

Beyond Precision Cosmology

東京大学 大学院理学系研究科
須藤 靖



2002年9月3日
埼玉大学 理学部
物理学教室談話会

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。

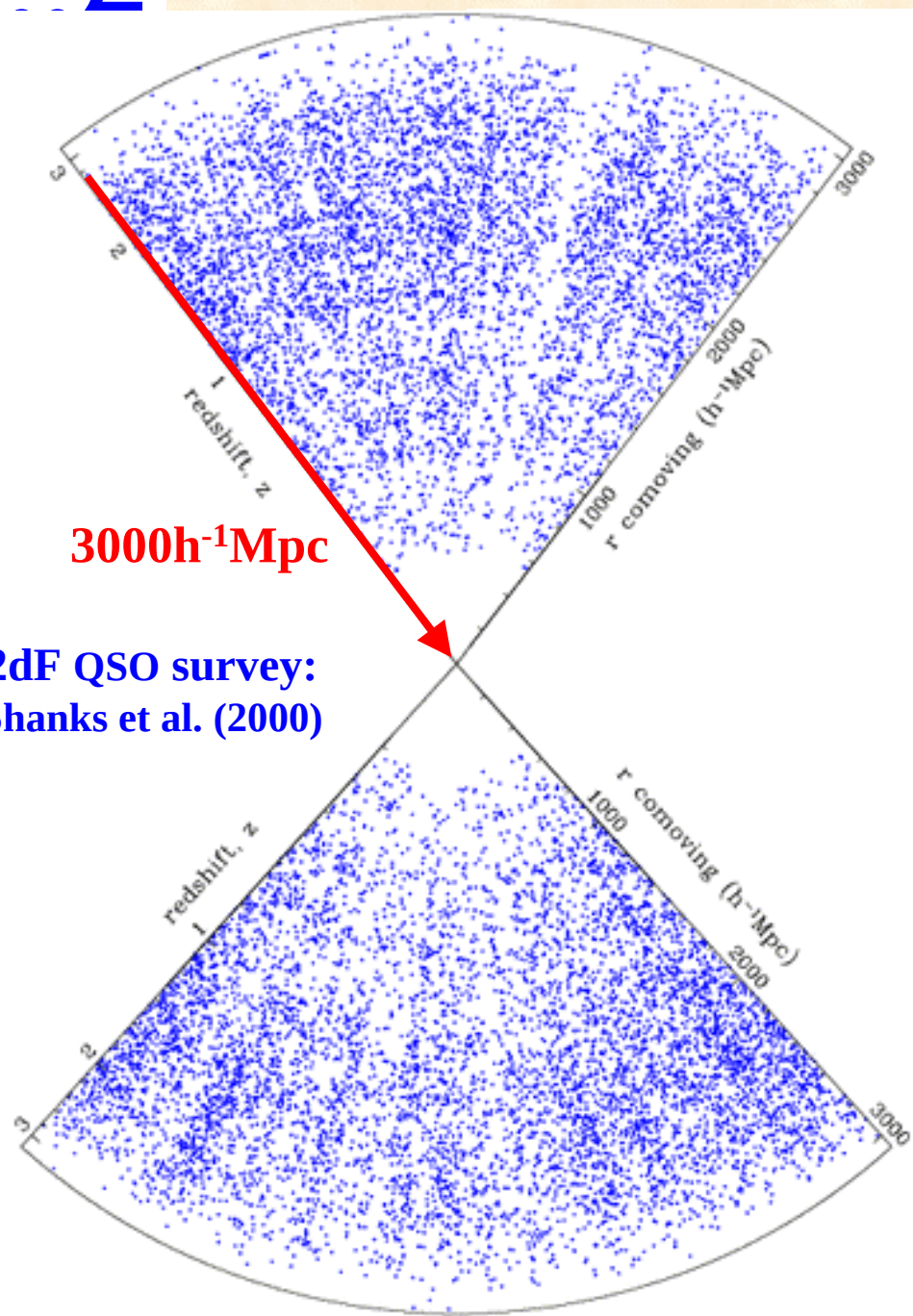
20世紀宇宙論研究の歴史

- 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

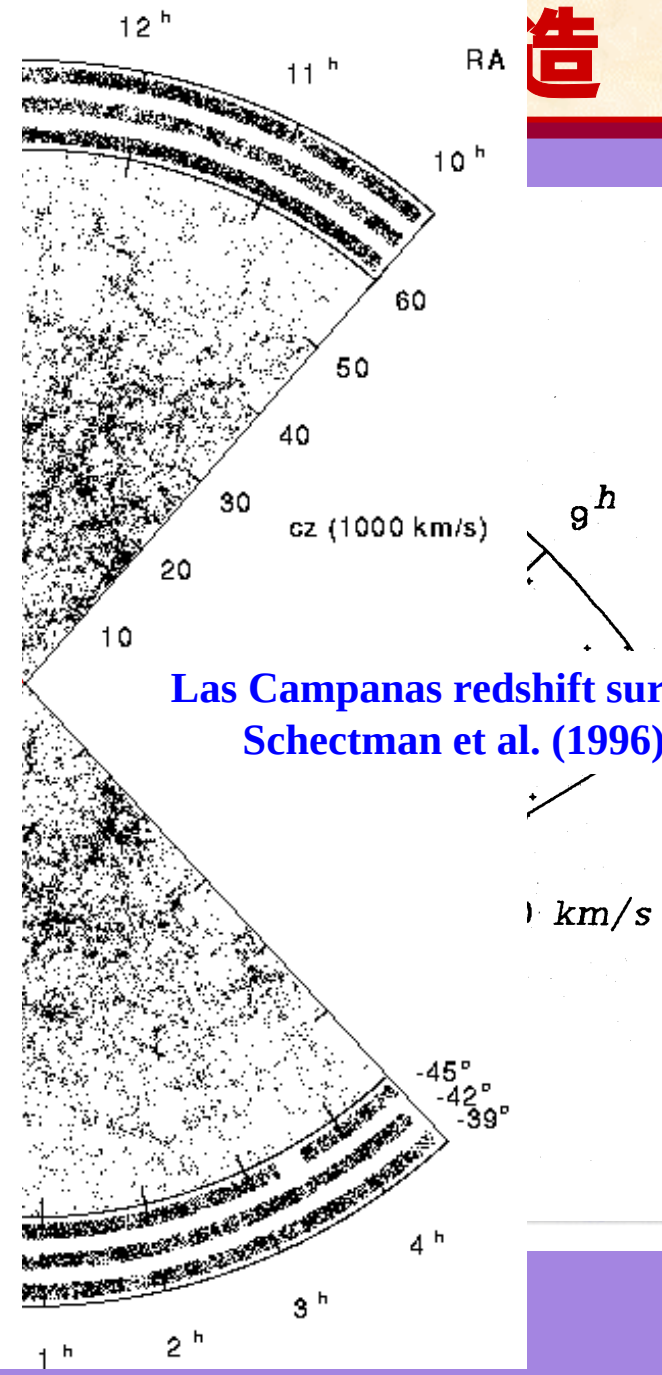
精密宇宙論(precision cosmology)の時代へ

$3000h^{-1}\text{Mpc}$

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



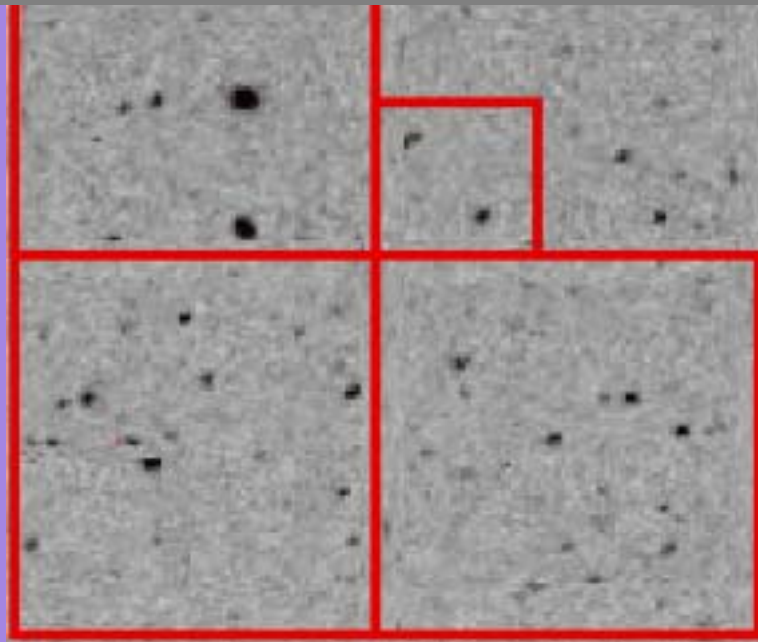
Las Campanas redshift survey:
Schectman et al. (1996)



