

# 不惑の観測的宇宙論

東京大学 大学院理学系研究科  
須藤 靖

2002年6月20日

東京工業大学 理学部 物理学教室談話会

# 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 (Penzias&Wilson)**
- 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～ 宇宙論パラメータ決定爆発的進展
- **2005年 観測的宇宙論、不惑を迎える**

# ビッグバン宇宙論を支える 3つの観測的証拠

## ハッブルの法則

十分遠方にある銀河は  
すべて我々に対して遠ざ  
かっている

## 軽元素の起源

現在の宇宙には大量のヘ  
リウムが存在する (質量密  
度にして全元素の約 25% )

## 宇宙マイクロ波背景輻射

現在の宇宙は、等方的な強度分布を示す電磁波  
(絶対温度約2.7Kに対応する熱放射) に満たされている

# 宇宙マイクロ波背景輻射

## ■ 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

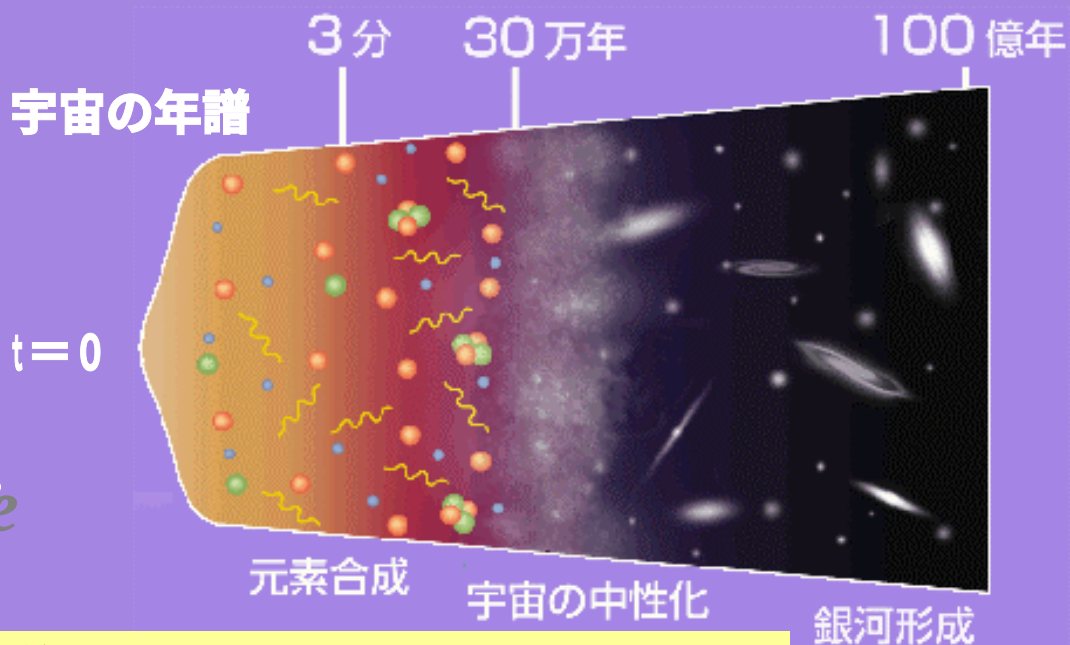
## ■ 宇宙の晴れ上がり

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

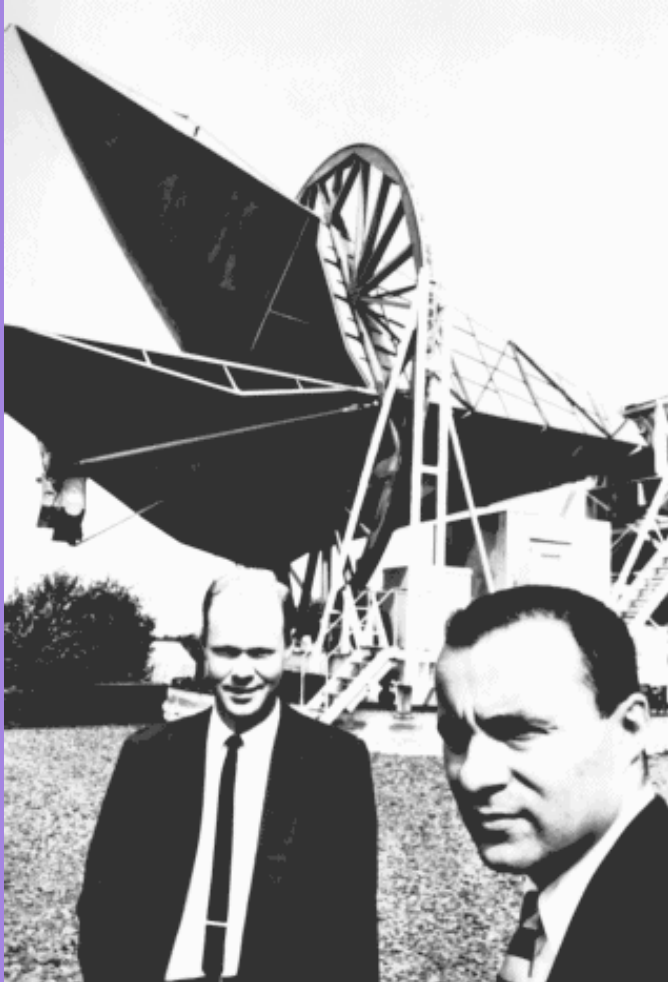
CMB:

Cosmic Microwave Background

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: 発見の歴史



Bell Labs/Lucent Technologies 提供画像

- 1940年代に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

# Dicke et al. ApJ 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

## 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.

# Penzias & Wilson: ApJ 142(1965)419

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

Measurements of the effective zenith noise temperature of the 20-foot horn-reflector antenna (Crawford, Hogg, and Hunt 1961) at the Crawford Hill Laboratory, Holmdel, New Jersey, at 4080 Mc/s have yielded a value about  $3.5^{\circ}$  K higher than expected. This excess temperature is, within the limits of our observations, isotropic, unpolarized, and 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

# ガモフの書簡

THE INSTITUTE FOR ADVANCED STUDY  
SCHOOL OF MATHEMATICS  
PRINCETON, NEW JERSEY

August 4, 1946

Professor G. Gamov  
Ohio State University  
Columbus, Ohio

Dear Mr. Gamov:

After receiving your manuscript I read it immediately and then forwarded it to Dr. Spitzer. I am convinced that the abundance of elements as function of the atomic weight is a highly important starting point for cosmogonic speculations. The idea that the whole expansion process started with a neutron gas seems to be quite natural too. The explanation of the abundance curve by formation of the heavier elements in making use of the known facts of probability coefficients seems to me pretty convincing. Your remarks concerning the formation of the big units (nebulae) I am not able to judge for lack of special knowledge.

Thanking you for your kindness, I am

yours sincerely,

A. Einstein.

Albert Einstein.

Of course, the old man agrees with almost everything nowadays.  
Geo.

Thanks for slides.  
G.

図4 アインシュタインがガモフに宛てた手紙\*



The Sept 29<sup>th</sup> 1963

Gamow Dacha  
785 - 6th Street  
Boulder, Colorado

Dear Dr. Penzias,

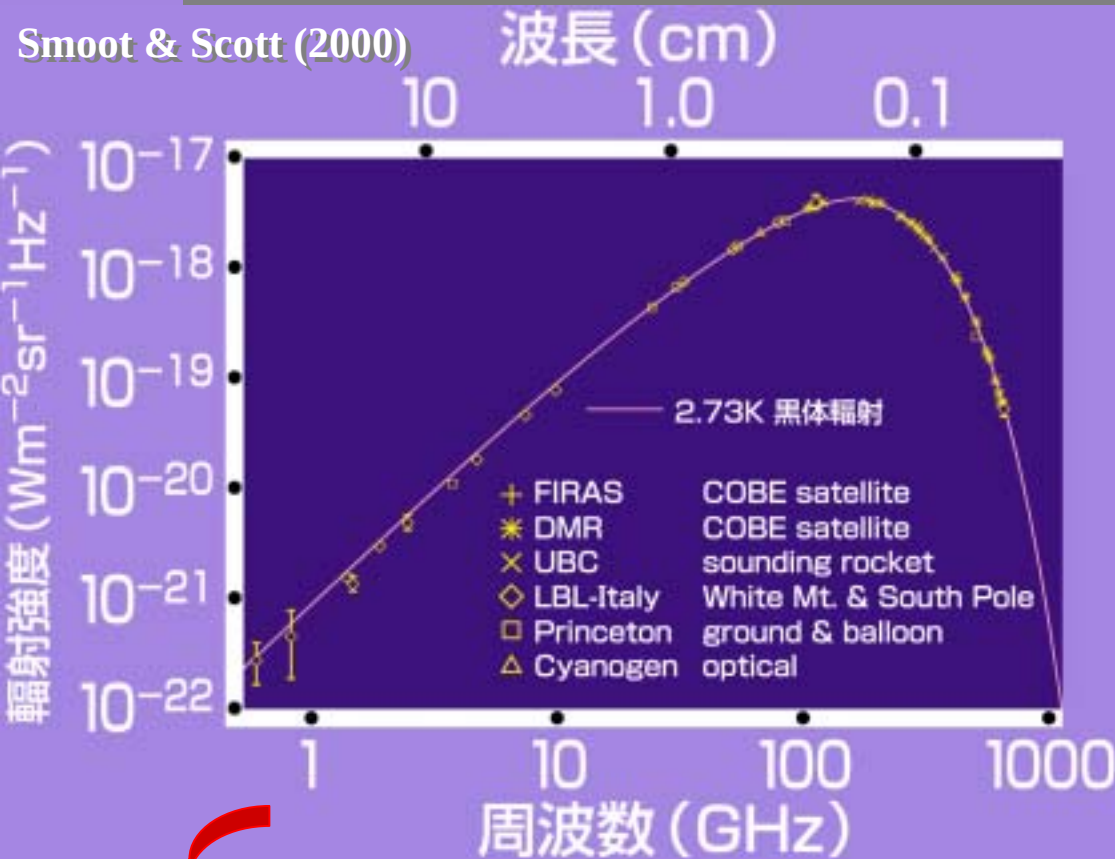
Send Thank you for sending me your paper on 3°K radiation. It is very nicely written except that "early history" is not "quite complete". The theory of, what is now known as, "primordial fireball" was first developed by me in 1946 (Phys. Rev. 70, 572, 1946; 74, 505, 1948; Nature 162, 680, 1948). The prediction of the numerical value of the present (residual) temperature could ~~can~~ be found in Alpher & Herman's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5°K, and in my paper (Kong Dansk. Vid. Sels. 27 no 10, 1953) with the estimate of 7°K. Even in my popular book "Creation of Universe" (Viking 1952) you can find (p. 42) the formula  $T = 1.5 \cdot 10^{10} / t^{1/2} \text{ } ^\circ\text{K}$ , and the upper limit of 50°K. Thus, you see the word did not start with almighty Dirac. Sincerely G. Gamow.

図3 G. ガモフの手紙。奇妙なことに日付が間違って1963年となっている\*。



# CMB: エネルギースペクトル

■  $10^{-4}$ の精度で熱輻射分布 (プランク分布) と一致



温度  $T$  の熱平衡にある光子の単位時間・単位面積・単位周波数・単位立体角あたりのエネルギー分布

$$I_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

$\nu$ : 周波数、 $c$ : 光速度  
 $h$ : プランク定数  
 $k$ : ボルツマン定数

温度  $T$  だけがパラメータ！

現在の“宇宙”の温度:  $T_{\text{CMB}} = 2.728 \pm 0.002$  [K]

# CMB: 全天温度地図

■ 1965: 一様成分  
(宇宙の温度)

$$T_{CMB} = 2.73 \text{ [K]}$$

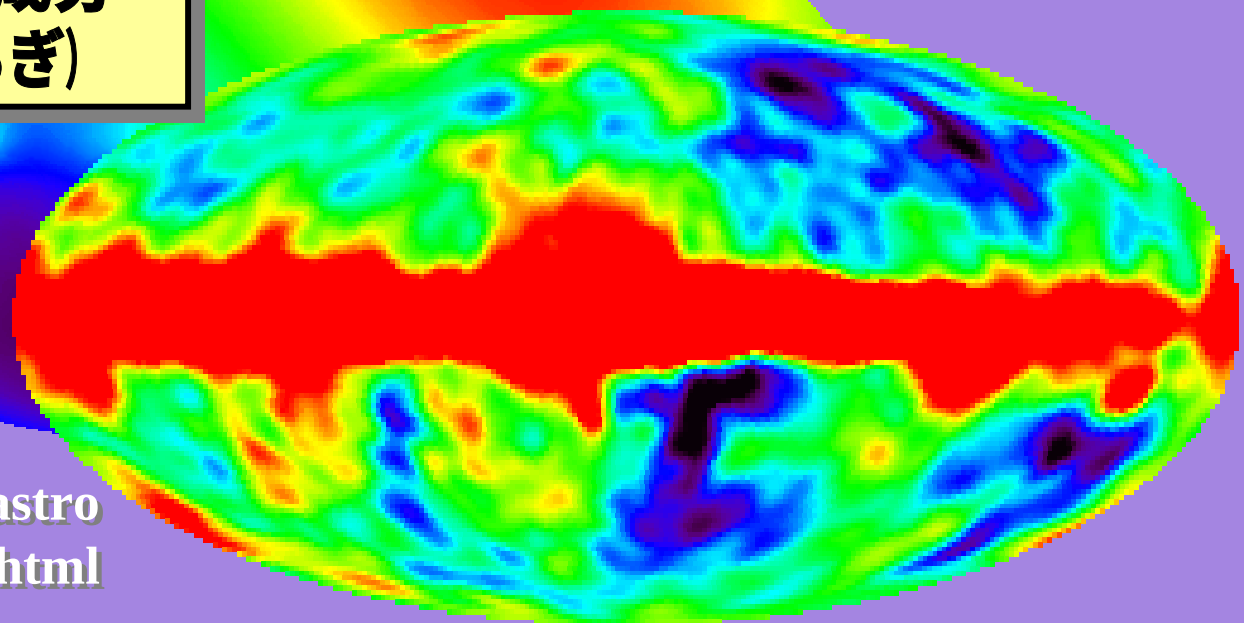


■ 1976: 二重極成分

$$(\delta T / T_{CMB})_{180^\circ} \approx 10^{-3} \Rightarrow \text{太陽系の運動 } 371 \text{ km/s}$$

