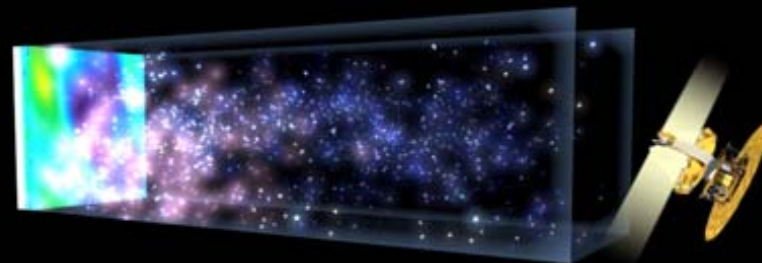


# WMAPと21世紀の宇宙論

2001年6月30日15:46:46 EDT 打ち上げ

NASA/WMAP  
Science Team



東京大学物理学教室 須藤 靖

中央大学理工学部物理学科素粒子論研究室セミナー

2003年4月15日

[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2003j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2003j.html)

# 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 (量子重力理論)
  - 宇宙の質量 (ダークマター、宇宙定数)
  - 宇宙の年齢 (距離尺度、ハッブル定数)
  - 宇宙の果て (宇宙は有限か、無限か)
  - 宇宙の未来

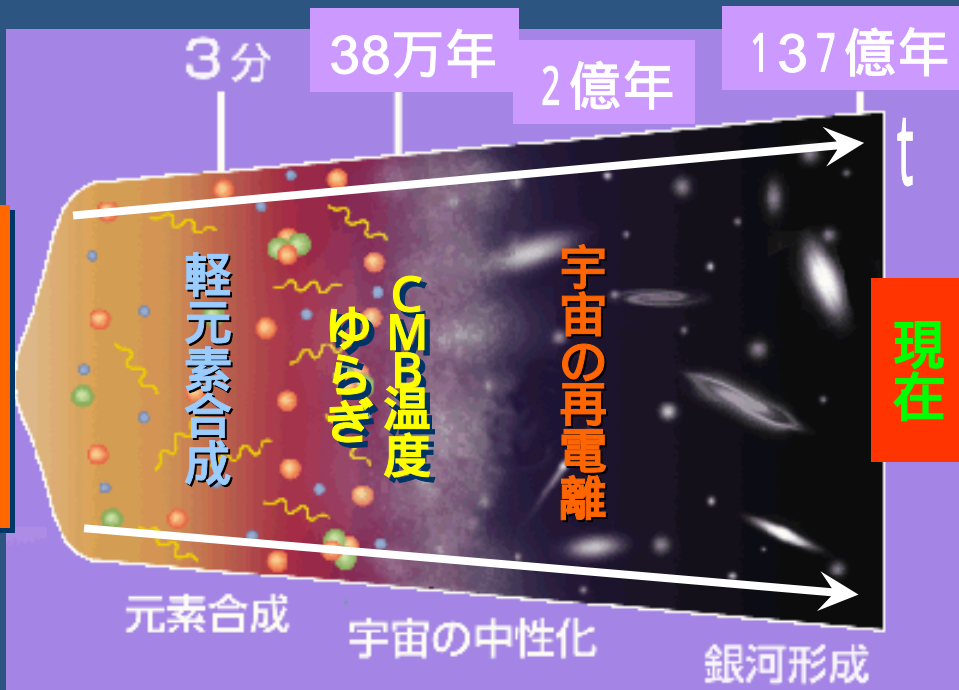
このような問題意識はもちろん古くから存在したが、観測データに基づく定量的検証が可能になったのは、わずかここ数年のことである。

# 20世紀宇宙論研究の歴史

- 1916年～ 一般相対論的宇宙モデル
- 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

**精密宇宙論(precision cosmology)の時代へ**

# A brief history of the universe



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

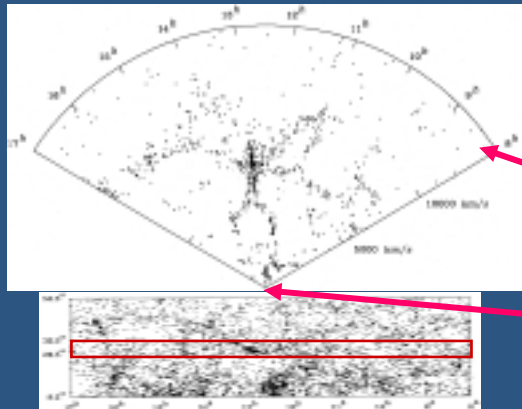
- $t \sim 10^{-40}$ 秒: インフレーション・量子ゆらぎの生成
- $t \sim 3$ 分: 軽元素(ヘリウム、重水素、リチウム)合成
- $t \sim 38$ 万年 ( $z=1089$ ): 宇宙の中性化・宇宙の晴れ上がり・CMB最終散乱面
- $t \sim 2$ 億年 ( $z=20$ ): 宇宙の再電離開始 第一世代天体の誕生?
- $t \sim 8$ 億年 ( $z=6$ ): 宇宙の再電離ほぼ終了(クエーサー吸収線系の観測より)
- $t = 8$ 億年 ( $z=6$ ) ~ 137億年 ( $z=0$ ): 銀河形成、銀河団形成、宇宙の大構造
- $t \sim 70$ 億年 ( $z=0.7$ ): 宇宙が減速膨張から加速膨張へ転ずる(宇宙定数が支配する)
- $t \sim 137$ 億年 ( $z=0$ ): 現在

# 20世紀宇宙論研究の到達点

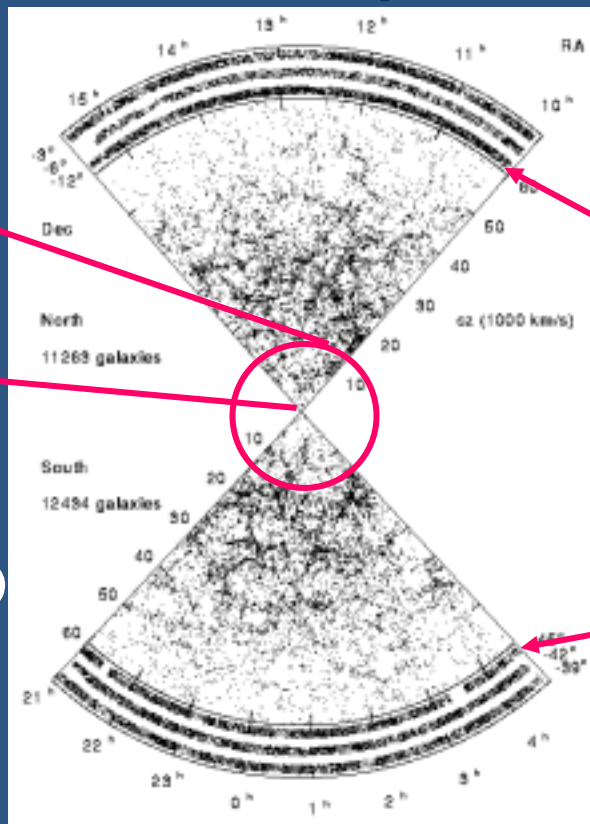
- **マイクロ波背景輻射の温度ゆらぎ発見** (1992年COBE)
- **銀河系内MACHOの検出** (1993年 MACHOグループ)
- **10%精度でのハッブル定数の決定**  
(1999年 Hubble Space Telescope key project)
- **宇宙定数(暗黒エネルギー)が存在する可能性**  
(1999年 Ia型超新星)
- **非バリオン暗黒物質の存在が決定的**  
(冷たい暗黒物質モデルパラダイムの確立)
- **素粒子論的宇宙論による初期条件**  
(インフレーション、密度揺らぎのスペクトル)

# 赤方偏移サーベイと宇宙の大構造

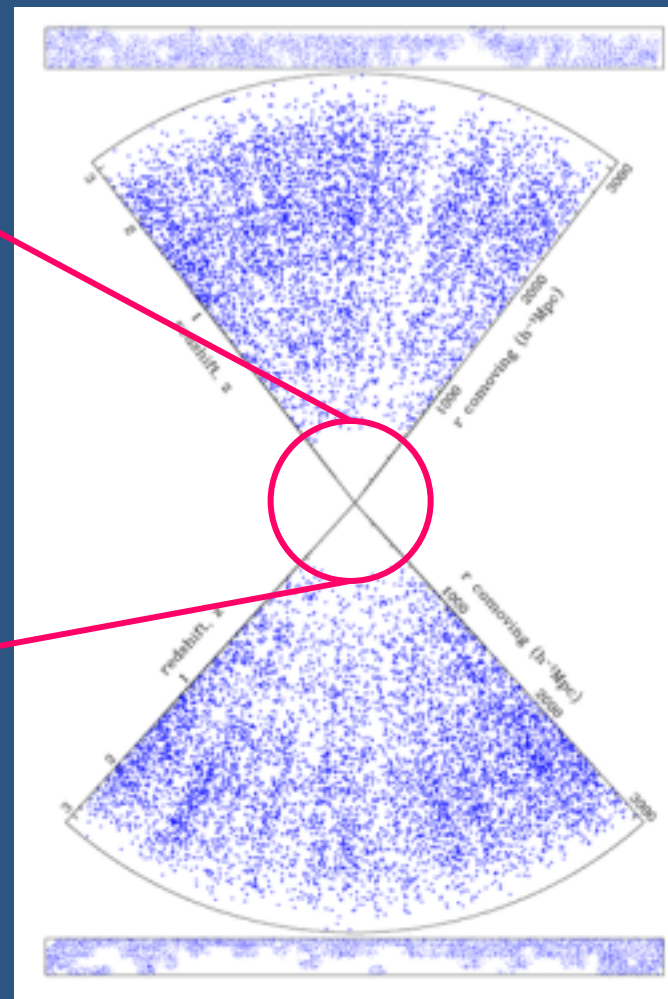
1986年



1996年



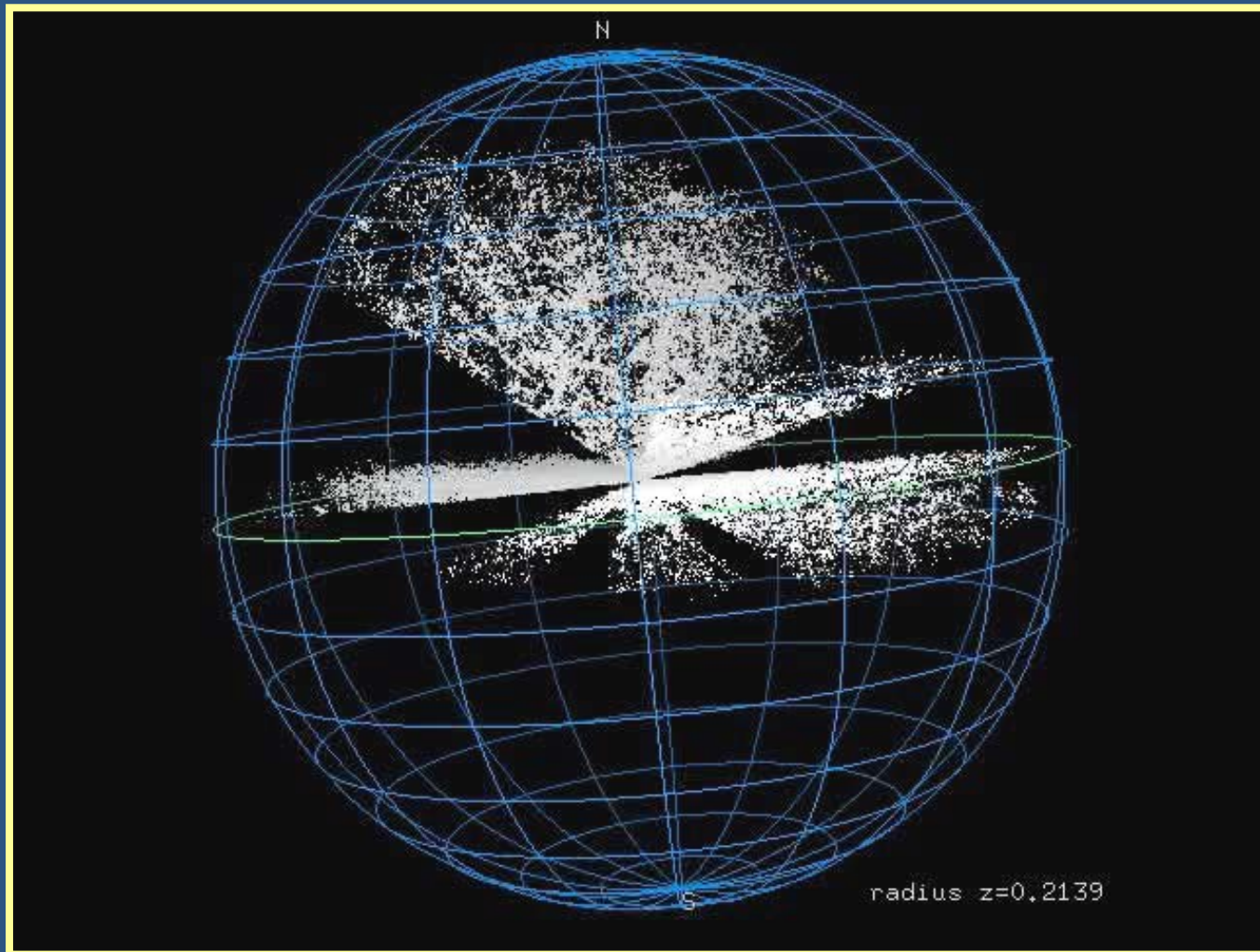
2000年



- CfA galaxy survey (de Lapparent et al. 1986)
- Las Campanas survey (Schectman et al. 1996)
- 2dF QSO survey (Shanks et al. 2000)

宇宙の大構造の発見にとどまらず、その形成進化を時系列として宇宙の果てまで見通せる時代

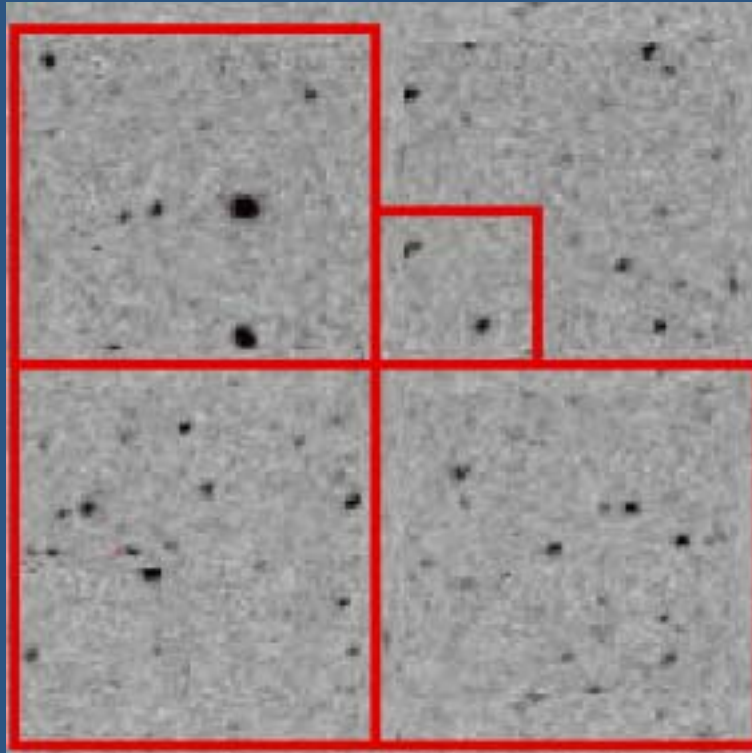
# Galaxy distribution in the SDSS Sample 10 (2002)