深宇宙: Hubble Deep Field

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

■ 遠方宇宙 ⇒ 過去の宇宙
⇒ 宇宙の起源



地上4m望遠鏡+CCD:
100×写真乾板

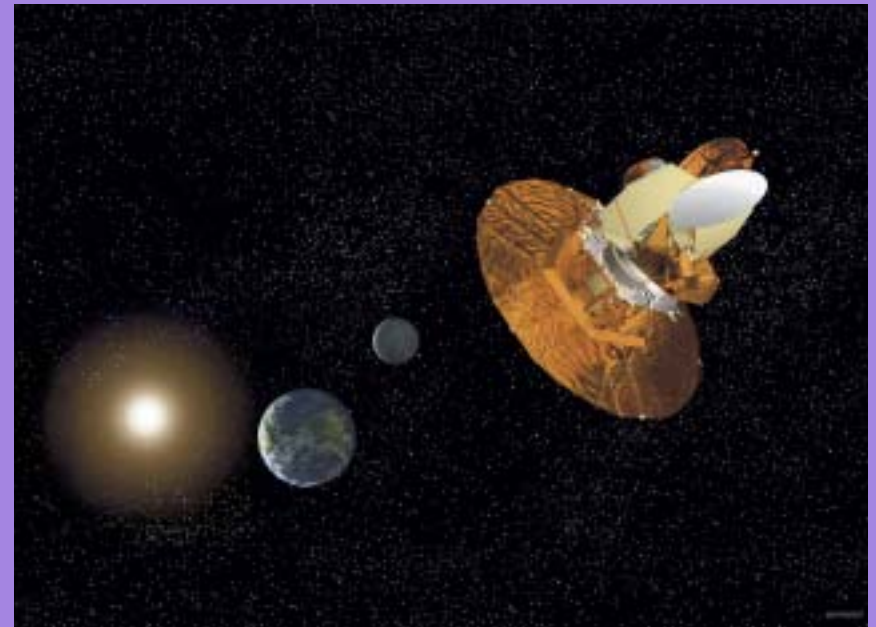
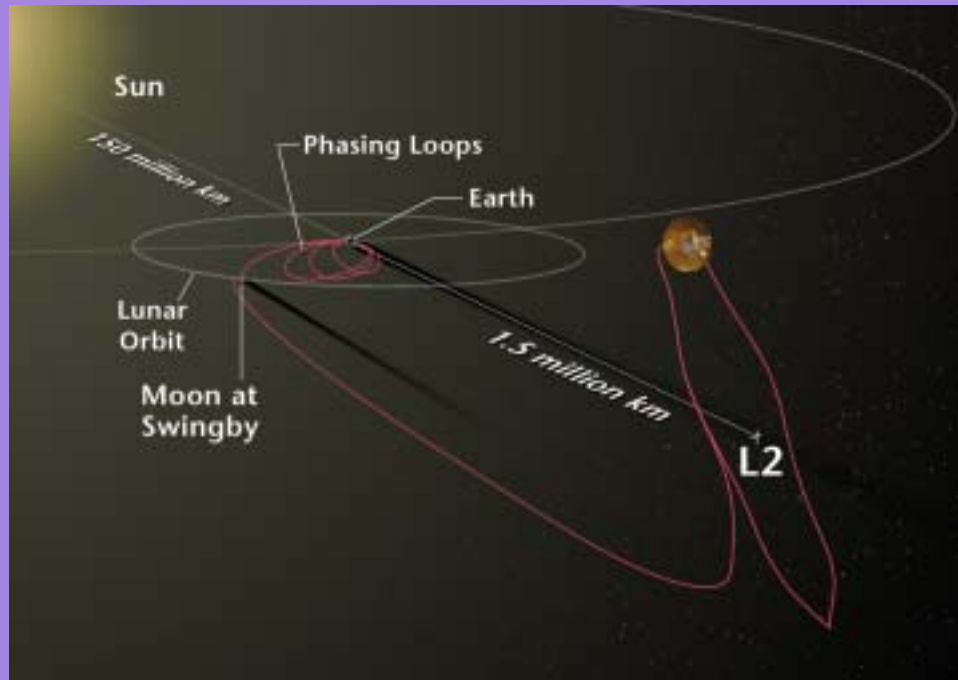


HST望遠鏡+CCD:
1000×地上望遠鏡

MAPの打ち上げ: 2001年6月30日15:46:46 EDT



MAP launched !



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)

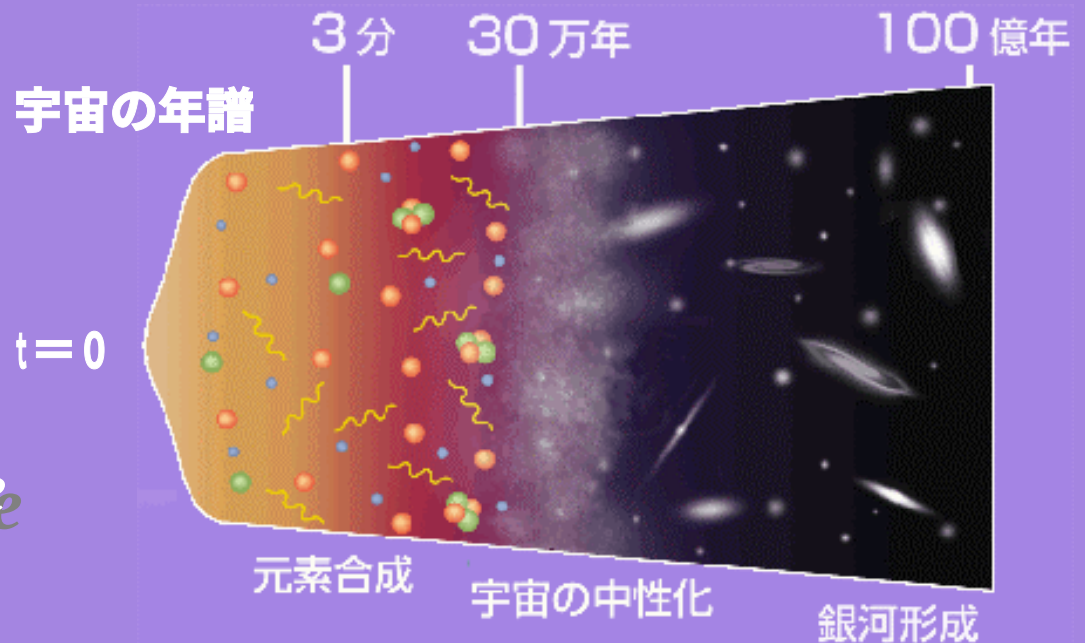
それまで完全に電離していた宇宙は、温度が約3000度以下 (宇宙誕生後約30万年) になると電子と陽子が結合して水素原子となる

■ 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:

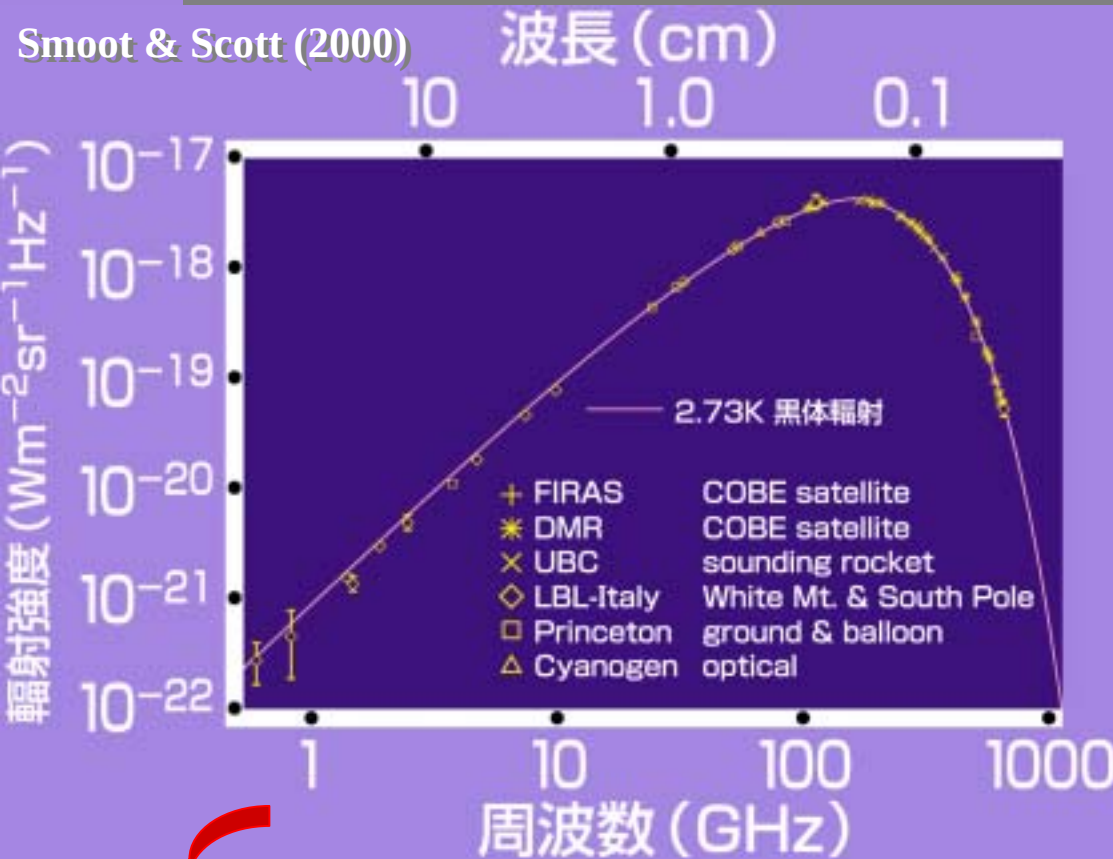
Cosmic Microwave
Background



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: 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

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

ν : 周波数、 c : 光速
 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: $T_{\text{CMB}} = 2.728 \pm 0.002 \text{ [K]}$

CMB: 全天温度地図

■ 1965: 一様成分
(宇宙の温度)

