

觀測的宇宙論

精密宇宙論から
有朋自遠方来不亦乐乎の宇宙論へ

須藤 靖

<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/>

東京大学理学部物理学教室
現代物理学入門 (2001年7月2日)

天文学、物理学、宇宙論

■ 天文学:

astronomy = astro (星、天体) + nemein (分布)

■ 物理学: physics (自然)

■ 宇宙論: c.f., universe (統一)

cosmology = kosmos (秩序、調和) + logic(論)

■ 宇宙: 四方上下謂之宇、往古來今謂之宙 「淮南子(齊俗訓)」のように「宇」を空間、「宙」を時間とする説や、「宇」を天、「宙」を地とする説などがある (三省堂、大辞林)

宇宙論研究の目的

- 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

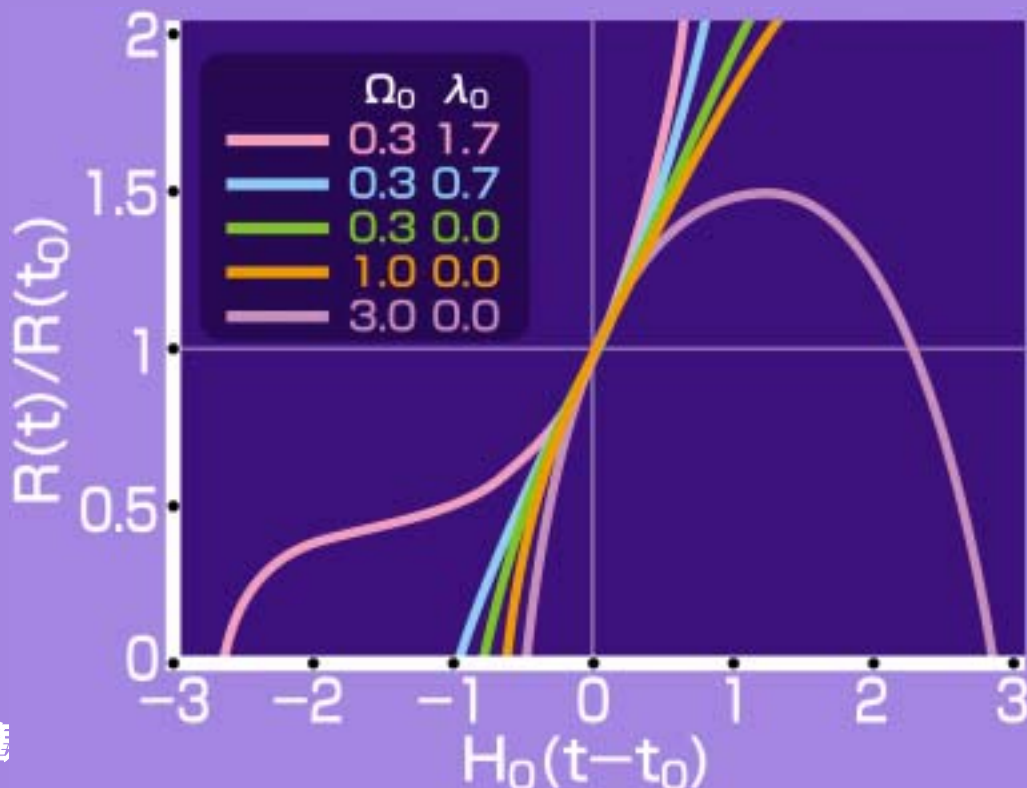
- 1916年～ 一般相対論的宇宙モデル
- 1929年 宇宙膨張の発見
- 1946年～ ビッグバンモデル
- 1965年 CMBの発見
- 1980年～ 宇宙の大構造の発見
素粒子論的宇宙論の誕生
宇宙論的数値シミュレーション
- 1992年 CMB温度ゆらぎの検出
- 1990年代後半～
宇宙論パラメータの精密決定

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

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 :

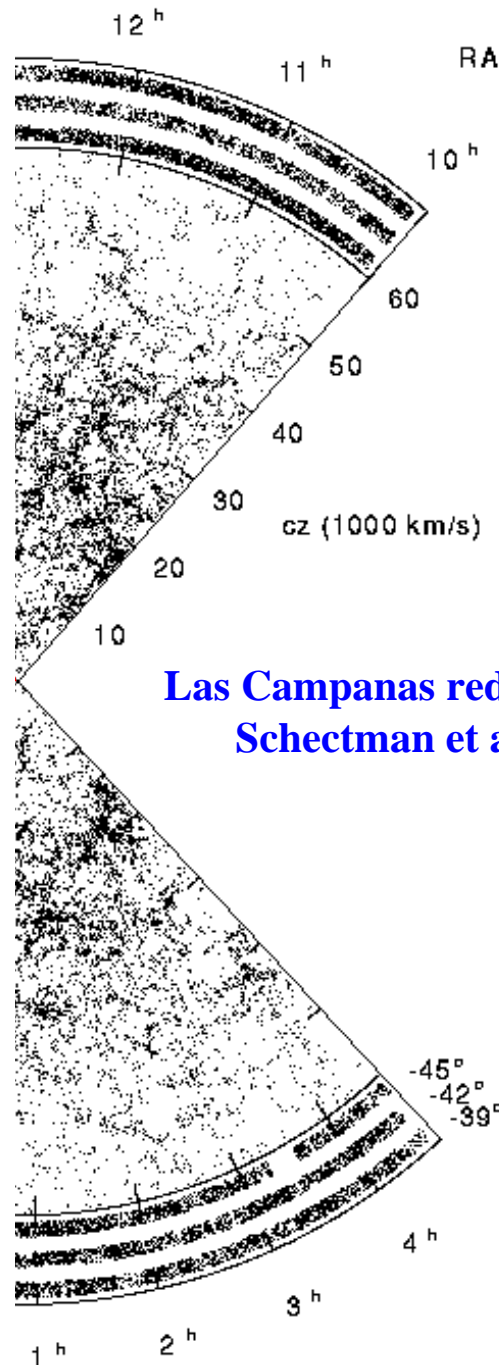
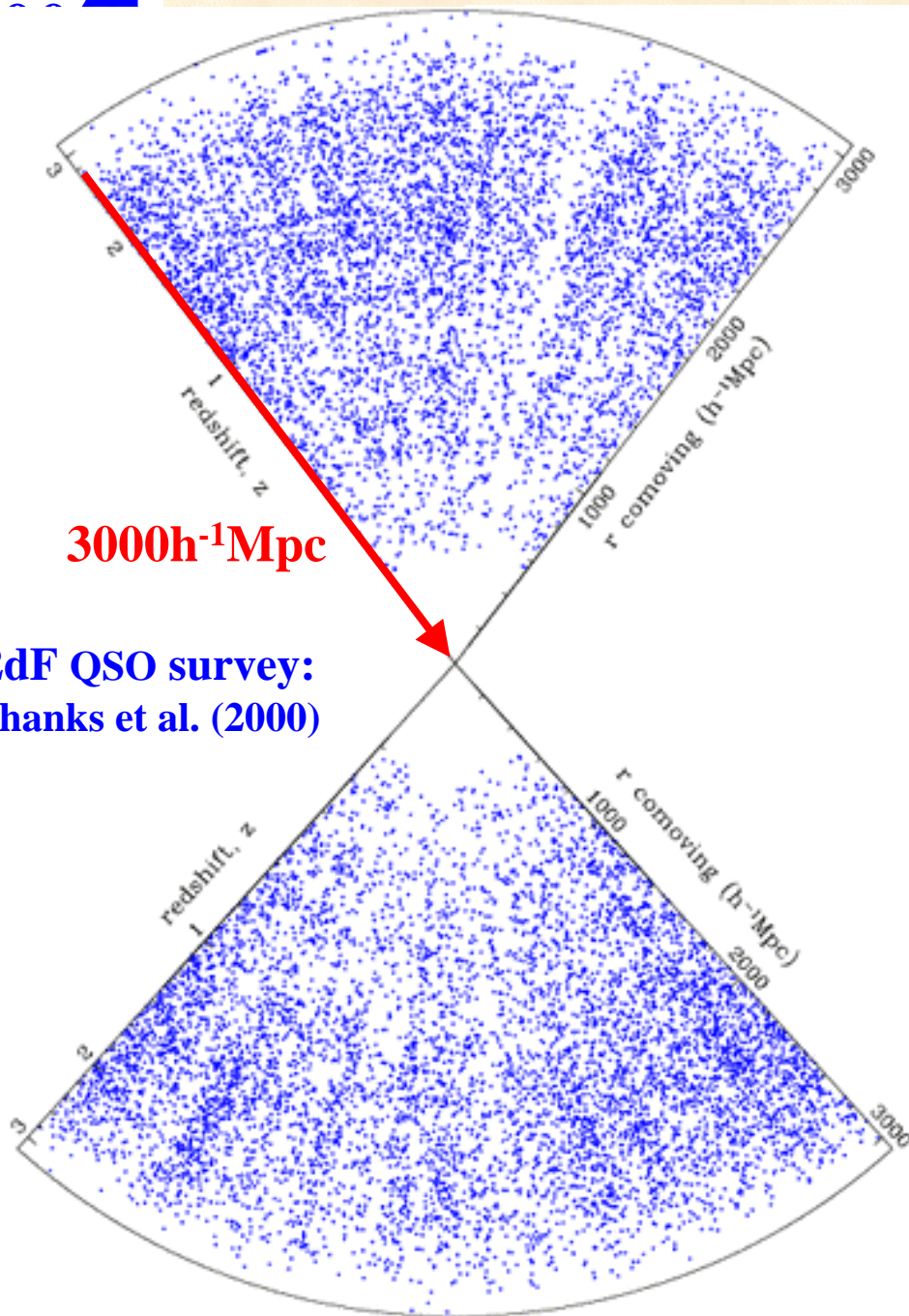
$$\rho_c \equiv \frac{3H_0^2}{8\pi G} \approx 2 \times 10^{-29} h^2 \text{g/cm}^3$$