三橋賢司(東京大学)による可視化

# 深宇宙: Hubble Deep Field

<http://osite.stsci.edu/pubinfo/PR/96/01.html>



地上4m望遠鏡 + CCD:  
100 × 写真乾板

WMAPと21世紀の宇宙論

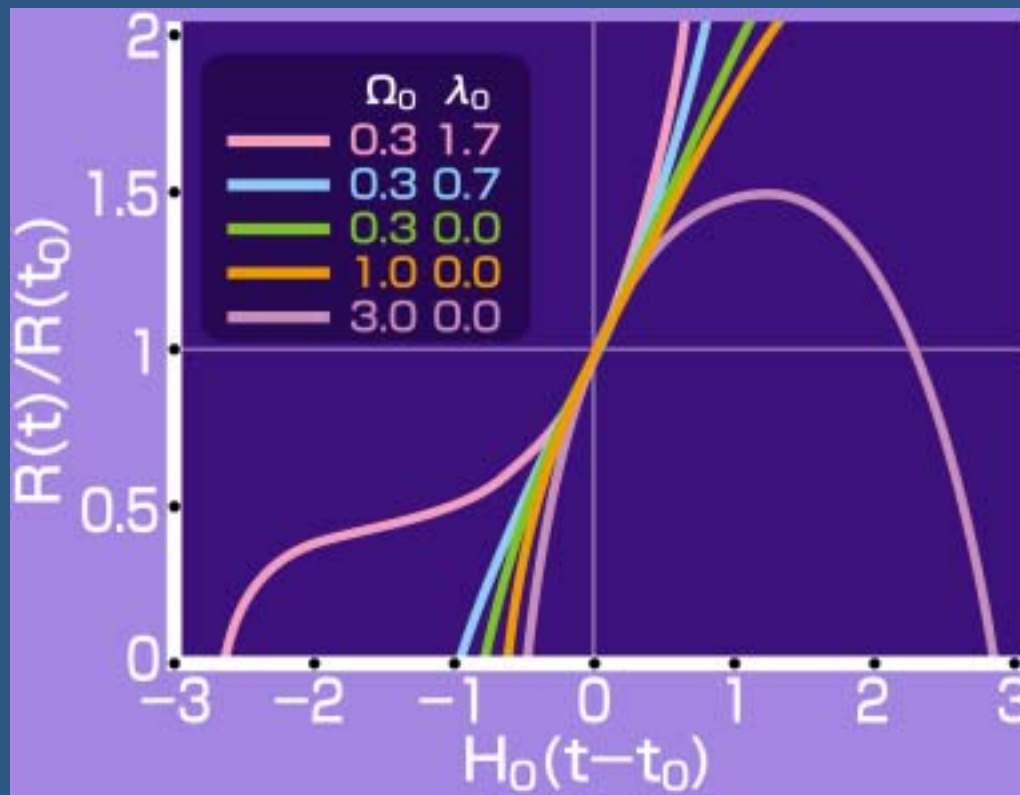


HST望遠鏡 + CCD:  
1000 × 地上望遠鏡



# 宇宙膨張と宇宙論パラメータ

- 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

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

宇宙定数

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

臨界密度 :

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

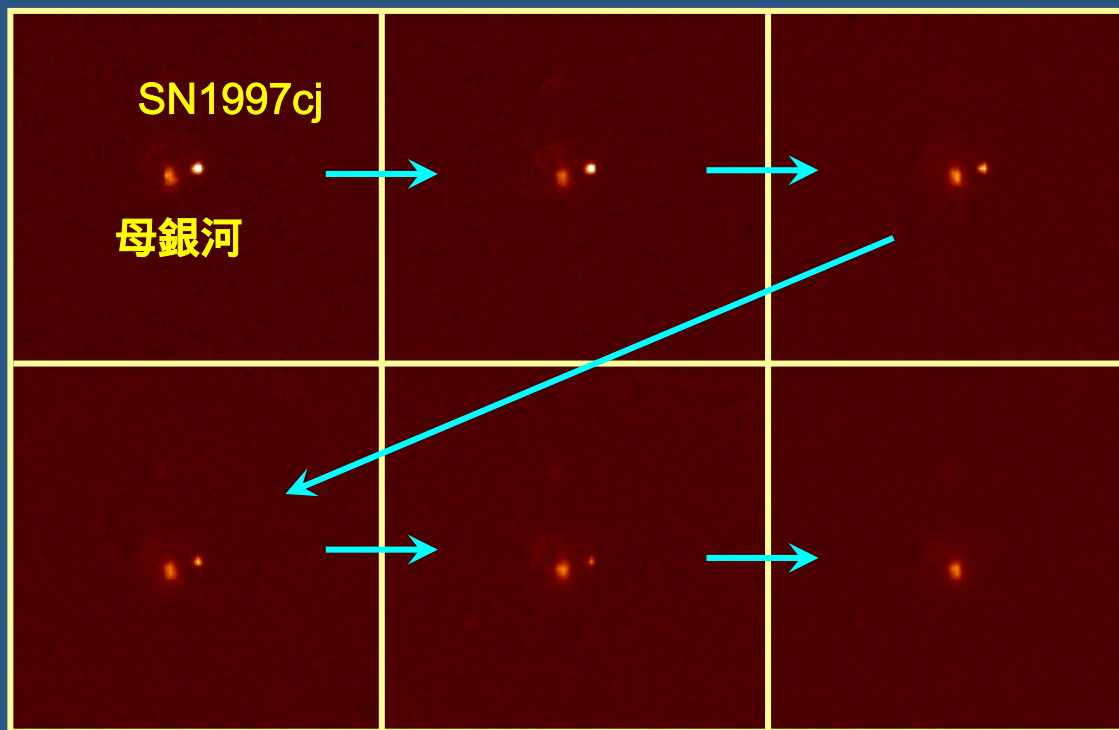
$$\Omega_m \approx 0.3, \Omega_\Lambda \approx 0.7$$

# 主な宇宙論パラメータ

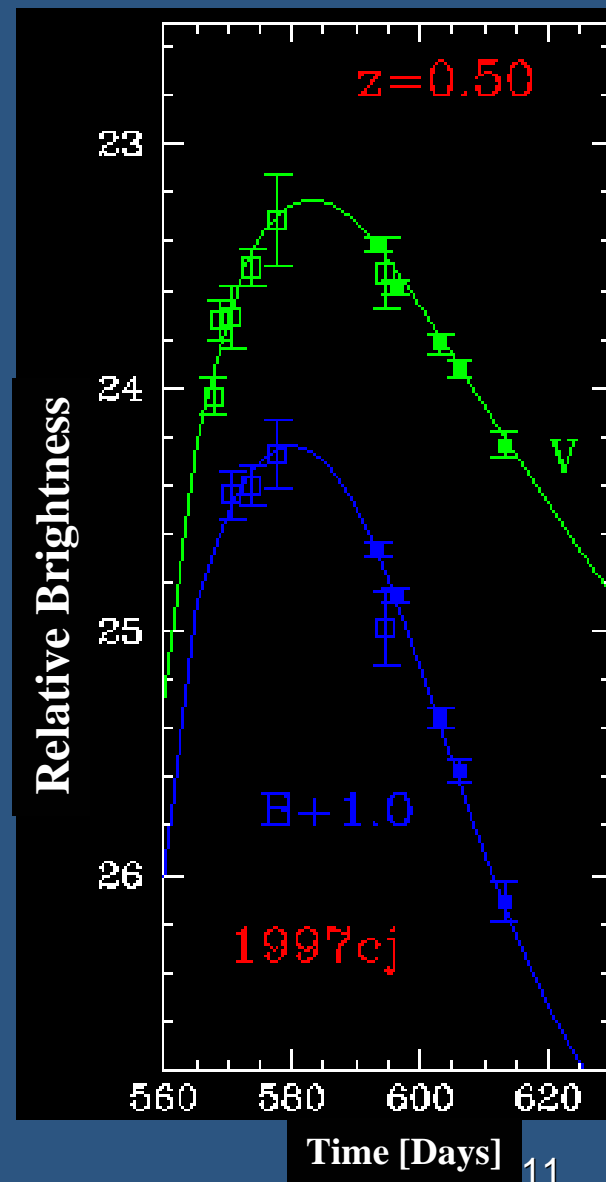
記号	名前	物理的意味
$h$	ハッブル定数	宇宙の運動エネルギー、膨張率
$\Omega_b$	バリオン密度パラメータ	宇宙のバリオン量
$\Omega_m$	質量密度パラメータ	宇宙の重力エネルギー、暗黒物質
$\Omega$	宇宙定数	真空のエネルギー密度
$\Omega_K$	宇宙の曲率	$= \Omega_m + \Omega - 1$ (Einstein方程式 あるいはエネルギー保存に対応)
$w$	宇宙の状態方程式 (圧力/エネルギー密度)	$p=w$ ( $w=0$ :非相対論的物質、 $w=1/3$ : 輻射、 $w=-1$ :宇宙定数)
$t_0$	宇宙年齢	ビッグバン以後の宇宙の経過時間

# Ia型超新星の光度曲線の測定

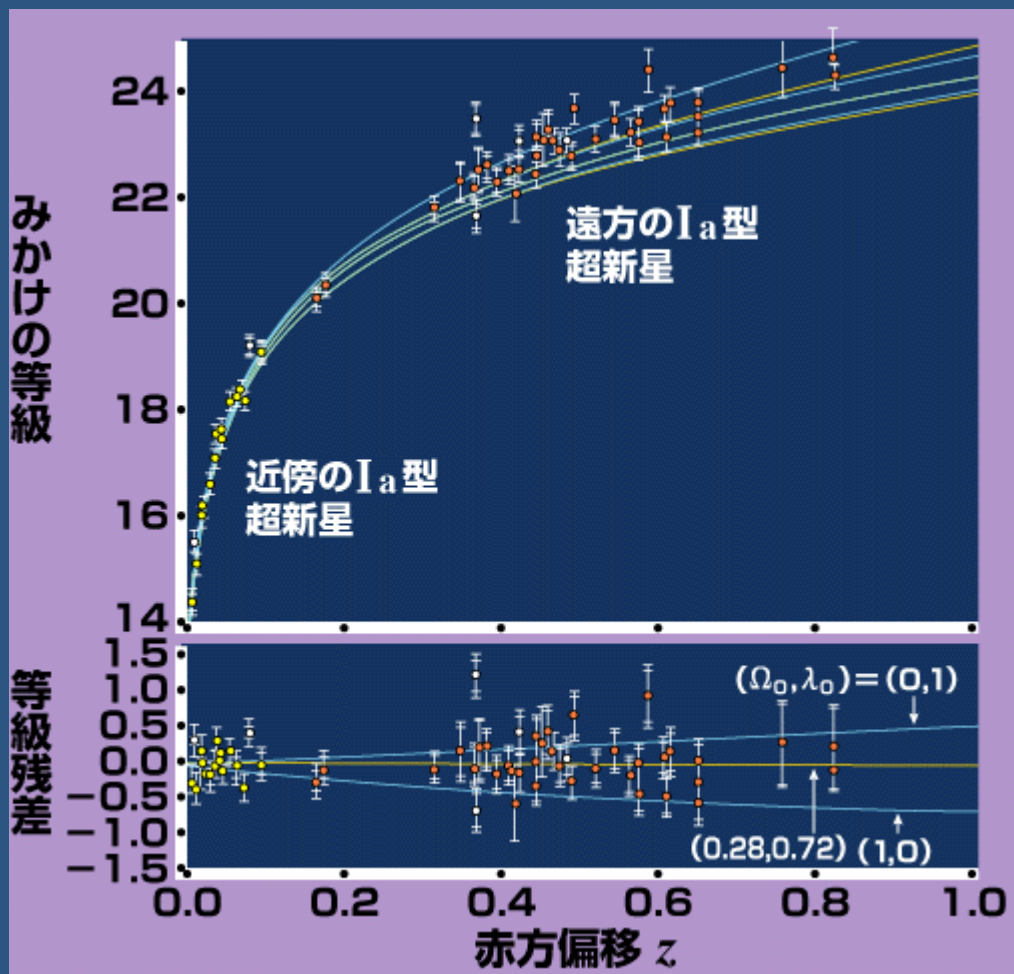
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



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



- 遠方超新星の光度曲線の観測から、それぞれの絶対光度を推定
- 見かけの等級と赤方偏移の関係から(光度)距離を推定し、それらを説明するパラメータを推定

$$\Omega_m = 1,$$

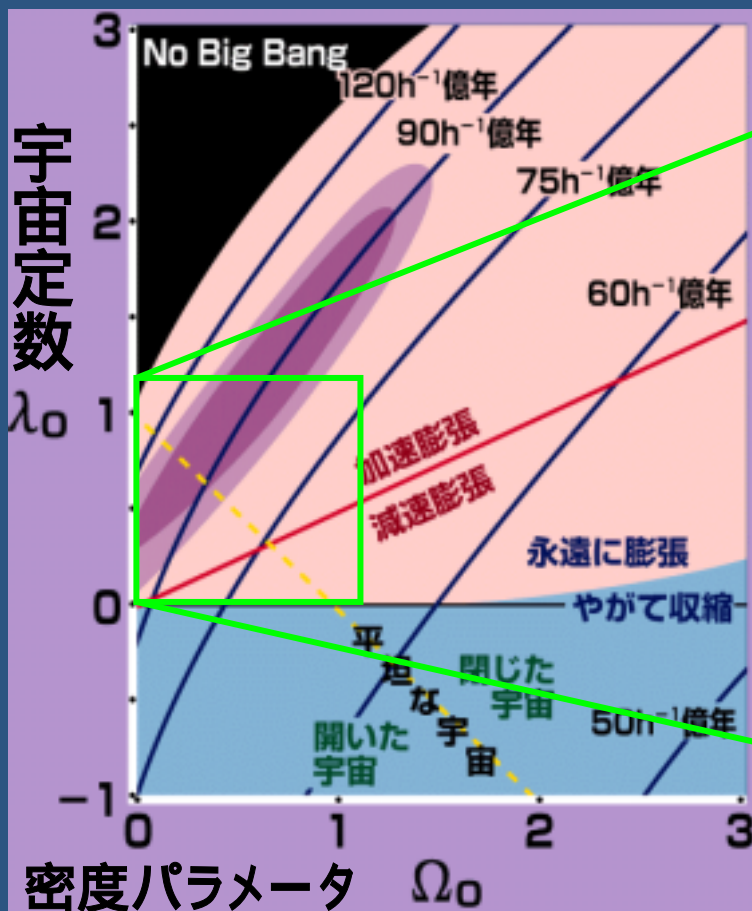
$$\Omega_\Lambda > 0$$

宇宙定数の存在！

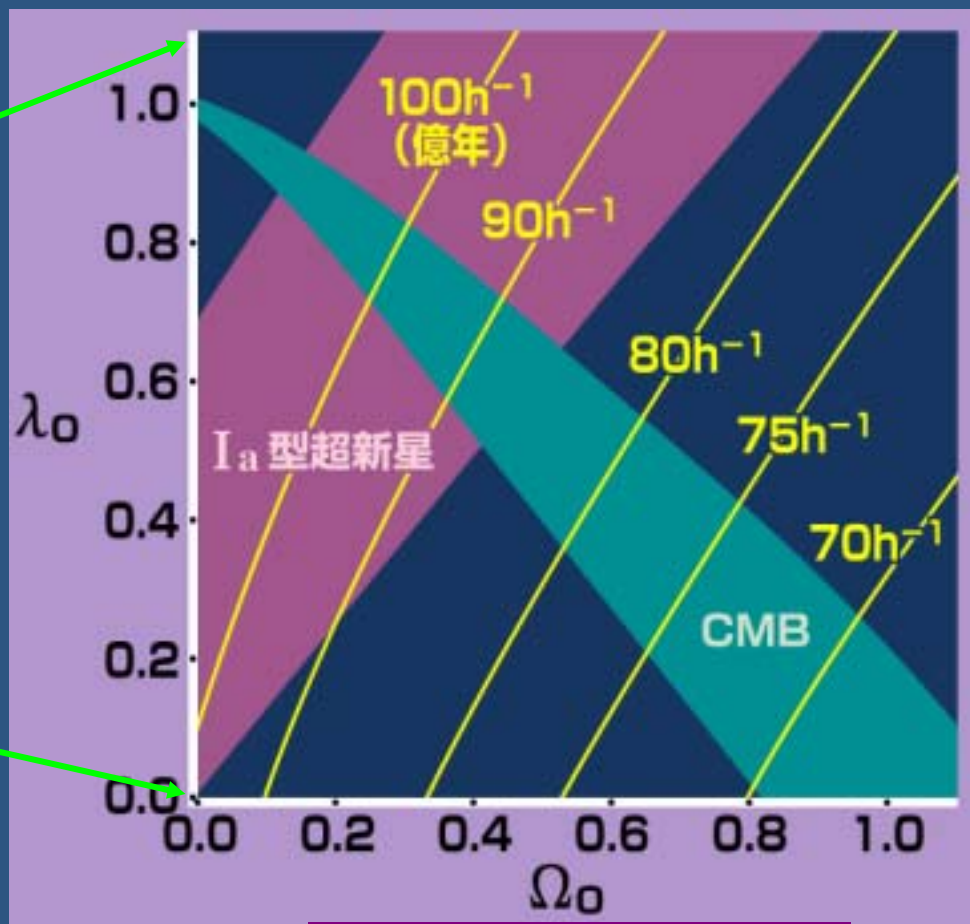
Perlmutter et al. :  
*The Astrophysical Journal*  
517(1999)565