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

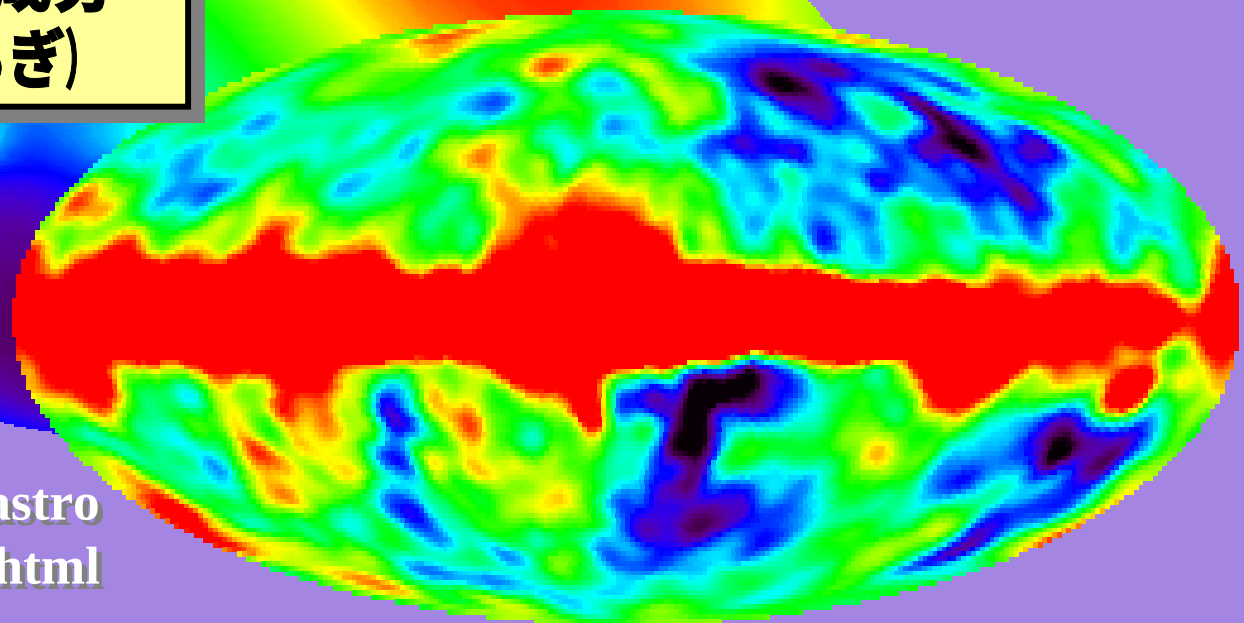


■ 1976: 二重極成分

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

■ 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

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

1965



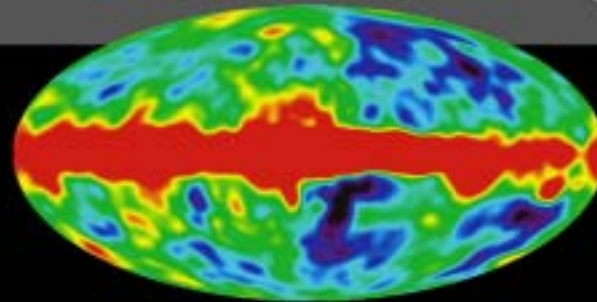
Penzias and
Wilson



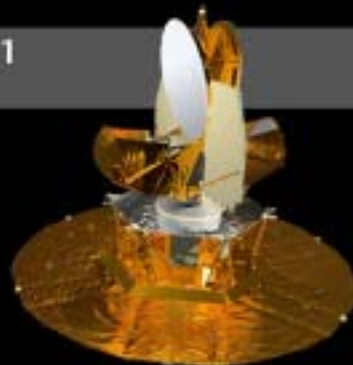
1992



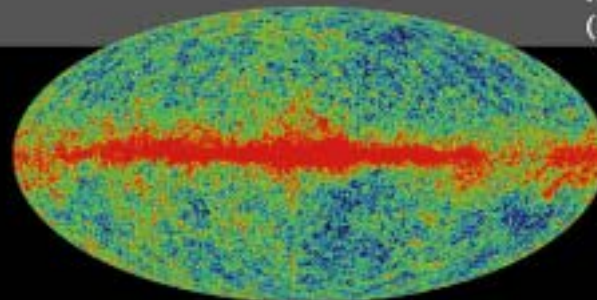
COBE



2001

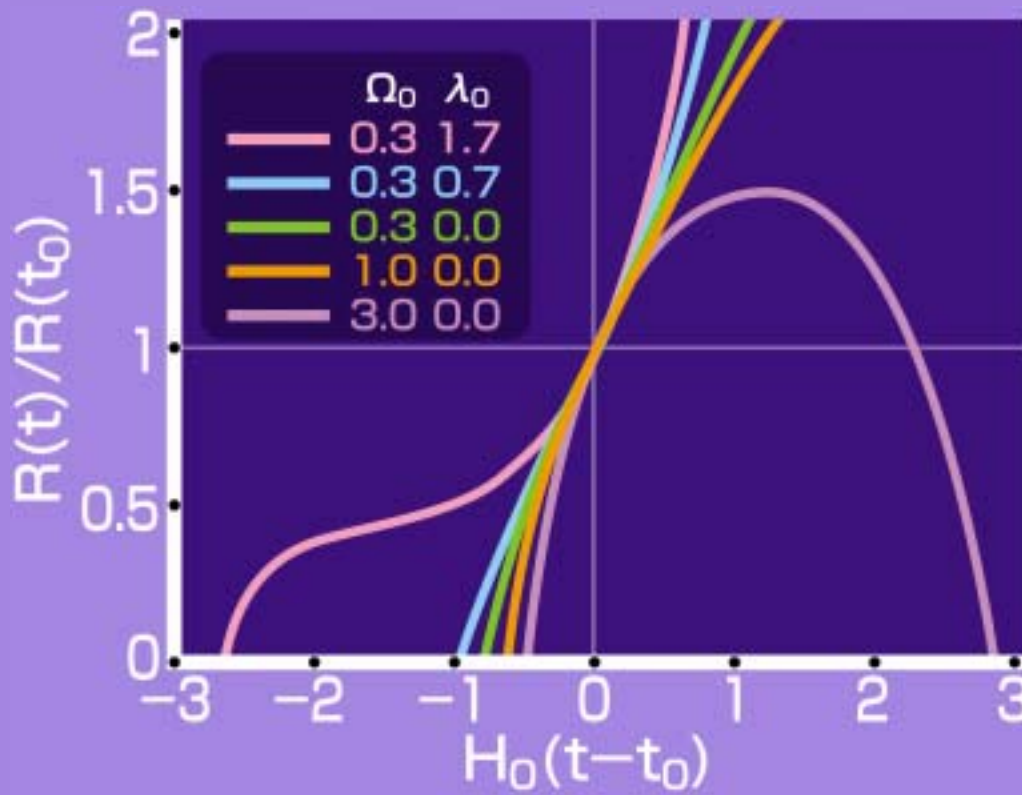


MAP
(Simulated)



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 :

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

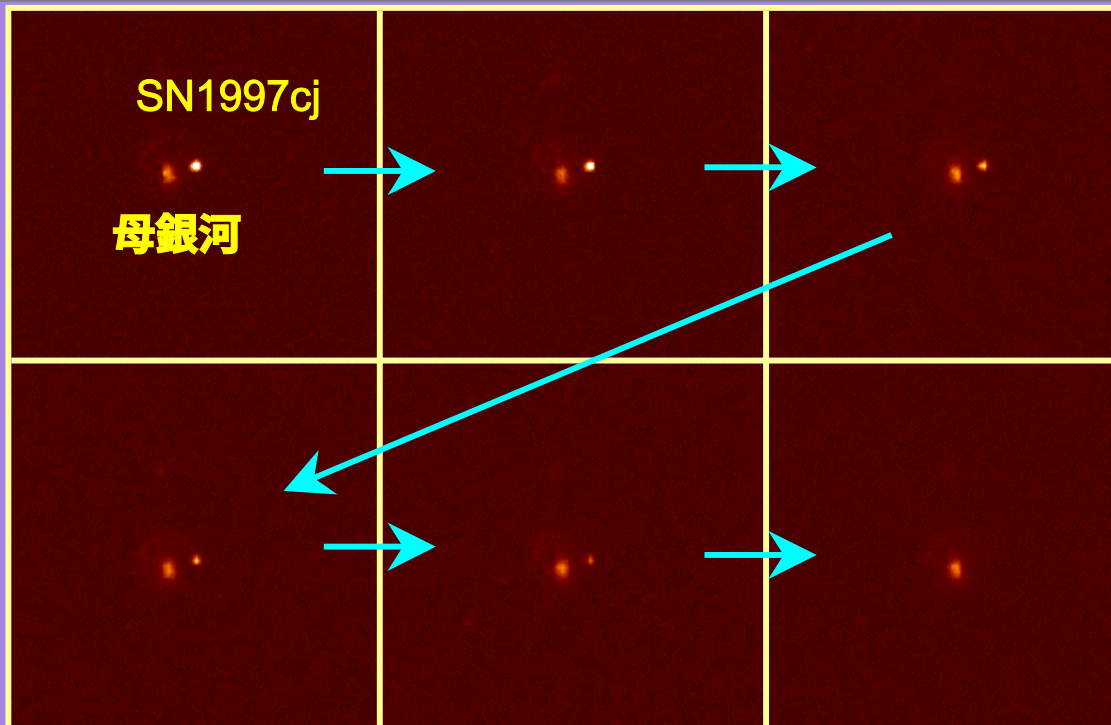
$$\Omega_0 \approx 0.3, \lambda_0 \approx 0.7(?)$$

宇宙論パラメータとその決定法

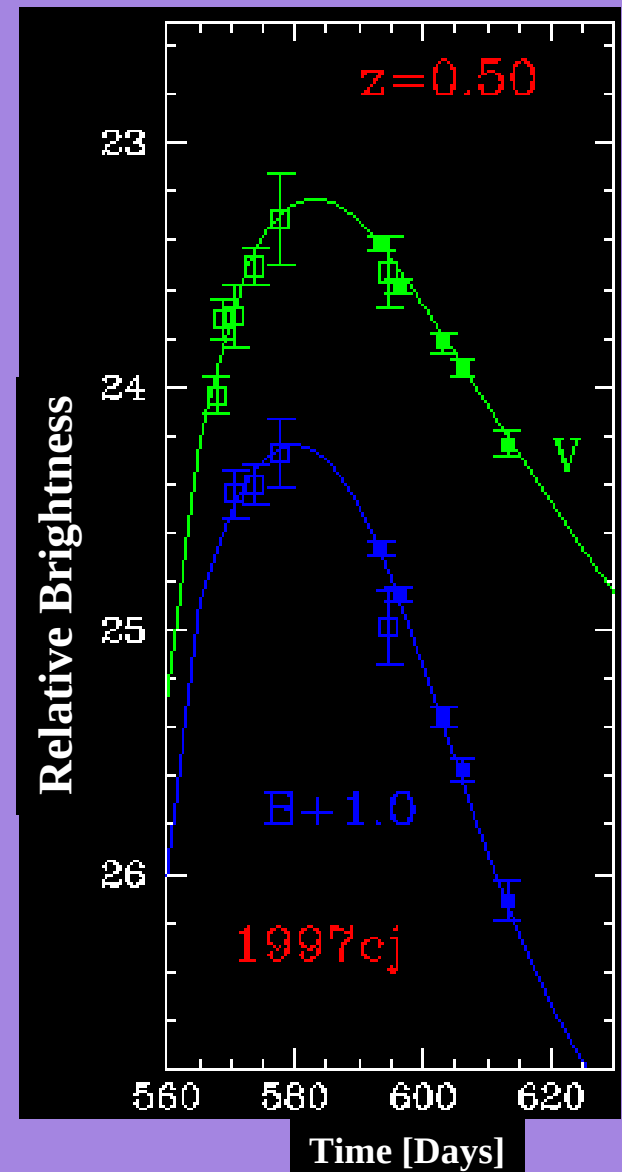
記号	意味	観測的決定法
H_0	ハッブル定数	HSTによるセファイド型変光星を用いた銀河距離指標の較正
Ω_b	バリオン密度パラメータ	ビッグバン元素合成理論予言値と軽元素存在量との比較
Ω_0	質量密度パラメータ	渦巻銀河の回転曲線、銀河団のビリアル質量、銀河団の個数密度
λ_0	宇宙定数	遠方のIa型超新星のハッブル図
k_0	宇宙の曲率 ($= \Omega_0 + \lambda_0 - 1$)	マイクロ波背景輻射の温度揺らぎの角度スペクトル

