

宇宙の果てから太陽系外惑星へ

東京大学大学院理学系研究科

須藤 靖

特定領域研究

「太陽系外惑星科学の展開」研究会

2005年9月5～7日



 西はりま天文台
NISHIHARIMA ASTRONOMICAL OBSERVATORY



遠くの世界はどうなっているのだろうか？

■ 宇宙の果てには何がある？

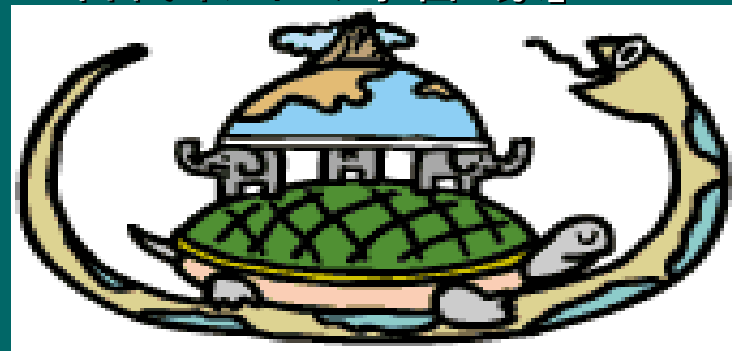
古代エジプトの宇宙像



古代中国の宇宙像



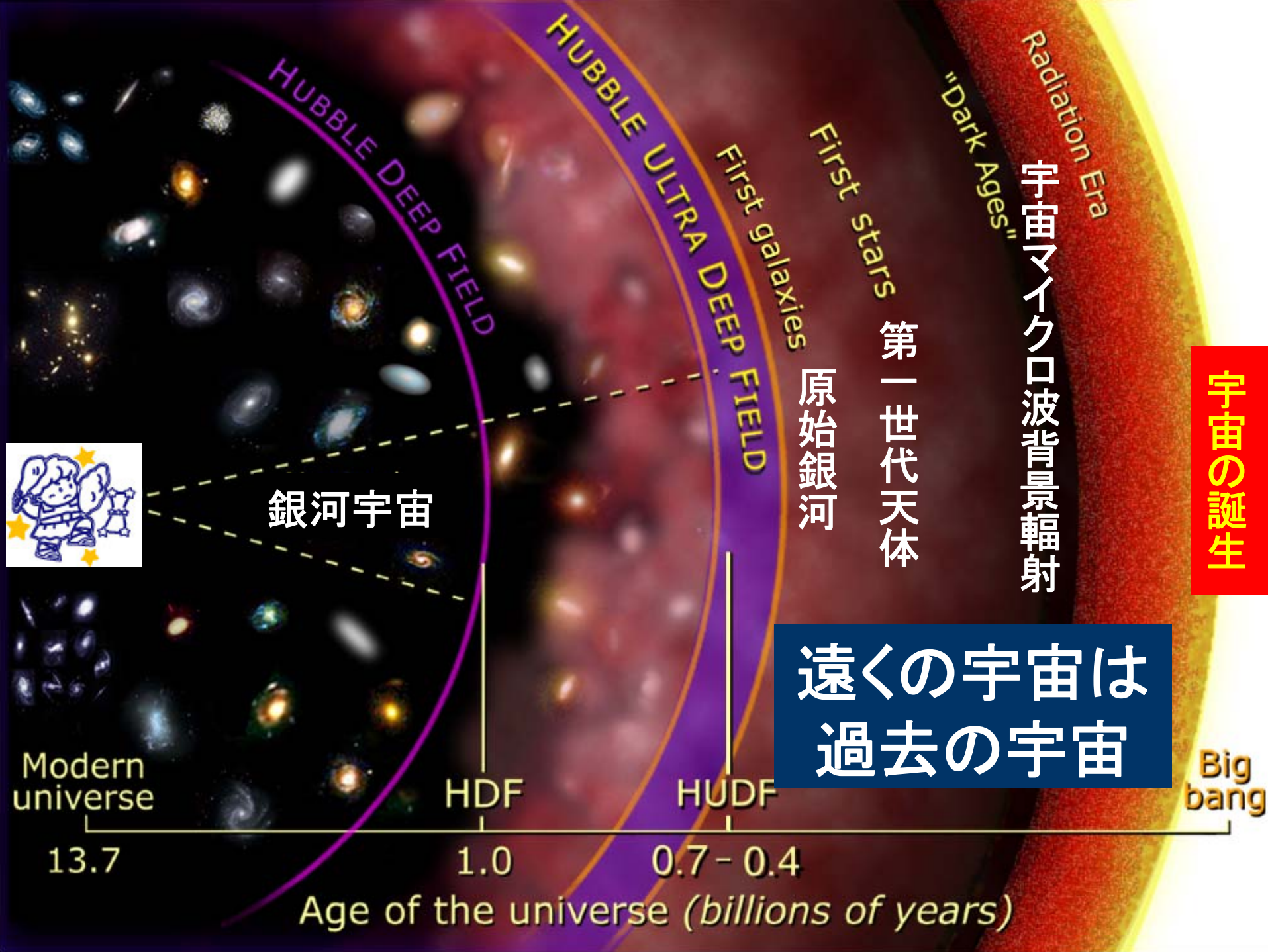
古代インドの宇宙「象」



<http://www.isas.ac.jp/kids/firstlook/index.html>

■ 第二の地球はあるか？

- 我々人類は広い宇宙でひとりぼっちなのか？



宇宙の誕生

宇宙マイクロ波背景放射

"Dark Ages"

第一世代天体

First stars

原始銀河

First galaxies

HUBBLE ULTRA DEEP FIELD

HUBBLE DEEP FIELD

銀河宇宙

遠くの宇宙は過去の宇宙

Big bang

Modern universe

HDF

HUDEF

13.7

1.0

0.7 - 0.4

Age of the universe (billions of years)





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/>



文部科学省

Ministry of Education, Culture,
Sports, Science and Technology

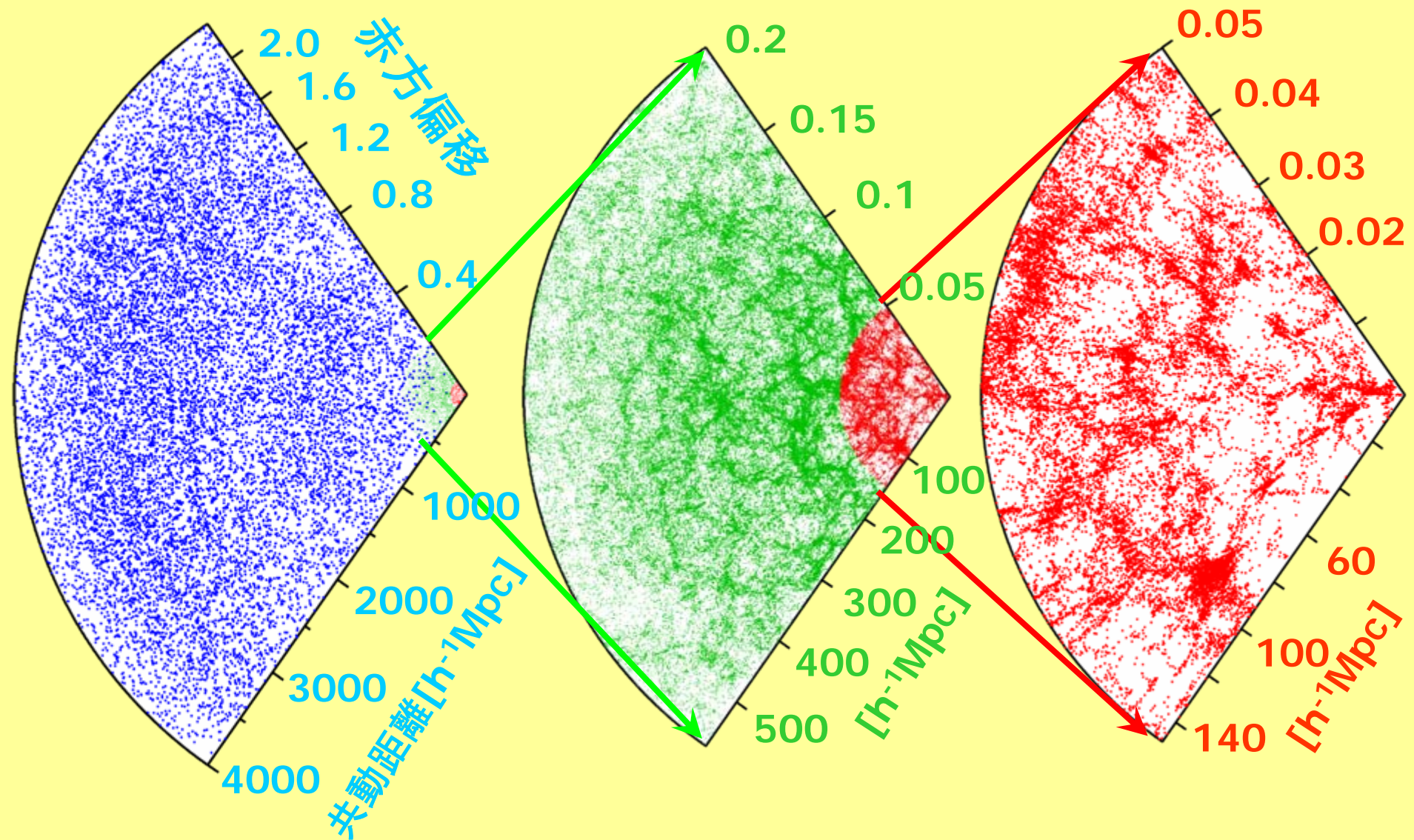
NHK教育 サイエンスZERO 2003年6月11日 0:00 放映

SDSS (スローンデジタルスカイサーベイ) 米国ニューメキシコ州アパッチポイント天文台

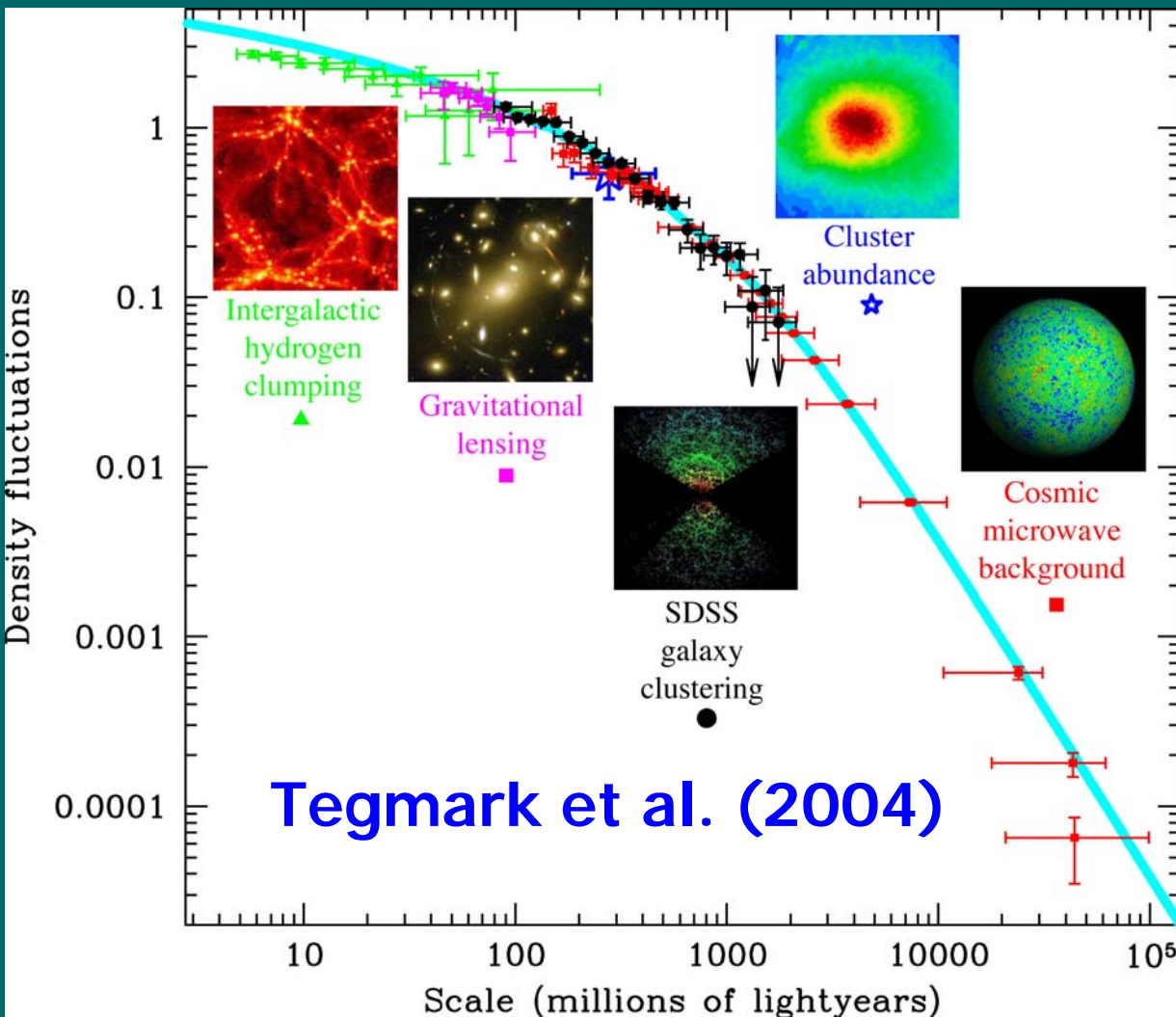


NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映

SDSSクエーサーと銀河の宇宙地図



宇宙のダークマター密度ゆらぎスペクトル



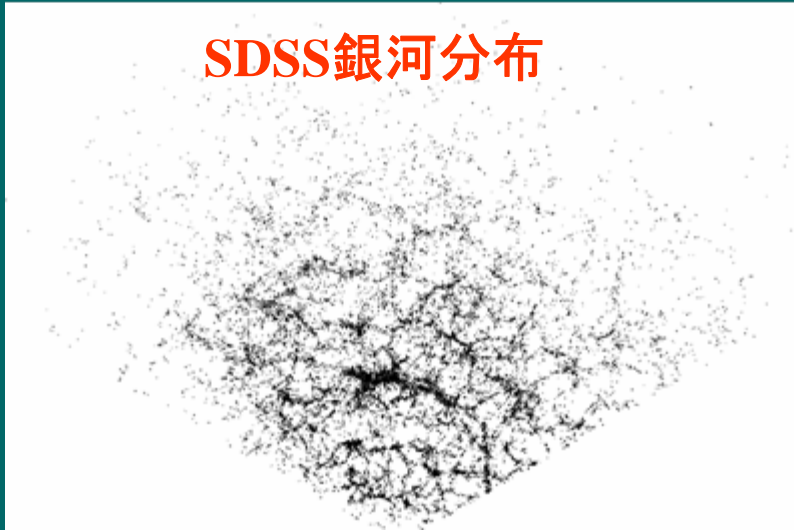
■ このダークマターゆらぎスペクトルによって、知られているすべての観測データが整合的・統一的に説明できる

- 銀河分布
- CMB温度揺らぎ
- 銀河団個数密度
- 重力レンズ歪み地図
- Ly α 雲分布

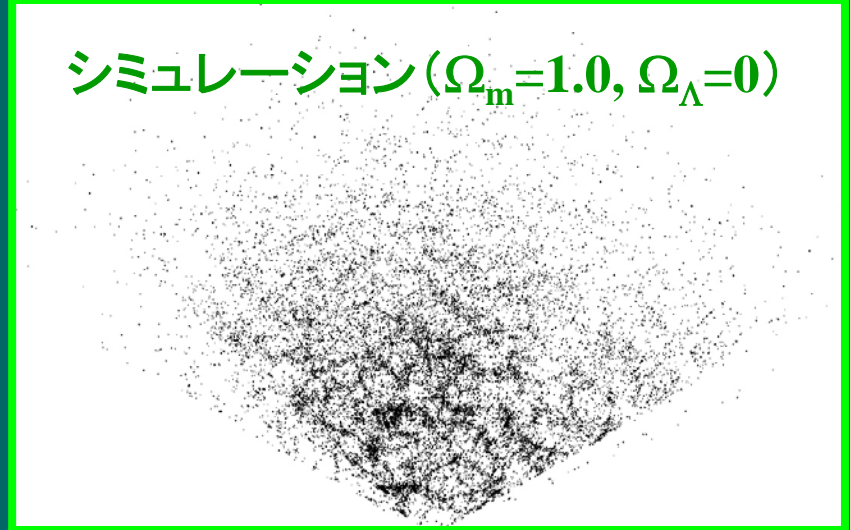
宇宙の大構造：理論モデルとSDSSデータ

4つのうち、1つだけが本当の銀河分布、残りは数値シミュレーション結果

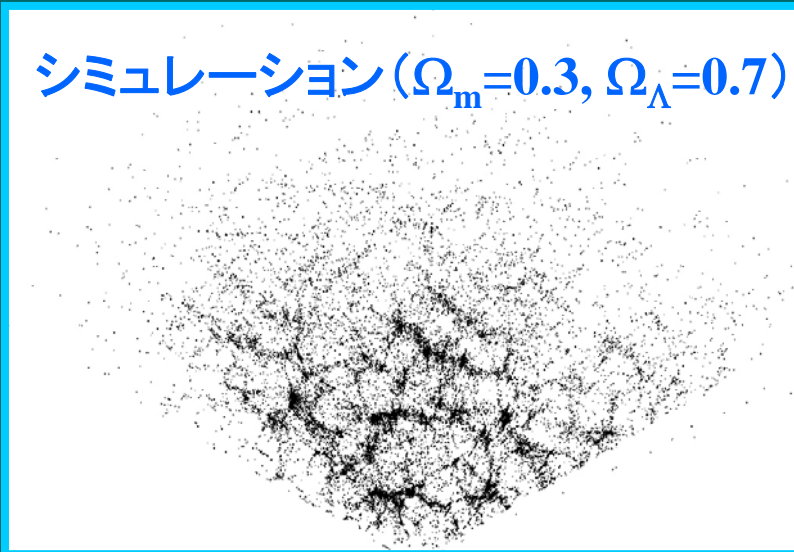
SDSS銀河分布



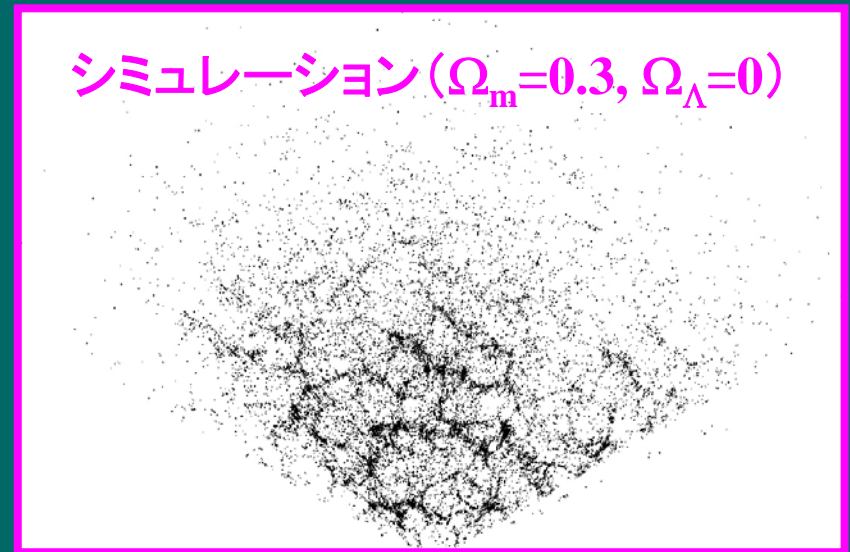
シミュレーション ($\Omega_m=1.0, \Omega_\Lambda=0$)



