

# 宇宙理論研究室ガイダンス

[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2006j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2006j.html)

2006年2月13日

教授： 佐藤勝彦

(素粒子的宇宙論、天体核物理)

助手： 向山信治

(相対論、ブレイン宇宙論)

助教授： 須藤 靖

(観測的宇宙論、太陽系外惑星)

助手： 樽家篤史

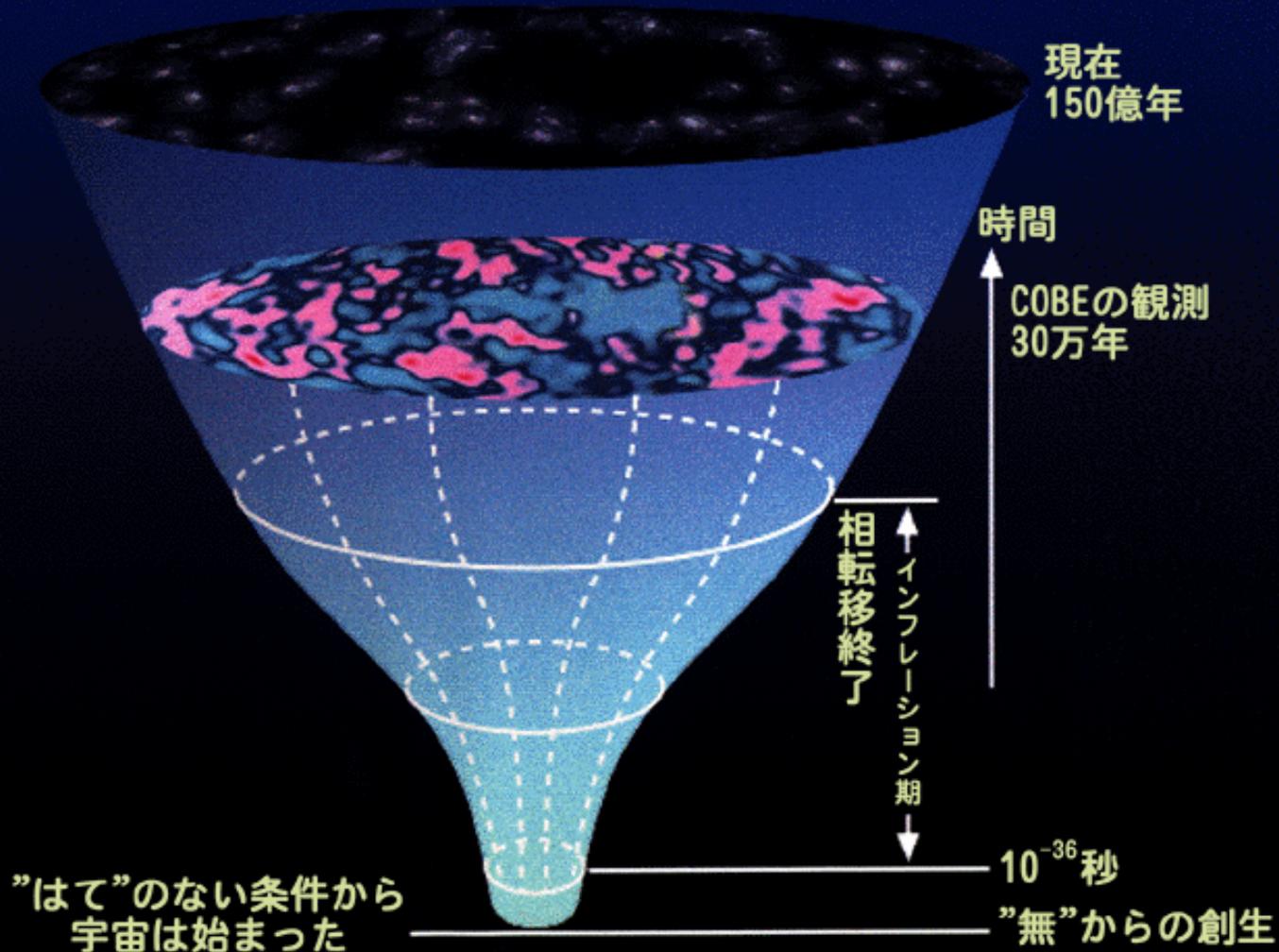
(観測的宇宙論、重力波)

# 宇宙理論研究室での研究内容

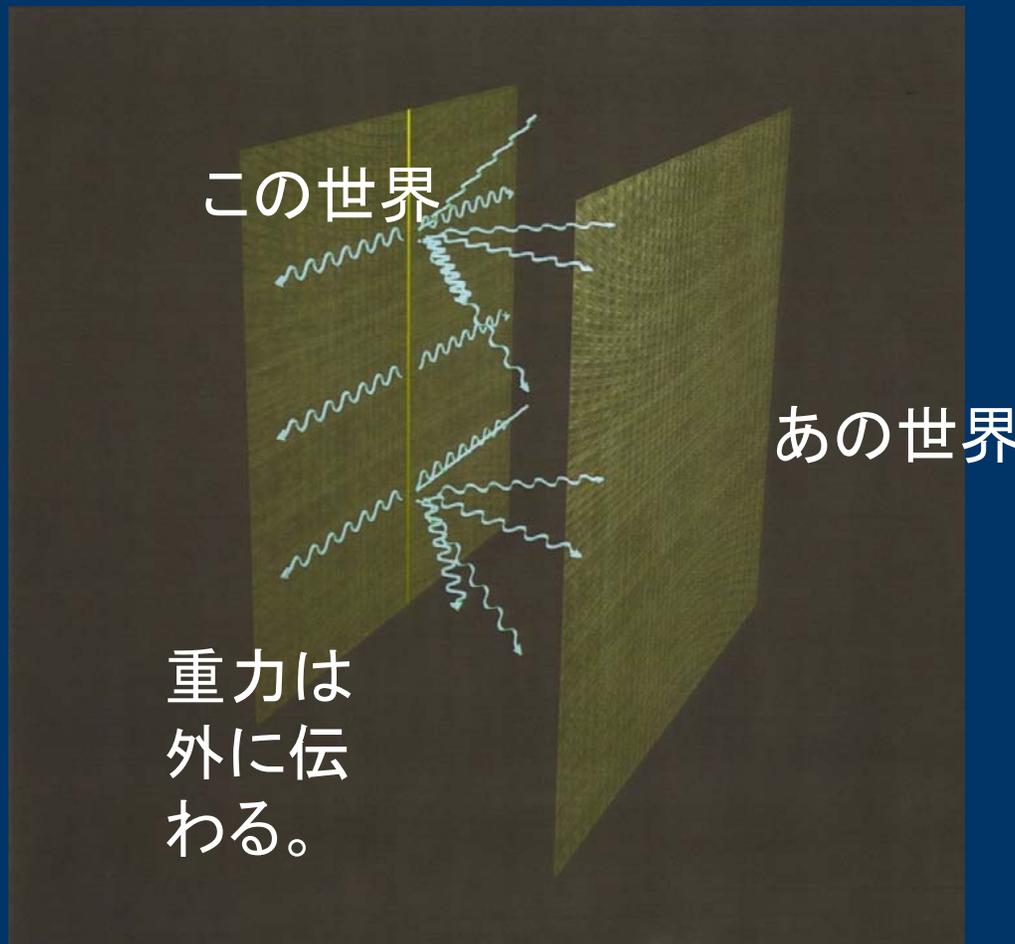
- **初期宇宙論・相対論**
  - インフレーション理論
  - 多次元/ブレーン宇宙論
  - 重力波
- **高エネルギー天体物理学・高密度星**
  - 中性子星の構造と状態方程式
  - 超新星爆発シミュレーション
  - 超新星ニュートリノ
  - 高エネルギー宇宙線の起源と伝播
- **観測的宇宙論**
  - スローンデジタルスカイサーベイを用いた観測的宇宙論
  - 宇宙のダークバリオン探査衛星(DIOS)
  - 宇宙のダークエネルギー探査
  - 太陽系外惑星

# 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。



# 宇宙創生論の新展開ーブレンワールドー 我々の世界は高次元空間に浮かぶ3次元膜なのか？



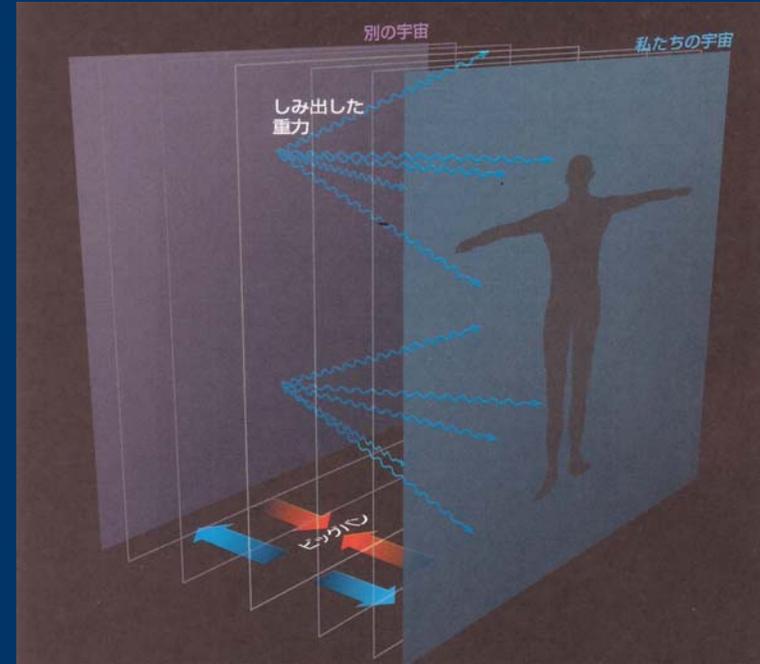
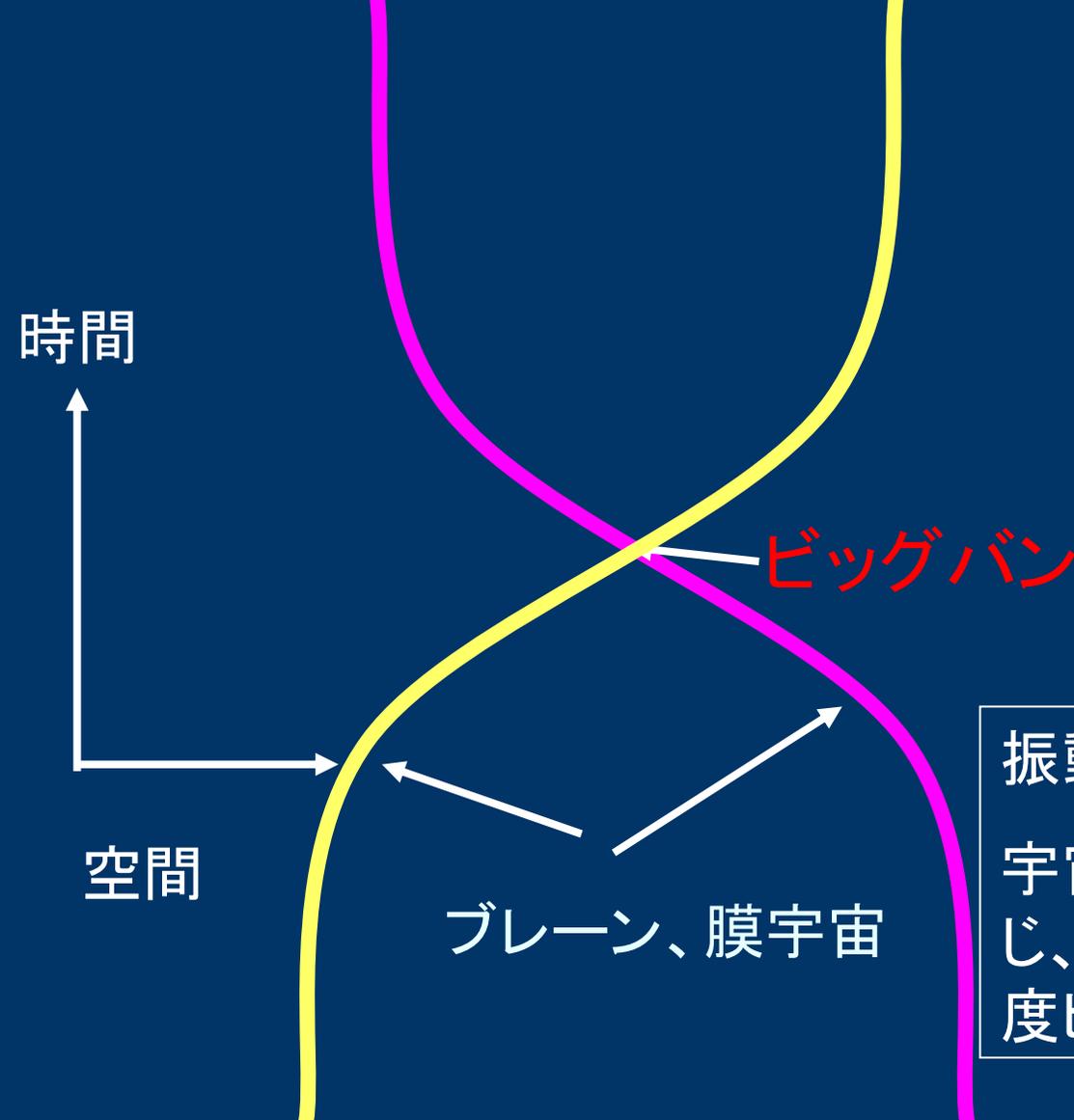
ブレンワールドでの  
インフレーションは  
実現できるか？