Ia型超新星の光度曲線の測定

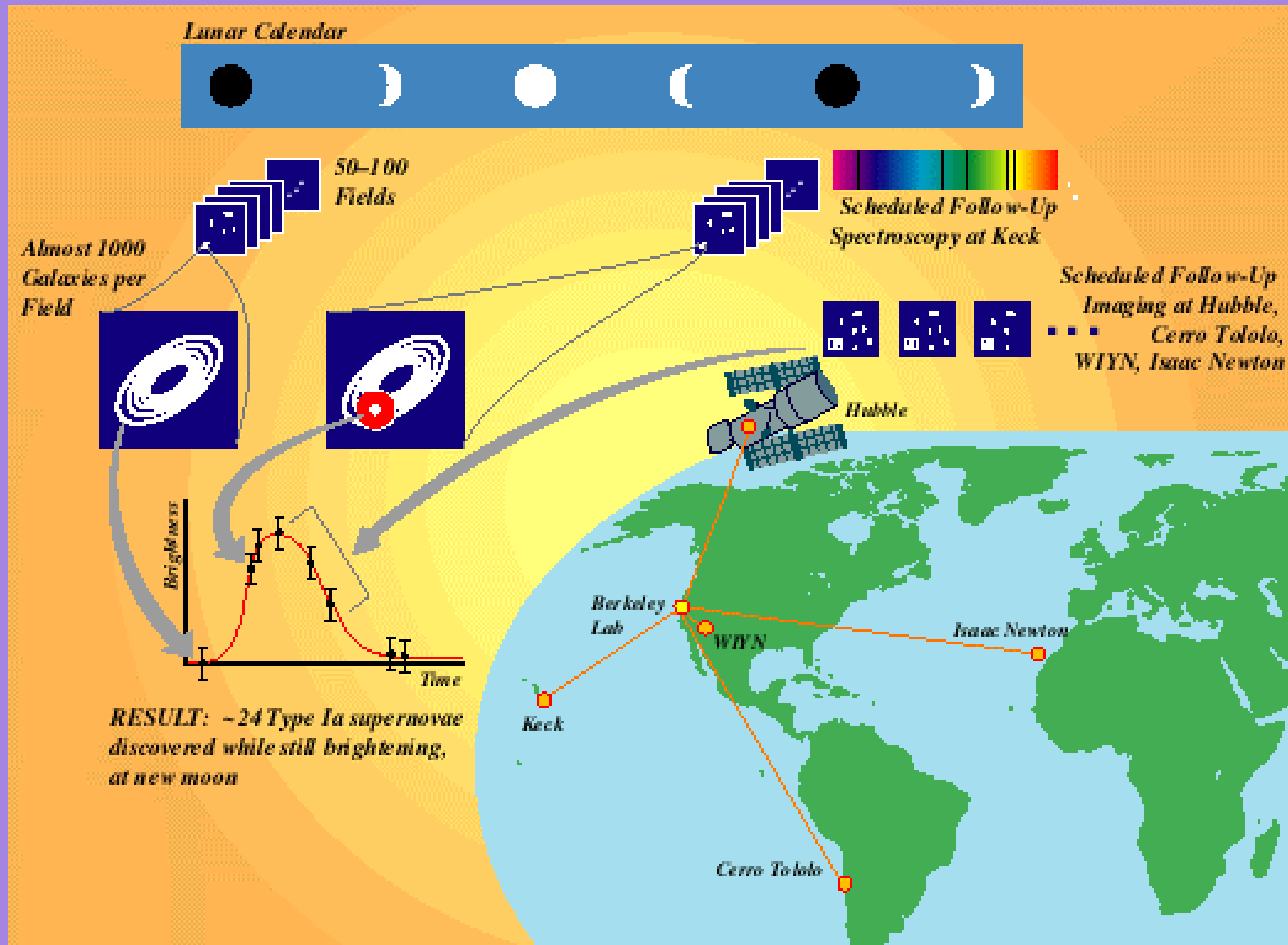
- 現在距離の知られているすべてのIa型超新星の最大絶対光度は約10パーセントの精度で一致
- Ia型超新星を発見し、定期的にその光度変化をモニターできれば距離決定の標準光源となる