■ 1992: 多重極成分  
(宇宙の温度ゆらぎ)

$$(\delta T / T_{CMB})_{7^\circ} \approx 10^{-5} \Rightarrow \text{宇宙の構造の起源}$$

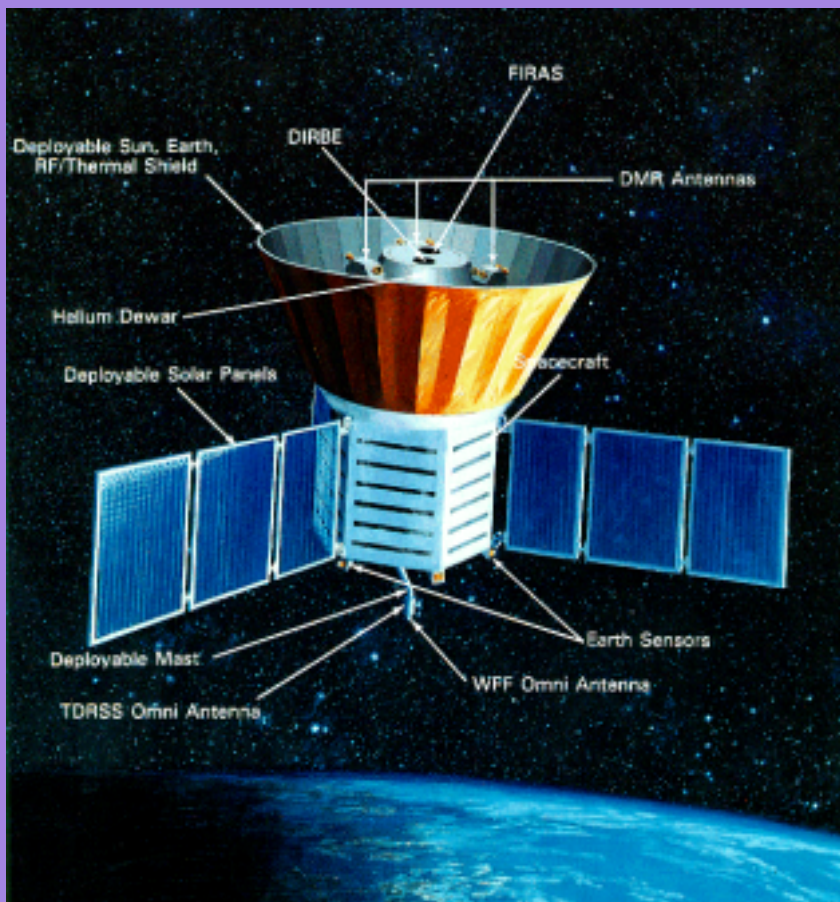


[http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed\\_resources.html](http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed_resources.html)

# CMB温度ゆらぎの観測

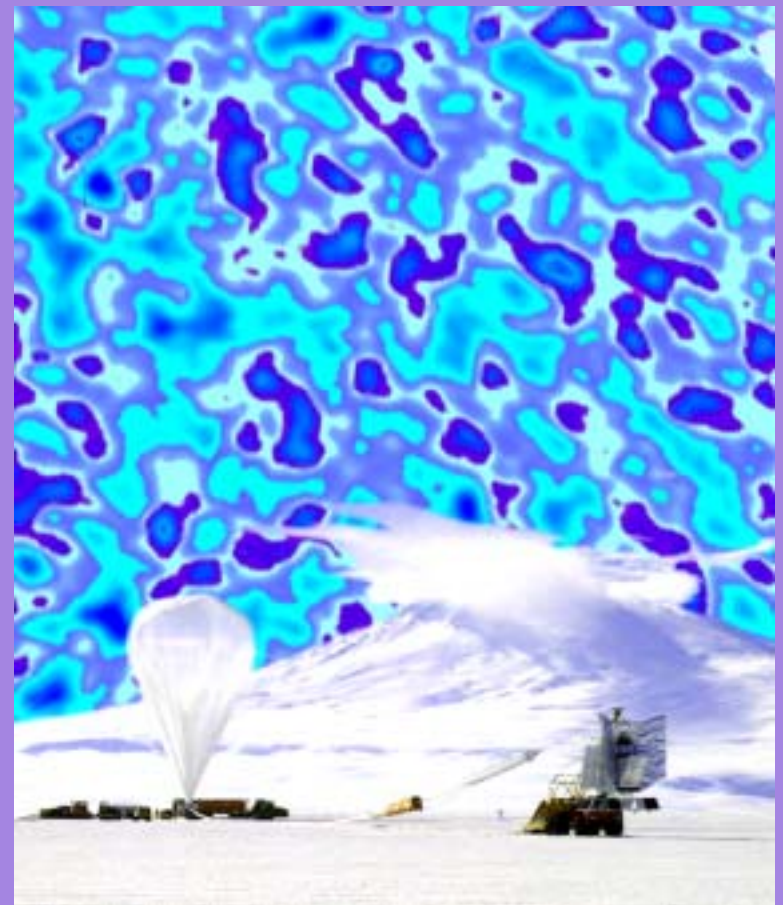
## COBE 衛星

[http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed\\_resources.html](http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed_resources.html)



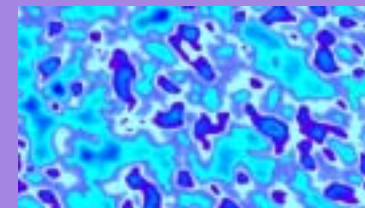
## BOOMERanG 気球実験

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

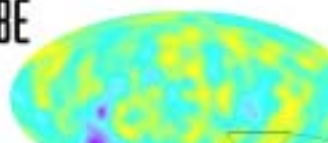




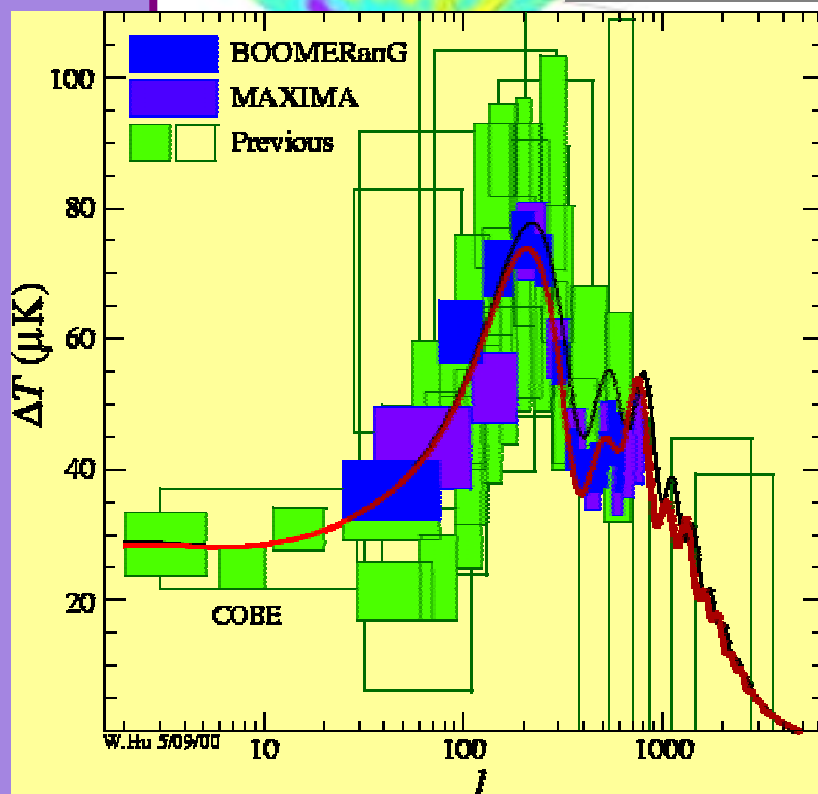
# CMB温度地図と宇宙の曲率



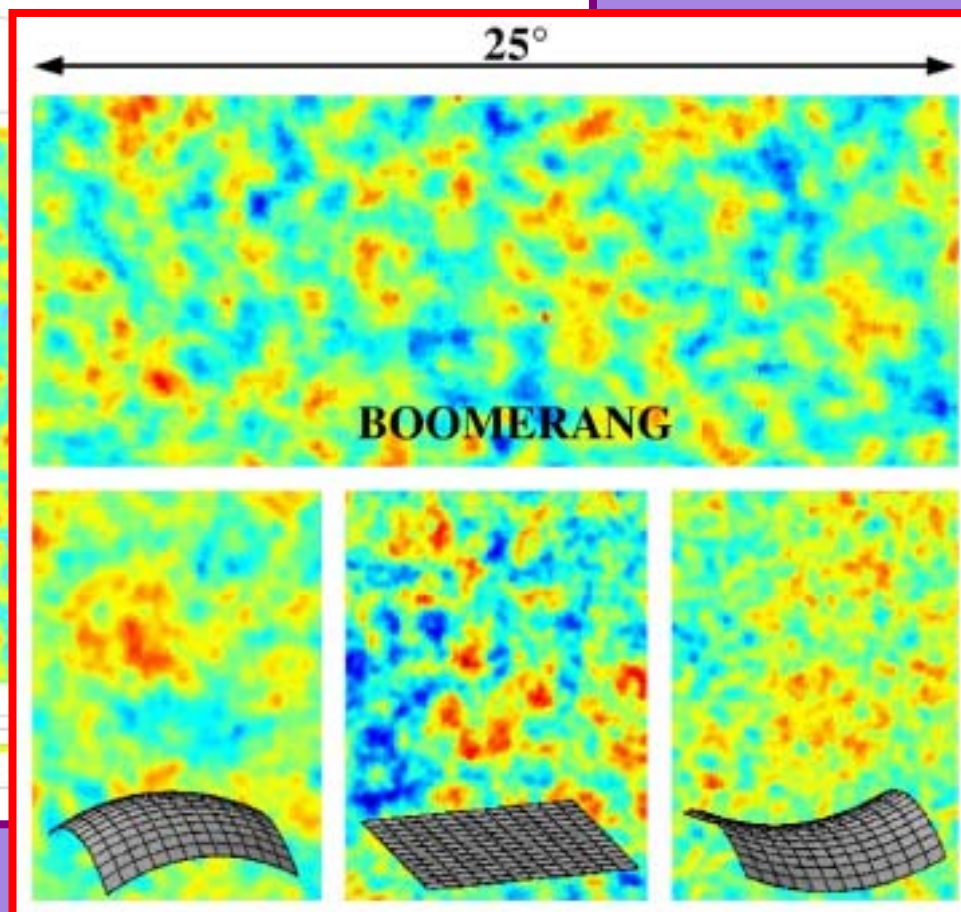
COBE



■ 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



# MAP (**M**icrowave **A**nisotropy **P**robe)衛星

1965



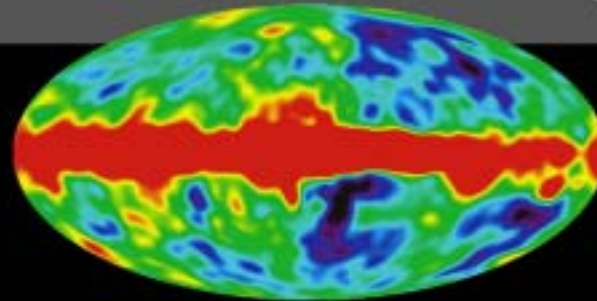
Penzias and  
Wilson



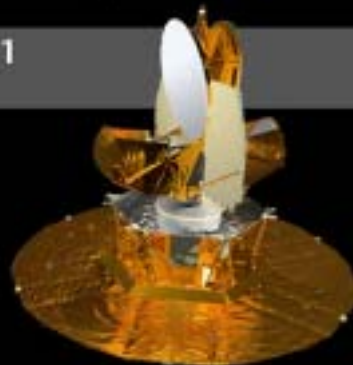
1992



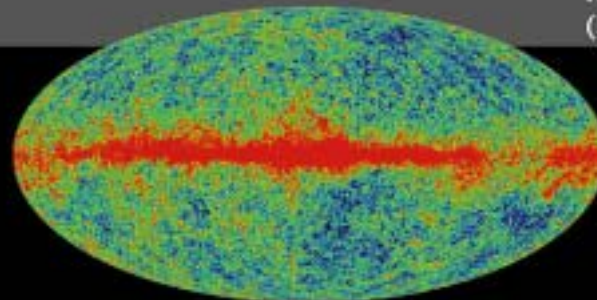
COBE



2001



MAP  
(Simulated)

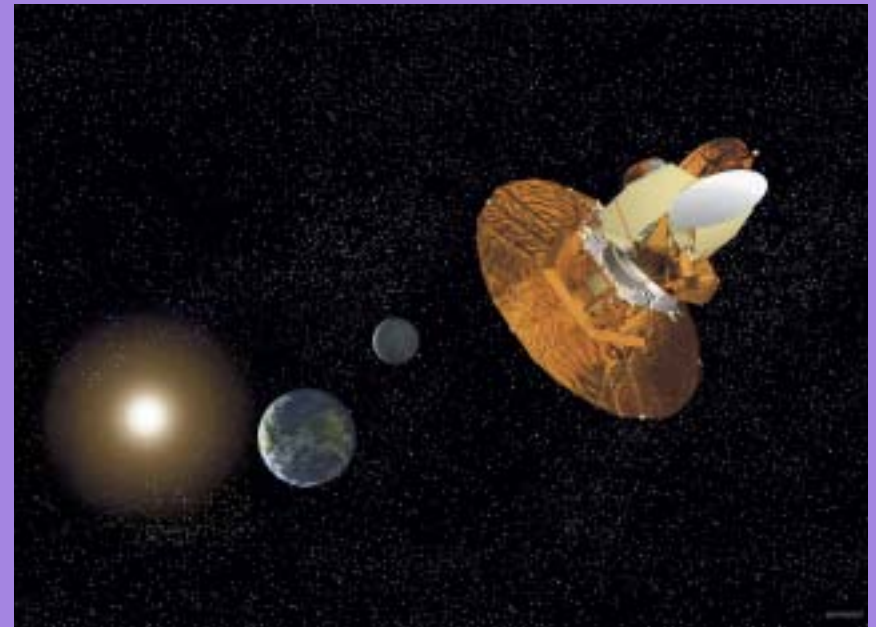
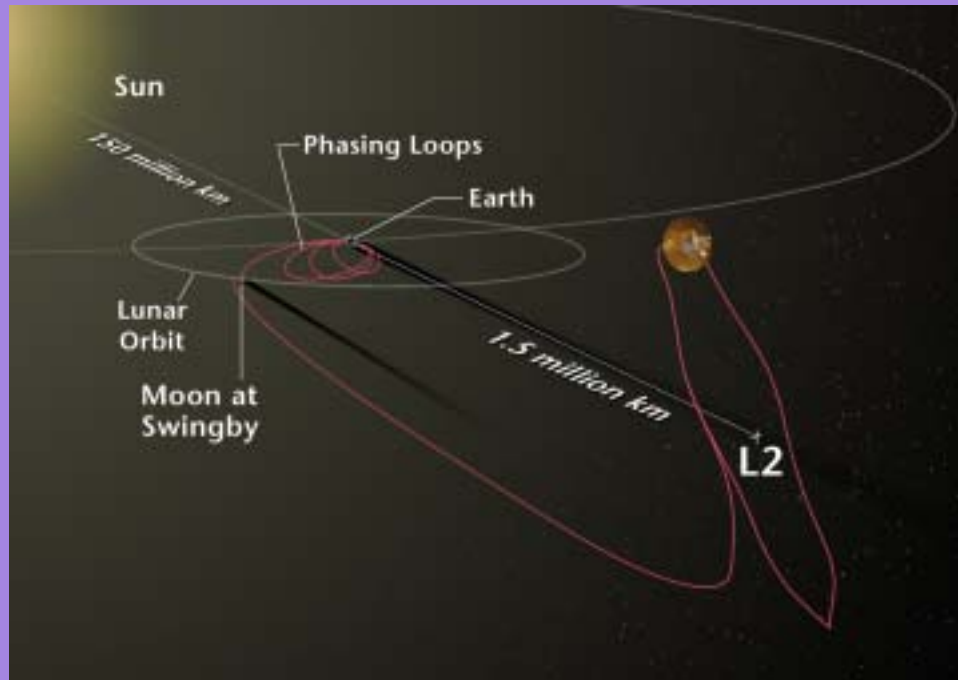