# 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 ( $k_0=0$ ) ?



超新星観測からの制限

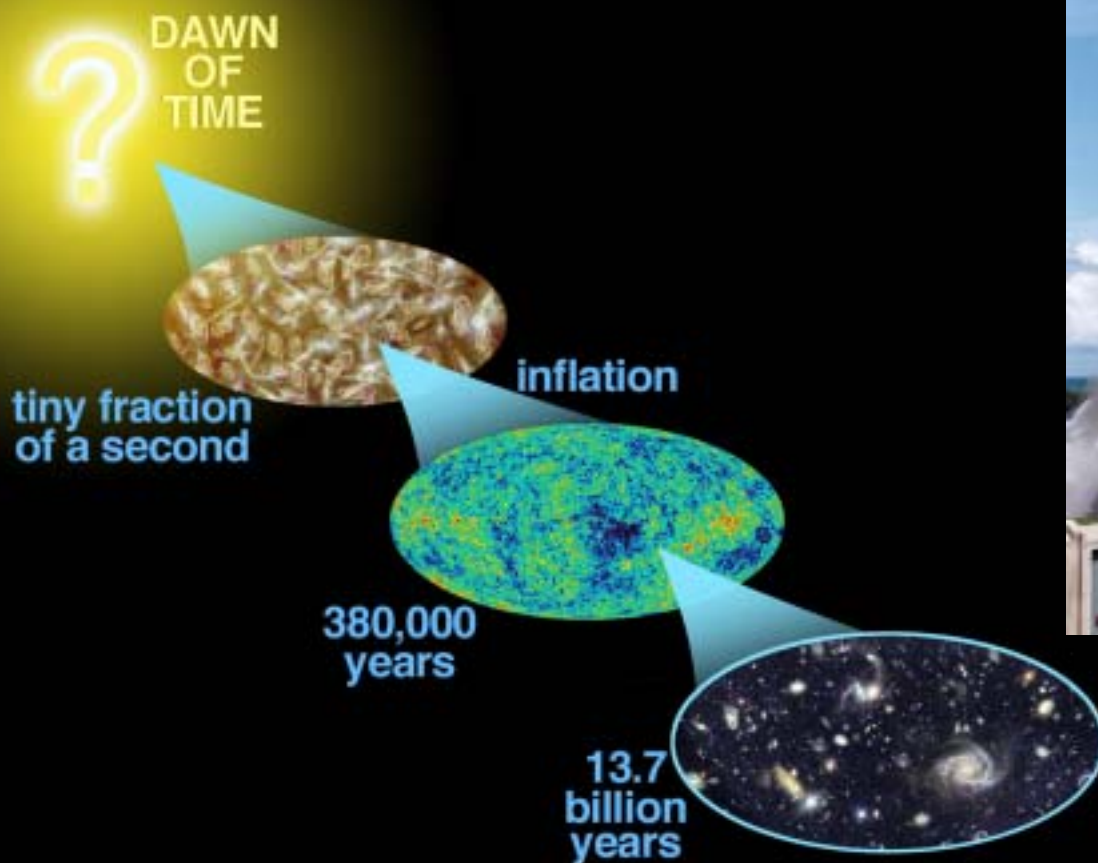


CMB 観測からの制限

# WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

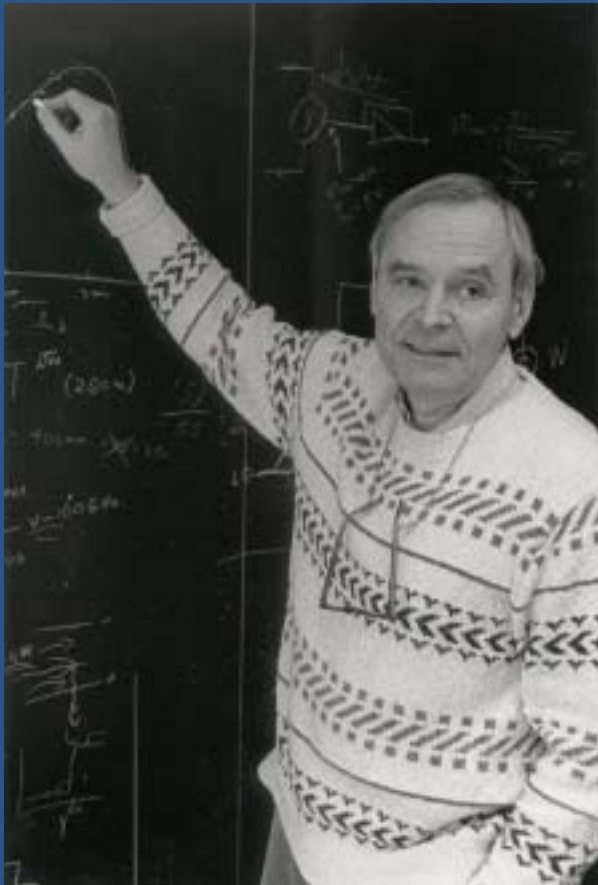
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

2001年6月30日  
15:46:46 EDT 打ち上げ



**NASA/WMAP  
Science Team**

# David Wilkinson (1935 ~ 2002)



(W)MAP Science Team Meeting  
Princeton, 2002年7月  
(小松英一郎氏提供)

# CMB: Cosmic Microwave Background

- 1940年代後半、ガモフとその学生達が元素の起源の研究から、理論的に存在を予言
- 1960年前半からプリンストン大学のディッキーを中心とするグループが検出実験を計画
- 1964年に、ベル研究所のペンジアスとウィルソンが発見



## A MEASUREMENT OF EXCESS ANTENNA TEMPERATURE AT 4080 Mc/s

free from seasonal variations (July, 1964–April, 1965). A possible explanation for the observed excess noise temperature is the one given by Dicke, Peebles, Roll, and Wilkinson (1965) in a companion letter in this issue.

A. A. PENZIAS  
R. W. WILSON

May 13, 1965

BELL TELEPHONE LABORATORIES, INC  
CRAWFORD HILL, HOLMDEL, NEW JERSEY

*The Astrophysical Journal* 142(1965)419



# Dicke, Peebles, Roll & Wilkinson *The Astrophysical Journal* 142(1965)414

## COSMIC BLACK-BODY RADIATION\*

One of the basic problems of cosmology is the singularity characteristic of the familiar cosmological solutions of Einstein's field equations. Also puzzling is the presence of matter in excess over antimatter in the universe, for baryons and leptons are thought to be conserved. Thus, in the framework of conventional theory we cannot understand the origin of matter or of the universe. We can distinguish three main attempts to deal with these problems.

We deeply appreciate the helpfulness of Drs. Penzias and Wilson of the Bell Telephone Laboratories, Crawford Hill, Holmdel, New Jersey, in discussing with us the result of their measurements and in showing us their receiving system. We are also grateful for several helpful suggestions of Professor J. A. Wheeler.

R. H. DICKE  
P. J. E. PEEBLES  
P. G. ROLL  
D. T. WILKINSON

May 7, 1965

PALMER PHYSICAL LABORATORY  
PRINCETON, NEW JERSEY

*The Astrophysical Journal* 142(1965)414

### REFERENCES

- Alpher, R. A., Bethe, H. A., and Gamow, G. 1948, *Phys. Rev.*, **73**, 803  
Alpher, R. A., Follin, J. W., and Herman, R. C. 1953, *Phys. Rev.*, **92**, 1347.

# 論文 (Phys.Rev. 73, 1948, 803)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 7

APRIL 1, 1948

## Letters to the Editor

**P**UBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

### The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER\*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,  
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

*Cornell University, Ithaca, New York*

AND

G. GAMOW

*The George Washington University, Washington, D. C.*

February 18, 1948

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,<sup>2</sup> the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

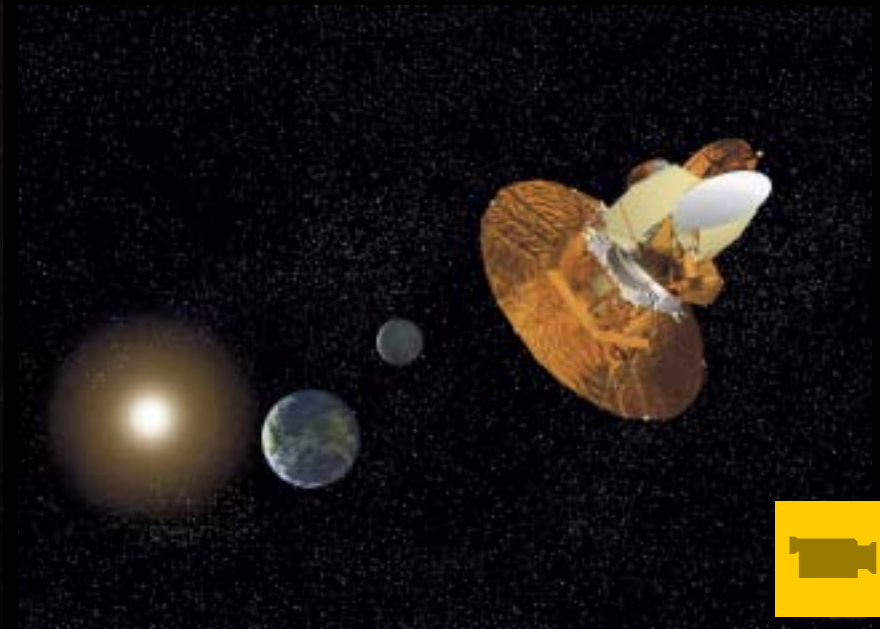
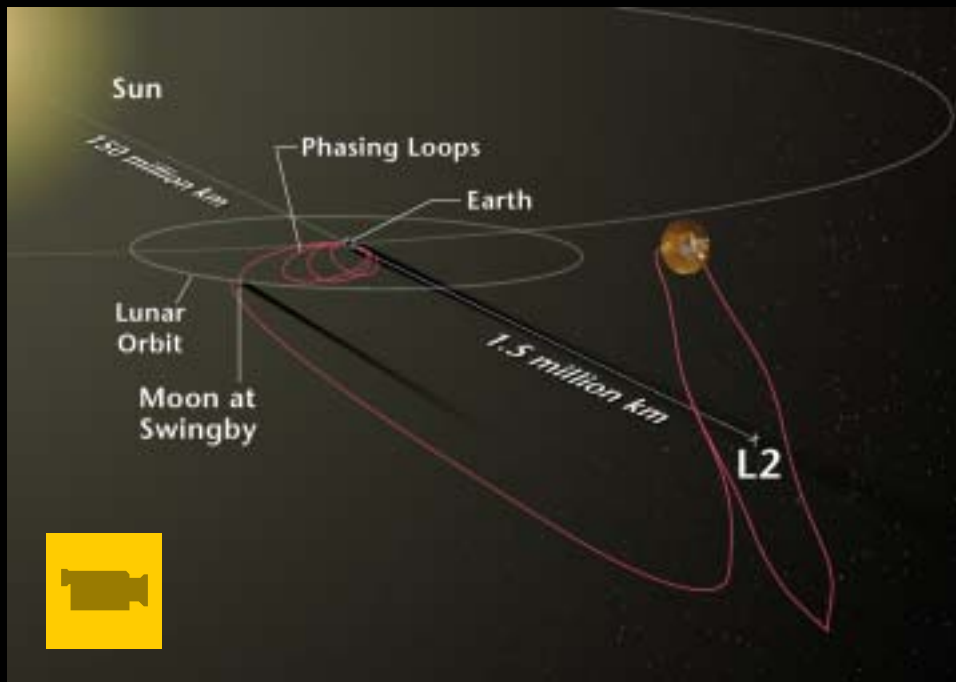
Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances<sup>3</sup> it is necessary to assume the integral of  $\rho_0 dt$  during the building-up period is equal to  $5 \times 10^4$  g sec./cm<sup>3</sup>.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe<sup>4</sup> the density dependence on time is given by  $\rho \approx 10^6/t^3$ . Since the integral of this expression diverges at  $t=0$ , it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time  $t_0$ , satisfying the relation:

# (W)MAPの打ち上げ: 2001年6月30日15:46:46 EDT



# (W)MAP launched !



# CMB 温度ゆらぎ地図の変遷

1965



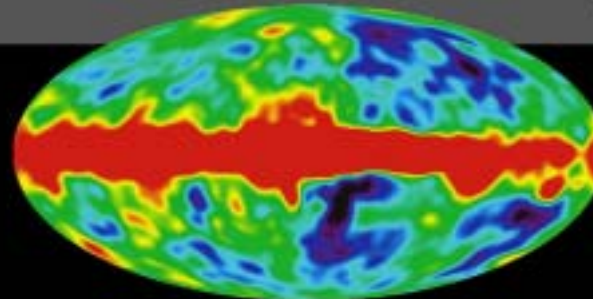
Penzias and  
Wilson



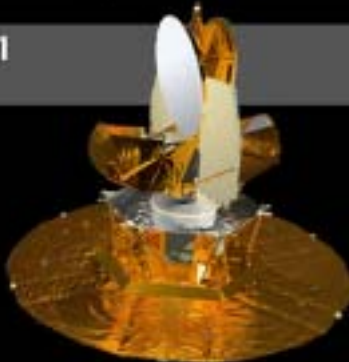
1992



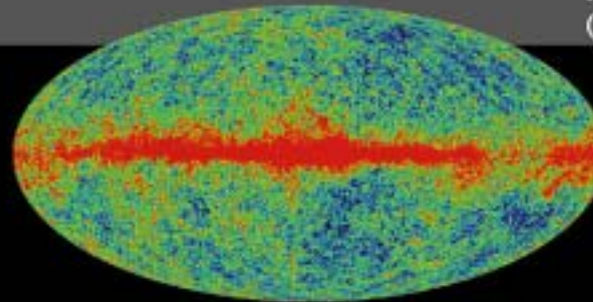
COBE



2001

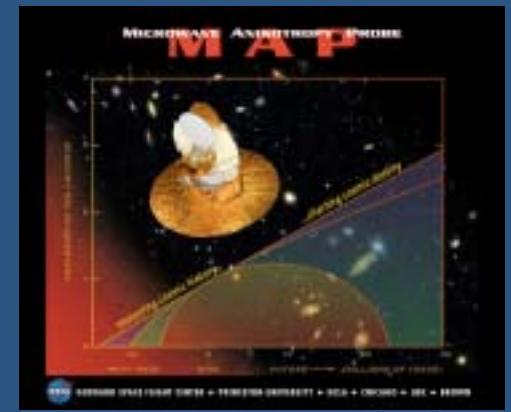
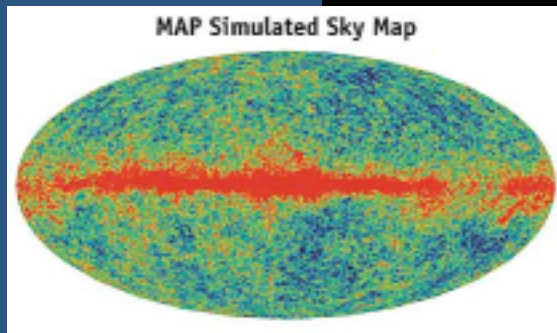
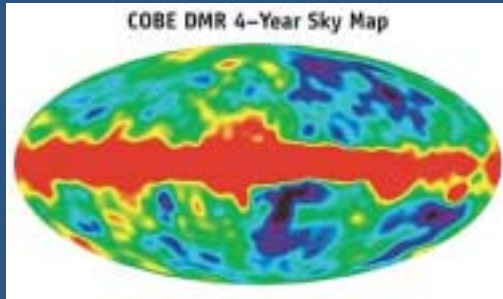