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

17^h

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

3000h⁻¹Mpc



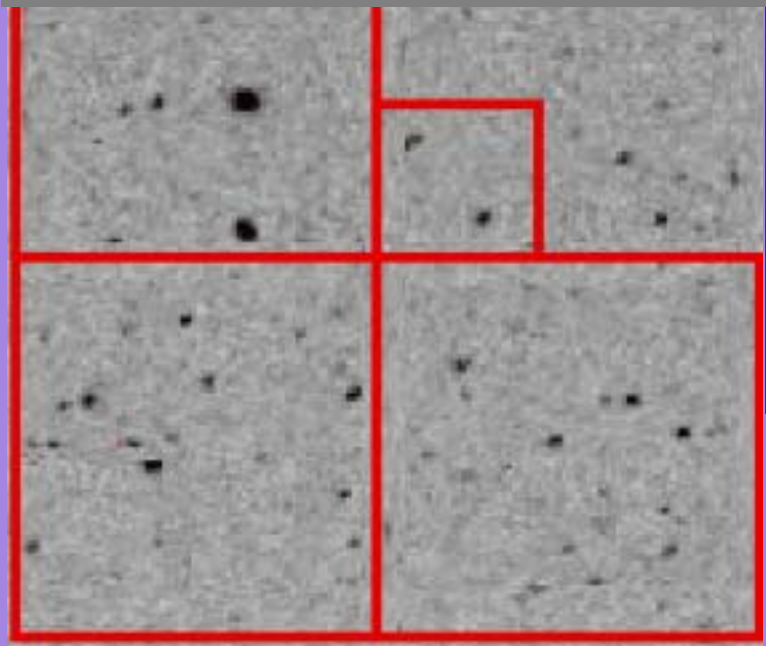
Las Campanas redshift survey:
Schectman et al. (1996)

km/s

深宇宙: Hubble Deep Field

<http://osite.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

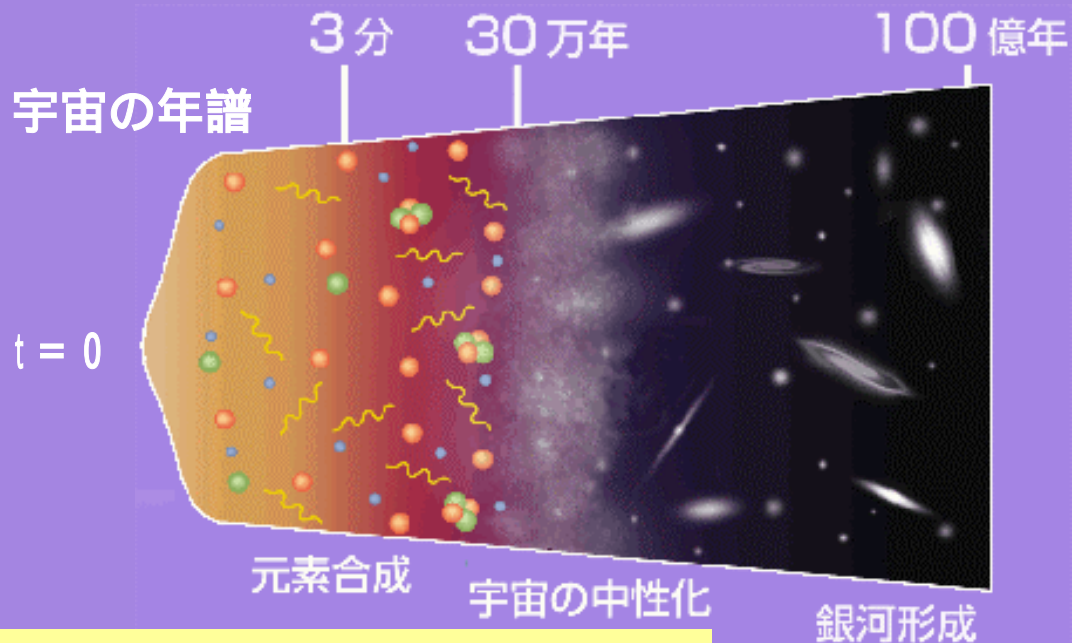
宇宙の晴れ上がりとCMB

■ 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

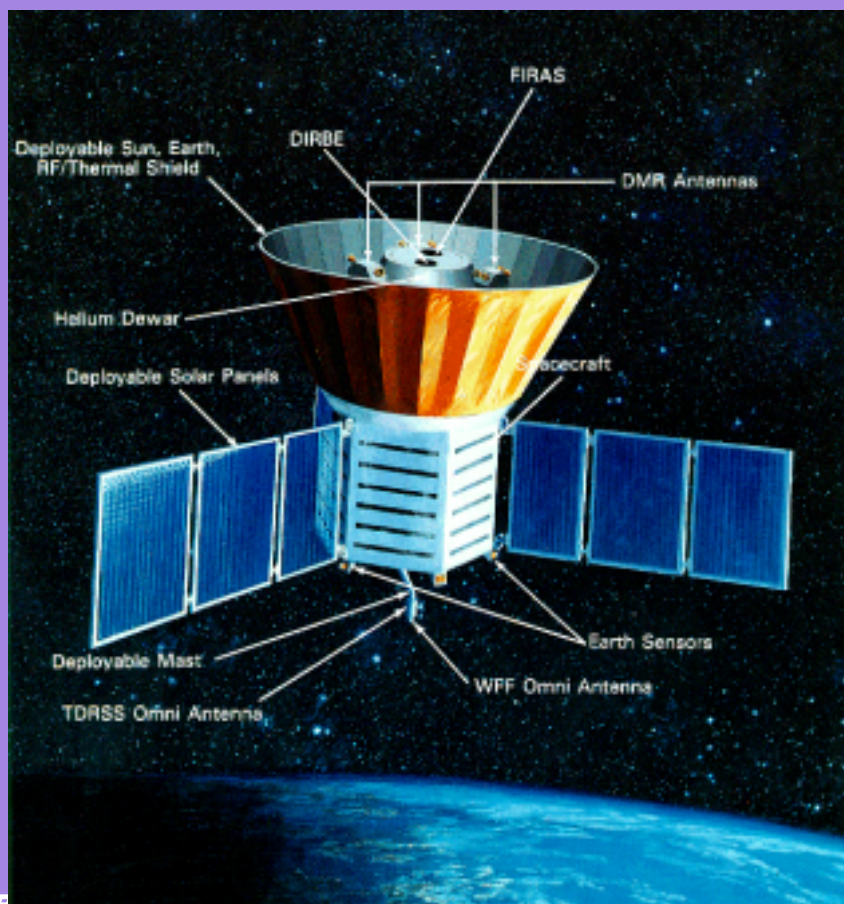


CMBは、晴れ上がり直後の宇宙を満たしていた電磁波(今から100億年以上も前の宇宙の光の化石)

CMB温度ゆらぎの観測

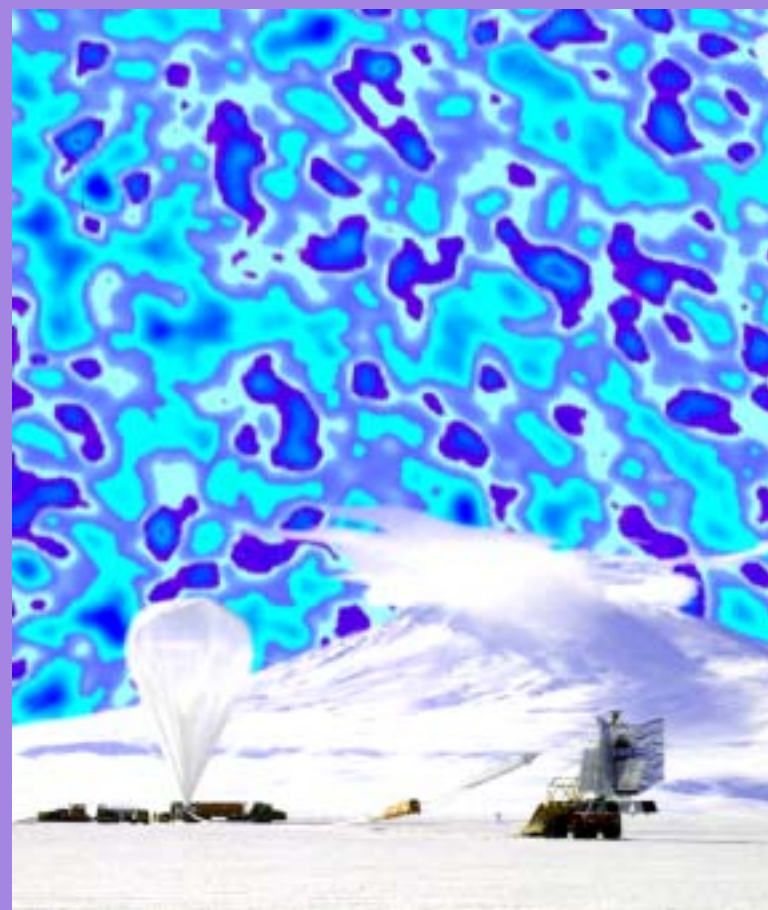
COBE 衛星

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



BOOMERanG 気球実験

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



CMB: 全天温度地図



■ 1965: 一様成分
(宇宙の温度)

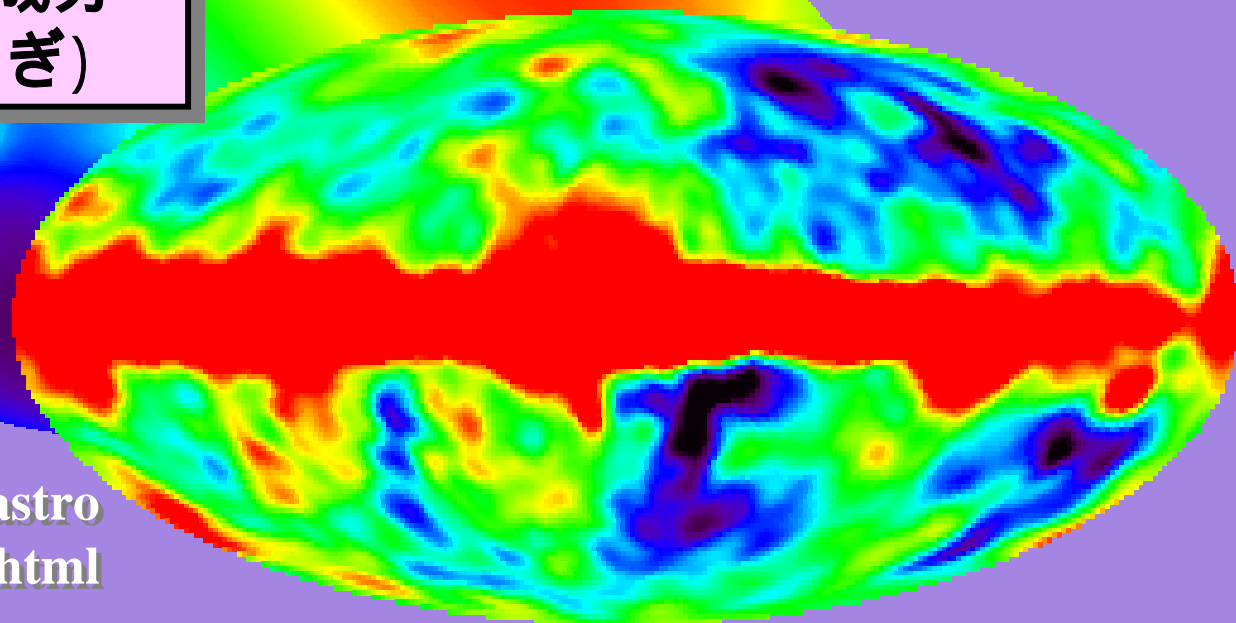
$$T_{CMB} = 2.73 \text{ [K]}$$

■ 1976: 二重極成分

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

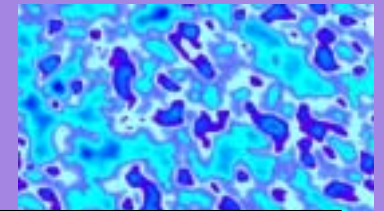
■ 1992: 多重極成分
(宇宙の温度ゆらぎ)

