

夜空のむこう

—宇宙の果てから太陽系外惑星へ—

理学系研究科 物理学専攻

須藤 靖



2006年5月28日 公開講座

東京大学^{第79回}五月祭
- The University of Tokyo, 79th May Festival -

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2006j.html

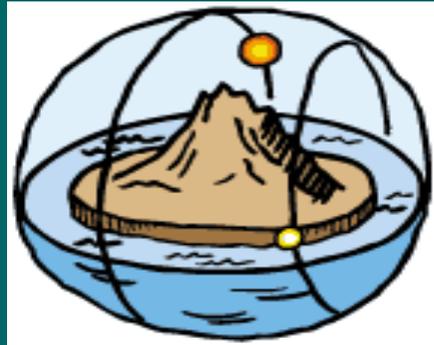
夜空のむこうの世界

■ 宇宙の果てには何がある？

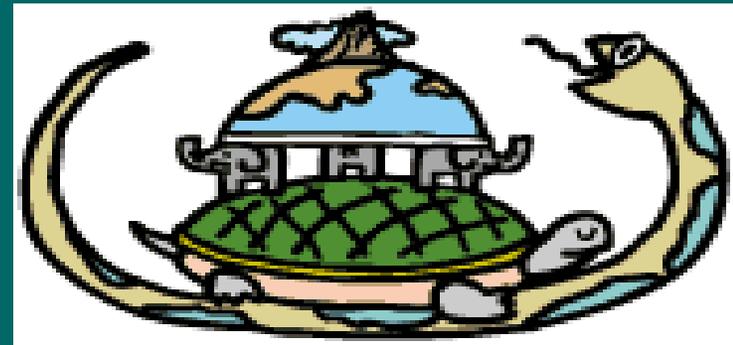
古代エジプトの宇宙像



古代中国の宇宙像



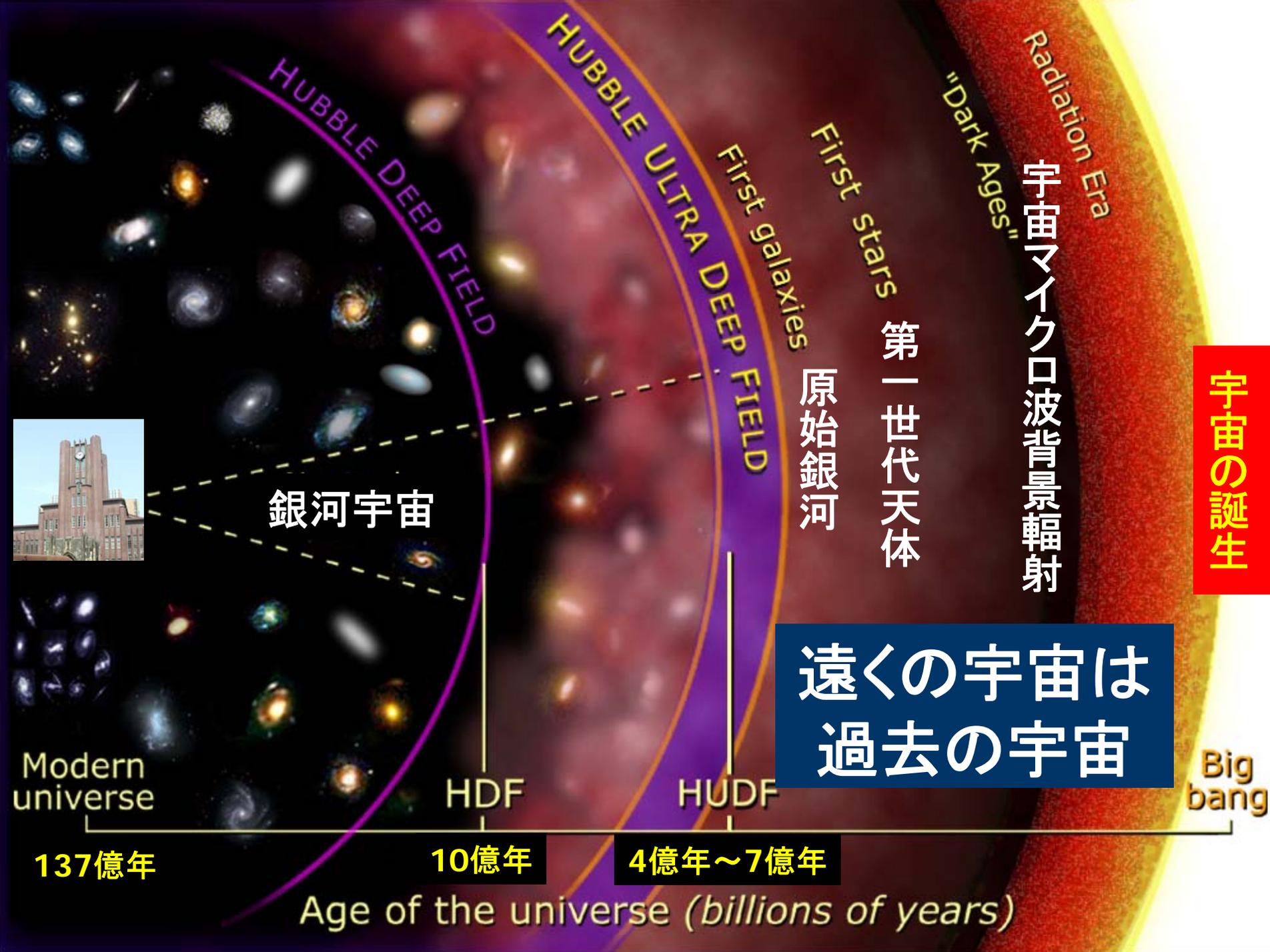
古代インドの宇宙像



<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

Radiation Era
"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

137億年

10億年

4億年~7億年

Age of the universe (billions of years)