MAP  
(Simulated)



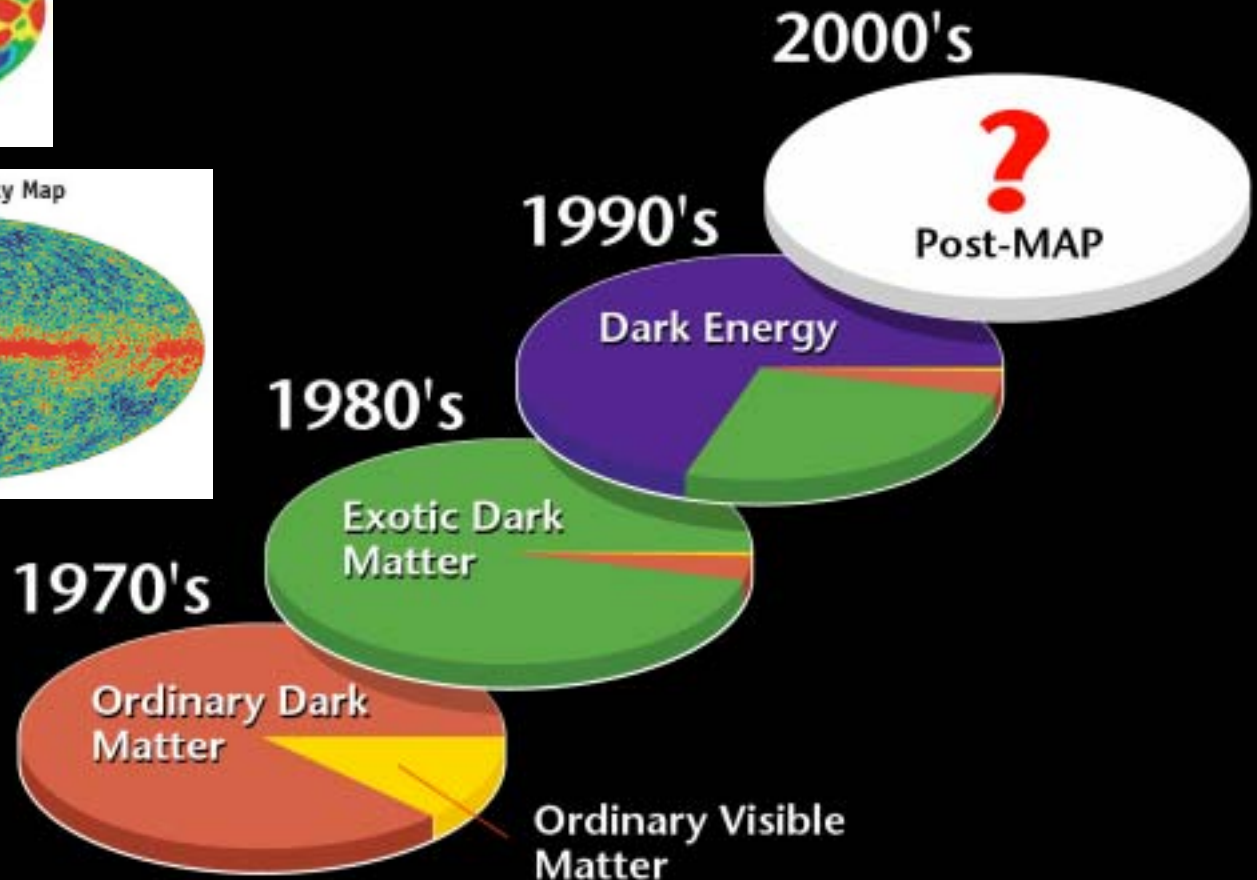
NASA/WMAP Science Team

# (W)MAP Science Goals

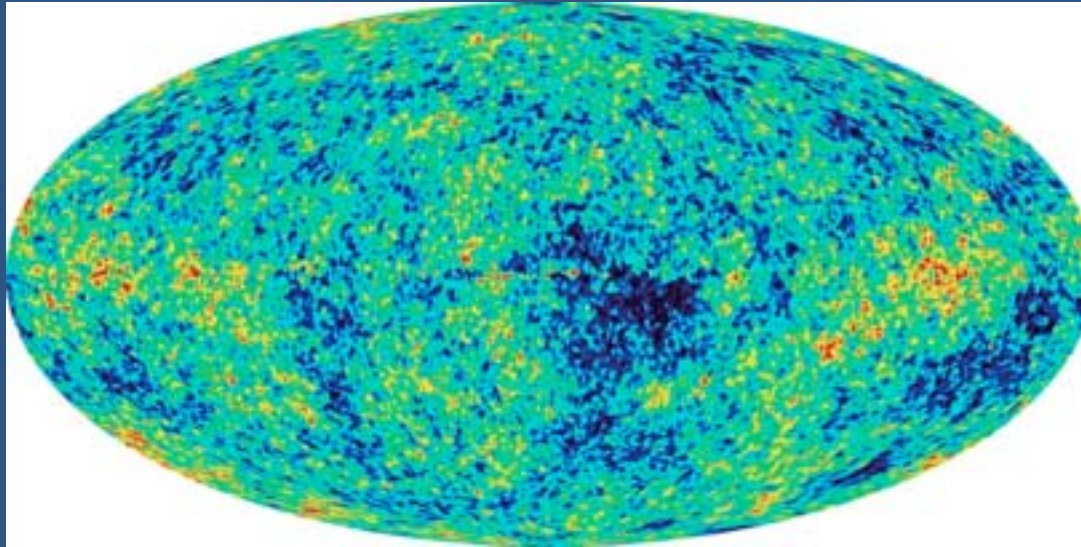


NASA/WMAP  
Science Team

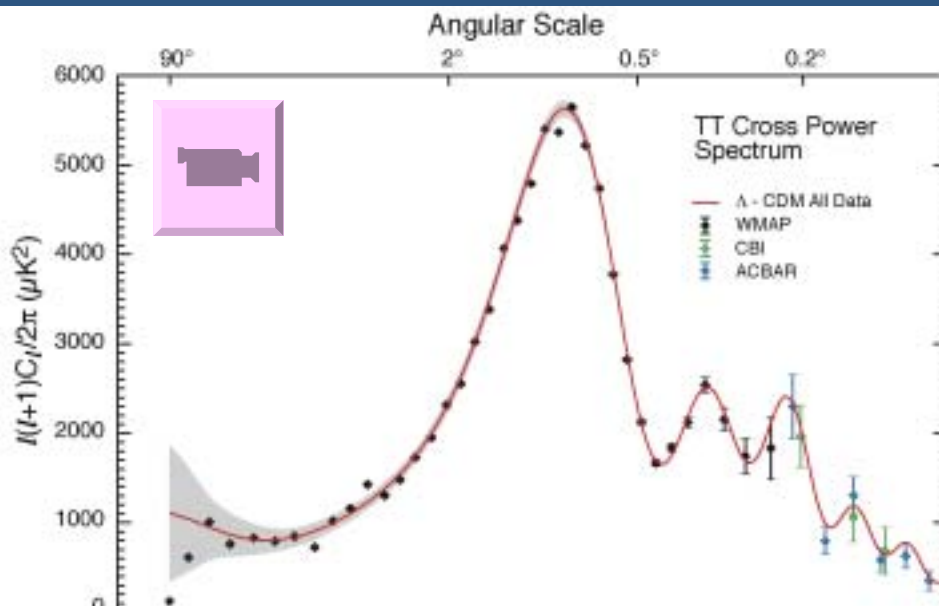
WMAPと21世紀の宇宙論



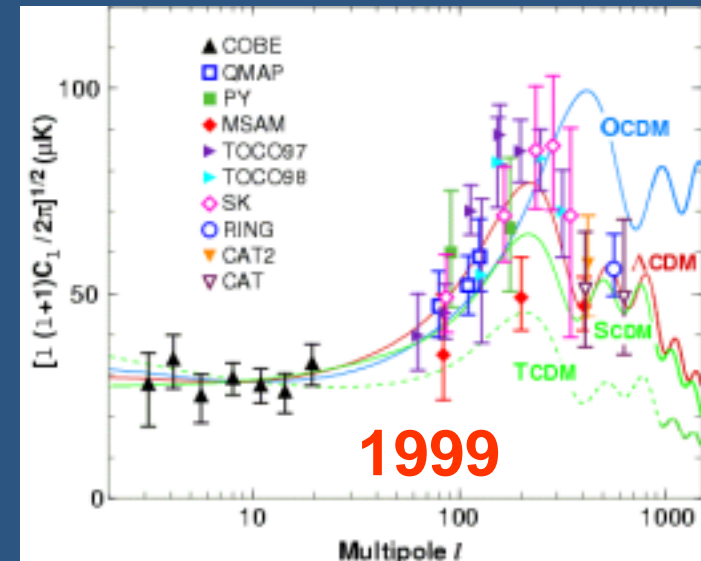
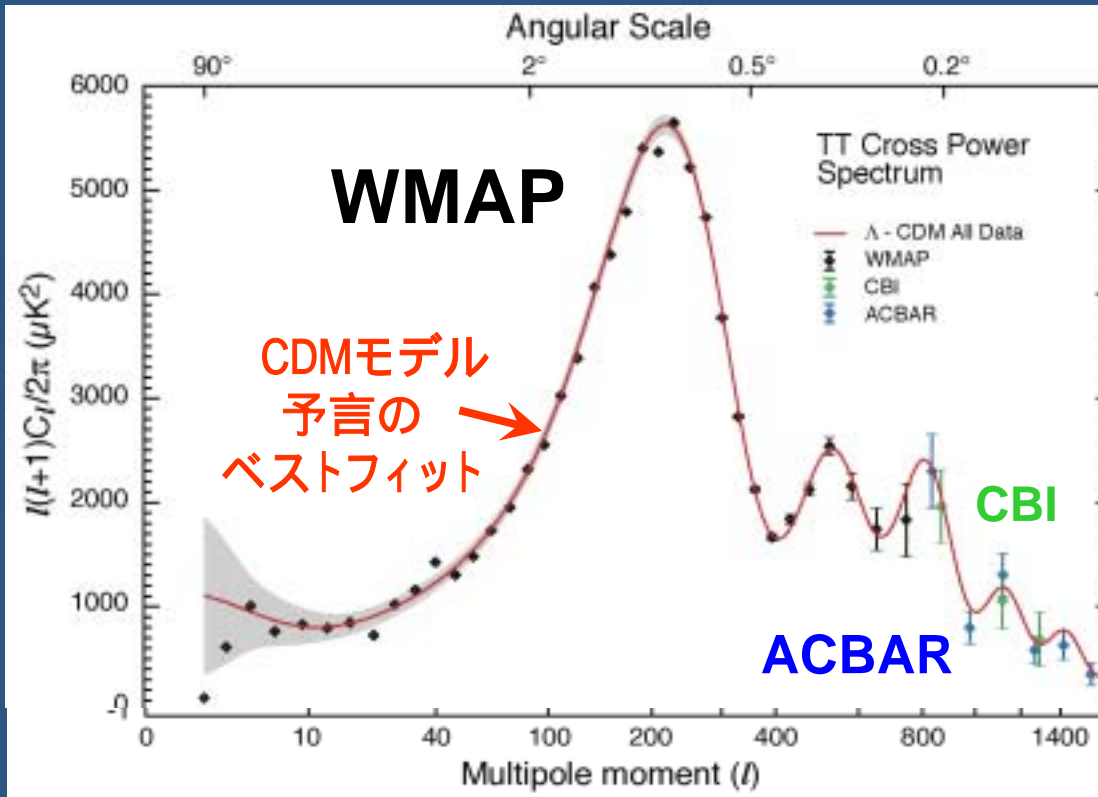
# WMAPの成果 (2003年2月12日発表)



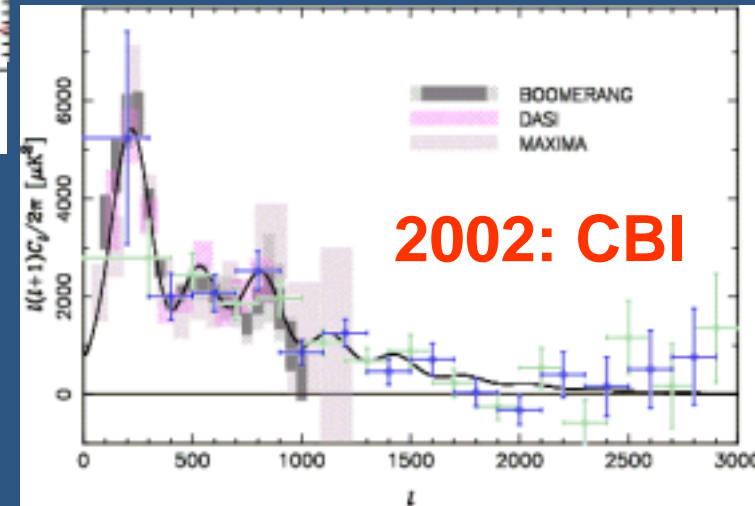
NASA/WMAP  
Science Team



# CMB温度ゆらぎ角度パワースペクトル: $C_l$



Bahcall et al. Science 284(1999)1481



Sievers et al. (2002)

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

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



# 主な宇宙論パラメータ

記号	名前	物理的意味
$h$	ハッブル定数	宇宙の運動エネルギー、膨張率
$\Omega_b$	バリオン密度パラメータ	宇宙のバリオン量
$\Omega_m$	質量密度パラメータ	宇宙の重力エネルギー、暗黒物質
$\Omega$	宇宙定数	真空のエネルギー密度
$\Omega_K$	宇宙の曲率	$= \Omega_m + \Omega - 1$ (Einstein方程式 あるいはエネルギー保存に対応)
$w$	宇宙の状態方程式 (圧力/エネルギー密度)	$p=w$ ( $w=0$ :非相対論的物質、 $w=1/3$ : 輻射、 $w=-1$ :宇宙定数)
$t_0$	宇宙年齢	ビッグバン以後の宇宙の経過時間

# 宇宙論パラメータ決定方法の概要

## ■ 原始ゆらぎのスペクトル指数 $n_s$ : $P(k) \propto k^{n_s}$

- $l < 100$ での振舞い: Sachs-Wolfe effect

$$C_l \propto \frac{\Gamma(l + n_s/2 - 1/2)}{\Gamma(l - n_s/2 + 5/2)} = \frac{1}{l(l+1)} \text{ (for } n_s = 1)$$

