

# 宇宙理論研究室ガイダンス

[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)

2003年 2月20日

教授：佐藤勝彦

(素粒子的宇宙論、天体核物理)

助手：長滝重博

(高エネルギー天体物理学)

助教授：須藤 靖

(観測的宇宙論)

助手：樽家篤史

(観測的宇宙論、相対論)

# 宇宙理論研究室での研究内容

## ■ 初期宇宙論・相対論

- インフレーション理論
- ビッグバン元素合成
- 多次元/ブレン宇宙論

## ■ 高エネルギー天体物理学・高密度星

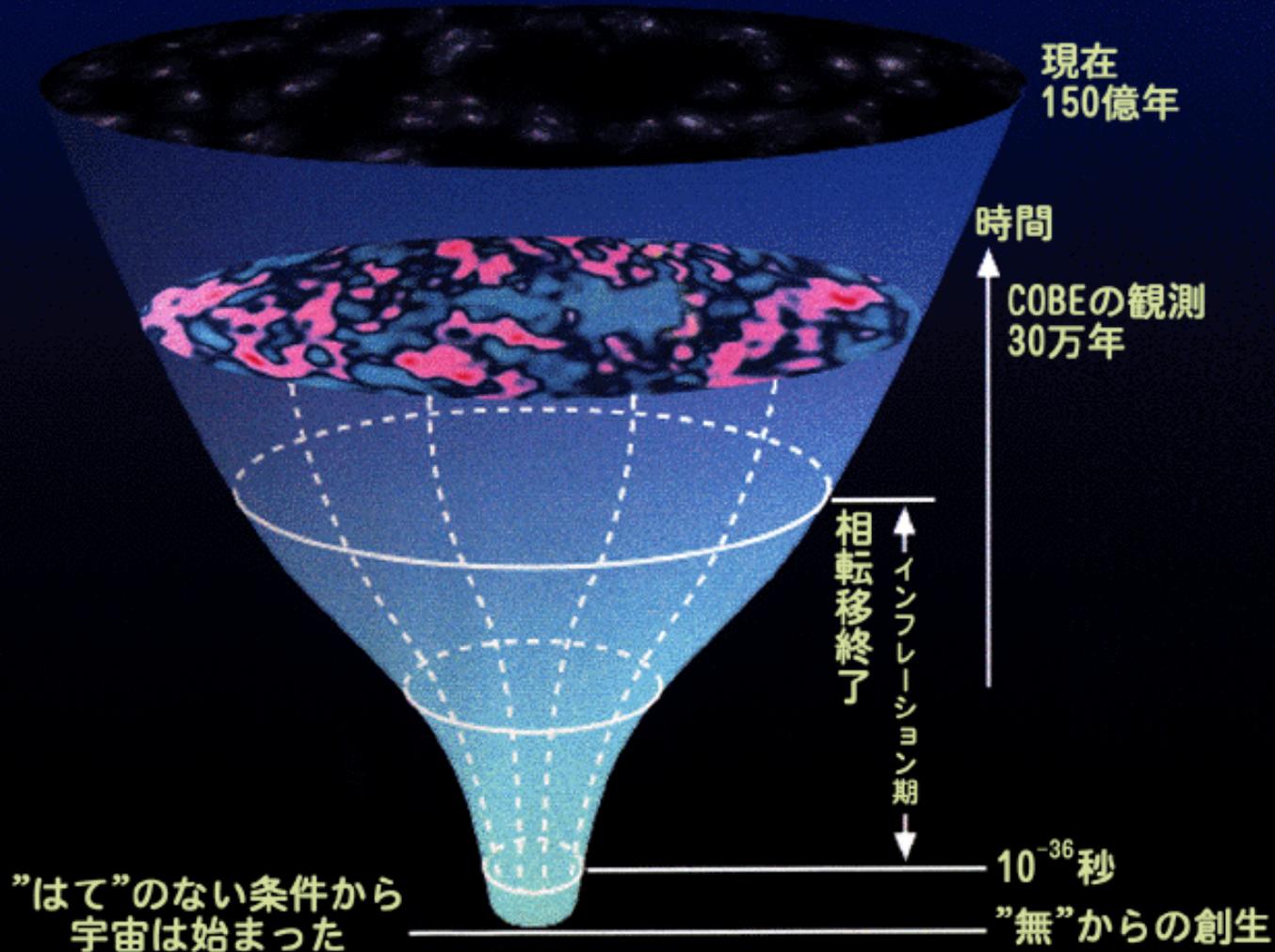
- 中性子星の構造と状態方程式
- 超新星爆発シミュレーション
- 超新星ニュートリノ
- 高エネルギー宇宙線の起源と伝播

## ■ 観測的宇宙論

- 宇宙モデルの観測的検証のための理論構築
- 宇宙論的構造形成重力・流体シミュレーション
- スローンデジタルスカイサーベイによる観測的宇宙論
- 太陽系外惑星探査

# 宇宙の創生と進化

宇宙が進化した結果、現在のような星や銀河などが生まれてきた。



# 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

# 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)

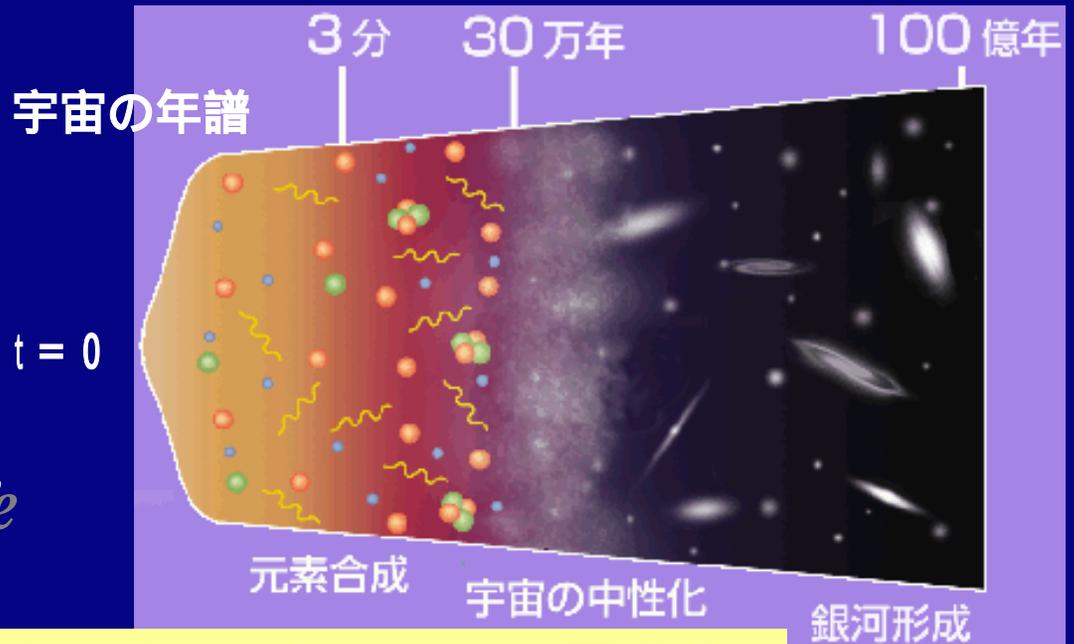
それまで完全に電離していた宇宙は、温度が約3000度以下 (宇宙誕生後約30万年) になると電子と陽子が結合して水素原子となる