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



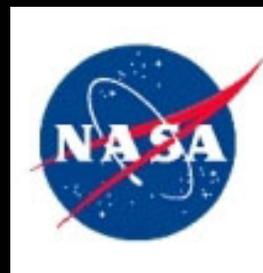
NHK教育TV “サイエンスゼロ” 2003年6月11日放映



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/>

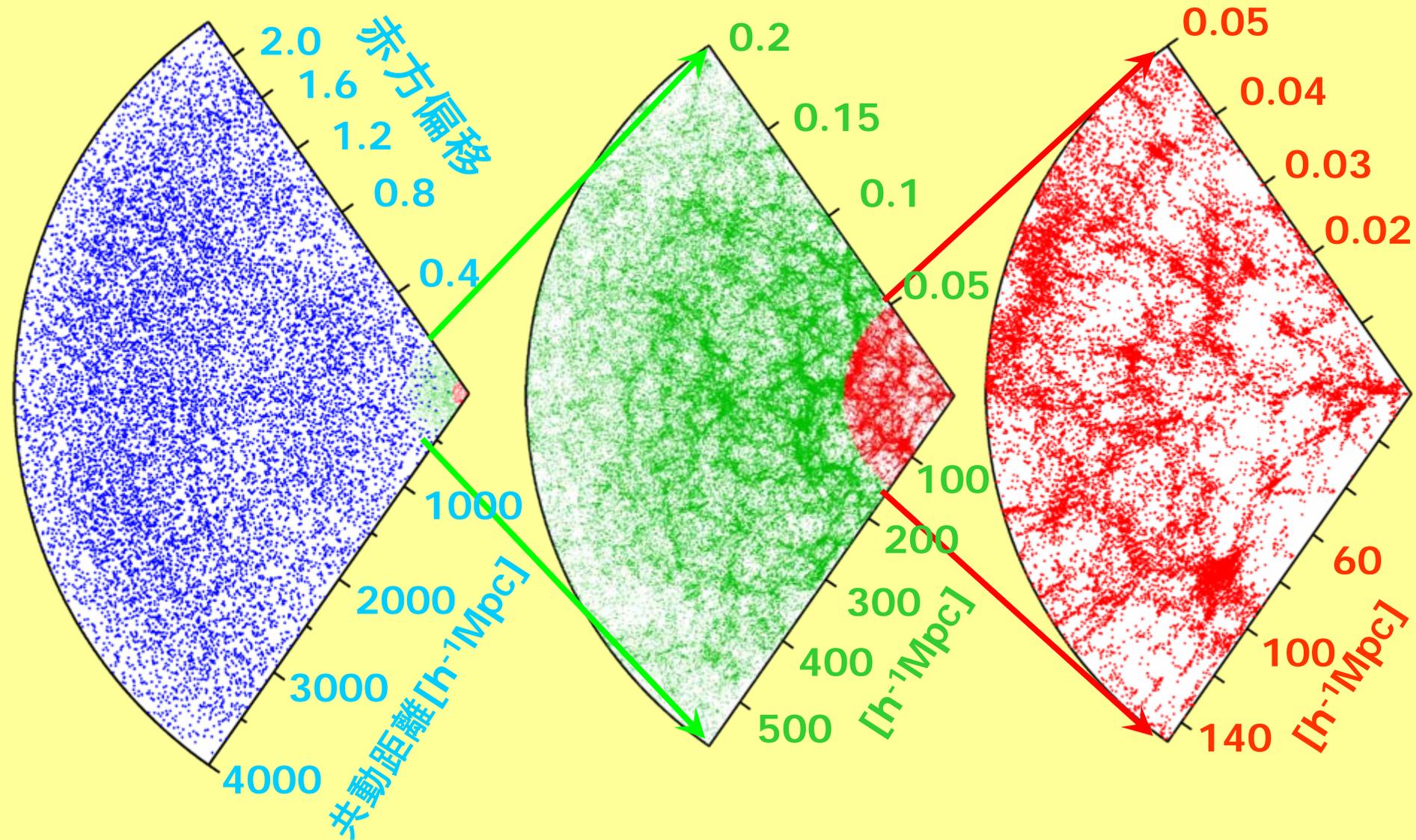


文部科学省

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

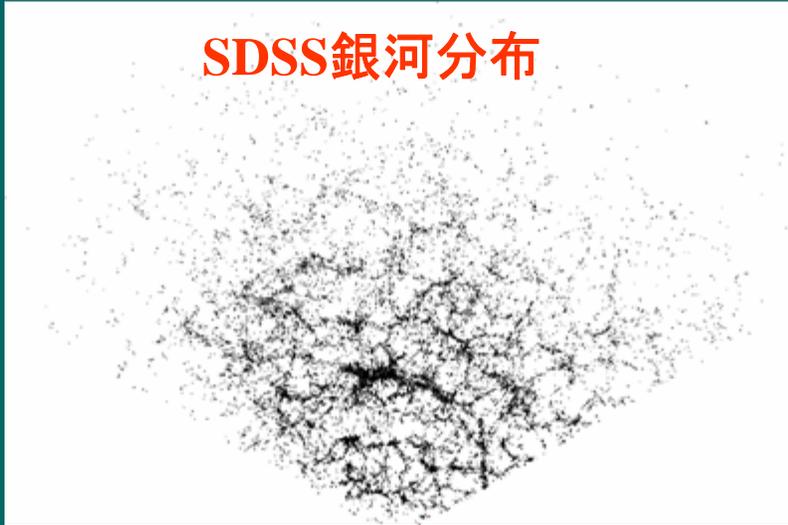
SDSSクエーサーと銀河の宇宙地図



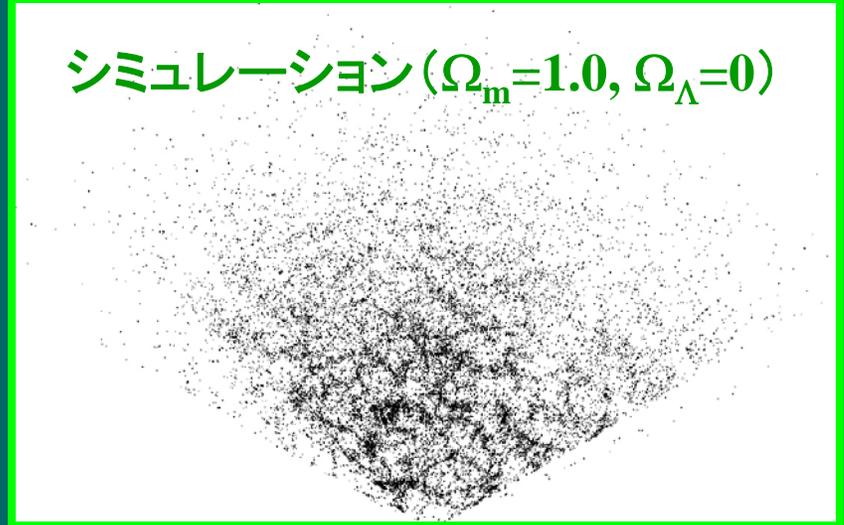
宇宙の大構造：理論モデルとSDSSデータ

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

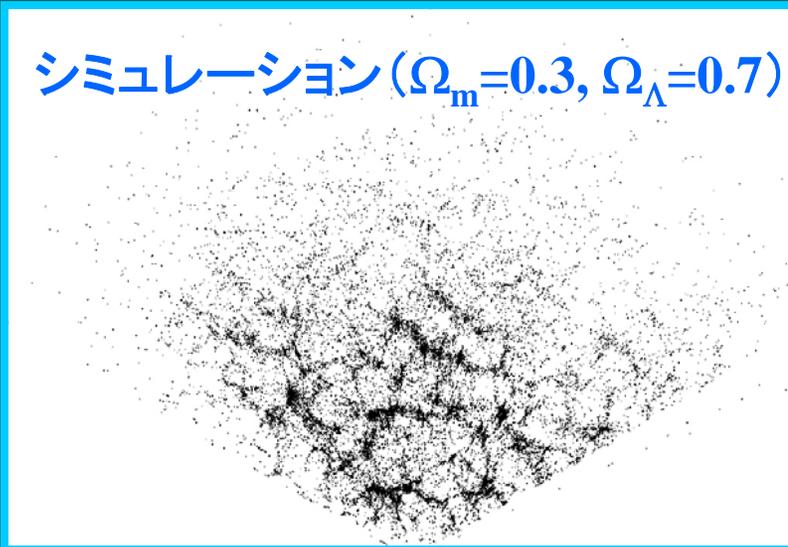
SDSS銀河分布



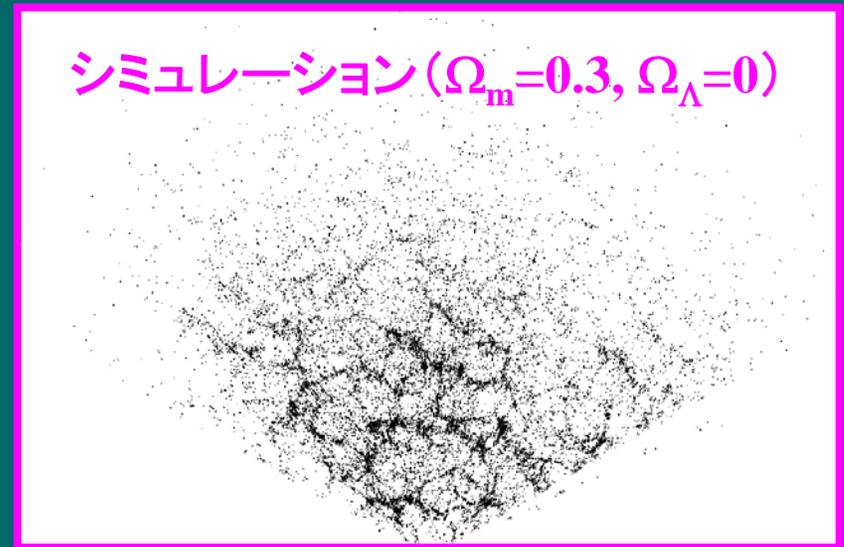
シミュレーション ($\Omega_m=1.0, \Omega_\Lambda=0$)



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



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



すばる望遠鏡の見た夜空のむこう



<http://www.naoj.org/Gallery/>

98億光年先にある
クエーサー

銀河団の重力を受けてクエーサーからの光線が曲げられてみかけ上5つの異なる天体として観測される

62億光年先にある
銀河団

重力レンズ天体
SDSS J1004+4112 :
一般相対論的蜃気楼

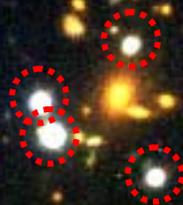


**The red crescents represent lensing arcs —
Smearred images of background galaxies.*

<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2006/23/>

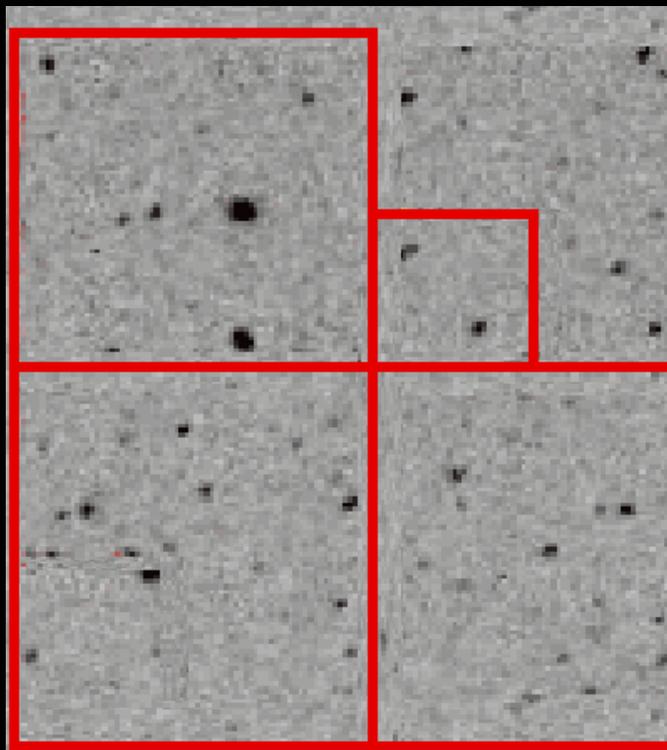


100億光年先からの一般相対論的蟹気楼 (SDSS J1004+4112)



2003年に東京大学の稲田直久と大栗真宗がSDSSで発見、すばるで確認
Inada et al. Nature 426(2003)810

宇宙を見る目の の進歩



地上4m望遠鏡+CCD
100×写真乾板



Hubble Deep Field
ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

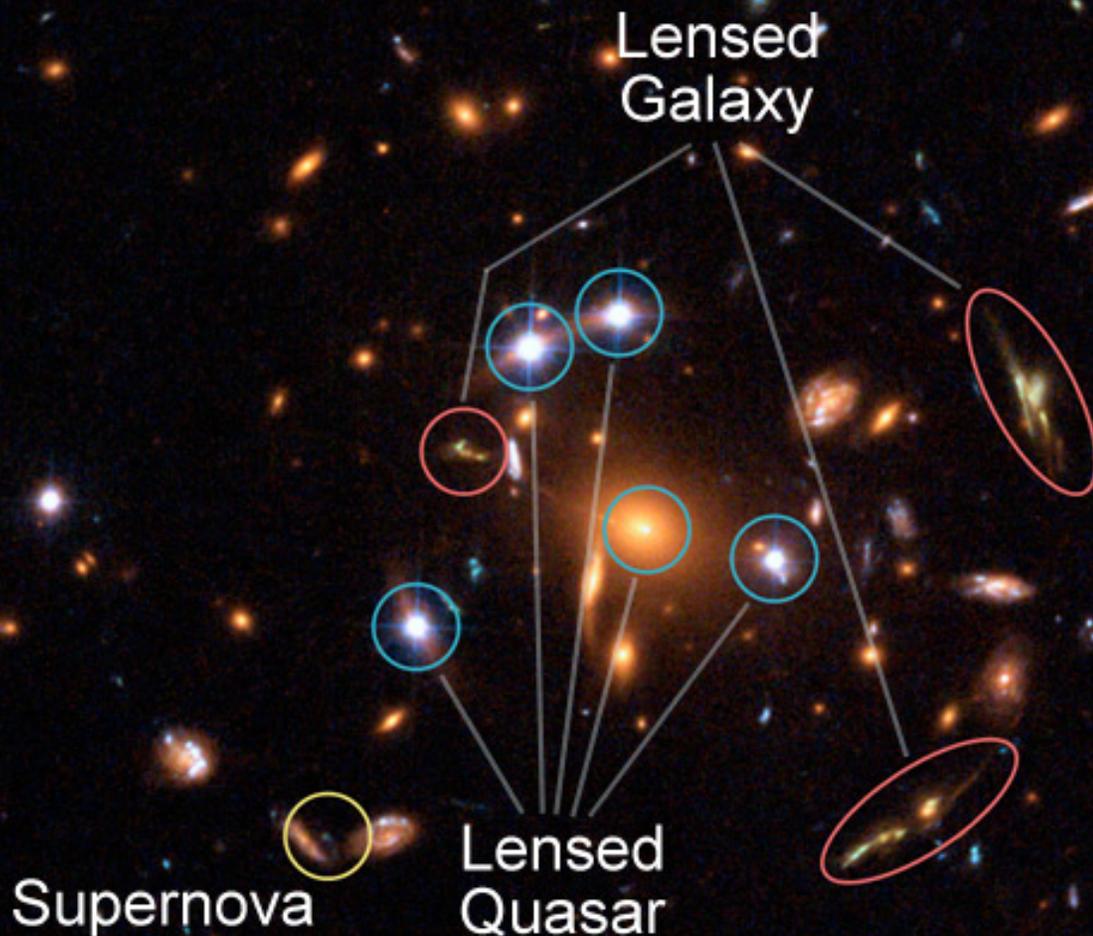
HST WFPC2

ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:1000×
地上望遠鏡

Galaxy Cluster SDSS J1004+4112

HST ACS/WFC

ハッブル望遠鏡で見たSDSS J1004+4112



2006年5月23日 ハッブル望遠鏡 写真公開

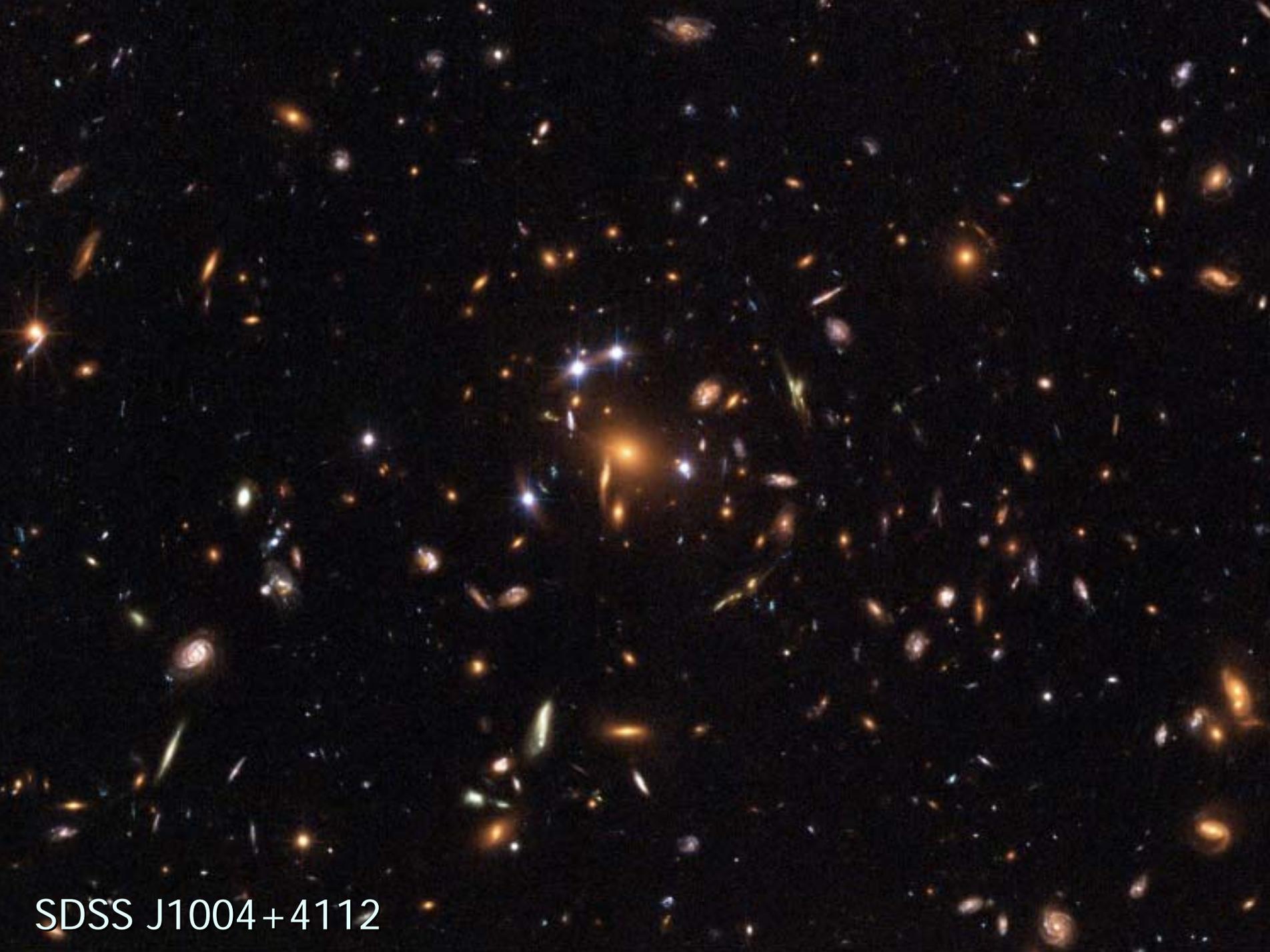
10"
<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2006/23/>