## ■ 宇宙の曲率: $\Omega_K = \Omega_m + \Omega_b - 1$

- 光子とバリオンがトムソン散乱によって相互作用し弾性振動
- この振動の特徴的波長は、最終散乱面における音速のホライズンスケールで決まる。これを見込む角度は、最終散乱面までの角度距離で決まる。これらの結果は、主として宇宙の曲率の値に敏感であることがわかっており、弾性振動ピークの $l$ の値から読み取れる。

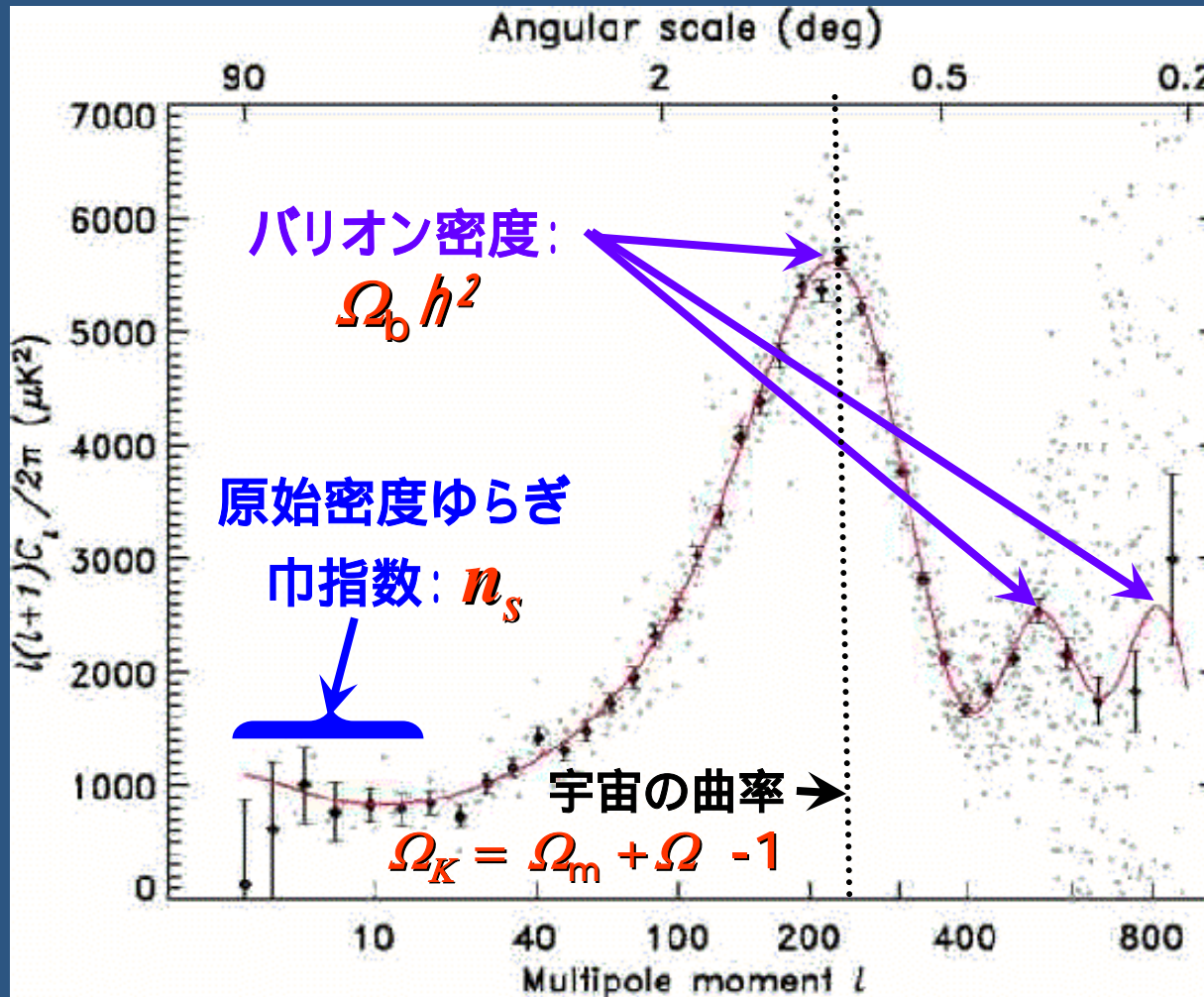
## ■ バリオン密度: $\Omega_b h^2$

- バリオン・光子流体の弾性振動の振幅は、バリオン密度と光子のエネルギー密度によって決まる。光子のエネルギー密度は、CMBの温度によって既知。振幅の値、さらに偶数次ピークと奇数次ピークとの振幅の比から読み取れる。

## ■ 他の宇宙論パラメータ

- WMAPのデータは $l < 800$  ( $\theta > 20''$ )程度、他の地上観測(気球、干渉計)のCMBデータはサーベイ領域は小さいものの、 $l \sim 3000$  ( $\theta \sim 5''$ )程度までのびている。さらに、銀河分布のパワースペクトル、クエーサー吸収線の分布、超新星のハッブル図、銀河団の存在量などの、独立したデータと組み合わせることで、主要な宇宙論パラメータをかなりの精度で推定することが可能。

# WMAPの観測した温度ゆらぎパワースペクトル



Spergel et al.  
astro-ph/0302209

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

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

# WMAPが決定した宇宙論パラメータ

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

$$w < -0.78 \text{ (95\% CL)}$$

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

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

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

$$n_b = 2.5 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-3}$$

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

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

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

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

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

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

$$\eta = 6.1 \times 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$$

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

$$\sigma_8 = 0.84^{+0.04}_{-0.04} \text{ Mpc}^{-1}$$

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

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

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

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

$$r < 0.71 \text{ (95\% CL)}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# 宇宙の組成 (2003年度版)

総量 =  $1.02 \pm 0.02$

ダークエネルギー

(宇宙定数)  $0.73 \pm 0.04$

全物質  $0.27 \pm 0.04$

星

$0.005 \pm 0.002$

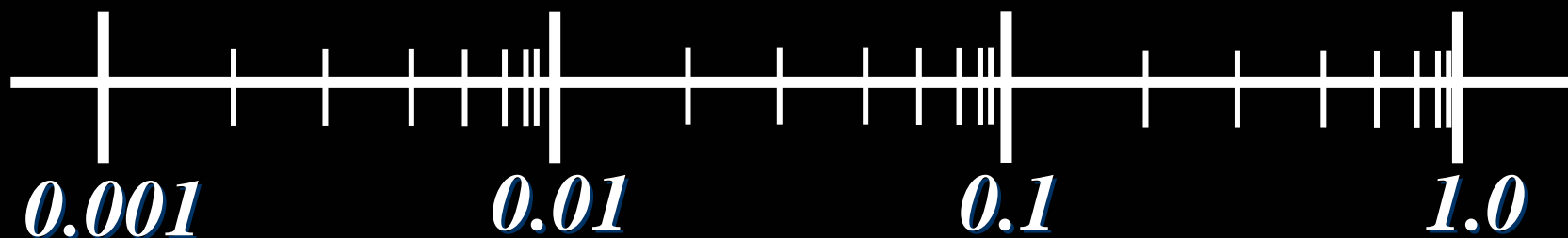
バリオン

$0.044 \pm 0.004$

CDM

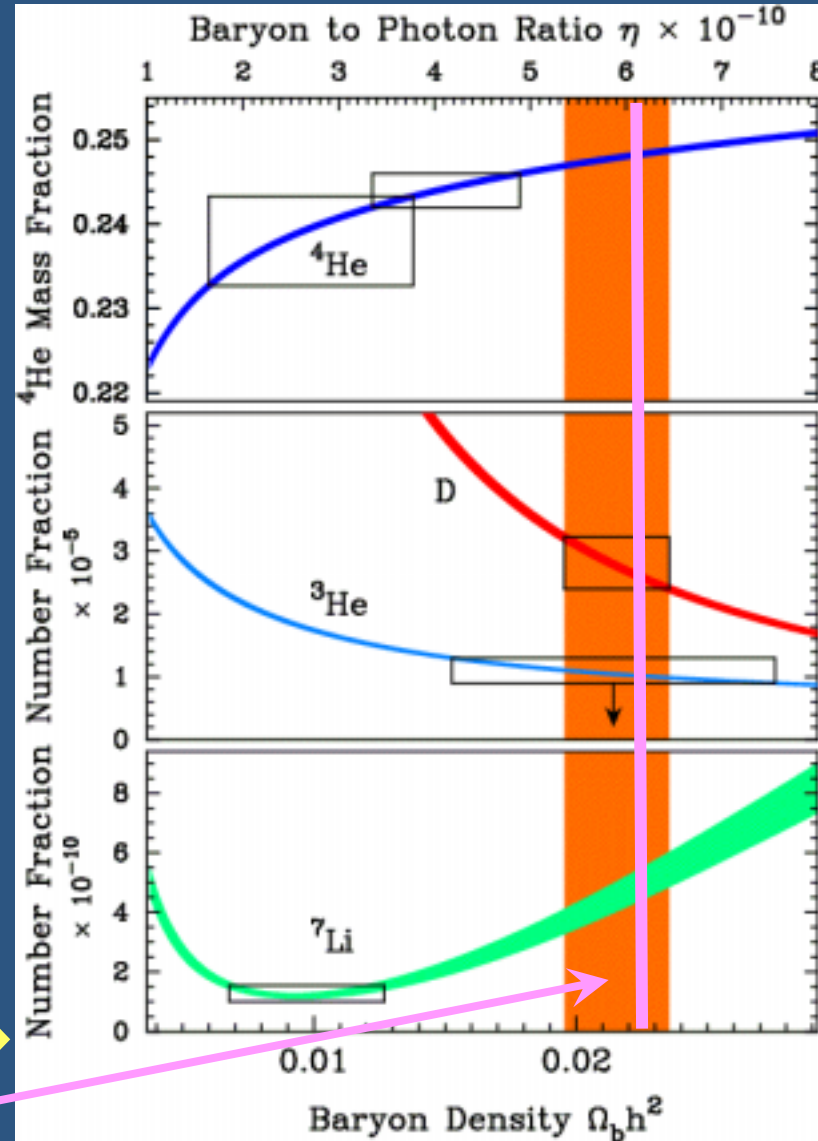
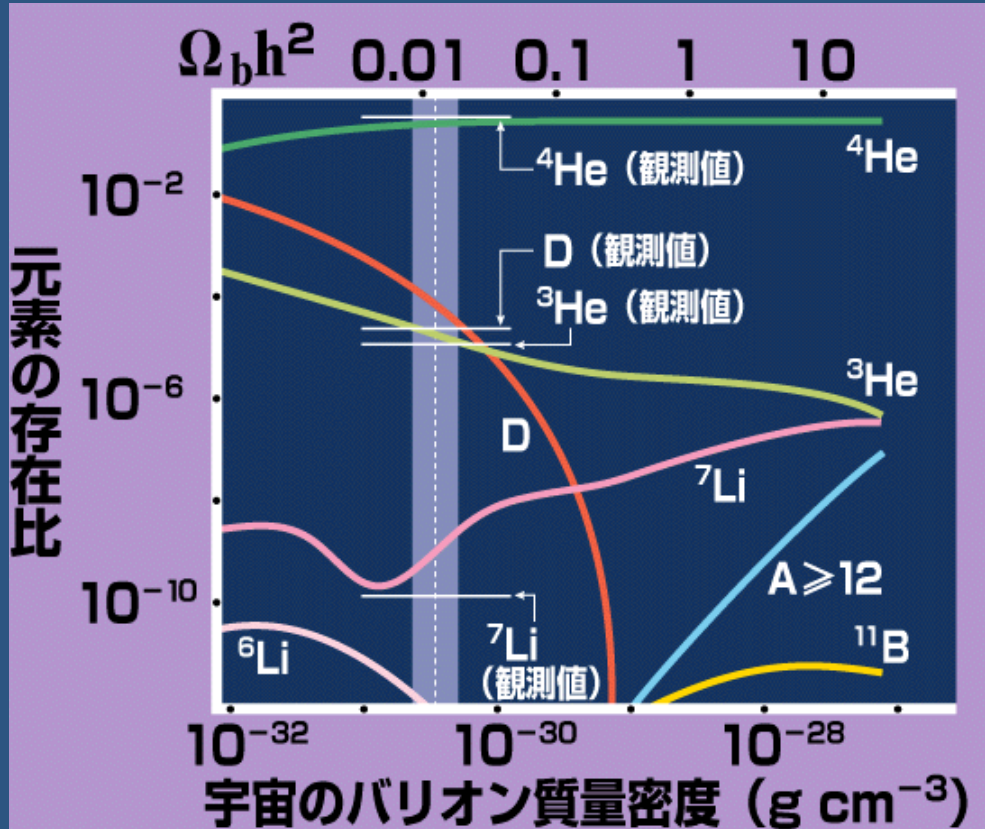
$0.23 \pm 0.04$

理論予言



$\Omega_{total}$

# バリオン量：軽元素合成理論・観測との比較



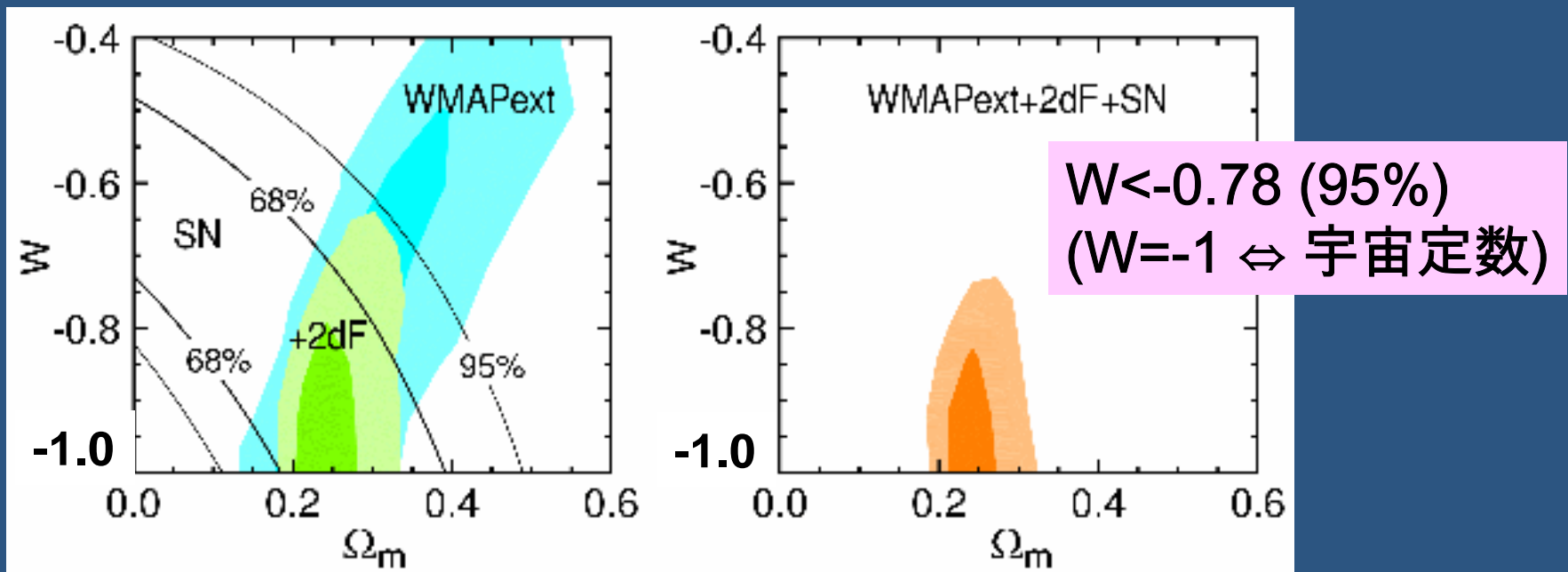
$\Omega_b h^2 = (0.015 \pm 0.002)$  : 1990年代前半