## ■ 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:**

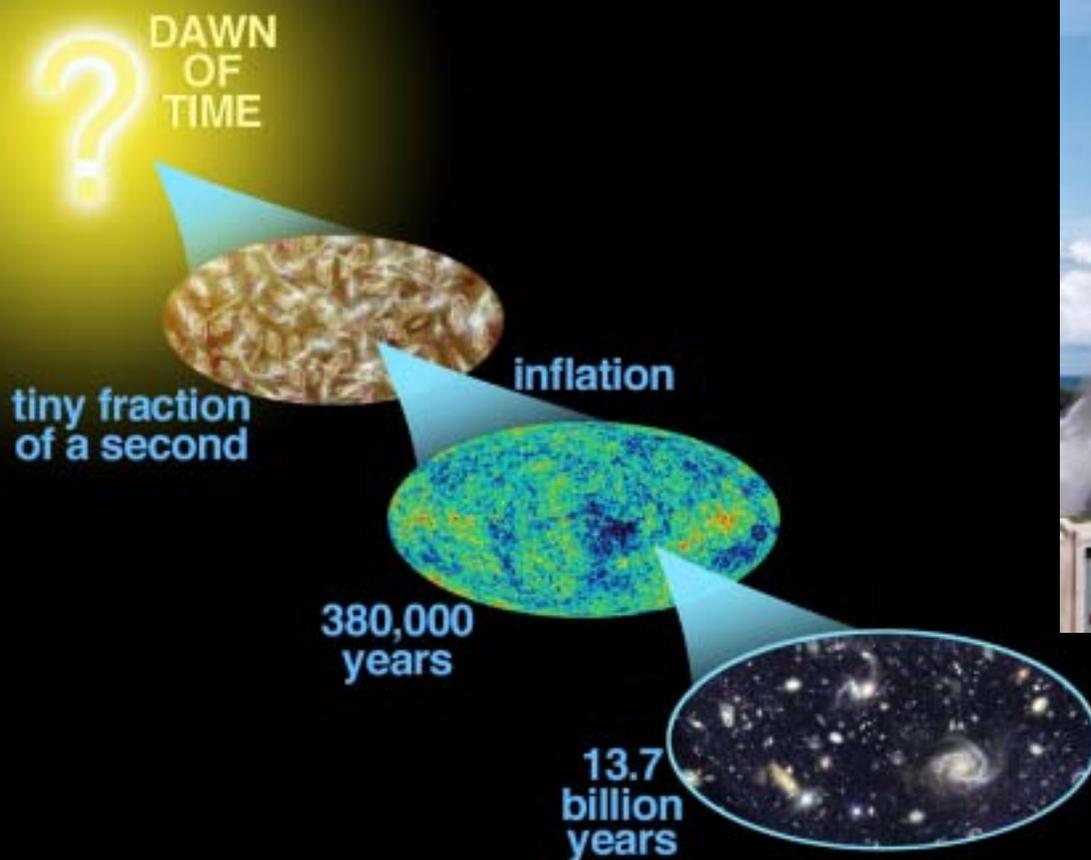
**Cosmic Microwave Background**



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)

# WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

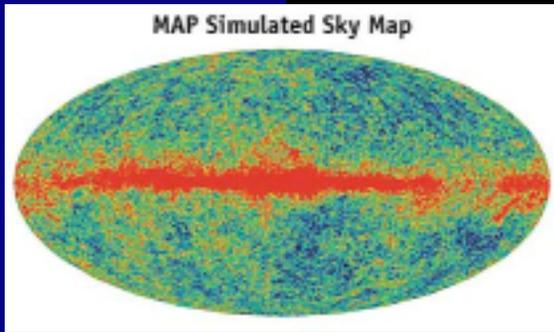
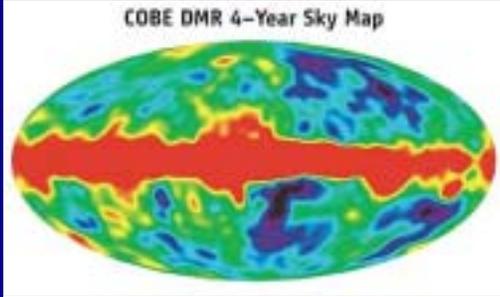
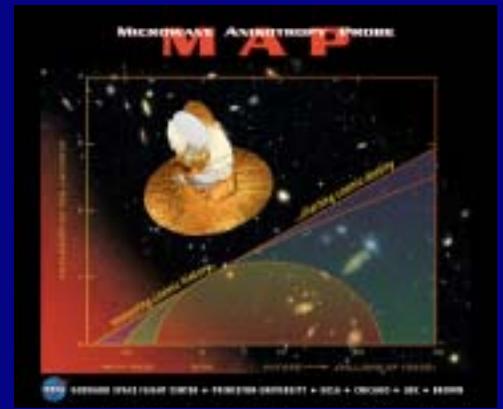
2001年6月30日  
15:46:46 EDT 打ち上げ