# MAPの打ち上げ: 2001年6月30日15:46:46 EDT



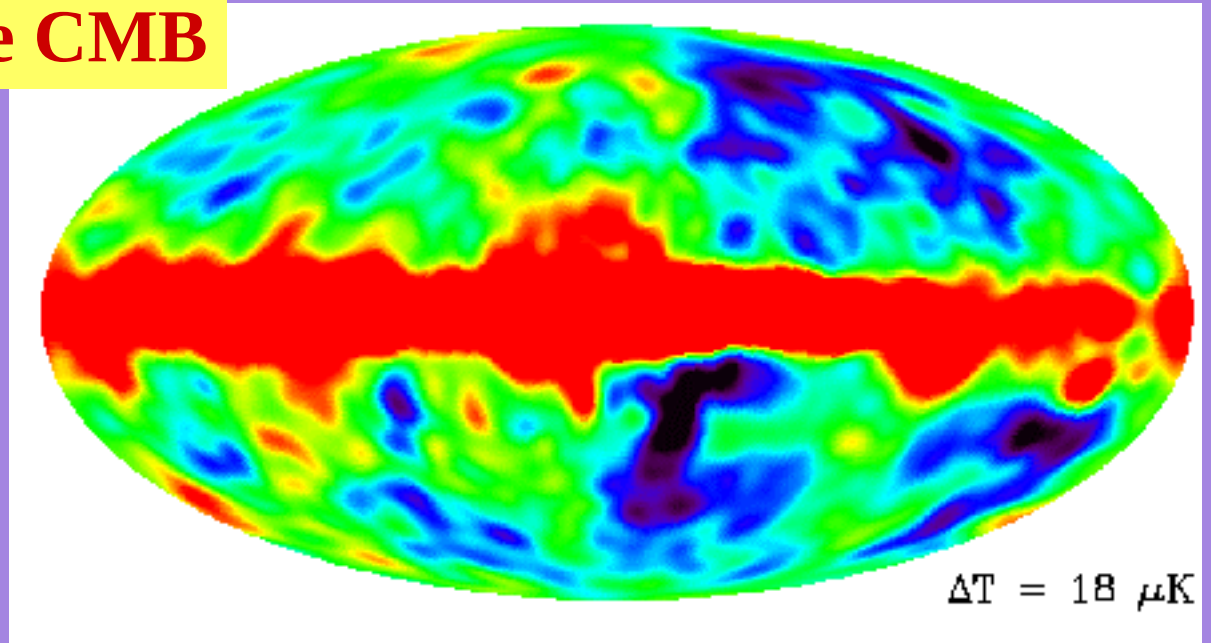


# MAP launched !

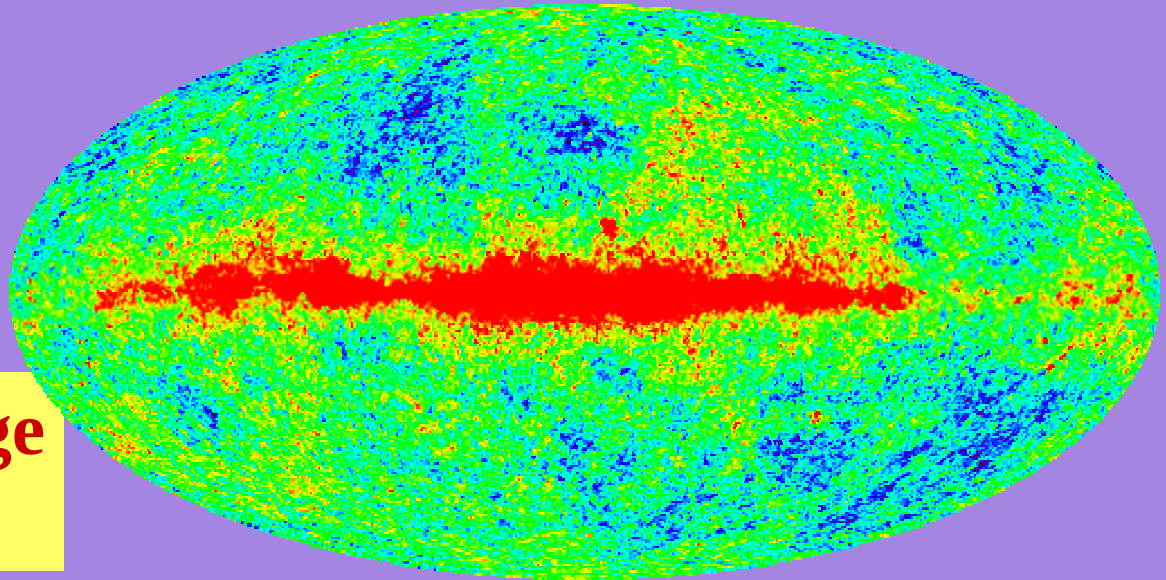


## COBE image of the CMB

COBE  
vs  
MAP



Simulated MAP image  
of the CMB

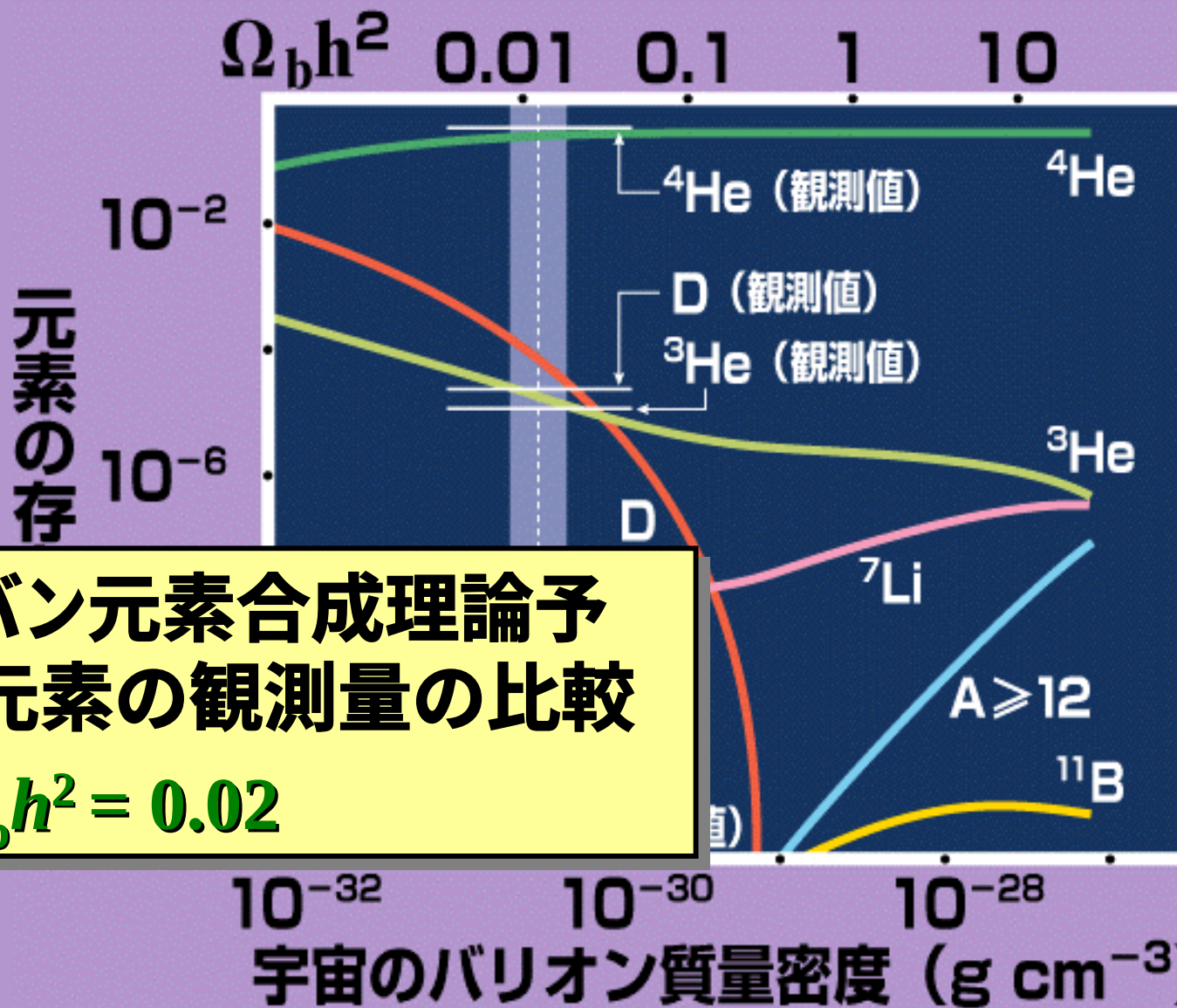




# 宇宙論パラメータとその決定法

| 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  |
| $\Omega_b$  | 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     |
| $\Omega_0$  | 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 |
| $\lambda_0$ | 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<br>( $= \Omega_0 + \lambda_0 - 1$ ) | マイクロ波背景輻射の温度揺らぎの角度スペクトル       |

# ビッグバン元素合成と バリオン密



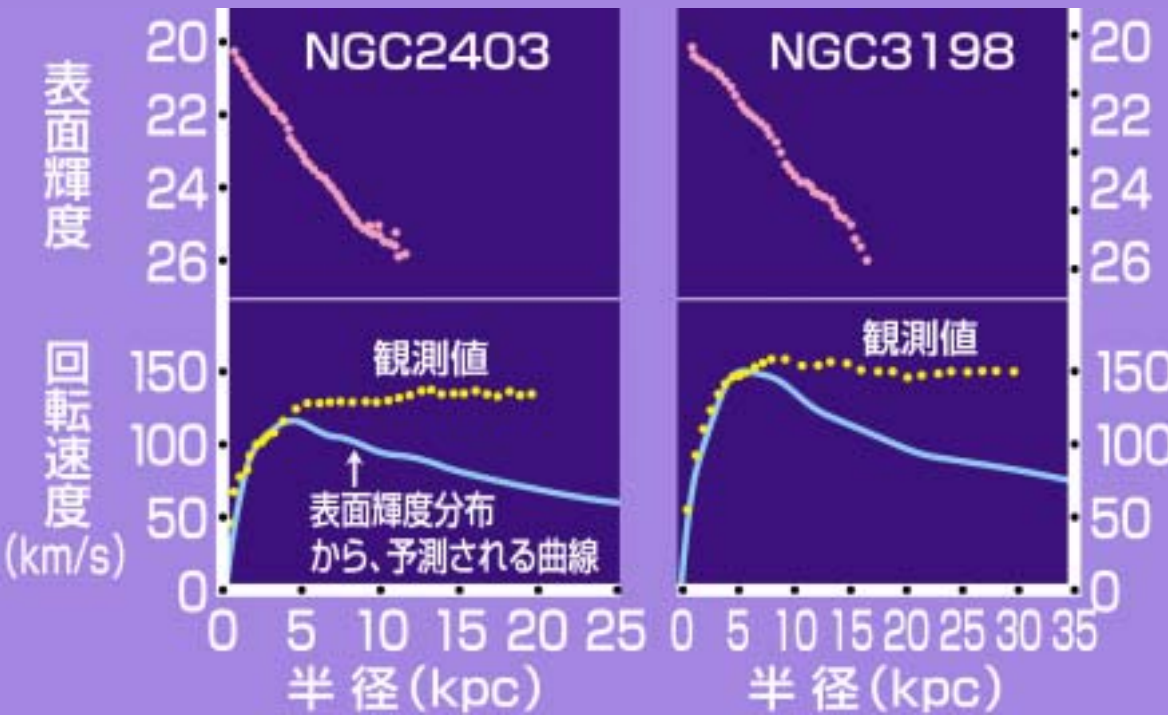
■ ビッグバン元素合成理論予言と軽元素の観測量の比較

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

# 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

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

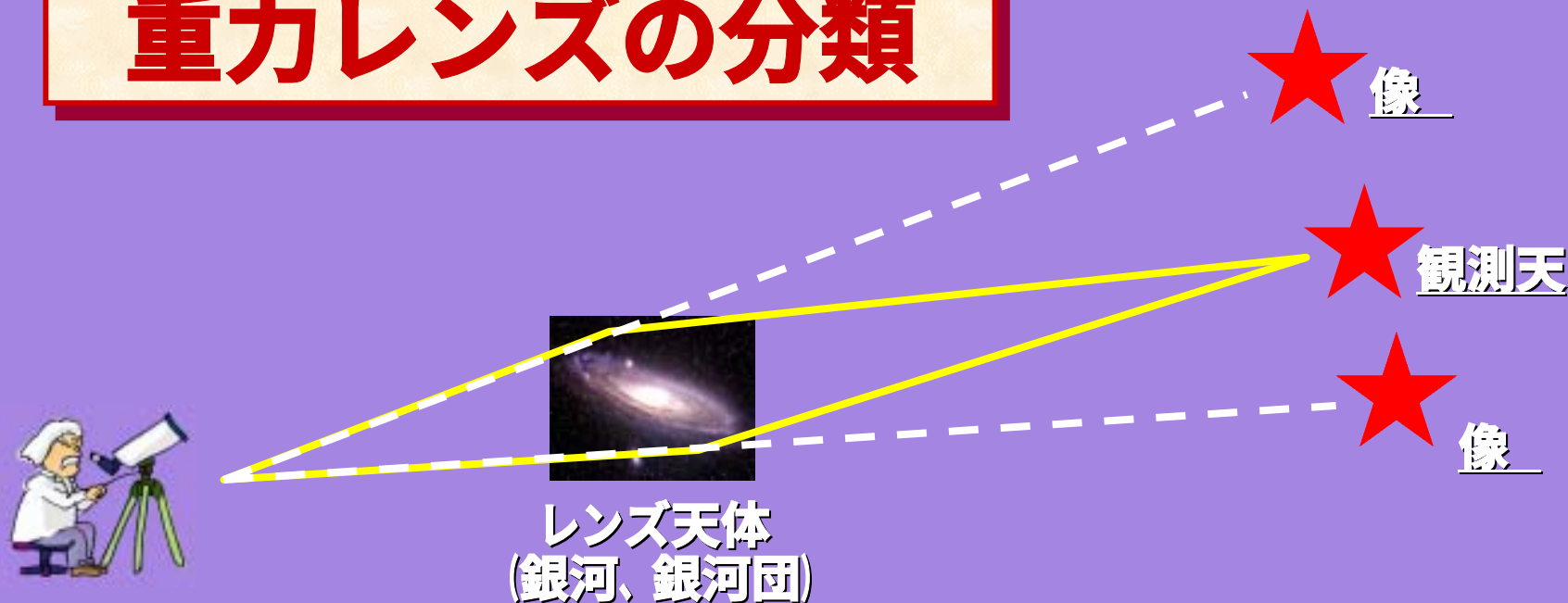
$$\Rightarrow v(r) = \sqrt{\frac{GM(<r)}{r}}$$

