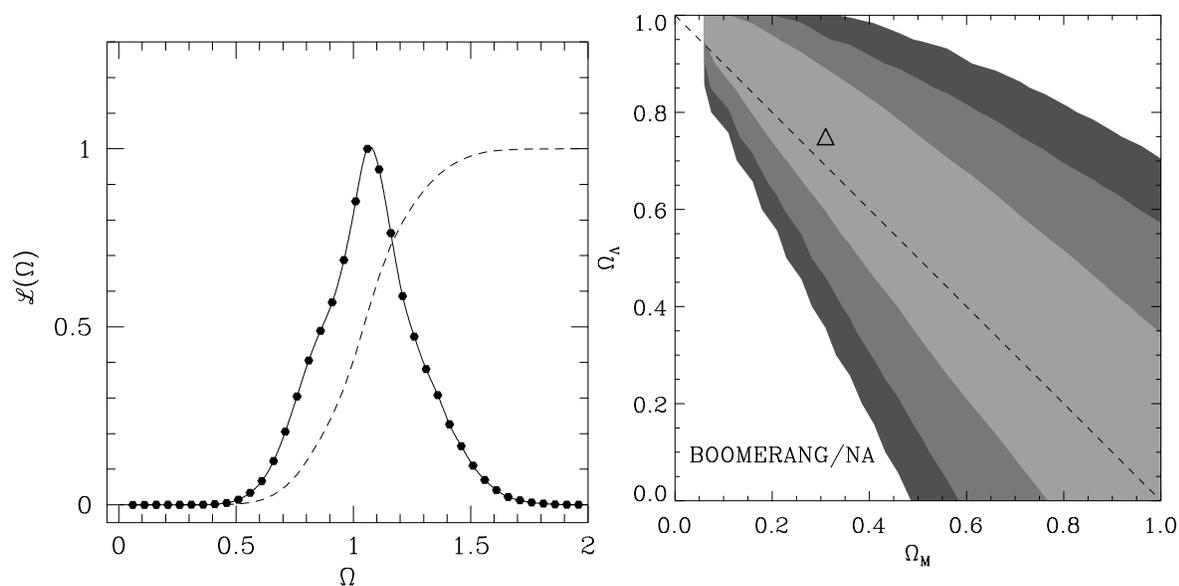


Figure 18: BOOMERANG/NA から得られた $\Omega \equiv \Omega_0 + \lambda_0$ の likelihood function(左)。及び likelihood contour (右)。ピーク値の 0.32, 0.05, 0.01 の等高線。三角がベストフィット。(Melchiorri et al. astro-ph/9911445)

5 行く末: 精密宇宙論 ???

TIME-
ORDERED
DATA

Pixel 1	Pixel 2	ΔT
6422347	6443428	-454.841
3141592	2718281	141.421
8454543	9345593	654.766
1004356	8345388	-305.567
...

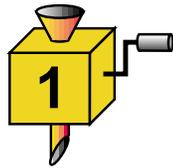
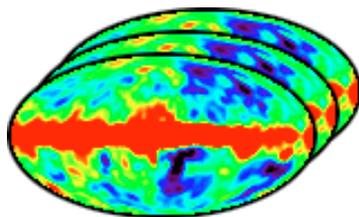
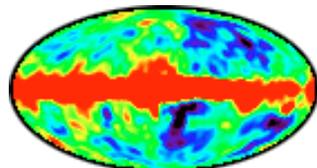
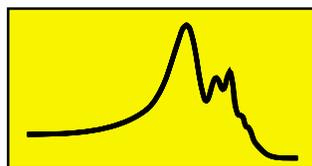
MULTI-
BAND
MAPSOTHER
TEMPLATESCMB
MAPPOWER
SPECTRUMPARAMETER
ESTIMATES
 $\Omega, \Omega_b, \Lambda, \tau, h$
 $n, n_T, Q, T/S$