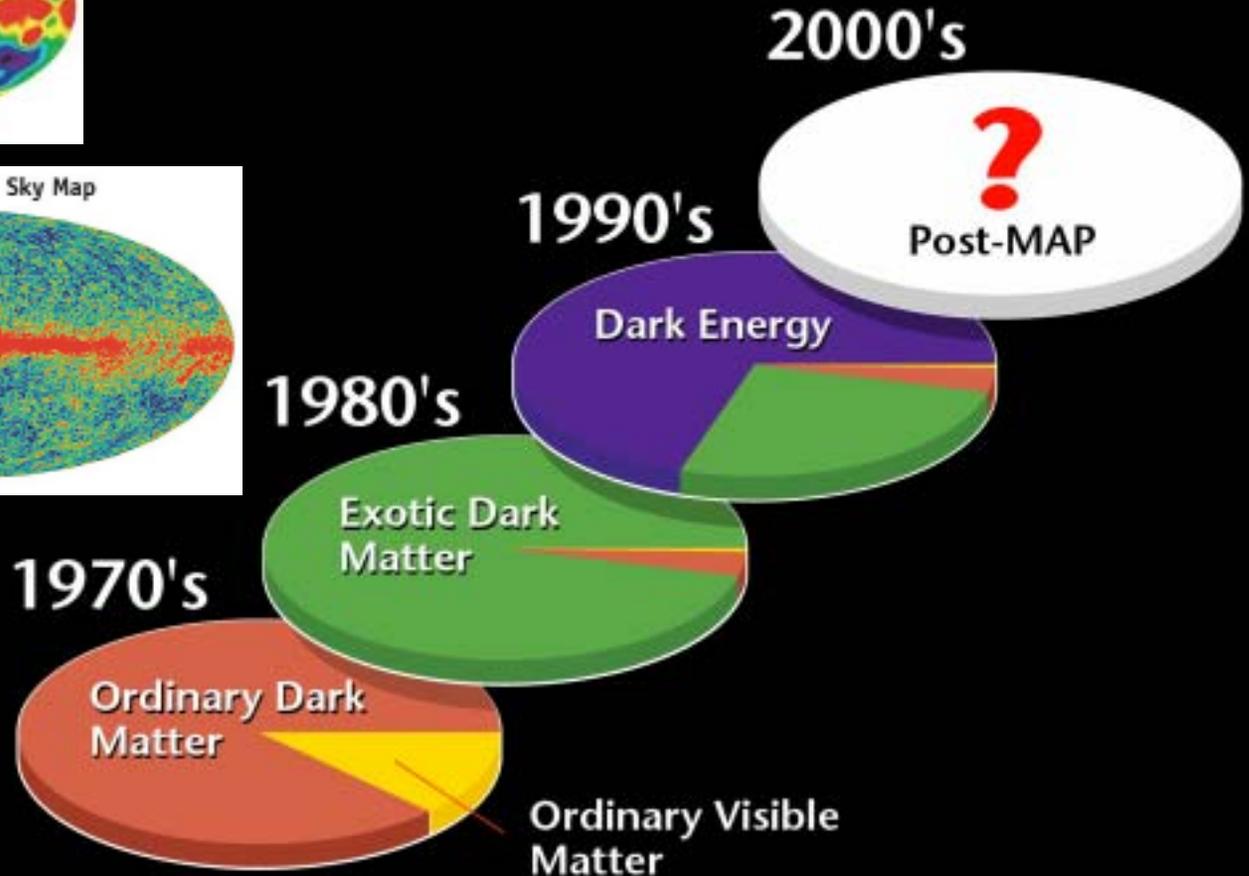
**NASA/WMAP  
Science Team**



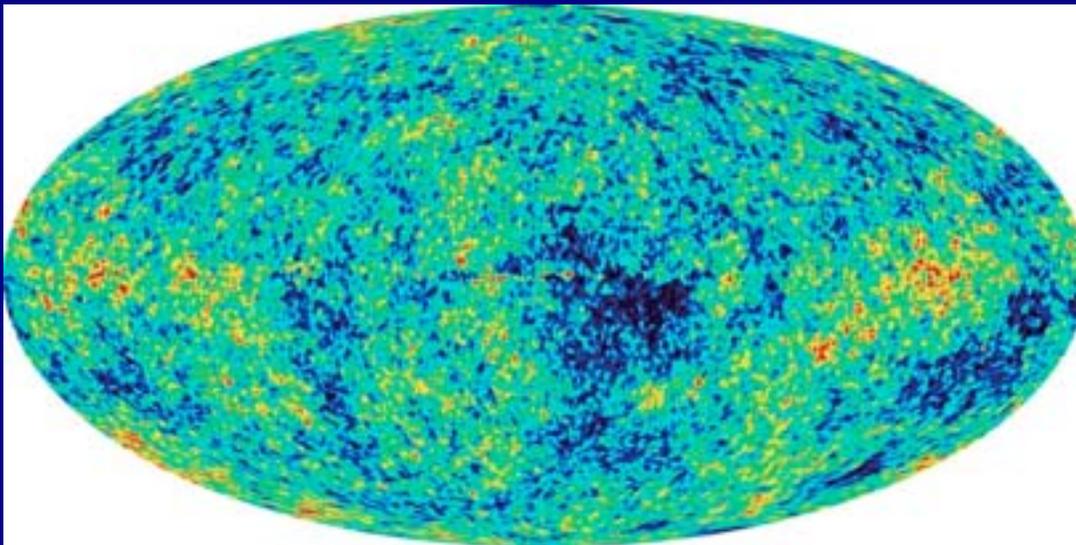
# WMAP Science Goals



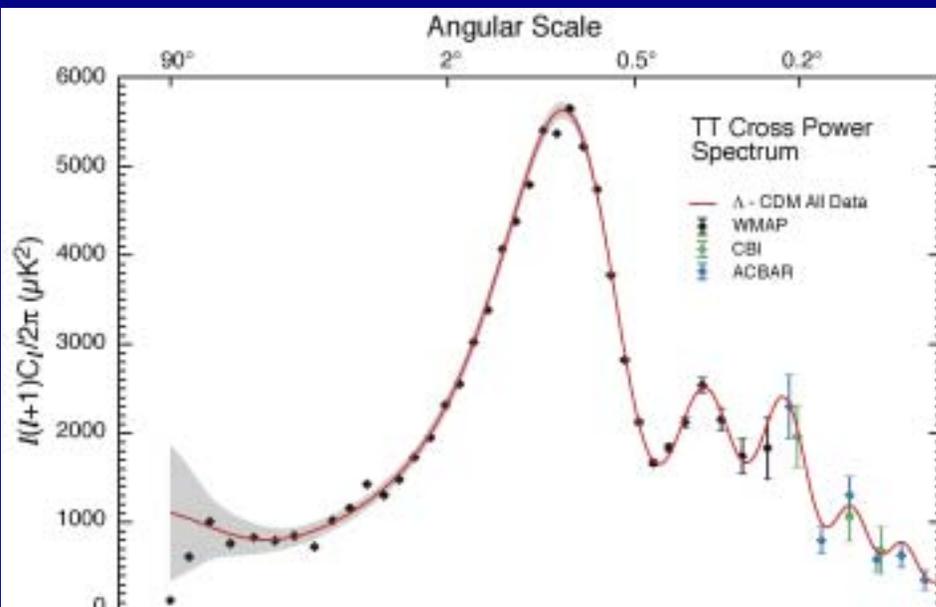
NASA/WMAP  
Science Team



# WMAPの成果 (2003年2月12日発表)



NASA/WMAP  
Science Team



# WMAPが決定した宇宙論パラメータ

## Old Universe – *New* Numbers

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

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

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

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

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

$$n_b = 2.5 \times 10^{-7} {}^{+0.1 \times 10^{-7}}_{-0.1 \times 10^{-7}} \text{ cm}^{-3}$$

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

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

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

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

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

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

$$\eta = 6.1 \times 10^{-10} {}^{+0.3 \times 10^{-10}}_{-0.2 \times 10^{-10}}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

# 宇宙の質量密度の内訳 (2002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

$0.005 \pm 0.002$



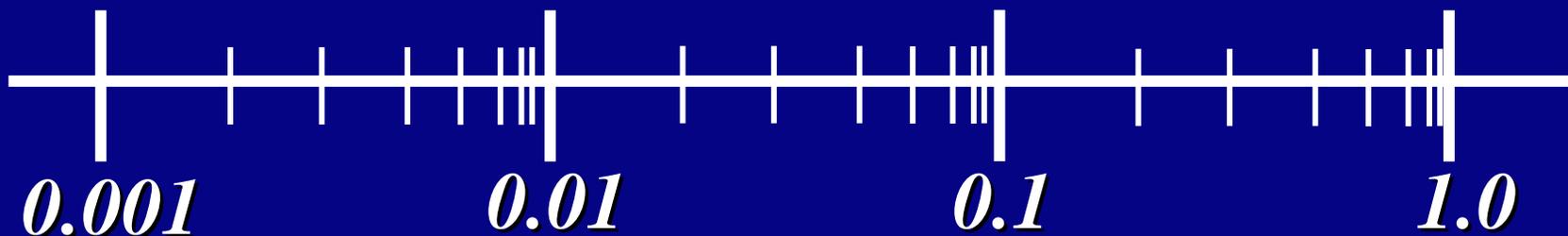
バリオン

$0.044 \pm 0.004$



CDM 理論予言

$0.23 \pm 0.04$



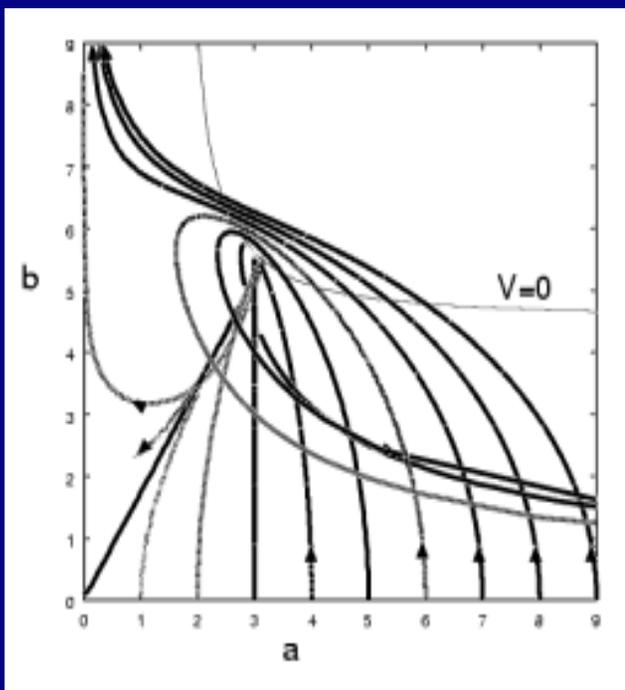
$\Omega_{total}$

# 多次元宇宙論

- カルツアクライン理論
- ブレーンワールド
- 宇宙の創生、インフレーションを多次元モデルで再構築

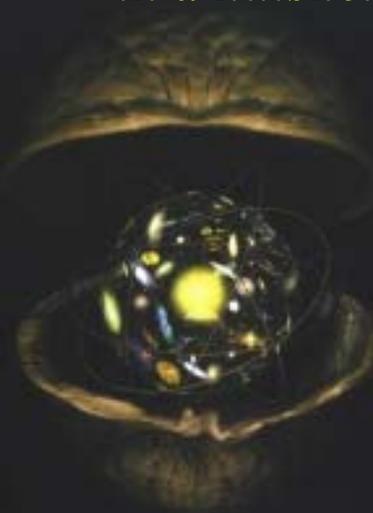
## 虚時間での進化

内部空間の大きさ



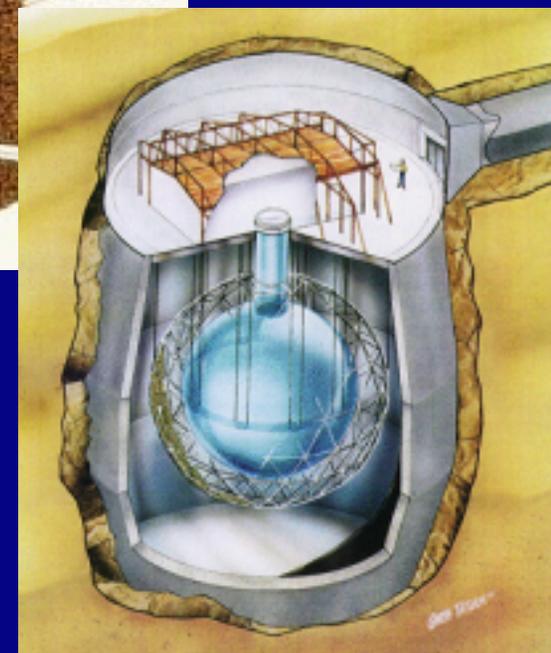
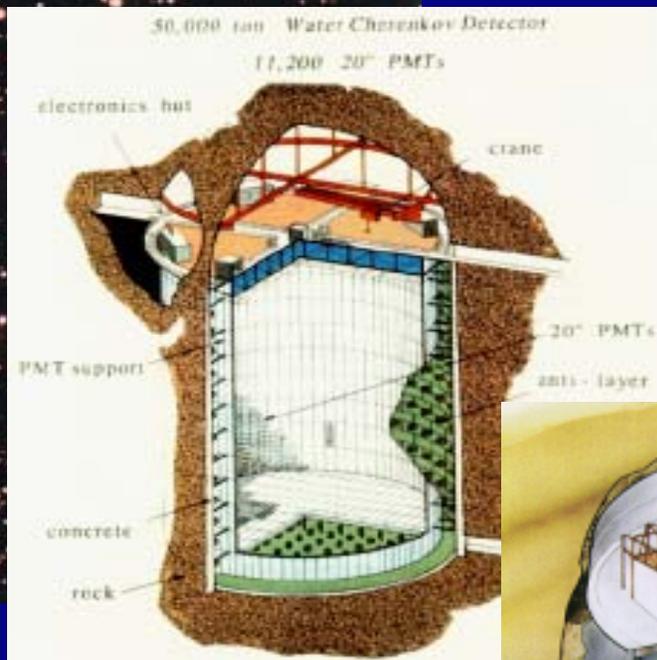
外部空間の大きさ