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

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)**

# 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)

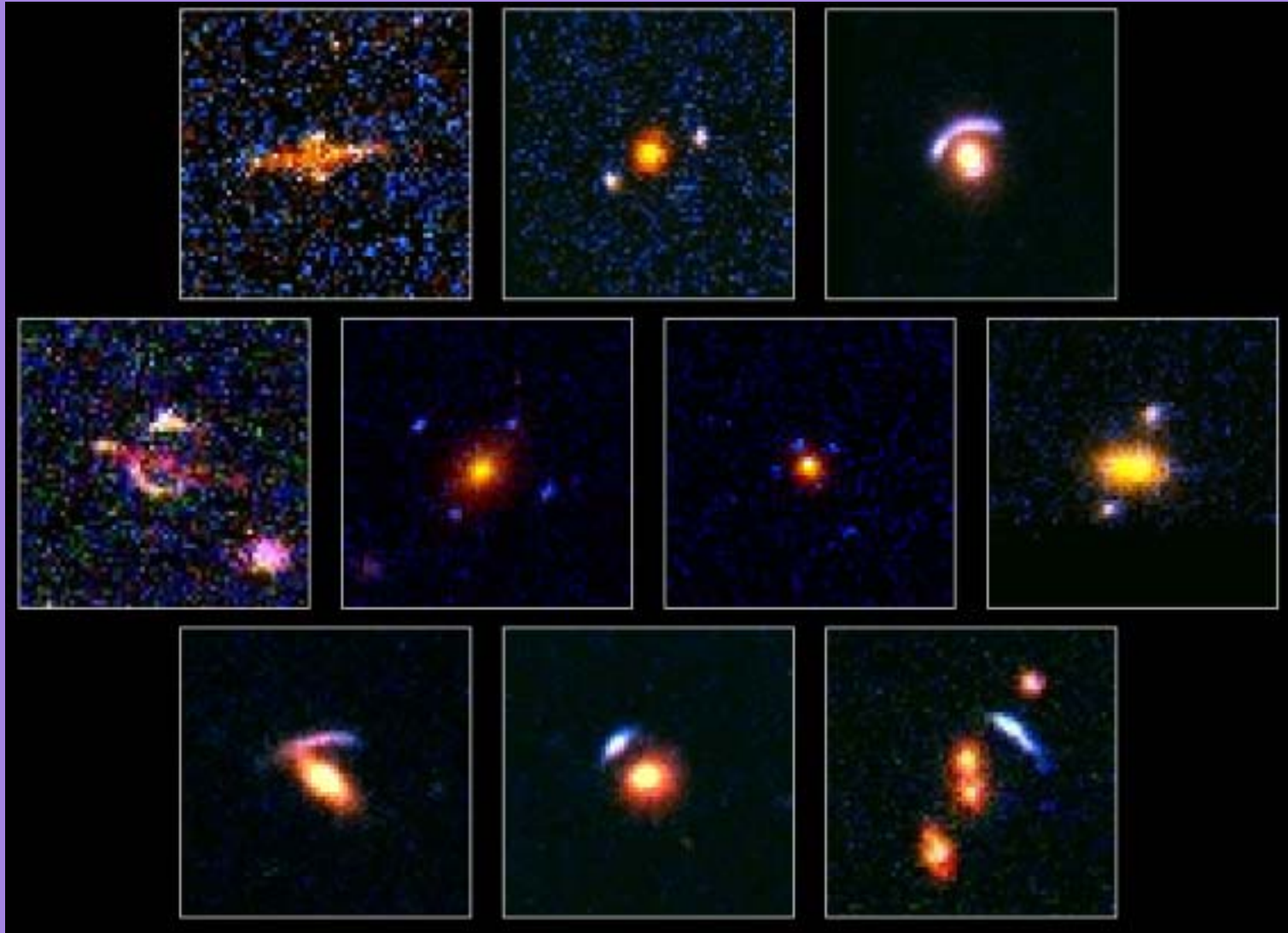


# ハッブル宇宙望遠鏡

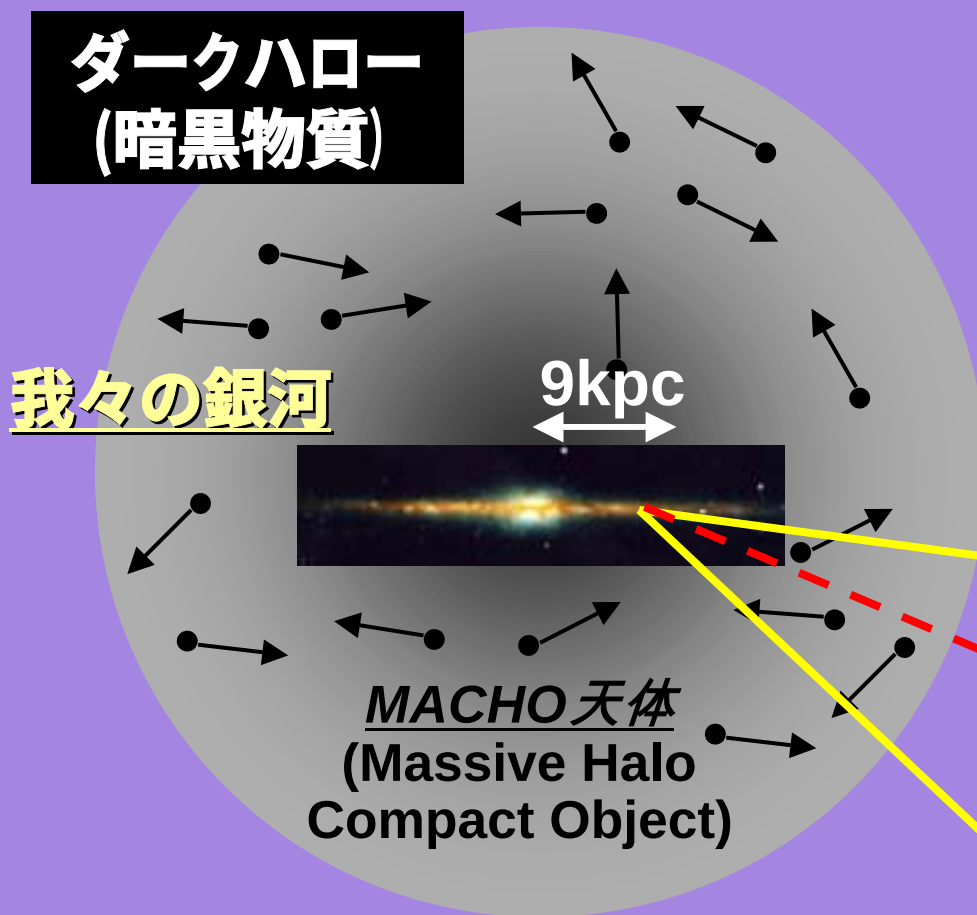
- 1990年4月24日に打ち上げられた、史上初の可視光宇宙望遠鏡（口径2.4m）。光学系の設計ミスでピンボケであったが、1993年12月2日に打ち上げられたスペースシャトルエンデバー号による修理ミッションの結果、当初の目的であった0.1秒角以下の解像度を達成。20世紀可視光天文学の金字塔である。



# 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



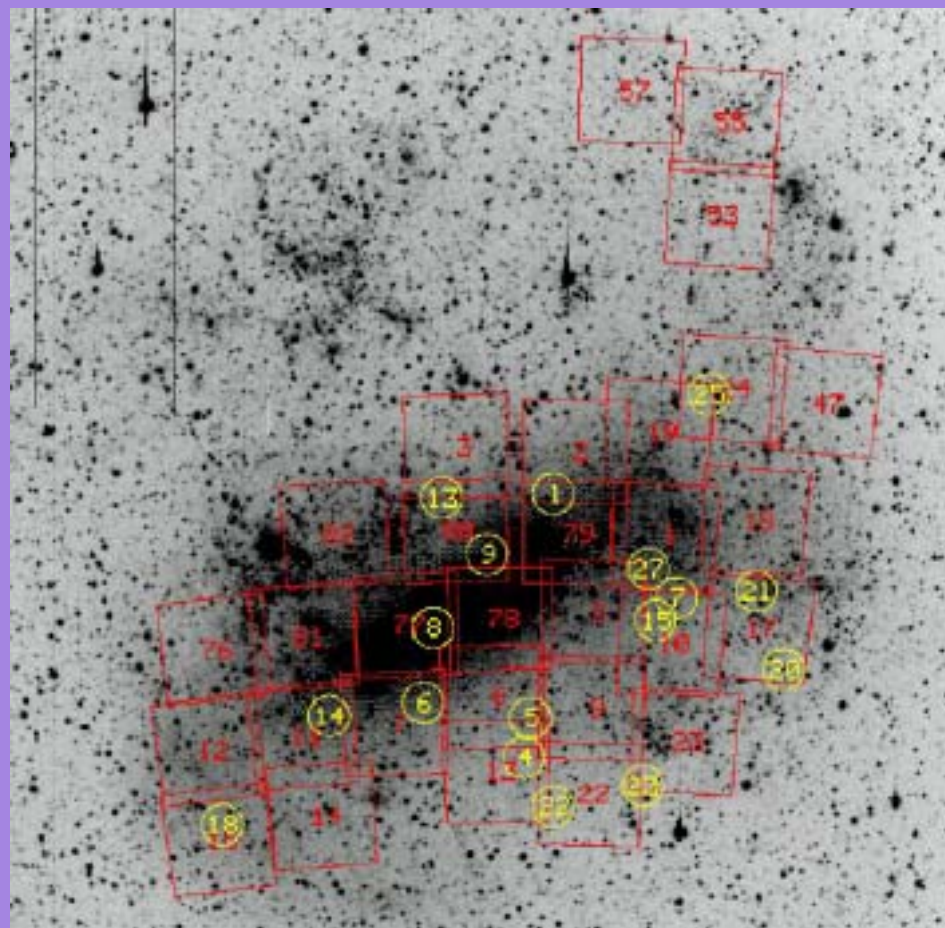
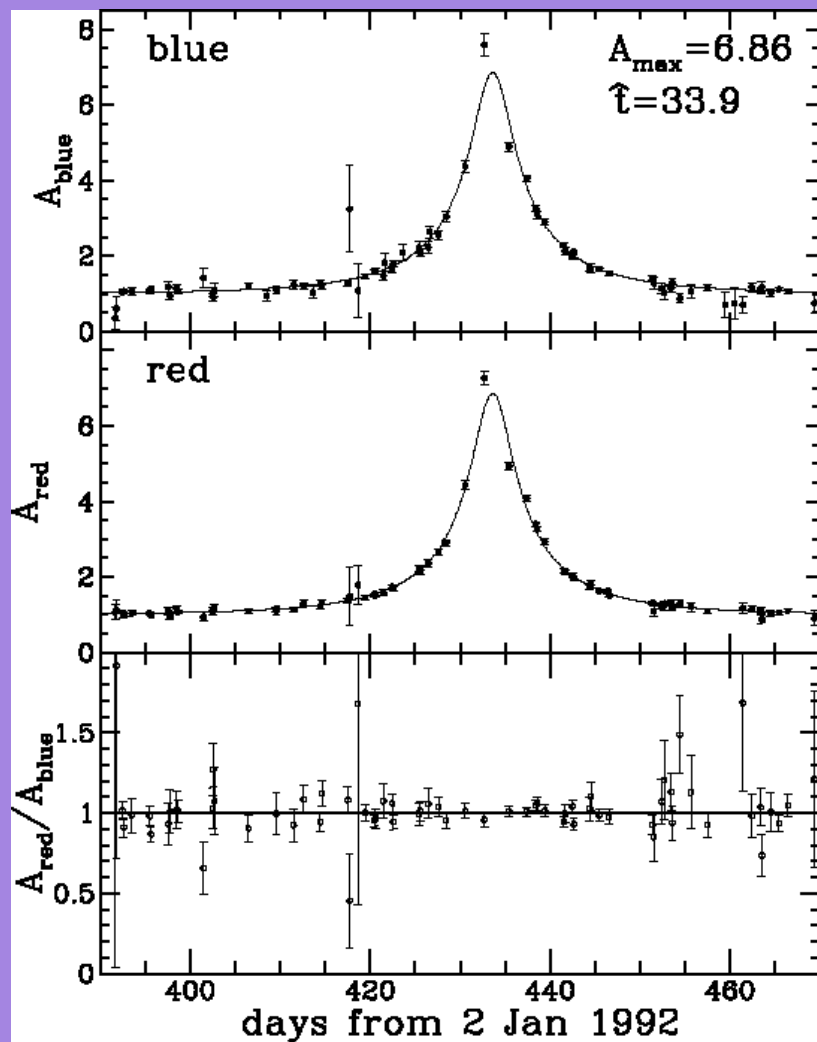
■ 銀河系ハローの  
MACHO天体によ  
る重力マイクロレン  
ズ現象で大マゼラ  
ン星雲の星が増光  
する兆候を探す