100億年を遡る



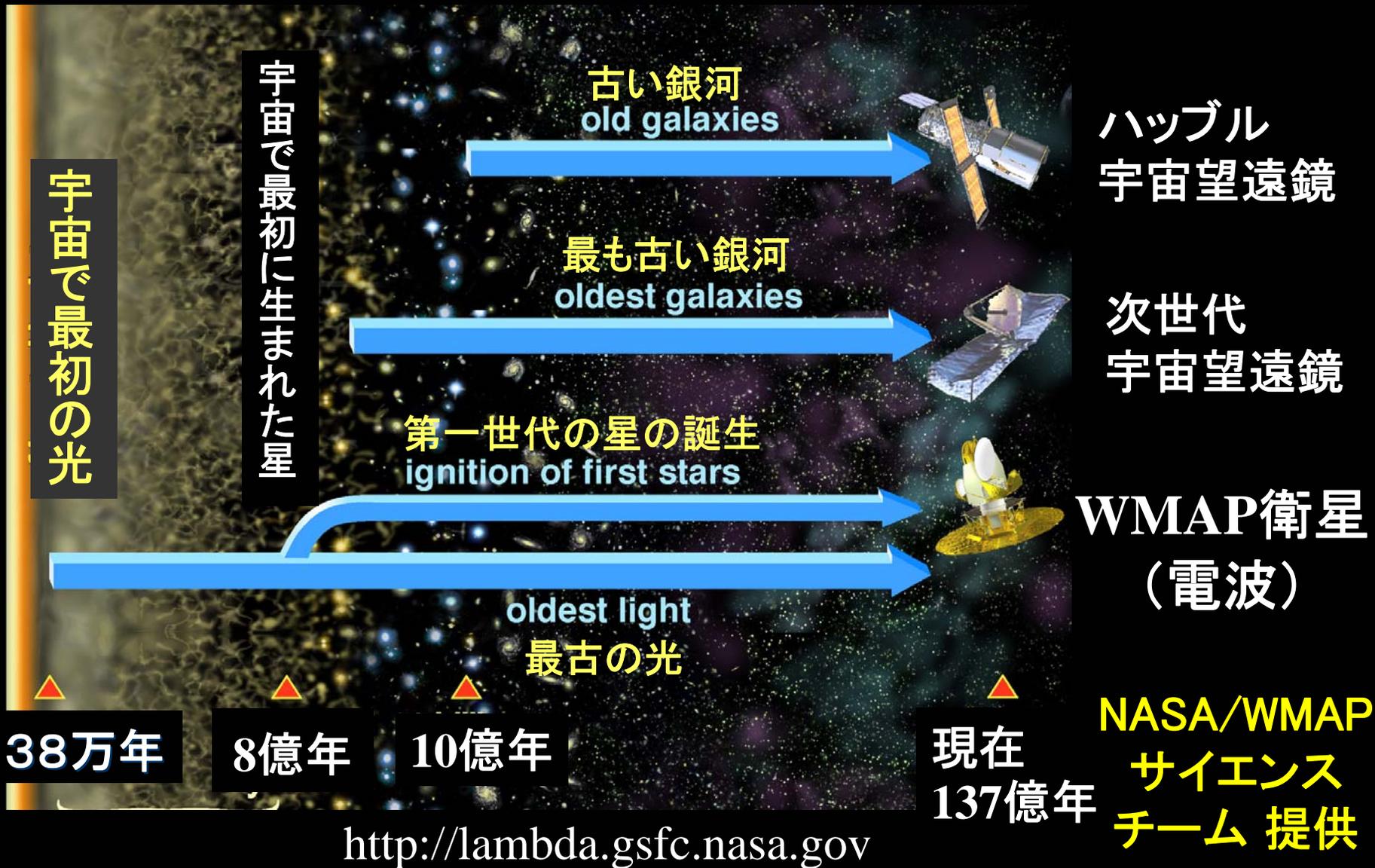
2006年5月23日 ハッブル望遠鏡 写真公開

<http://hubblesite.org/newscenter/newsdesk/archive/releases/2006/23/>



SDSS J1004+4112

衛星によってさらなる宇宙の果てを見る

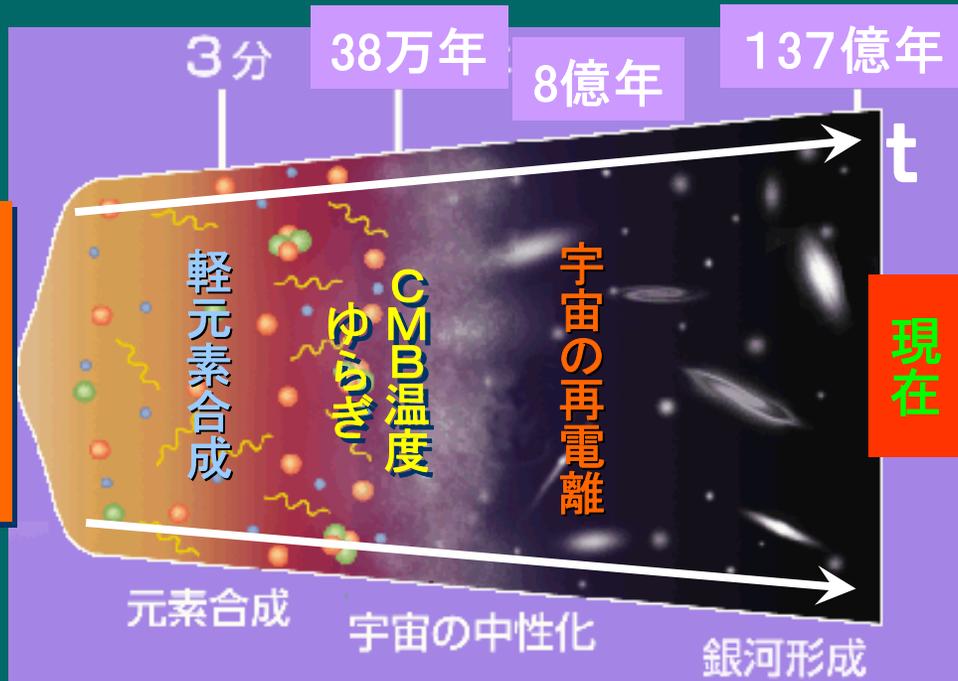


さらに遠く(=過去)を見たい

- 現在は、宇宙が誕生してから137億年
- 宇宙が誕生してから8億年後(つまり、今から129億年前!)の姿はすでに観測可能な時代
- しかし、さらにその昔はまだ天体が誕生していないので、可視光では見たくても見ることができない
 - ⇔ **宇宙が生まれたときの最初の光を見る**
- 現在はマイクロ波と呼ばれる波長0.1cm程度の電磁波として全宇宙を満たしている
 - ⇔ **CMB:宇宙マイクロ波背景放射**

宇宙マイクロ波背景輻射

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137億年前の宇宙の光の化石)



- 宇宙の晴れ上がり
 - 誕生後約38万年で、電子と陽子が結合して水素原子となる (宇宙の中性化)
 - その結果、宇宙は電磁波に対して透明となる

量子ゆらぎの生成

第一世代天体の誕生

銀河の形成

銀河団の形成

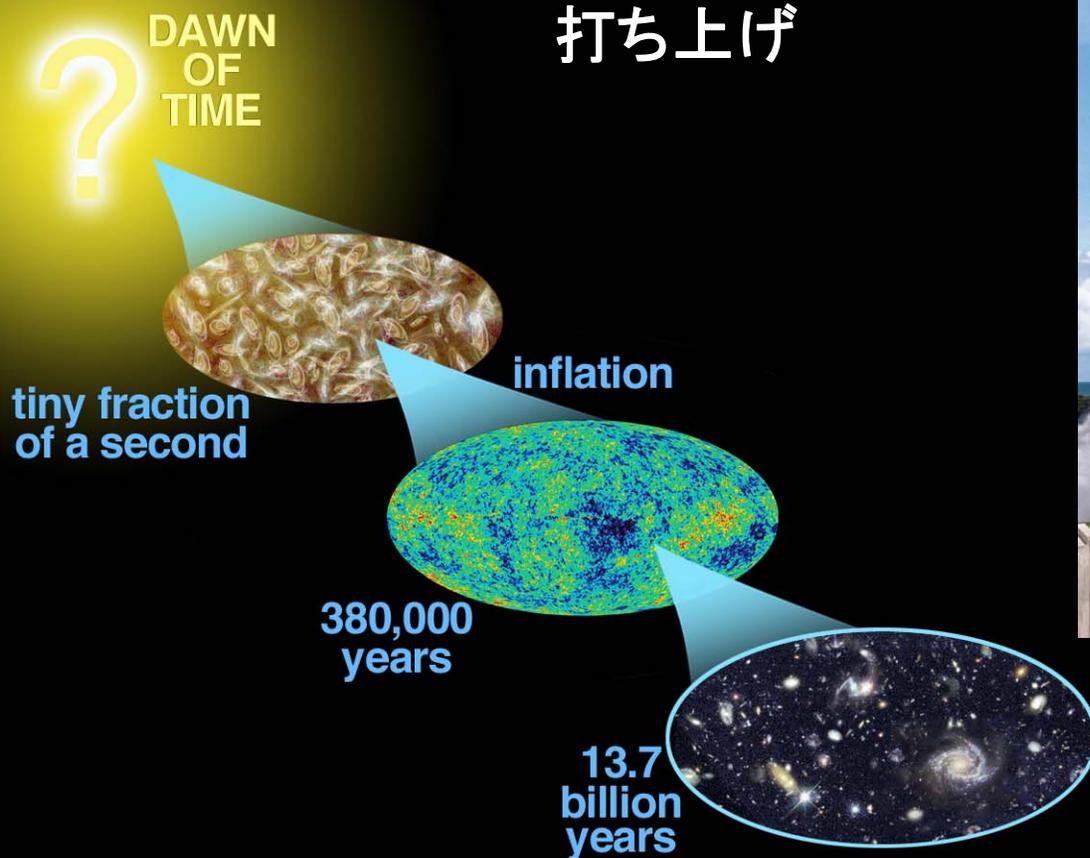
宇宙の大構造

CMB:
Cosmic Microwave Background

WMAP (ウィルキンソンマイクロ波非等方性探査衛星)