$\Omega_b h^2 = (0.021 \pm 0.002)$  : WMAP直前

$\Omega_b h^2 = (0.0224 \pm 0.0009)$  : WMAP

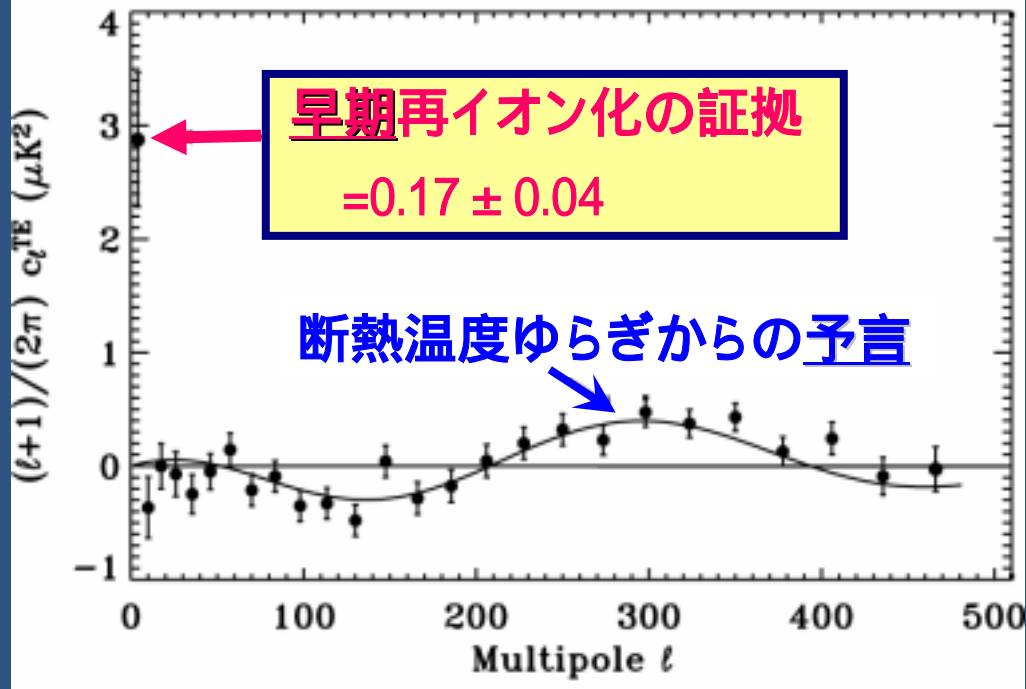
# ダークエネルギーは宇宙定数か？

- WMAPは、全エネルギー密度、バリオン質量密度、CDM質量密度を推定
- それらの差から、消去法的にダークエネルギーの存在を示唆
- 他の観測データと組み合わせることで、ダークエネルギー成分の状態方程式に対する制限が得られる
- (圧力) $=w \times$  (質量密度)      質量密度  $a(t)^{-3(w+1)}$



# 偏光観測と宇宙の再電離

WMAPの温度・偏光相関パワースペクトル



**Polarization: How It Works**

fence (filter)  
 vertically polarized light wave  
 light source  
 horizontally polarized light wave  
 fence allows only vertical waves through

**how we see it...**

like the fence, lenses of polarized sunglasses accept only vertical waves  
 Sun  
 partially-polarized light from scattering  
 unpolarized natural light  
 water  
 only vertically-polarized part of sunlight allowed through

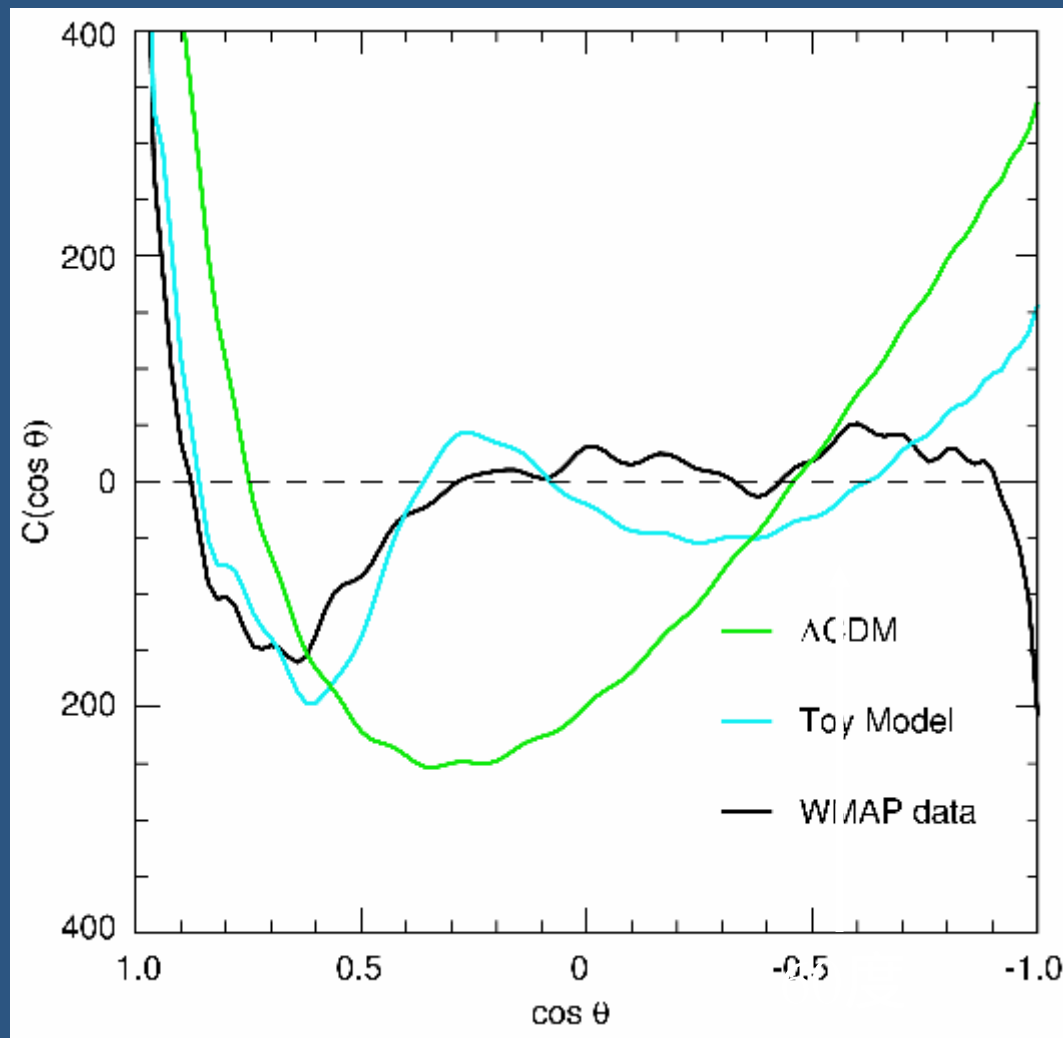
**how WMAP sees it...**

probe's receivers detect both kinds of polarizations  
 light is partially-polarized by scattering  
 electrons scatter light  
 light from Big Bang  
 WMAP



# 大角度スケールでゆらぎが小さすぎる？

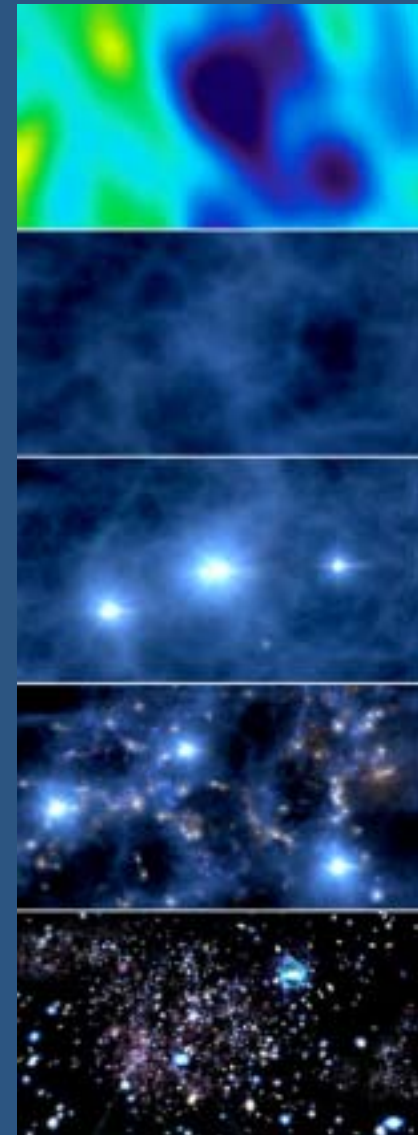
温度ゆらぎ角度2点相関関数



- 60度以上のスケールに、理論予想に比べてゆらぎが極端に小さい！
- 確率的には、わずか0.3%以下しか許されない
- 観測的系統誤差？ あるいは、何か知らない物理過程の存在を示唆？

# WMAP 1st year 成果の要約

- 容器としての宇宙モデルを確定
- 宇宙の再電離時期
- ほとんどすべてのデータが、驚くべき精度で「インフレーション+宇宙定数入りの冷たい暗黒物質モデル」の理論予言とぴたりと一致
- The most revolutionary result out of WMAP is that there is no revolutionary results. (J. Bahcall)



# The cosmological standard model: What's next ?

Cosmology is now in a similar stage in its intellectual development to particle physics three decades ago when particle physicists converged on the current standard model. The standard model of particle physics fits a wide range of data, but does not answer many fundamental questions: “what is the origin of mass ? why is there more than one family ?, etc.”. Similarly, the standard cosmological model has many deep open questions: “what is the dark energy? what is the dark matter ? what is the physical model behind inflation (or something like inflation)?” Over the past three decades, precision tests have confirmed the standard model of particle physics and searched for distinctive signatures of the natural extension of the standard model: supersymmetry. Over the coming years, improving CMB, large scale structure, lensing, and supernova data will provide even more rigorous tests of the cosmological standard model and search for new physics beyond the standard model.

*D.N.Spergel et al. astro-ph/0302209*

# 今後の宇宙論の方向？

宇宙論界の重鎮： P.J.E.Peebles (1993)

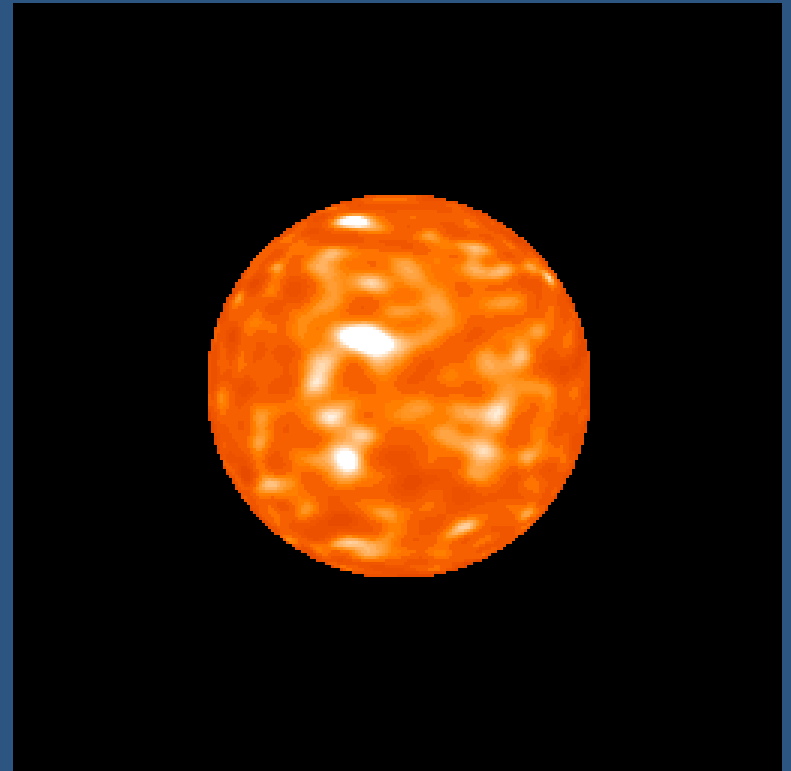
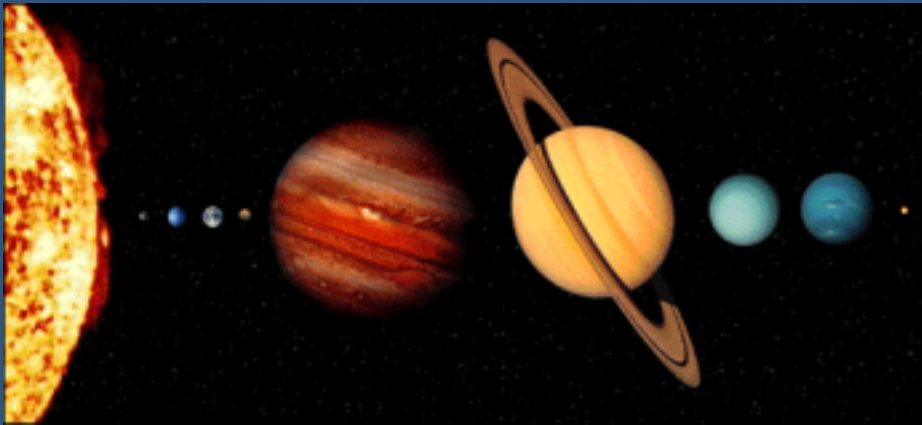
『Principles of Physical Cosmology』 p.683  
にある、わかったようでわからない根拠の薄い希望的観測

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.