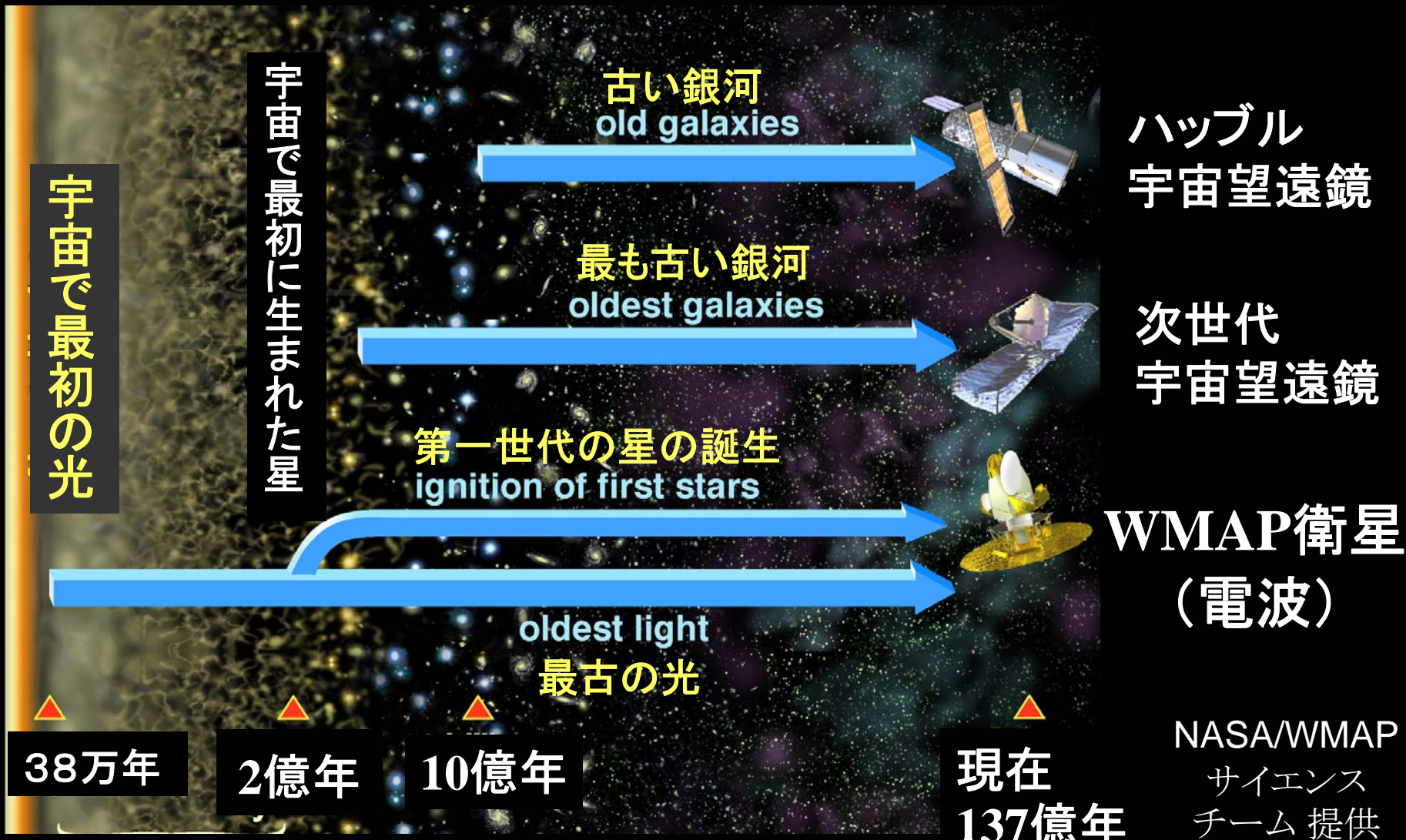
シミュレーション ($\Omega_m=0.3, \Omega_\Lambda=0.7$)



シミュレーション ($\Omega_m=0.3, \Omega_\Lambda=0$)



衛星によってさらなる宇宙の果てを見る

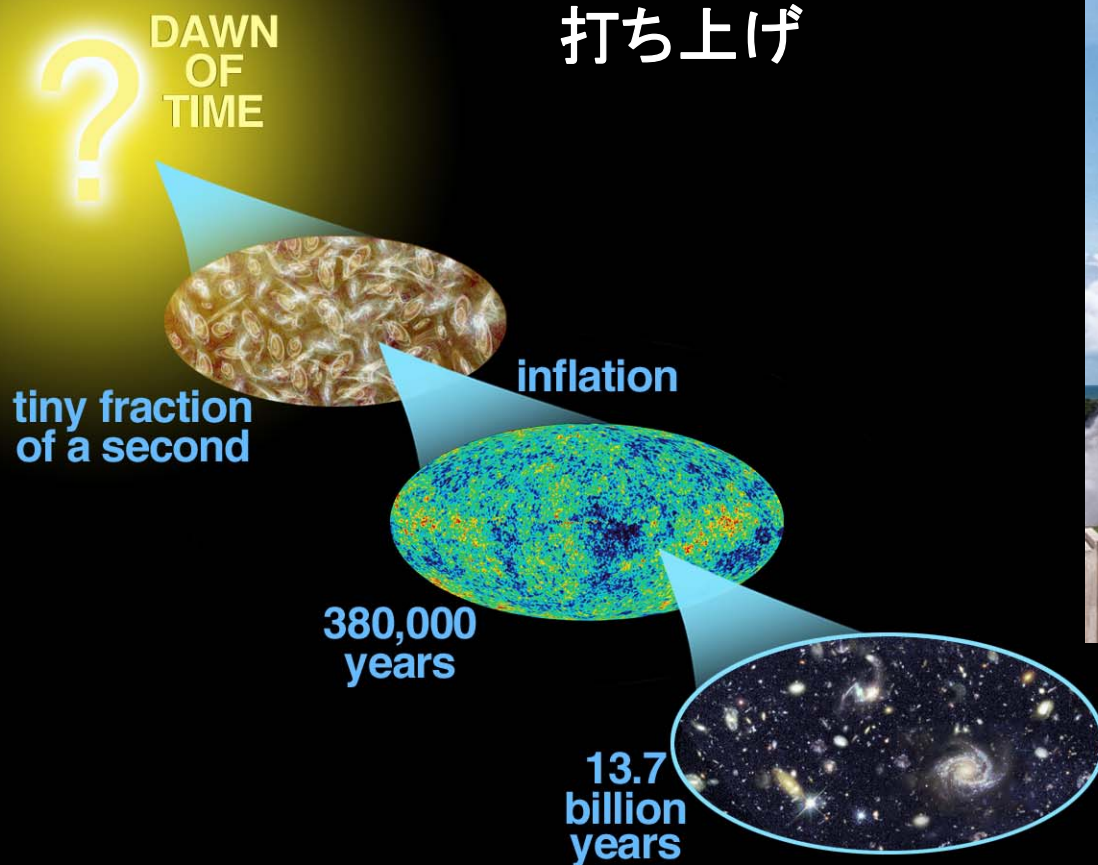


<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

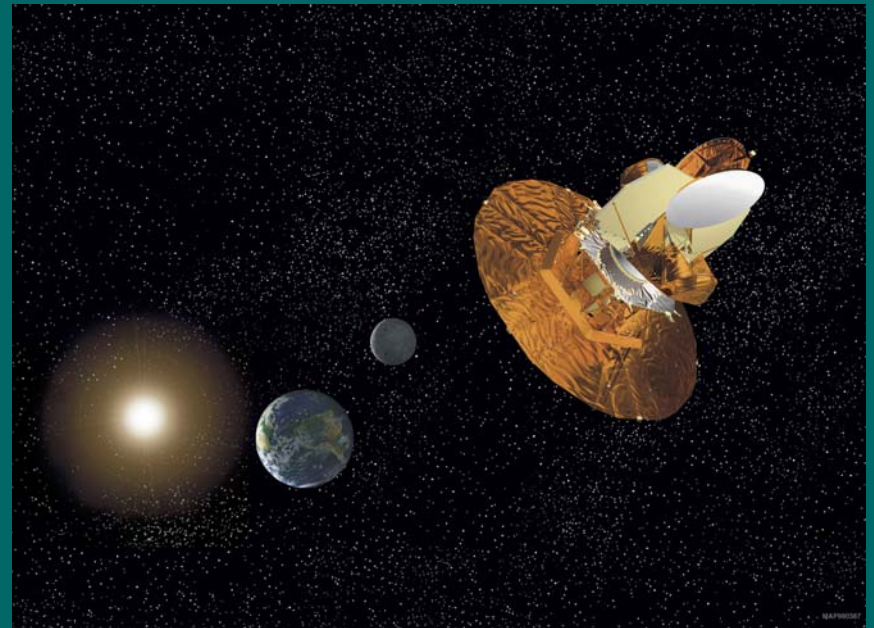
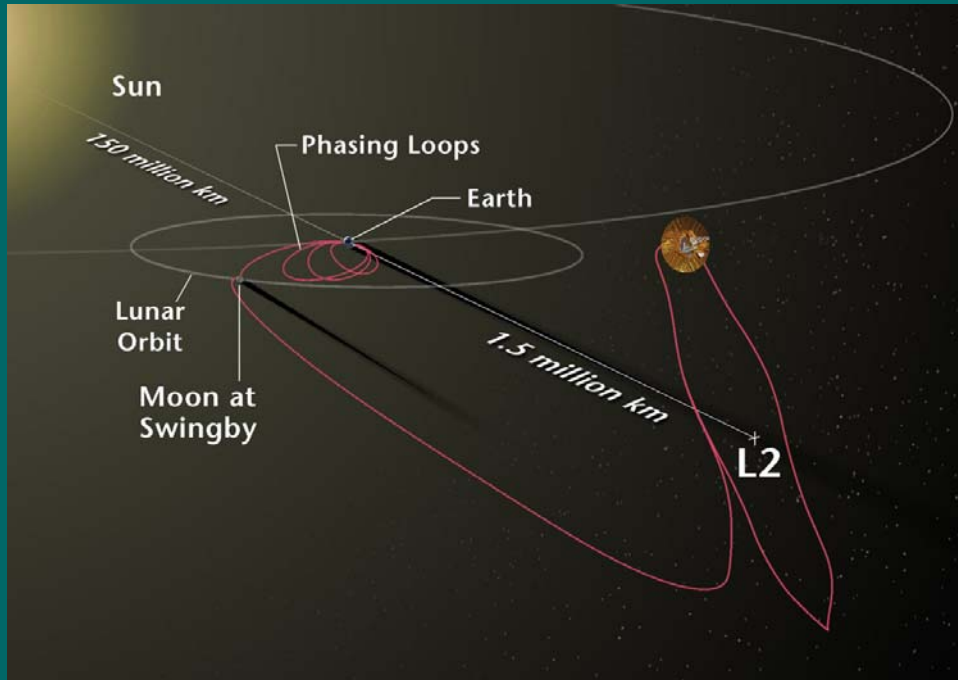
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

2001年6月30日 15:46:46
米国東海岸標準時間
打ち上げ

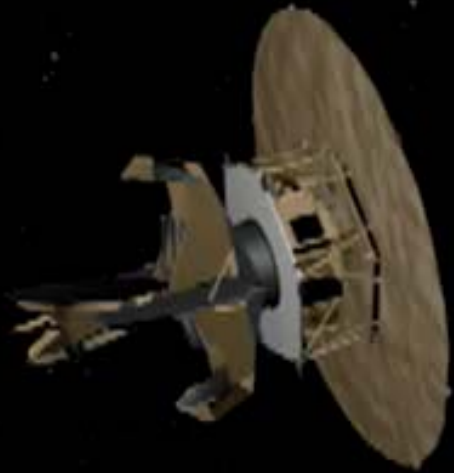


NASA/WMAP
サイエンスチーム提供

WMAP 衛星打ち上げ



WMAP衛星：地球から宇宙の果てへの旅

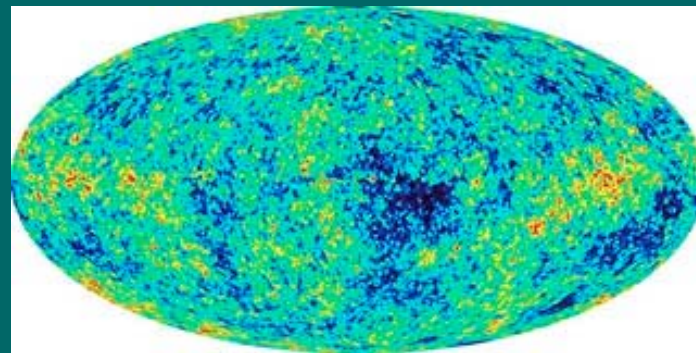


<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

137億年前の古文書の解読方法

■ 暗号化された状態の古文書

- 宇宙マイクロ波全天温度地図



■ 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$

■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

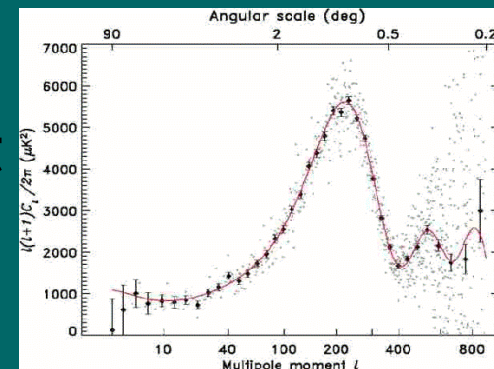
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

■ この古文書の意味を理解するための文法

- 冷たい暗黒物質モデルの理論予言

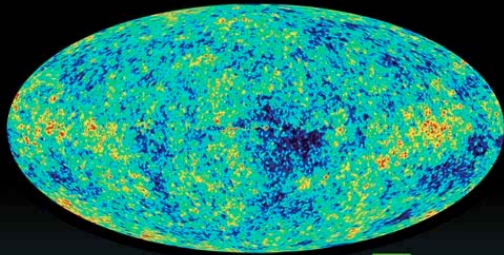
■ 隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



WMAPの観測した温度ゆらぎパワースペクトル

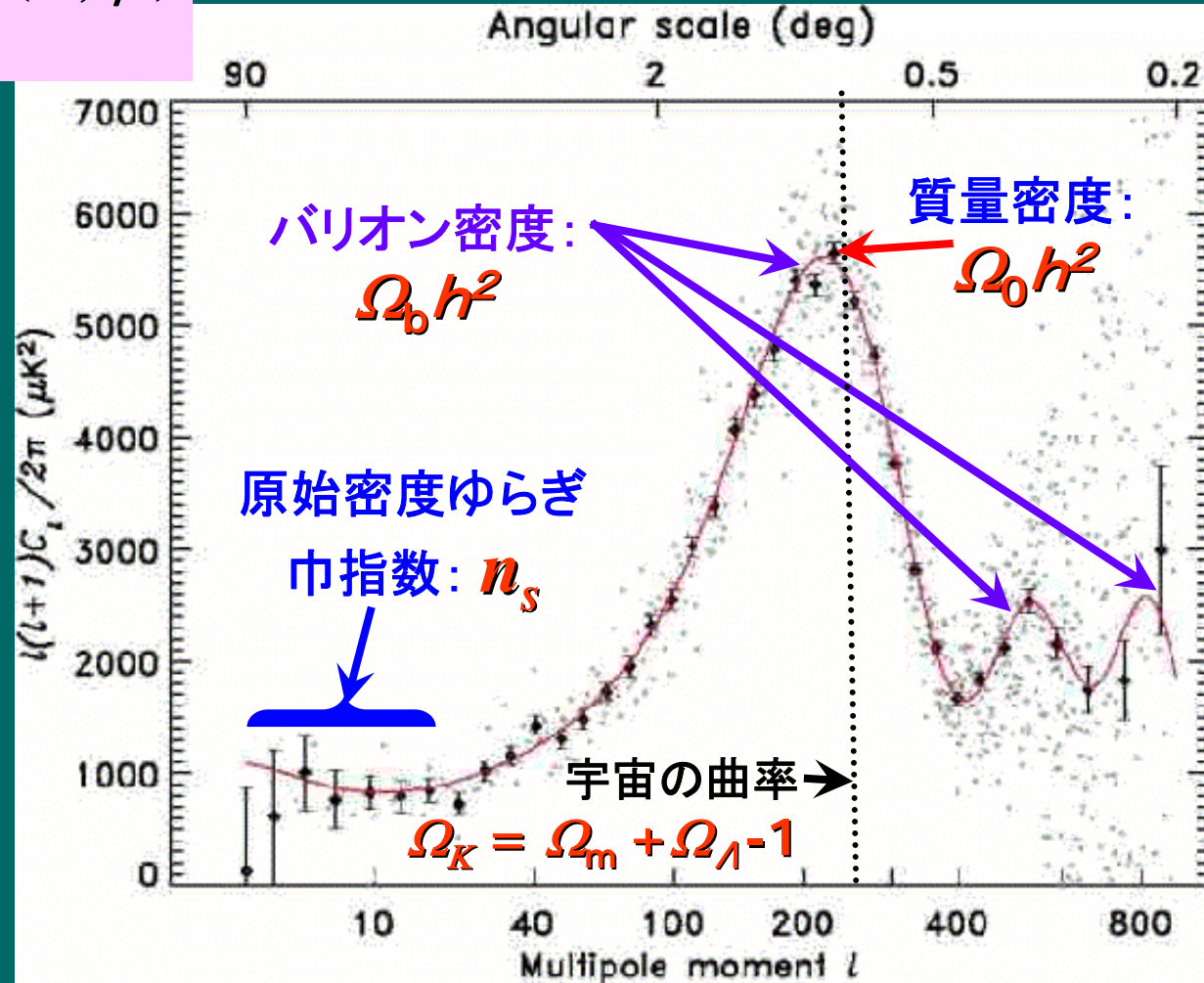
$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \varphi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \varphi)$$



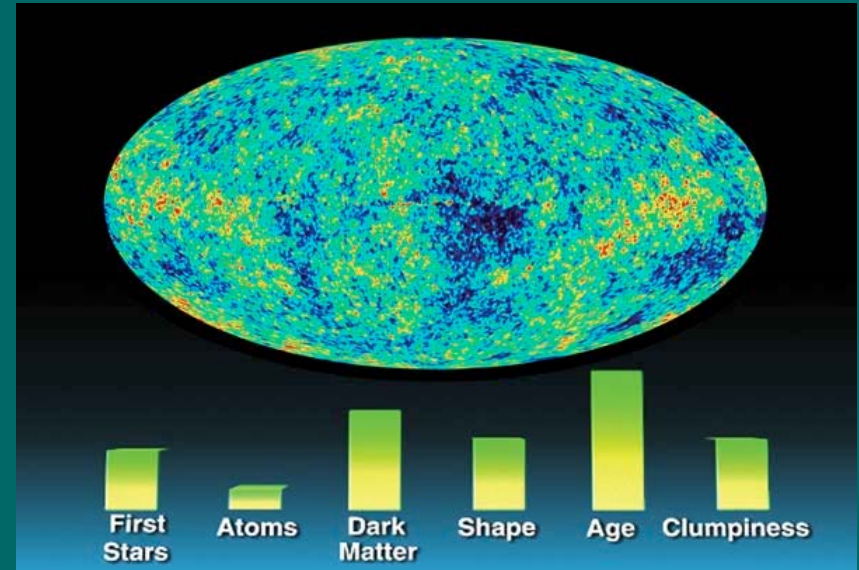
First Stars Atoms Dark Matter Shape Age Clumpiness