密度揺らぎは観測を  
説明できるか？

始原的5次元ブラック  
ホール形成と蒸発、  
その宇宙進化への  
影響？

# エキピロテック宇宙モデル

膜宇宙の衝突でビッグバン(火の玉)になるのかもしれない



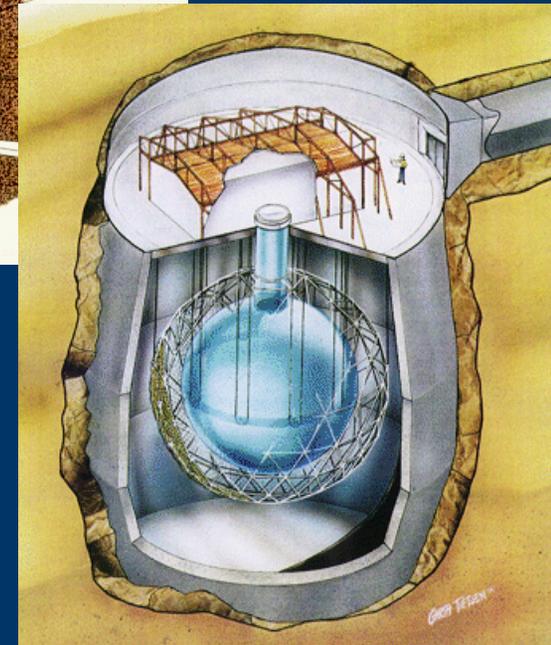
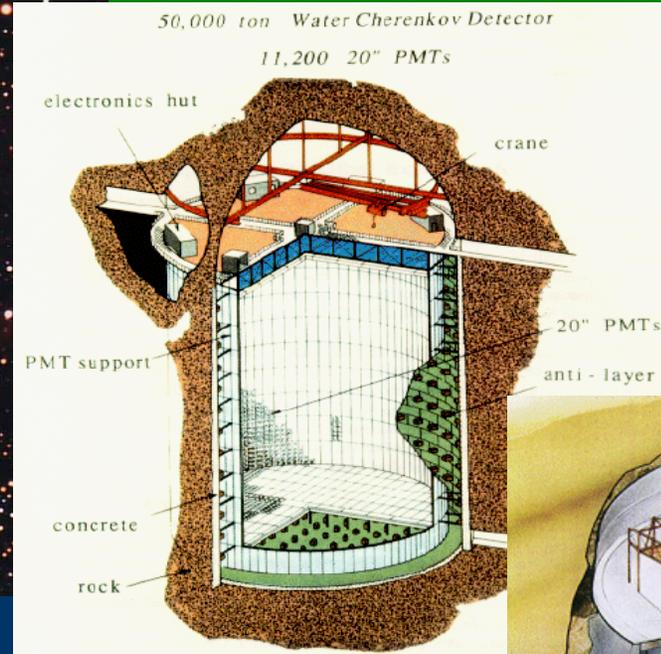
振動宇宙モデル (Turock, Steinhardt, 02)

宇宙はビッグバン後、収縮に転じ、再度衝突が起こり宇宙は再度ビッグバンとして生まれる。

# 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



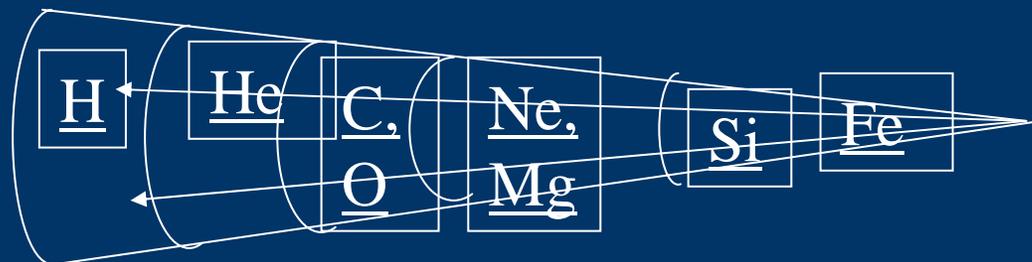
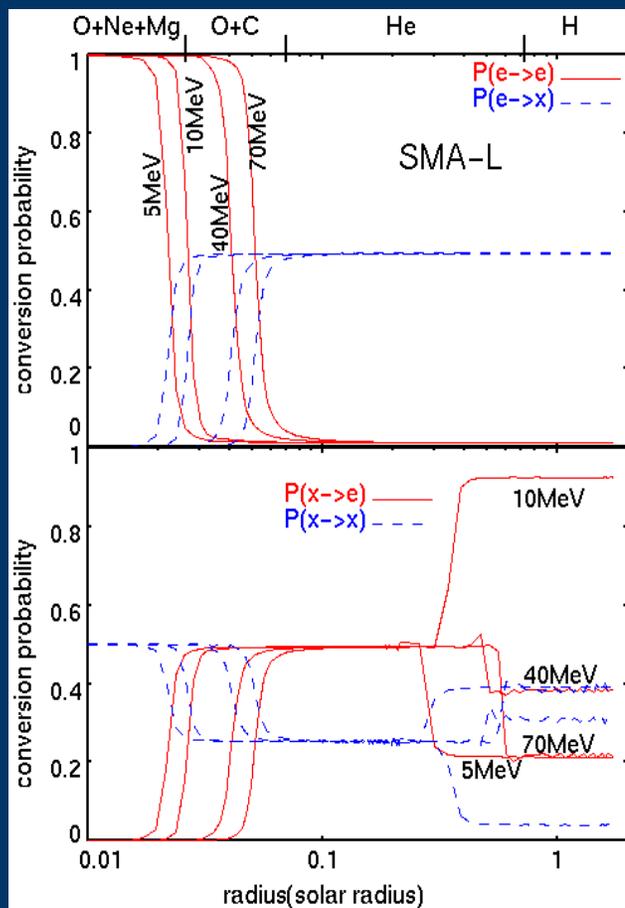
1987年2月23日

カミオカンデ 11発のニュートリノ検出

IMB 8発

我々のグループはこの発見前から、超新星  
ニュートリノの研究をリードしてきた。

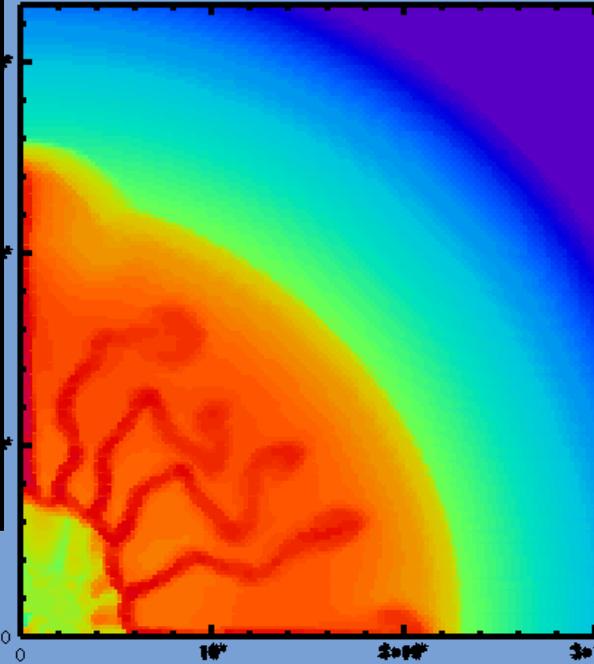
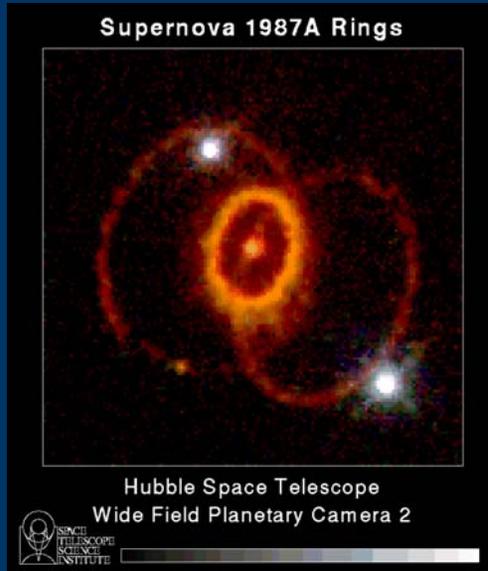
# 超新星ニュートリノが検出されると、地上 実験ではまだ得られていない振動のパ ラメータが測定できる



超新星ニュートリノは地球の中で再転換される。

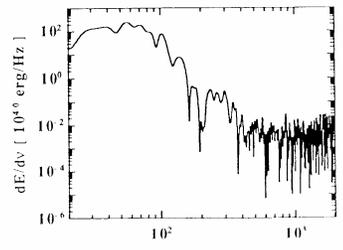
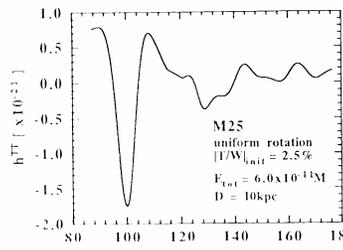
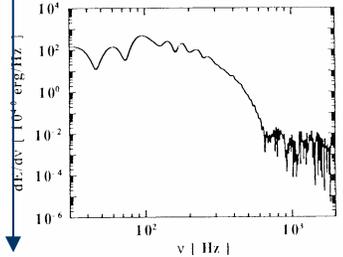
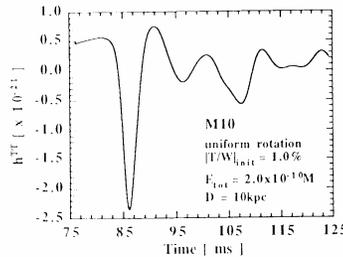
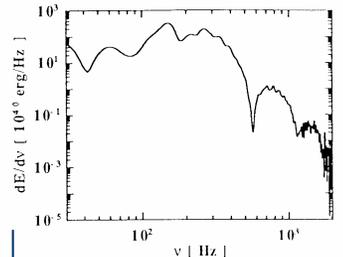
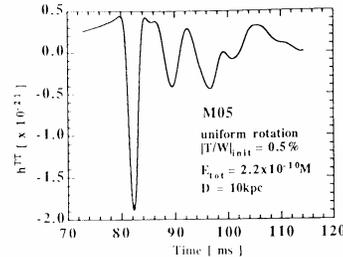
SK, SNO, VLOのデータを組み合わせると、 $e$ 、 $\tau$ の混合角、 $\Delta m^2$ などの情報が得られる。

# 自転星の超新星と元素合成、 重力波放出



## 重力波形

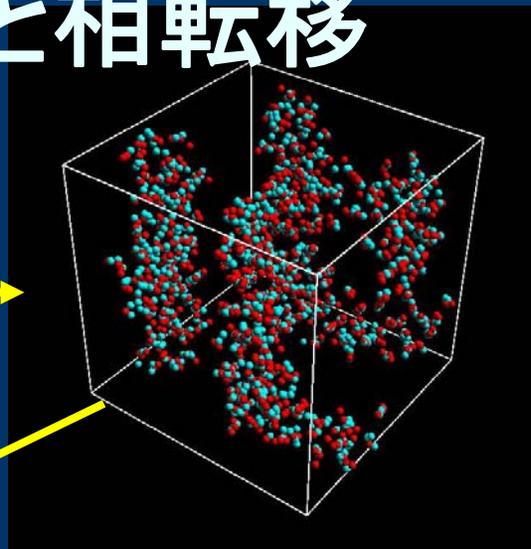
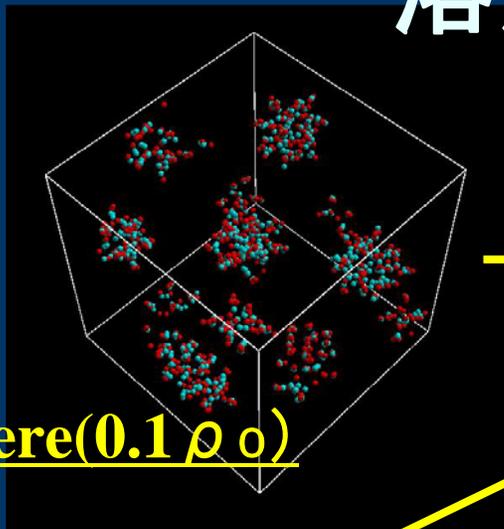
## エネルギー スペクトル