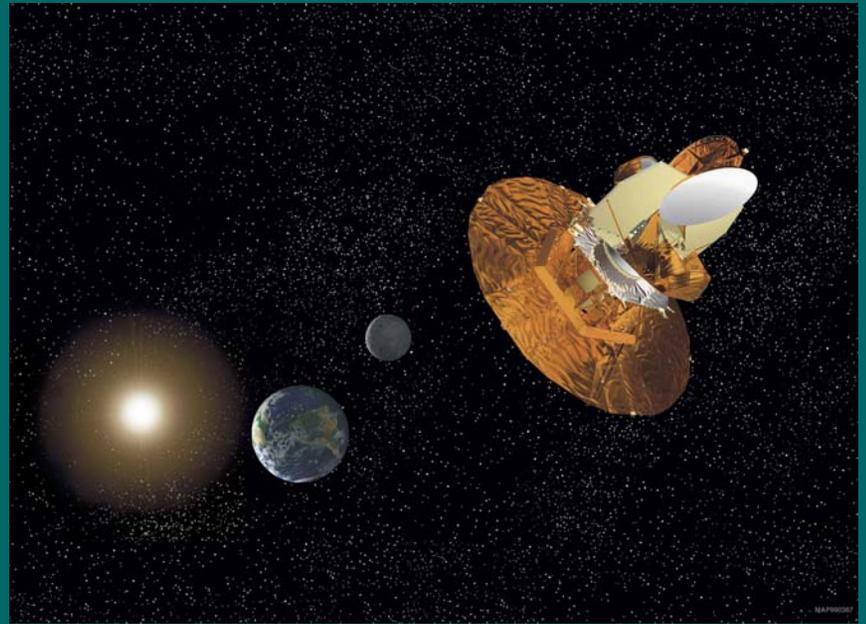
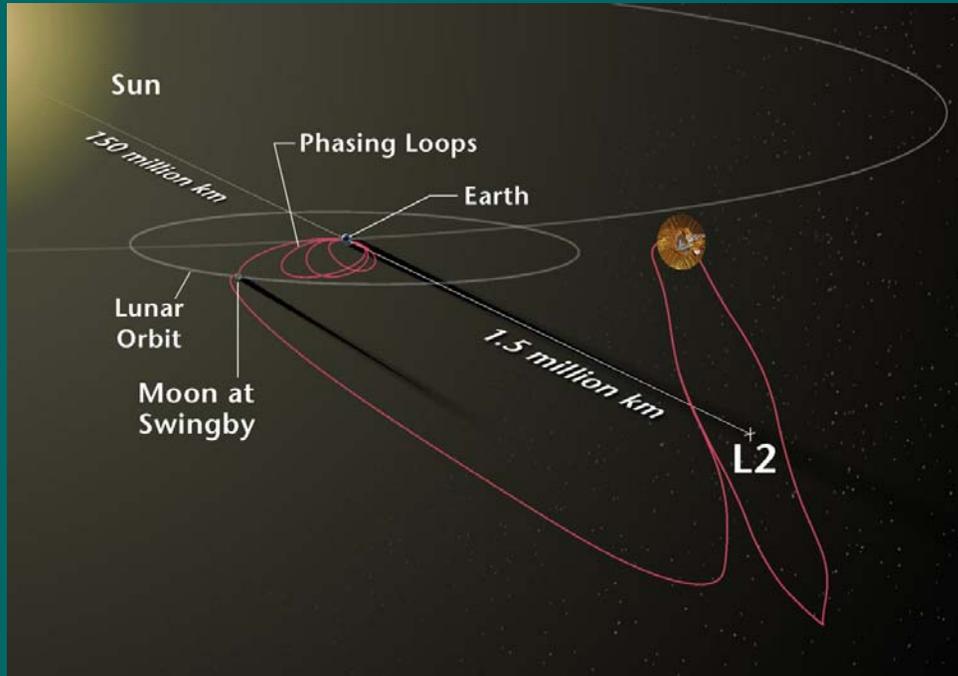
<http://lambda.gsfc.nasa.gov>

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



NASA/WMAP サイエンスチーム提供

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

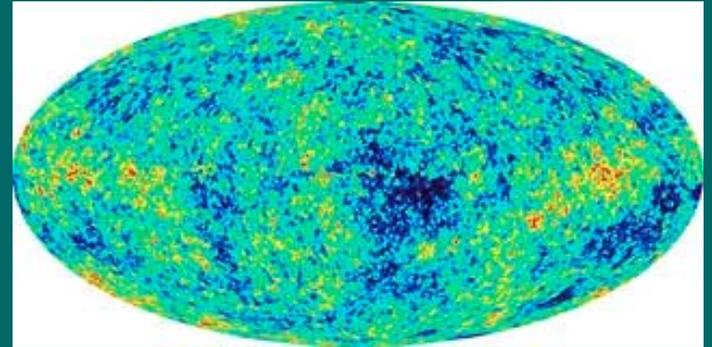
「初めに“光”あれ」が観測できる時代



- 神は言われた。「光あれ。」 (*let there be light*)
こうして、光があった。
- 旧約聖書 創世記 天地創造
はすでに現在のビッグバン理論 (1946年) にかなり迫っていた！

137億年前の古文書の解読

- 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

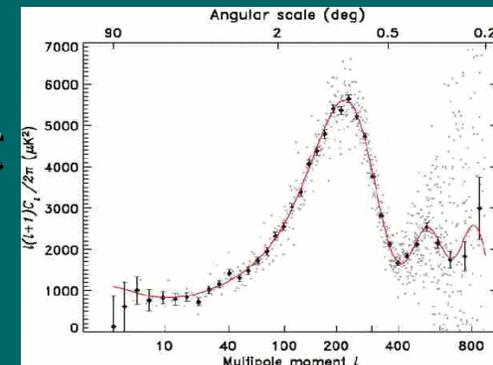
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

- この古文書の意味を理解するための文法

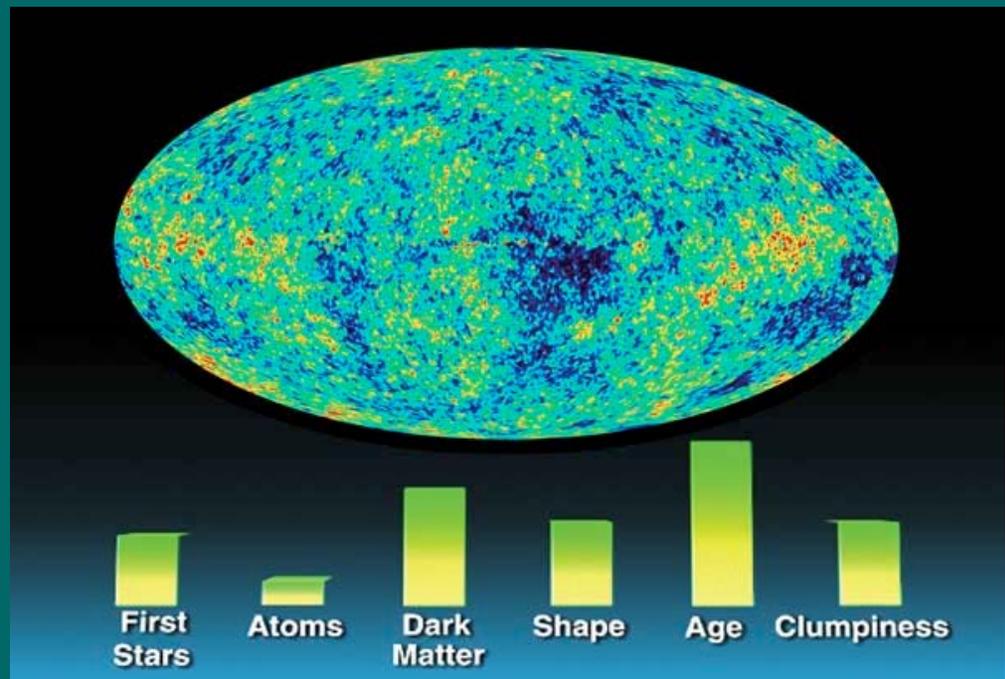
- 冷たい暗黒物質モデルの理論予言

- 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、、、



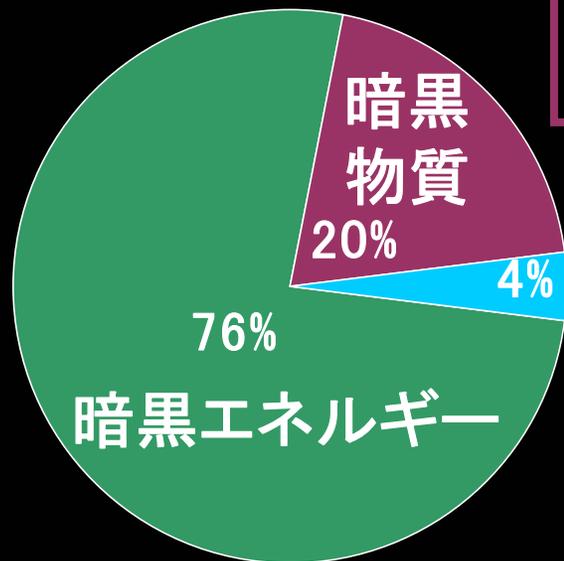
宇宙の古文書が 教えてくれたこと



- 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)
- 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

我々の宇宙は何からできている (2006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)

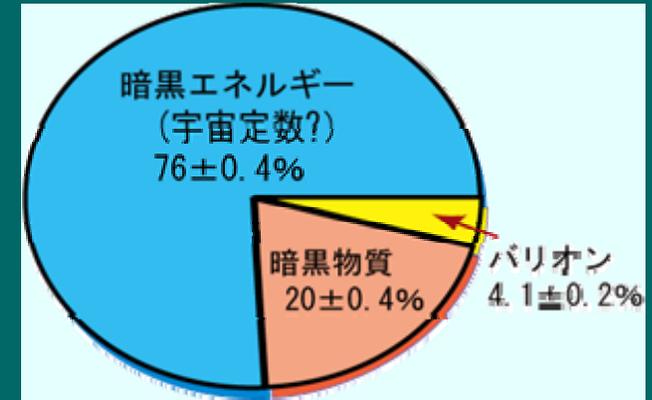
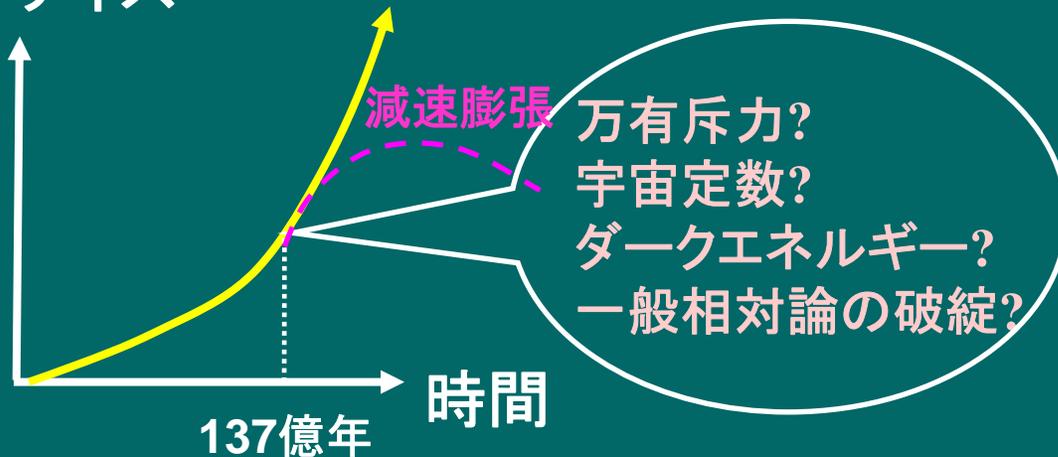
- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