*The universe  
in a nutshell*



# 超新星 1987Aからのニュートリノ検出

スーパーカミオカンデ (30倍)  
ニュートリノは質量を持ち振動

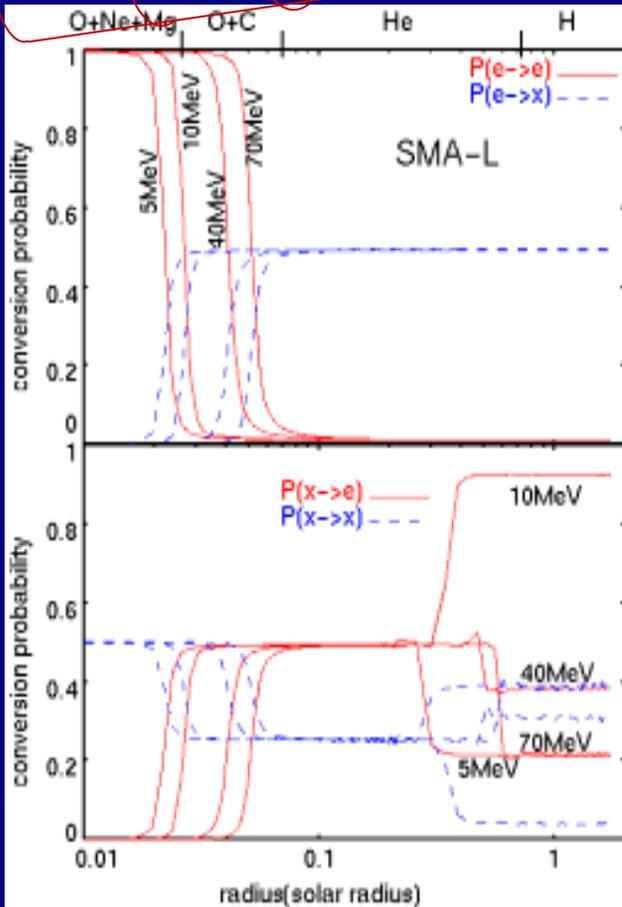
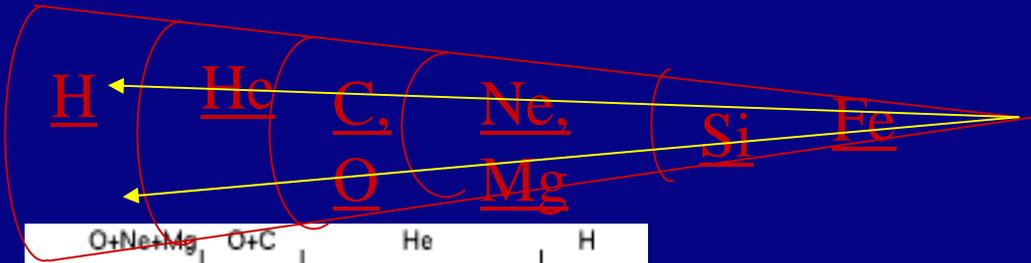


1987年2月23日

カミオカンデ 11発のニュートリノ検出

IMB 8発

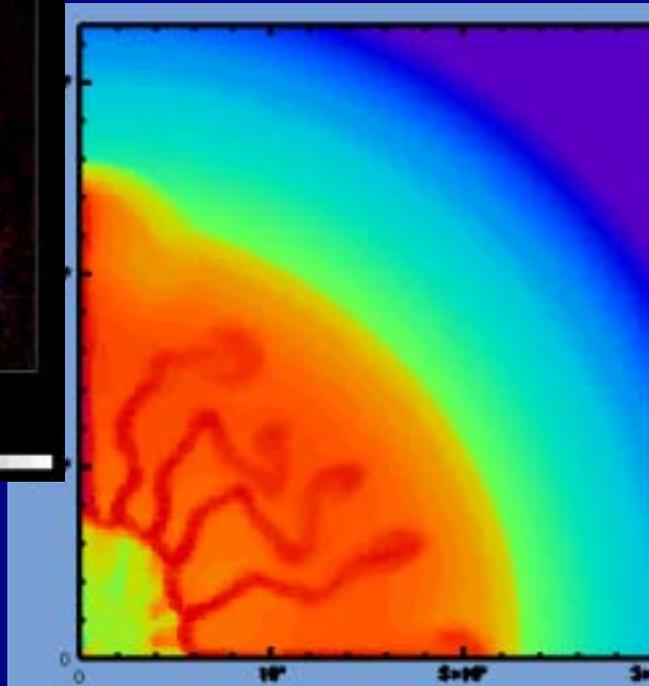
超新星ニュートリノが検出されると、地上実験ではまだ得られていない振動のパラメータが測定できる



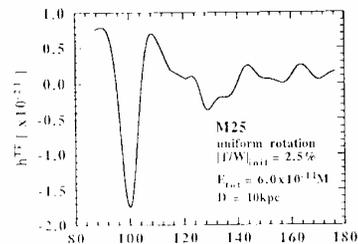
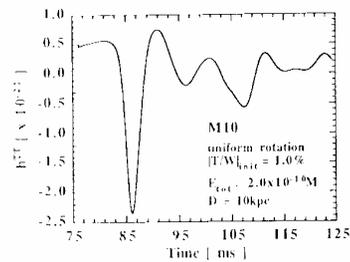
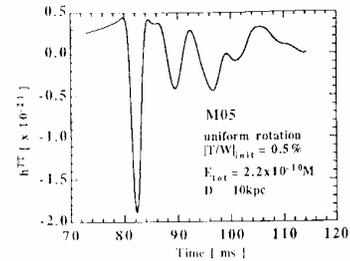
超新星ニュートリノは地球の中で再転換される。

SK, SNO, VLOのデータを組み合わせると、 $e_\nu$ の混合角、 $m^2$ などの情報が得られる。

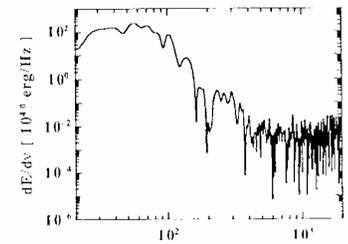
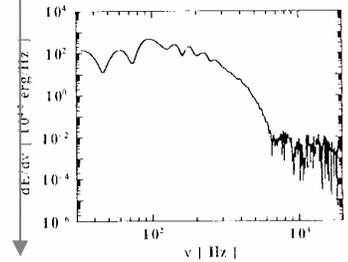
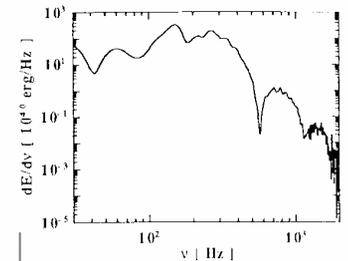
# 自転星の超新星での元素合成、重力波放出



## 重力波形

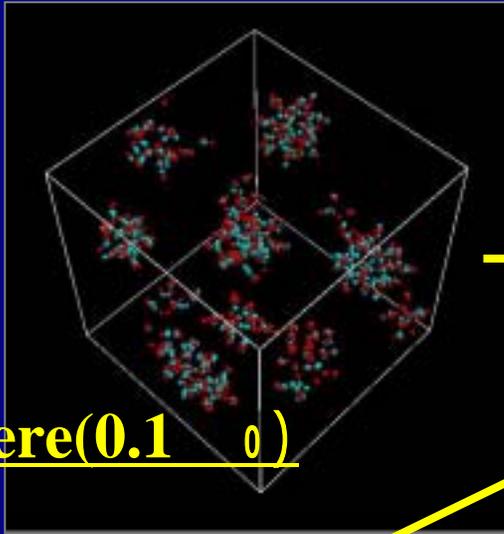


## エネルギー スペクトル



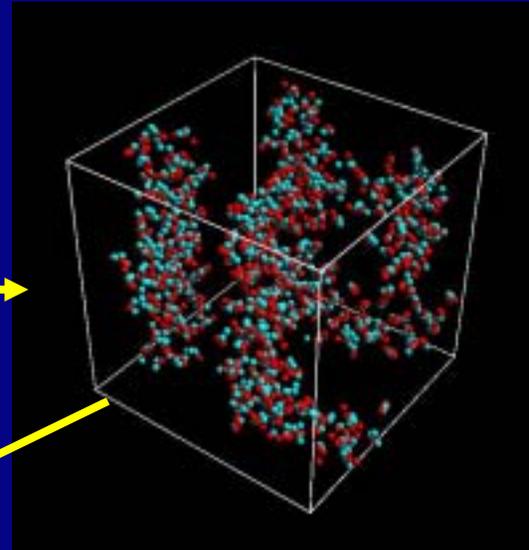
# 量子分子動力学による原子核の溶解と相転移

Sphere(0.1 0)