近い将来、TAMA、LIGOなどで  
超新星重力波は観測されるかもしれない。

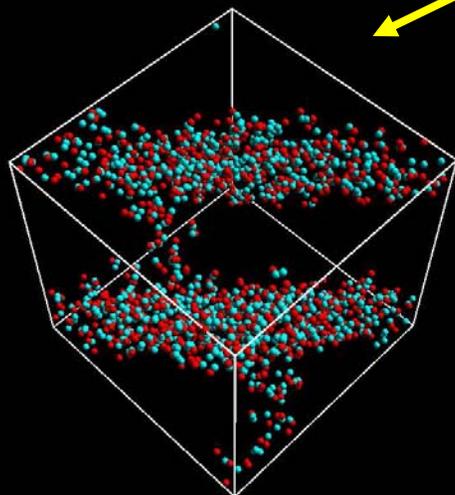
# 量子分子動力学による原子核の 溶解と相転移

Sphere( $0.1 \rho_0$ )

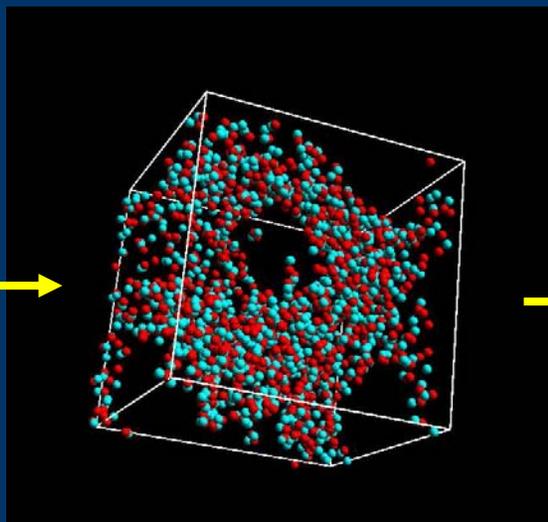


Cylinder

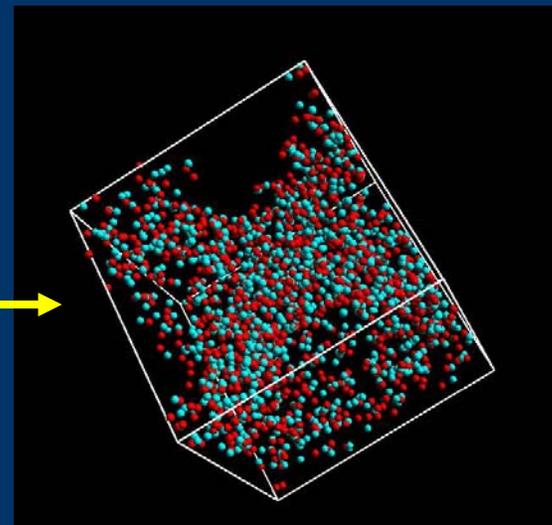
( $0.25 \rho_0$ )



slab ( $0.4 \rho_0$ )



Cylinder hole ( $0.5 \rho_0$ )



Spherical hole ( $0.6 \rho_0$ )

# 我々の世界をもっとよく知りたい

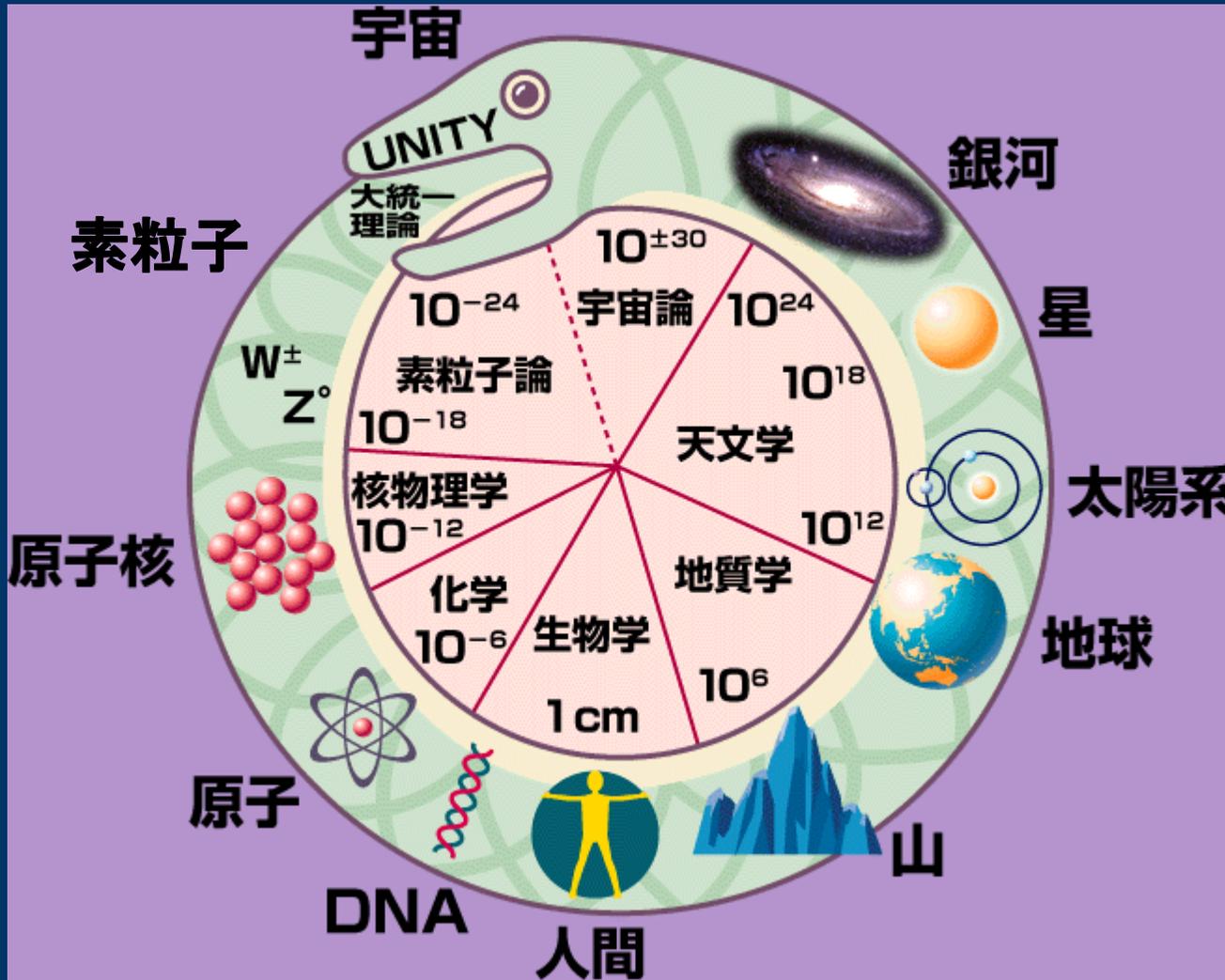
## ■ 微視的世界：物質は何からできているのだろうか？

- ものをどんどん分けていくとどうなるか？
- 分子⇒原子⇒原子核(バリオン)⇒素粒子(クォーク・レプトン)
- もはやこれ以上は分けることのできない最小構成要素が存在
- これ以外の物質(素粒子)は存在しないのか？

## ■ 巨視的世界：宇宙の果てには何があるのだろうか？

- 地球⇒太陽系⇒星団⇒銀河⇒銀河団⇒宇宙の大構造
- 宇宙の大きさ(＝年齢)はどのくらいだろう
- さらに遠く(＝過去)の宇宙はどうなっているのだろうか
- 宇宙を占めている物質は、我々がすでに知っている微視的世界の構成要素と同じなのだろうか

# 自然界の階層：ミクロとマクロをつなぐ



- 宇宙の大きさは約 $10^{27}$ cm, すべての物質を形づくる素粒子の大きさは $10^{-24}$ cm以下
- この約50桁も離れた巨視的世界と微視的世界とが宇宙の研究を通じてより深く理解されつつある

シェルドン グラショー 著 ‘Interaction’ のなかの図をもとに作成

# 現在行っている研究テーマの例

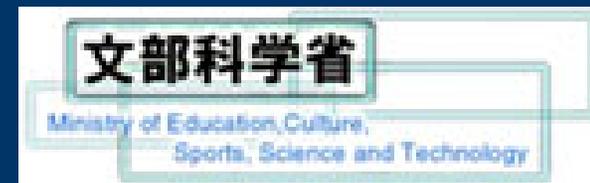
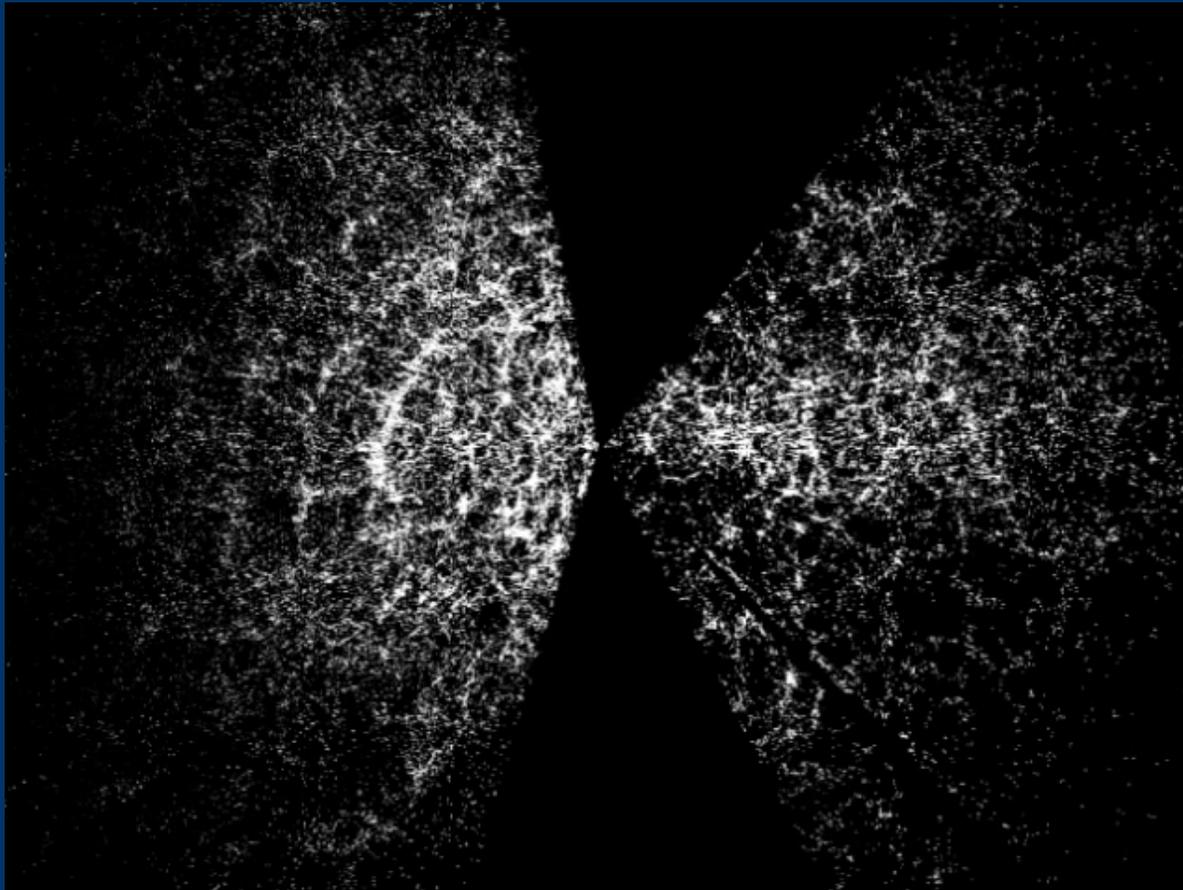
- **SDSS銀河・クエーサーを用いた観測的宇宙論**
  - 矢幡和浩、西道啓博＋名古屋大学・松原グループ＋ソウル大・KIAS 他
- **宇宙論的スケールでの重力の逆自乗法則の検証**
  - 白田晶人＋東工大＋名古屋大
- **すばる望遠鏡を用いたダークエネルギー探査**
  - 国立天文台＋東大(相原研)他
- **ダークバリオン探査専用軟X線衛星DIOS**
  - 吉川耕司、河原創＋都立大＋宇宙研(満田和久、山崎典子)＋名古屋大＋東工大 他
- **太陽系外トランジット惑星の精密分光観測**
  - 成田憲保、太田泰弘＋国立天文台＋プリンストン大＋ハーバード大＋セントアンドリュース大 他