- 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

ダークエネルギーとは何か

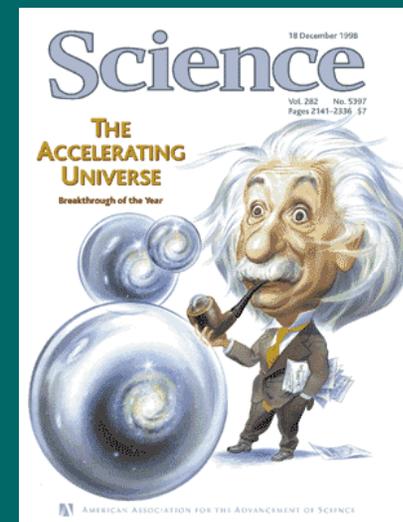
宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



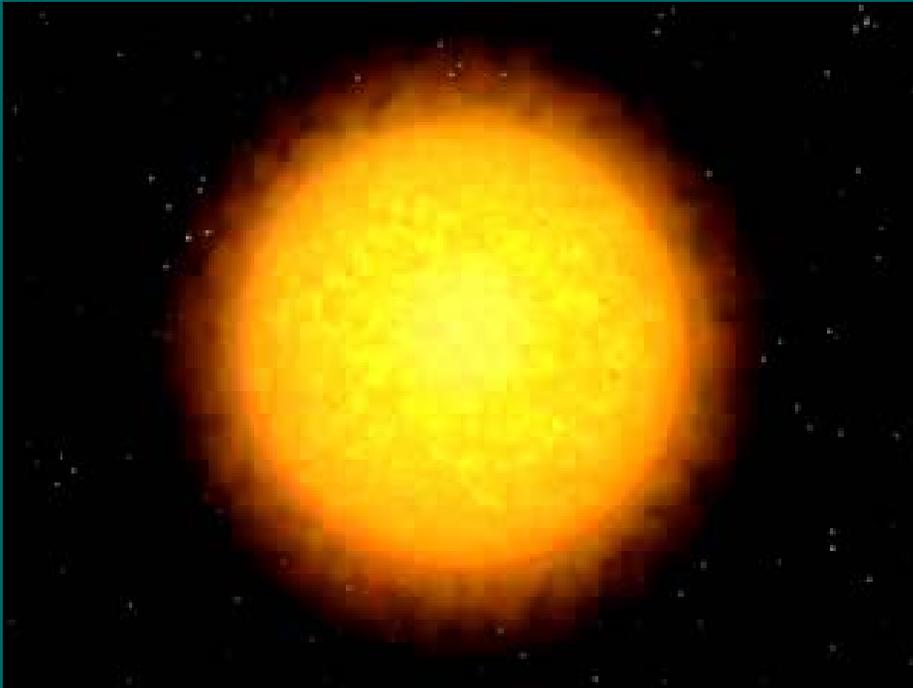
Science誌が選んだ
breakthrough of the year
1998年 宇宙の加速膨張
2003年 ダークエネルギー

- **宇宙の加速膨張の発見(1998年)**
 - 重力は引力なので必ず減速膨張
 - 重力を打ち消すような「万有斥力」が必要
- **加速膨張の原因は何か?**
 - 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数(1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー?
 - 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻
- **いずれも未知の物理学を切り拓く鍵**



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く
にあり暗く見える天体
⇒ 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

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

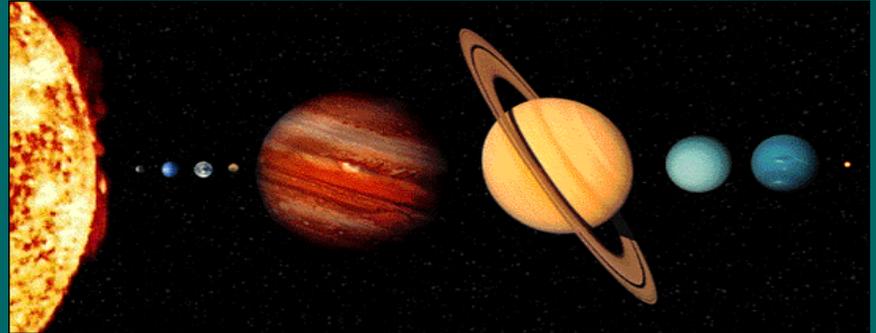


太陽系外惑星とは何か

■ 水金地火木土(天海冥)のその先？

■ 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初の検出(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6月: 6~8倍地球質量の惑星発見(地球型?)
- 2005年7月: 超巨大コアを持つ灼熱惑星の発見(佐藤文衛ほか)
- 2005年10月: 惑星公転軸の傾きの発見
- 2006年5月25日時点で165個の系外惑星系(計193個の惑星)

太陽系外惑星探査の方法

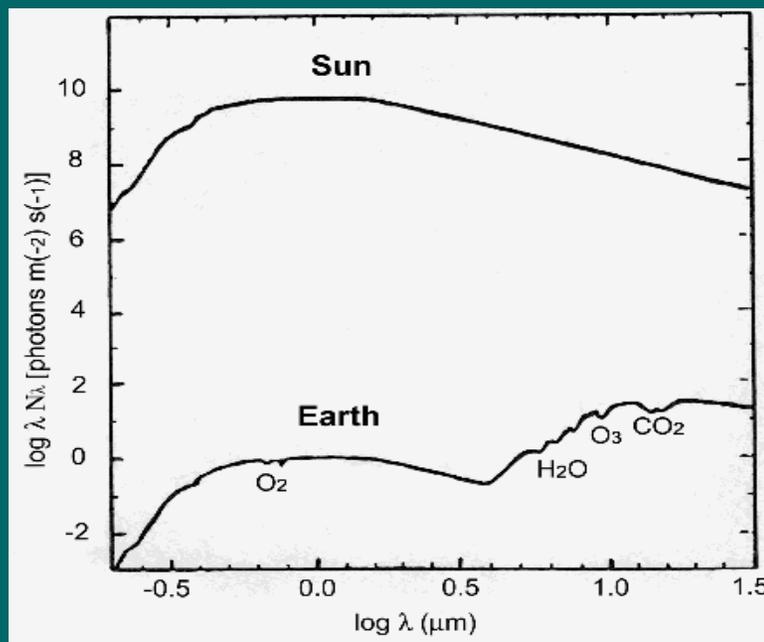
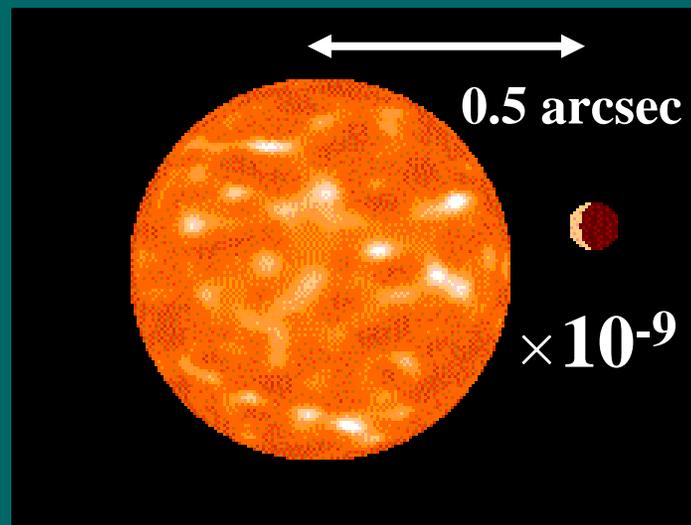
- 直接撮像：高角度分解能
- 主星の速度変動：高精度分光
- 主星の位置変動：高精度位置決定精度
- 主星の光度変動：高精度測光
- パルサーの信号到着時刻変動：
高時間分解能

⇒ いずれも最先端の観測技術を要する

惑星は直接見えるか？

10pcから観測した木星

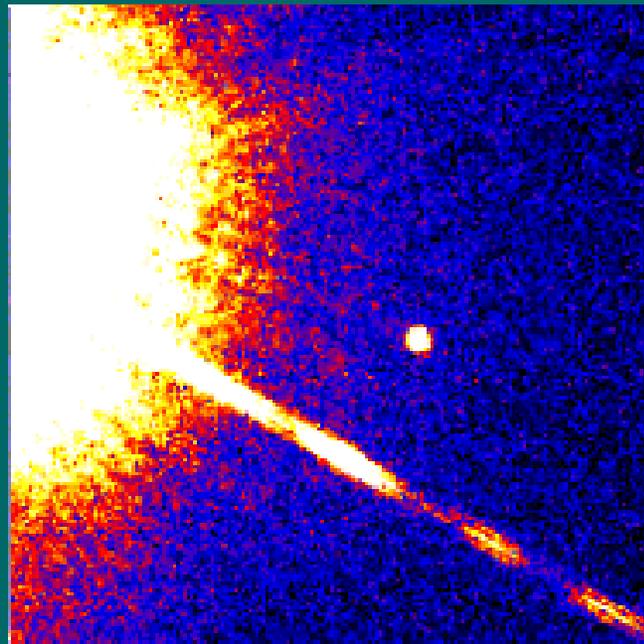
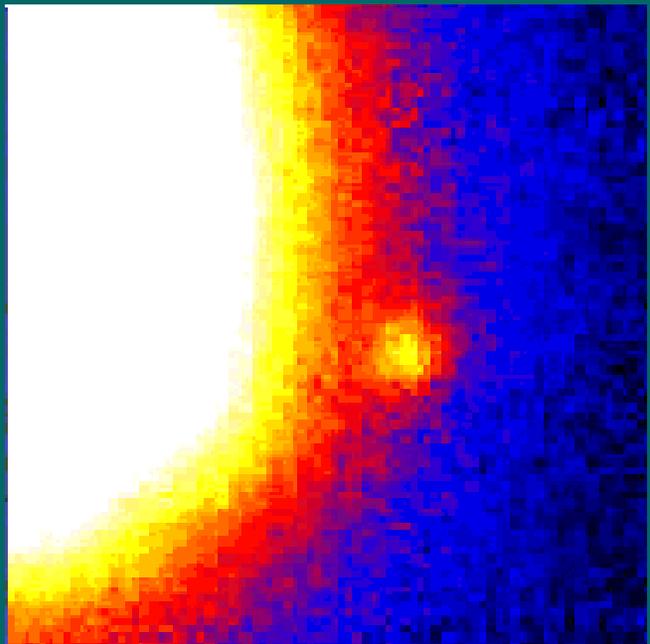
明るさ: 27等級(可視域)
主星との角距離: 0.5秒角



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！

褐色矮星の直接撮像例



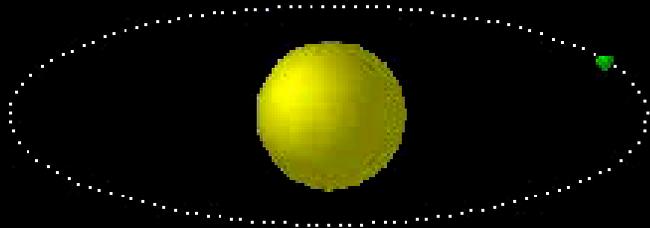
Gliese229 b:
角距離 7arcsec
光度比 5000

左: Palomar
右: HST
(国立天文台:
中島紀氏)

- 木星が10pcの距離にあるとすれば、これよりも14倍主星に近く、20万分の1暗くなる！

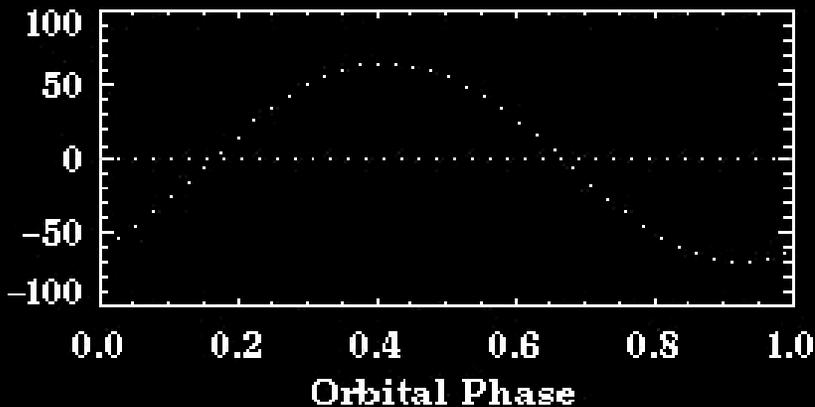
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrB