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

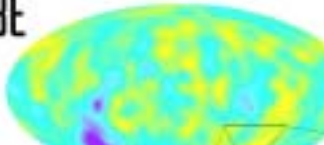


http://space.gsfc.nasa.gov/astro/cobe/ed_resources.html

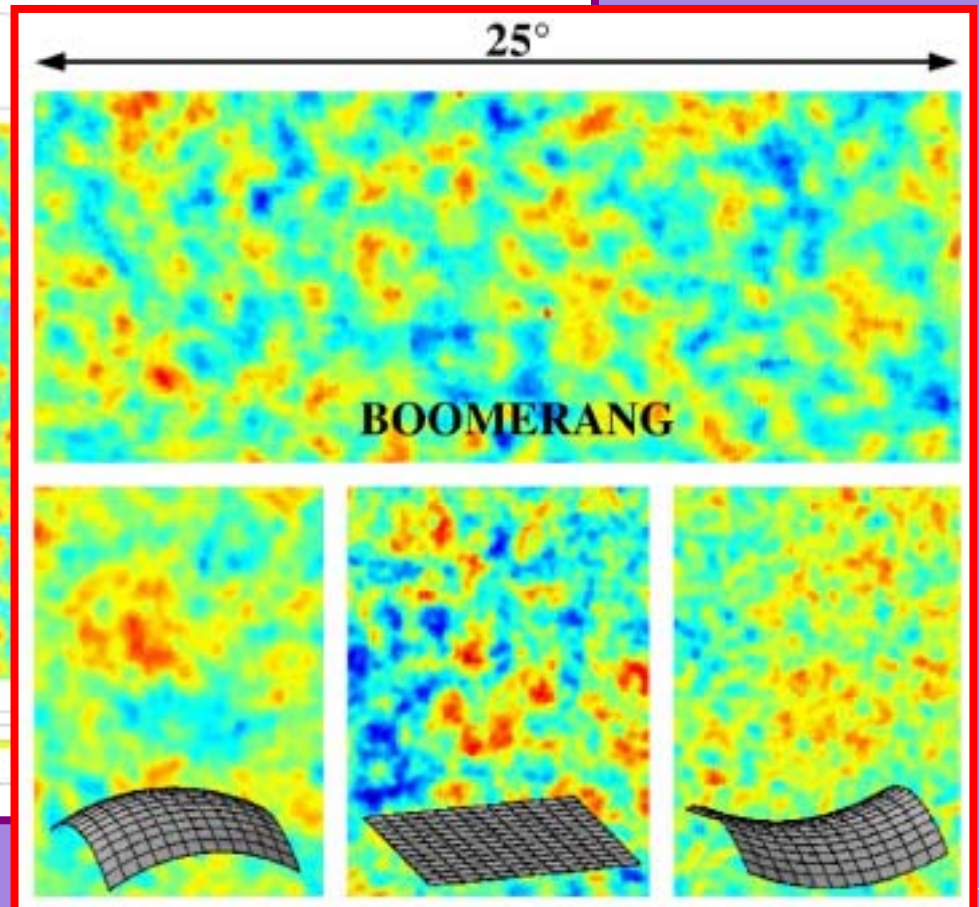
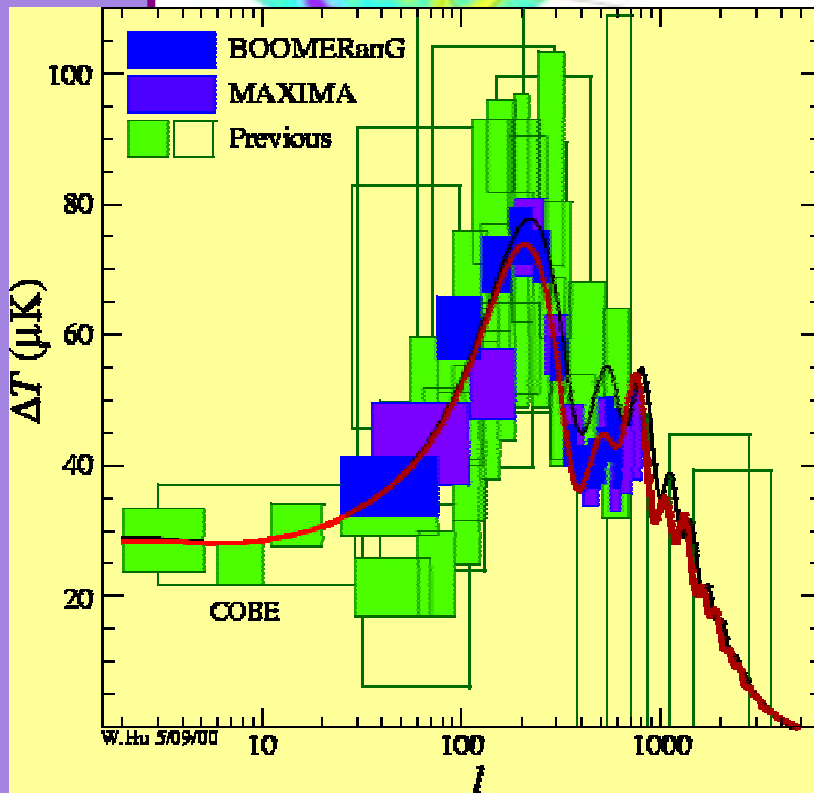
CMB温度地図と宇宙の曲率



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

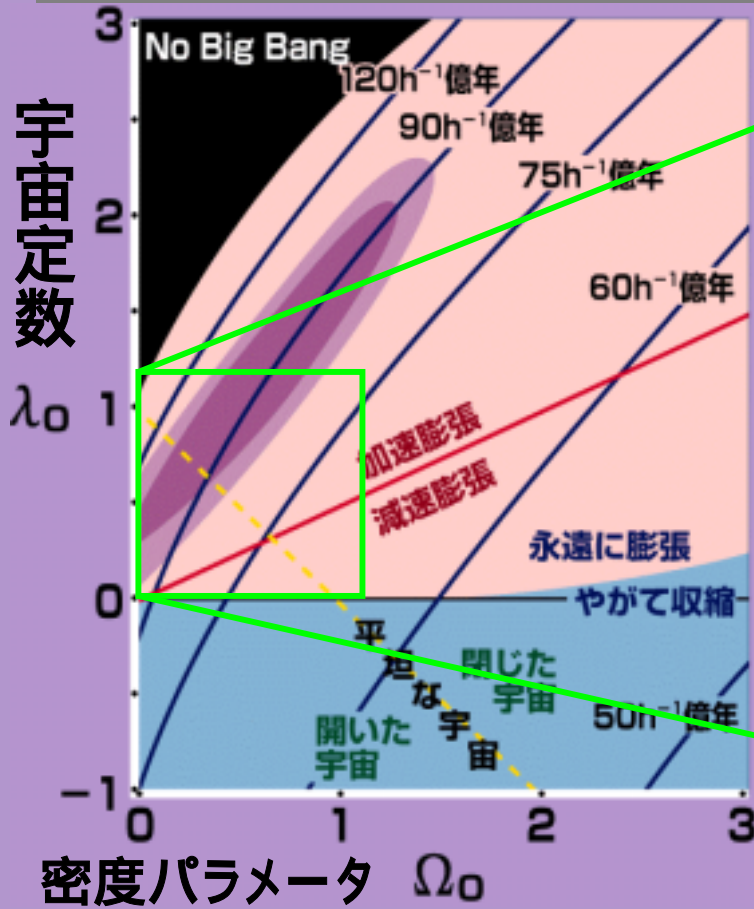


BOOMERanG 観測

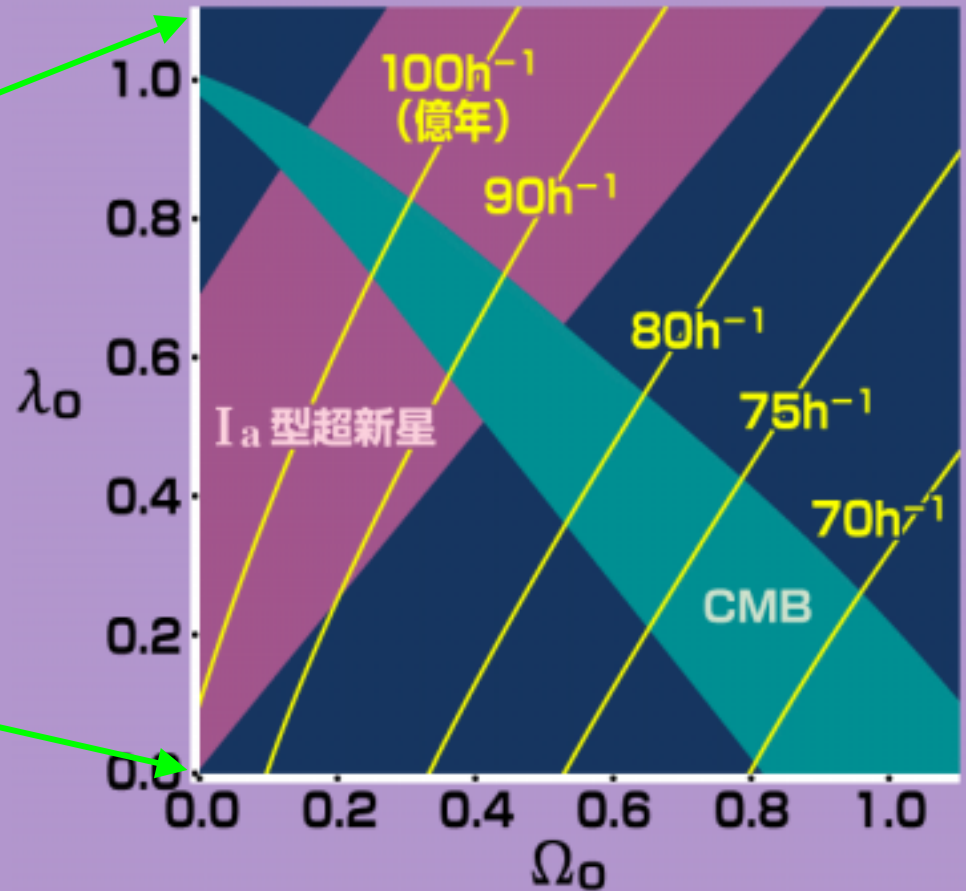
質量密度パラメータと宇宙定数

■ $\Omega_0=0.3, \lambda_0=0.7$

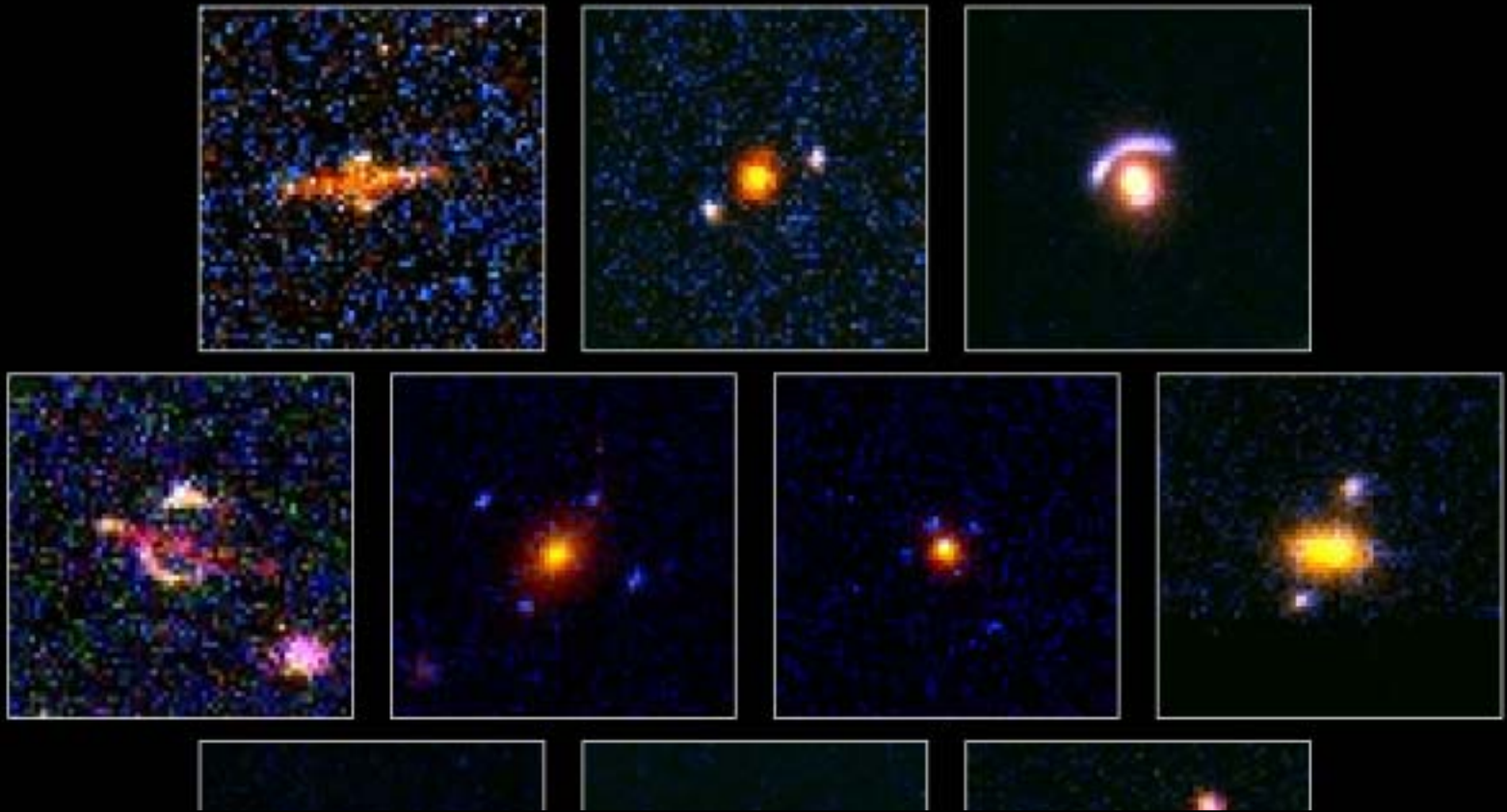
宇宙は平坦 ($k_0=0$) ?