# 史上最大の銀河地図作りをめざして： 日米独共同スローンデジタルスカイサーベイ

8千万個の銀河を観測、そのなかの80万個の銀河の3次元地図作り

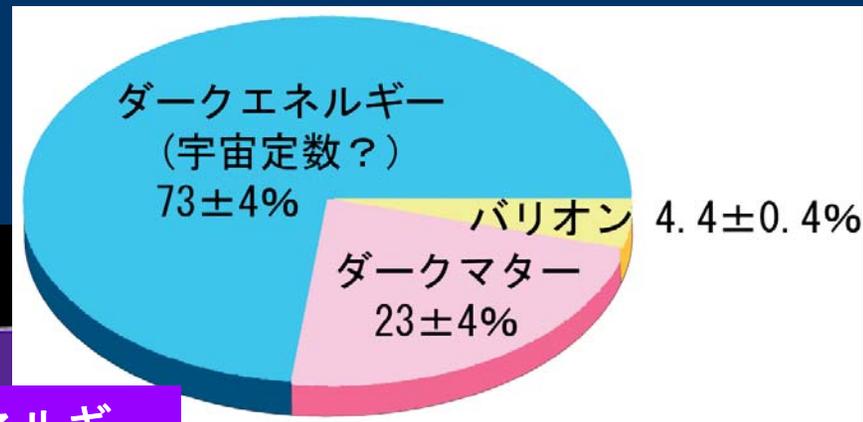
<http://www.sdss.org/dr1/>



NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

# ダークエネルギーと WFMOS

2000年代



1990年代



1980年代



1970年代



星・銀河(バリオン)

# 宇宙のダークエネルギー

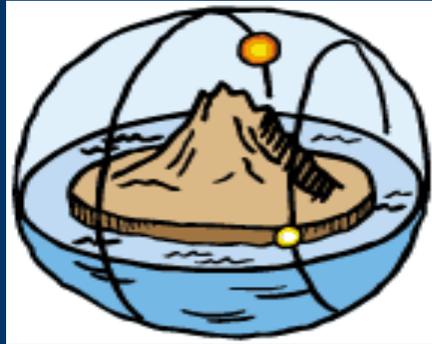
- ある意味では、現代的な文脈での「エーテル」
- 暗黒物質とは異なり、ある特定の場所に集中して存在しているようなものではない
  - 例えば、本来何もないはずの真空自体が持っているエネルギーのように、宇宙全体を一様にみたくしている
- その重力は、実効的に「万有斥力」
  - 1917年にアインシュタインが(全く異なる理由から)導入した宇宙定数に対応
  - 暗黒物質以上にその正体は不明
- 暗黒エネルギーもまた、我々がいまだ理解していない新たな物理学を探る重要な道しるべ(天文学から基礎物理学へ)

# 宇宙観は本当に進化したか？

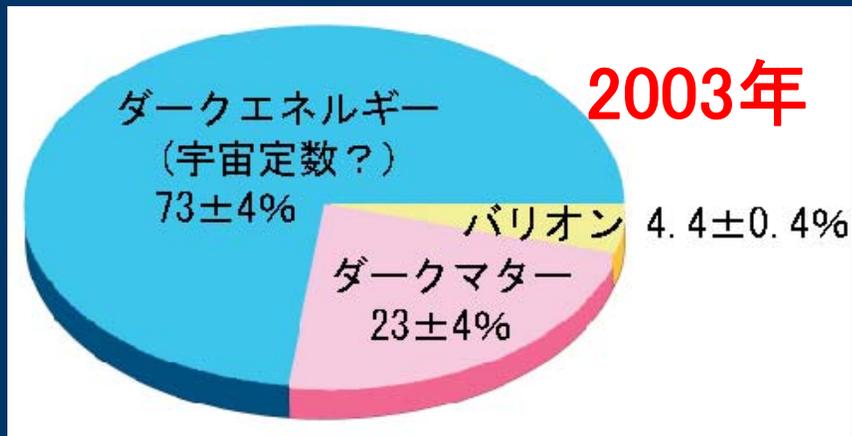
古代エジプト



古代中国



古代インド



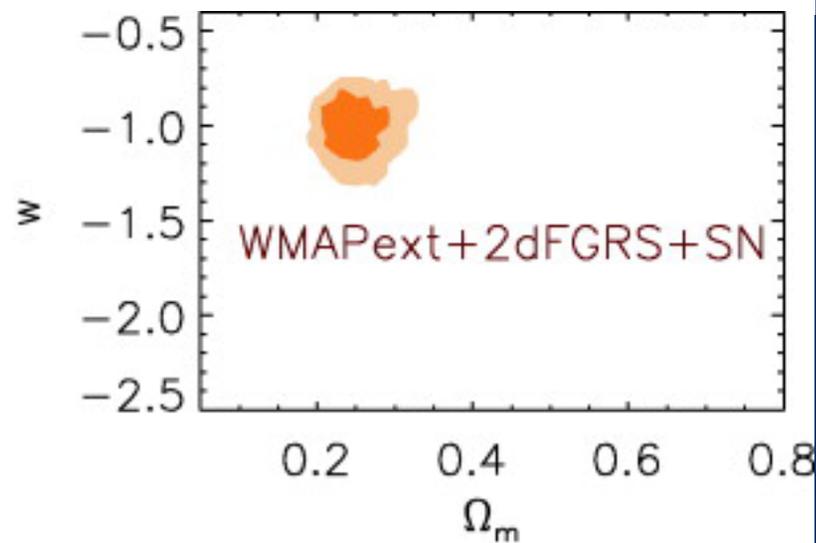
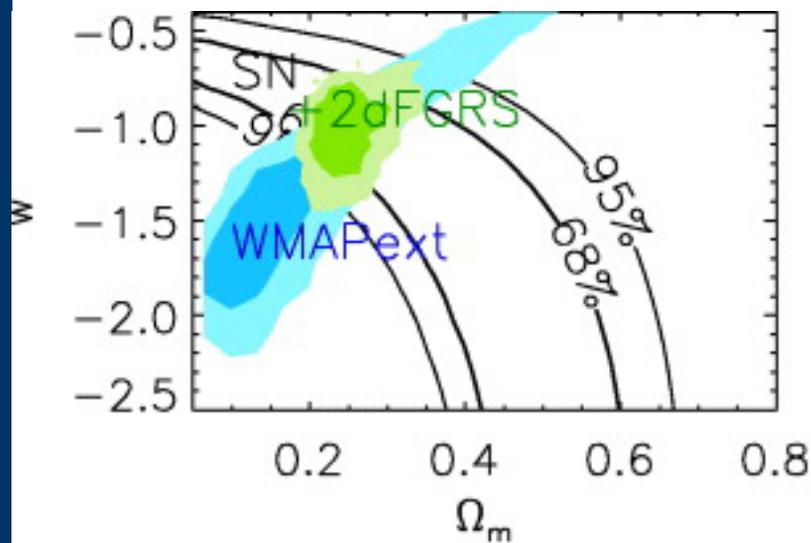
# ダークエネルギー—探査観測の意義

- 宇宙は本当に加速膨張しているか
  - 観測的な系統誤差？
    - 超新星データに対する、ダストや進化効果の存在？
- ダークエネルギーか？一般相対論の限界か？
  - 宇宙論的スケールでの自然法則の一般相対論からのずれをダークエネルギーの存在と誤解しているだけ？
  - 仮にそうならば、ダークエネルギーの存在以上に重要な科学的 (>> 物理学的) 大発見！
- もし、ダークエネルギーが実在するならば、それは宇宙定数か？
  - その実効的な状態方程式は？
  - 理論の論文は無数にあるが、意味のあるものはない
  - 現時点では、天文観測以外で解明する手段はない

# 現状のまとめ：ダークエネルギーは宇宙定数か？

- **ダークエネルギーの状態方程式**（現時点では物理ではない、単なるパラメトリゼーション）
  - $p=w\rho \Rightarrow \rho(t) \propto a(t)^{-3(w+1)}$
  - $w=-1$ : 宇宙定数
  - $-1 < w < -1/3$ : (一般の)ダークエネルギー
- **WMAP+others  $\Rightarrow w = -0.98 \pm 0.12$**

Spergel et al. ApJS 148(2003)175

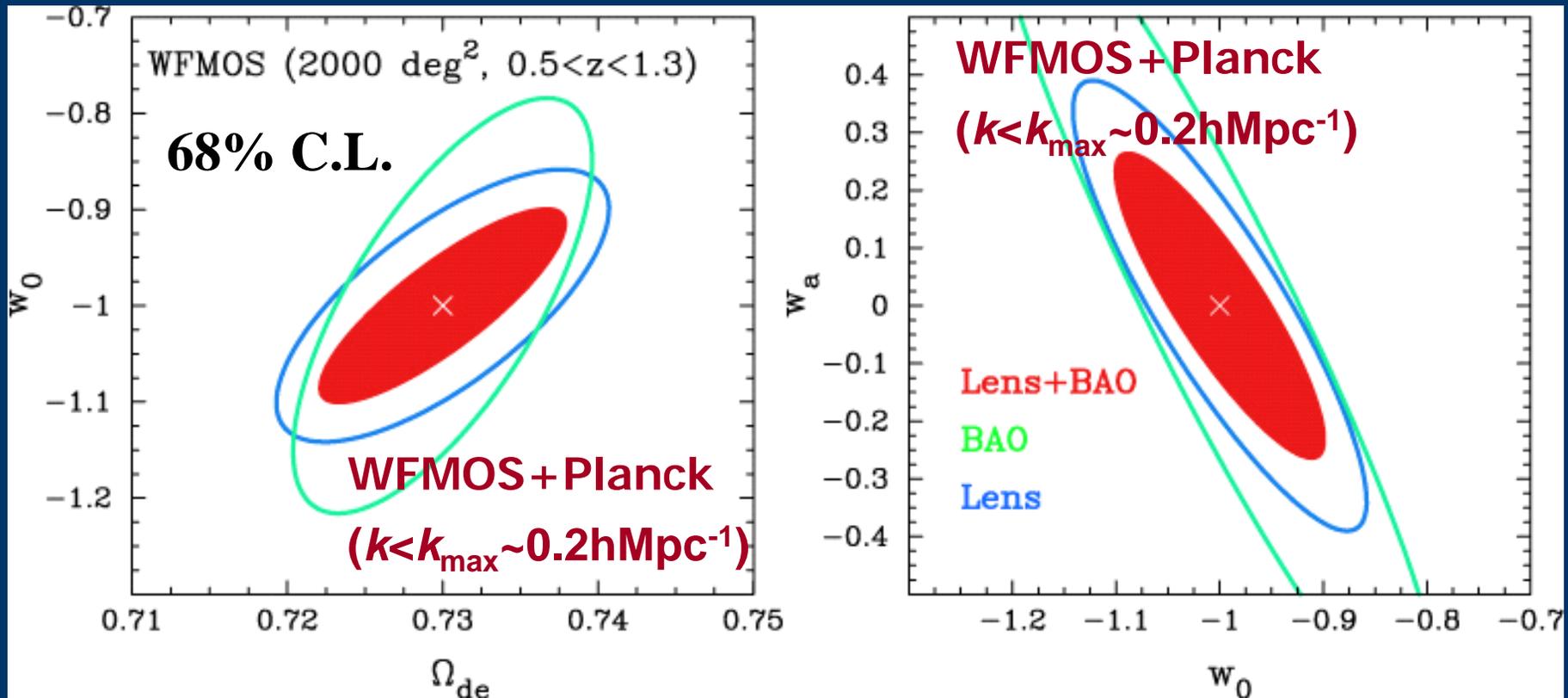


# ダークエネルギー観測からみたWF MOSの概要

- すばる主焦点に口径 $1.5^\circ$  の広視野カメラ
- 4000天体分光器による赤方偏移サーベイ
  - $0.5 < z < 1.3$ : emission line galaxies
    - $2 \times 10^6$ 個/2000平方度 $\Rightarrow$ 1400ポイントング(900時間)
  - $2.3 < z < 3.3$ : Lyman-break galaxies
    - $6 \times 10^5$ 個/300平方度 $\Rightarrow$ 200ポイントング(800時間)
- 銀河空間分布のバリオン振動スケールを決定し、 $H(z)$ ,  $D_A(z)$ を1%レベルで決定
- $w$ ,  $dw/dz$ を $\pm 5\%$ ,  $\pm 25\%$ の精度で決定
  - $\Rightarrow$  ダークエネルギーを観測的に絞り込む

# 期待される結果

- WFMOS サーベイ + プランク衛星データ + Hyper-Suprime weak lensing (WFMOSデータによる測光zの較正後)



	BAO	WL	BAO+WL
$\sigma(w_0)$ :	0.14	0.09	0.07
$\sigma(w_a)$ :	0.49	0.26	0.18

(東北大 高田昌広)

# 法則か実在か？ 暗黒エネルギーと重力法則

観測 (CMB, SDSS...)