$K = 67.4 \text{ m/s}$ $e = 0.03$
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3$ (*)

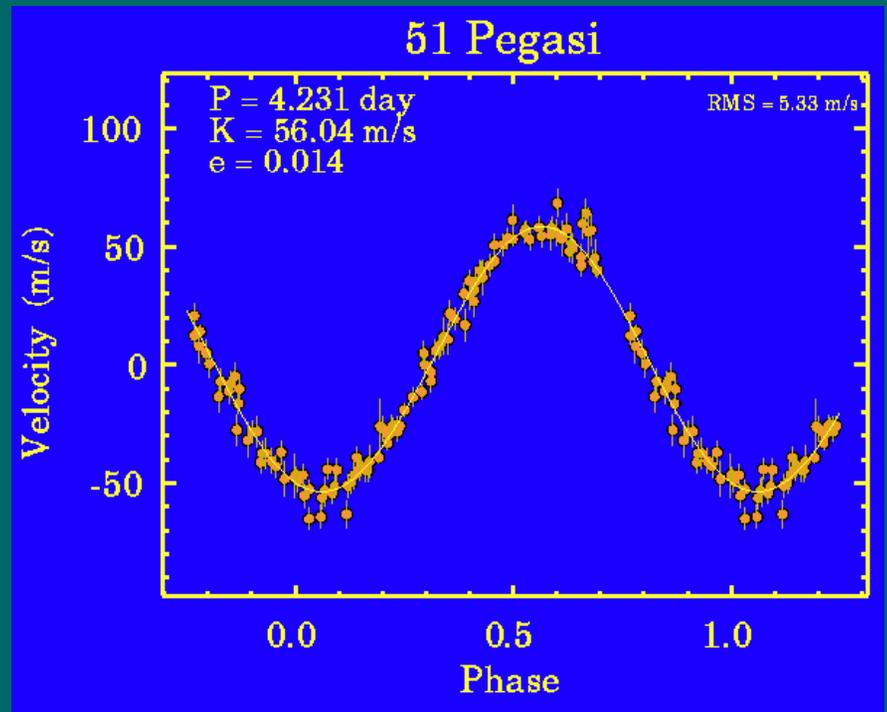
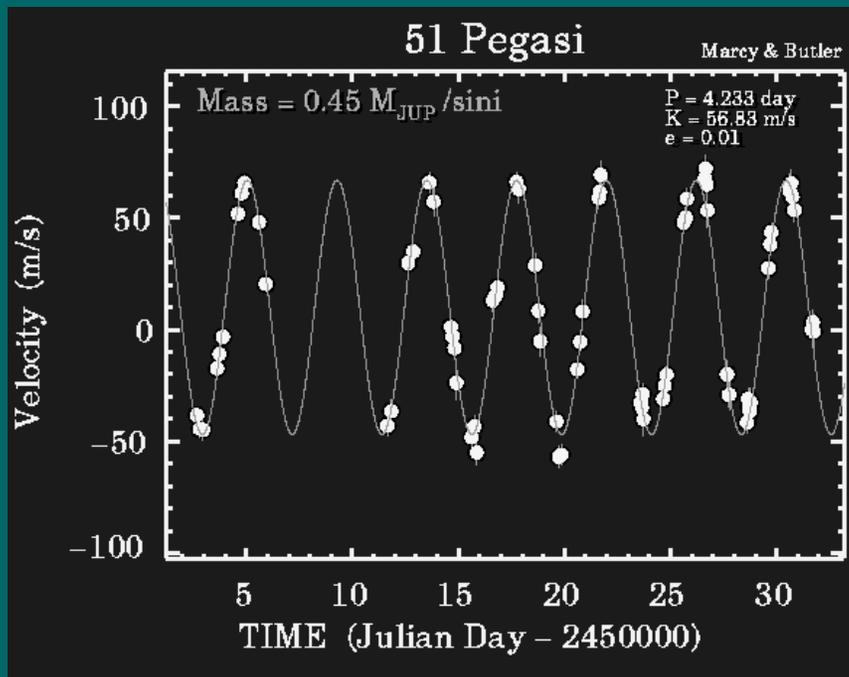
Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



- 中心星の運動を精密に観測すれば惑星があるかどうか分かる
 - 中心星の速度が我々に対して毎秒数十メートルだけ周期的に変動
- さらに運がよければ、中心星の前を惑星が横切ること
で星の明るさがほんの少しだけ暗くなる場合もある
 - 公転周期を4日間とすると、2時間程度の間、1パーセントだけ暗くなる

ペガサス座51番星 ～初めての太陽系外 惑星の発見～

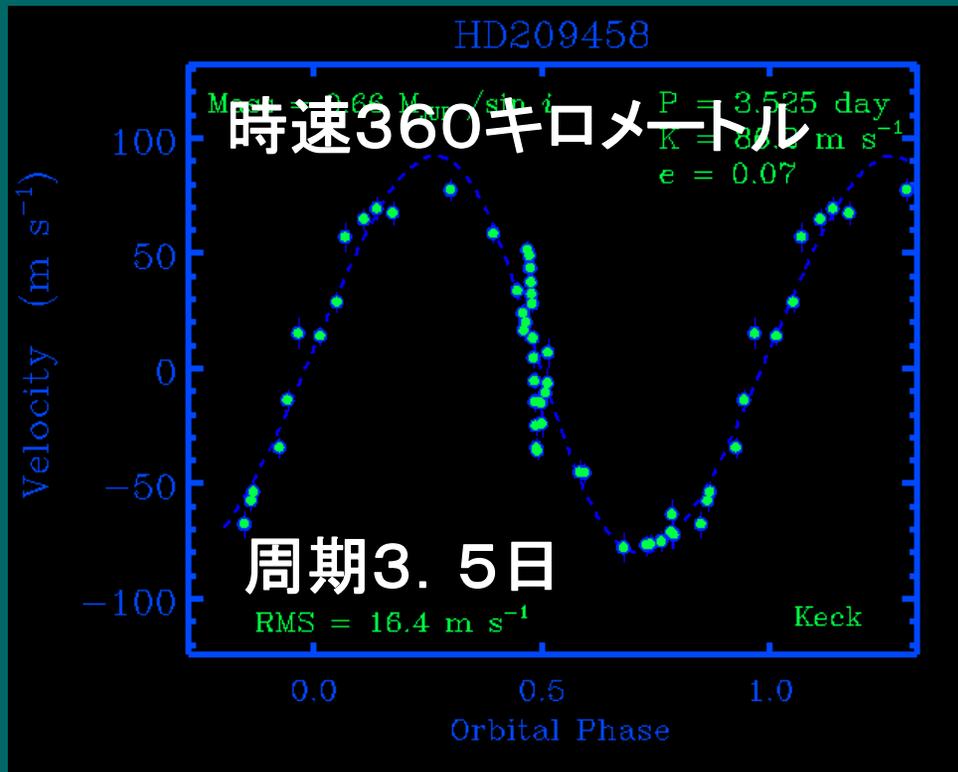
- メイヨール & ケロス (1995年)



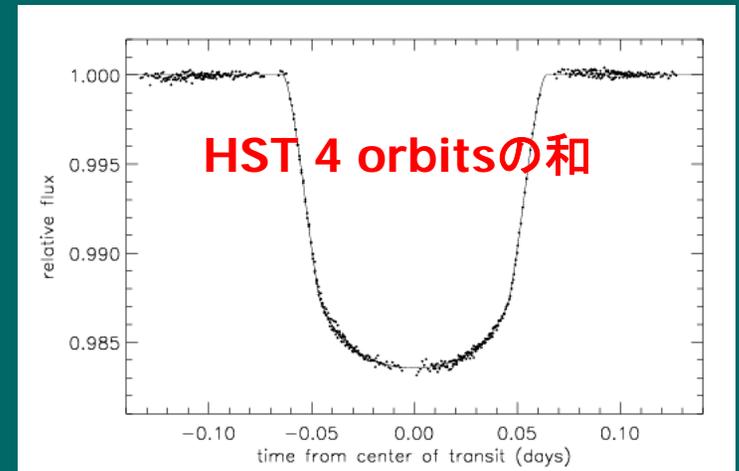
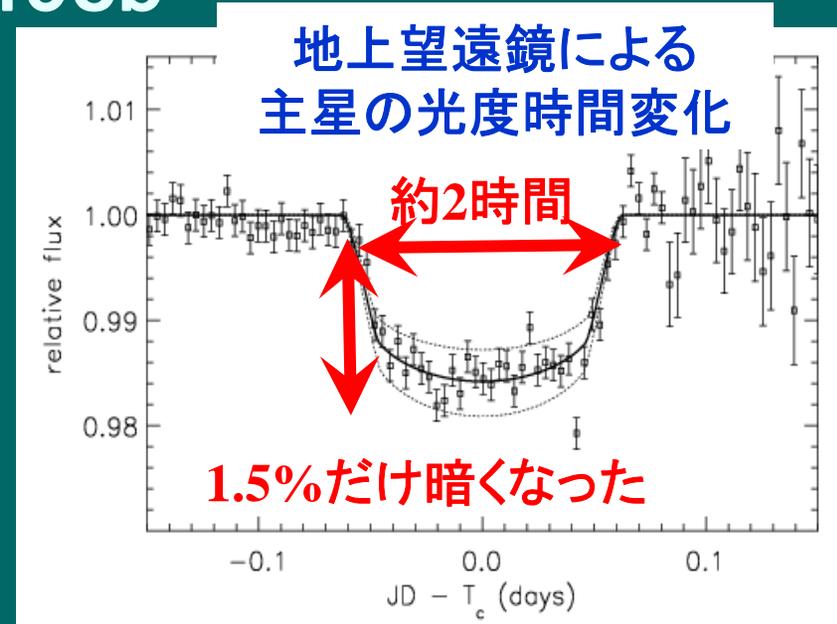
周期がわずか4.2日！

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)

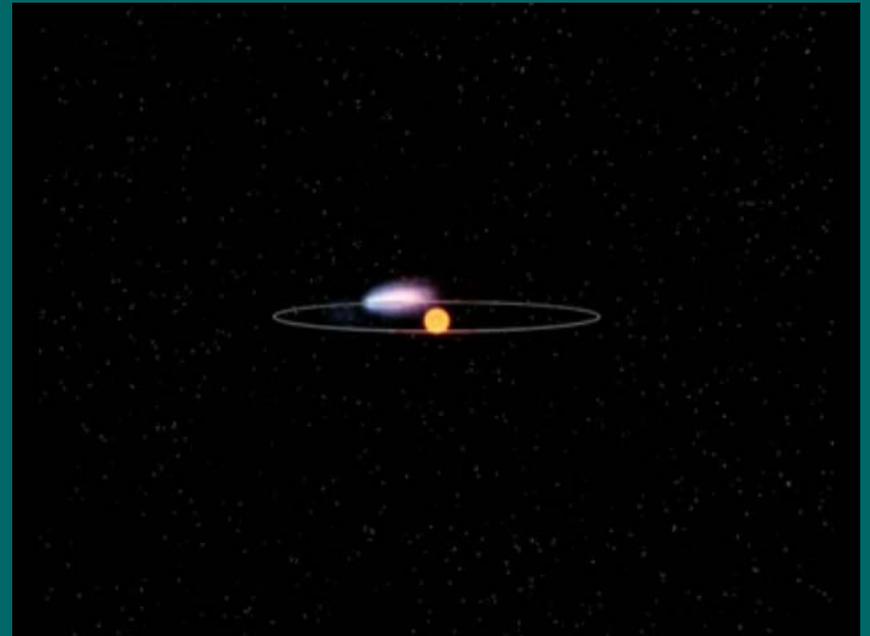
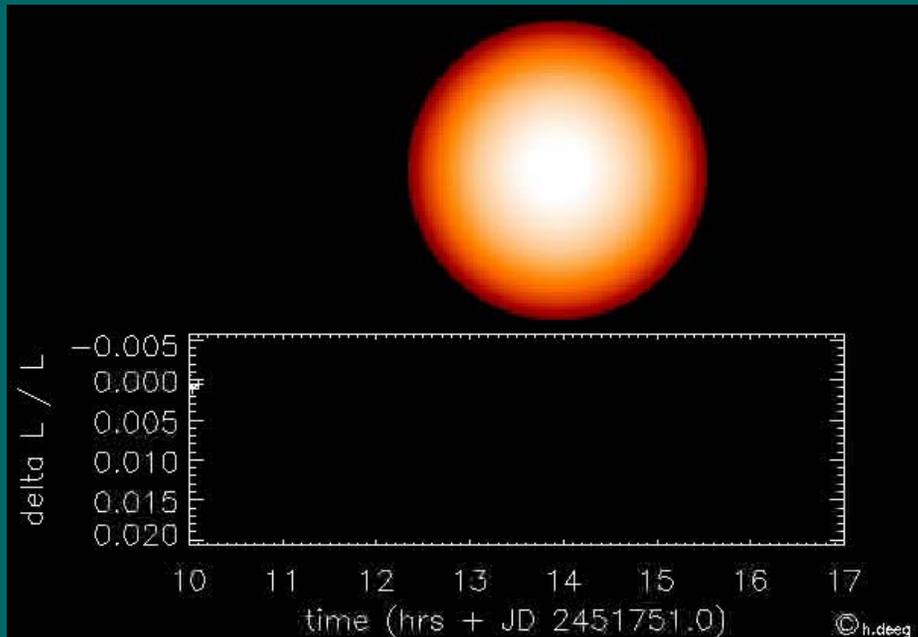
トランジット惑星とは