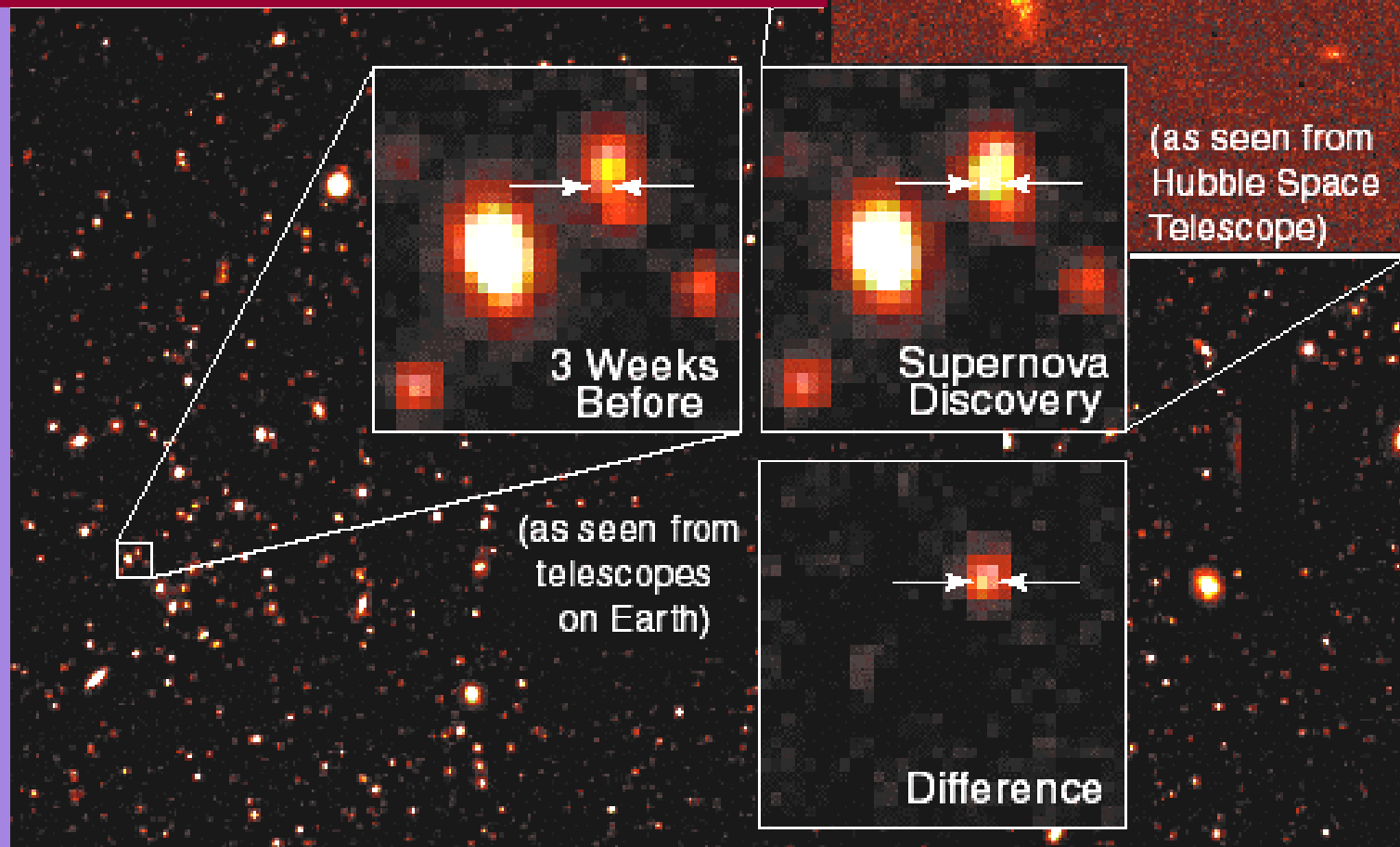
HSTで測定したSN 1997cjの明るさの時間変化



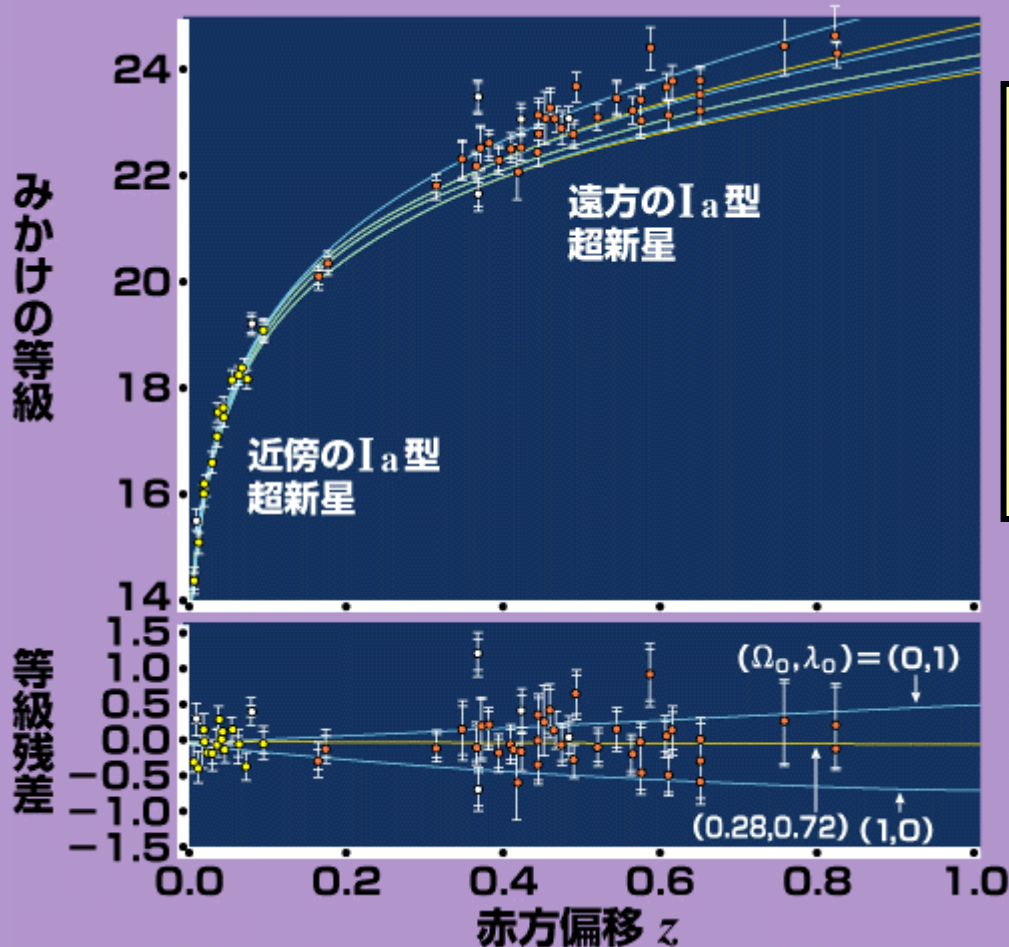
Supernova Cosmology Project: Strategy



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

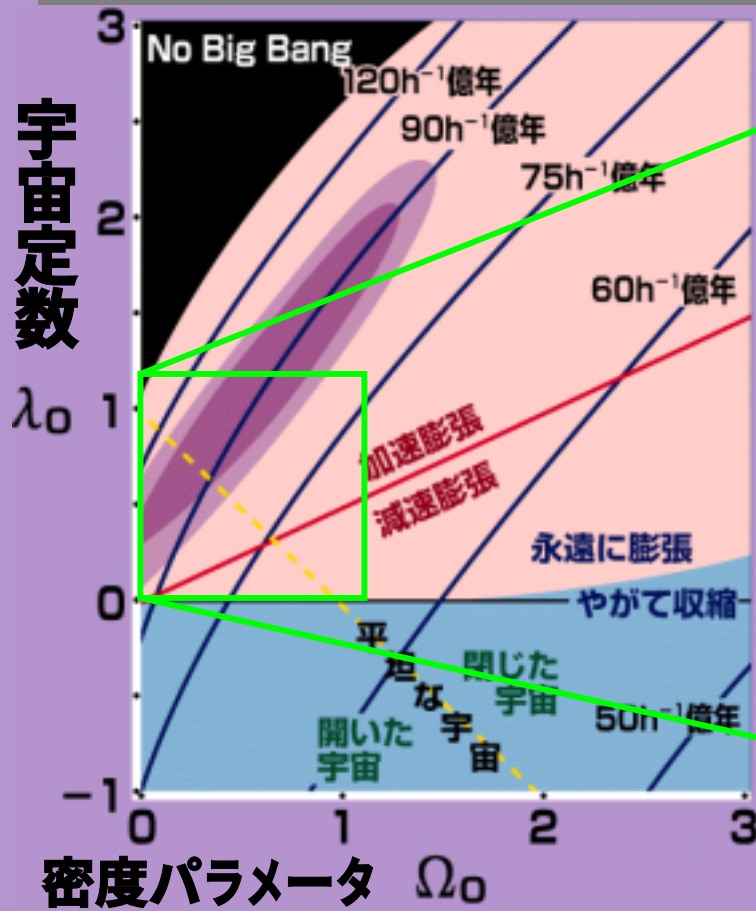
$$\Rightarrow \Omega_0 \ll 1, \lambda_0 > 0$$

宇宙定数の存在！

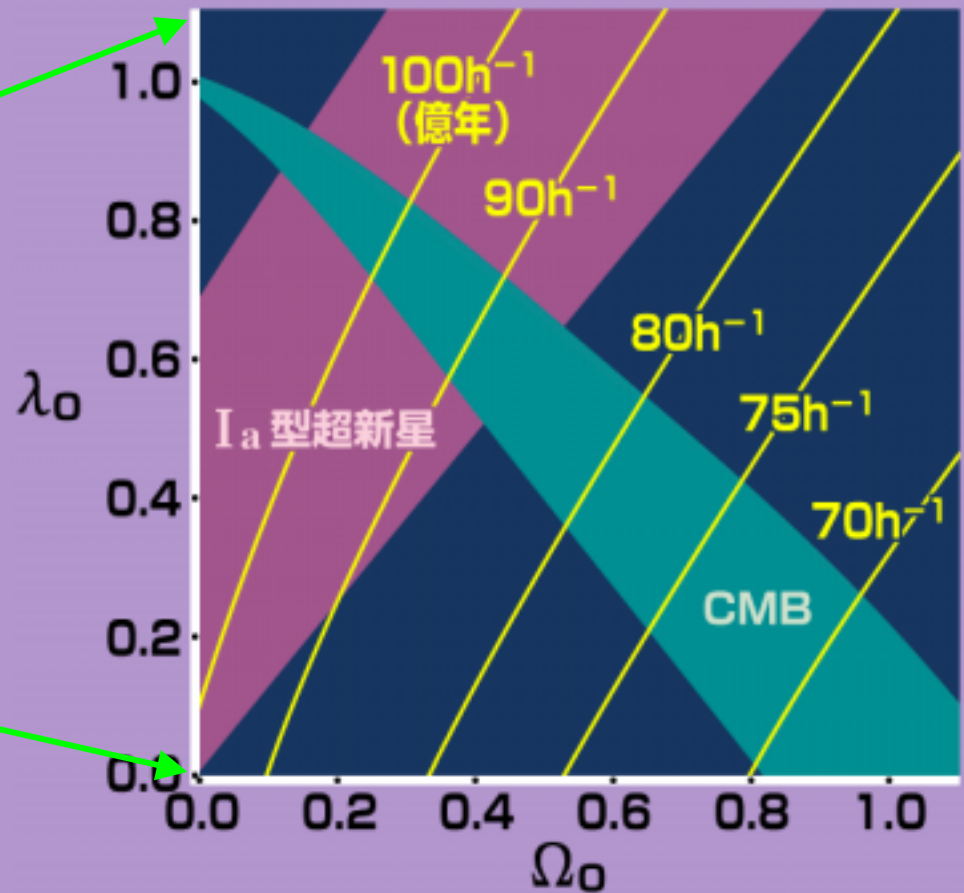
Perlmutter et al. :
The Astrophysical Journal
517(1999)565

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 ($k_0=0$) ?



超新星観測からの制限



CMB 観測からの制限

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

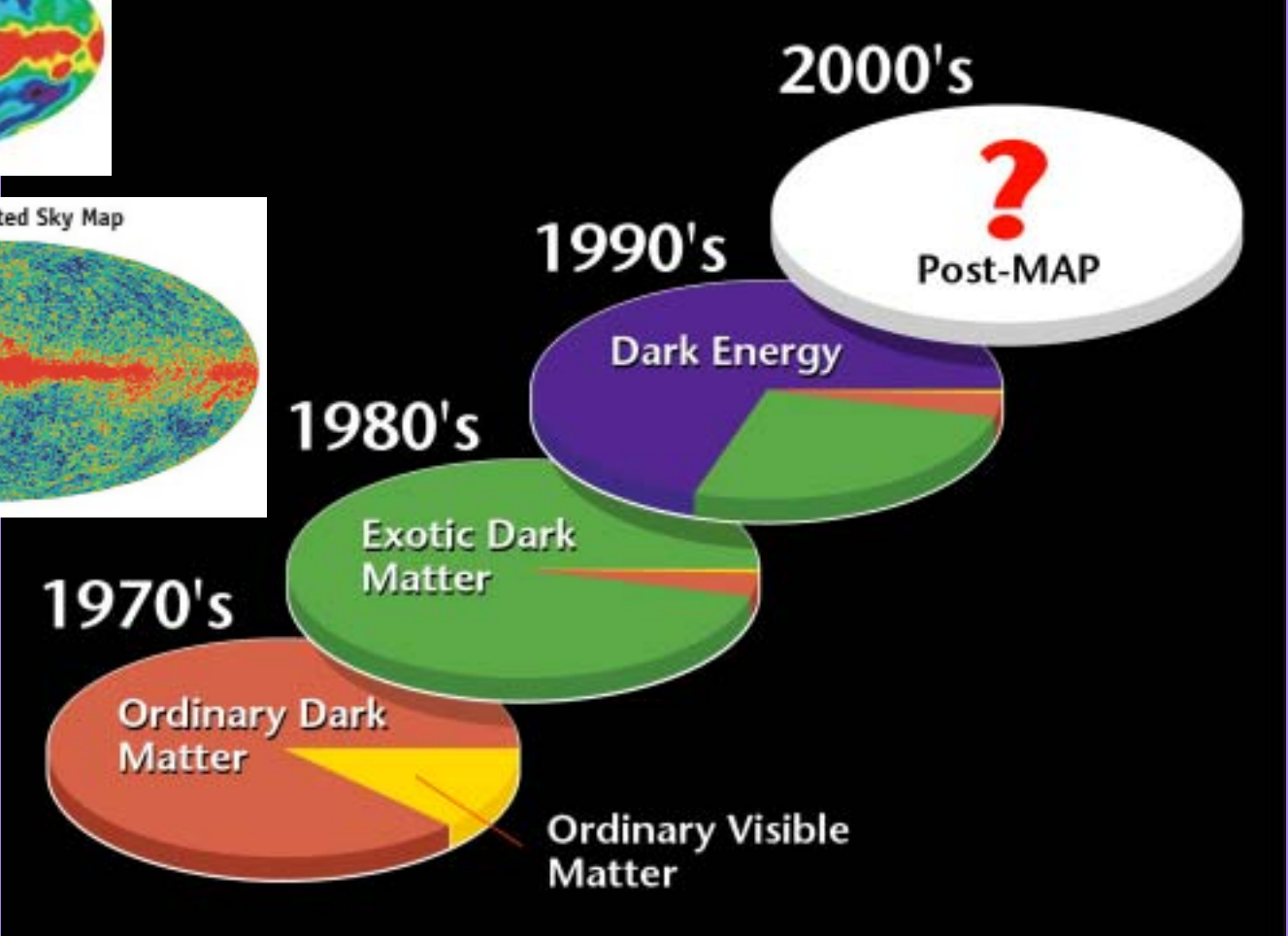
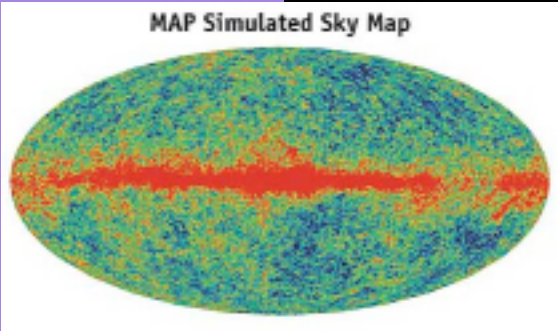
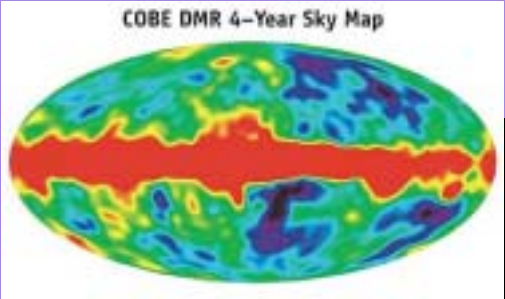
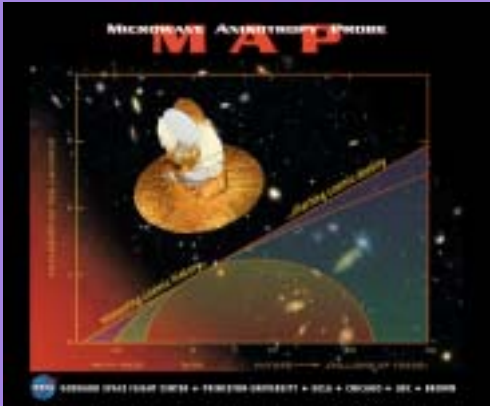