超新星観測からの制限



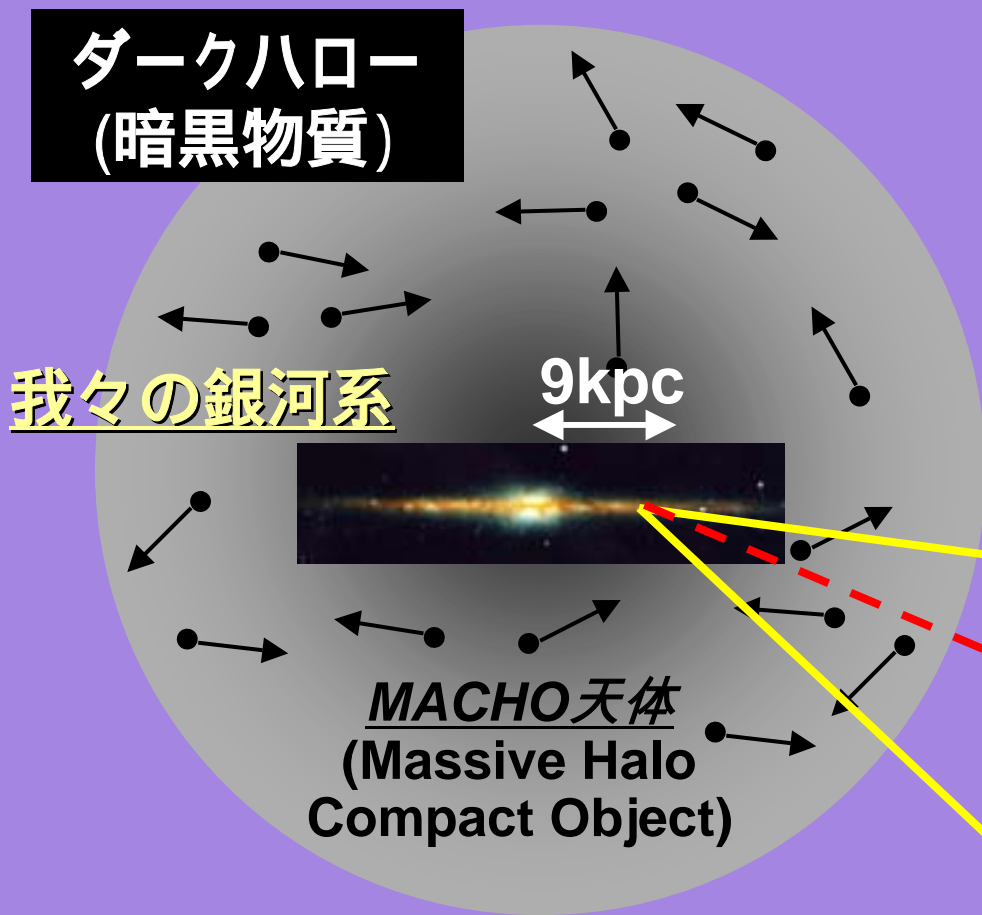
CMB 観測からの制限



■ 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



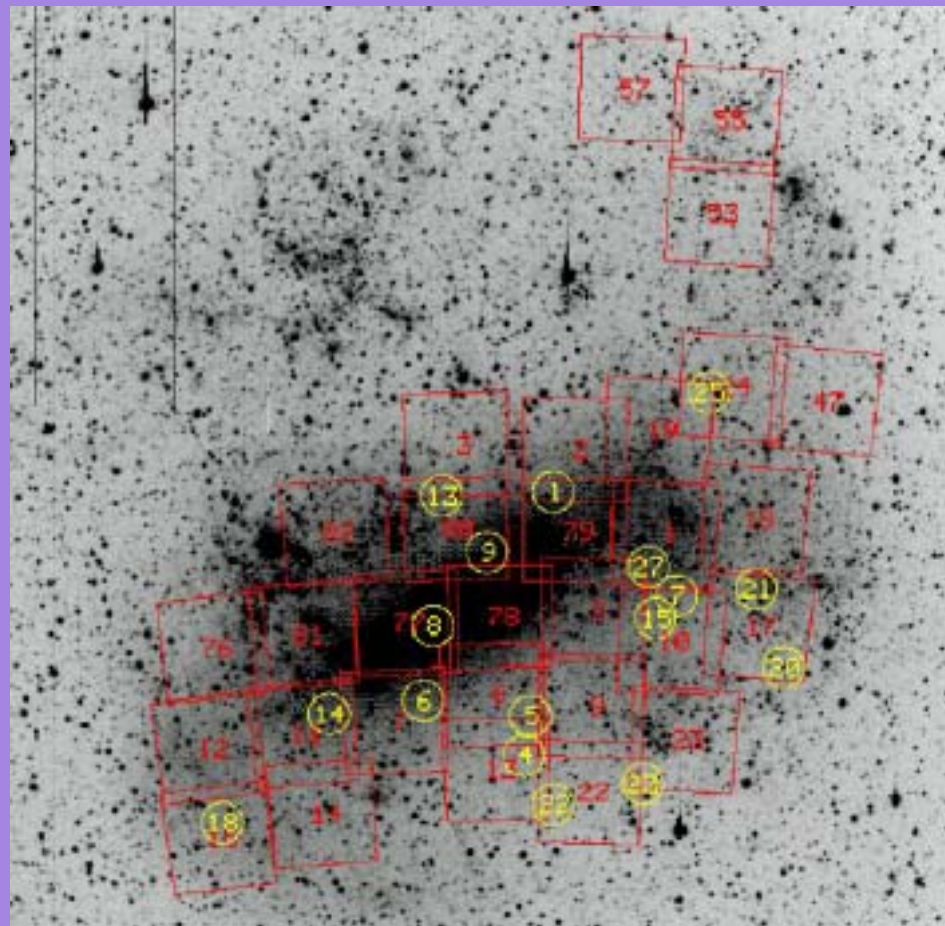
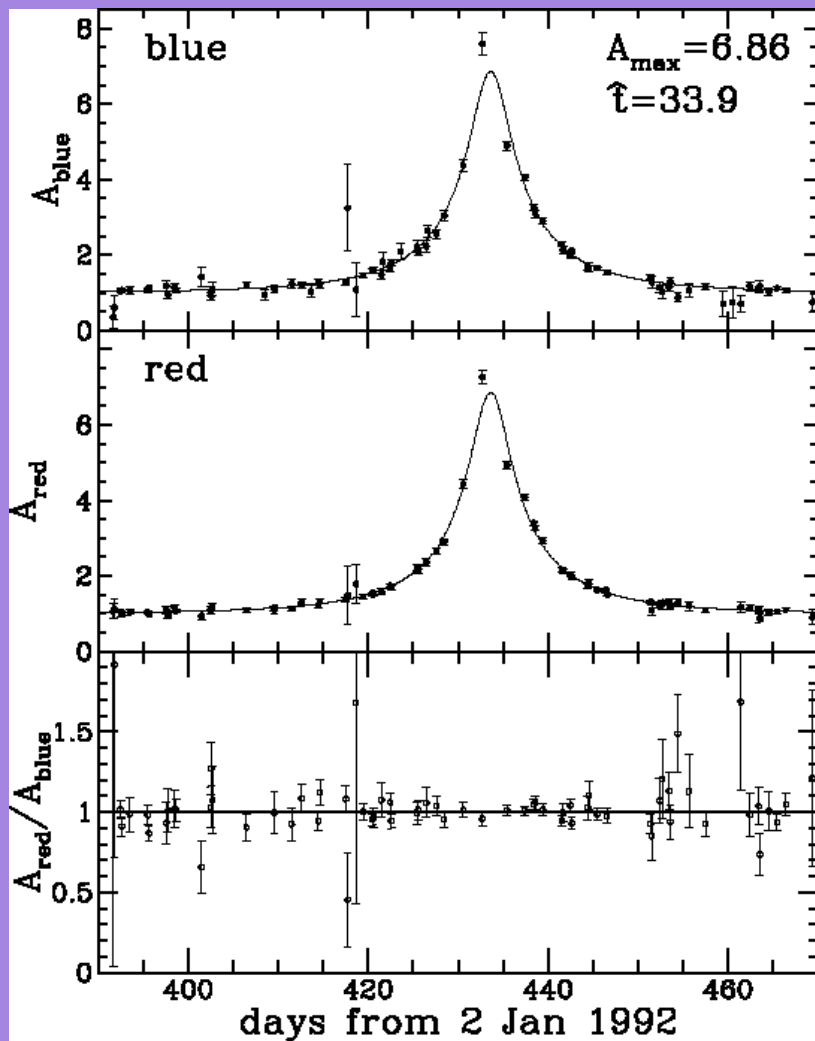
■ 銀河系ハロ - の MACHO天体による重力マイクロレンズ現象で大マゼラン星雲の星が増光する兆候を探す