- **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
 - 2006年5月時点で、10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**



最初に発見されたトランジット惑星系: HD209458

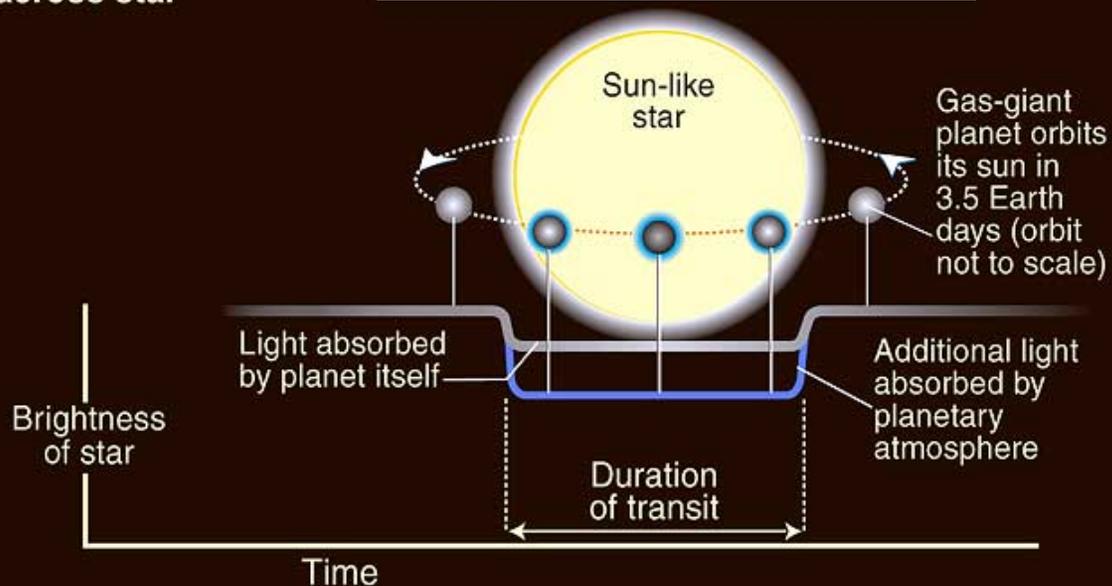
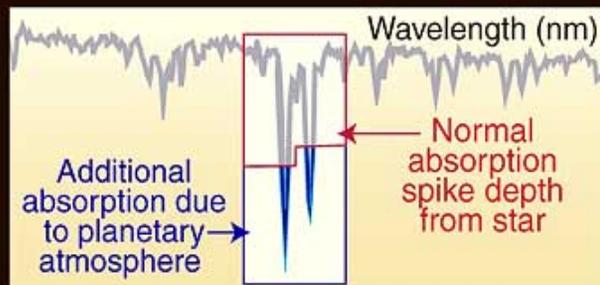
- 距離: 約150光年
- 公転周期: 3.5日
- 質量: 0.63木星質量
- 半径: 1.4木星半径
- 密度: 0.4g/cc



HD209458b 惑星大気の 初検出

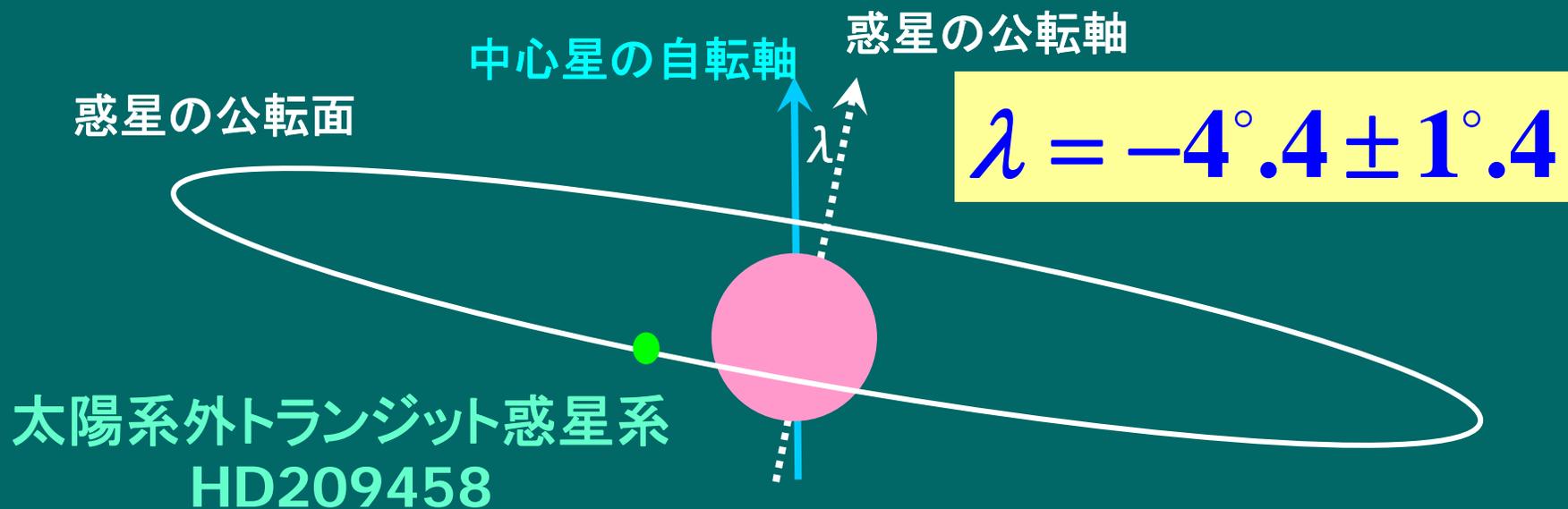
[http://hubblesite.org/
newscenter/archive/
2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

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
 - 質量の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を発見

太陽系外トランジット惑星系 HD209458の中心星自転軸と惑星公 転軸のずれの発見

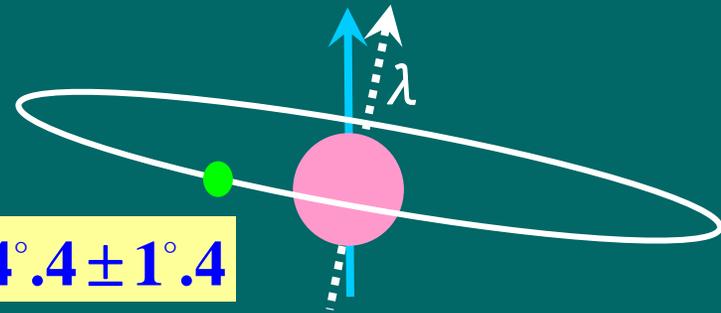


太陽系外惑星の公転軸はちょっぴり傾いていた

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



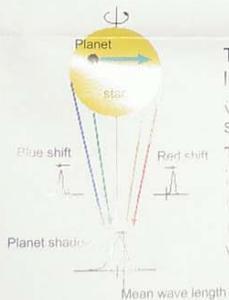
共同研究者：太田泰弘、樽家篤史

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

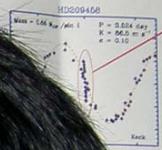
- We show analytic formulae for radial velocities of the transiting extrasolar planetary systems with the stellar limb darkening effect.

1. Introduction

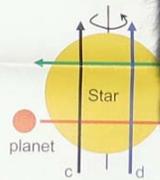
Characterization and observational method of the planetary systems

- 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 inclination

Rossiter-McLaughlin



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



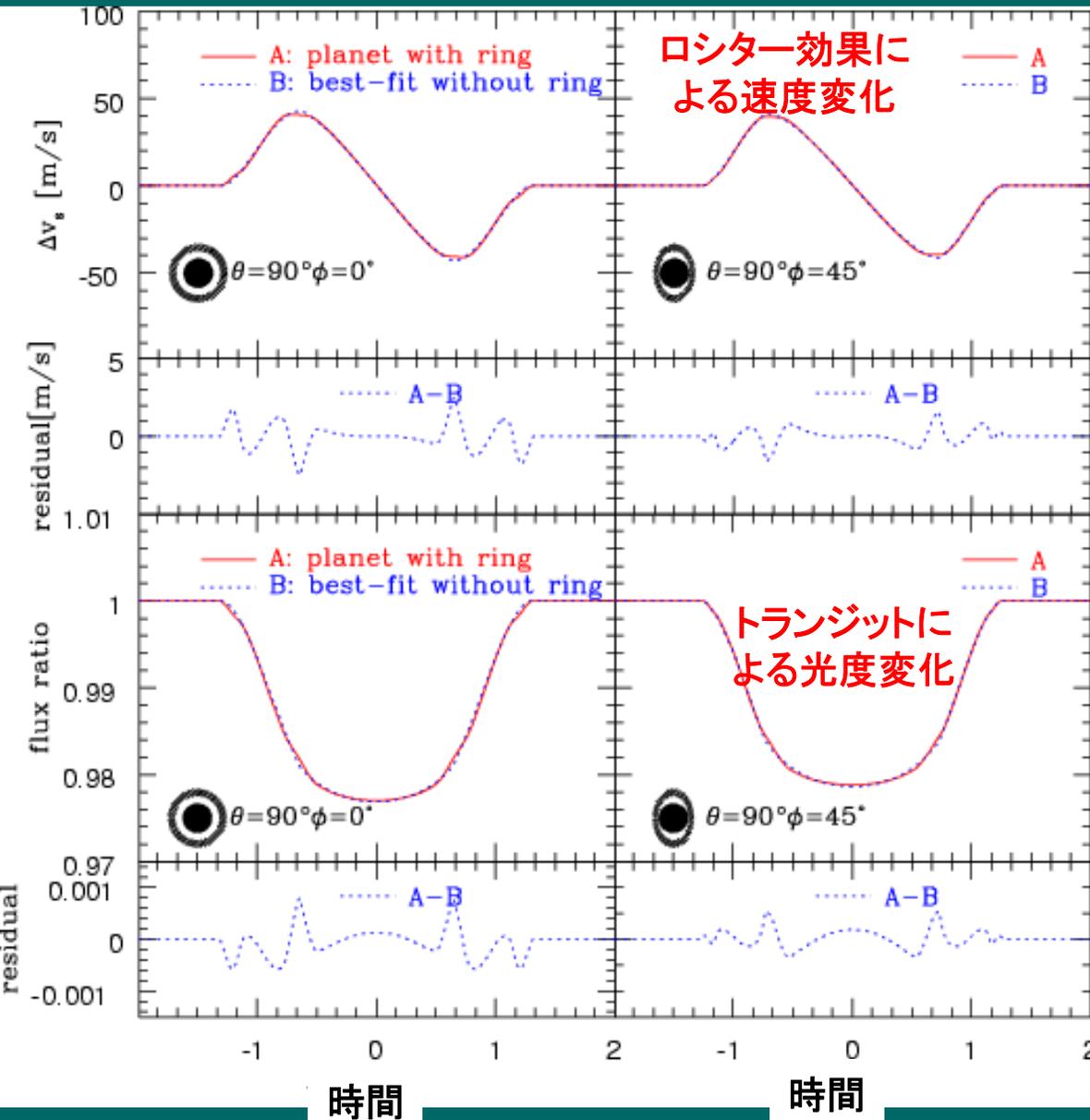
We can obtain the information about the alignment of the planet's orbital axis and the stellar spin axis from the timing of the Rossiter-McLaughlin effect. This methodology provides a new way to study the formation process of extrasolar planetary systems.