# 21世紀宇宙論の展望

- 宇宙論パラメータの値をさらに精密化  
精密宇宙論をさらに突き進む
- 宇宙の起源・パラメータの値のもつ意味を理解  
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・未知の領域を開拓
  - 第一世代の原始天体
  - パラダイム自体の精密検証  
一般相対論の検証、物理定数は定数か
  - **生命誕生の環境としての宇宙論へ** (究極の宇宙論)

# 太陽系外惑星探查



# 太陽系外惑星探査の意義

## ■ *Are we alone ?*

- 地球の起源
- 太陽系(惑星系)の起源
- 生命の起源

生命を生み出す環境としての惑星

- 地球外知的生命体は存在するか
- 地球外文明はあるか

(*“Where are they ?” Fermi 1950*)

やや危ない ↓

# 太陽系外惑星発見の歴史

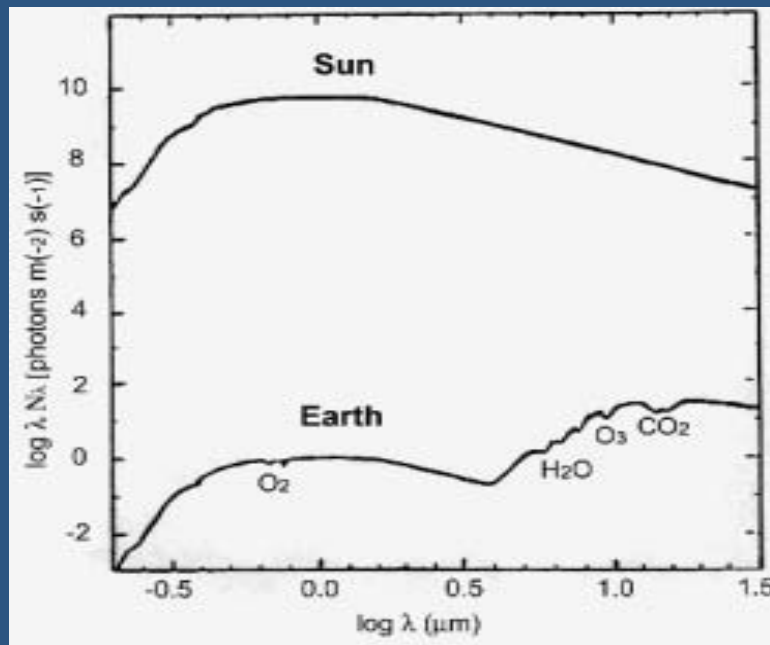
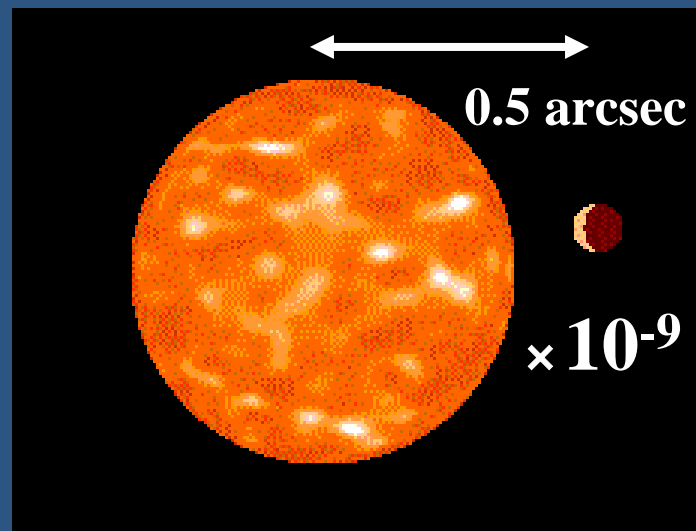
- 1995年: 主系列星 51 Pegasiの周りに惑星を発見 (Mayor & Quelos ; 公転周期4.2日)
- 1999年: 主系列星 Andの周りに3つの惑星を発見 (Butler, Marcy & Fisher)
- 1999年: 系外惑星による食の観測に成功 (Charbonneau et al., Henry et al.)
- 2003年1月6日: 食によって発見された最初の系外惑星 (OGLE-TR-56b; 公転周期1.2日)
- 2003年2月18日までに105個の系外惑星



# 惑星の直接撮像？

10pcから観測した木星

明るさ： 27等級（可視域）  
主星との角距離： 0.5秒角

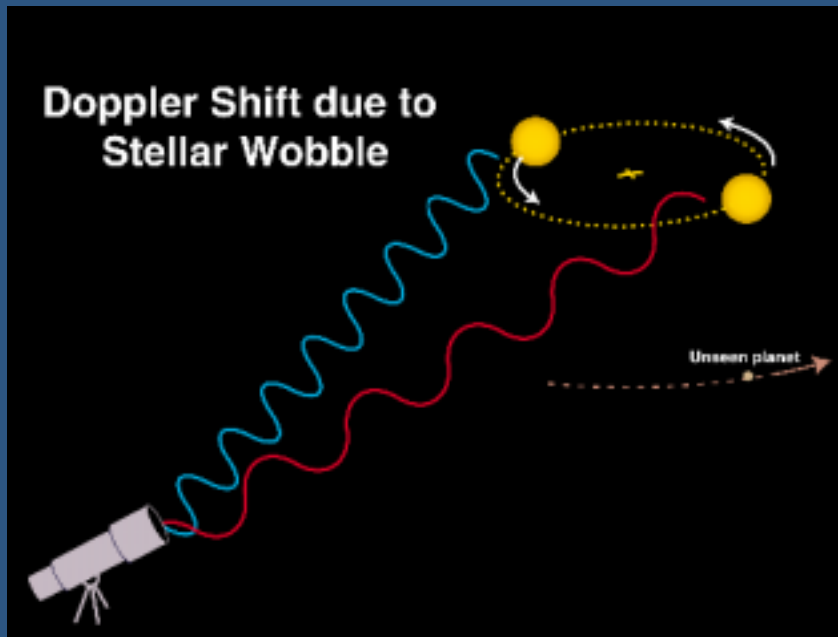


地上観測の典型的な角度分解能の大きさ内で、9桁程度も明るい主星のすぐ隣にある27等級の暗い天体を観測する

ほとんど不可能！

# 系外惑星発見法：主星 の速度変動の分光観測

惑星は直接見えなくても、  
主星の軌道はその影響を受ける



太陽の受ける速度摂動：

12.5 m/s(木星)

0.1 m/s(地球)

(参考) 地球の公転速度  
3万 m/s

地上の分光観測で、3m/s

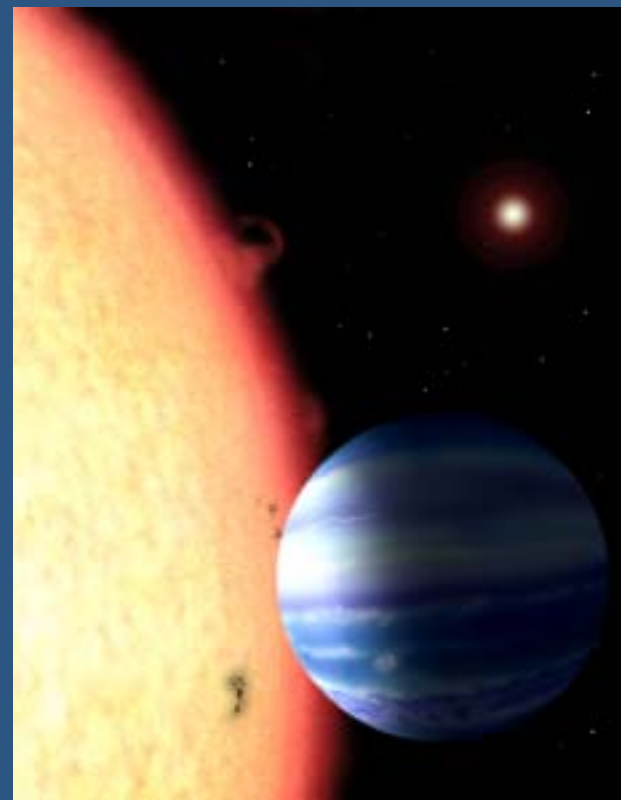
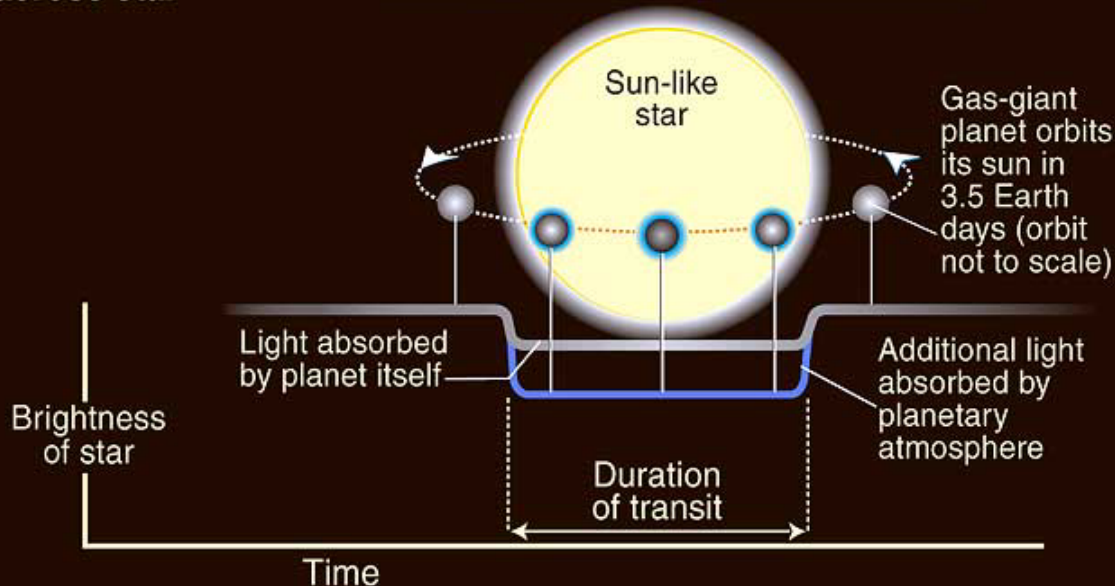
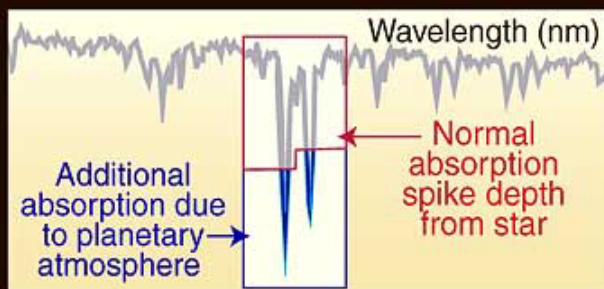
程度の精度が実現済み

現在、木星規模の  
惑星探査の主方法

# HD209458 の食の観測

- 速度変動のデータに合わせて惑星の食を初めて検出(Charbonneau et al. 2000, Henry et al. 2000)
- 2001年11月、この惑星の大気にナトリウムが存在することを発見(Charbonneau et al. 2001)

HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



# (Logically natural) steps toward direct detection of extrasolar planets

- Radial velocity modulation of the star
- Shadowing of the stellar light due to transit
- Additional absorption features due to the planetary atmosphere during the transit
- **Total flux variation of the star+planet system due to the orbital phase-dependent scattered light component (current attempt)**
- **Direct imaging of planet, i.e., separation of the planetary component from the stellar light (final goal)**

# Subaru observation



**“Spectro-photometric search  
for scattered light from HD209458b”**  
S02B-16 on October 24 and 26, 2002

Yasushi Suto (Univ. of Tokyo)

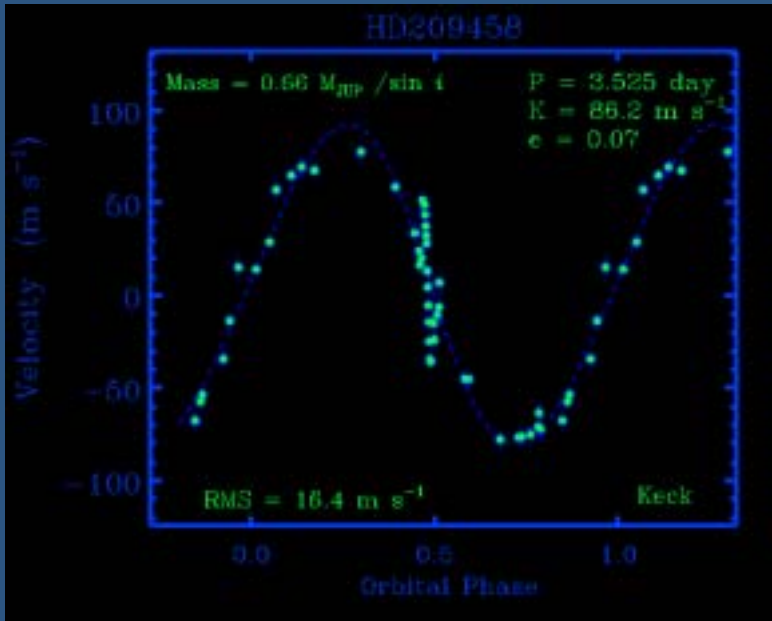
Toru Yamada (National Astronomical Obs. Japan)

Edwin L. Turner (Princeton Univ.)

Norio Narita (Univ. of Tokyo)

# Radial velocity curve

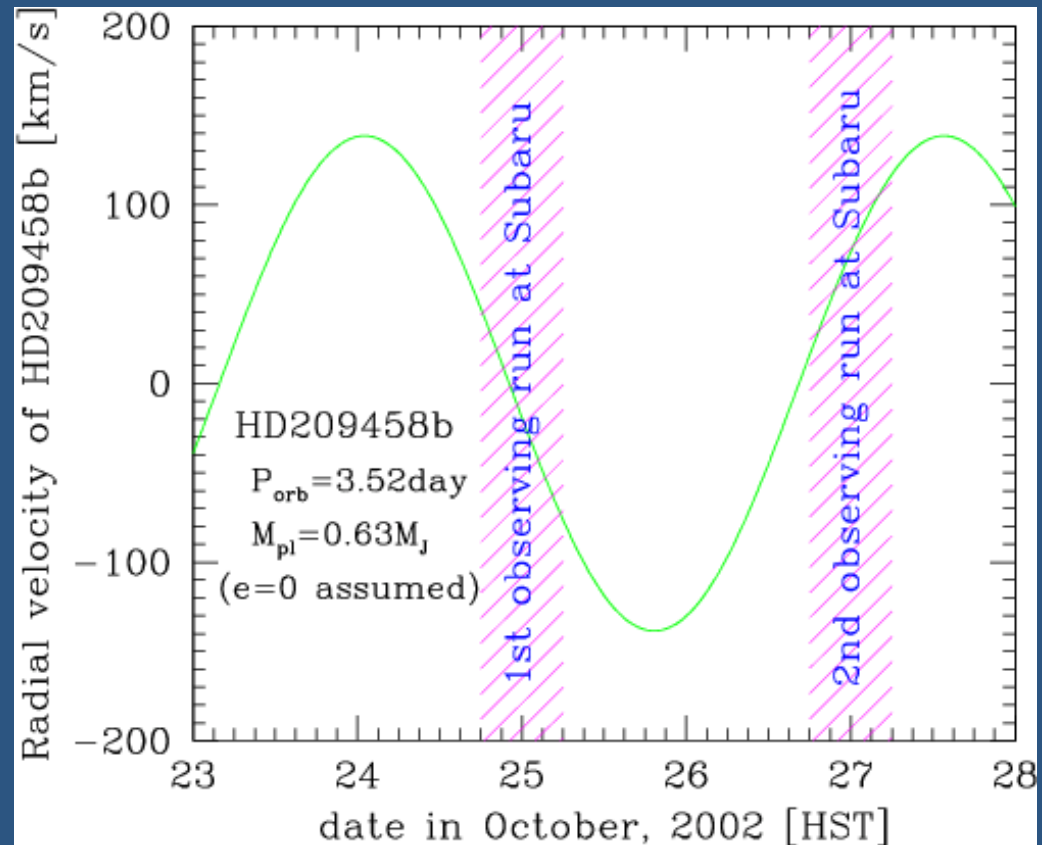
HD209458 (parent star)