50kpc

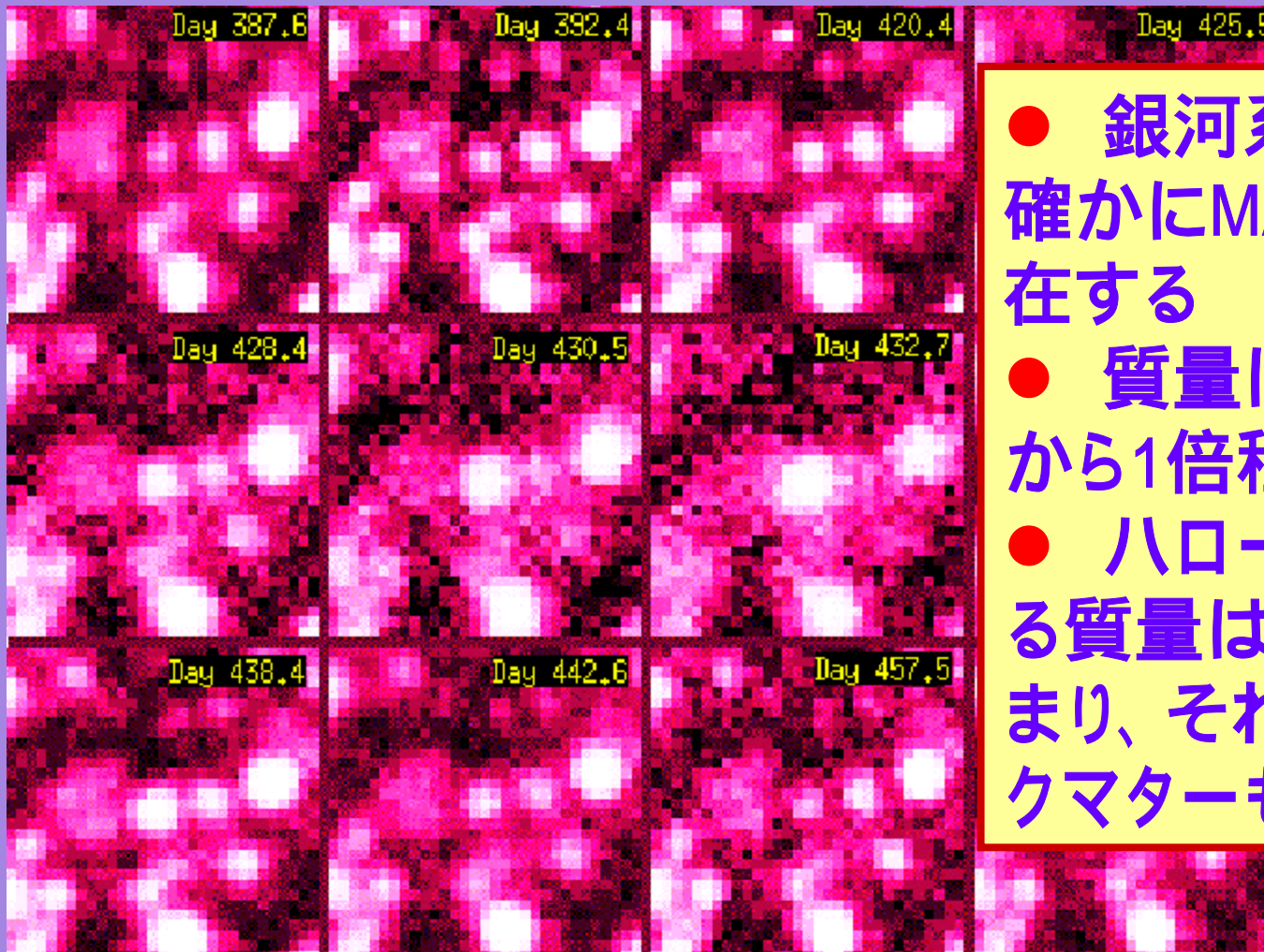


大マゼラン星雲

MACHOイベントの光度曲線



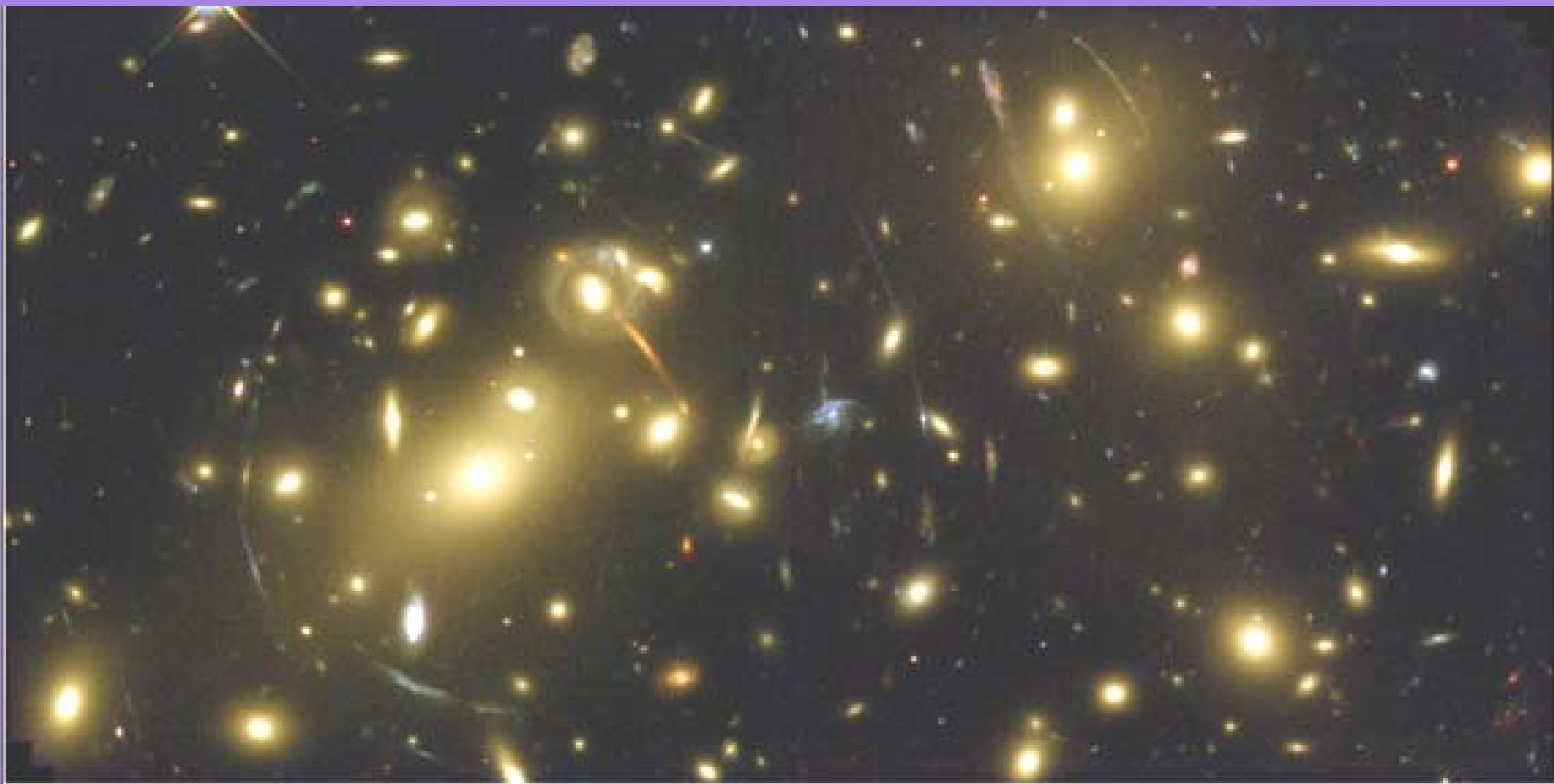
Massive Compact Halo Objectの発見



- 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)

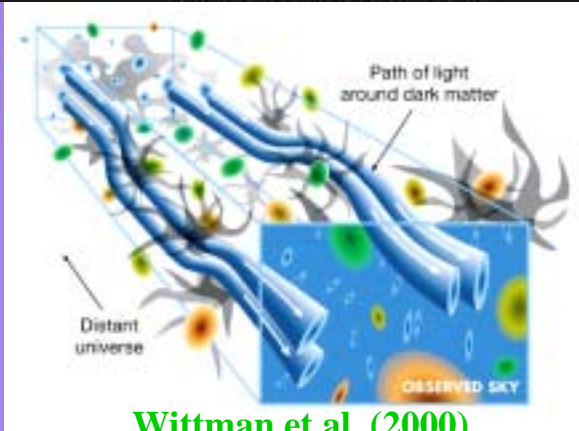
最初に発見された重力マイクロレンズ現象 (Alcock et al. 1993)

銀河団による重力レンズアークの形成



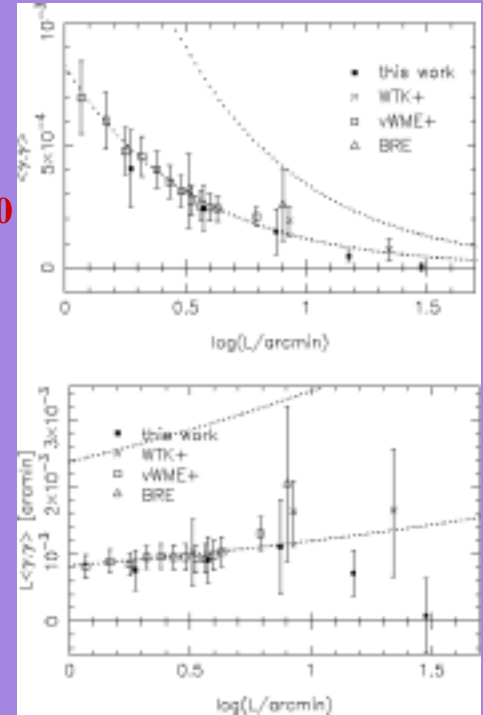
Galaxy Cluster Abell 2218
Hubble Space Telescope • WFPC2

重力レンズを用いた 多=多マ多=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



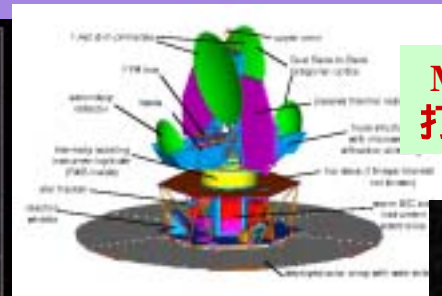
多 波長で



ALMA



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

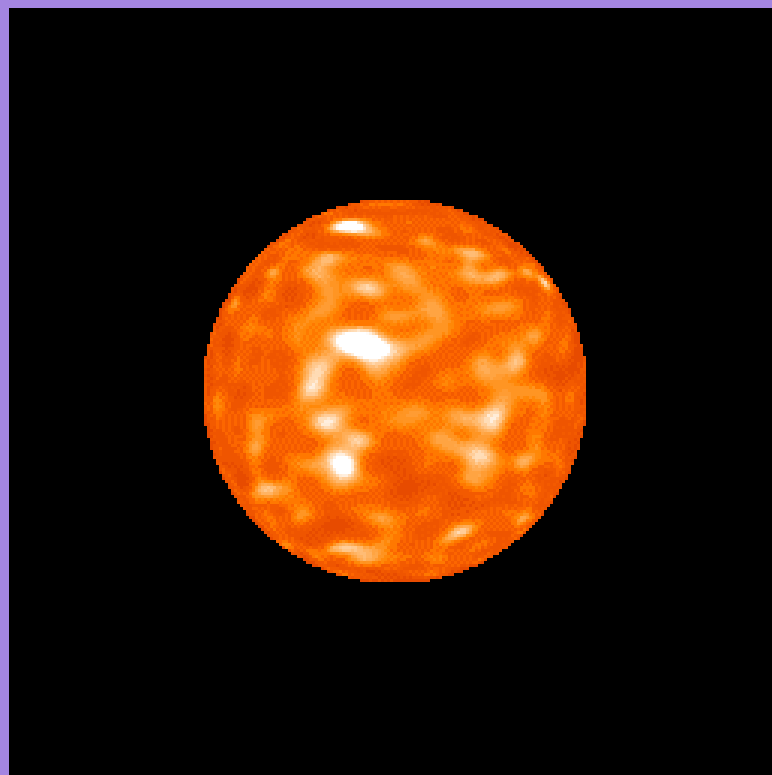
(素粒子論の進展を待つしかない、、、)