$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

Spergel et al.
ApJS 148(2003)175



宇宙の古文書が 教えてくれたこと



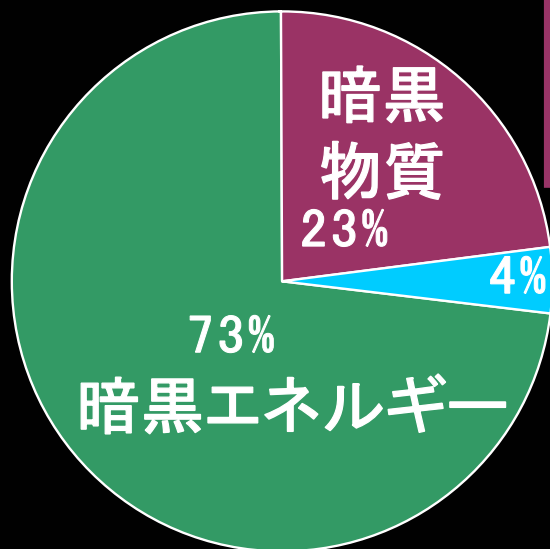
- 宇宙の年齢は137億年
- 宇宙は曲率が0(平坦:ユークリッド幾何)
- 「最初の星」が宇宙が生まれて2億年後に誕生
- 宇宙の「物質」のほとんどは「暗黒物質」
- 実はさらに、「暗黒エネルギー」が宇宙を支配

WMAPと他の データの 組み合わせ て決定され た宇宙論パ ラメータの値

Ω_{tot}	1.02 ± 0.02	全エネルギー密度パラメータ
w	< -0.78	ダークエネルギーの圧力と密度の比 (95%信頼度での上限値)
Ω_{Λ}	0.73 ± 0.04	ダークエネルギー密度パラメータ
$\Omega_b h^2$	0.0224 ± 0.0009	バリオン密度パラメータ
Ω_b	0.044 ± 0.004	バリオン密度パラメータ
$n_b [\text{cm}^{-3}]$	$(2.5 \pm 0.1) \times 10^{-7}$	バリオン個数密度
$\Omega_m h^2$	$0.135^{+0.008}_{-0.009}$	全物質密度パラメータ
Ω_m	0.27 ± 0.04	全物質密度パラメータ
$\Omega_\nu h^2$	< 0.0076	ニュートリノ質量密度パラメータ (95%信頼度での上限値)
η	$6.1^{+0.3}_{-0.2} \times 10^{-10}$	バリオンフォトン比
Ω_b / Ω_m	0.17 ± 0.01	全物質中のバリオンの割合
σ_8	0.84 ± 0.04	半径 $8h^{-1}$ Mpc の球のゆらぎの値
n_s	0.93 ± 0.03	$k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ でのゆらぎのスペクトル指数
$dn_s / d \ln k$	$-0.031^{+0.016}_{-0.018}$	$k_0 = 0.05 \text{ Mpc}^{-1}$ でのゆらぎのスペクトル指数の微係数
r	< 0.9	$k_0 = 0.002 \text{ Mpc}^{-1}$ でのテンソルスカラー比 (95%信頼度)
z_{eq}	3233^{+194}_{-210}	物質と輻射のエネルギー密度が等しくなる時期
z_{dec}	1089 ± 1	脱結合時の赤方偏移
Δz_{dec}	195 ± 2	脱結合時の赤方偏移範囲 (FWHM)
h	$0.71^{+0.04}_{-0.03}$	ハッブル定数
t_0	137 ± 2 億年	現在の宇宙年齢
t_{dec}	$37.9^{+0.8}_{-0.7}$ 万年	脱結合時の宇宙年齢
t_{r}	$1.8^{+2.2}_{-0.8}$ 億年	再イオン化時の宇宙年齢
z_{r}	20^{+10}_{-9}	再イオン化時の赤方偏移
τ	0.17 ± 0.04	光学的深さ

我々の宇宙は何からできている (2005年版)

宇宙の組成



- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量をもつ
- 未知の素粒子が正体？

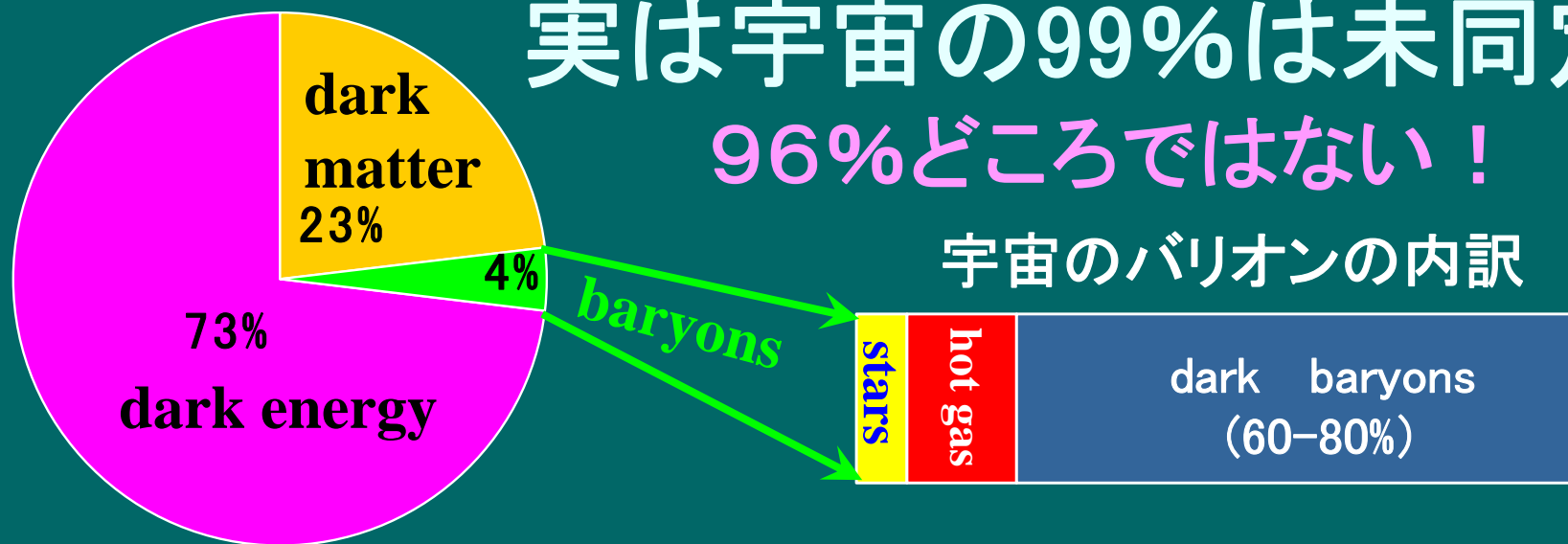
通常物質 (バリオン)

- 元素をつくっているもの (主に、陽子と中性子)
- 現時点で知られている物質(の質量)は実質的にはすべてバリオン

- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

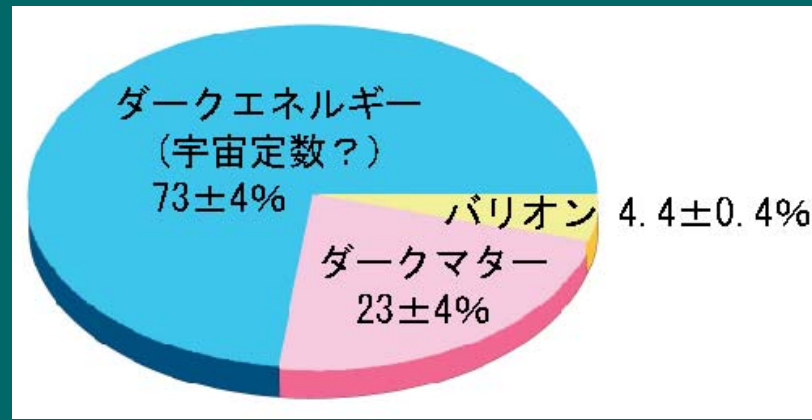
実は宇宙の99%は未同定 96%どころではない！

宇宙のバリオンの内訳



Component	Central	Maximum	Minimum	Grade ^a
Cosmic Baryon Budget: Fukugita, Hogan & Peebles: ApJ 503 (1998) 518				
1. Stars in spheroids	0.0026 h_{70}^{-1}	0.0043 h_{70}^{-1}	0.0014 h_{70}^{-1}	A
2. Stars in disks	0.00086 h_{70}^{-1}	0.00129 h_{70}^{-1}	0.00051 h_{70}^{-1}	A-
3. Stars in irregulars	0.000069 h_{70}^{-1}	0.000116 h_{70}^{-1}	0.000033 h_{70}^{-1}	B
4. Neutral atomic gas	0.00033 h_{70}^{-1}	0.00041 h_{70}^{-1}	0.00025 h_{70}^{-1}	A
5. Molecular gas	0.00030 h_{70}^{-1}	0.00037 h_{70}^{-1}	0.00023 h_{70}^{-1}	A-
6. Plasma in clusters	0.0026 $h_{70}^{-1.5}$	0.0044 $h_{70}^{-1.5}$	0.0014 $h_{70}^{-1.5}$	A
7a. Warm plasma in groups	0.0056 $h_{70}^{-1.5}$	0.0115 $h_{70}^{-1.5}$	0.0029 $h_{70}^{-1.5}$	B
7b. Cool plasma	0.002 h_{70}^{-1}	0.003 h_{70}^{-1}	0.0007 h_{70}^{-1}	C
7'. Plasma in groups	0.014 h_{70}^{-1}	0.030 h_{70}^{-1}	0.0072 h_{70}^{-1}	B
8. Sum (at $h = 70$ and $z \simeq 0$).....	0.021	0.041	0.007	...

20世紀宇宙論研究の進展によって、ますます謎が深まってしまった



- 20世紀物理学の飛躍的進展は、「通常の物質」の構成要素については極めて深い理解をもたらした
- 一方、20世紀最後の数年間の宇宙観測によって、この「通常の物質」は、宇宙全体のわずか4%でしかないことが判明
 - 宇宙の果てを見ることで微視的世界の新しい階層が明らかとなった
 - 宇宙全体の約23%は暗黒物質、約73%は暗黒エネルギー
- **我々は宇宙の96% (99%?)を全く理解していなかった**
- 暗黒物質の直接検出、暗黒エネルギーの正体の理解は、21世紀科学の単なる一課題にとどまらず、新しい自然法則を探り当てる上での本質的な鍵

21世紀の宇宙論

- 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
 - ⇒ **さらなる精密化へ突き進む**
- 「値」の意味(≡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**

1) ダークエネルギー探査

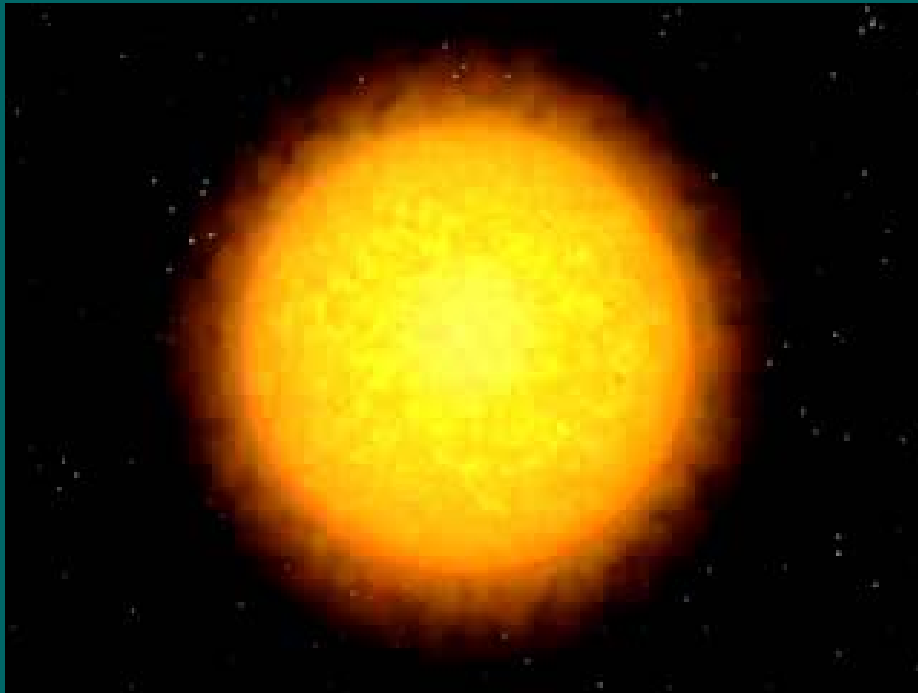
- 「アインシュタインが予言した」という修飾句がつけられるので、大衆受けを狙いやすい
 - 市民が意義を理解したと誤解してもらえるテーマは、同レベルの官僚あるいは本当に賢い官僚のどちらにも受け入れられてもらいやすい
- まずは大量に存在するものから調べるべきなのは当然
 - しかし幸いなことに、直接検出は極めて時期尚早
 - 理論的にも何一つわかっておらず、直接検出など100年スケールの話なので、物理関係とは競合しない
- 逆に言えば、まだ天文観測から攻めることを正当化できる
 - 「宇宙の状態方程式を探る」とかいう受けやすいキャッチフレーズの下に、超新星サーベイ、重力レンズマッピング、高赤方偏移銀河サーベイと絡めて、数多くの計画が提案されている(特にアメリカ)

2) ダークマター探索

- 歴史的には、天文観測がダークマター存在確認に唯一すばらしい貢献(独壇場とってよい)をした
 - 逆に言えば、いまや、天文学的にできることはほぼやりつくした
- 次は直接検出をめざすべきで、すでに天文学から巢立ったと考えるべき
 - 測定技術・感度もそれなりに現実的なレベルに到達しつつある
 - 5-10年で何らかのブレイクスルーがあってもおかしくない
- 同定すれば、(素粒子)物理学に与える意義は計り知れない
 - ハイリスク・ハイリターンではあるが、個人的には大いにサポートしたい

3) もうひとつの宇宙の果て： 銀河系のどこかに生命を宿した惑星はあるのか？

■ 宇宙の果てと系外惑星



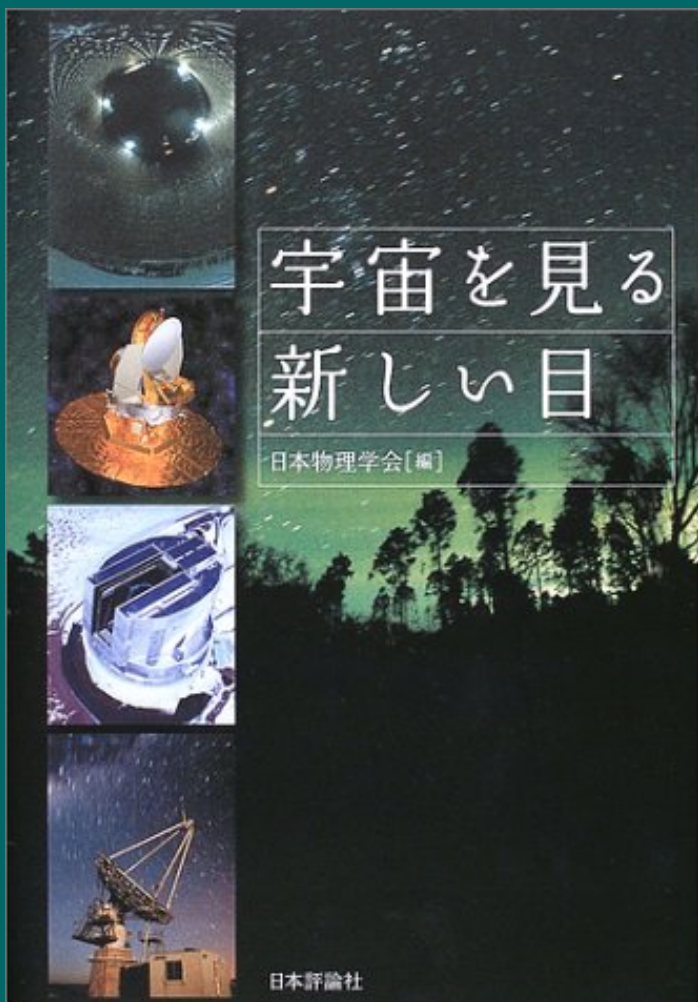
- 大望遠鏡は「暗い」天体を観測できる
 - 本当は明るいのだが遠いために暗い天体 ⇒ 宇宙の果てにある銀河
 - すぐ近くにあるのだが本当に暗い天体 ⇒ 銀河内にある系外惑星

Fermi's question

- *Where are they?*
- Enrico Fermi during a luncheon conversation at Los Alamos (1950)

「宇宙を見る新しい目」(日本評論社)

日本物理学会編:2004年3月刊



- 1章 宇宙マイクロ波背景輻射で見る宇宙...小松英一郎
- 2章 X線で見る宇宙...大橋隆哉
- 3章 ガンマ線で見る宇宙...谷森達
- 4章 重力波で見る宇宙...三尾典克
- 5章 最高エネルギー宇宙線...手嶋政廣
- 6章 コンピュータシミュレーションから見る宇宙...吉田直紀
- 7章 超新星で測る宇宙膨張とダークエネルギー...土居守
- 8章 ニュートリノと素粒子物理...梶田隆章
- 9章 超新星ニュートリノで見る宇宙...佐藤勝彦
- 10章 究極の宇宙論:太陽系外惑星探査...須藤靖**

天の世界と 地の世界

■ 古代ギリシャの4元説

- 地上: 空気、土、火、水
- 天空: エーテル(第5元素)
- アリストテレスの2世界観

■ 中国の五行説

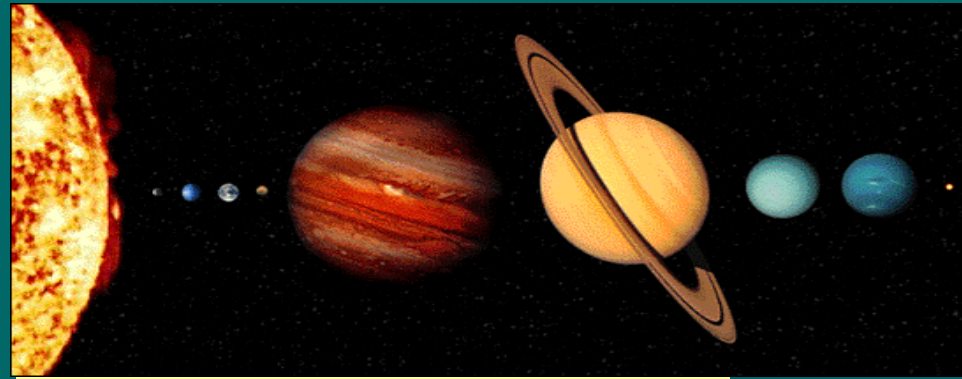
- (木、火、土、金、水) × (陽、陰)
- 甲乙 丙丁 戊己 庚辛 壬癸

■ 昔の中国では惑星の名前は物質の 起源にちなんでいる

- 中国では、地上と天空の世界の組成が
同じと信じられていた? より近代的!