50kpc



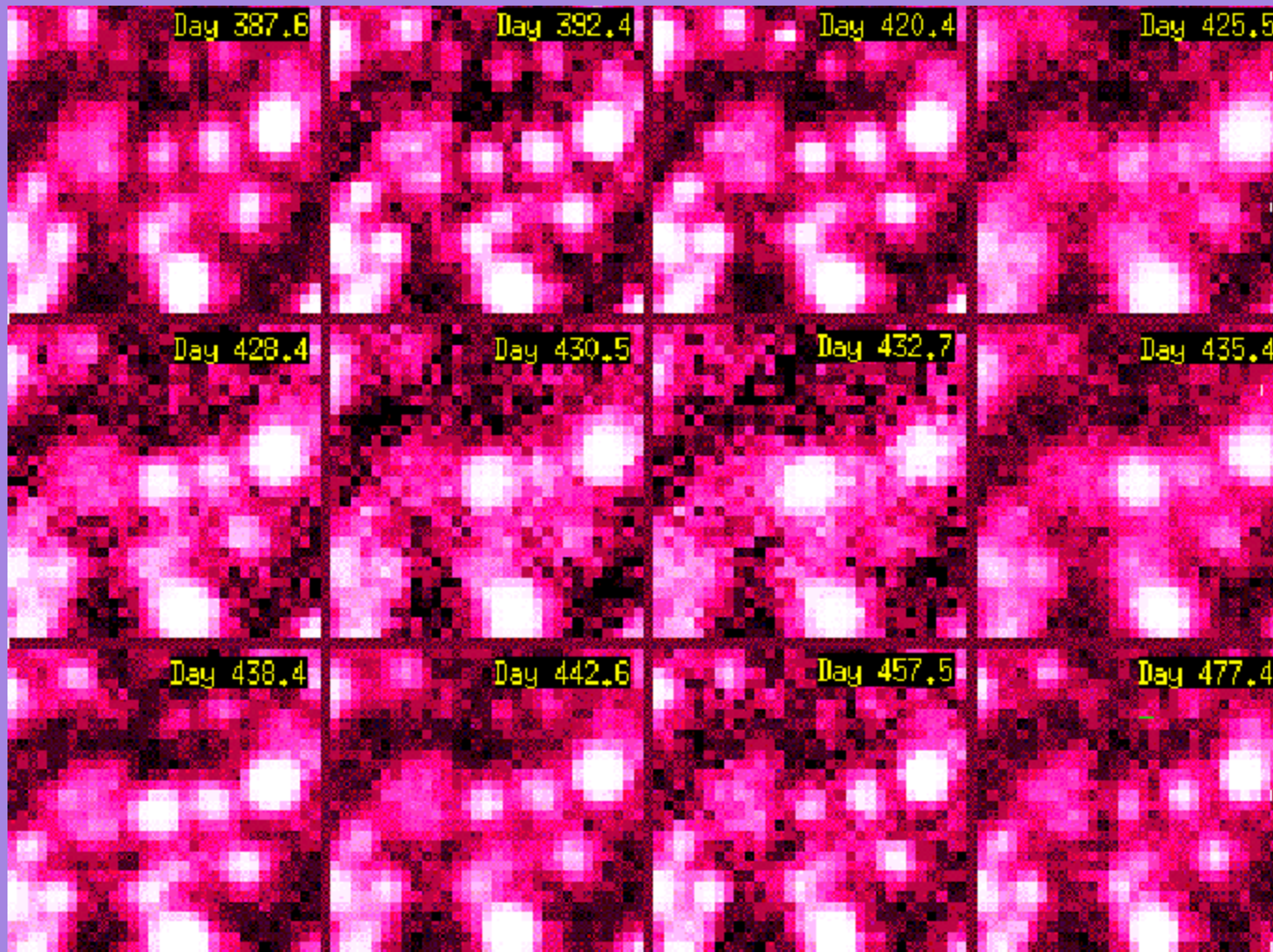


# MACHOイベントの光度曲線



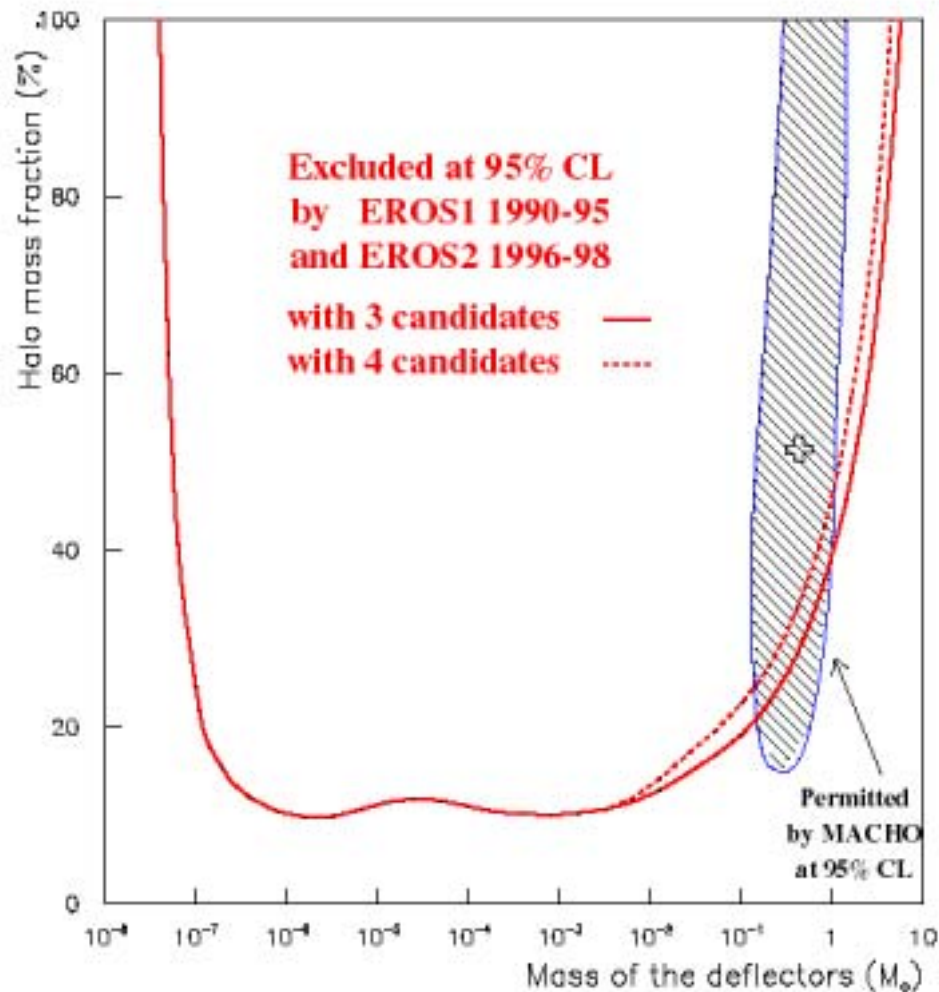


# Massive Compact Halo Objectの発見



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

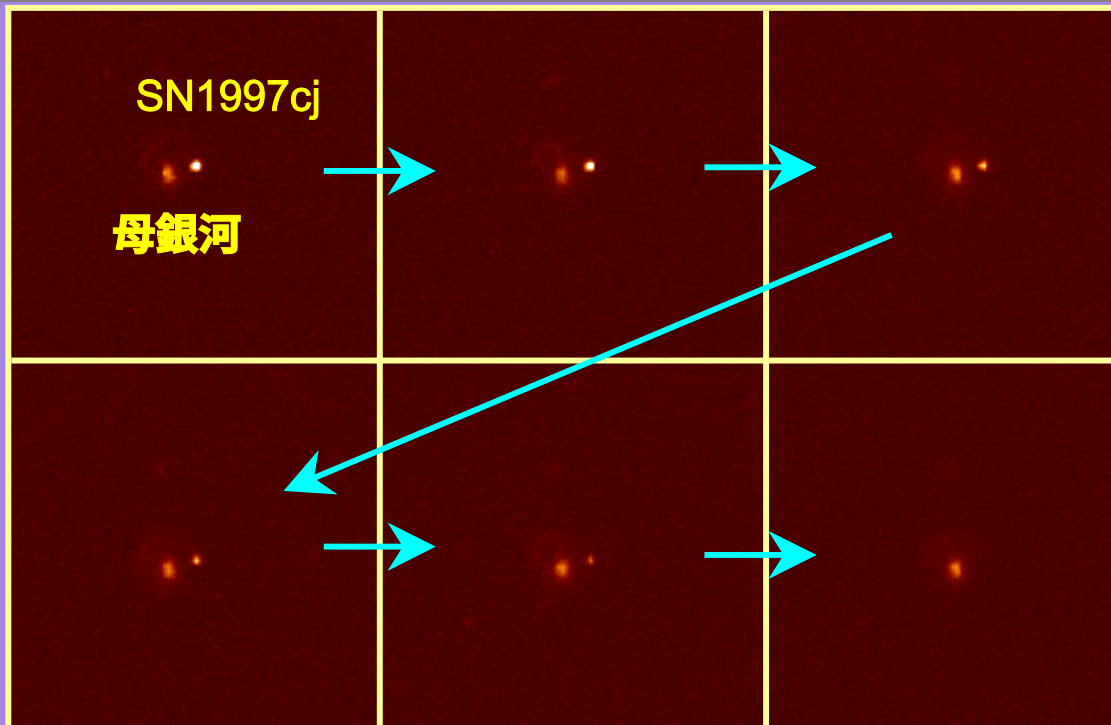


- 銀河系ハローには確かにMACHOが存在する
- 質量は太陽の0.1から1倍程度
- ハロー全体に占める質量は2割程度(つまり、それ以外のダークマターも存在する)

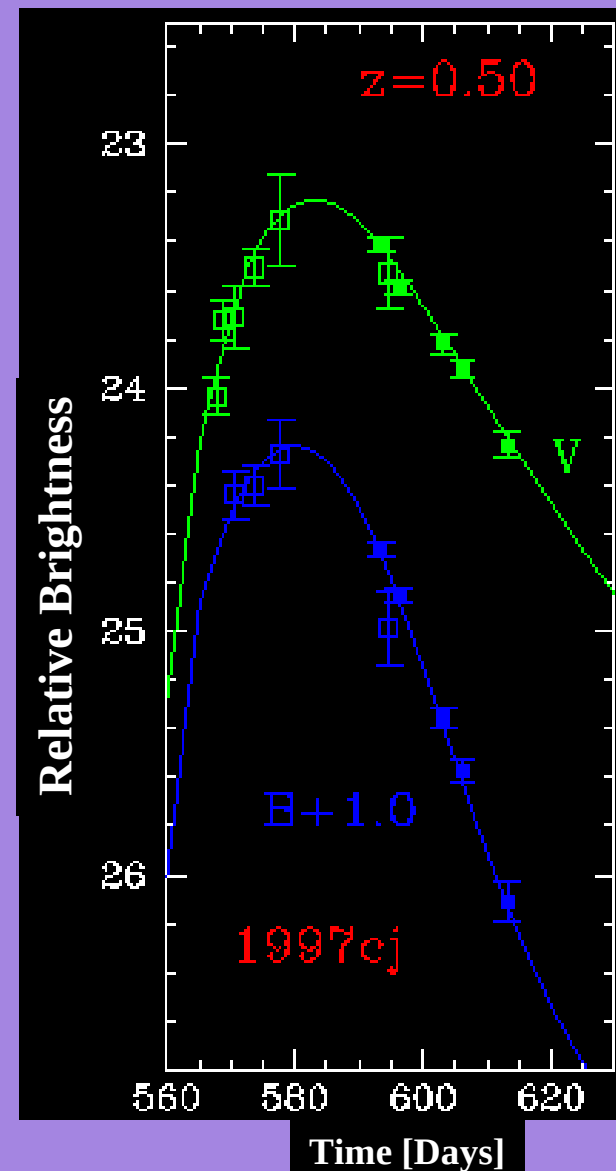
MACHO mass fraction  
Lasserre et al. (2000):  
EROS collaboration

# Ia型超新星の光度曲線の測定

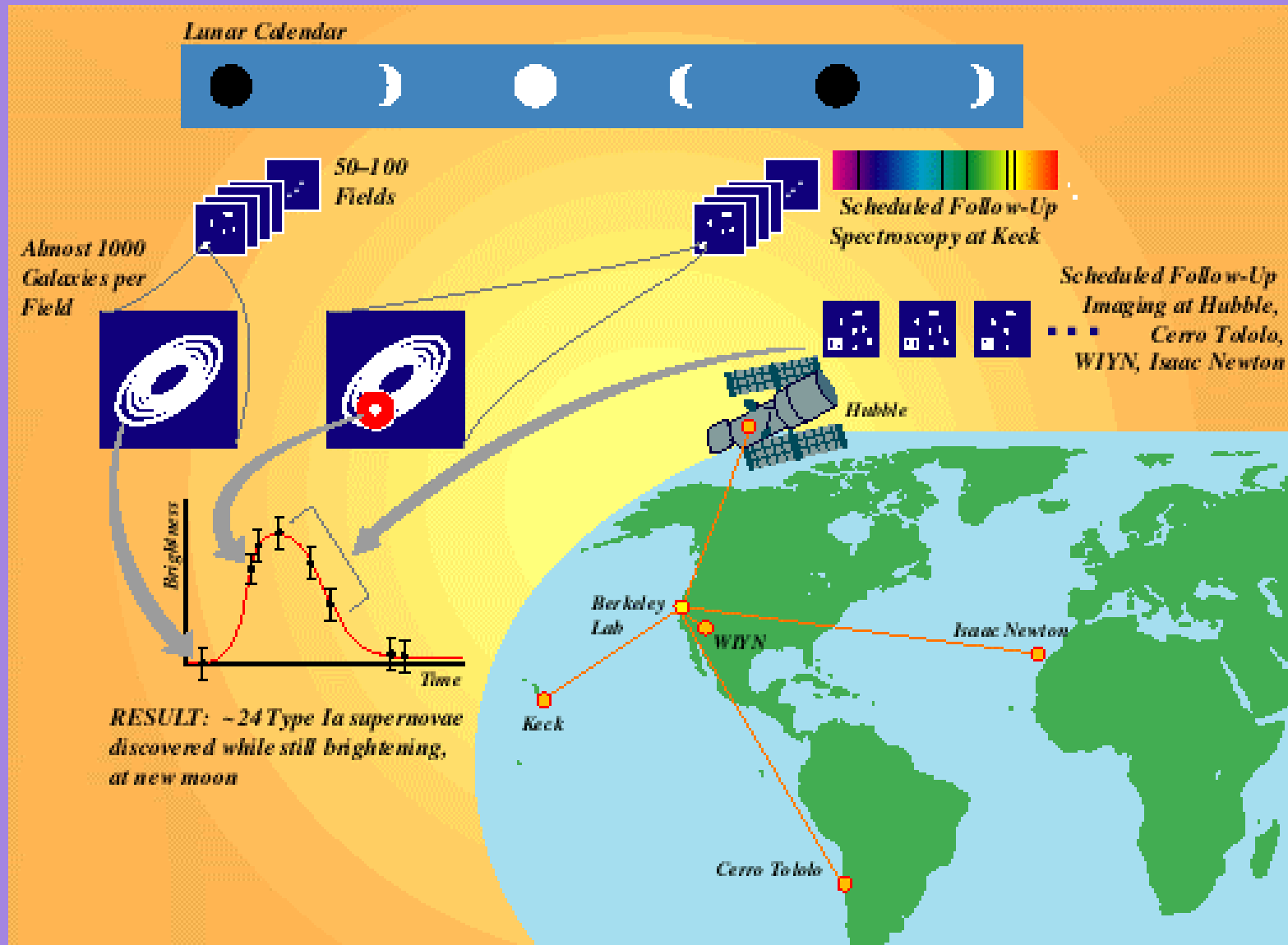
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