Figure 19: **CMB 工場流れ作業工程** (Tegmark & Zaldarriaga, astro-ph/0002091)。膨大なデータベースは着実に完成する。精密化した理論モデルと組み合わせて、10 個程度の宇宙論パラメータに対して大規模なフィッティングを行うことでパラメータの値を数パーセント程度の精度で決定できるようになる。

2つのマイクロ波背景輻射観測衛星 MAP (Microwave Anisotropy Probe: 2000年11月7日打ち上げ予定) と PLANCK (2007年打ち上げ予定) のデータ解析から推定される宇宙論パラメータの誤差予想 (Tegmark et al. astro-ph/9905257)

観測衛星	パラメータ	Foregrounds		
		None	Known	Unknown
<i>MAP</i>	$\ln(\Omega_m h^2)$	0.080	1.208	1.66
	$\ln(\Omega_b h^2)$	0.051	1.201	2.01
	m_ν (eV) $\propto \Omega_\nu h^2$	0.57	1.078	2.06
	$n_S(k_{\text{fid}})$	0.041	1.264	2.63
	Ω_Λ	0.091	1.230	1.74
	τ	0.018	1.90	3.33
	T/S	0.16	1.309	1.86
<i>Planck</i>	$\ln(\Omega_m h^2)$	0.016	1.056	1.160
	$\ln(\Omega_b h^2)$	0.0094	1.028	1.165
	m_ν (eV) $\propto \Omega_\nu h^2$	0.24	1.032	1.075
	$n_S(k_{\text{fid}})$	0.0076	1.109	1.303
	Ω_Λ	0.022	1.051	1.151
	τ	0.0036	1.69	1.96
	T/S	0.0073	4.04	6.58

↓

1%以内の精度での宇宙論パラメータの決定

夢 ?? 悪夢 ??

6 まとめと展望

ハッブル定数: $h = 0.71 \pm 0.07$

HST キーププロジェクトが終了し、近傍宇宙からのハッブル定数の値はこれ以上決まらないであろう。今後は、距離尺度の原点を与えるセファイドの較正（特にLMCまでの距離）や、遠方宇宙の観測から直接ハッブル定数を決める（超新星、SZ効果）ことが重要となる。

密度ゆらぎの振幅: $\sigma_8 \approx 1 \pm 0.5$

天体の空間分布とダークマターの空間分布との違い(バイアス)を理解することが重要。弱い重力レンズ効果のサーベイが期待される。

質量密度パラメータ: $\Omega_0 = (0.1 \sim 0.4) \ll 1$

我々の宇宙が低密度(臨界密度以下)であることはほとんど確実。バリオン質量密度に対する制限と組み合わせると、バリオン以外のダークマターが存在すると考えることは自然。我々の銀河系ハローには、MACHOが直接観測されているが、全質量には2割程度の寄与しかない。**ダークマターの直接検出が今後の最重要課題。**

宇宙定数: $\lambda_0 > 0 (= 1 - \Omega_0 \sim 0.7)$?

超新星データの解釈は別としても、宇宙論的には宇宙定数があるほうが好ましいのは事実。今後の観測的進展は最も期待できる。

Expanding the expanding universe

0-th order	一様等方宇宙モデル (宇宙論パラメータ, Ω_0 , λ_0 , h の理解)
1st order	密度揺らぎの線形摂動論 (宇宙の大構造、マイクロ波背景放射)
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、惑星の形成と進化 (光り輝く銀河宇宙の誕生)
	...
M-th order	生命の起源・進化 (宇宙論的生物発生学)
	...
N-th order	知的生命体への進化、文化・文明・宗教 (宇宙論的生物進化学)
	...
∞	宇宙の終焉

良し悪しは別として、天文学研究の一つの潮流が“宇宙論化”であることは否定できない。実際この方向で今後10年から20年程度、新しい観測プロジェクトが目白押しで、我々が現在想像できないような新発見の洪水が確約されているといっても良い。その成果が予想できるという意味で、いまやlow-risk low-return となった宇宙論にとどまらず、信頼性は低いながらも新たな展開を生み出しうるようなserendipityに迅速に対応し、新しい学問分野の開拓へ結び付けていくことが本質的である。