■ 宇宙の起源 ⇔ 物質の起源 という考え 方は、現在の素粒子的宇宙論における もっとも基本的な出発点

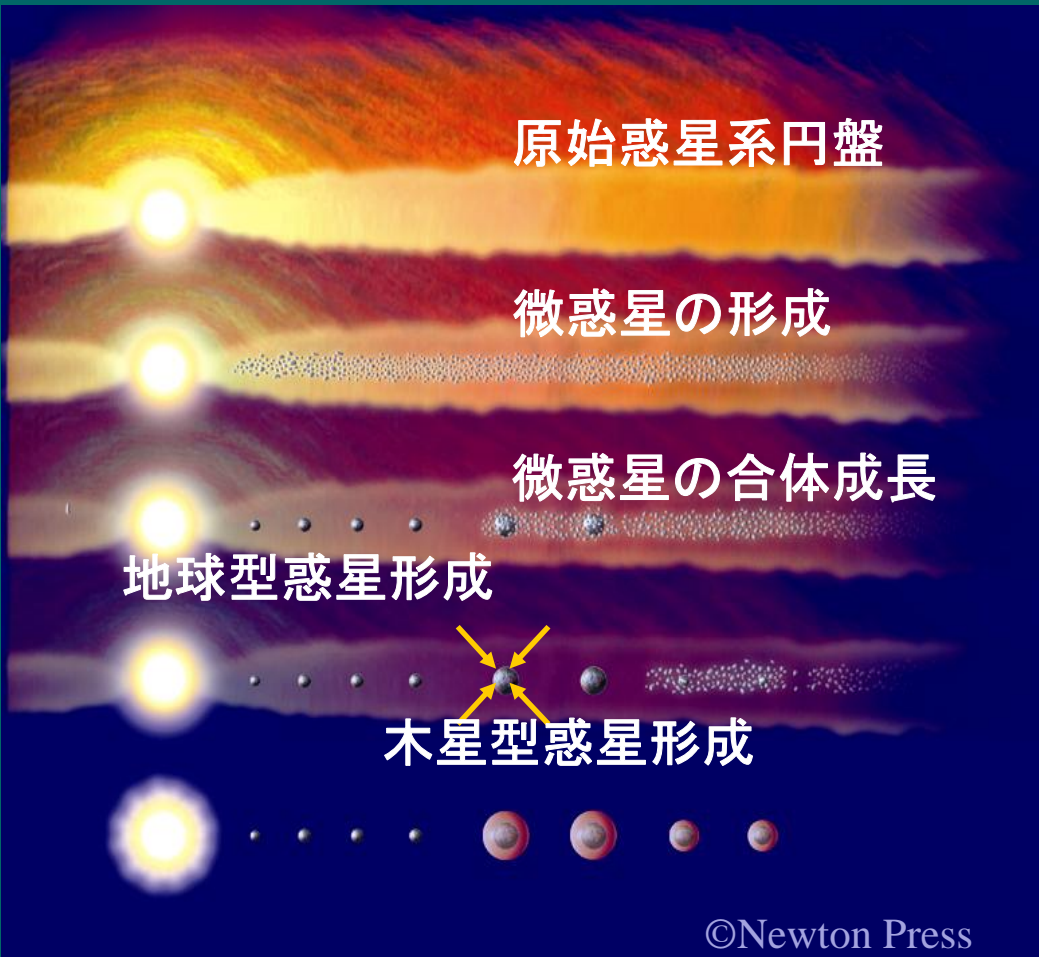
- 長岡半太郎: 原子の土星モデル



日月火水木金土



太陽系形成標準理論

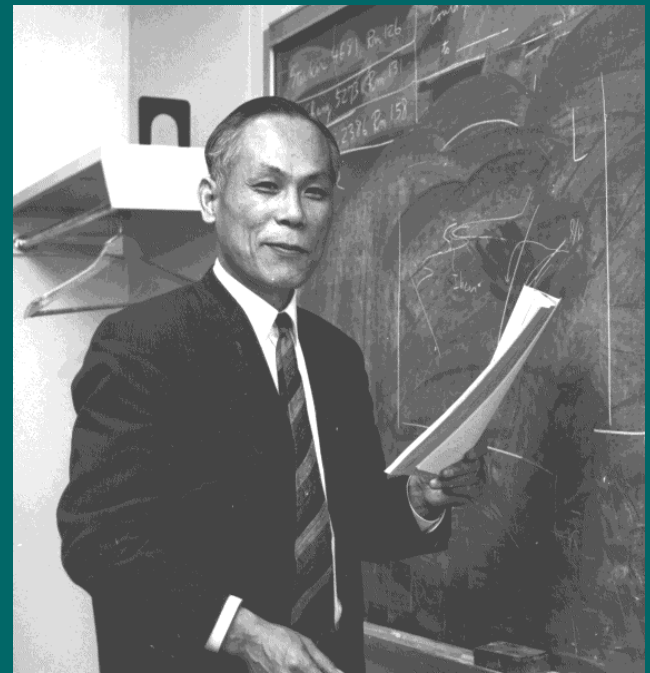


- 京都モデル
 - 林忠四郎@京都大学
天体核研究室
- 原始惑星系円盤
 - H, Heガス: 99%質量
 - 固体成分: 1%の質量
- 微惑星仮説
 - 固体成分がまず凝集
 - その後ガス成分が降着

©ニュートンプレス、井田茂@東工大

林忠四郎先生

- 1940年 東大物理学科卒業！
- 宇宙論、星の進化論、太陽系形成論においていずれも偉大な業績を成し遂げられた



- *H.Kragh "Cosmology and controversy"*

(Princeton Univ. Press, 1996)

- P.126 The assumption that the ylem consisted only of neutrons simplified the picture of the earliest universe, but it was realized that it was merely as an assumption. **In early 1950, Chushiro Hayashi of Nanikawa University in Japan reconsidered the question** and suggested that at the very high temperatures in the initial phase of the expansion, other processes than radioactive neutron decay should also be taken into account... **Hayashi was the first of the rather few physicists who took an interest** in the work of Alpher and Herman, and his contribution was important in indicating a new insight into the isotropic composition of the early universe.

George Gamow

ultra-precision cosmology

Erratum: Expanding Universe and the Origin of Elements

[Phys. Rev. 70, 572-573 (1946)]

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

THE value of the space curvature entering into the formulae (1) and (3) must be considered to be expressed not in centimeters but in the units of the selected length l . Thus estimating the radius of curvature from the expression (3) we get the value of $1.7 \times 10^{-27} (-1)^{\frac{1}{2}} \times l = 1.7 \times 10^{-27} (-1)^{\frac{1}{2}} \text{ cm}$, or about two billion imaginary light years, instead of 0.2 imaginary light year as given in the Letter to the Editor. This does not change, however, the further arguments.

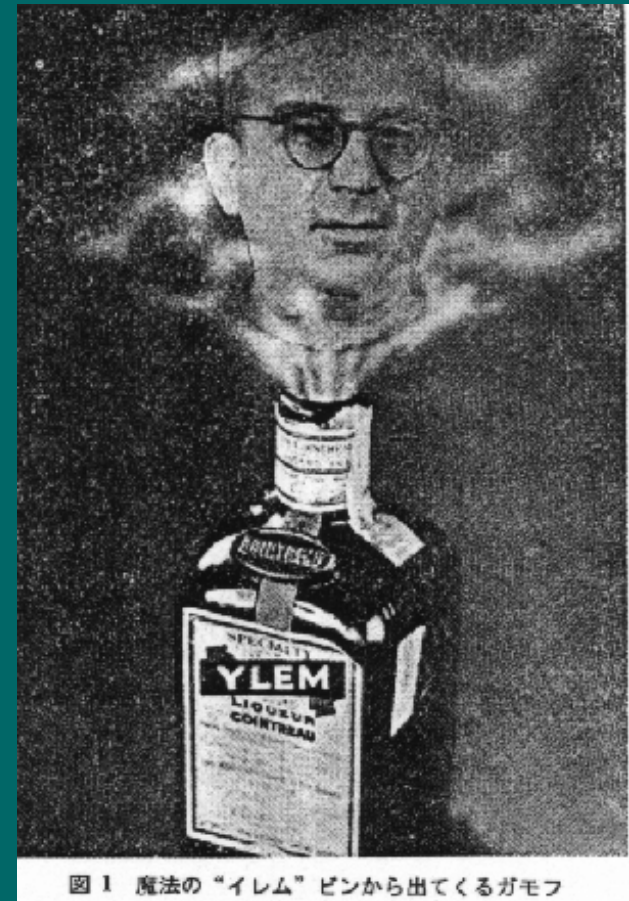


図1 魔法の“イレム”ビンから出てくるガモフ

- *H. Kragh “Cosmology and controversy”*
 - P.138 **With the exception of Hayashi, no one outside America contributed to the big-bang theory.** Furthermore, it is noteworthy that the physicists involved in the program were East Coast or Chicago physicists with, in most cases, personal connections to Gamow.

2000年11月10日
東京大学物理教室談話会

THE DETECTION AND CHARACTERIZATION
OF EXTRASOLAR PLANETS

Ed Turner

Princeton University Observatory

太陽系外惑星の発見

■ わが太陽系の拡大

- 1781年:天王星の発見
- 1846年:海王星の発見
- 1930年:冥王星の発見

■ 1995年:初めての太陽系外惑星の発見

■ 哲学から科学へ

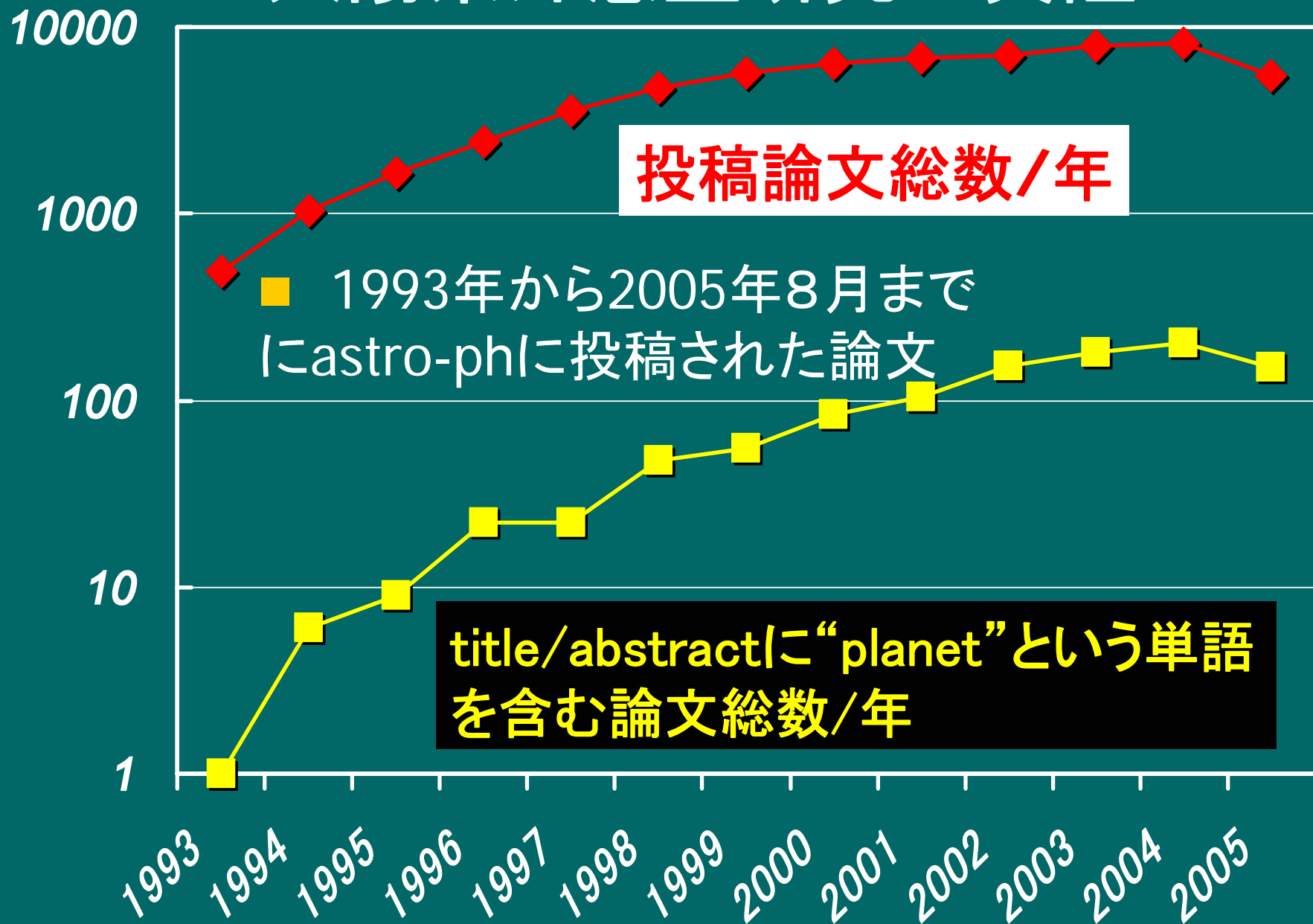
- この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在する
 - エピキュラス (紀元前341年～270年)
- 我々以外の宇宙は存在し得ない
 - アリストテレス (紀元前384年～322年)

太陽系外惑星発見の歴史

- 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:トランジット惑星大気の新検出(ナトリウム)
- 2003年:トランジット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:トランジット惑星大気中に炭素と酸素を検出
- 2004年4月:公転周期1.4日、1.7日のトランジット惑星発見
- 2005年月:6~8倍地球質量の惑星発見(地球型?)
- 2005年6月:超巨大コアを持つ灼熱惑星の新発見(佐藤文衛ほか)
- 2005年10月:惑星公転軸の傾きの発見
- 2005年8月31日時点で143個の系外惑星系(計167個の惑星)



太陽系外惑星研究の興隆



太陽系外惑星探査の方法

- 直接撮像：高角度分解能
- 主星の速度変動：高精度分光
- 主星の位置変動：高精度位置決定精度
- 主星の光度変動：高精度測光
- パルサーの信号到着時刻変動：
高時間分解能

⇒ いずれも最先端の観測技術を要する

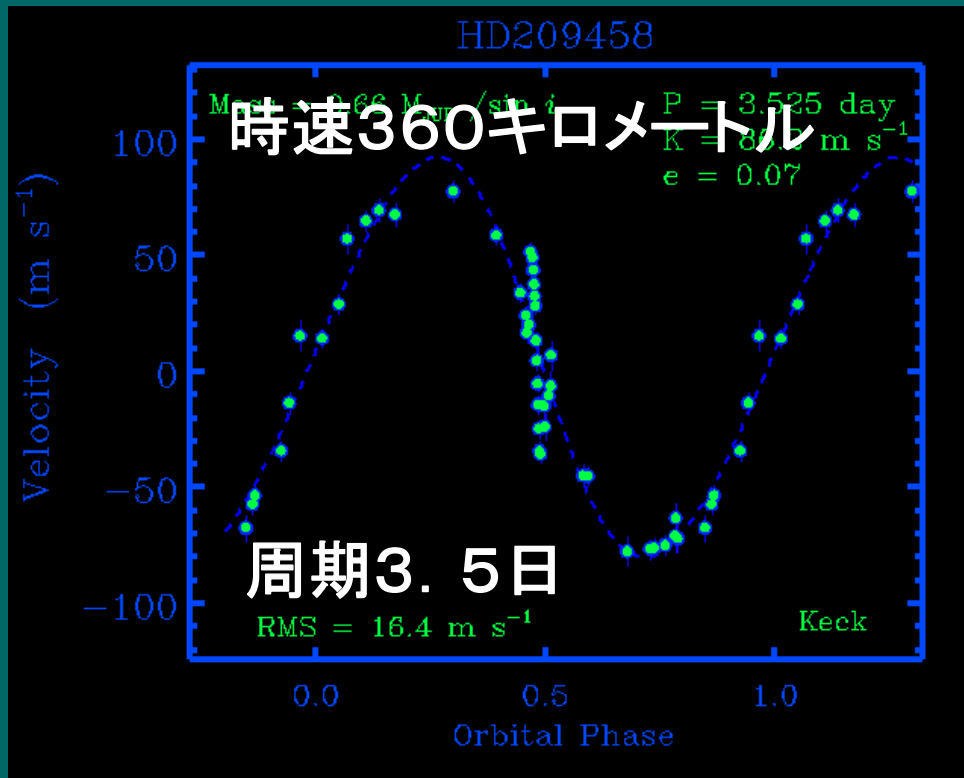
トランジット惑星とは

- **惑星系をより深く理解する手がかり**
 - 惑星の公転面がたまたま観測者の視線面と同じで、惑星が恒星の前を横切るもの
 - 2005年9月時点で、8個が知られている
 - 中心星の光度変化の観測⇒惑星のサイズ
 - 精密分光観測データ解析⇒惑星大気組成
 - **中心星の自転速度と中心星自転軸と惑星公転軸のなす角度がわかる(今回の結果)**

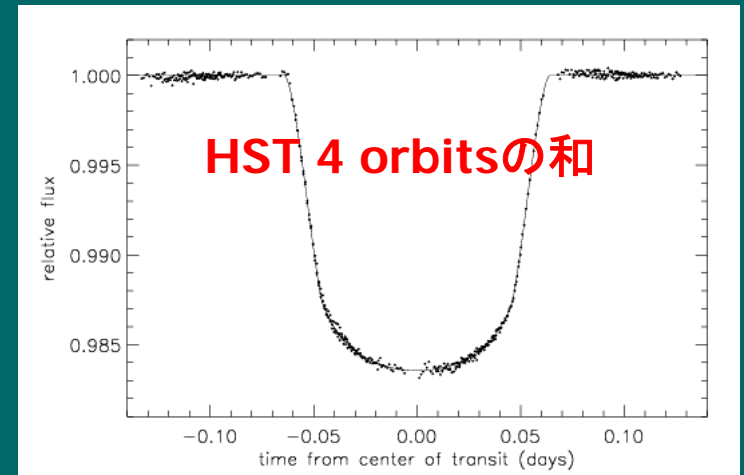
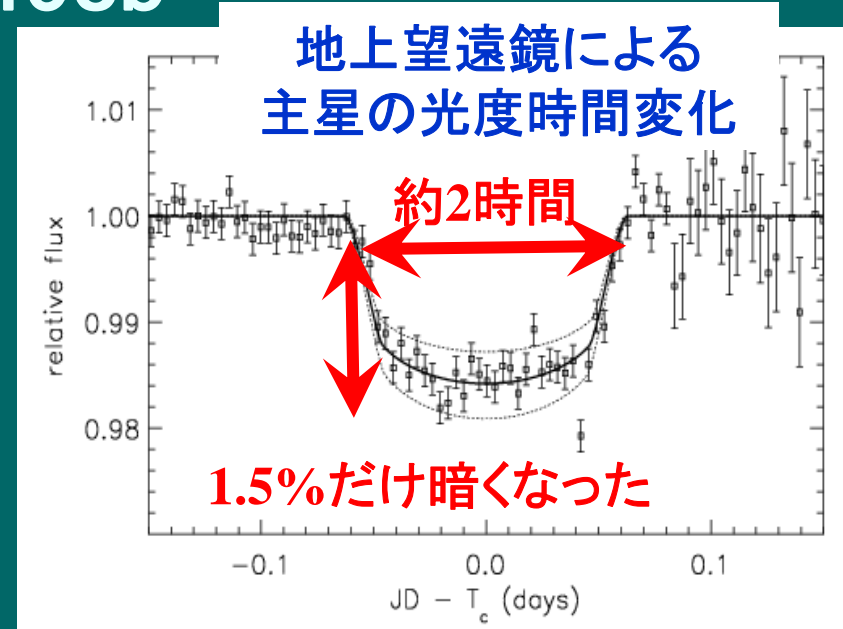