- 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

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

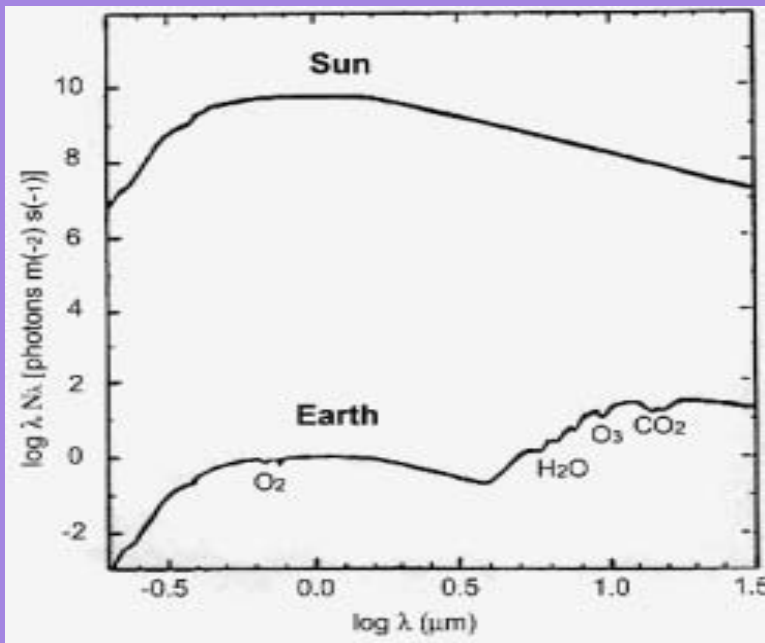
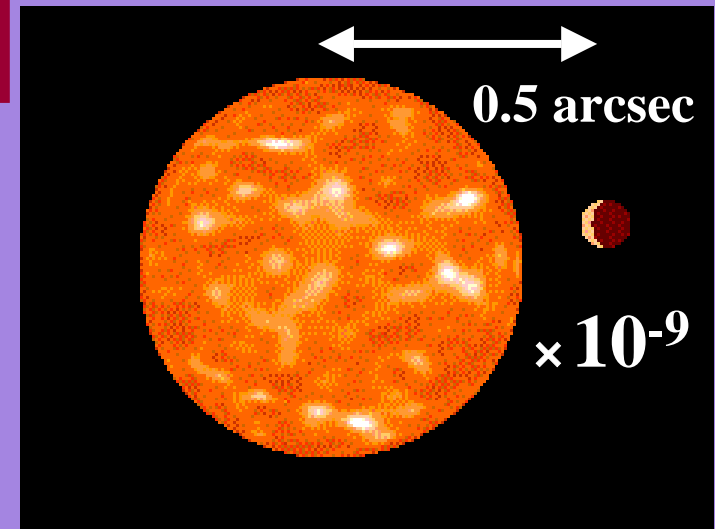
- 地球外知的生命体は存在するか
- 地球外文明はあるか

やや危ない
↓

系外惑星の直接撮像？

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

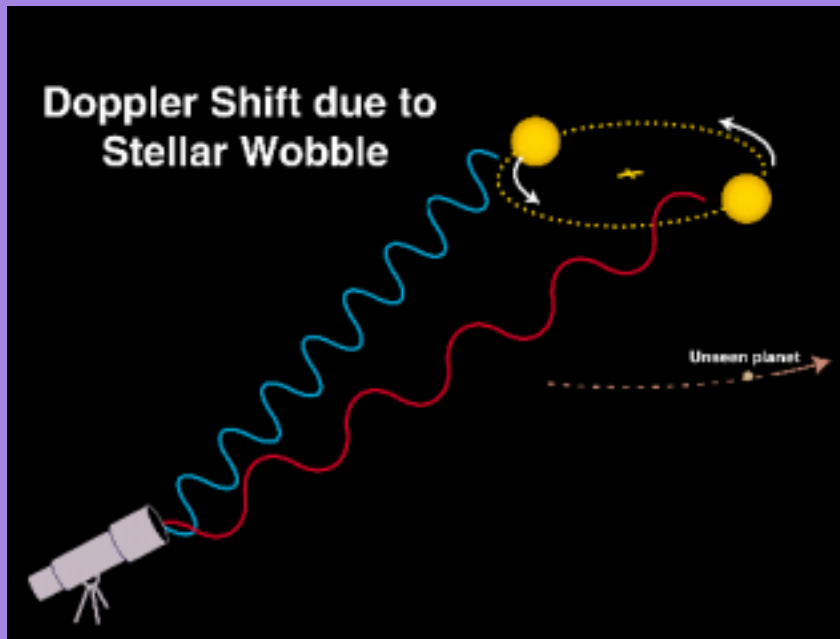


地上観測の典型的な角度分解能の大きさ内で、9桁程度も明るい主星のすぐ隣にある27等級の暗い天体を観測する

ほとんど不可能！

主星の速度変動

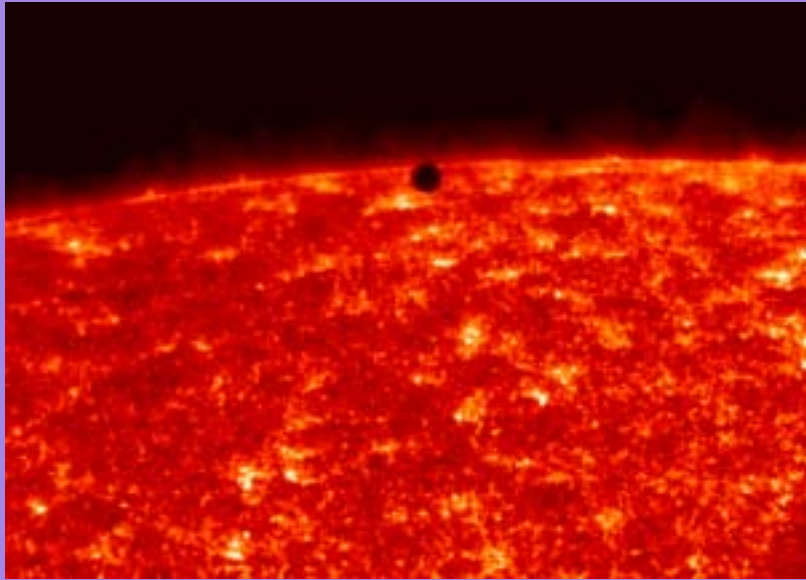
惑星は直接見えなくても、
主星の軌道はその影響を受ける



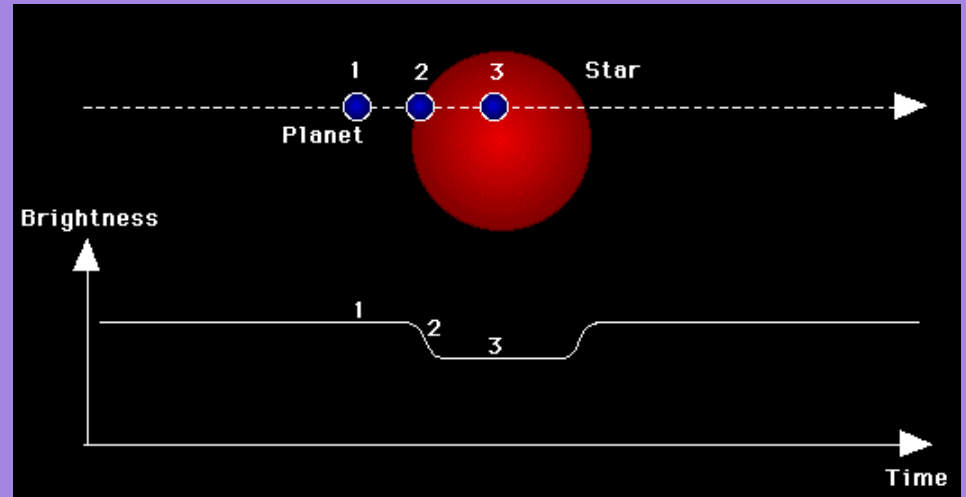
太陽の受ける速度摂動：
12.5 m/s (木星)
0.1 m/s (地球)
(参考) 地球の公転速度
3万 m/s

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: $0.3\% \left(\text{AU}/\text{軌道半径} \right) \left(R_{\text{主星}}/R_{\text{太陽}} \right)$

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

地上での測光精度: 0.1% が限界(木星なら、地球は×)

パルサー信号到着時刻変動

主星の位置変動を、信号到着時間に換算すれば

$$\Delta t = 0.5 \text{ 秒} \left(\frac{M_{\text{planet}}}{M_{\text{Jupiter}}} \right) \left(\frac{M_{\text{sun}}}{M_{\text{star}}} \right)^{1/3} \left(\frac{P}{1 \text{ 年}} \right)^{2/3}$$

このような到着時間の変動がモニターできるような定期的な信号を出すような天体？

パルサー（自転周期の安定性 $\sim 10^{-19} \text{s/s}$ ）

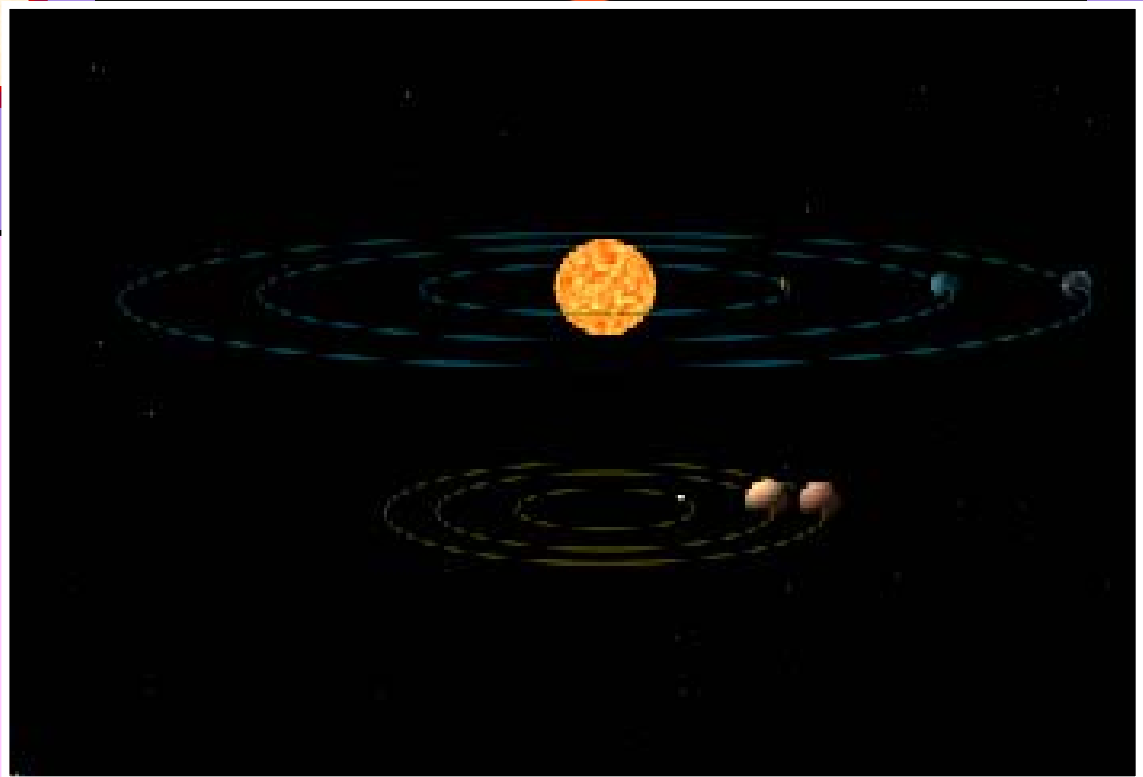
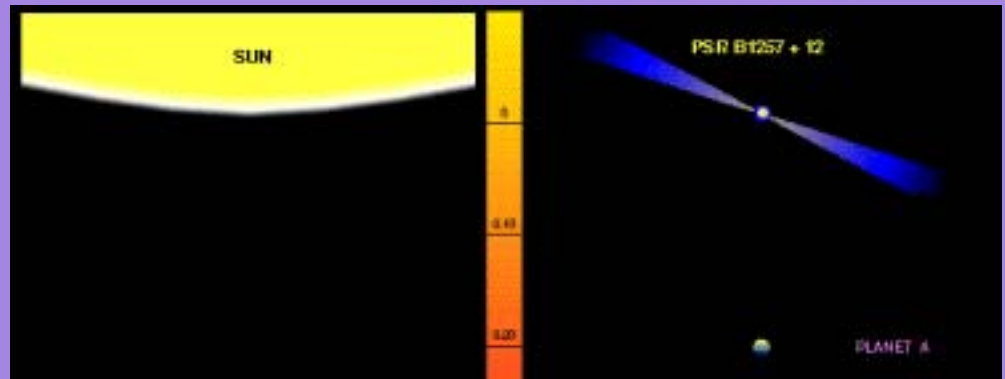
しかし、超新星爆発によって誕生したとされるパルサーがその後も惑星系を伴っているとは考えがたい、、、