~ Our stance ~

~ (Precision) cosmology ~

重力法則は  
Newton's law  
(Einstein gravity)

宇宙膨張は  
 $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7$   
と同じ

宇宙論パラメータへの制限

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

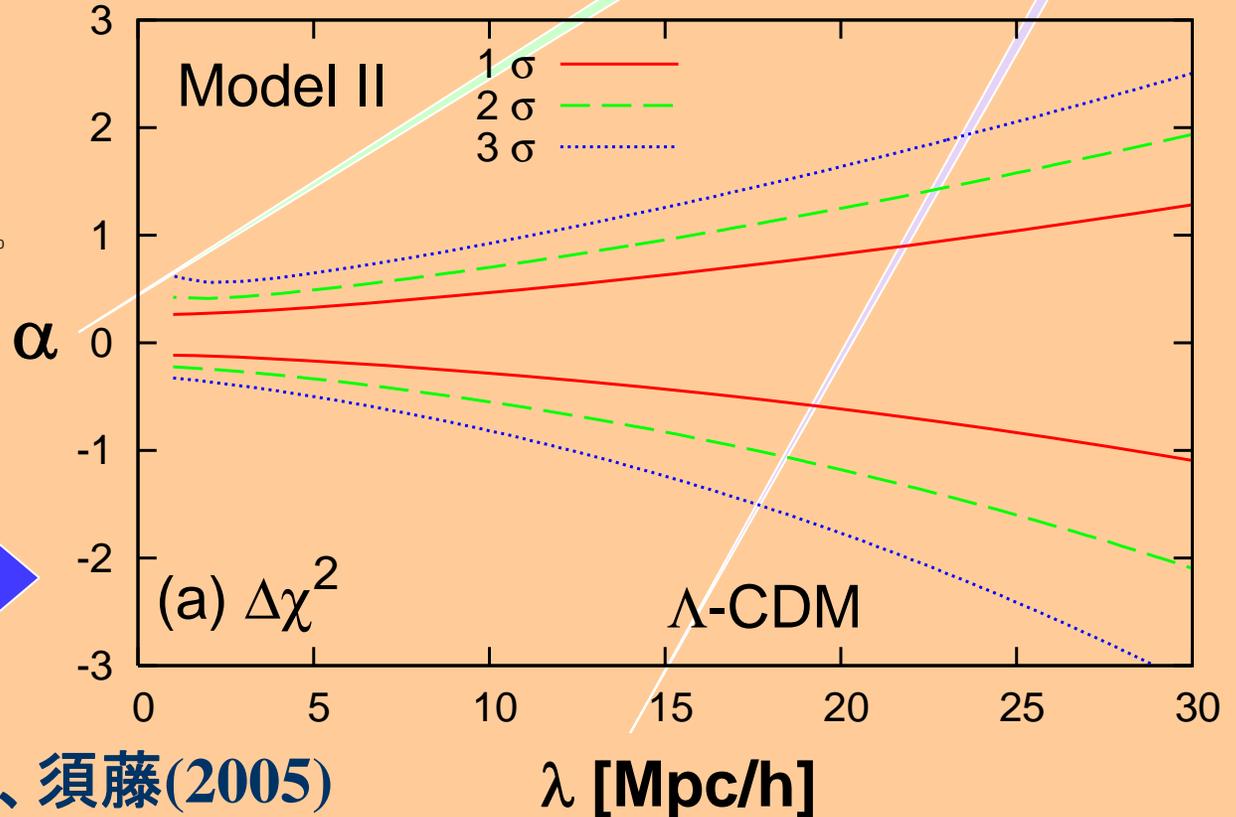
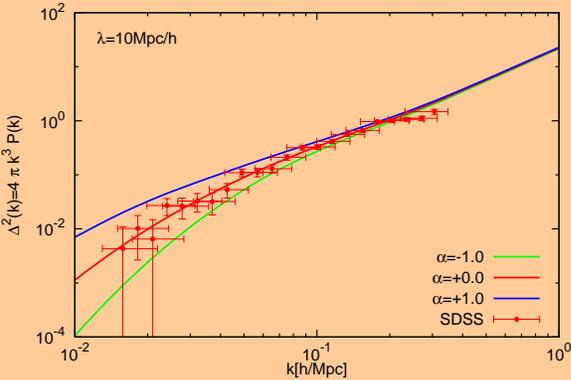
重力法則への制限

???

宇宙の構造形成の立場から、Mpcスケールでの  
重力の変更に対して制限を行う。

# ニュートンの逆自乗法則からのずれ に対する制限

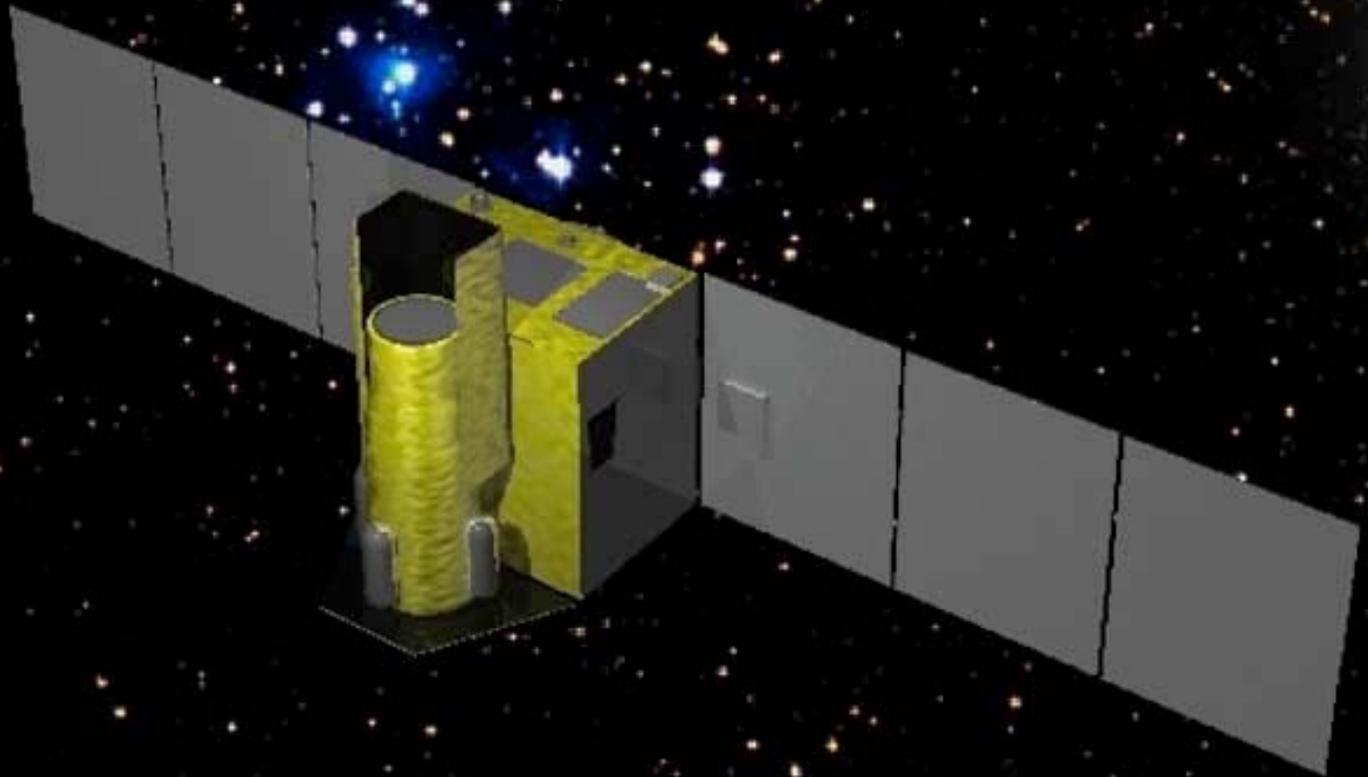
$$V(r) = -\frac{GM}{r} \left[ 1 + \alpha \left( 1 - e^{-r/\lambda} \right) \right]$$



白田、白水、吉田、須藤(2005)

$\lambda$  [Mpc/h]

# Searching for cosmic missing baryons with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)



# 宇宙の99%は未同定

実は96%どころではない！

宇宙のバリオンの内訳



Component

Central

Maximum

Minimum

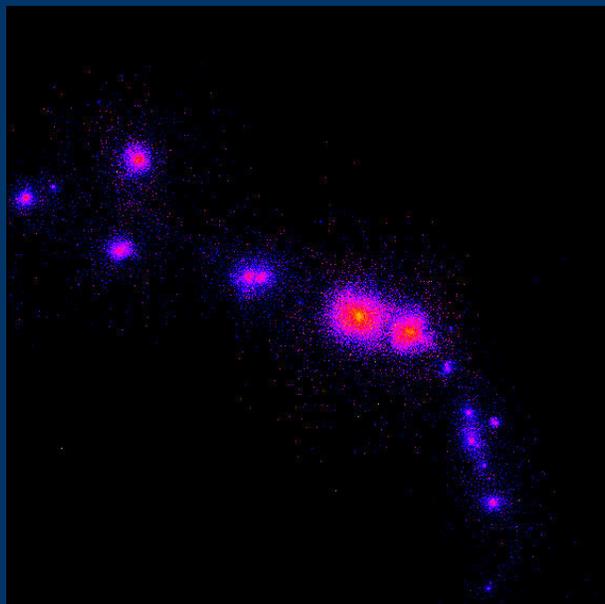
Grade<sup>a</sup>

**Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan & Peebles: ApJ 503 (1998) 518**

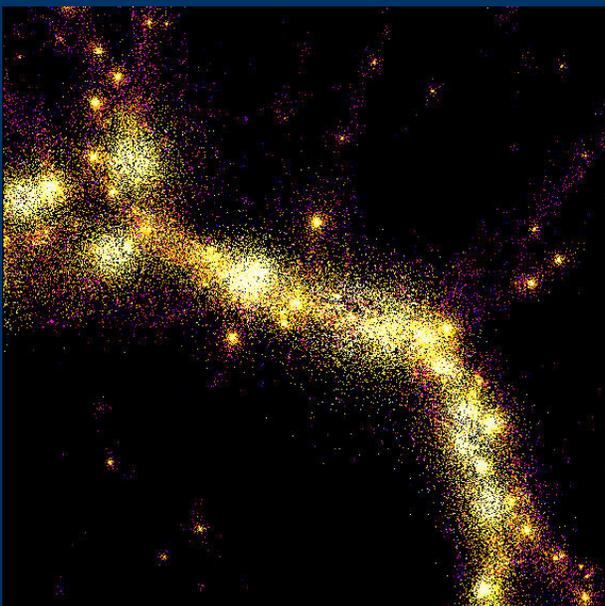
Component	Central	Maximum	Minimum	Grade <sup>a</sup>
1.				
2.				
3.				
4.				
5.				
6.				
7a.				
7b.				
7c.				
8. Sum (at $h = 70$ and $z \simeq 0$ ).....	0.021	0.041	0.007	...

# 宇宙の物質分布 (SPH simulation)

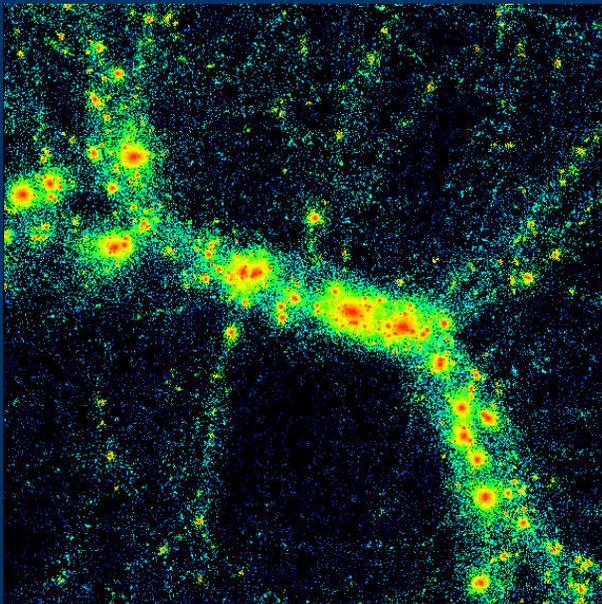
銀河団高温ガス



ダークバリオン



ダークマター

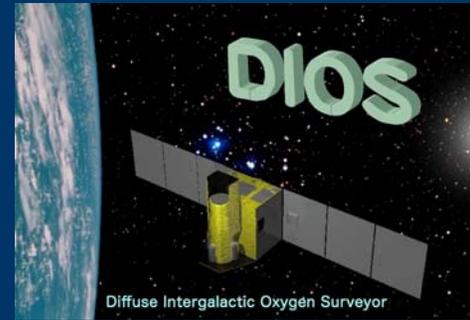


銀河

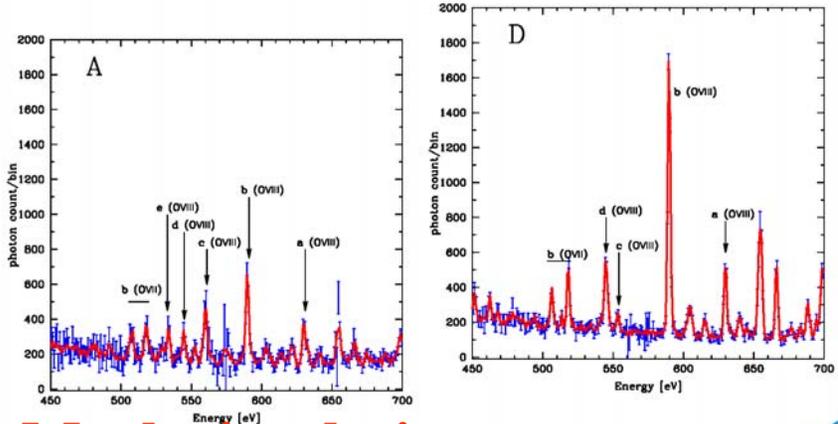


Yoshikawa et al. (2001)