初めての太陽系外トランジット(食)惑星 HD209458b

- 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



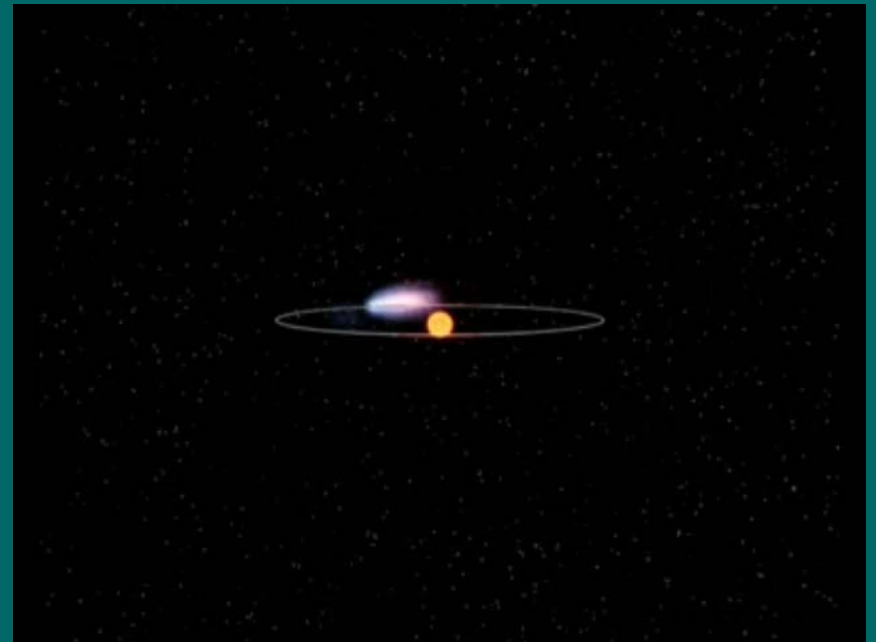
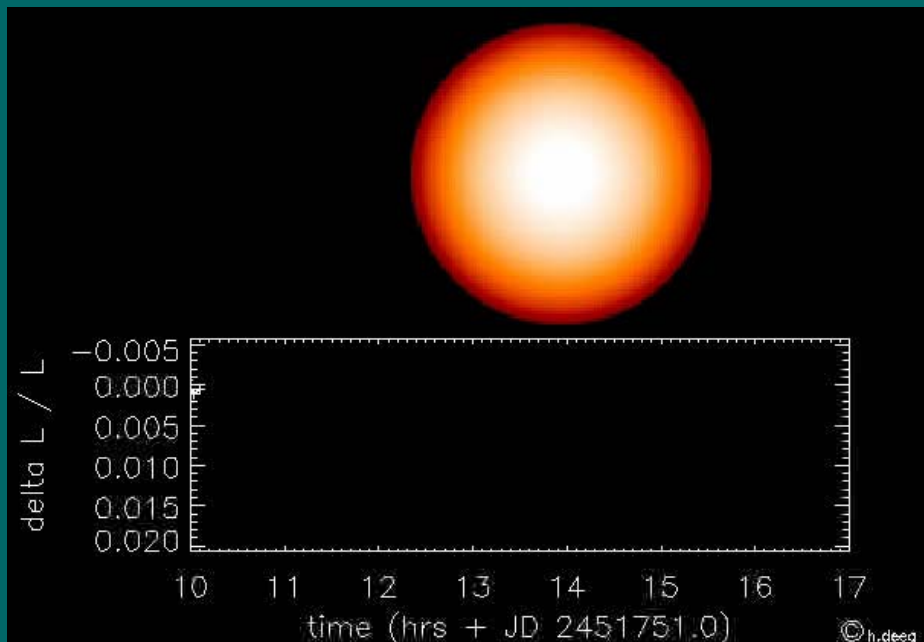
Brown et al. (2001)

トランジット惑星の重要性

- 速度変動を惑星のためとする**解釈の正当性**
- 食の光度曲線より**惑星のサイズ**がわかる
 - 速度変動データとあわせて惑星の密度がわかる
 - ガス惑星？ 地球型？
- 惑星大気による吸収より**大気組成**がわかる
- 主星の自転軸と惑星の公転軸の関係がわかる(角運動量の起源): **ロシター効果**
- **測光観測だけで系外惑星候補を選ぶことが可能**
 - 今後(より遠方)の惑星探査の有効な手段
 - 速度変動は分光観測を要するため効率が低い
 - アマチュアによる(だからこそ可能な)長期継続モニター観測によって、より外側の惑星の発見につながる可能性も

最初に発見されたトランジット惑星系: HD209458

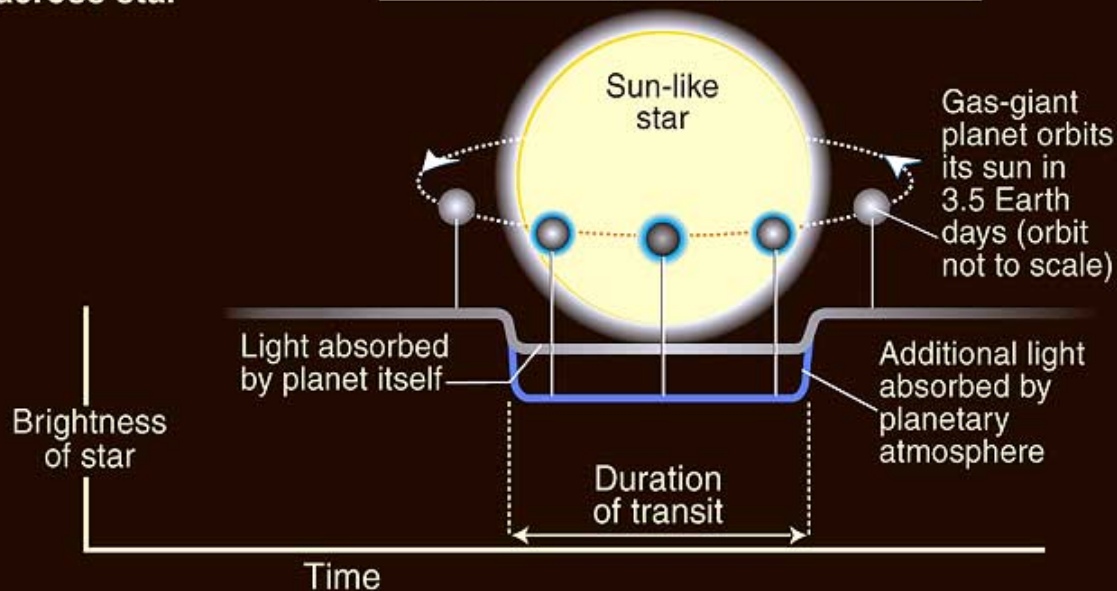
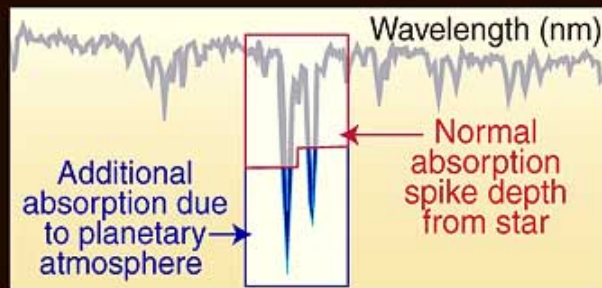
- 距離: 約150光年
- 公転周期: 3.5日
- 質量: 0.63木星質量
- 半径: 1.4木星半径
- 密度: 0.4g/cc



HD209458b 惑星大気の 初検出

[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/
2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

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



■ 2000年 系外惑星の食を初検出

- 惑星の大きさがわかる
- 木星程度の質量という観測データとあわせて密度を0.4g/ccと推定
- 巨大ガス惑星であることの確認

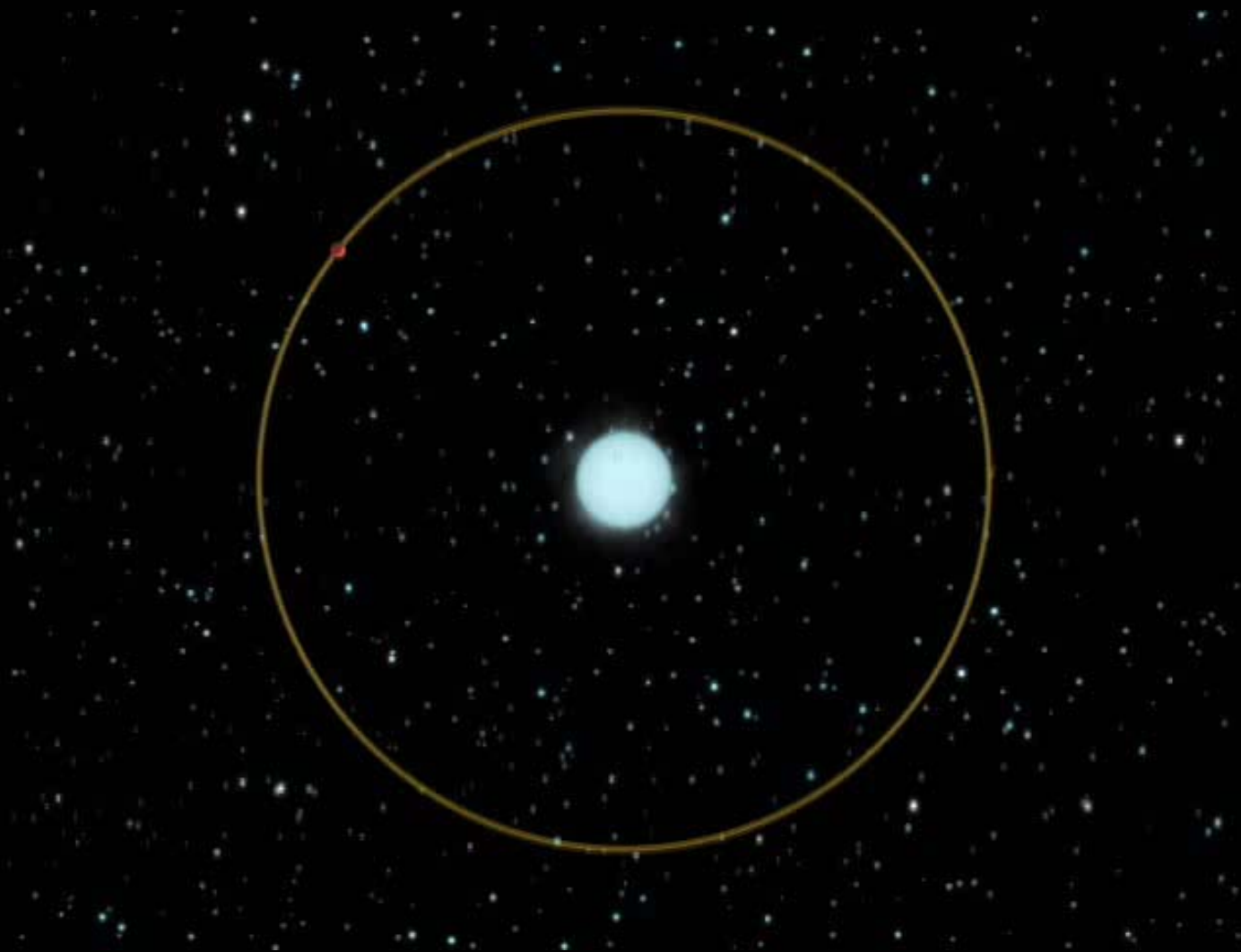
■ 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムの存在を発見

HD209458惑星系のパラメータ推定値

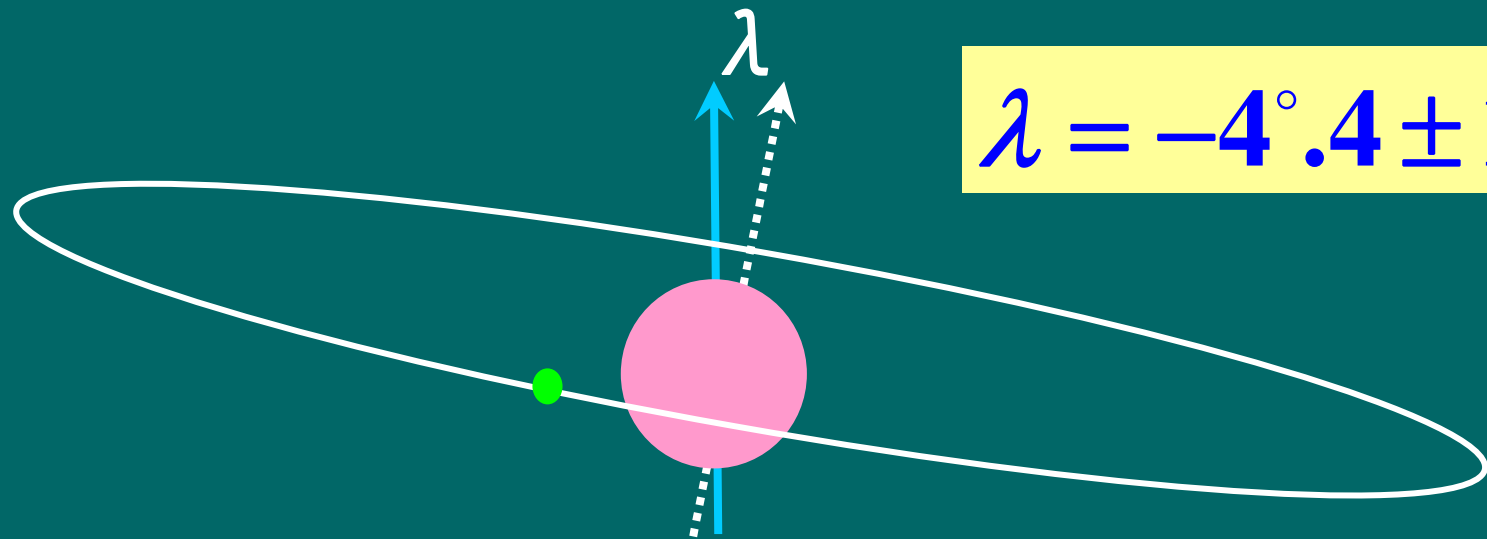
Radial velocity データ + *transit* データ

HD209458 (主星)	スペクトル型	G0V
	Vバンド等級	7.58 (距離=47pc)
	表面温度	6000度
HD209458b (惑星)	公転周期	3.52474 ± 0.00004 日
	軌道面傾斜角	86.68±0.14 度
	質量	0.63 木星質量
	半径	1.347±0.060 木星半径
	密度	0.4g/cc (< 土星密度)
	有効温度	1400度
	大気組成	ナトリウム、水素、 炭素、酸素の存在が報告