太陽系外惑星発見の歴史

- 1992年: PSR 1257 - 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 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4月末で67個の系外惑星

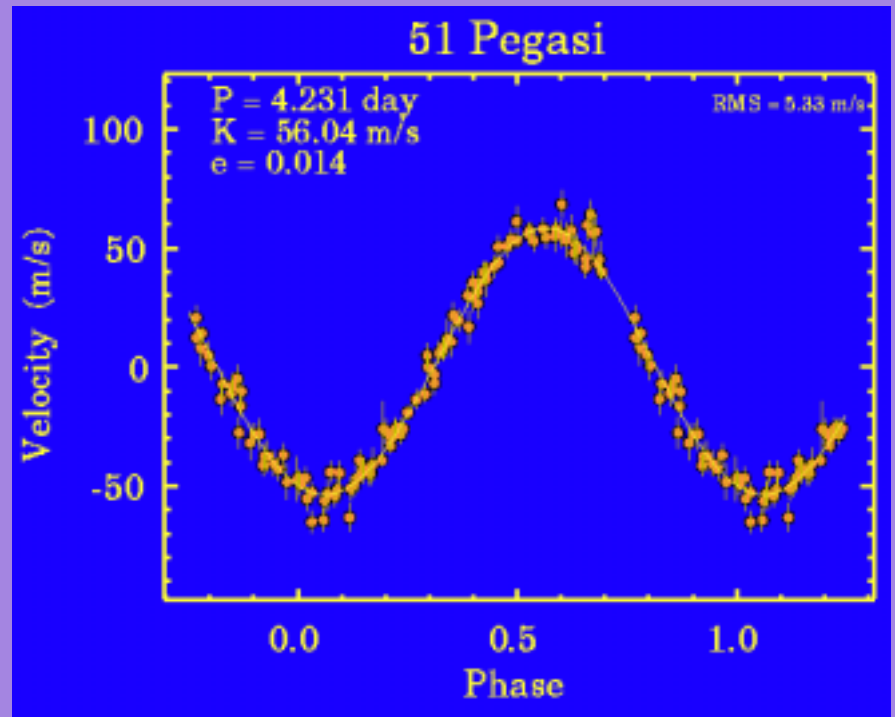
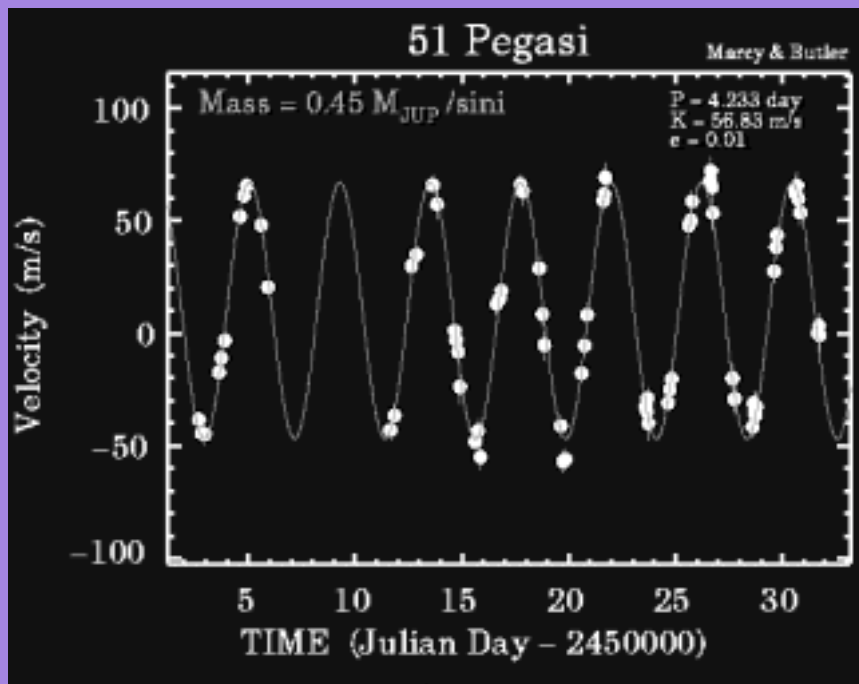
PSR1257+12: 3 planets around a pulsar

- 初めて発見された系外惑星かつ惑星系 (2つは確実、多分3つ、あるいは4つ?)



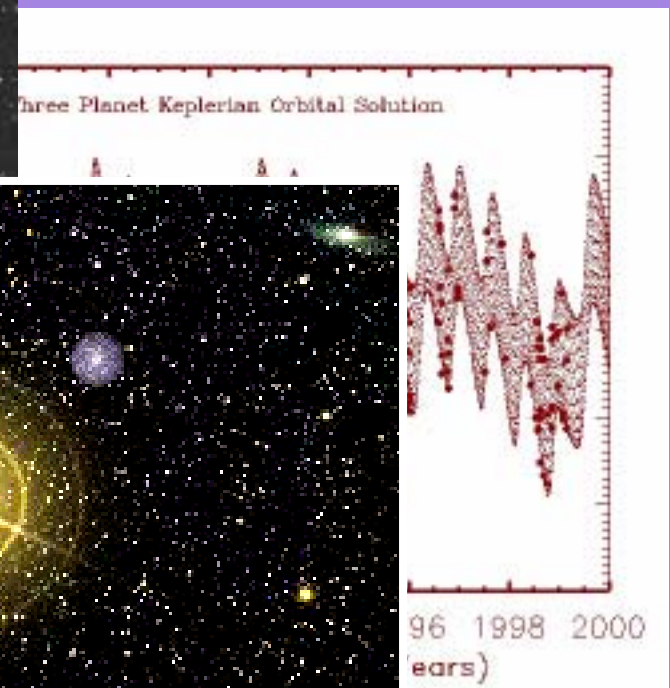
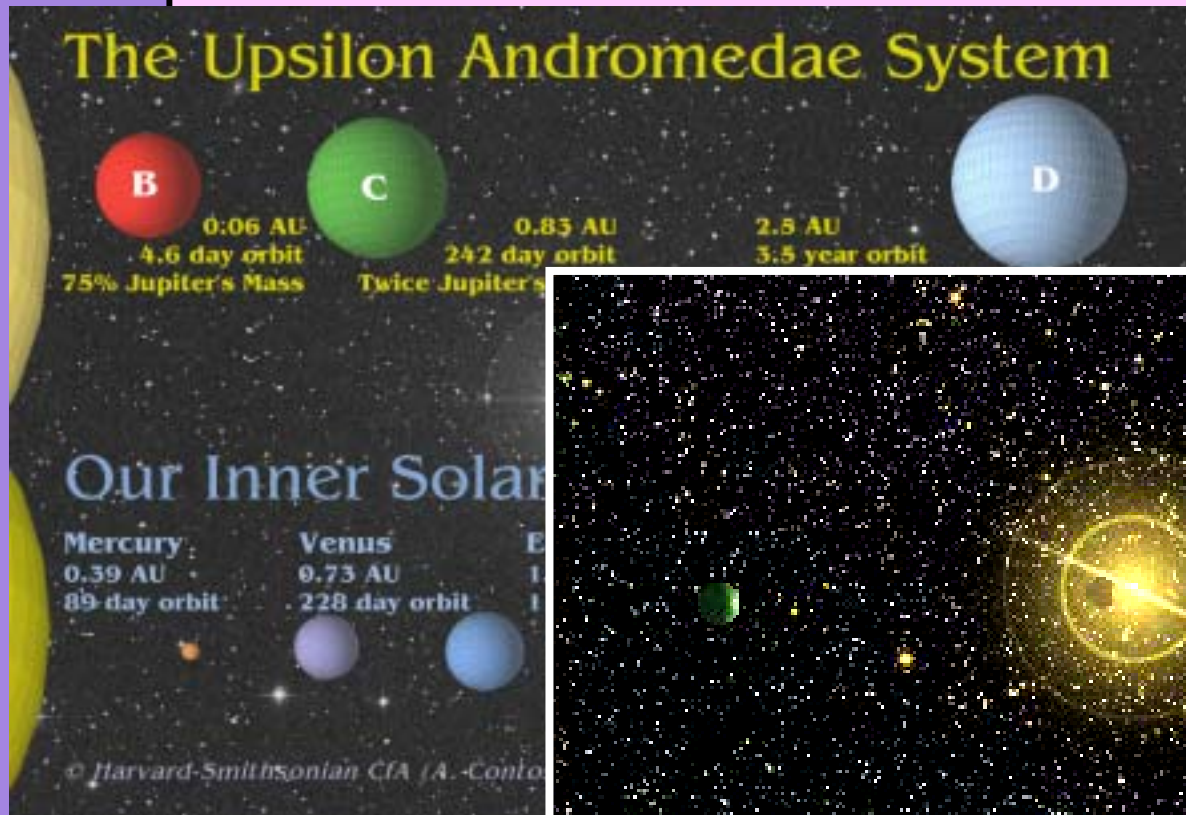
51 Pegasi b: 主系列星の周りの惑星

- 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)