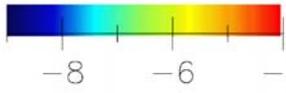
# Searching for cosmic missing baryons with DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor)



**PASJ 55 (2003) 879**  
**PASJ 56 (2004) 939**



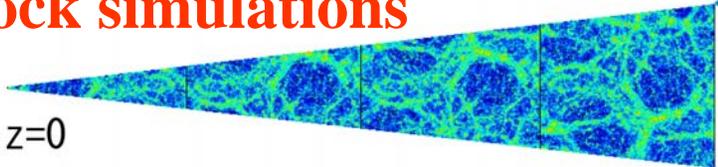
$\text{Log } S_x \text{ [erg/s/cm}^2\text{]}$



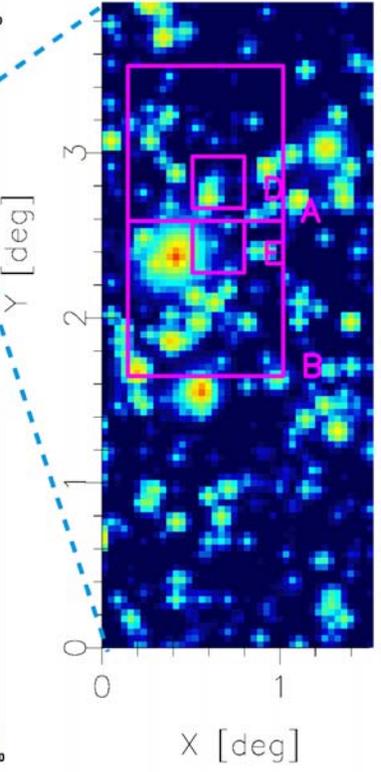
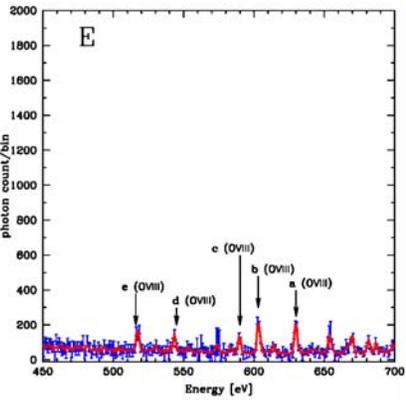
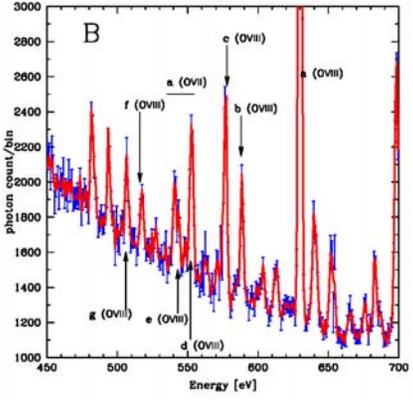
**Mock simulations**



$z=0$



$z=0.3$



Tokyo Metropolitan Univ.:

*T. Ohashi*

JAXA/ISAS:

*N. Yamasaki*

*K. Mitsuda*

Nagoya Univ.:

*Y. Tawara*

Univ of Tokyo:

*K. Yoshikawa*

*Y. Suto*

# 宇宙のダークバリオン探査の重要性

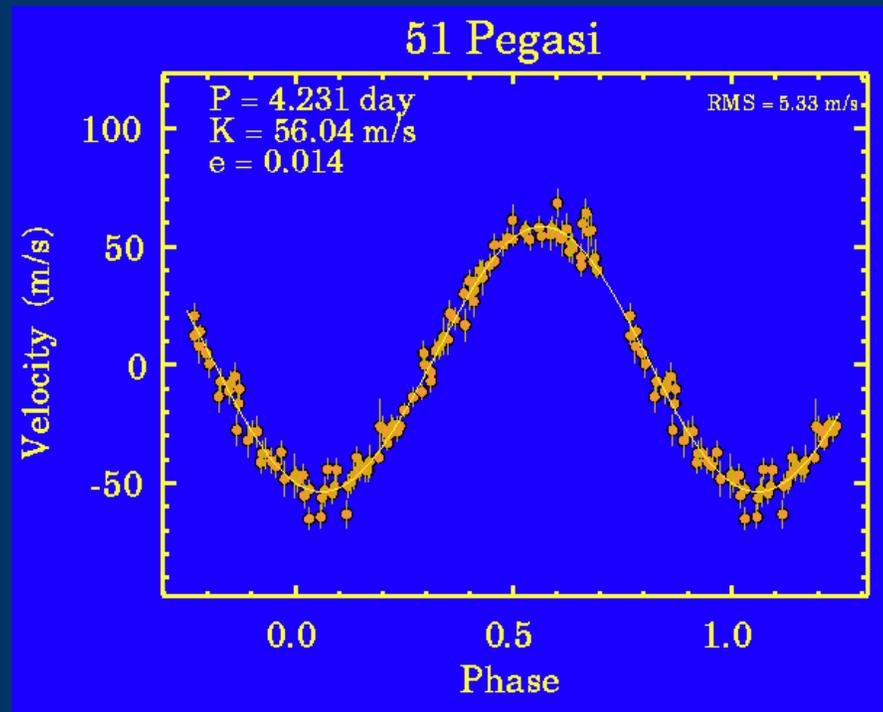
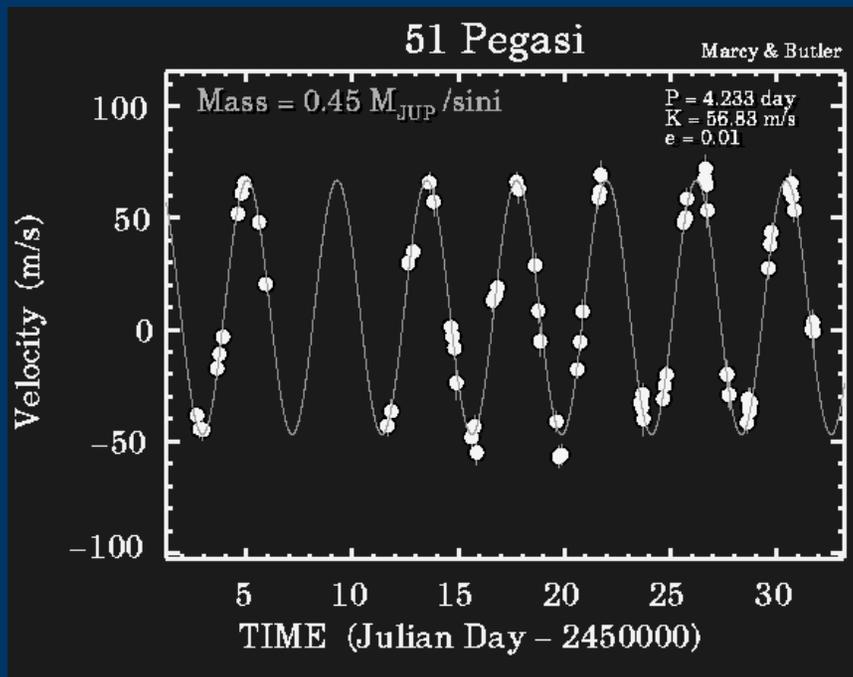
- **ダークマターやダークエネルギーの探査・研究と極めて相補的**
  - バリオンは宇宙の物質階層の中でもっとも重要な成分
  - その存在形態を突き止めるためには未知の物理学を必要としない
  - 天文・宇宙物理学を適切に組み合わせることで必ず答えが出る確実なテーマ
  - その検出手段を確定すれば新たな宇宙観測の窓を開拓することになる
- **計画の準備状況(観測可能性と科学的意義の検討、衛星の具体的仕様)において、現時点では日本が世界のトップの位置にいる**
  - 日本独自あるいは他の国も参加するスタイルで国際協力を主導できるプロジェクト

# 太陽系外惑星：過去の10年

- 1995年：主系列星周りの系外惑星の発見 (51Peg)
- 1999年：系外惑星のトランジット発見(HD209458)
- 2001年：惑星大気の新検出(ナトリウム)
- 2003年：惑星から蒸発する水素大気の新発見
- 2003年：公転周期1.2日のトランジット惑星発見(OGLE)
- 2004年1月：惑星大気中に炭素と酸素を検出
- 2004年4月：周期1.4日、1.7日のトランジット惑星発見
- 2004年8月：14地球質量の惑星発見(氷/岩石惑星?)
- 2006年2月までに170個の系外惑星が報告済み

# 51 Pegasi b: 太陽と同じような恒星(主系列星)を周る惑星の初発見

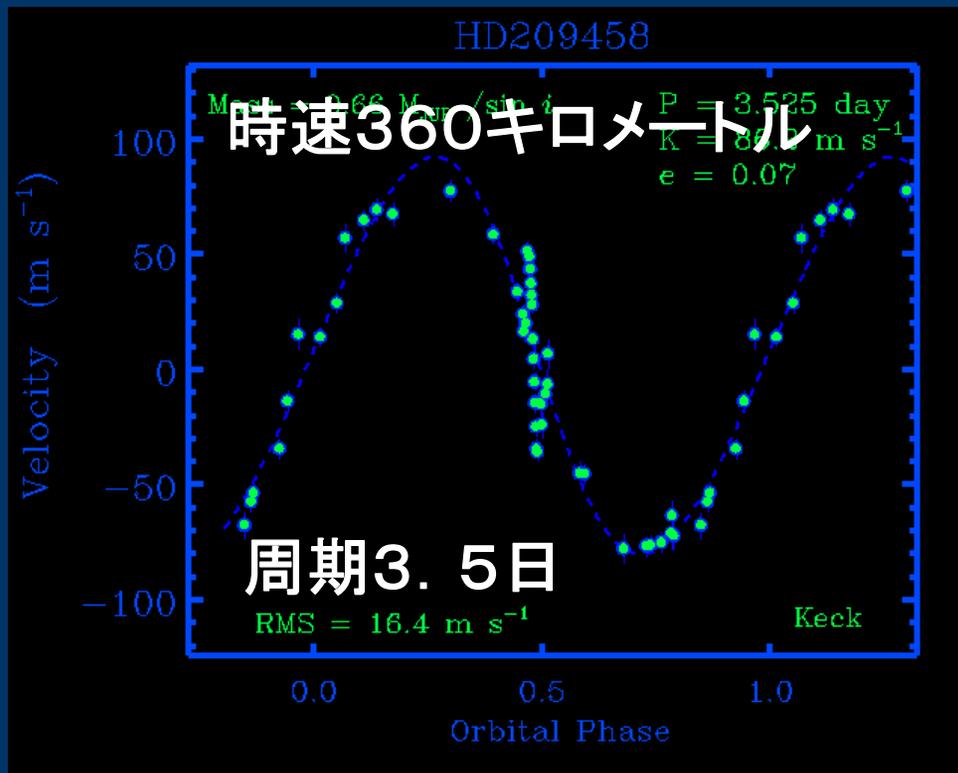
- 主星の速度変動の検出によって初めて発見された惑星 (Mayor & Queloz 1995)



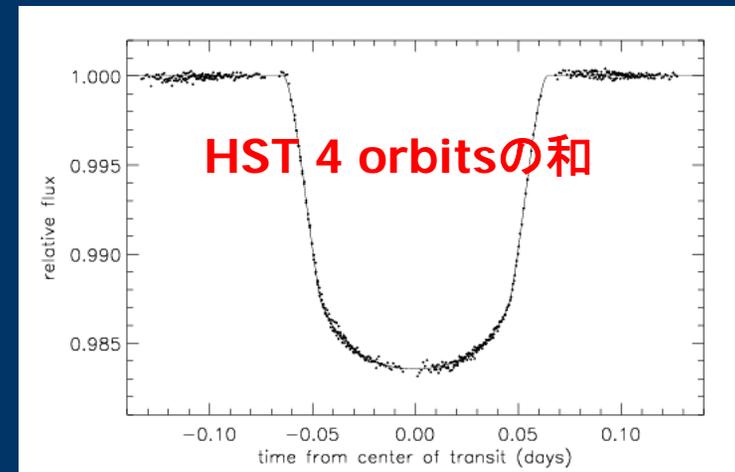
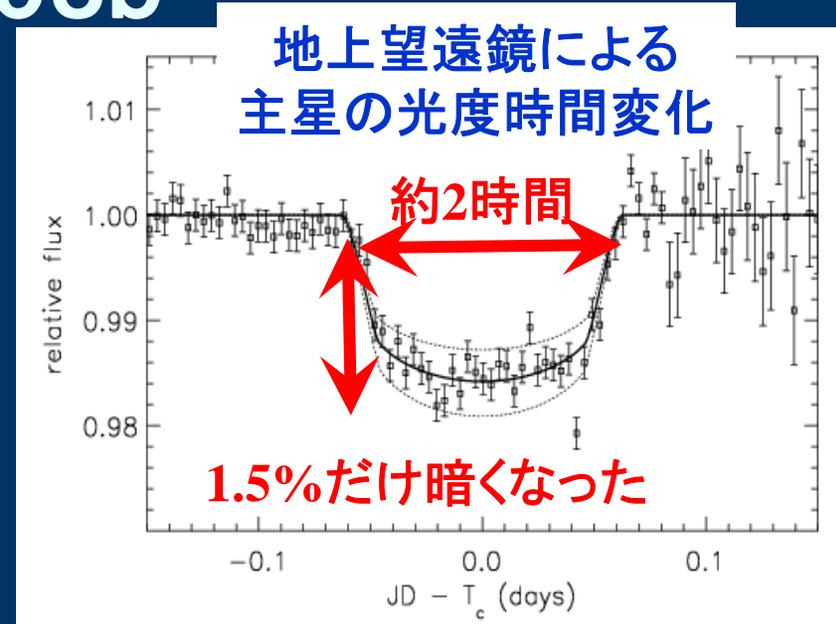
周期がわずか4.2日！