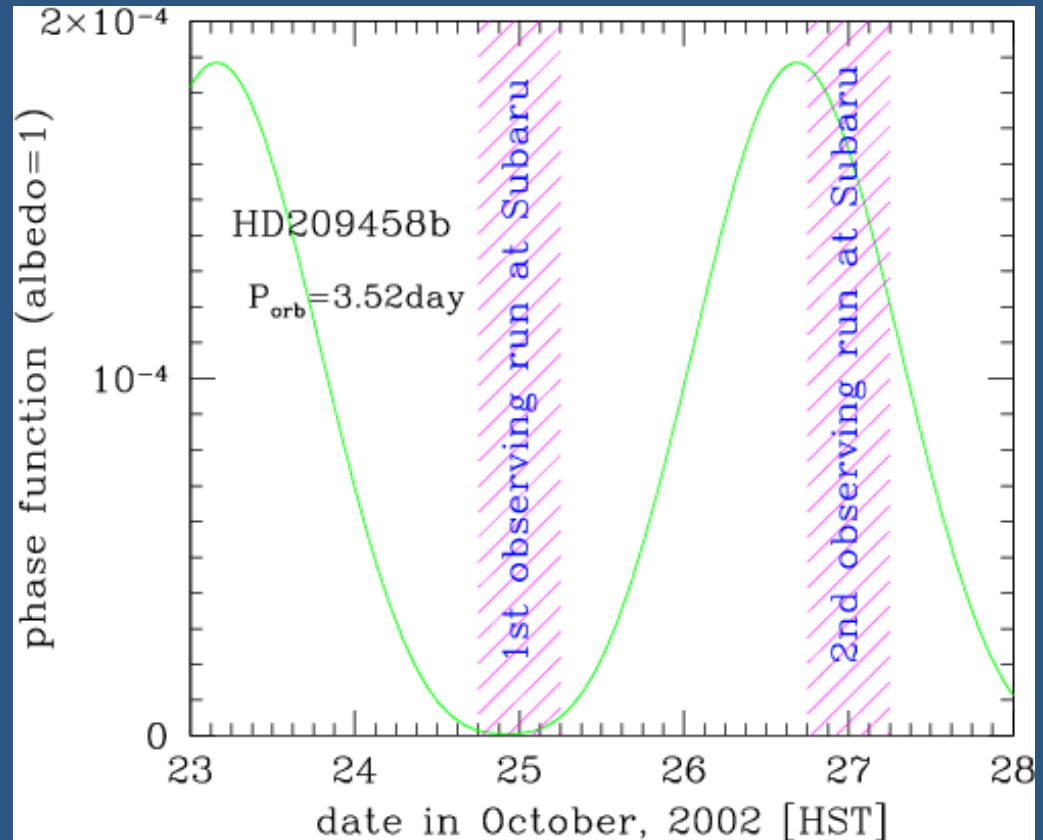
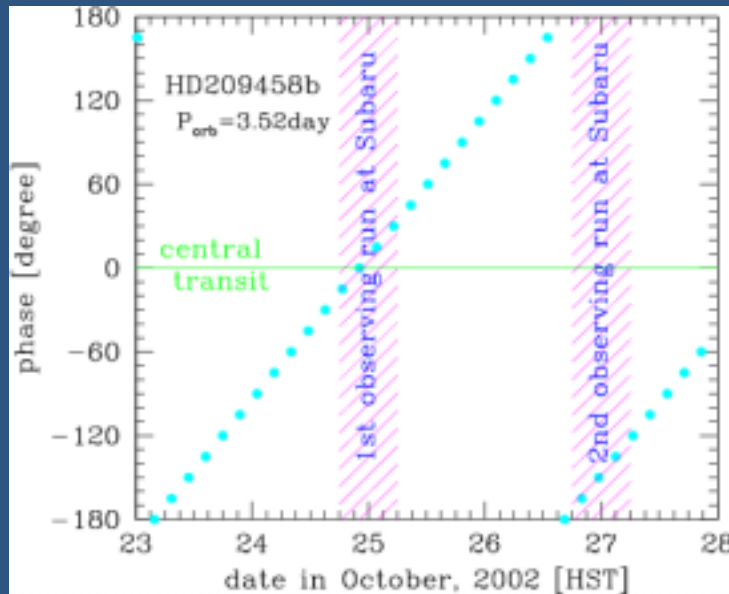
HD209458b  
(a transiting planet)

$$K_{pl}(\Phi) = \left( \frac{2\pi GM_*}{T_{orbit}} \right)^{1/3} \frac{\sin i}{(1 + M_{pl} / M_*)^{2/3}} \cos \Phi$$

$\approx 144 \cos \Phi \text{ km/s}$



# Phase function



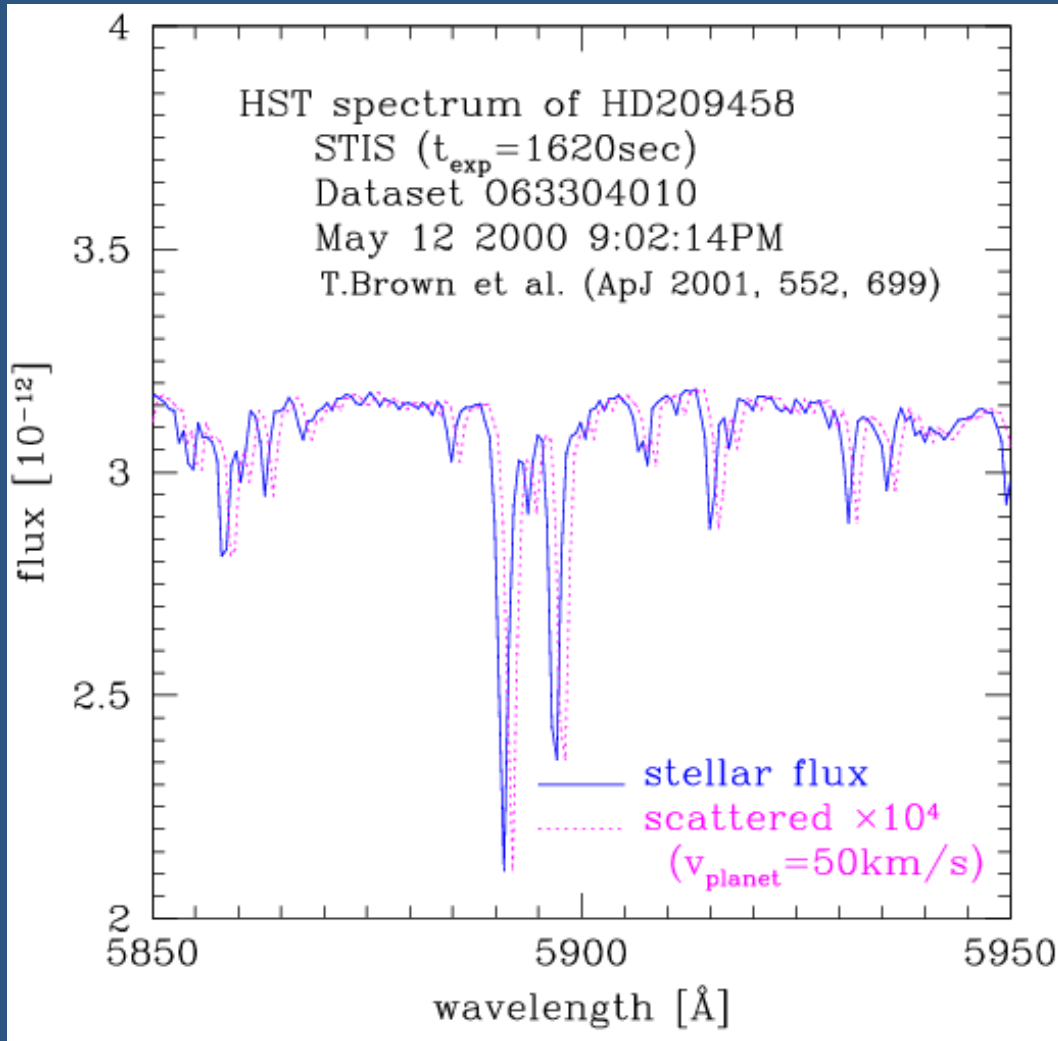
**The Lambert law :**

$$f(\Phi, i) = \varepsilon \phi(\alpha) = p \left( \frac{R_p}{a} \right)^2 \left[ \frac{\sin \alpha + (\pi - \alpha) \cos \alpha}{\pi} \right]$$

$$\cos \alpha = -\sin i \sin 2\pi\Phi$$

$\Phi = 0$  : maximum radial velocity of the star

# Strategy for scattered light search with HDS



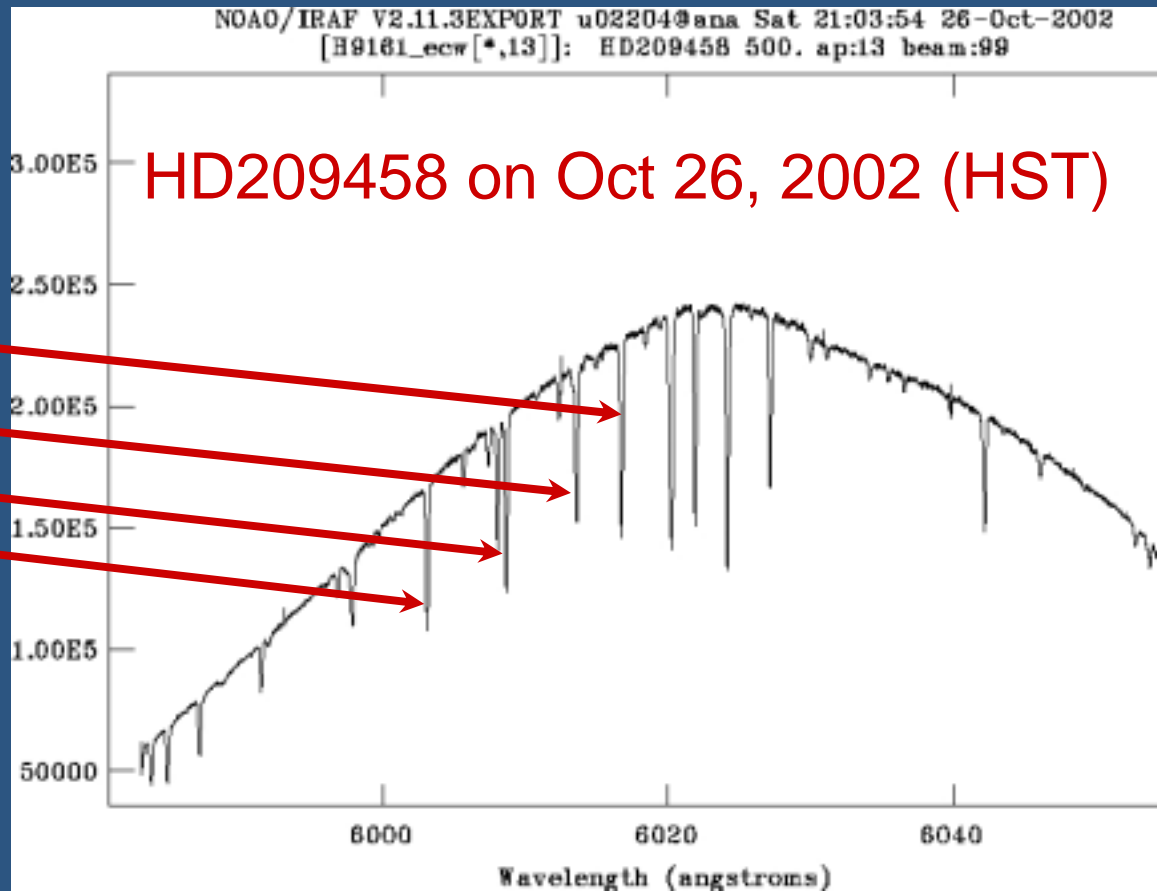
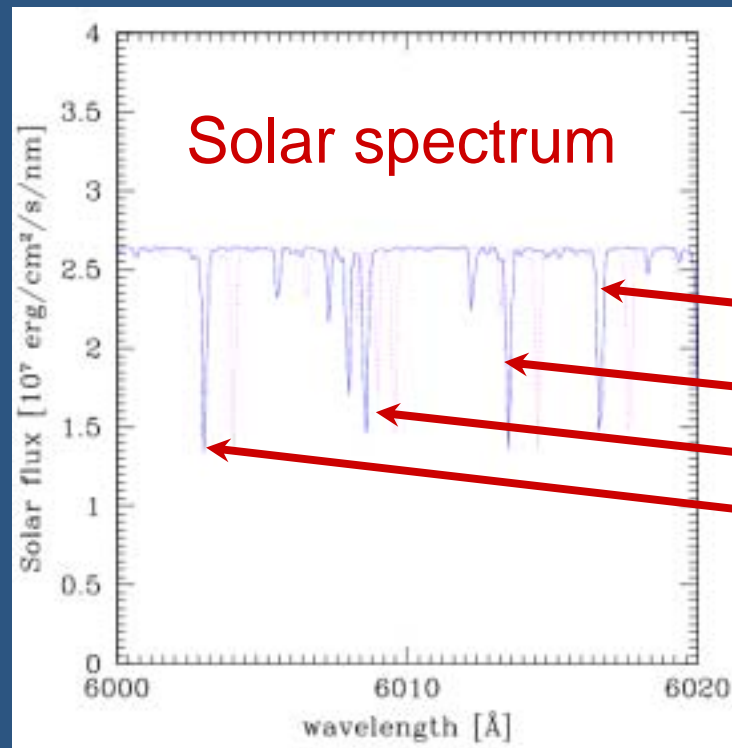
- Statistical search for the scattered components Doppler-shifted at  $v_p(t)$  from the stellar absorption lines.
- The spectral resolution of HDS ( $\lambda/\Delta\lambda=50000$ ) is 10 times better than that of STIS, HST ( $\lambda/\Delta\lambda=5540$ ).



# Subaru observing run at Mouna Kea



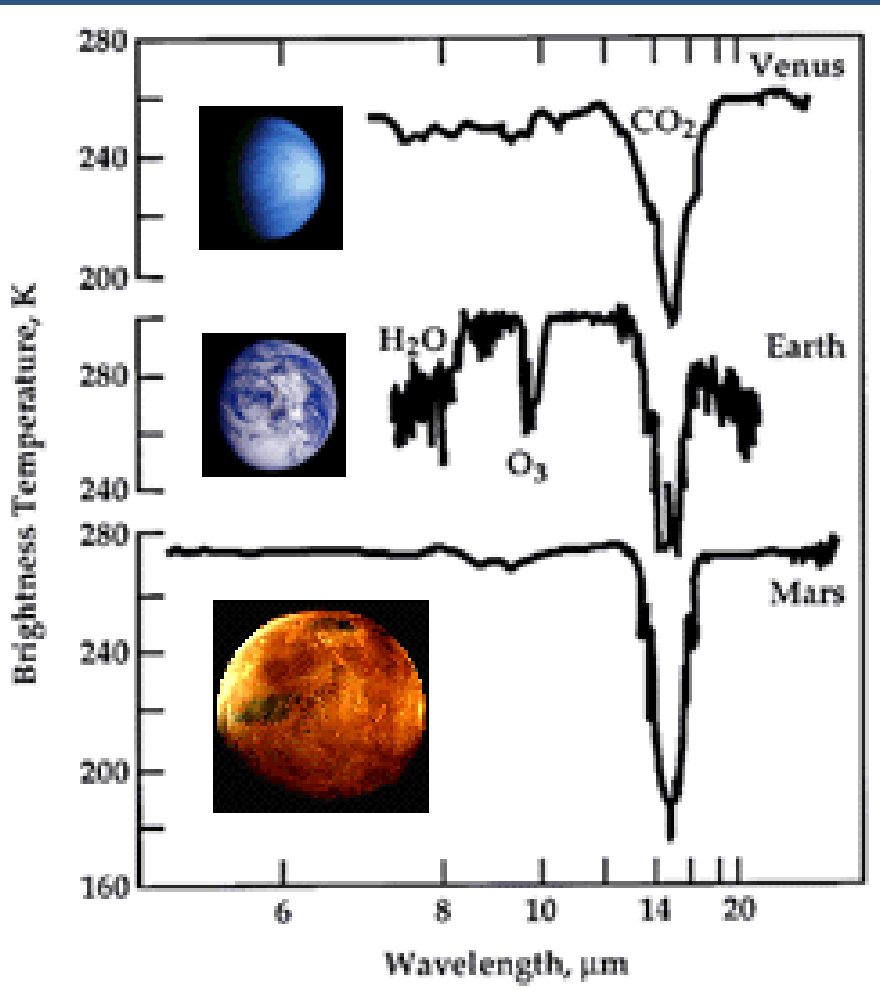
# Glimpse of our data



- We have already made sure that HD209458 is G0V (its spectral type is very close to that of the Sun) !

# 究極の宇宙論： 太陽系外惑星 探査研究の展望

- 木星型惑星の発見の時代 (1995) から、惑星系 “characterization” へ
- 地球型惑星の発見へ
- habitable planets ?
  - search for life
- 分光観測から生命の兆候を探る
  - スペクトルの形 惑星の温度、水が液体として存在？
  - 強いCO<sub>2</sub>吸収帯 大気？
  - O<sub>3</sub>吸収帯 大量の酸素 生物によって生成？
  - H<sub>2</sub>O吸収帯 海の存在？



# Expanding the *expanding* universe (Suto 1997)

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
...		

宇宙論の究極の宇宙論

WMAP



**本当の宇宙論研究はいよいよこれから!**