赤外線(スピッツァー衛星)で見る 主星による惑星の食



太陽系外惑星の公転軸は ちょっぴり傾いていた



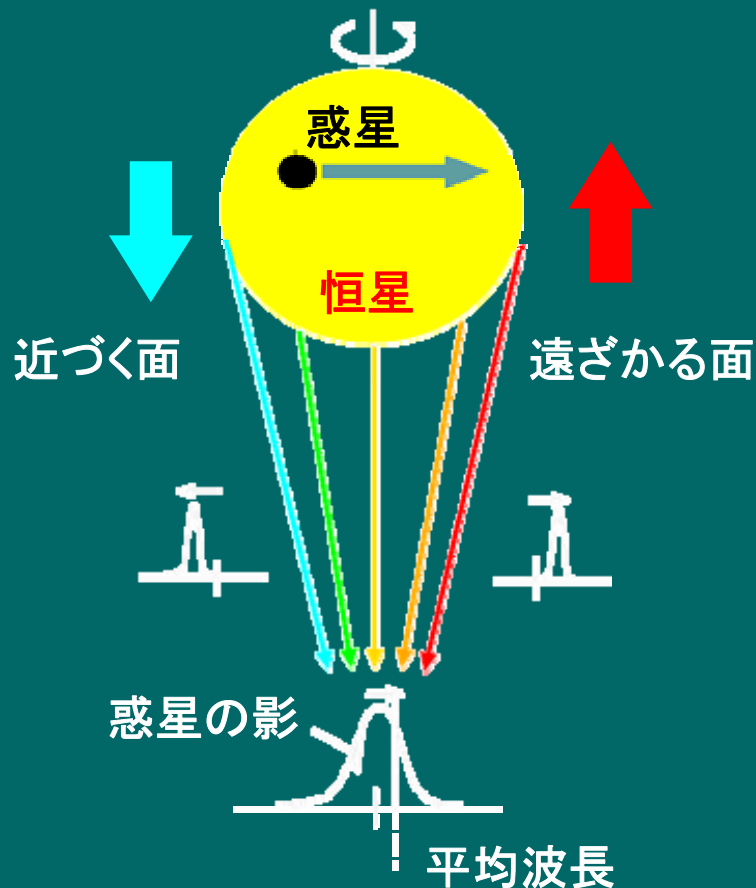
$$\lambda = -4.4 \pm 1.4$$

太陽系外トランジット惑星系 HD209458

2005年10月5日 日本天文学会秋季年会
記者発表プレゼンテーション@札幌 かでのる2・7

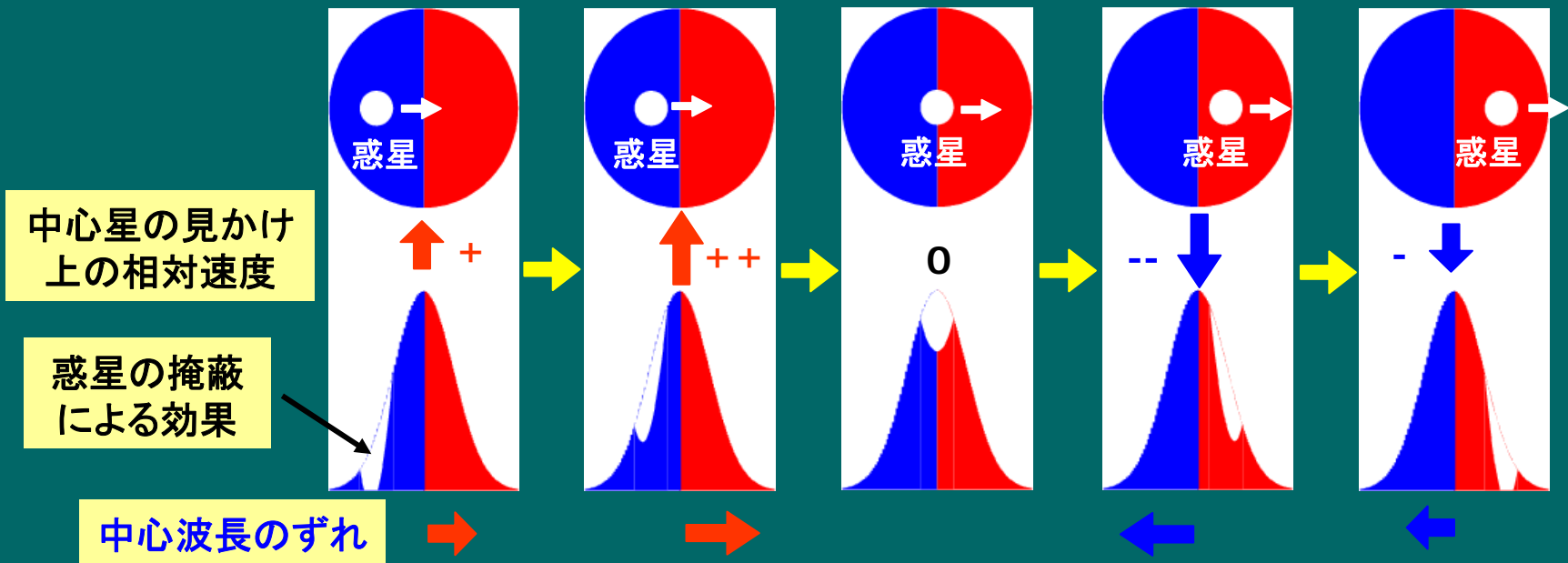
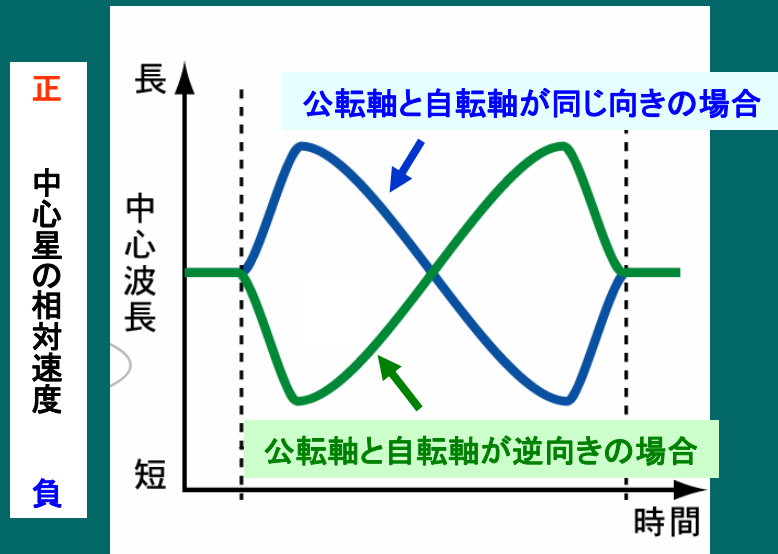
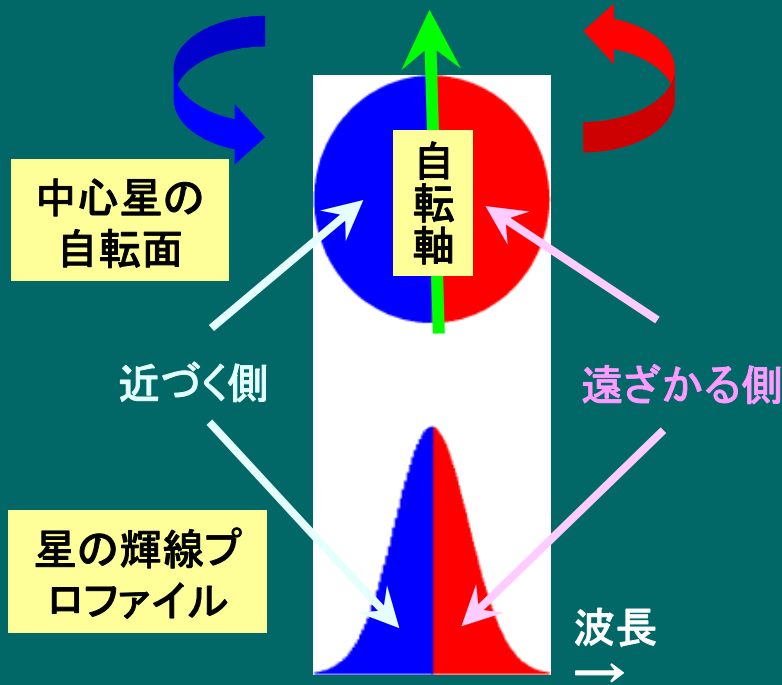
ロシター効果とはなにか

食連星において、一方の星が他方の星の一部を掩蔽することで、星の自転速度の一部が見かけ上、その星と観測者の相対速度のように見えてしまう現象
(Rossiter 1924)

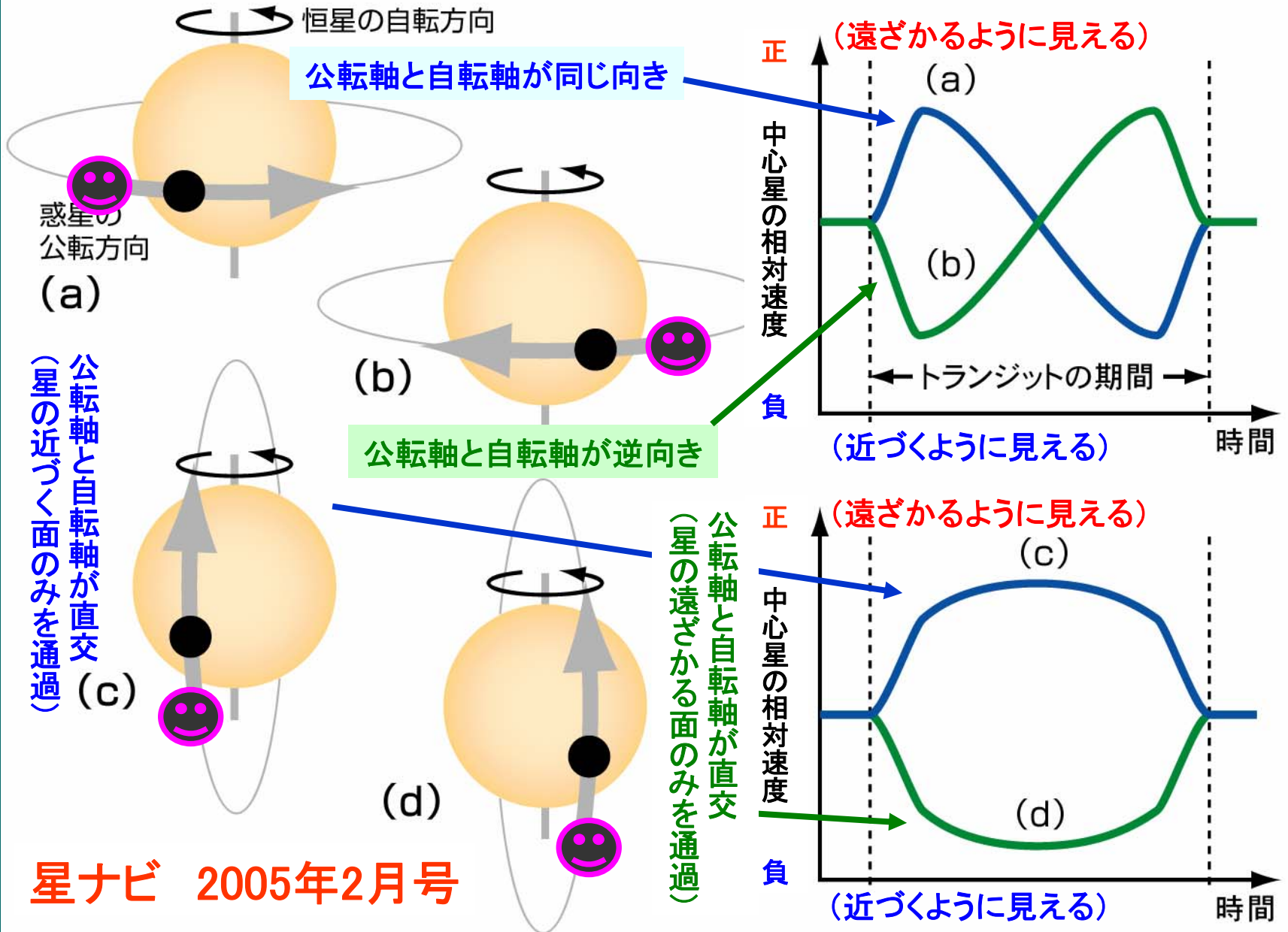


1. 恒星の自転によるドップラー効果によって、スペクトル線が広がる
2. 惑星が恒星の一部を隠すと、スペクトル線の対応する部分が欠ける
3. スペクトル線の平均的な波長がずれる

ロシター効果の観測

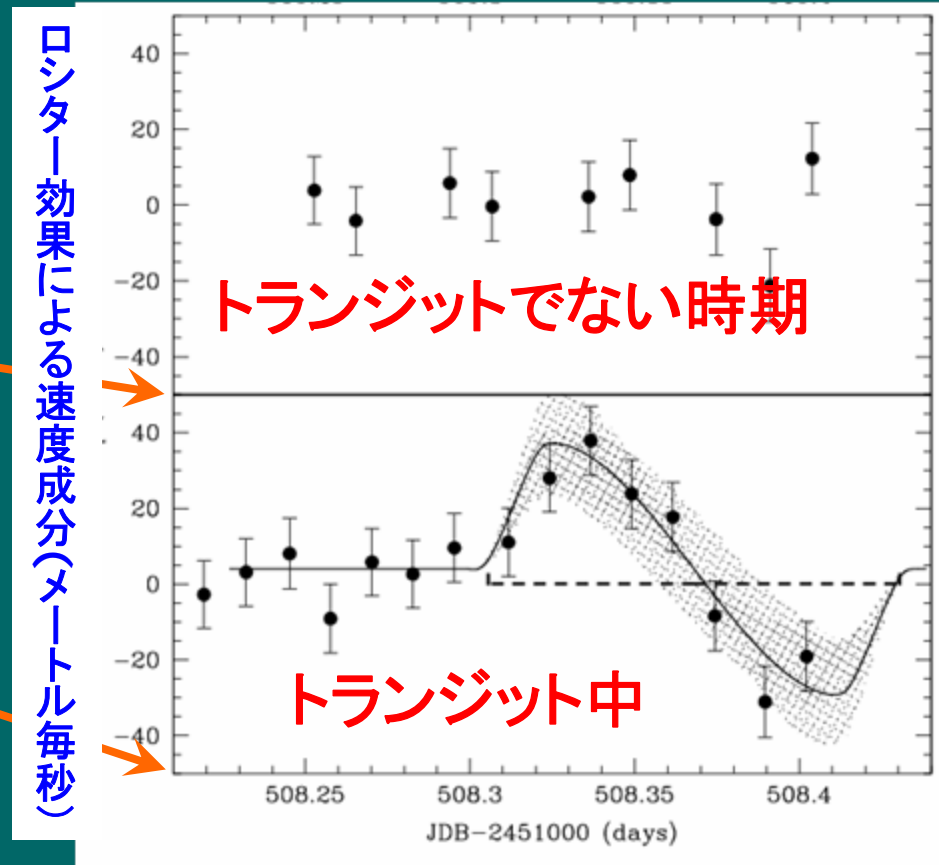
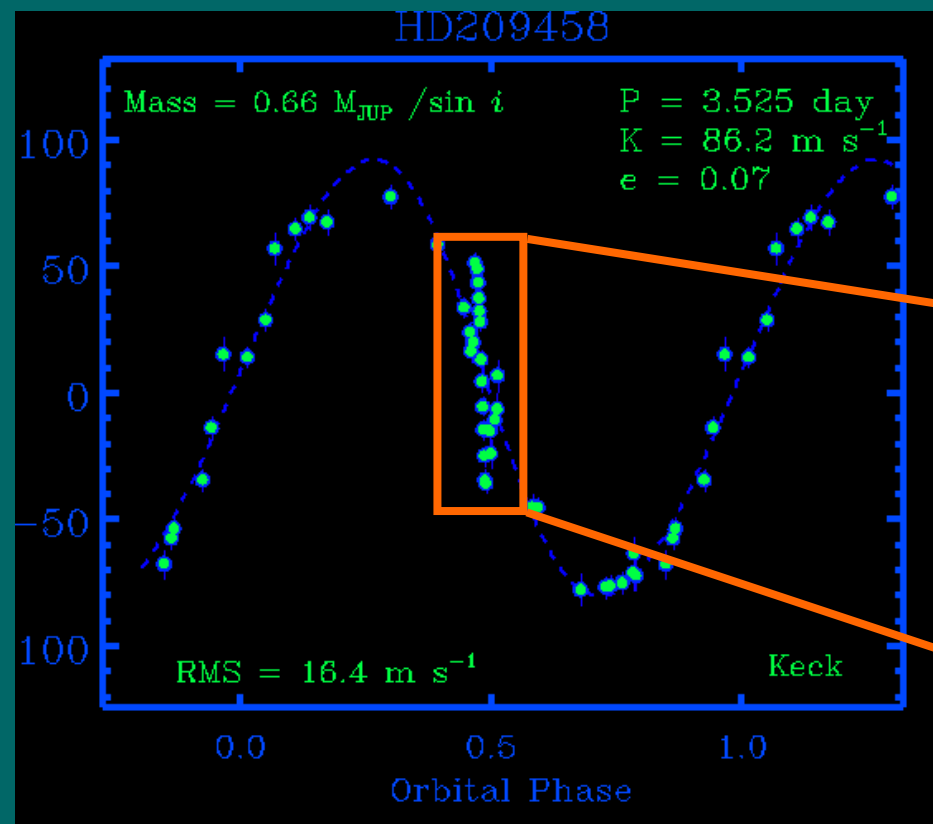


惑星の公転方向とロシター効果の関係予想図



過去の研究

- 太陽系外惑星系におけるロシター効果の初検出
- 自転軸と公転軸が $\pm 20^\circ$ の精度で同じ向きであることを発見



HD209458 の速度変動
<http://exoplanets.org/>

Queloz et al. (2000) A&A 359, L13

Measurement of Spin-Orbit Alignment in an Extrasolar Planetary System

(太陽系外惑星系における自転軸と公転軸の向き の測定)

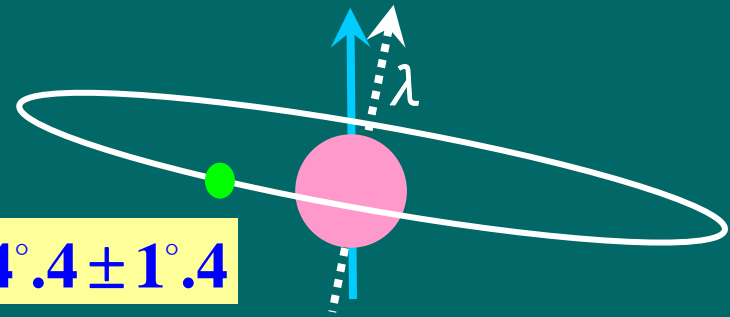
- Joshua N. Winn¹, Robert W. Noyes¹, Matthew J. Holman¹, David B. Charbonneau¹, 太田泰弘²、樽家篤史²、須藤靖²、成田憲保², Edwin L. Turner^{2,3}, John A. Johnson⁴, Geoffrey W. Marcy⁴, R. Paul Butler⁵, & Steven S. Vogt⁶
 - ¹ハーバード大学、²東京大学、³プリンストン大学、⁴カリフォルニア大学バークレー校、⁵ワシントン カーネギー研究所、⁶カリフォルニア大学サンタクルス校
- The Astrophysical Journal 631(2005)1215 (10月1日号)
- [astro-ph/0504555](https://arxiv.org/abs/astro-ph/0504555)



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 λ にして (-4.4 ± 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



パラメータフィット (HD209458)

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^{83} \left(\frac{v_{\text{obs}} - v_{\text{model}}}{\sigma_v} \right)^2 + \sum_{n=1}^{417} \left(\frac{f_{\text{obs}} - f_{\text{model}}}{\sigma_f} \right)^2 + \left(\frac{t_{2nd, \text{obs}} - t_{2nd, \text{model}}}{\sigma_t} \right)^2$$

12 の独立なパラメータ

83+417 のデータ点

自由度の数 = 83+417-12=489

ベストフィット: $\chi^2/\text{自由度}$

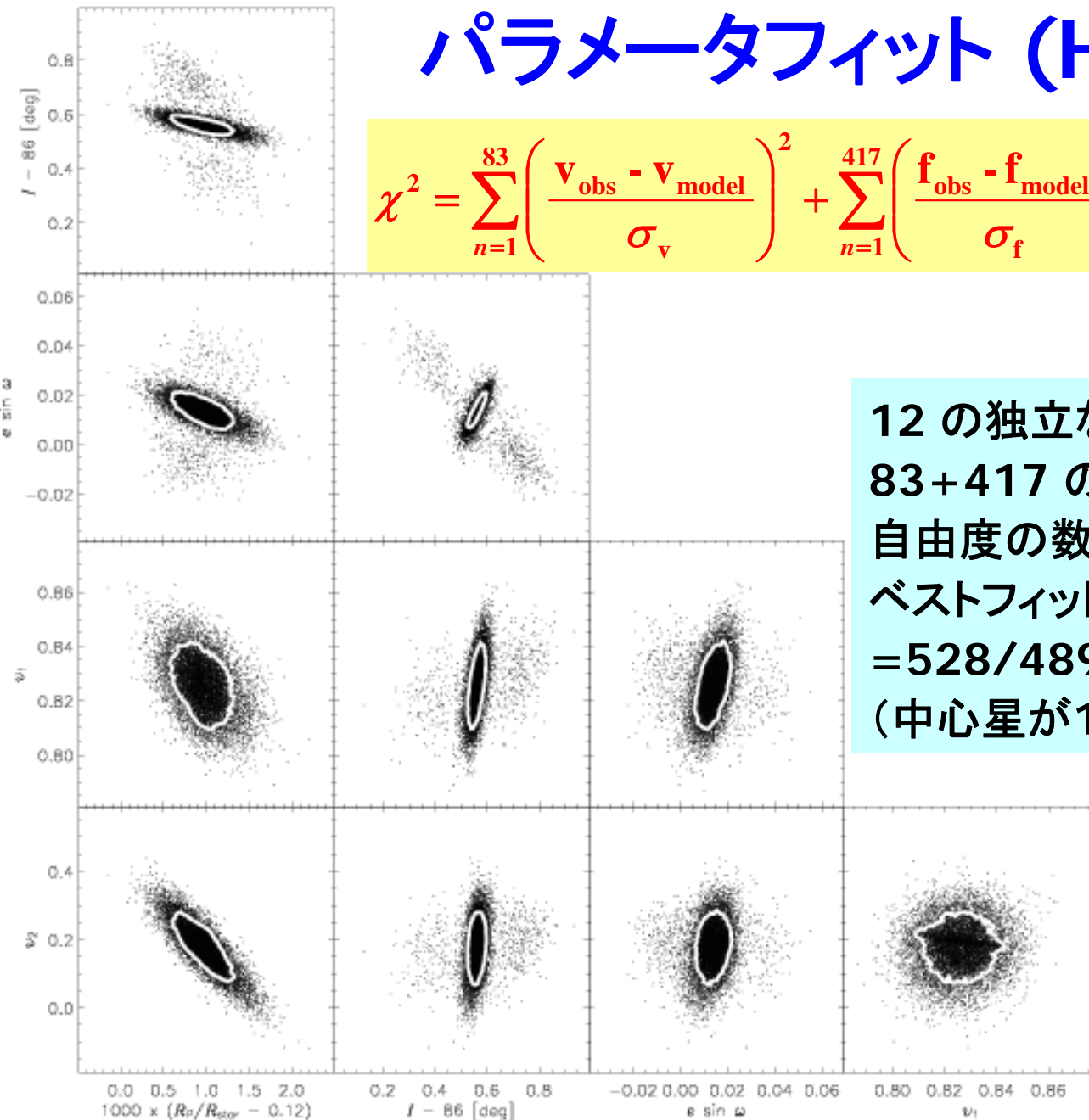
=528/489=1.08

(中心星が1.06太陽質量を仮定)

Winn et al.