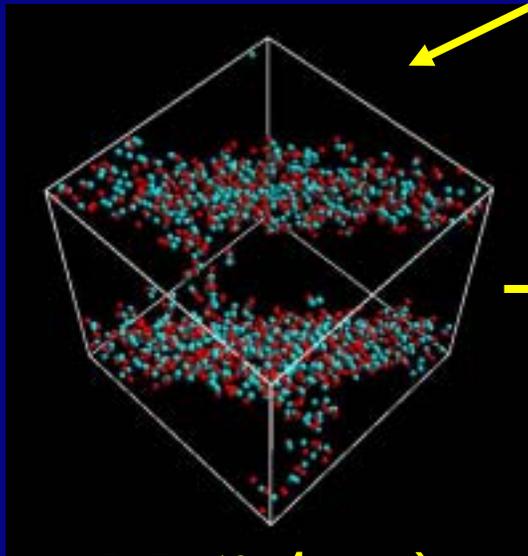


Cylinder

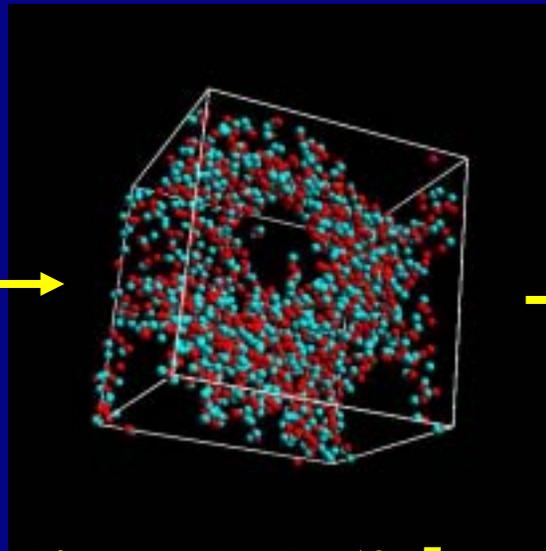
(0.25 0)



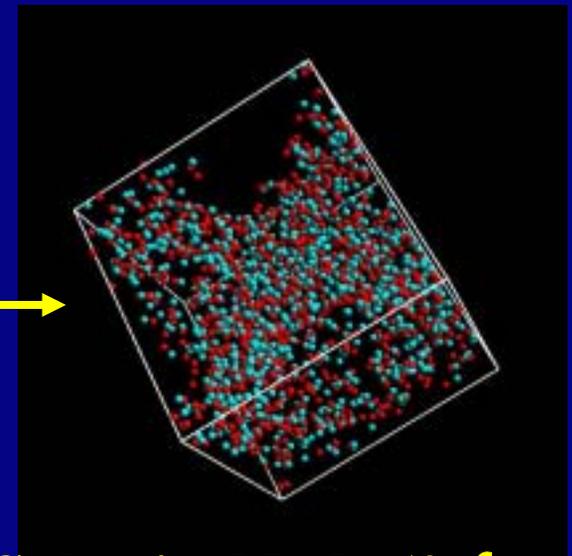
slab (0.4 0)



Cylinder hole (0.5 0)



Spherical hole (0.6 0)



# 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

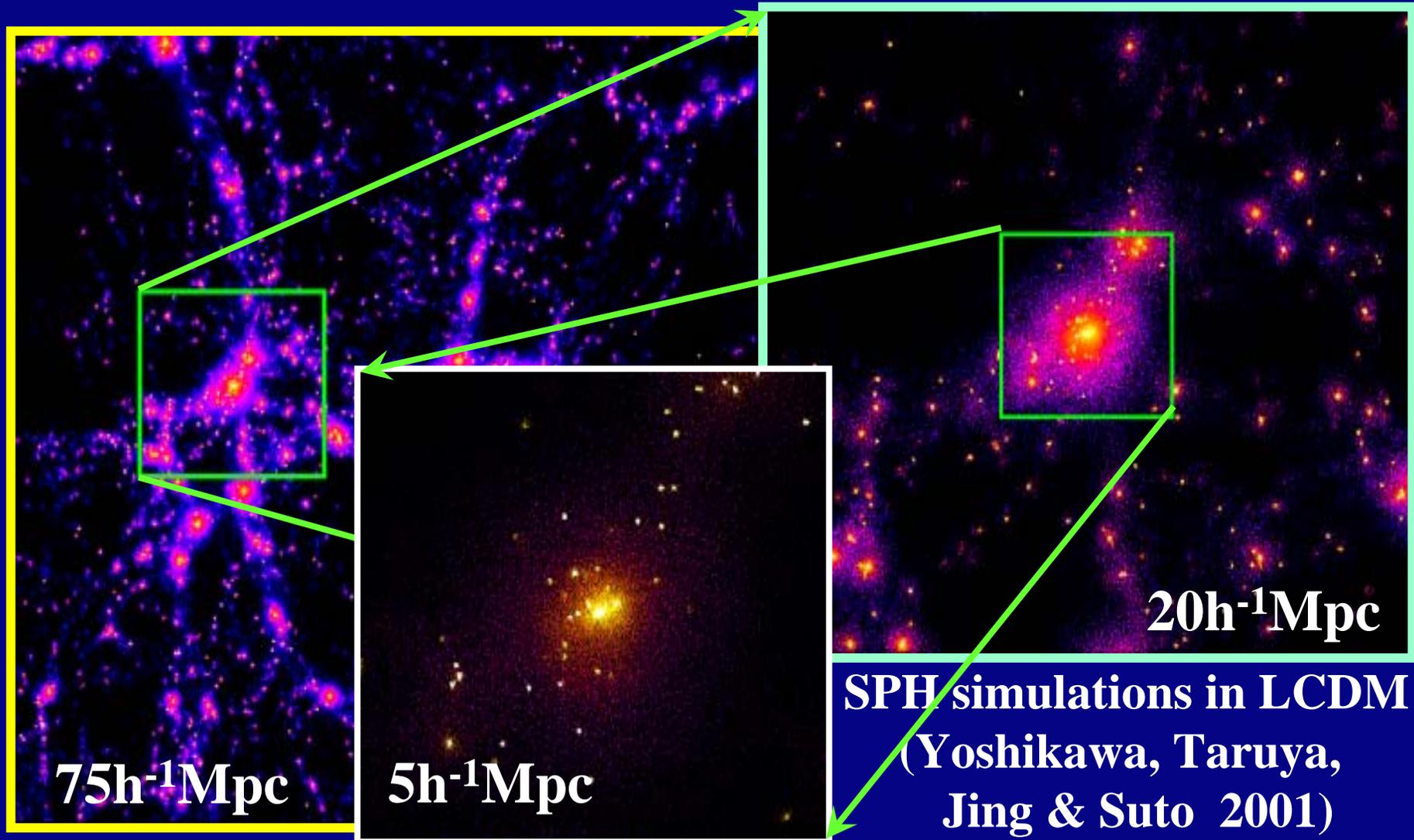
**第一世代の原始天体**

**生命誕生の環境としての宇宙**

# Expanding the *expanding* universe

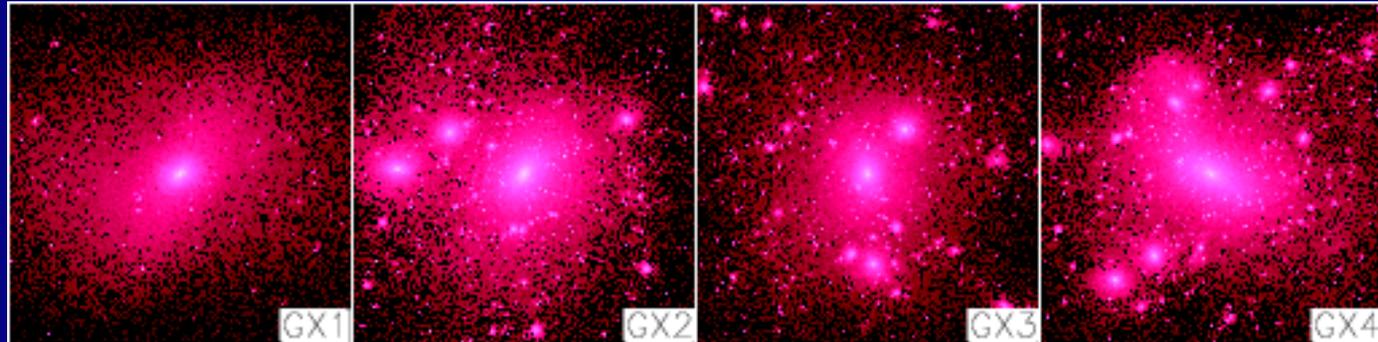
0th order	一様等方宇宙モデル	宇宙論パラメータ
1st order	密度揺らぎの線形摂動論	宇宙の大構造 マイクロ波背景輻射
2nd order	非線型重力進化	ダークマターの構造形成
3rd order	バリオンガスの進化	第一世代天体と元素の起源
4th order	銀河、星、惑星の形成進化	光り輝く銀河宇宙の誕生
...		
L-th order	生命の起源・進化	宇宙論的生物発生学
M-th order	知的生命体への進化	宇宙論的生物進化学
N-th order	文化・文明・宗教	宇宙論的社会学
...		