HSTで測定したSN 1997cjの明るさの時間変

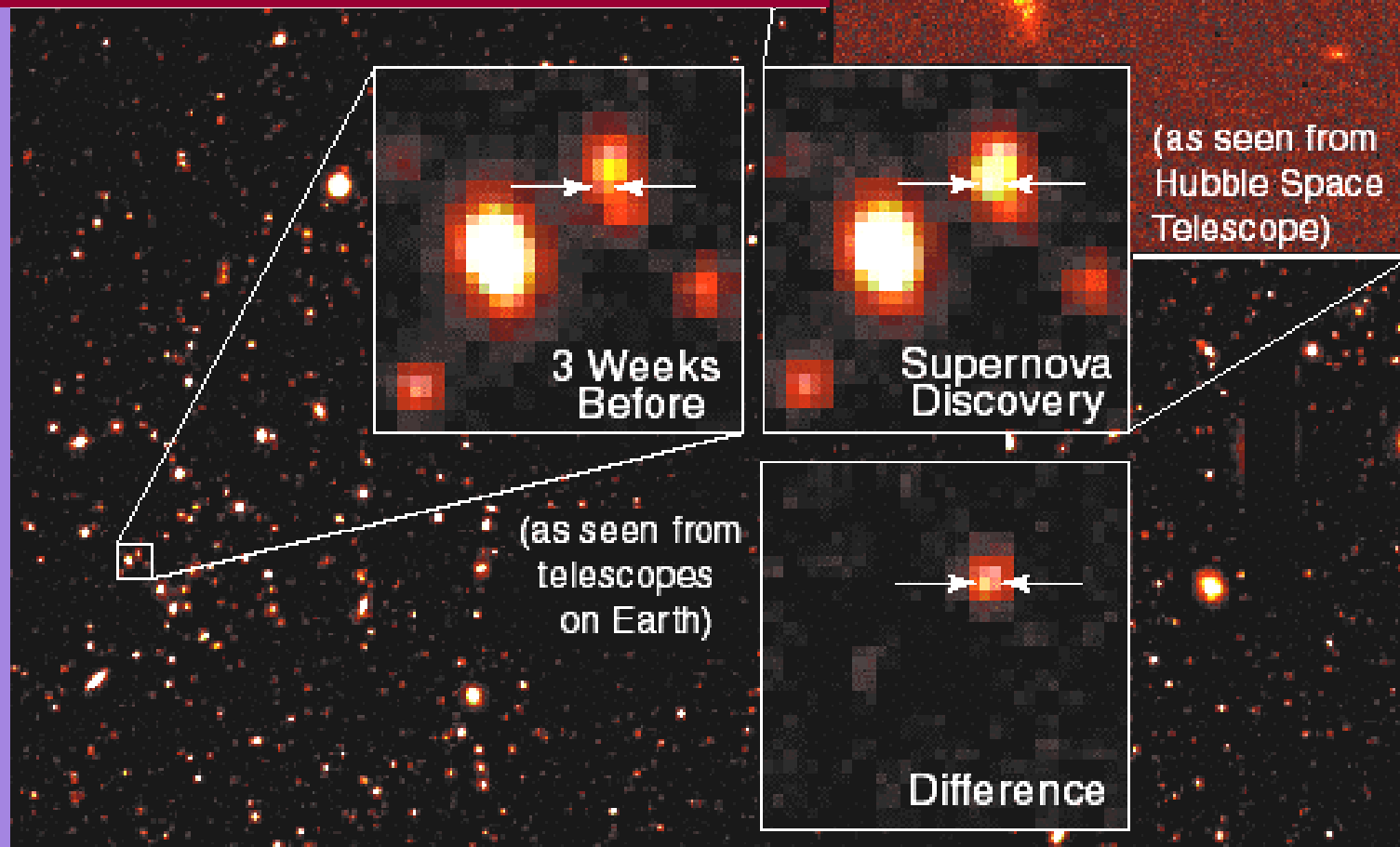


# Supernova Cosmology Project: Strategy

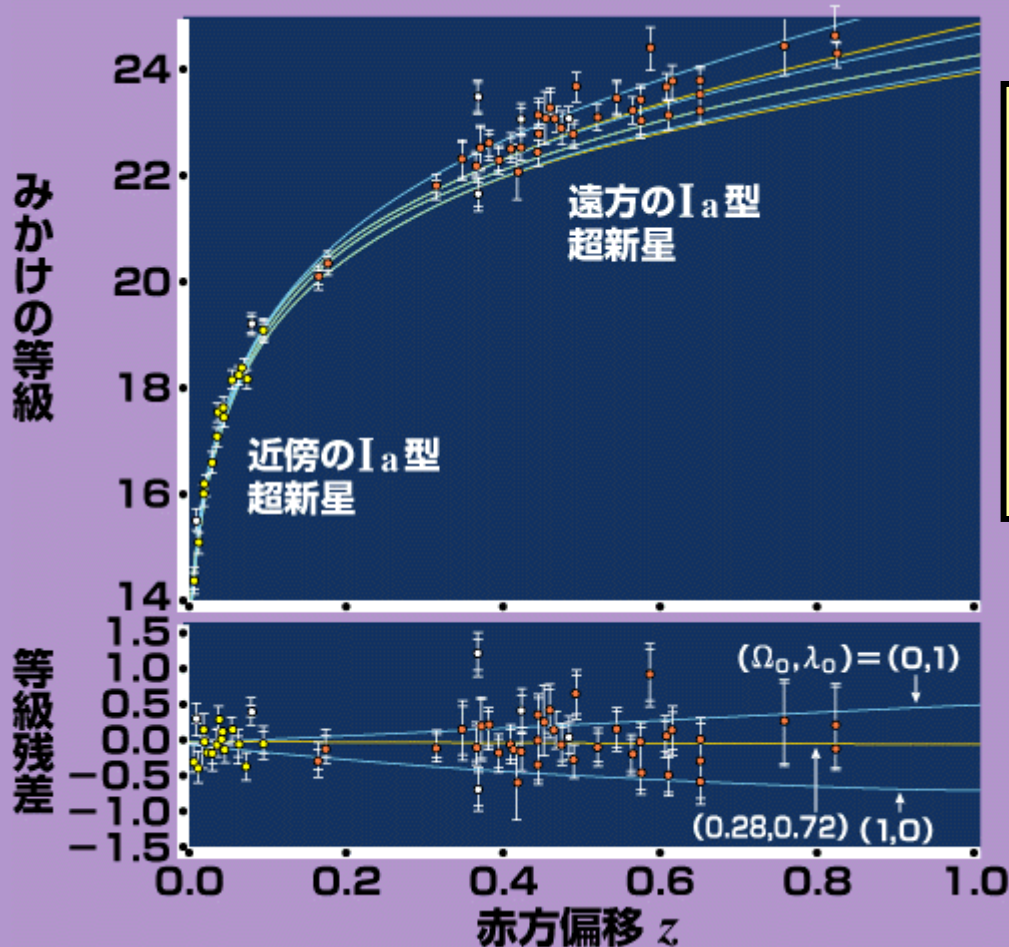




# Supernova Cosmology Project : Ia型超新星1998baの観測



# 超新星と宇宙定数



■ 遠方超新星までの距離推定

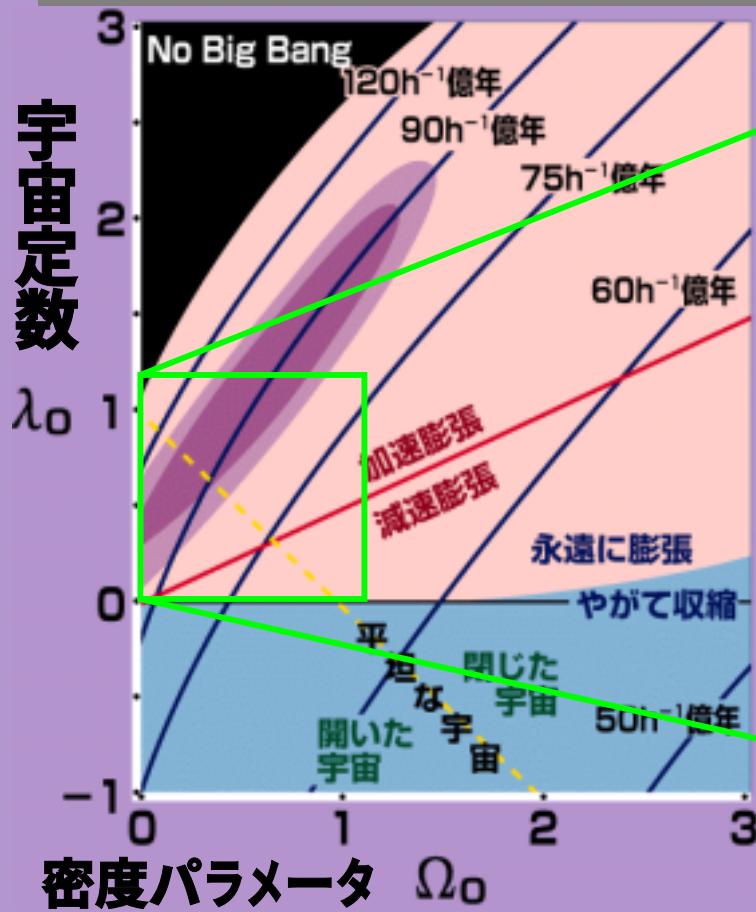
$$\Rightarrow \Omega_0 \ll 1, \lambda_0 > 0$$

**宇宙定数の存在！**

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

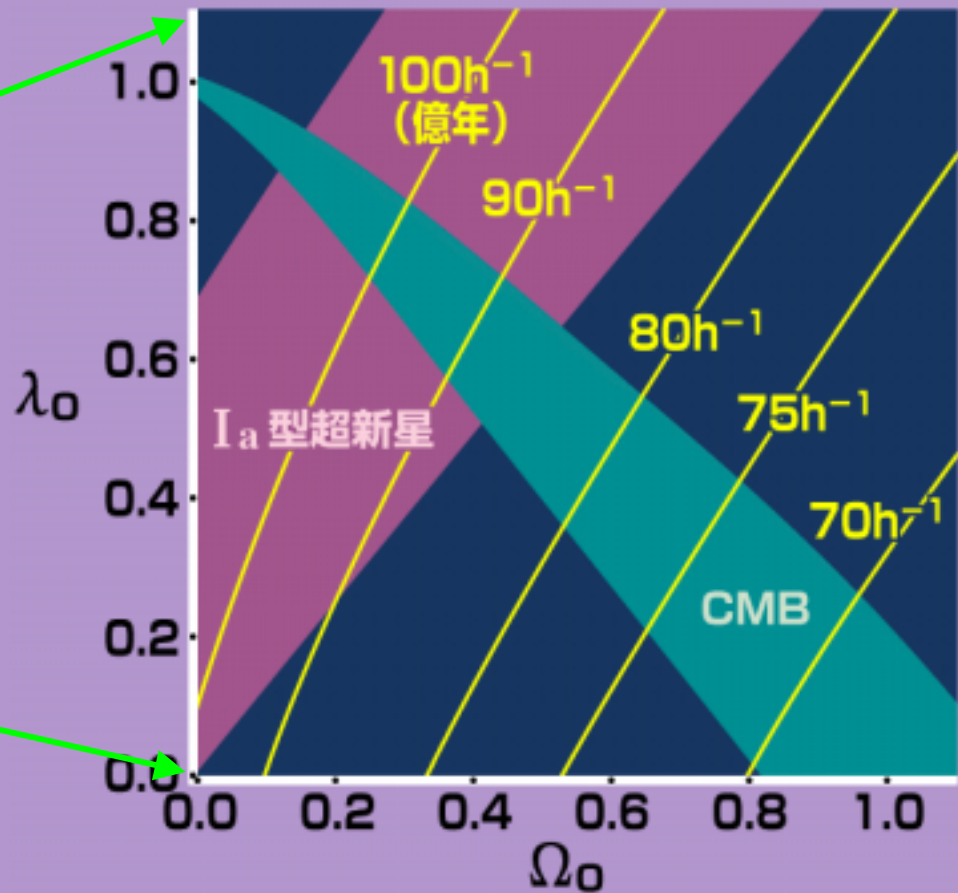
# 質量密度パラメータと宇宙定数

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



密度パラメータ  $\Omega_0$

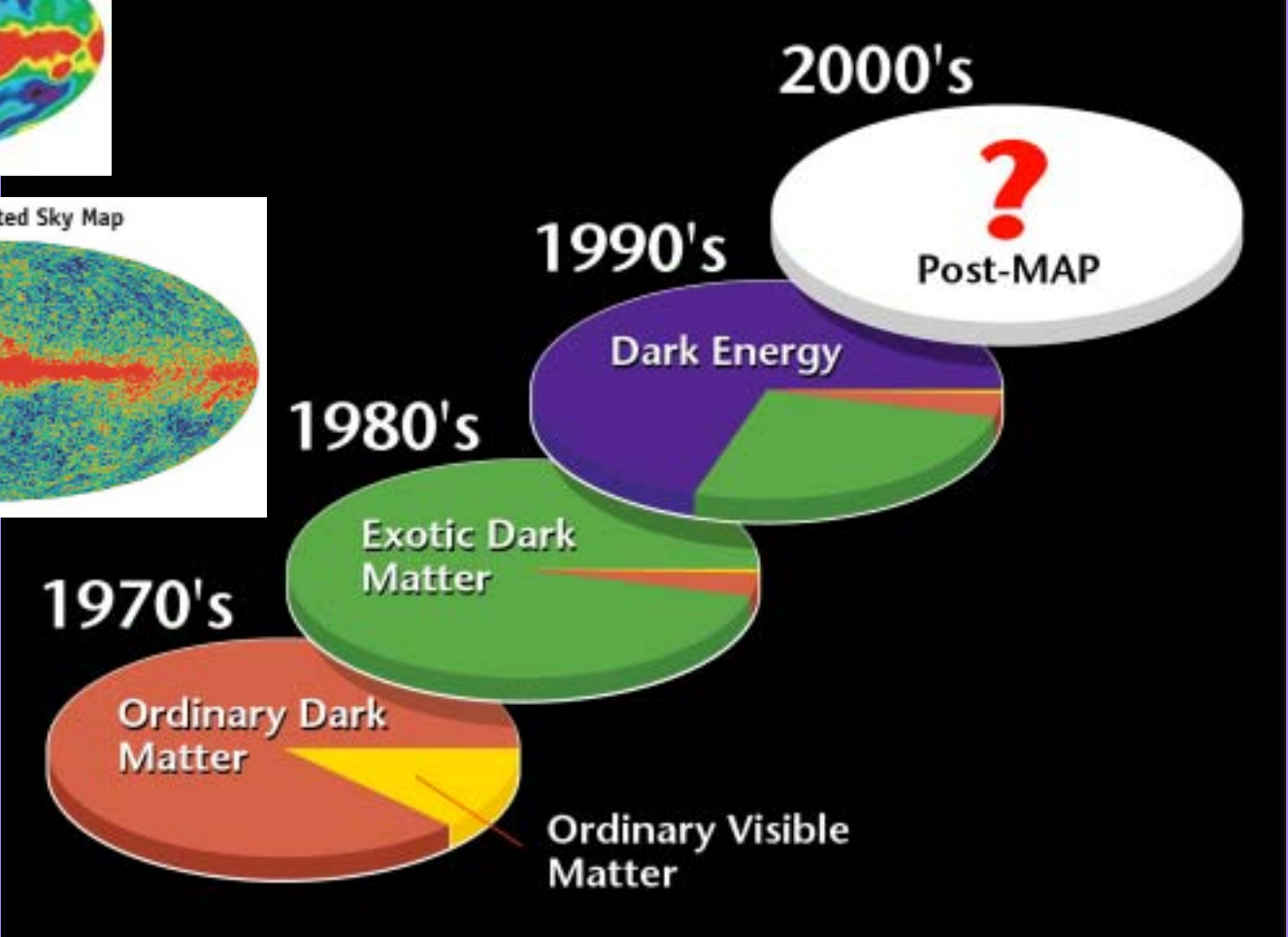
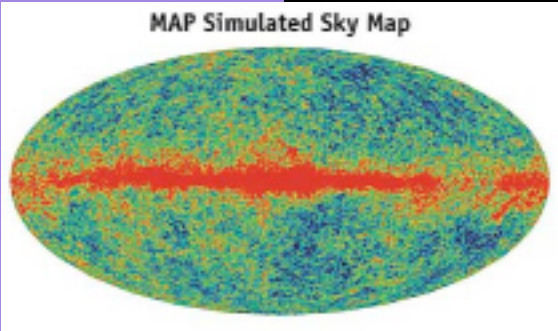
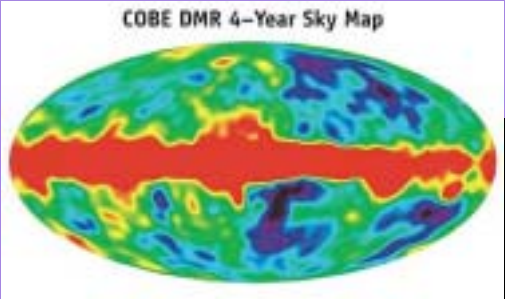
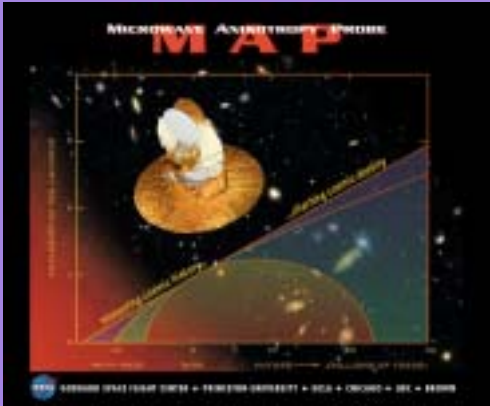
超新星観測からの制限