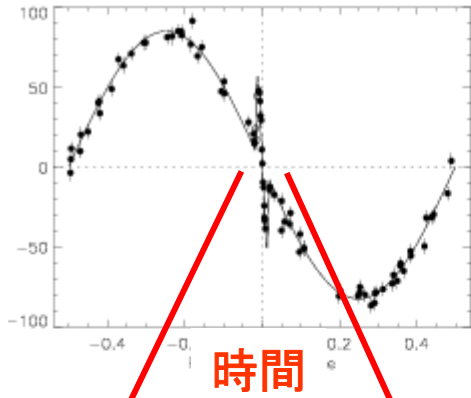
astro-ph/0504555

ApJ 631(2005)1215

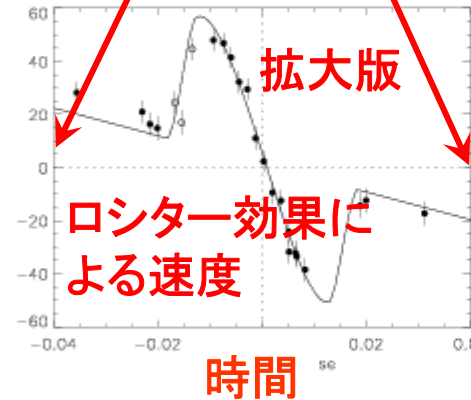


相対速度 (ケック天文台)

中心星の視線速度 [m/s]

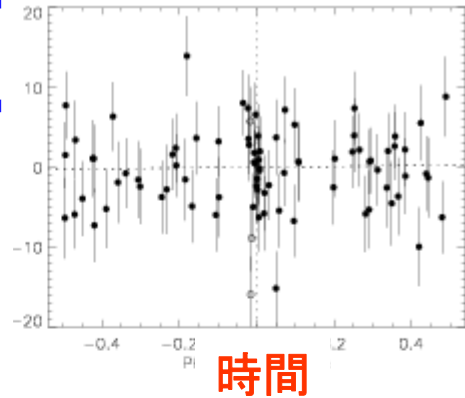


時間

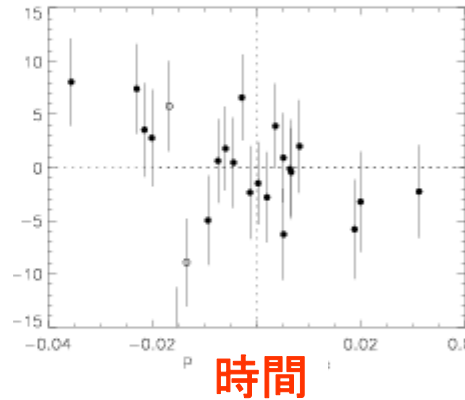


時間

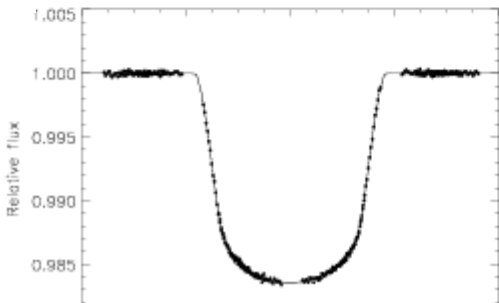
(観測データ) — (ベストフィットモデル) [m/s]



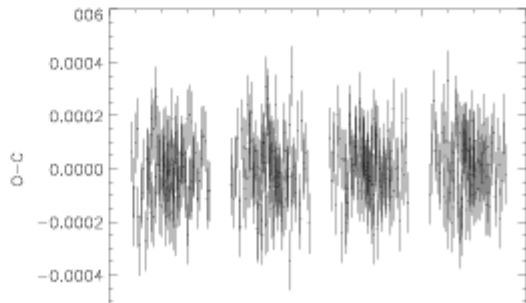
時間



時間

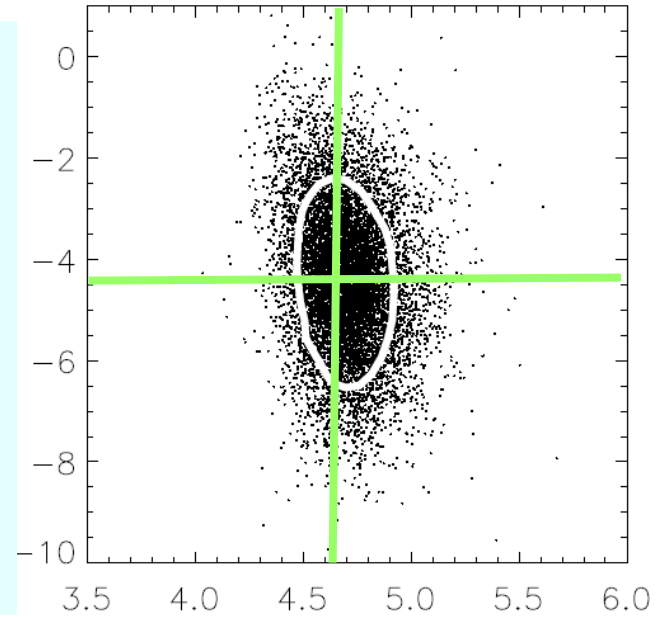


トランジット中の光度曲線 (ハッブル望遠鏡)



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]

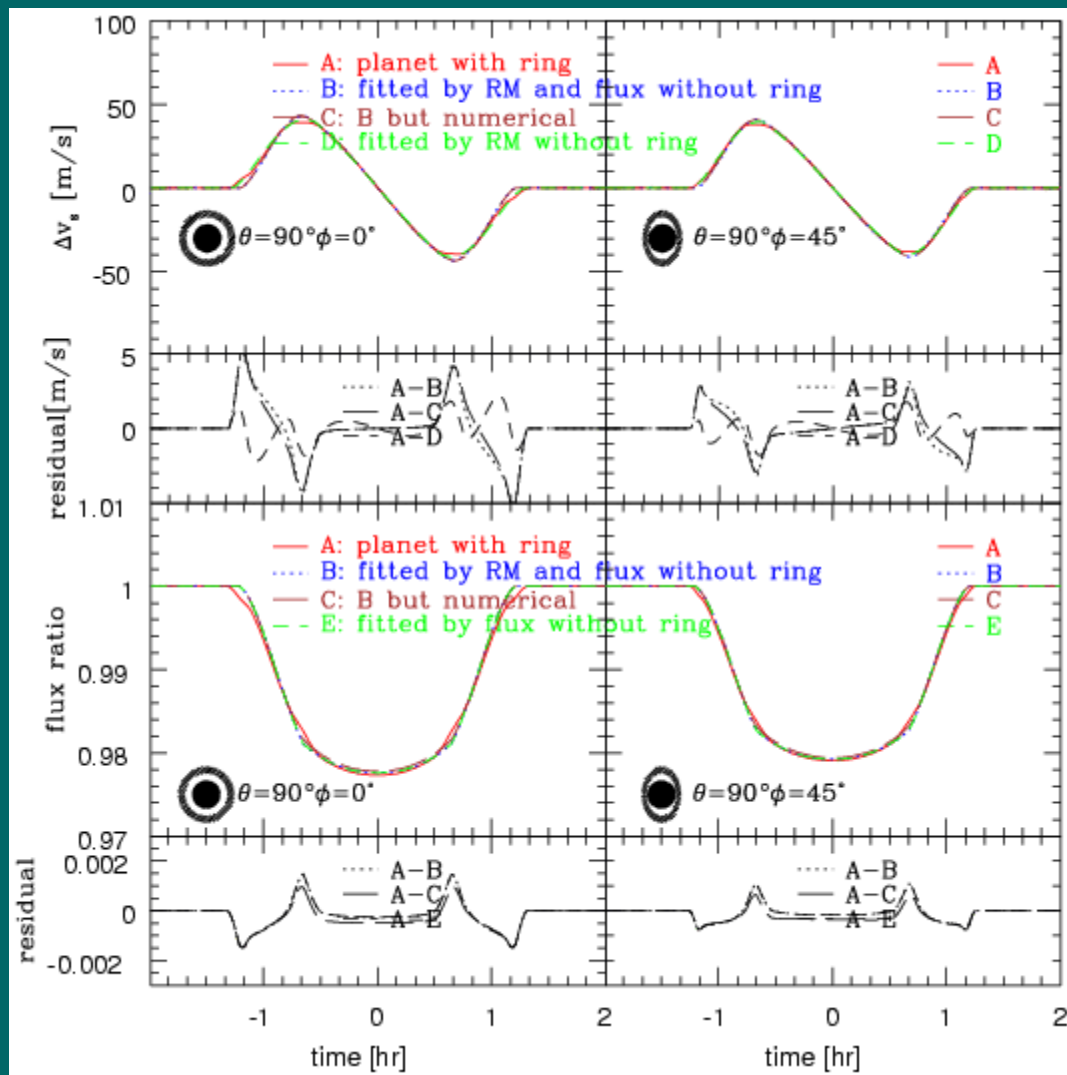
$$\lambda = -4.4 \pm 1.4$$

わずかではあるが有意に0からずれている!

系外惑星の初期条件と進化

- 太陽系外惑星系HD209458の観測データの解析から、中心星の自転軸と惑星の公転軸がわずかに4.4度だけ傾いていることを発見した
 - 1) **「史上初」** 観測精度の飛躍的進歩による成果
 - 2) **「標準モデルの検証」** 惑星は中心星の誕生とともに形成される原始惑星系円盤を起源とする
 - 3) **「新たな謎の提供」** 公転軸のわずかな傾きを説明するモデルが必要
 - 4) **「将来性」** 多くの惑星系に対して測定されれば、原始惑星系円盤内の密度分布や角運動量分布などの手がかり

ロシター効果を用いたリングの検出可能性



- トランジット惑星系の光度曲線とロシター効果の速度曲線を同時にモニターすることで惑星の周りのリングの存在を知れないか？
- $\delta v \sim$ a few m/s,
 $\delta F/F \sim 0.1\%$ 程度の変動が検出できれば土星程度のリングの有無がわかる
- 現時点で、系外惑星のリングを検出できる唯一の現実的な方法論

太田泰弘 (2005, 博士論文の予定)

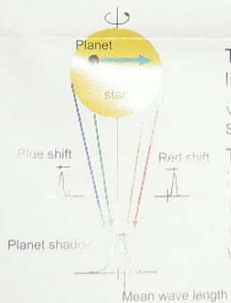
共同研究者：太田泰弘、樽家篤史

The Rossiter effect and analytic radial velocity curves for transiting extrasolar planetary systems

Yasuhiro Ohta¹, Atsushi Taruya^{1,2}, and Yasushi Suto^{1,2}

¹Department of Physics, The University of Tokyo

²RESCEU, School of Science, The University of Tokyo



The planet blocks off the light from the approaching (receding) part of the stellar surface.

This produces a dip in the stellar spectrum during the transit, leading to an anomaly of radial velocity curves.

2. Purpose

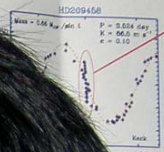
- We show analytic formulae for radial velocities of the transiting extrasolar planetary systems with the stellar limb darkening effect.

1. Introduction

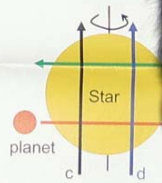
Characterization and observational method of the planetary systems

- Radial velocity measurement
 - orbital period P , eccentricity e , planetary mass $m \sin i$
- Photometry of transit
 - orbital period P , planetary inclination i , planetary radius R_p
- Radial velocity
 - The degree of orbital axis and the

Rossiter-McLaughlin



There are anomalies during the transit. This is the Rossiter-McLaughlin effect for stars.

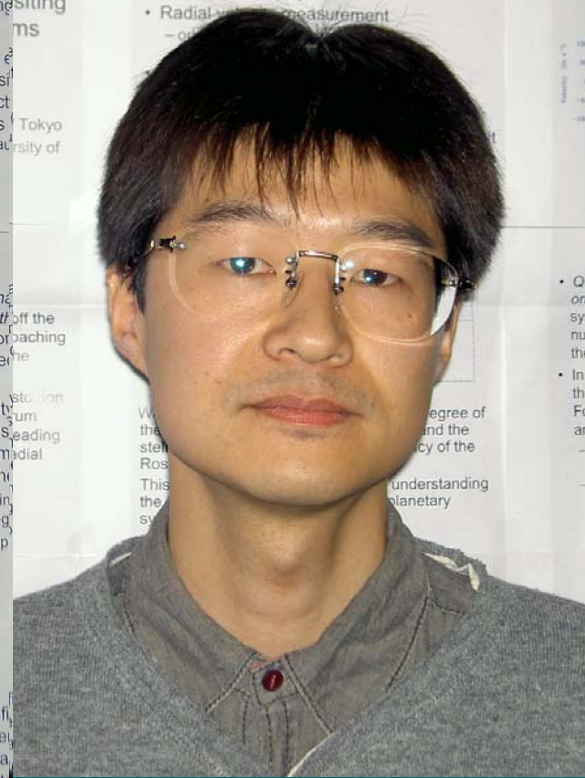


We can obtain the information of the alignment of the planet, stellar spin axis from the timing of the Rossiter-McLaughlin effect. This methodology provides the formation process of extrasolar planetary systems.

1. Introduction

Characterization and observational method of the planetary systems

- Radial velocity measurement
 - orbital period P , eccentricity e , planetary mass $m \sin i$
- Photometry of transit
 - orbital period P , planetary inclination i , planetary radius R_p
- Radial velocity
 - The degree of orbital axis and the



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**



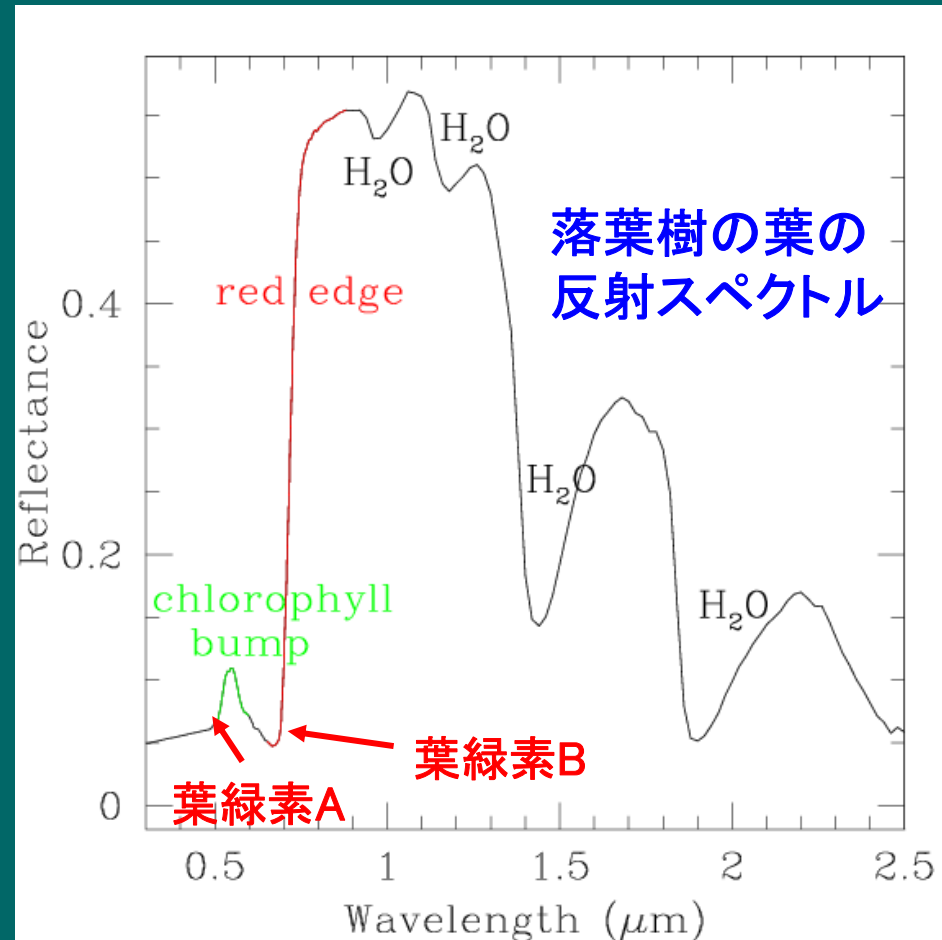
Biomarkerと地球照：我が地球を用いて「第2の地球」がどのように見えるかを予測

- 惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない
- **Biomarker** の探求
 - 植物の反射スペクトルに見られる**red edge**
- 遠くに我々の地球をおいたとき、分光観測からその特徴を同定できるか？
 - **地球照**
- 衛星による分光測光観測の可能性を探る

植物の反射率とバイオマーカー

■ 植物のレッドエッジ

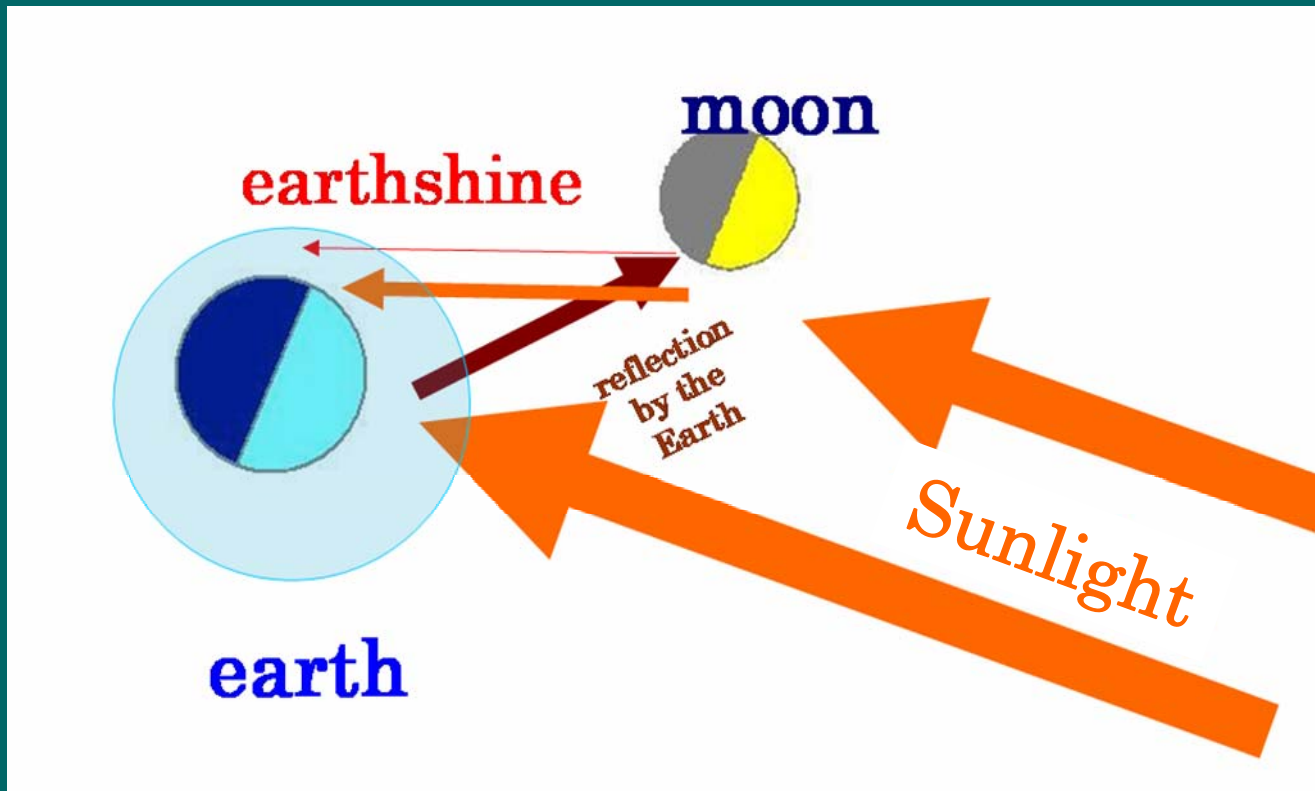
- (地上の)植物は赤外線に近い波長でまばゆく輝いている(反射率が急激に増大)
- これを太陽系外惑星に生命(植物)があるかどうかの判定に利用できないか？