# Zooming in the simulated structure

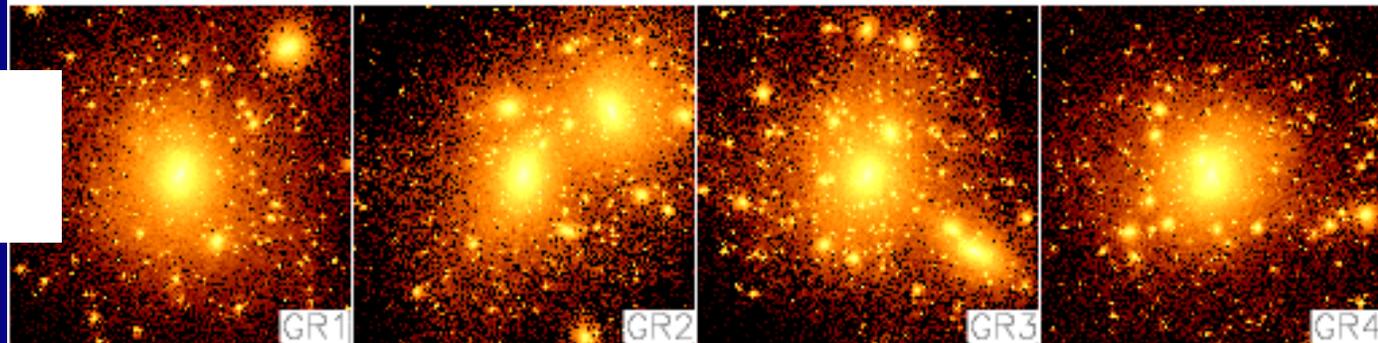


# シミュレーションハローギャラリー

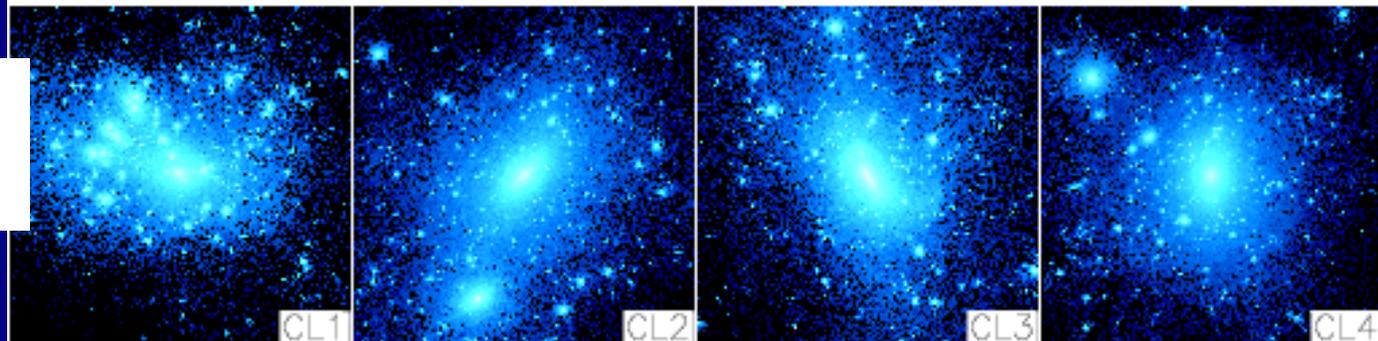
銀河スケール  
 $\sim 5 \times 10^{12} M_{\text{sun}}$



銀河群スケール  
 $\sim 5 \times 10^{13} M_{\text{sun}}$

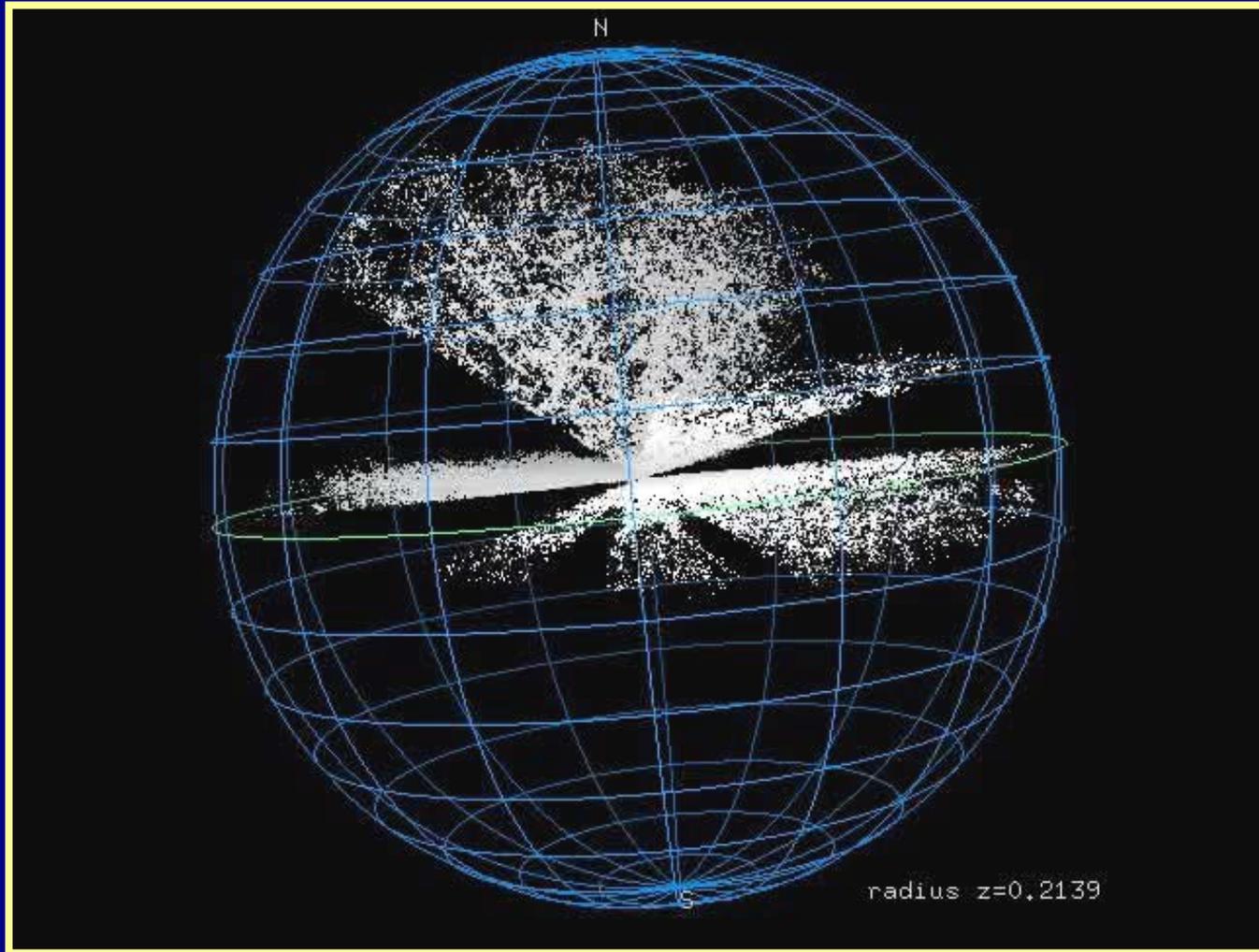


銀河団スケール  
 $\sim 3 \times 10^{14} M_{\text{sun}}$



Jing & Suto (2000)