理論予言





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

「物理学に関する5つの誤解」 (S玉大学S宗教授) その1

■ 誤解その1 物理学の頂点は素粒子論である。

これは誤解である。素粒子論はもう終わったも同然である。今後はもう新しい成果はほとんどでないだろう。したがって、ほとんど進歩しないだろう。

■ 誤解その2 物理学の研究の中心は素粒子物理学である。

これは3, 40年前までの話である。現在, 年に2回ある日本物理学会講演会でも, 研究発表の数は素粒子・原子核・宇宙を合わせても2割しかない。残りの8割は物性物理学である。

「物理学に関する5つの誤解」 (S玉大学S宗教授) その2

■ 誤解その3 現代物理学は相対論と量子力学によって始まった。

これは部分的に誤解である。特殊相対性理論はむしろ古典物理学の完成と言った方がよい。現代物理学の真髄は量子力学である。

■ 誤解その4 宇宙がやりたい人は物理学科に入るべきだ。

これは誤解に基づいている可能性がある。まず、星が好きなだけの人は天文学科に行くべきである。そして、天文学は物理学ではない。星を分類するだけでは物理にならない。物理学はもっと緻密な法則を探求する学問である。また、宇宙論は学問ではない。だから「論」と付いている。ブルーバックスの記事と学問を混同してはいけない。

「物理学に関する5つの誤解」 (S玉大学S宗教授) その3

■ 誤解その5 物理学科を卒業すれば物理学者になれる。

これは誤解である。そんな生易しいものではない。少なくともまず、大学院に進んで博士号を取らないといけない。その後も、素粒子論や宇宙論をやったら、まず新しい研究成果は生み出せない。このような分野では、世界に10人くらい天才的な学者がいればそれで十分であって、諸君が参入する余地はない。それよりも、量子力学を生かした物性物理学の研究をするべきである。この分野では、アイデアと工夫次第でいくらでも成果が上がり、研究発表も出来るし、論文も書ける。

■ 結論 物性理論をやろう！

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. ---

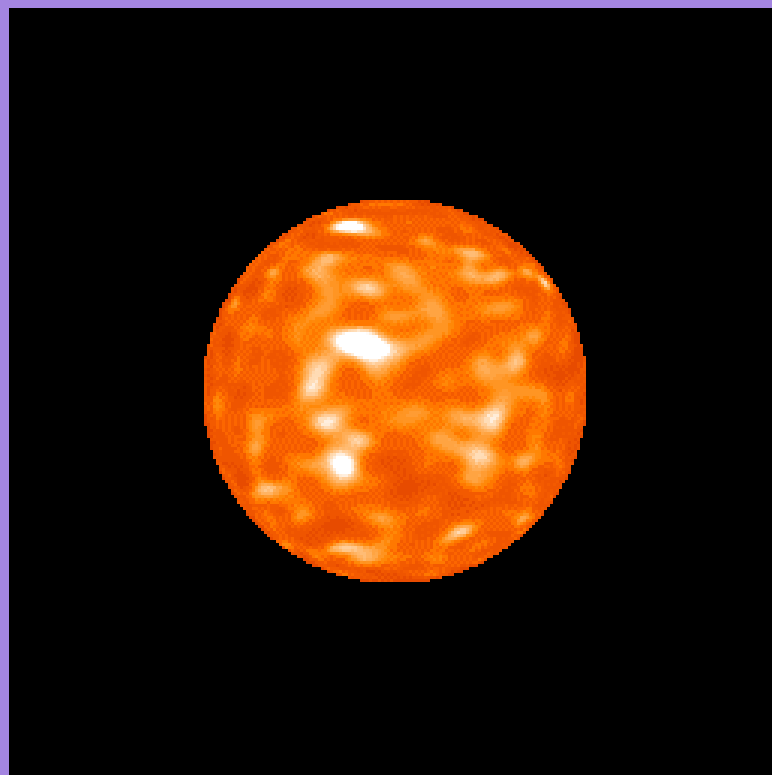
P.J.E.Peebles (1993) ``Principles of Physical Cosmology'' p.677

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

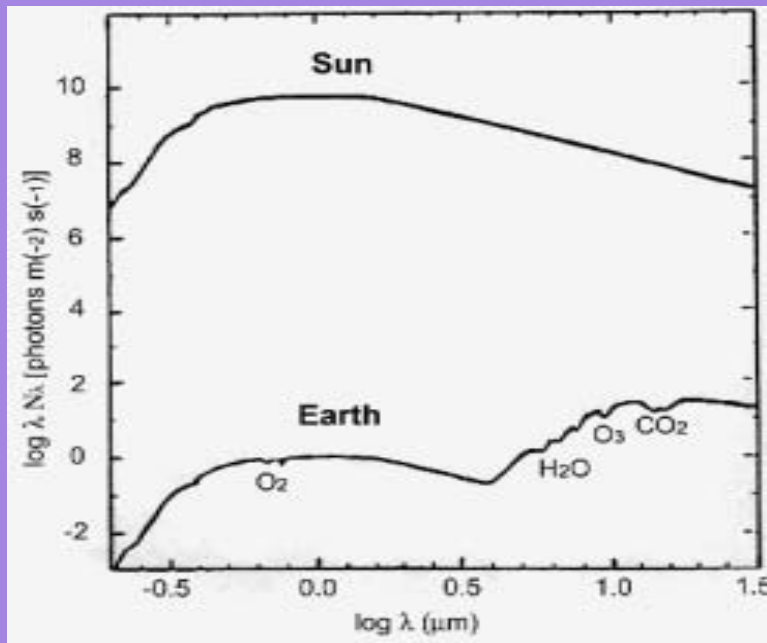
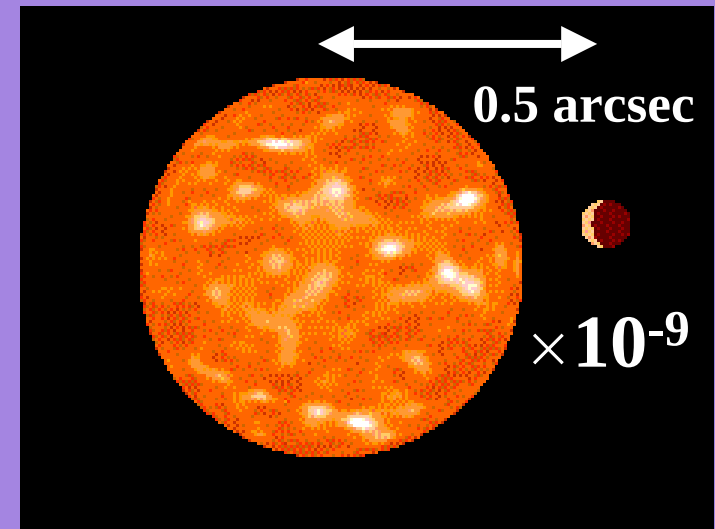
(*“Where are they ?” Fermi 1950*)