Seager, Ford & Turner
astro-ph/0210277

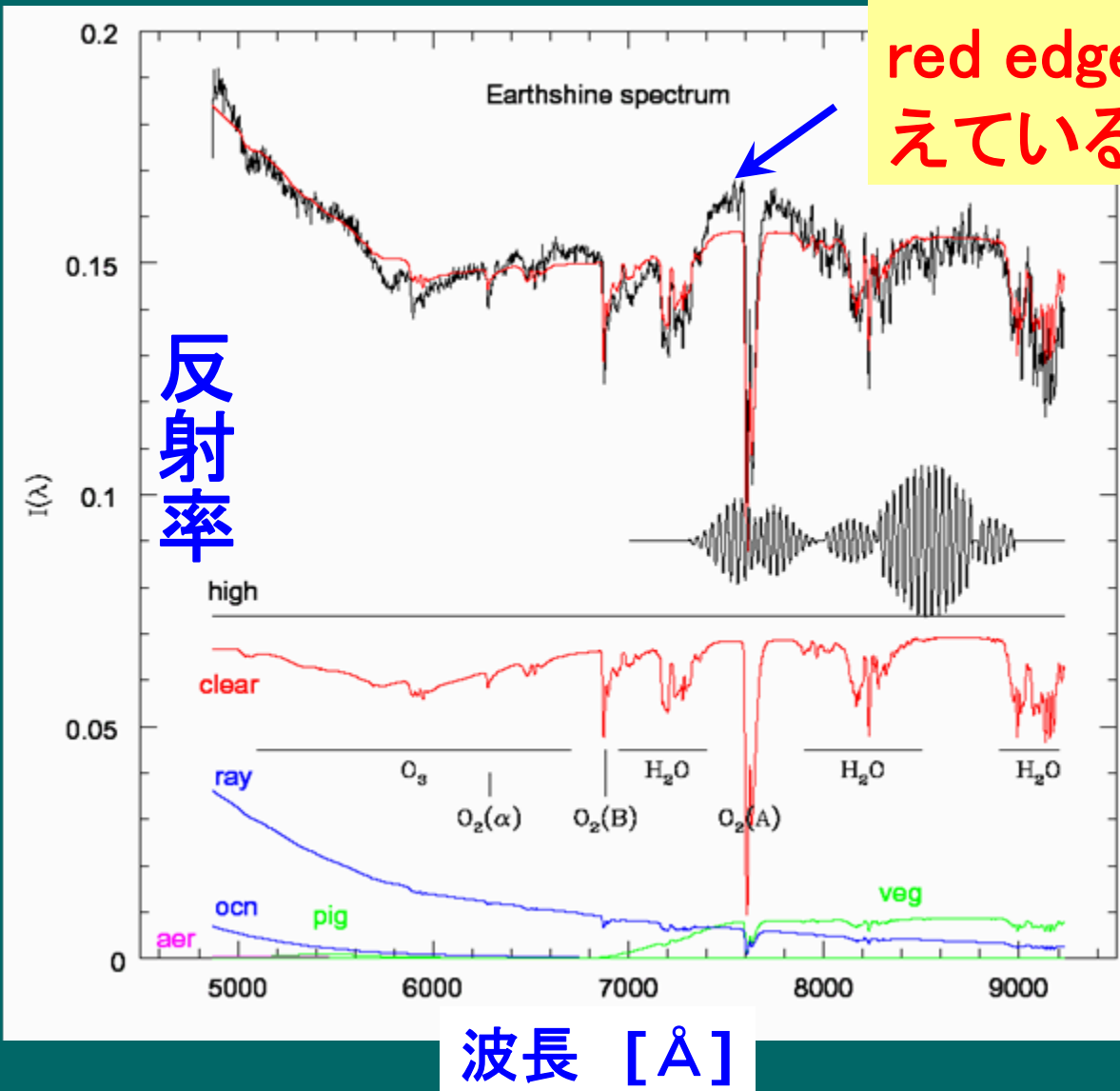
地球照観測

- 月の暗い部分の分光観測をして、地球からの反射光中のred edgeが検出できるか？
- 遠方の、第2の地球の分光観測の模擬実験



地球照分光観測の例

red-edge in a pale blue dot ?



Woolf & Smith
ApJ 574 (2002) 430
"The spectrum
of earthshine:
A Pale Blue
Dot Observed
from the
Ground"

Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “spiral nebulae”（今で言う銀河）の赤方偏移を発見
- ハッブルによる宇宙膨張の発見に本質的寄与

“Observations of Mars in 1924 made
at the Lowell Observatory: II
spectrum observations of Mars”

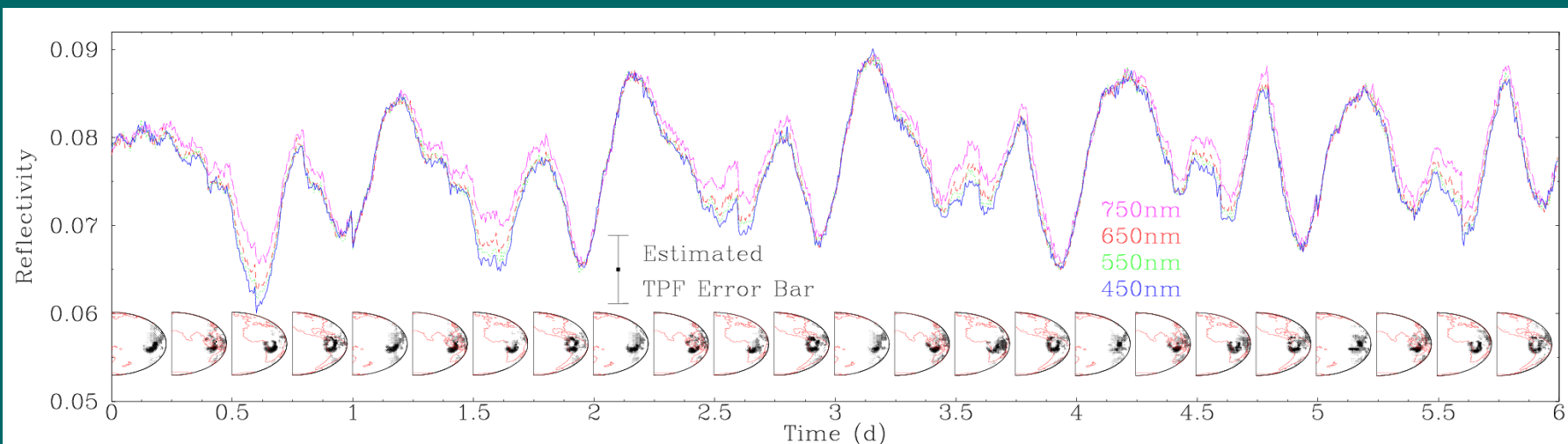
PASP 36(1924)261



reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

1924年にすでに宇宙生物学は存在

地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？

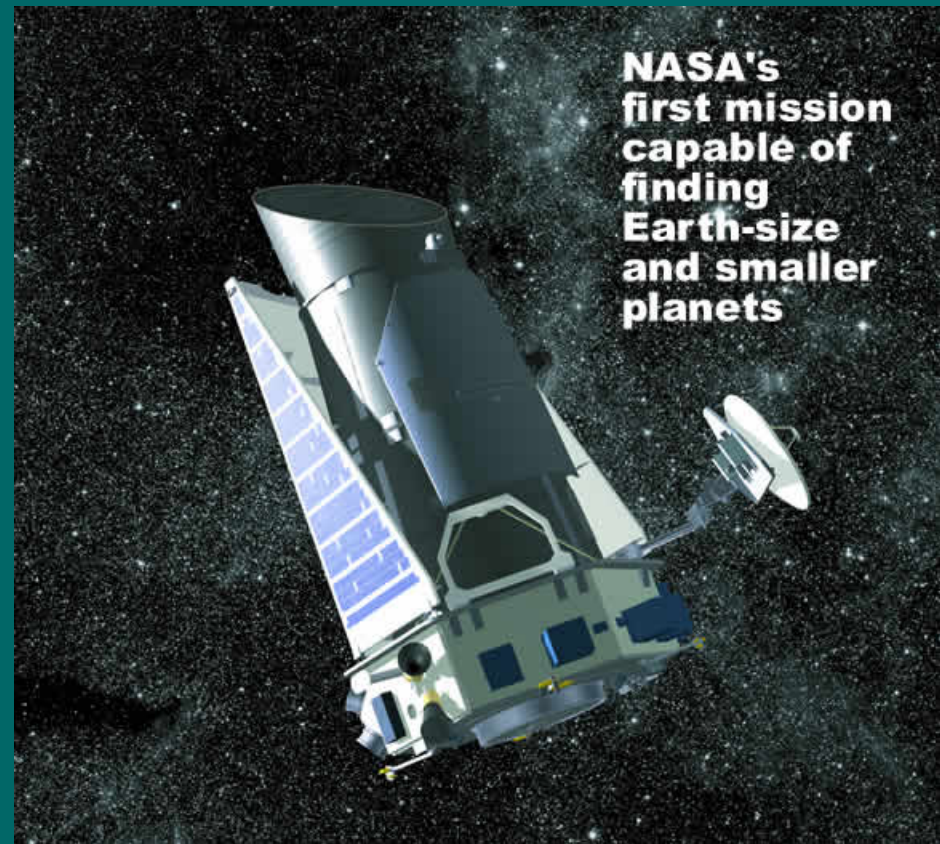
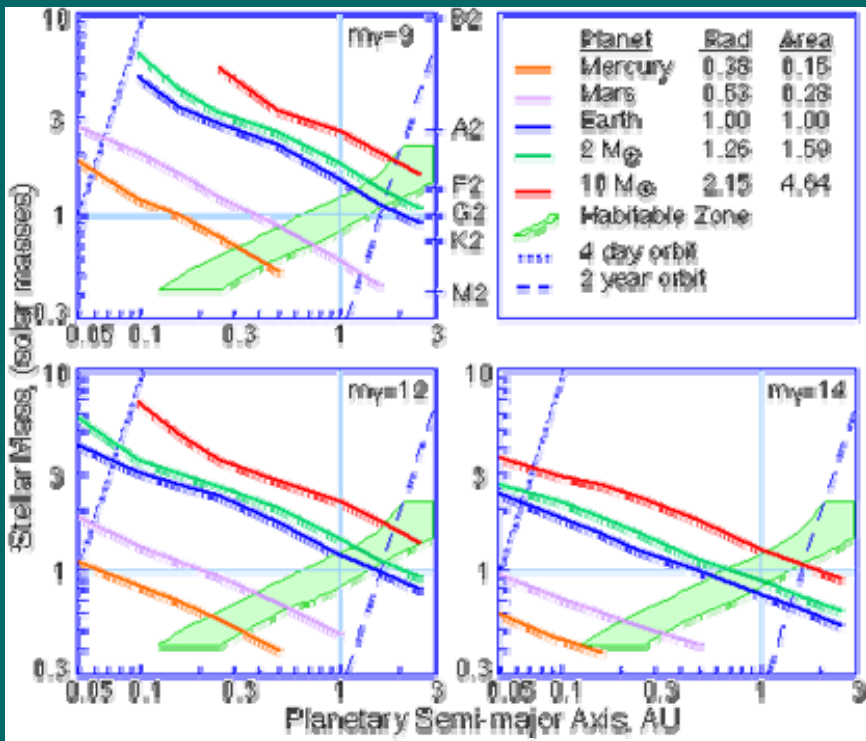


Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

- **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/>

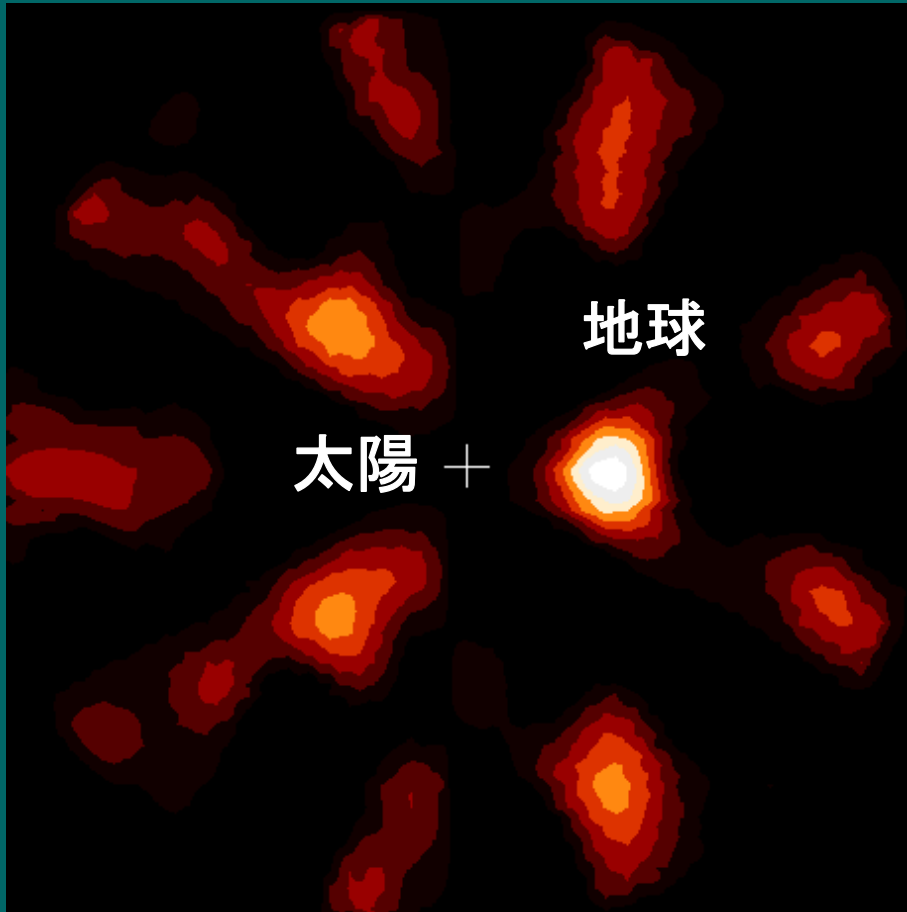
ケプラー衛星が何を見るか



ダーウィン衛星

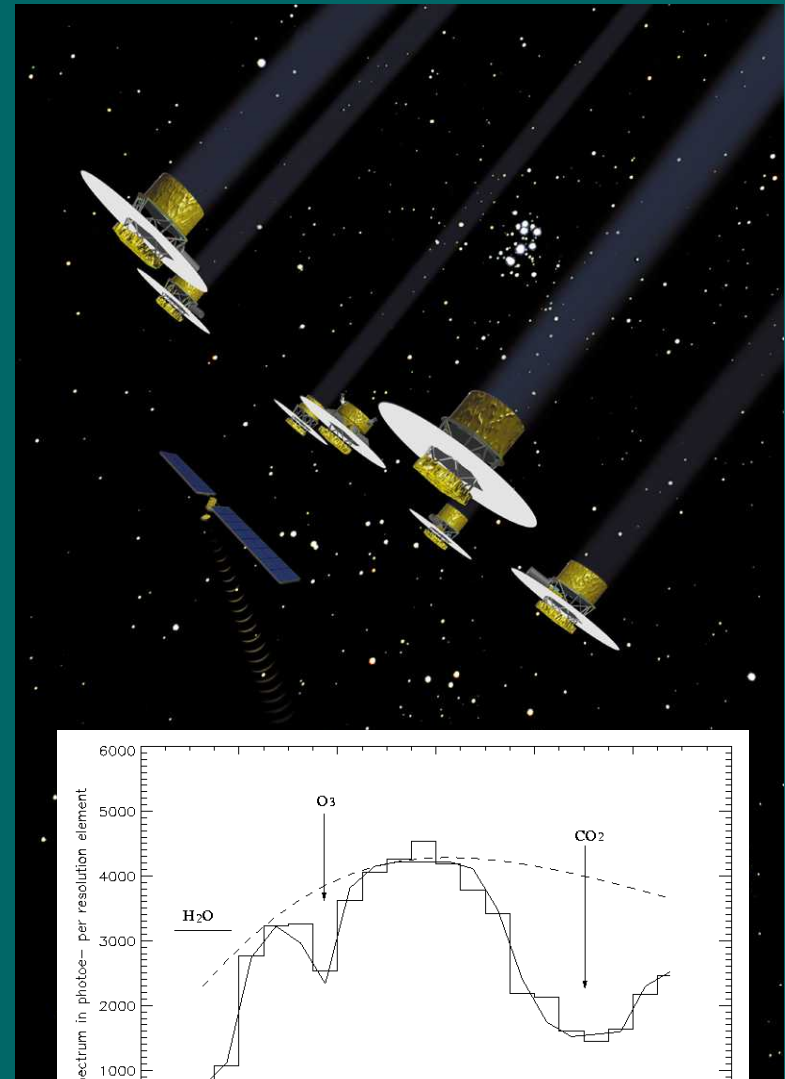
(欧州：2020年頃？打ち上げ)

赤外線での惑星の直接撮像を目指す



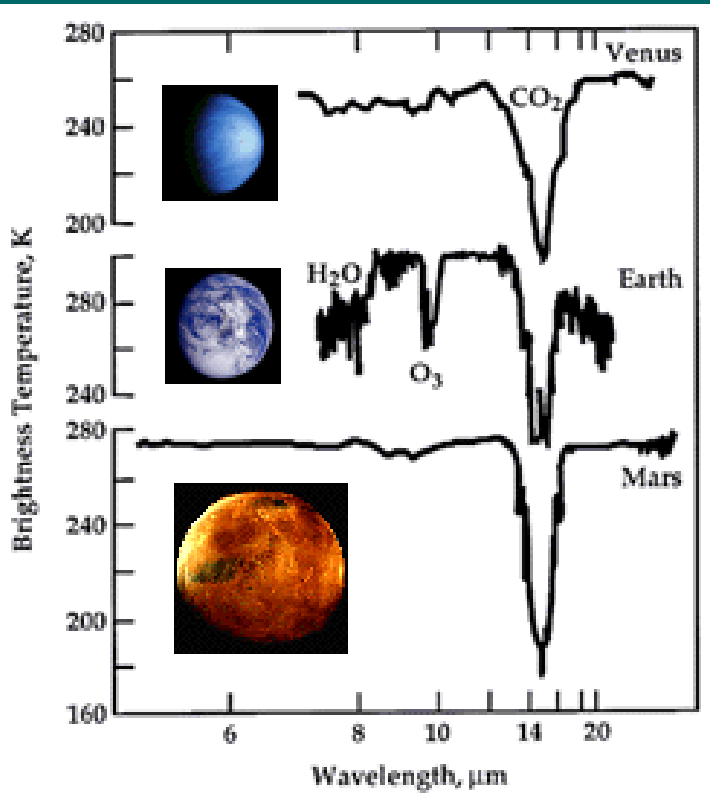
30光年先においた太陽と地球の観測予想図

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



宇宙赤外線干渉計群
測光分光観測

太陽系外惑星研究： 今後の10年 “天文学から宇宙生物学へ”



- 木星型ガス惑星： 発見の時代から“characterization”の時代へ
 - 起源、形成、進化の基礎モデル構築
- 地球型惑星の発見へ
- 居住可能惑星の発見へ
 - 水が液体として存在する惑星
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを中心星から分離する

直接見てくることができない距離にある惑星に生物が存在するかどうかを天文観測だけで検証できるか？ Biomarker を特定できるか？