# Galaxy distribution in the SDSS Sample 10

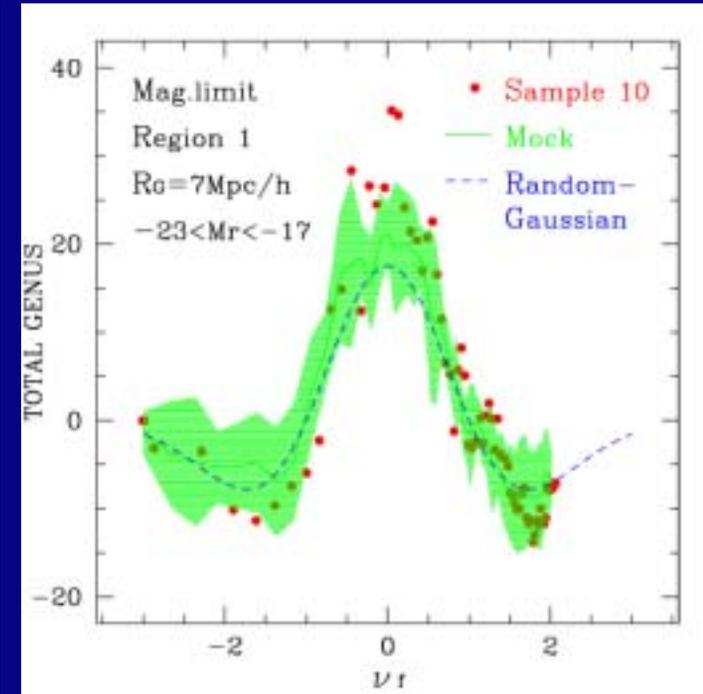
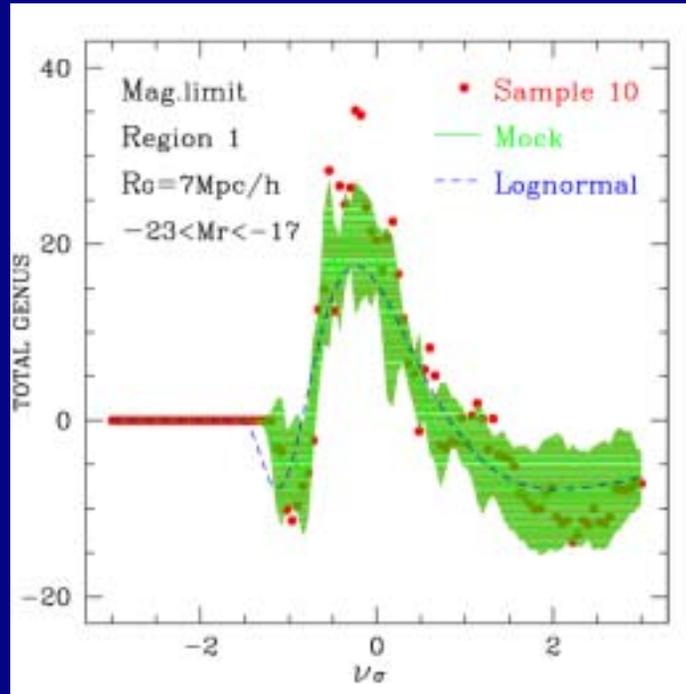
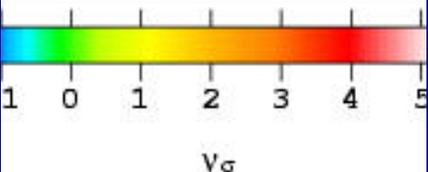
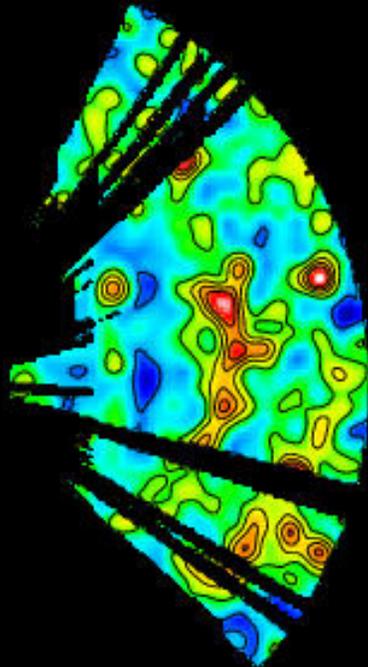


三橋賢司、田村健一(東京大学)による可視化

# Topology of SDSS galaxy distribution: genus

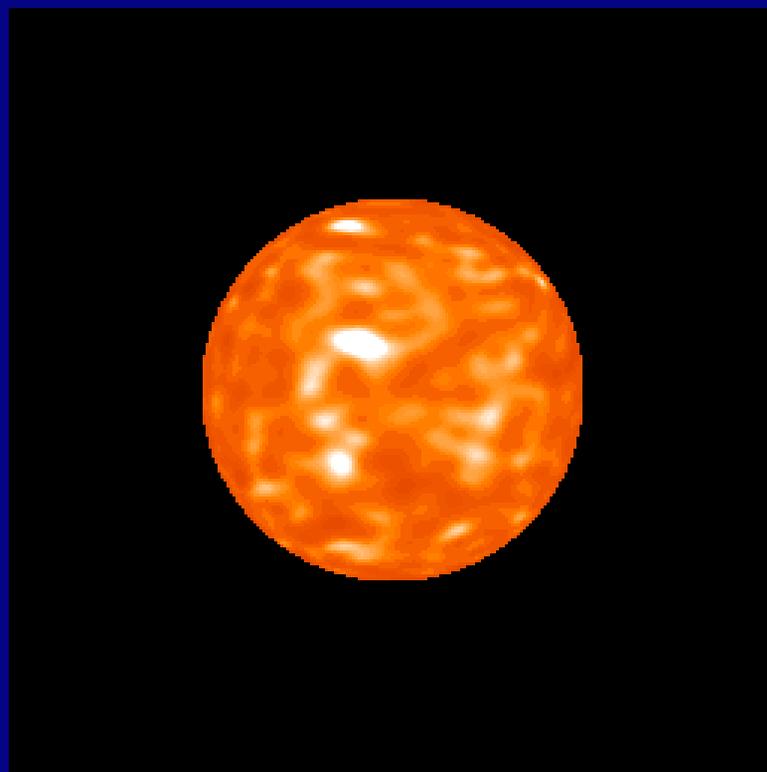
Region 1  $R=7\text{Mpc}/h$

All galaxies



- Genus curves of SDSS sample 10 are largely consistent with those originated from the primordial random-Gaussian field (Hikage et al. in preparation).