やや危ない
↓

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

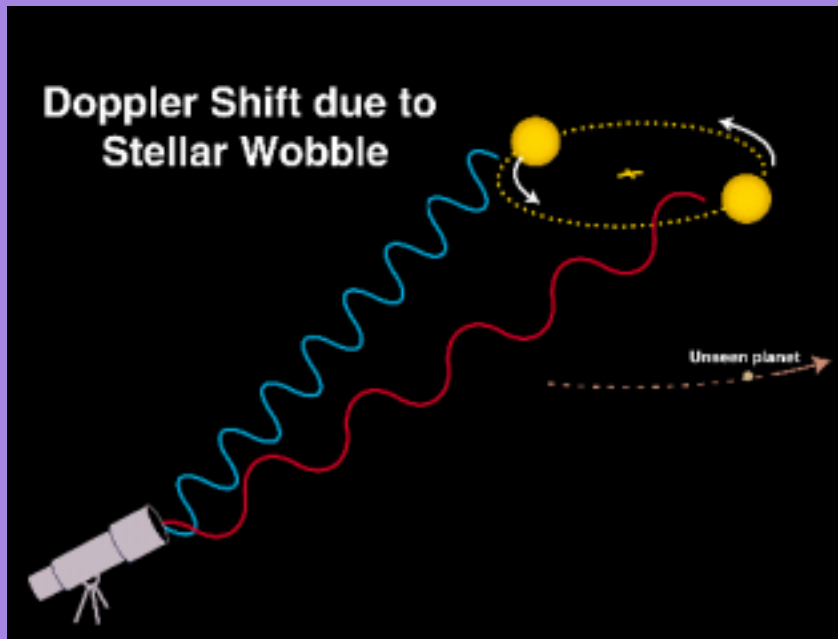


地上観測の典型的な角度分解能の大きさ内で、9桁程度も明るい主星のすぐ隣にある27等級の暗い天体を観測する

⇒ ほとんど不可能！

主星の速度変動

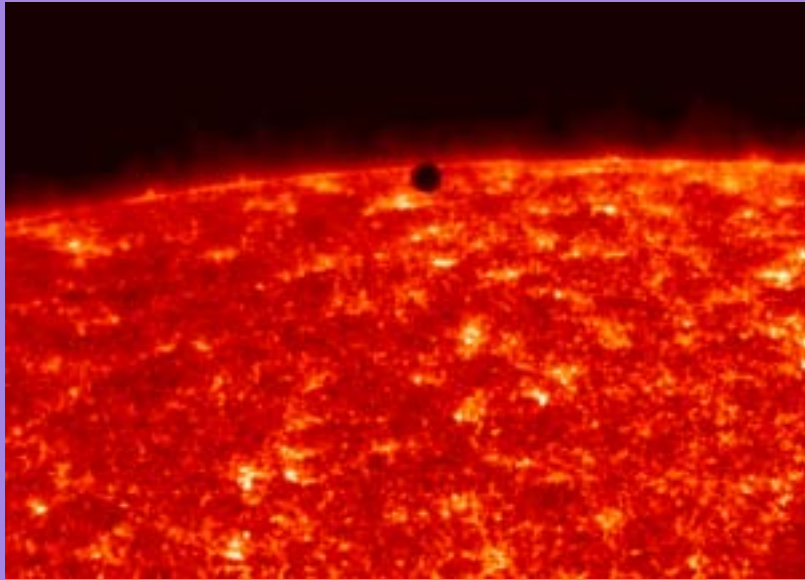
惑星は直接見えなくても、
主星の軌道はその影響を受ける



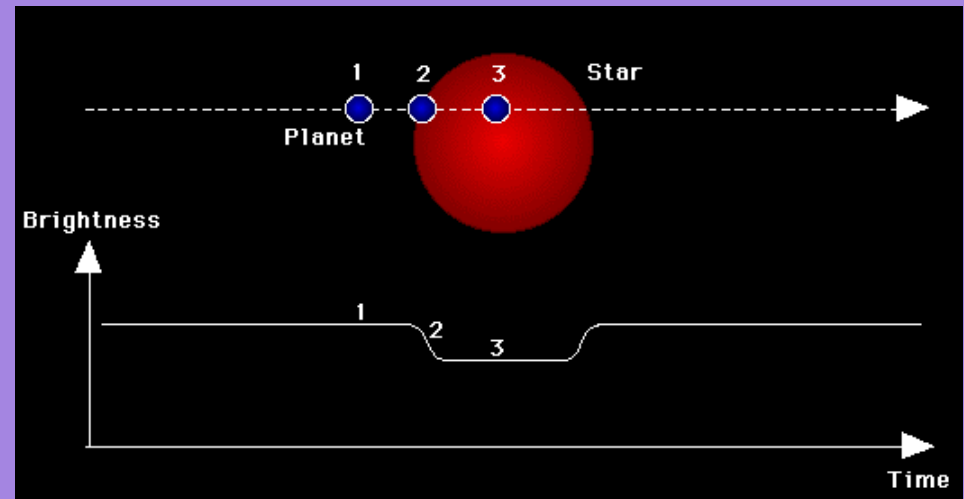
太陽の受ける速度摂動:
12.5 m/s (木星)
0.1 m/s (地球)
(参考) 地球の公転速度
3万 m/s

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% $(R_{\text{惑星}}/R_{\text{木星}})^2(R_{\text{太陽}}/R_{\text{主星}})^2$

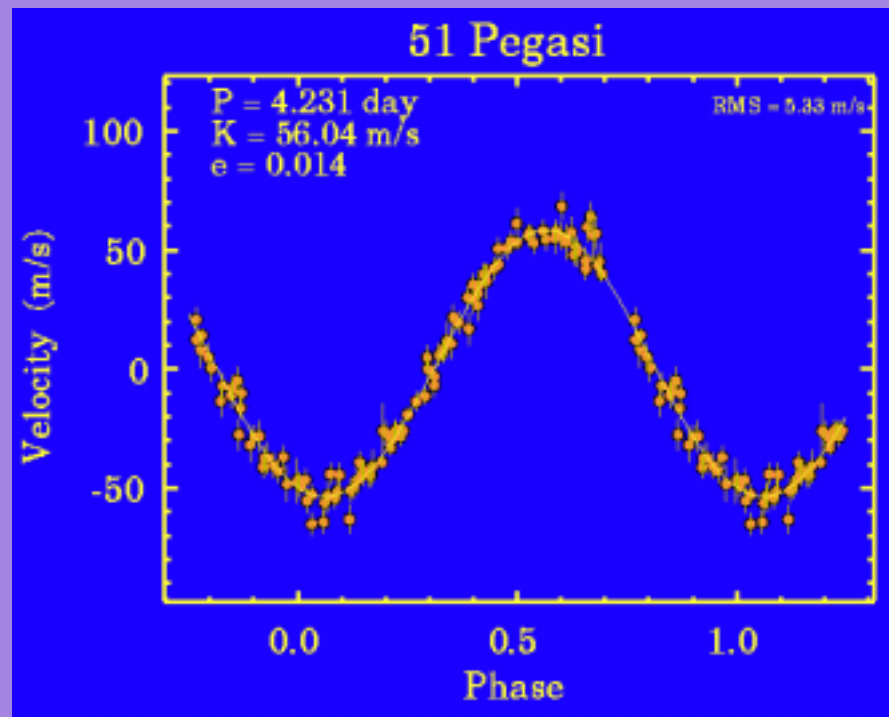
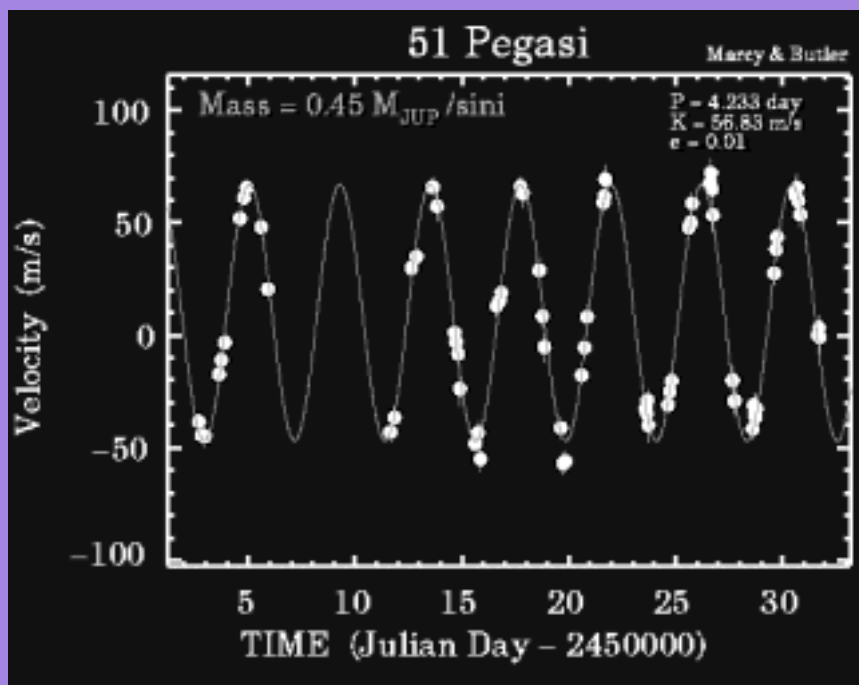
⇔ 地上での測光精度: 0.1% が限界 (木星なら○、地球は×)

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 υ 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8月21日時点で101個の系外惑星**

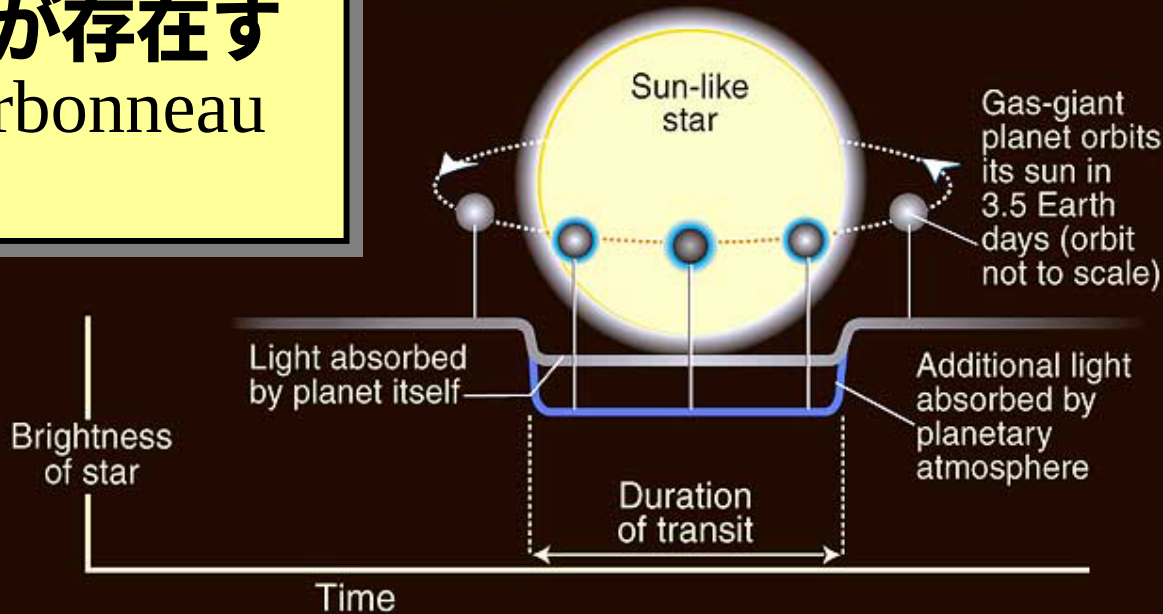
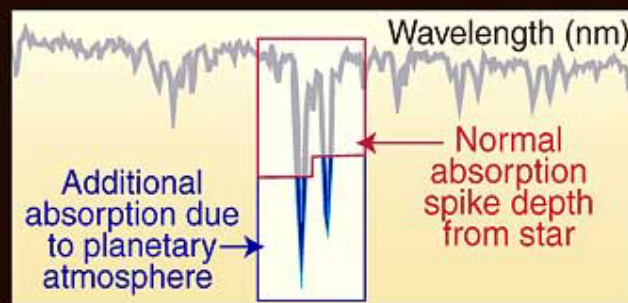
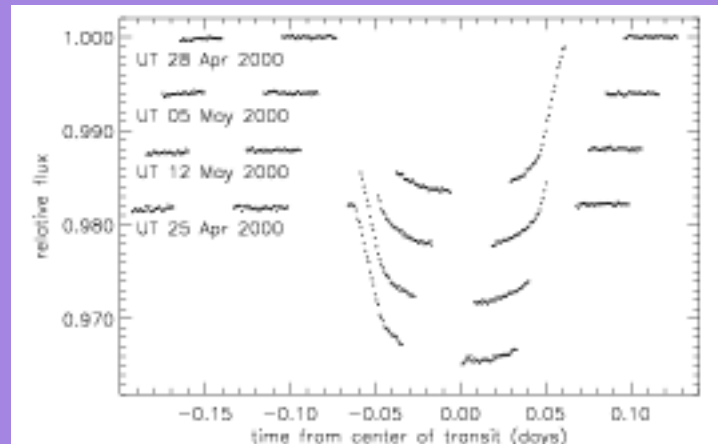
51Pegasi b: 主系列星の周りの惑星