CMB 観測からの制限



# 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

# 宇宙の質量密度の内訳

総量 =  $1 \pm 0.2$



ダークエネルギー (宇宙定数)  $0.8 \pm 0.2$



全物質  $0.4 \pm 0.1$



星

$0.005 \pm 0.002$



バリオン

$0.04 \pm 0.005$



CDM

$0.35 \pm 0.1$



理論予言



# 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**

# 精密宇宙論 (Precision Cosmology) ?

--- Since people have been working on the problem for more than sixty years, perhaps the most surprising result would be that in the next decade a consistent and believable picture for the values of the cosmological parameters is at last established. ---

P.J.E.Peebles (1993) ``Principles of Physical Cosmology'' p.677

驚くべきことに、60年以上誤差100パーセントと評すべき精度でしか知られていなかった宇宙論パラメータの値が、21世紀早々すでにかなり収束している



21世紀は、**精密宇宙論 (Precision Cosmology)** だ！  
という人もいる (多い?) が、それでは結局、宇宙論は  
low risk, low returnの学問になりさがるのではないか？



# 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

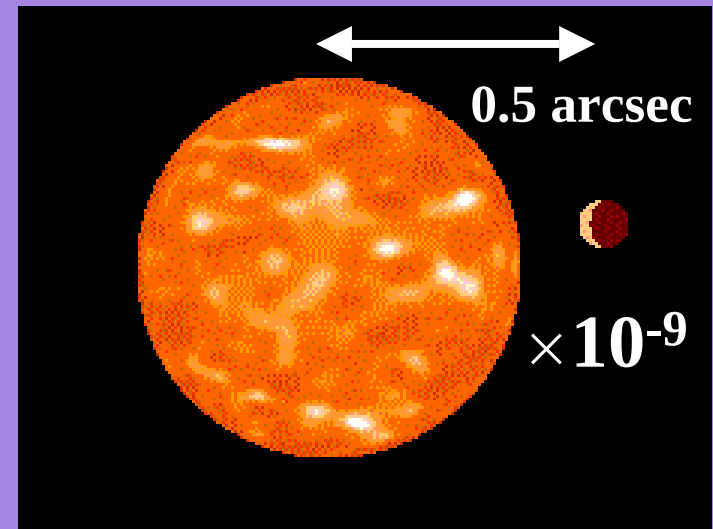
(*“Where are they ?” Fermi 1950*)

やや危ない  
↓

# 惑星の直接撮像

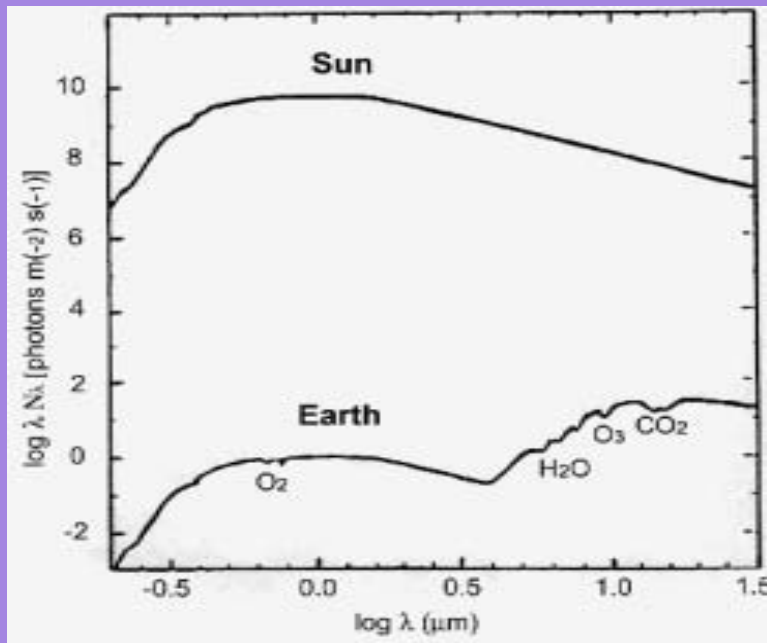
10pcから観測した木星

明るさ： 27等級（可視域）  
主星との角距離： 0.5秒角



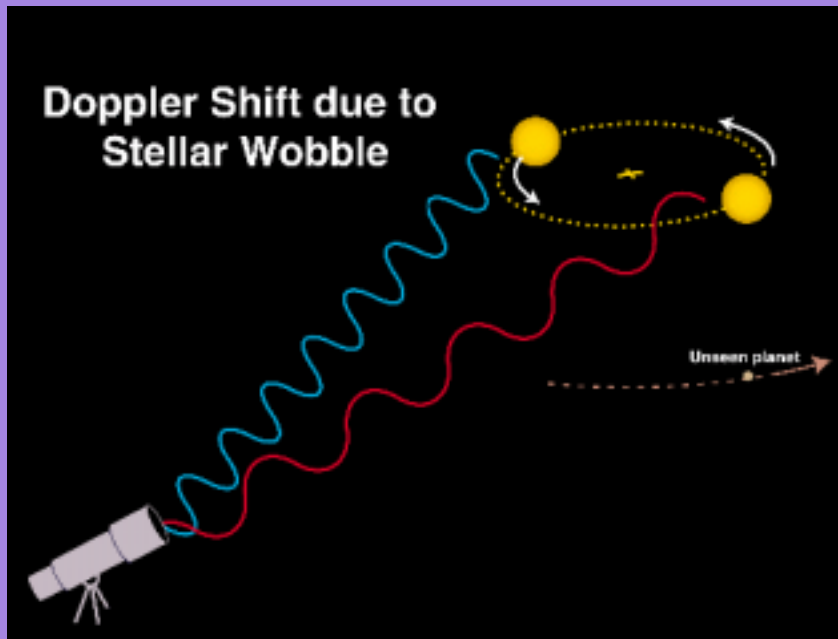
地上観測の典型的な角度分解能の大きさ内で、9桁程度も明るい主星のすぐ隣にある27等級の暗い天体を観測する

⇒ ほとんど不可能！



# 主星の速度変動

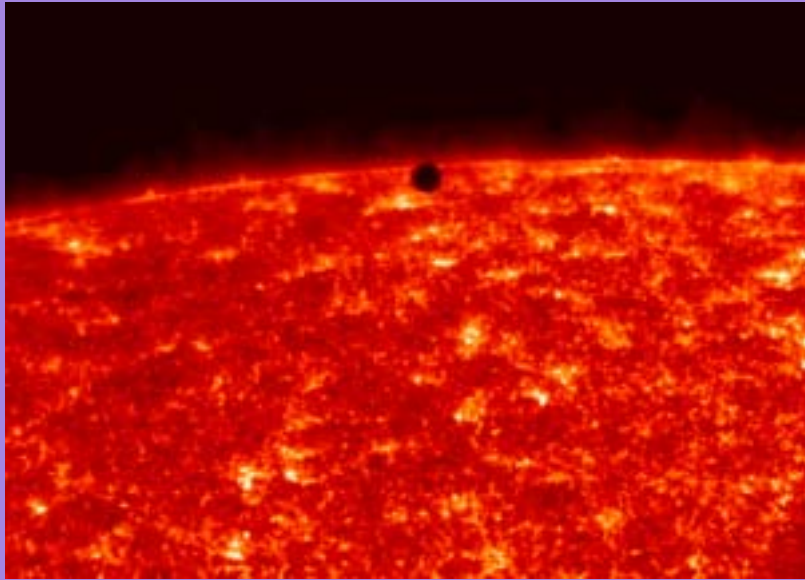
惑星は直接見えなくても、  
主星の軌道はその影響を受ける



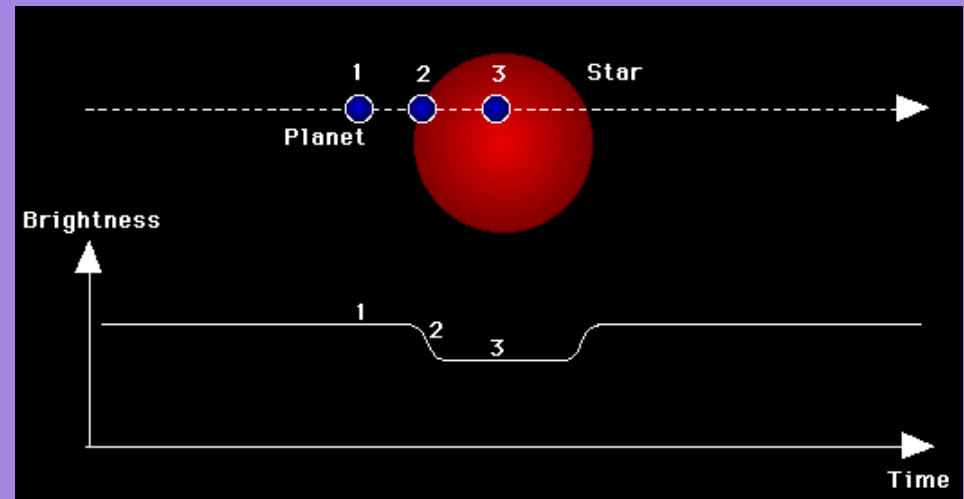
**太陽の受ける速度摂動:**  
**12.5 m/s (木星)**  
**0.1 m/s (地球)**  
**(参考) 地球の公転速度**  
**3万 m/s**

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

# 主星の光度変動：惑星による食



太陽を横切る水星の画像  
(TRACE衛星:1999年11月)



食が観測できる確率:  $0.3\%$   $(\text{AU}/\text{軌道半径})(R_{\text{主星}}/R_{\text{太陽}})$

主星の光度変動:  $1\%$   $(R_{\text{惑星}}/R_{\text{木星}})^2(R_{\text{太陽}}/R_{\text{主星}})^2$

⇔ 地上での測光精度:  $0.1\%$  が限界 (木星なら○、地球は×)

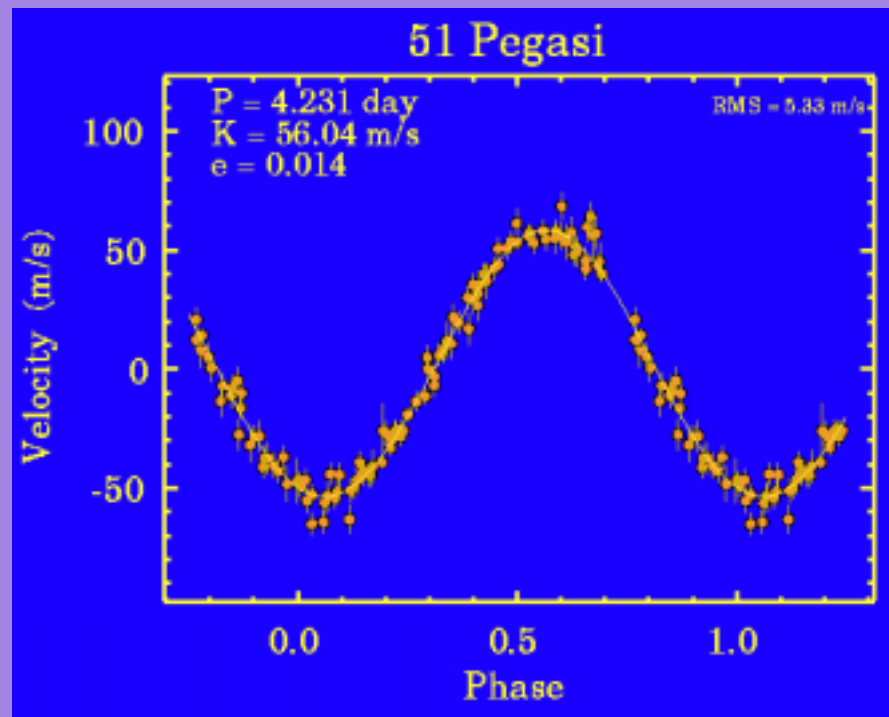
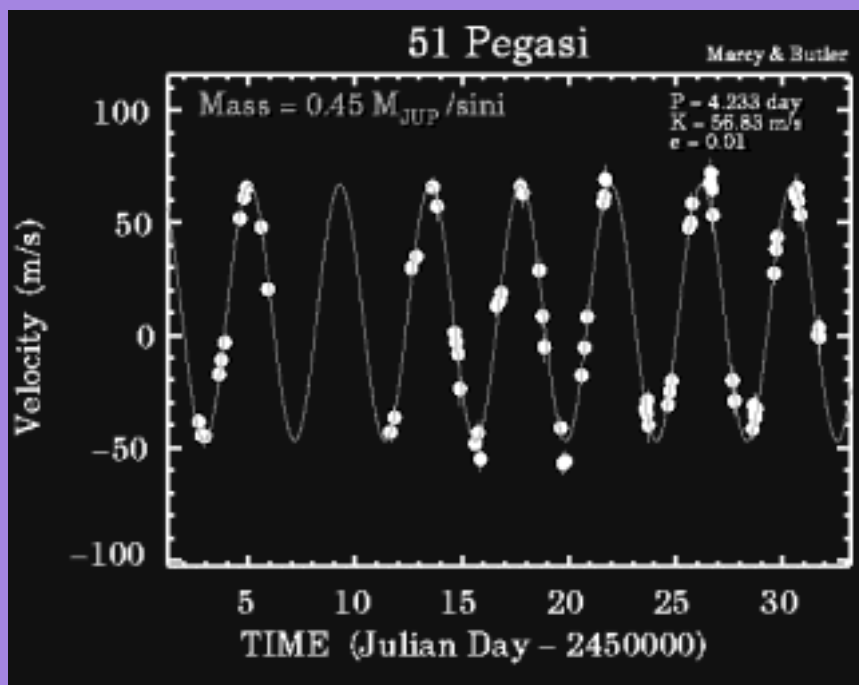