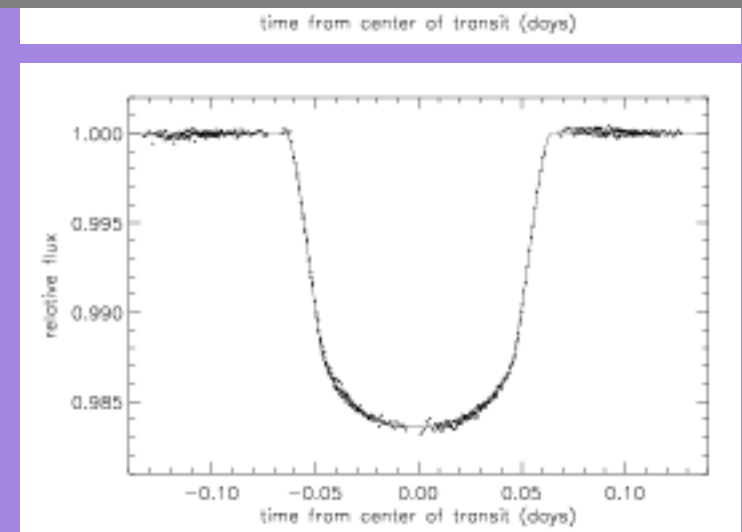
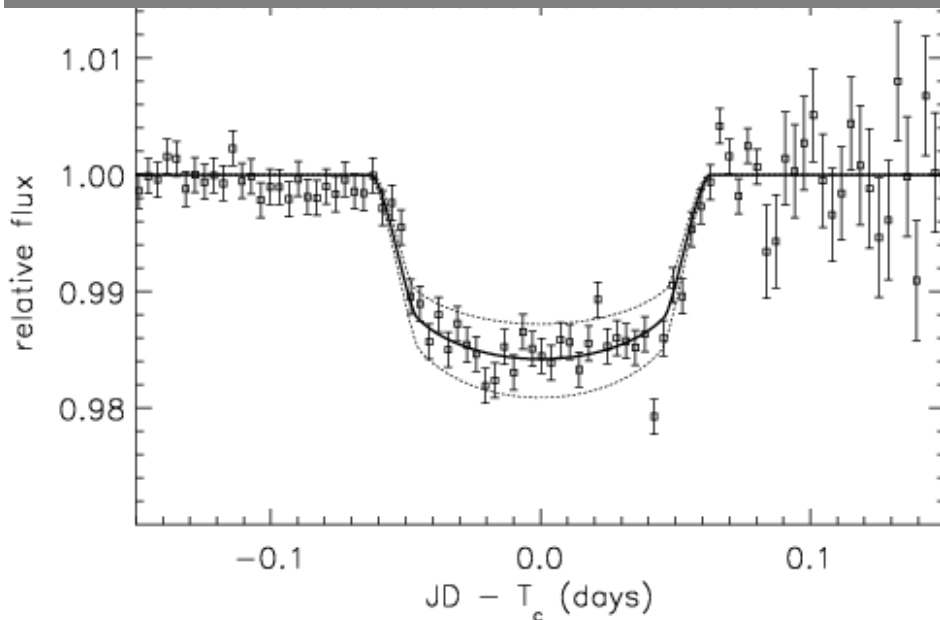
And: 3 planets around the star

- 主系列星に対して初めての惑星系の発見(Butler, Marcy & Fischer 1999)



HD209458の食の観測

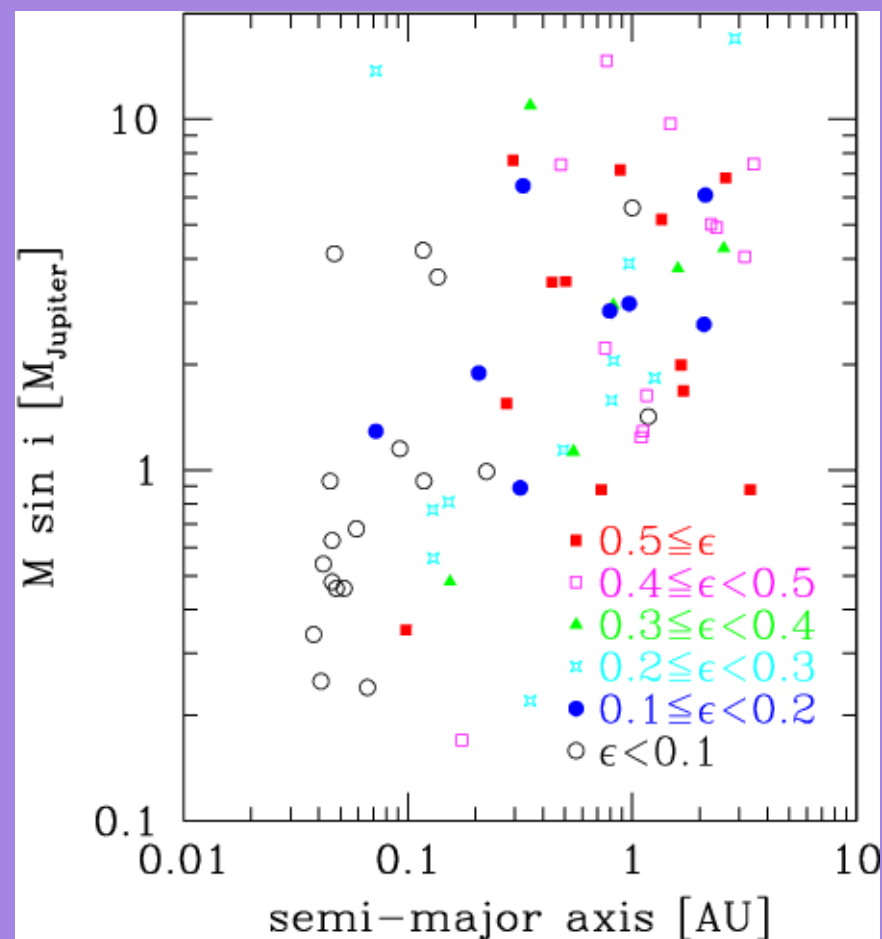
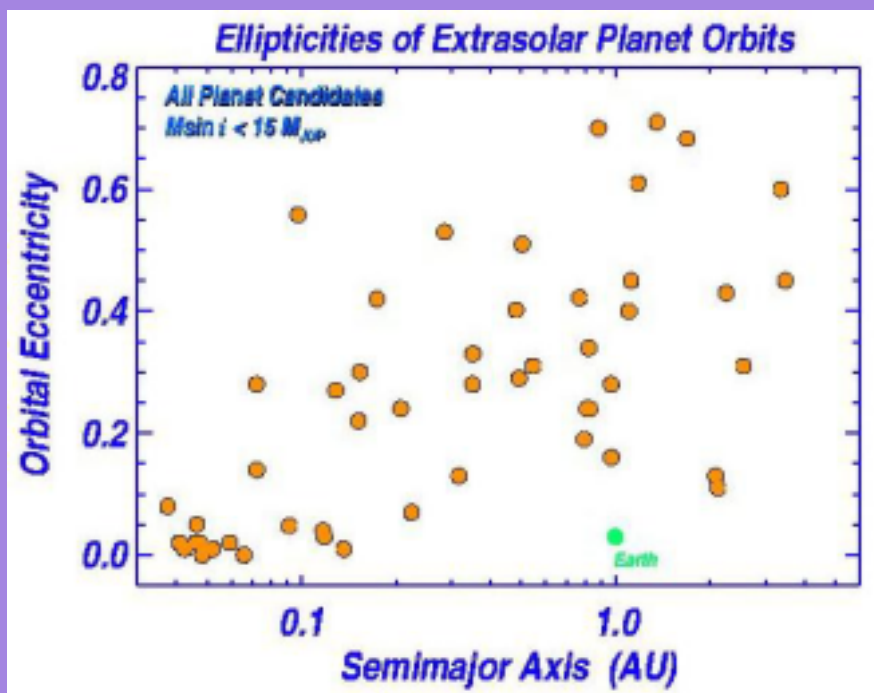
- 速度変動のデータに合わせて惑星の食を初検出
(Charbonneau et al. 2000, Henry et al. 2000)
- 質量: $0.63M_{\text{木星}}$, 半径: $1.35R_{\text{木星}}$, 密度: 0.3g/cm^3
巨大ガス惑星の最も確実な証拠



Brown et al. (2001)

発見された 系外惑星 一覽

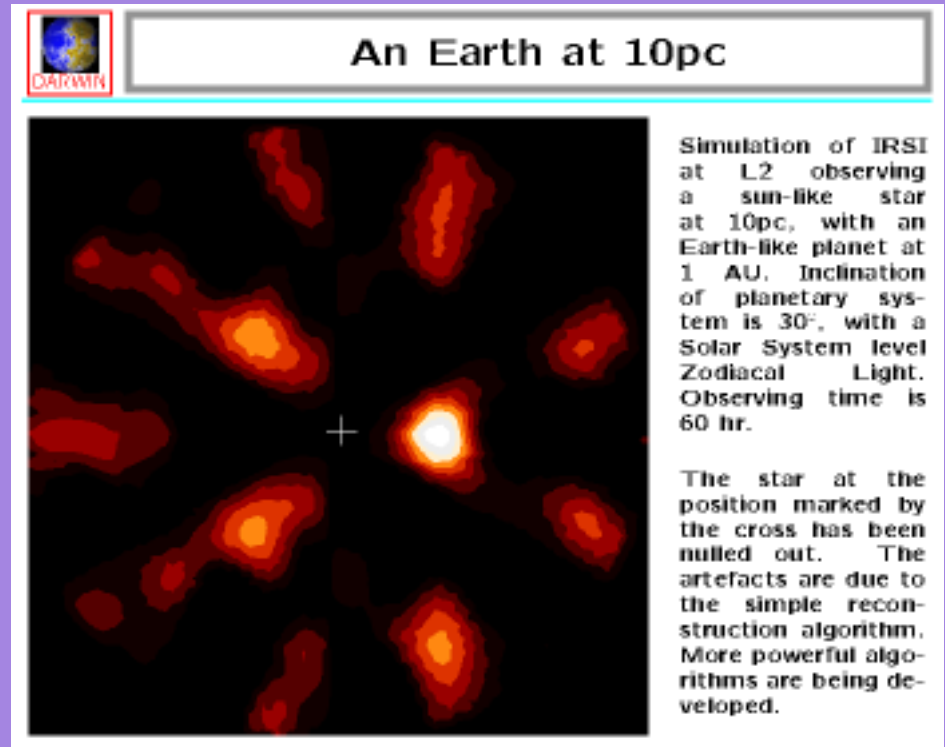
- 発見ラッシュ(2001年4月末で67個)
- 軌道半径が小さく、離心率が大きいものが多い
- ほぼ木星程度の質量



Darwin(ESA:launch after 2015)

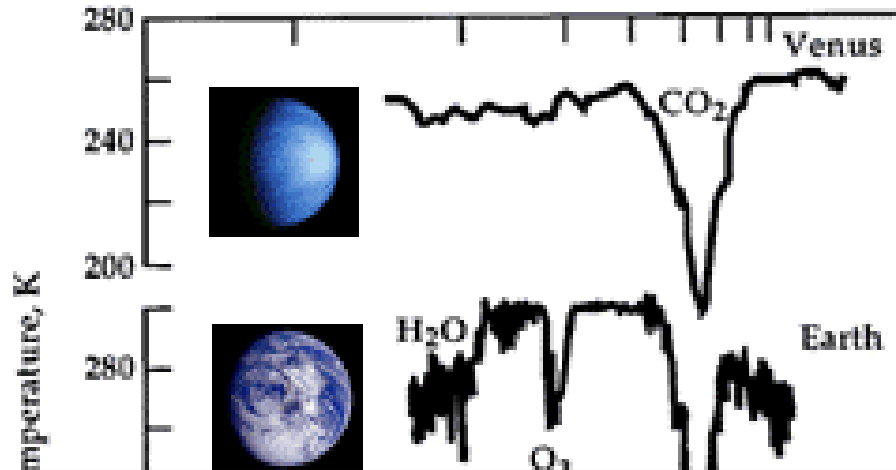


infra-red space interferometry:
imaging and spectroscopy



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

まとめと展望



見の時代はすでに終

“characterization”
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？

論語 卷第一 學而第一章

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、學而時習之、不亦說乎、有朋自遠方來、不亦樂乎、人不知而不愠、不亦君子乎。

孔子が言われた、「学んだことをおさらいするのは楽しいことだね。友達¹が遠くから訪ねてくる、これも楽しいことだね。人が理解してくれなくても気にしない、君子だからだね。」。

<http://www.confucius.org/>

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！