- 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)



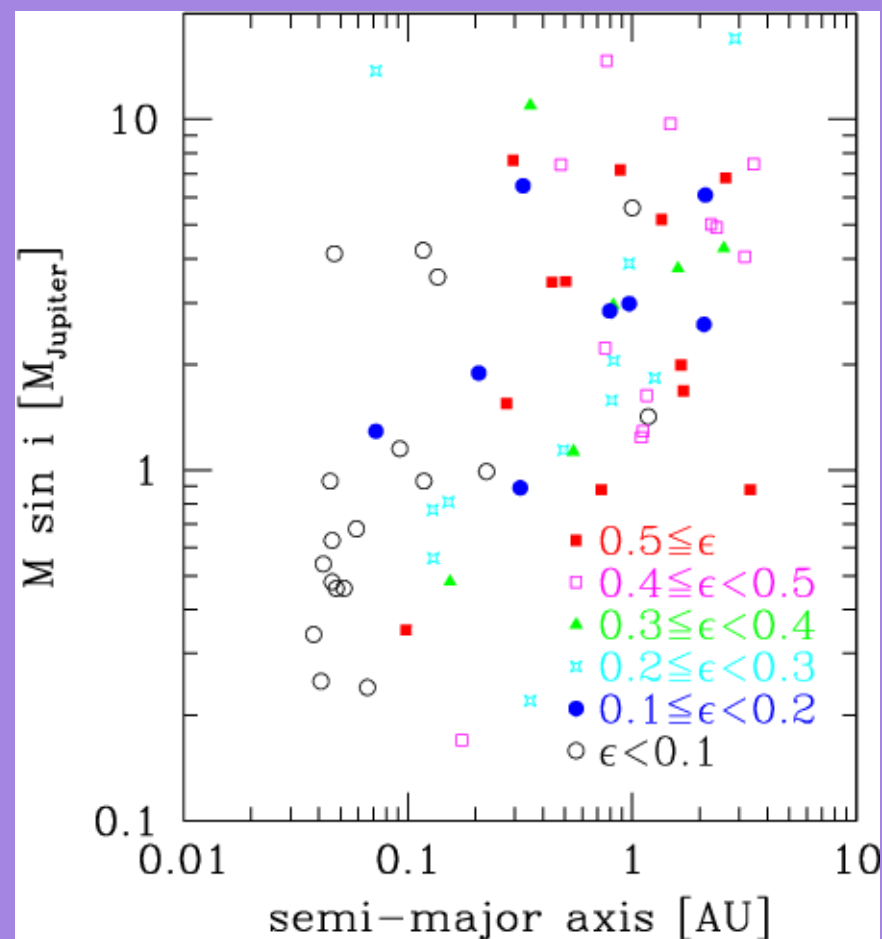
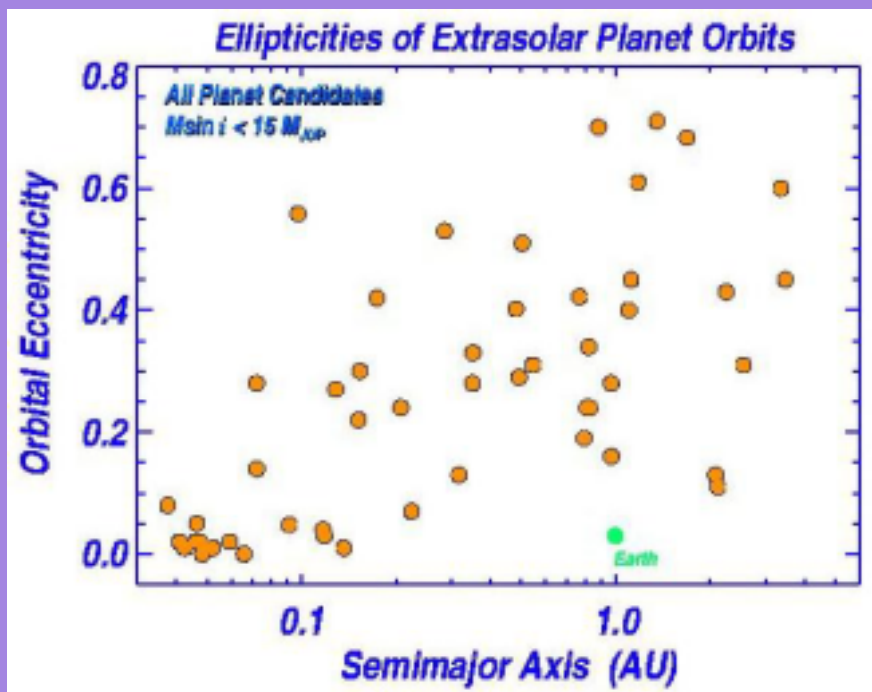
HD209458の 食の観測

- 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

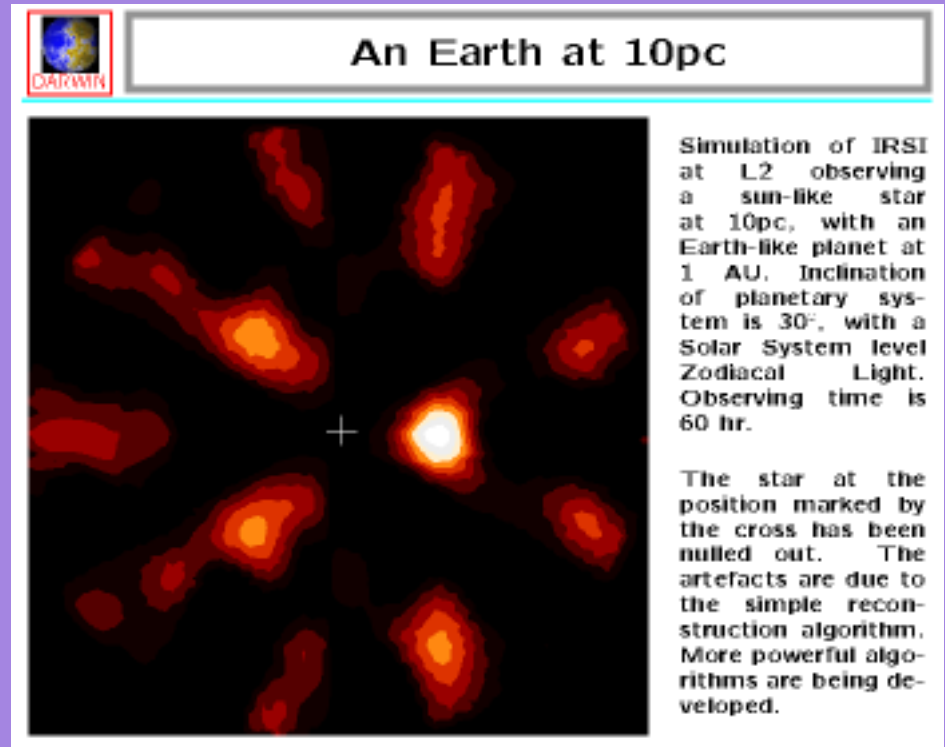
- 発見ラッシュ(2002年8月で101個)
- 軌道半径が小さく、離心率が大きいものが多い
- ほぼ木星程度の質量



Darwin(ESA:launch after 2015)

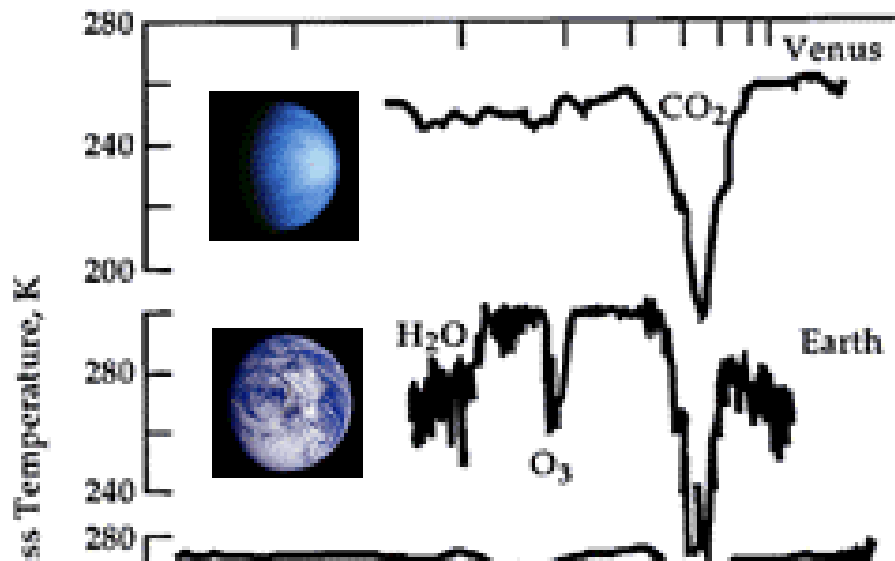


infra-red space interferometry:
imaging and spectroscopy



<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CO₂吸収帯 ⇒ 大気？
- O₃吸収帯 ⇒ 大量の酸素 ⇒ 生物によって生成？
- H₂O吸収帯 ⇒ 海の存在？

Expanding the *expanding* universe



0th order	一様等方宇宙	宇宙論パラメータ
1st order	密度揺らぎ	宇宙の大構造 マイクロ波背景輻射
2nd order	非線型重力	ダークマターの構造形成
3rd order	バリオンカ	第一世代天体と元素の起源
4th	結論: (広い意味での) 宇宙論をやろう !	
L-th order		
M-th order		
N-th order	文化・文明・宗教	宇宙論的社会学
...		