# 太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458b

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出



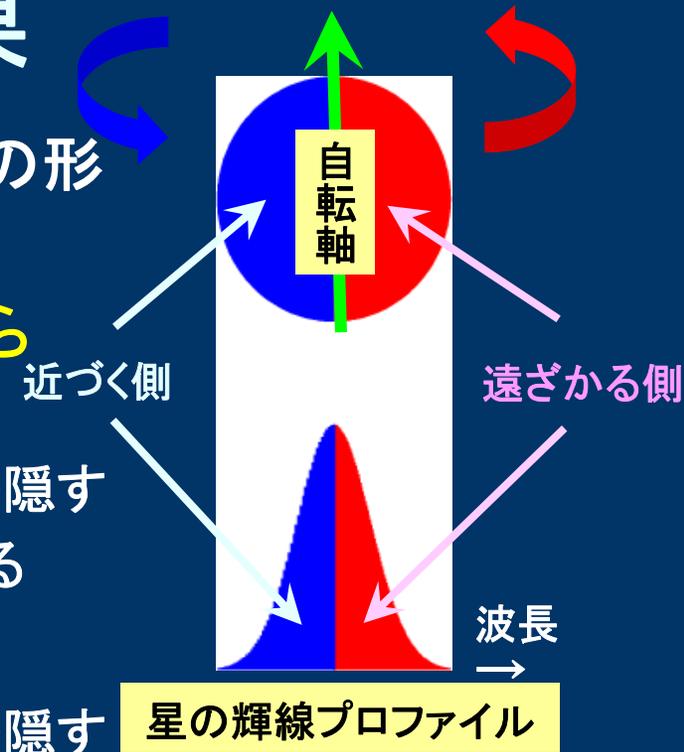
地上望遠鏡による  
主星の速度時間変化



Brown et al. (2001)

# 検出原理： ロシター効果

- 中心星の自転のため、星の線スペクトルの形は波長に関して左右対称に広がっている
- しかし、トランジット惑星が同じ向き(左から右)に通過すると
  - 中心星の近づく面を隠してから遠ざかる面を隠す
  - 星は、まず遠ざかりその後近づくように見える
- 一方、逆周り(右から左)の場合には
  - 中心星の遠ざかる面を隠してから近づく面を隠す
  - 星は、まず近づきその後遠ざかるように見える
- この結果、線スペクトルの形に非対称性が生まれる
  - この波長のズレを精密に観測すれば、惑星が右回りか左回りかがわかる
  - さらに詳しく解析すると、惑星の公転面の傾きの角度までわかる！

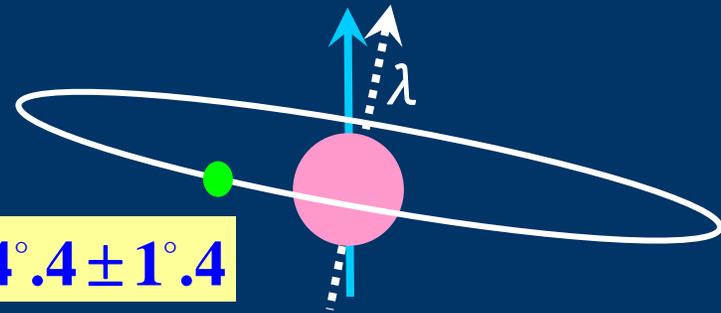


1924年、食連星 こと座ベータ星の速度データの解析に際してロシターが発見した  
**R.A. Rossiter:**  
**ApJ 60(1924)15**

# わずかなズレの初検出！



$$\lambda = -4.4 \pm 1.4$$

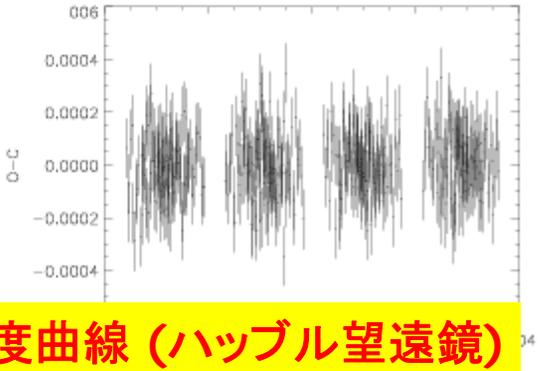
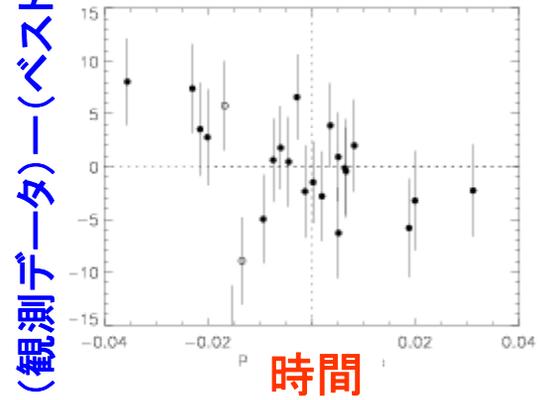
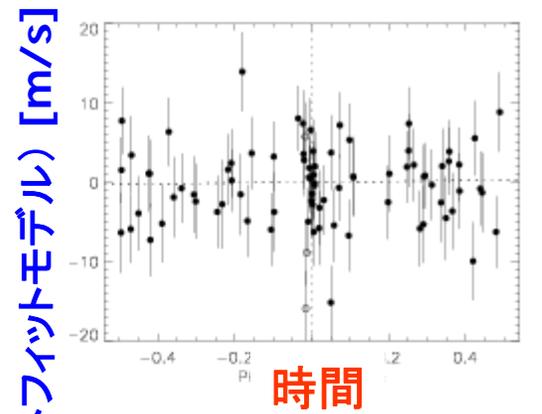
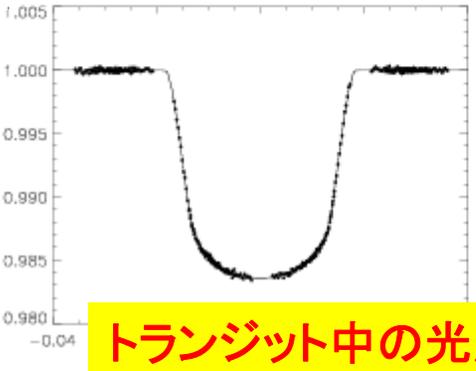
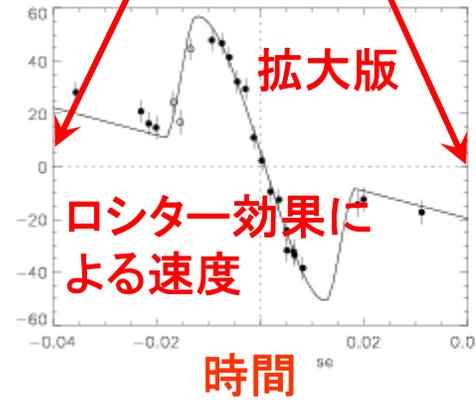
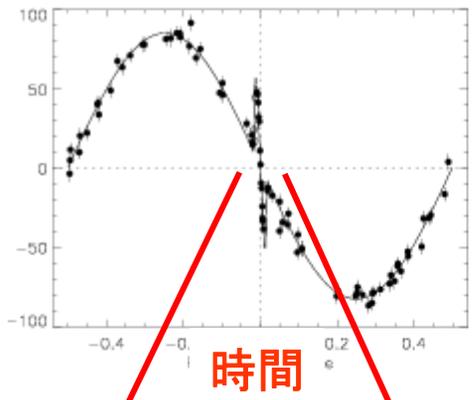


- 私の研究室の大学院生太田泰弘君の理論的研究が、共同研究者であるハーバード大学のJosh Winn氏を刺激した結果
- トランジット惑星 HD209458 のベストデータフィット
  - ケック天文台(ハワイの10m望遠鏡)による可視光での分光観測
  - ハッブル宇宙望遠鏡による可視光強度変動モニター
  - スピッツァー望遠鏡による赤外線強度変動モニター
- 主星の自転軸と惑星の公転軸が、(射影された)角度 $\lambda$ にして $(-4.4 \pm 1.4)$ 度だけずれていることを発見
  - Queloz et al.(2000)の精度(約20度)を一桁以上向上
  - 太陽の場合、自転軸は系内惑星の全角運動量軸(不変面の法線方向)に対して約6度傾いている



# 相対速度 (ケック天文台)

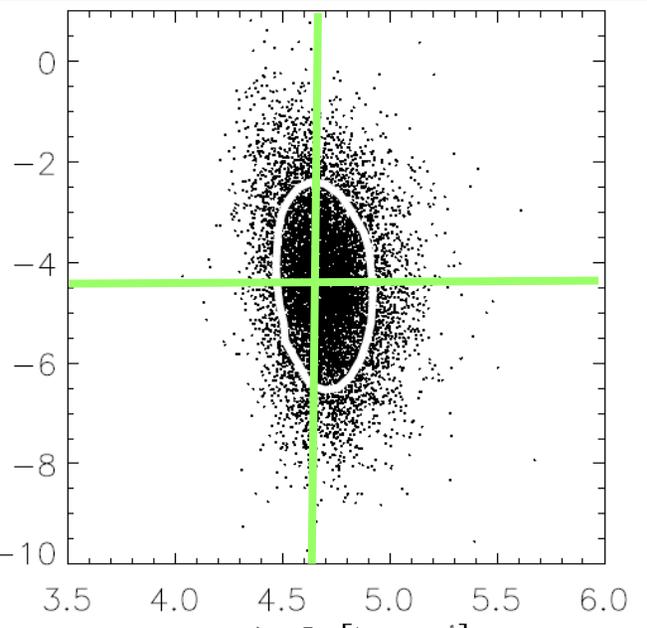
中心星の視線速度 [m/s]



トランジット中の光度曲線 (ハッブル望遠鏡)

# 解析結果

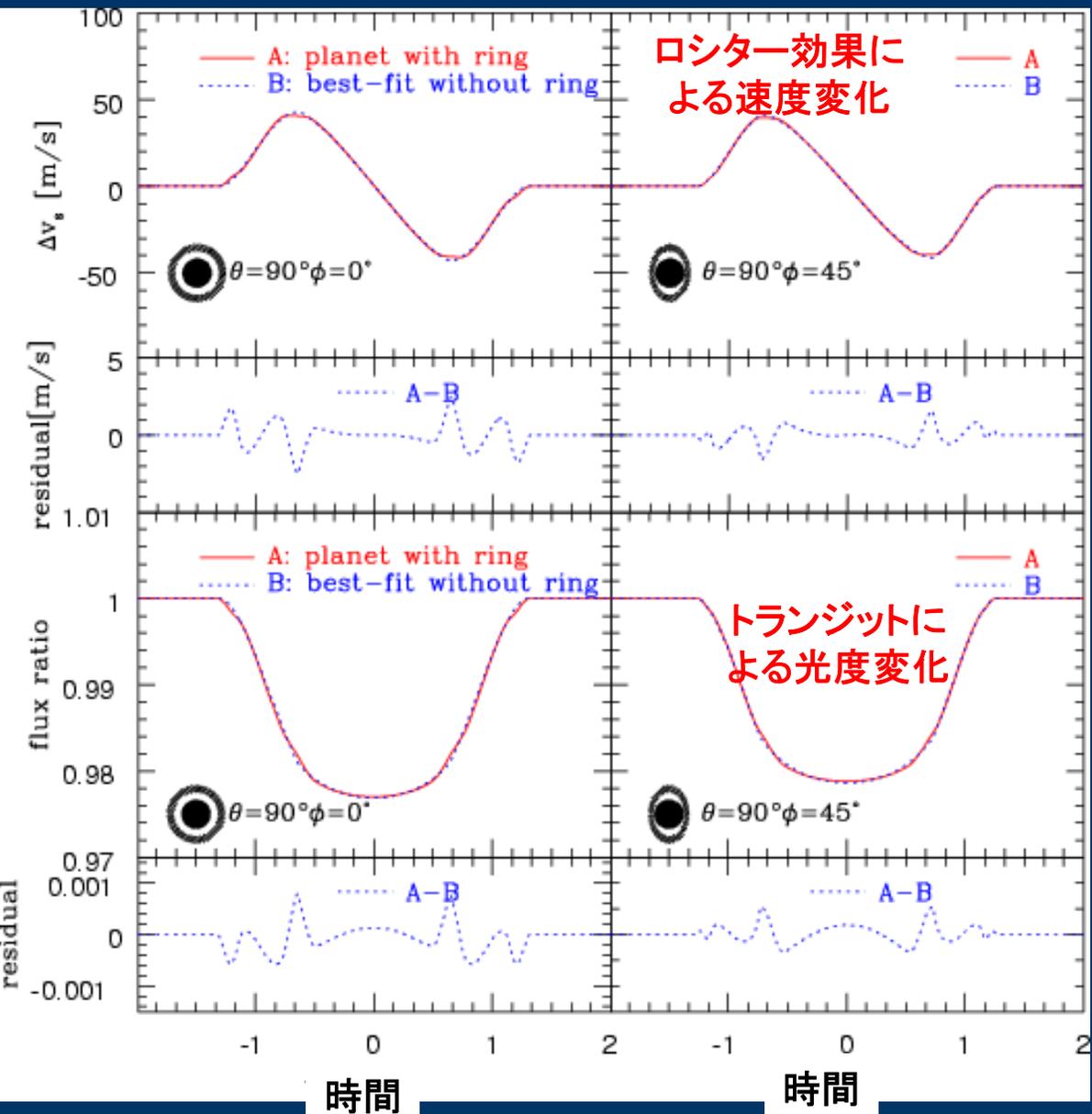
自転軸と公転軸のなす角 [度]