# 太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年: PSR1257-12の周りに3つの“惑星”を発見 (Wolszczan & Frail)
- 1995年: 主系列星 51 Pegasiの周りに惑星を発見 (Mayor & Quelos)
- 1999年: 主系列星  $\upsilon$  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.)
- 2001年: 系外惑星大気中にNaを発見
- 2002年6月19日時点で91個の系外惑星

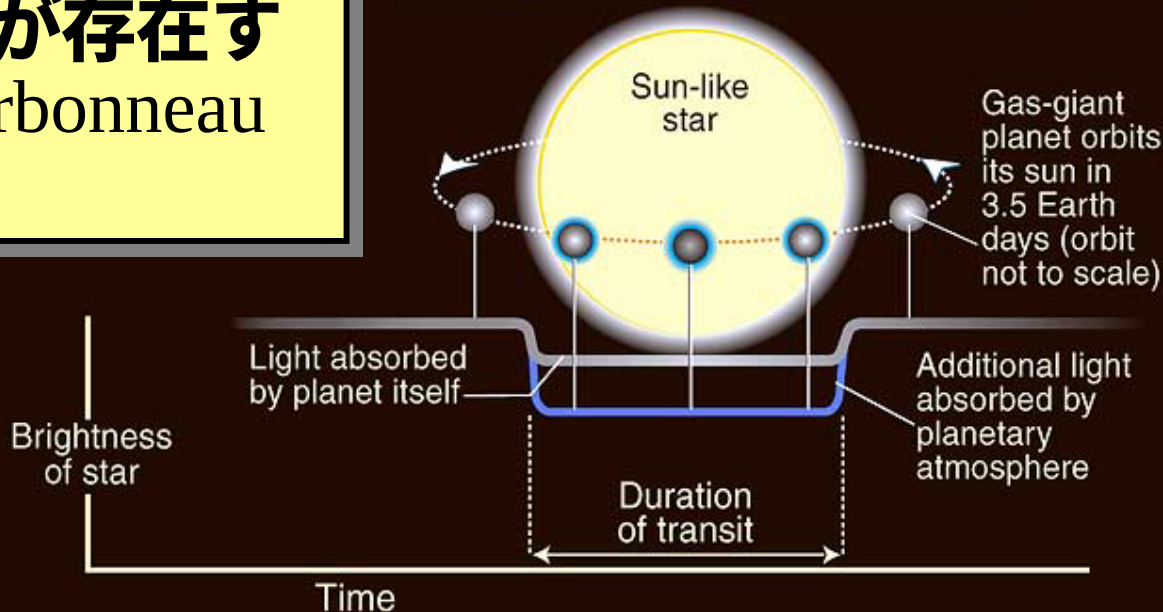
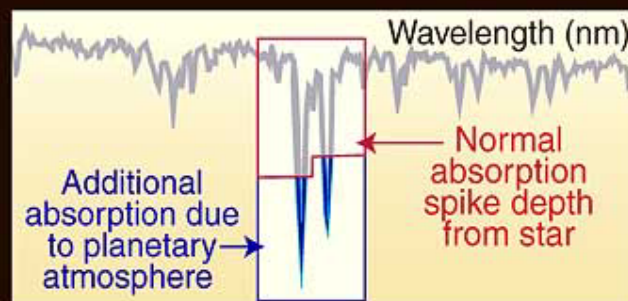
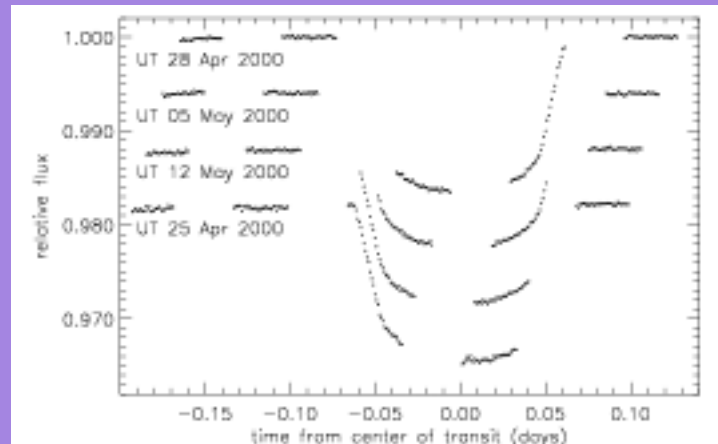
# 51Pegasi b: 主系列星の周りの惑星

- 主星の速度変動の検出によって初めて発見された惑星 (Mayor & Queloz 1995)



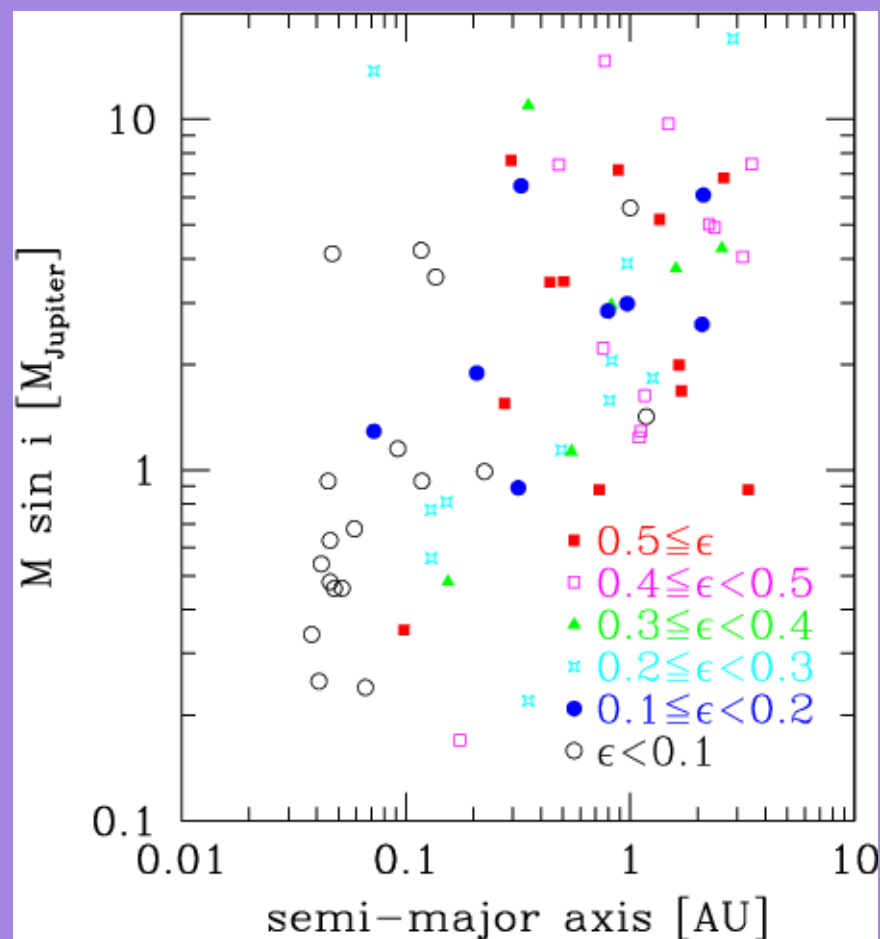
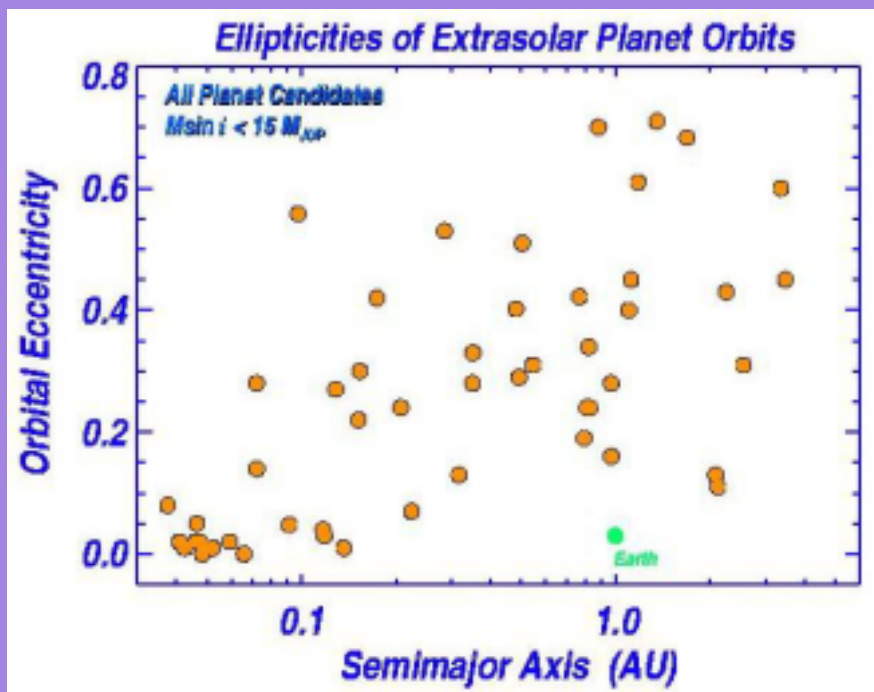
# HD209458の 食の観測

- 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) **唯一の例**
- 2001年11月、この惑星の大気にナトリウムを発見 (Charbonneau et al. 2001)



# 発見された 系外惑星 一覧

- 発見ラッシュ(2002年6月で91個)
- 軌道半径が小さく、離心率が大きいものが多い
- ほぼ木星程度の質量

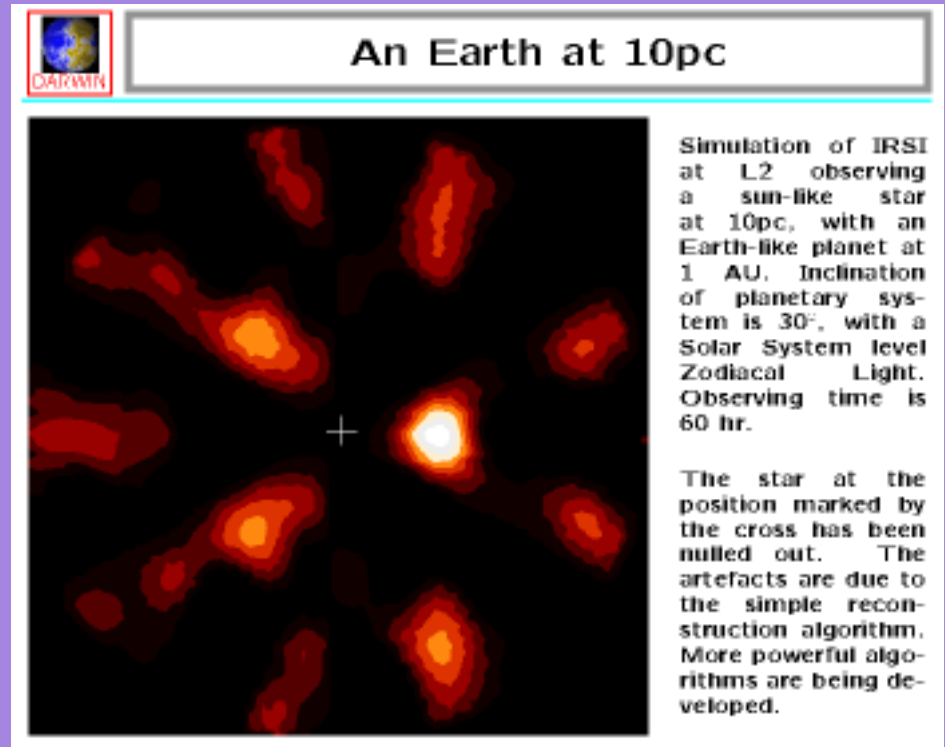




# Darwin(ESA:launch after 2015)

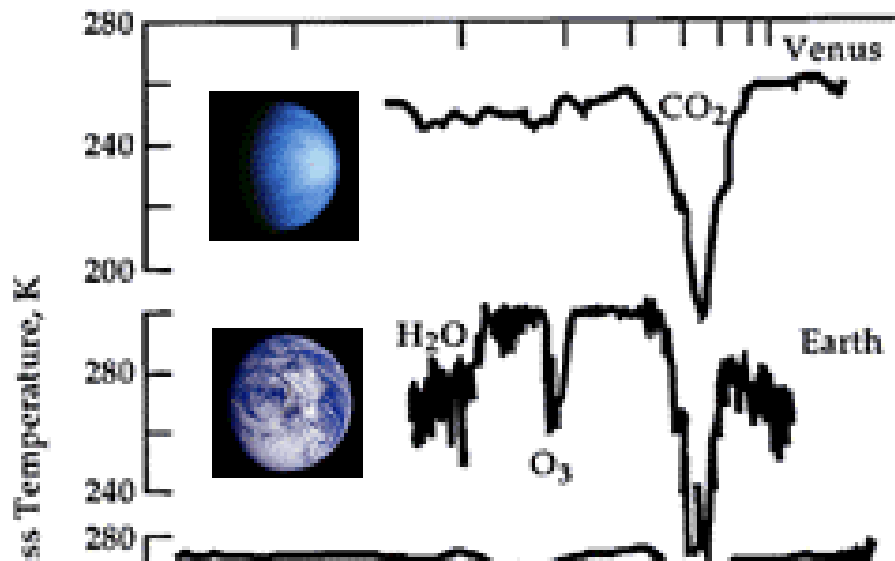


infra-red space interferometry:  
imaging and spectroscopy



<http://ast.star.rl.ac.uk/darwin/>

# 太陽系外惑星探査研究の展望



- 木星型惑星の発見の時代から、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

|            |             |                     |
|------------|-------------|---------------------|
| 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<br>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 | 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！**

# アンパンマン オープニングテーマ



■ 作詞: やなせたかし  
(高知県出身)

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!







# 論語 卷第一爲政第二章

中国の大思想家・大教育家、孔子様は紀元前551年（今から約2550年前）に、中国山東省曲阜でお生まれになりました。その教えである儒教は、歴代の中国の皇帝及び国民に大きな影響を与え、中国のみならず、広くアジア全体に広まりました。

子曰、吾十有五而志于學、三十而立、四十而不惑、五十而知天命、六十而耳順、七十而從心所欲不踰矩。

四十にして惑星  
観測的宇宙論に不惑なし