# 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

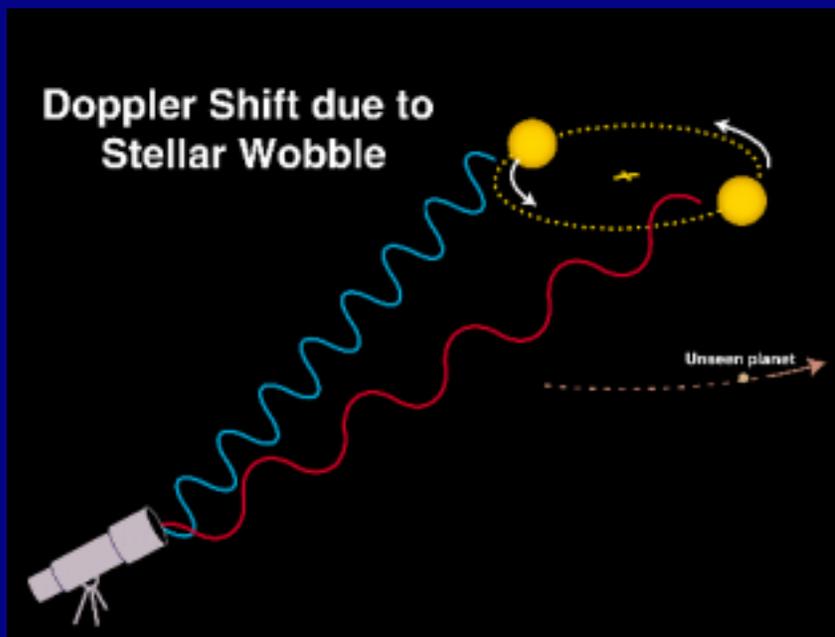
や  
や  
危  
ない  
↓

# 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

# 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



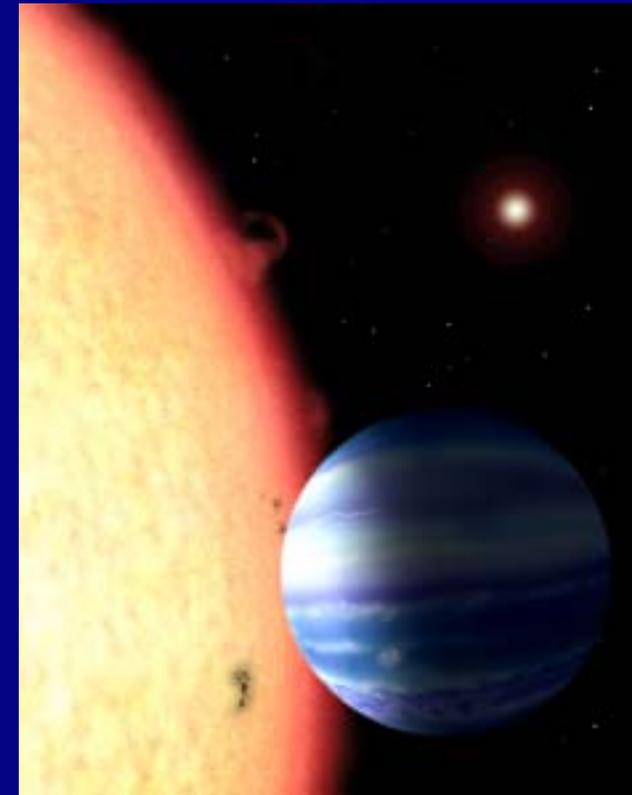
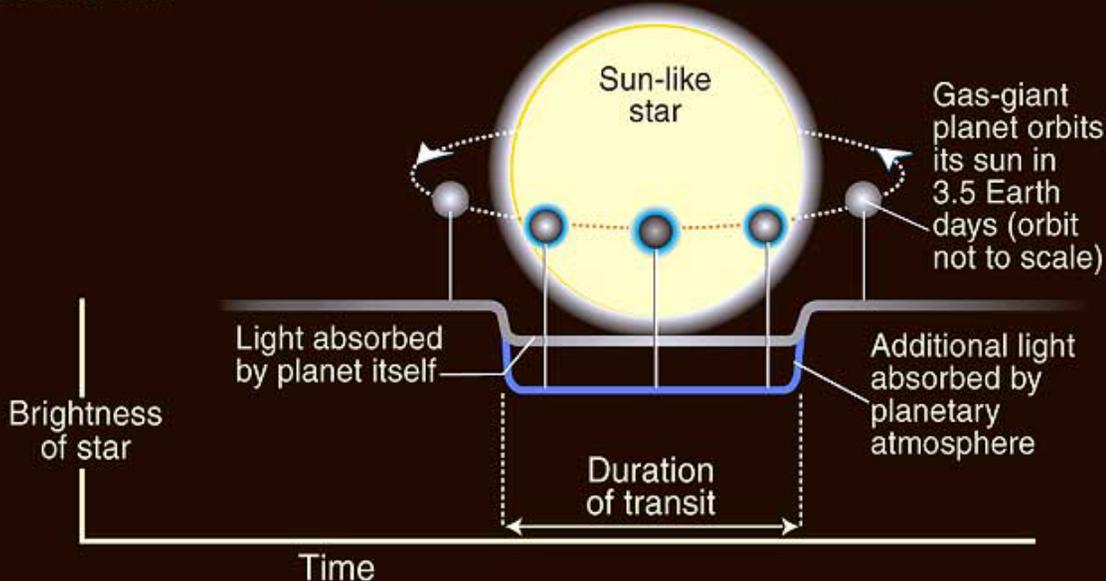
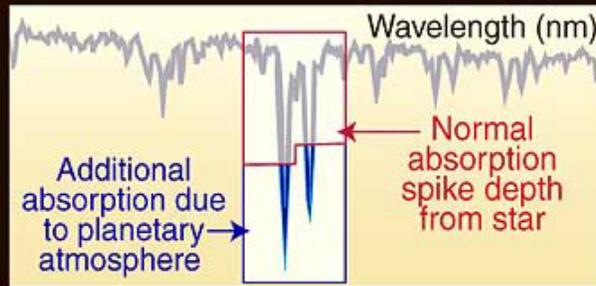
太陽の受ける速度摂動：  
12.5 m/s (木星)  
0.1 m/s (地球)  
(参考) 地球の公転速度  
3万 m/s

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)

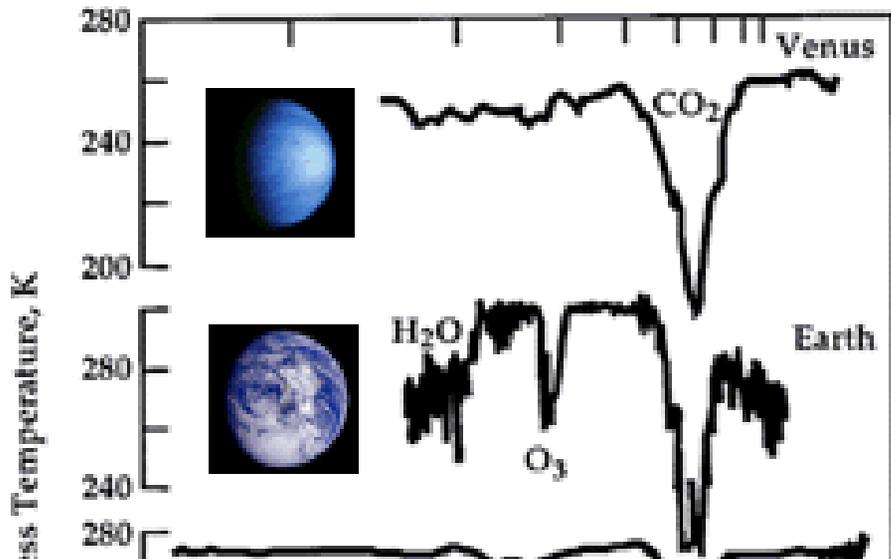
HST detects additional sodium absorption due to light passing through planetary atmosphere as planet transits across star



## (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)**

# 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

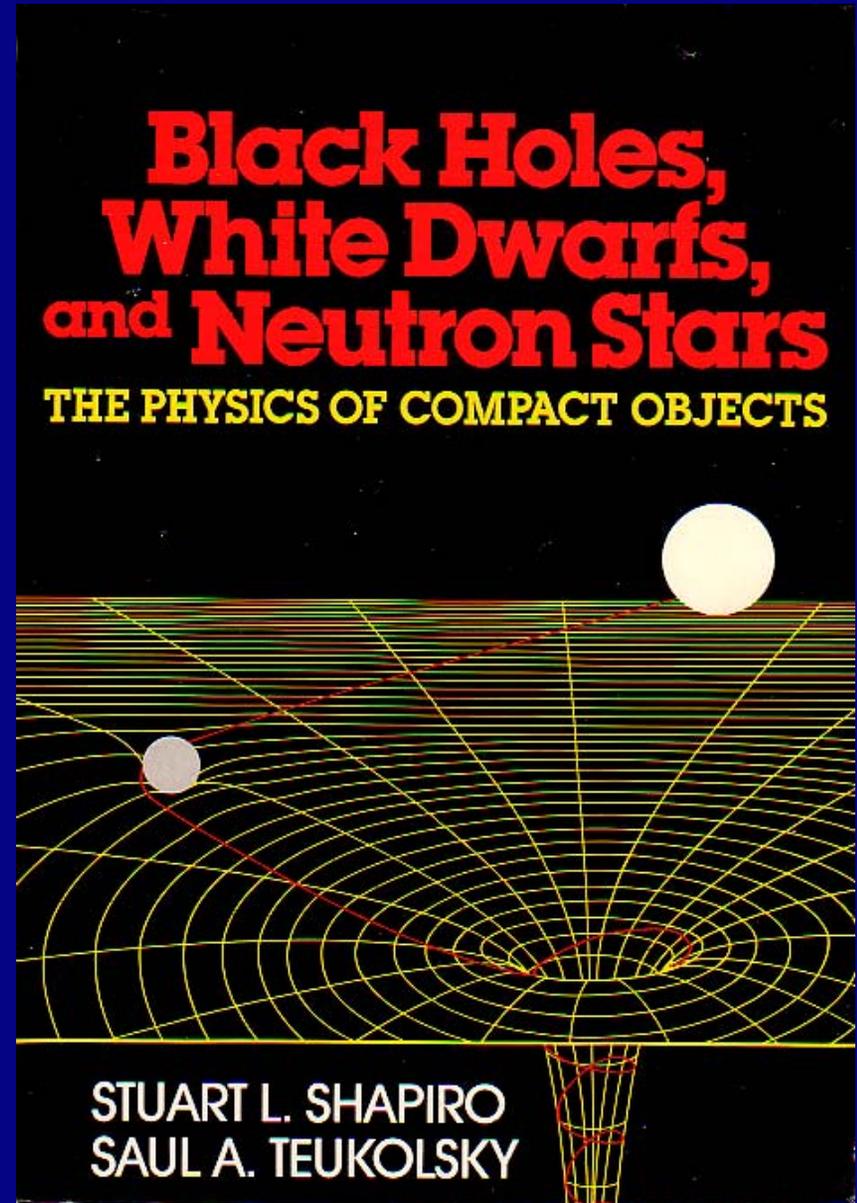
- スペクトルの形 惑星の温度  
水が液体として存在？
- 強いCO<sub>2</sub>吸収帯 大気？
- O<sub>3</sub>吸収帯 大量の酸素 生物によって生成？
- H<sub>2</sub>O吸収帯 海の存在？

## 前期理論演習（佐藤・須藤研合同）

- フリードマン宇宙モデル、宇宙の熱史とニュートリノの温度、ビッグバン元素合成、宇宙の再結合、などを中心とした宇宙論の基礎的事項に関していくつかのテキストを輪講する。
- 輪講トピックおよび参考文献一覧のコピーが樽家助手@923号室のところにありますのであらかじめ受け取っておくこと。

# 後期理論演習 その1

- S.L.Shapiro and S.Teukolsky  
“Black Holes,  
White Dwarfs and  
Neutron Stars”  
の輪講



# 後期理論演習その2

- 計算機シミュレーションの可視化 (担当: 須藤)