中心星の自転速度 [km/s]

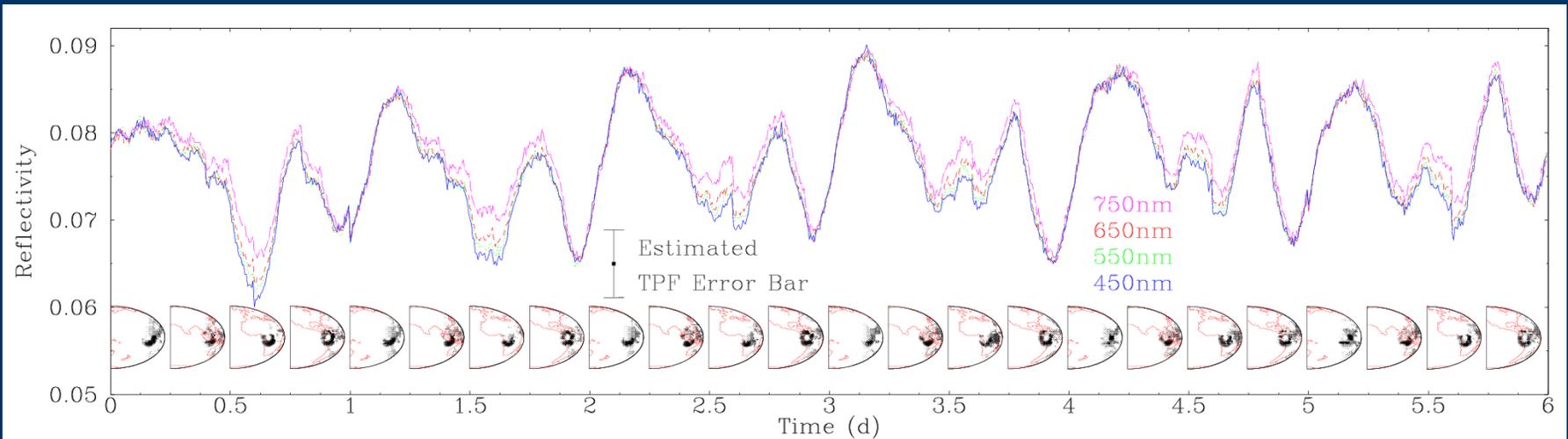
$\lambda = -4.4 \pm 1.4$   
 わずかではあるが有意に0からずれている!

# 系外惑星リングの検出可能性



- HD209458に似たトランジット惑星系がリングを持つと仮定
  - 惑星半径:  $R_{\text{木星}}$
  - リング内径:  $1.5R_{\text{木星}}$
  - リング外径:  $2R_{\text{木星}}$
- リングがない場合の予想とのズレ
  - 速度: 1m/s程度
  - 光度変化: 数ミリパーセント程度
- ほとんど現在の測定精度のレベル!
- もし存在すれば近い将来検出可能

# 地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？

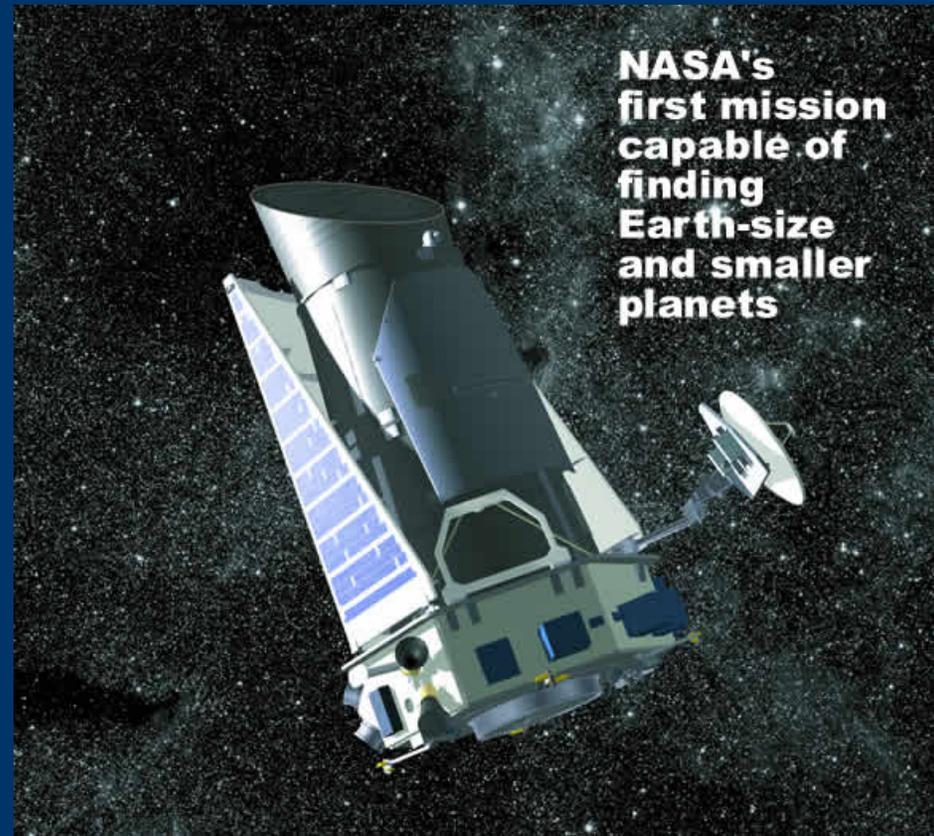
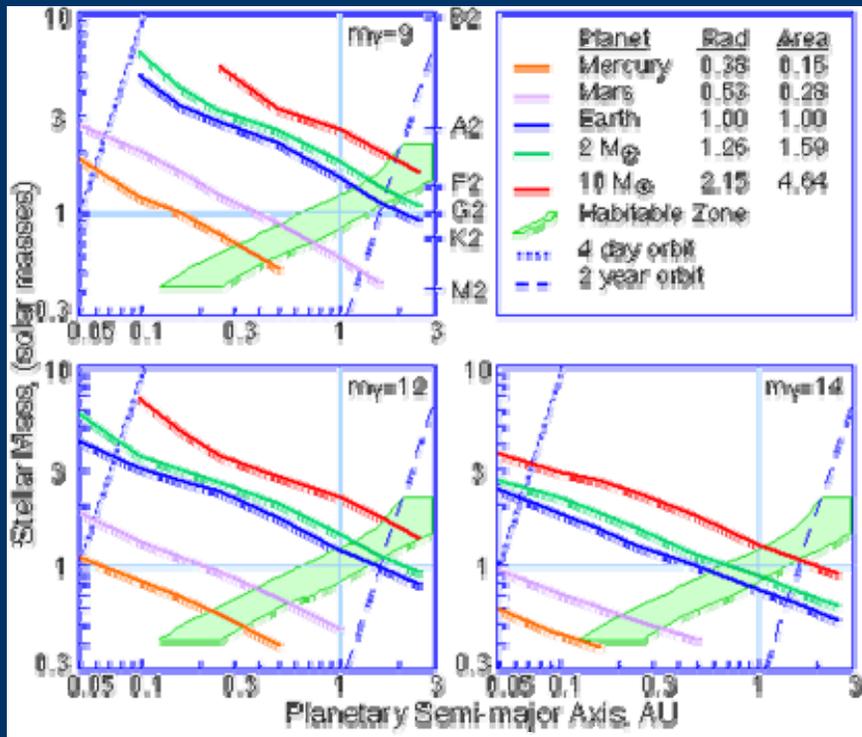


Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

- **10%レベルの日変化は検出可能**
  - 大陸、海洋、森林などの反射特性の違いを用いる
- **雲の存在が鍵**
  - 太陽系外地球型惑星の天気予報の精度が本質的！

# ケプラー衛星 (米国2008年6月予定)

トランジット惑星の測光サーベイ:  
4年間で50個以上の地球型惑星を発見することをめざす



<http://kepler.nasa.gov/>

# 今後の系外惑星研究方向

- 巨大ガス惑星発見の時代
- 惑星大気の見
- 惑星大気の精密分光観測による組成決定

---

- 惑星反射光の検出

---

- **地球型惑星の発見**
- **バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定**
- **居住可能惑星の発見**
- **地球外生命の発見**

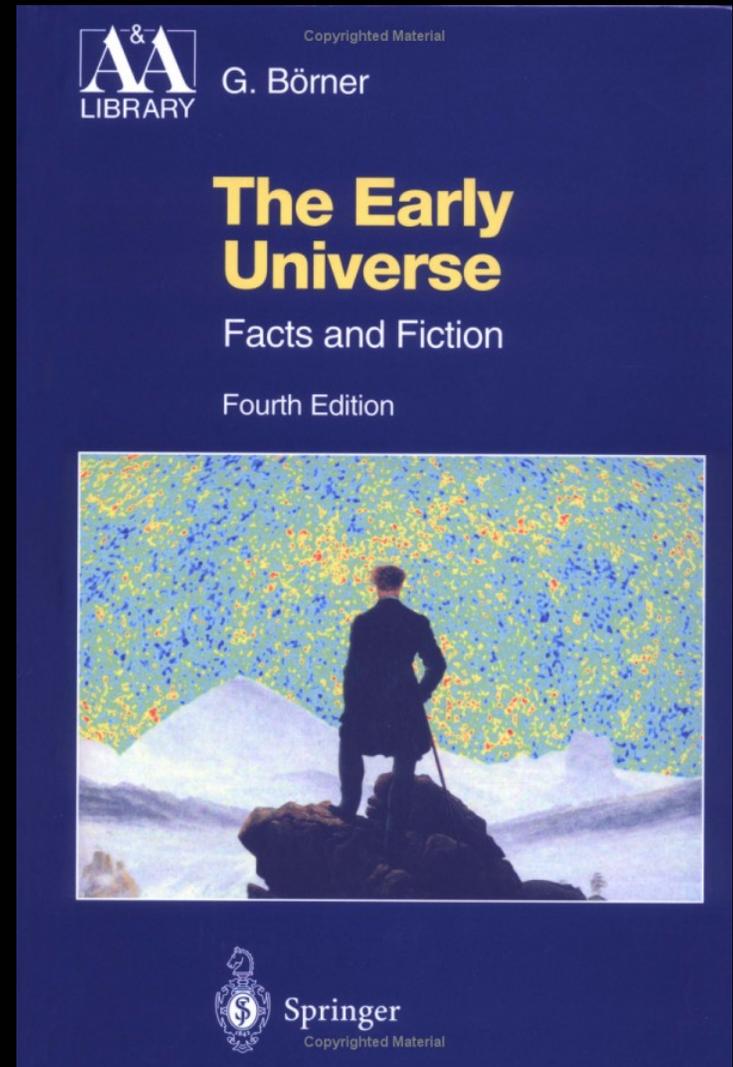


# 謎解きはまだまだこれから

- 宇宙の果てをみることで自然界の新たな物質階層が明らかとなった
  - 宇宙の約23%は暗黒物質、約73%は暗黒エネルギー
  - 我々は宇宙の96%の部分を全く理解していなかった
  - 暗黒物質、暗黒エネルギーの解明は21世紀科学の大目標
- 10年足らず前に初めて太陽系以外に惑星が存在することが発見された(ただしまだガス惑星のみ)。
  - 第二の地球はあるのか？
  - 地球外生物、地球外知的文明は存在するか？
  - 我々の存在は偶然か、必然か？
  - これらが単なる夢物語やSFではなく、科学的(物理+天文+化学+地学+生物)に議論できる時代になってきた！

# 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テキスト (The early universe - facts and fiction - by Gerhard Boerner) を主として輪講する。



# 後期理論演習（佐藤・須藤研合同）

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