3. Results

We show the results of our analysis.



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

今後の系外惑星研究ロードマップ

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

- 惑星反射光の実出

- **地球型惑星の実見**
- **居住可能惑星(水が液体として存在)の実見**
- **バイオマーカー(生物存在の証拠)の実定**
- **地球外生命の実見**



第二の地球はあるか？



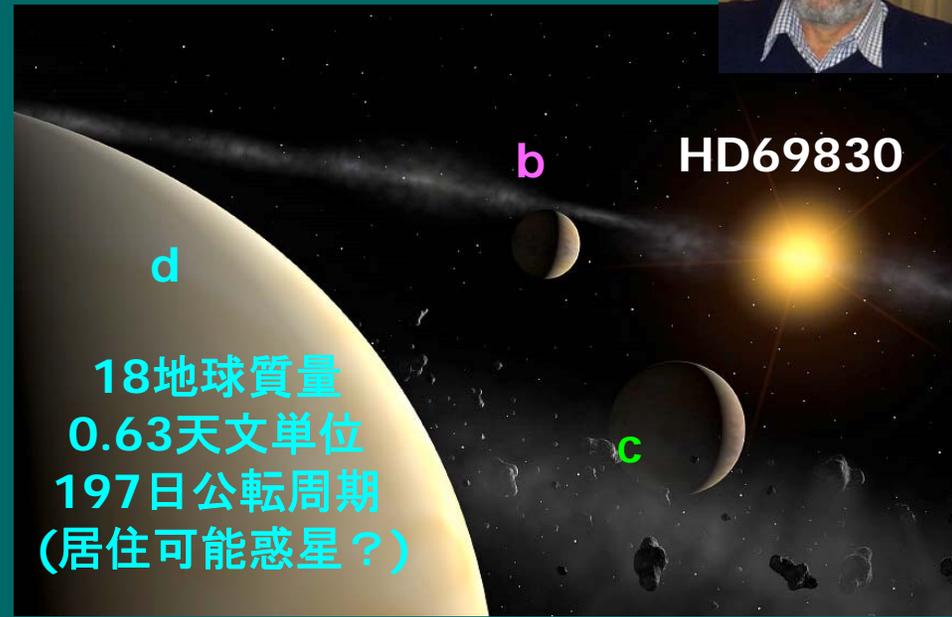
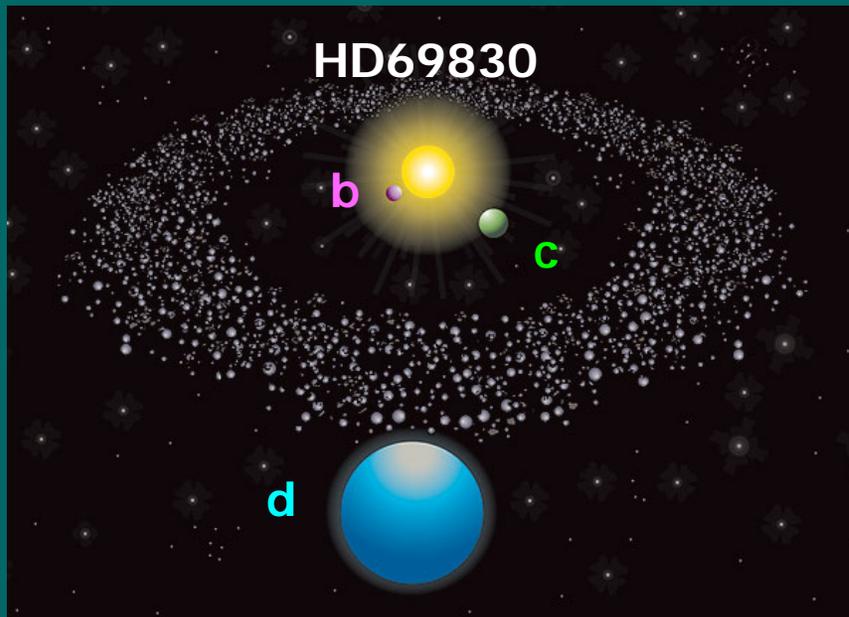
- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(居住可能)
 - +偶然？
- 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

Terra衛星のMODIS検出器のデータ

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

<http://www.nasa.gov/home/index.html>

居住可能領域にある惑星の発見?



- HD69830: 約40光年先のK型星(0.86太陽質量)の周りに3つの惑星 (Lovis et al. Nature 2006年5月18日 441巻305ページ)
 - b. 10地球質量、0.08天文単位、8.7日公転周期
 - c. 12地球質量、0.19天文単位、32日公転周期
 - d. 18地球質量、0.63天文単位、197日公転周期 (居住可能惑星? ただし地球型ではなく表面はガスでおおわれているであろう)

<http://www.eso.org/outreach/press-rel/pr-2006/phot-18-06.html>

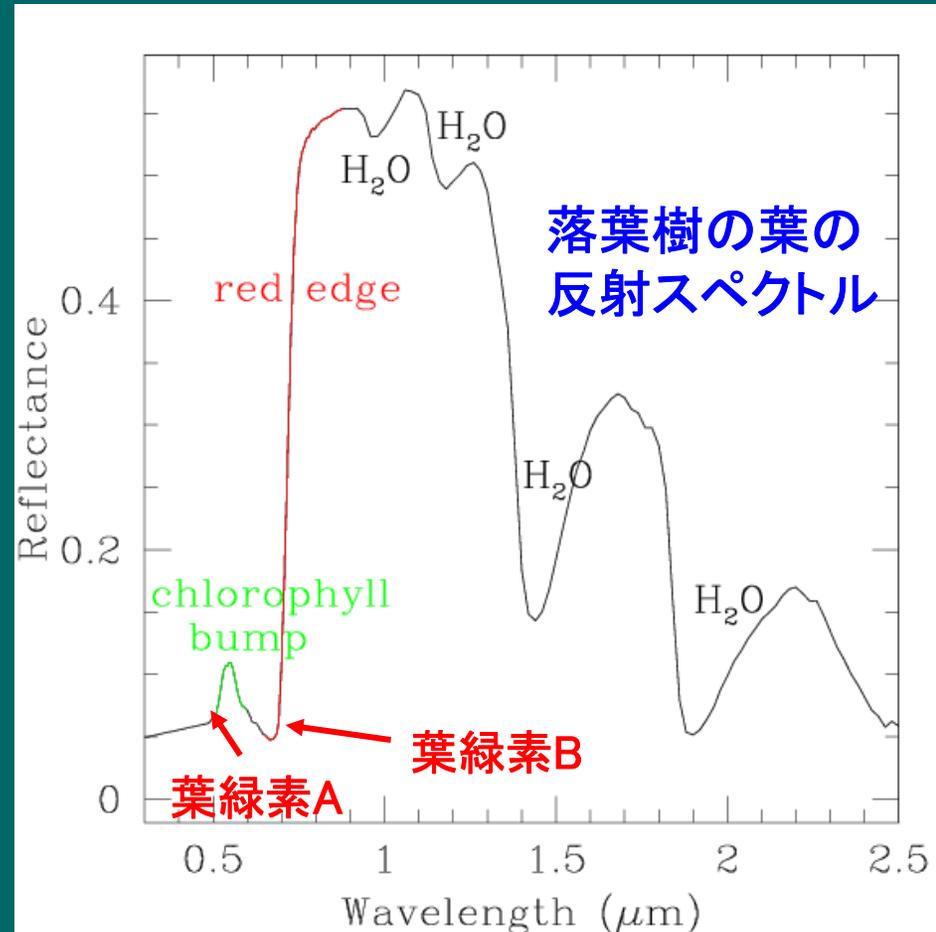
Biomarkerと地球照：我が地球を用いて「第2の地球」がどのように見えるかを予測

- (居住可能)地球型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(将来に向けた模擬観測)**
- 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

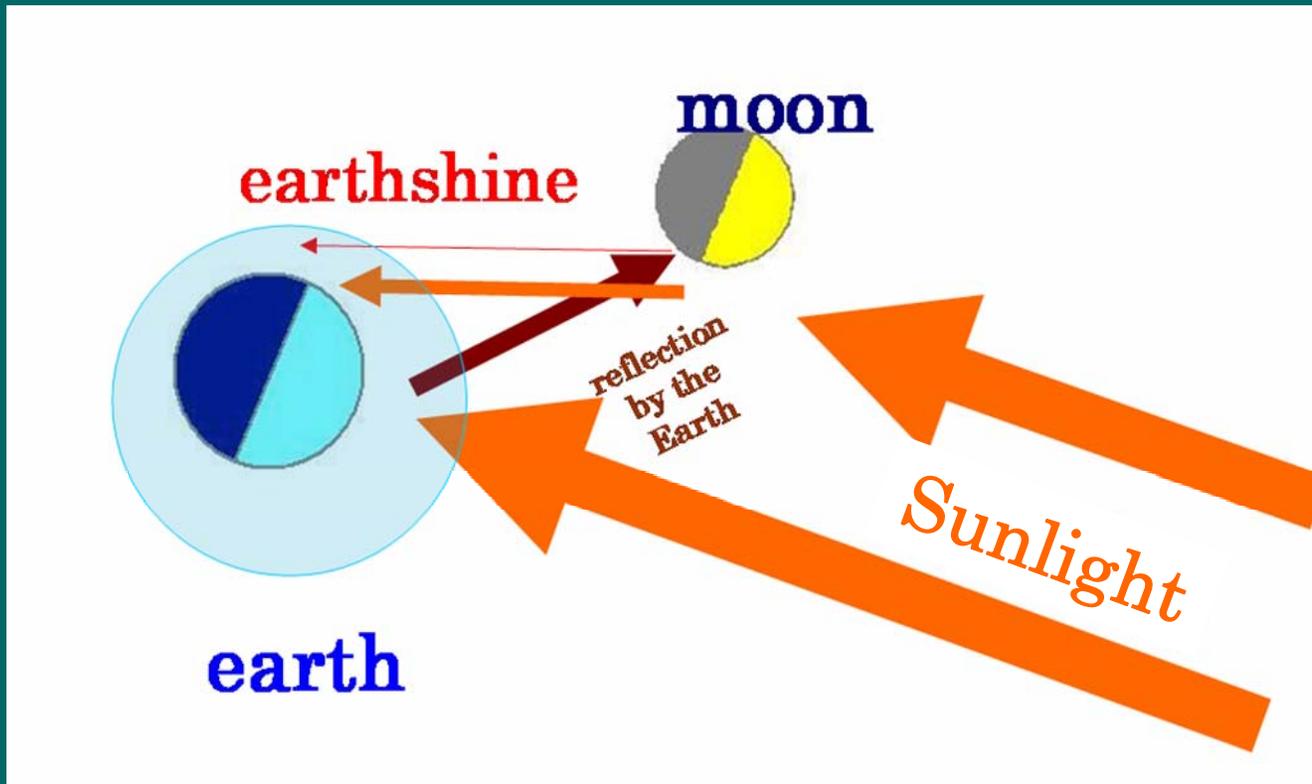
- (地上の)植物は赤外線に近い波長でまばゆく輝いている(反射率が急激に増大)
- これを太陽系外惑星に生命(植物)があるかどうかの判定に利用できないか？



Seager, Ford & Turner
astro-ph/0210277

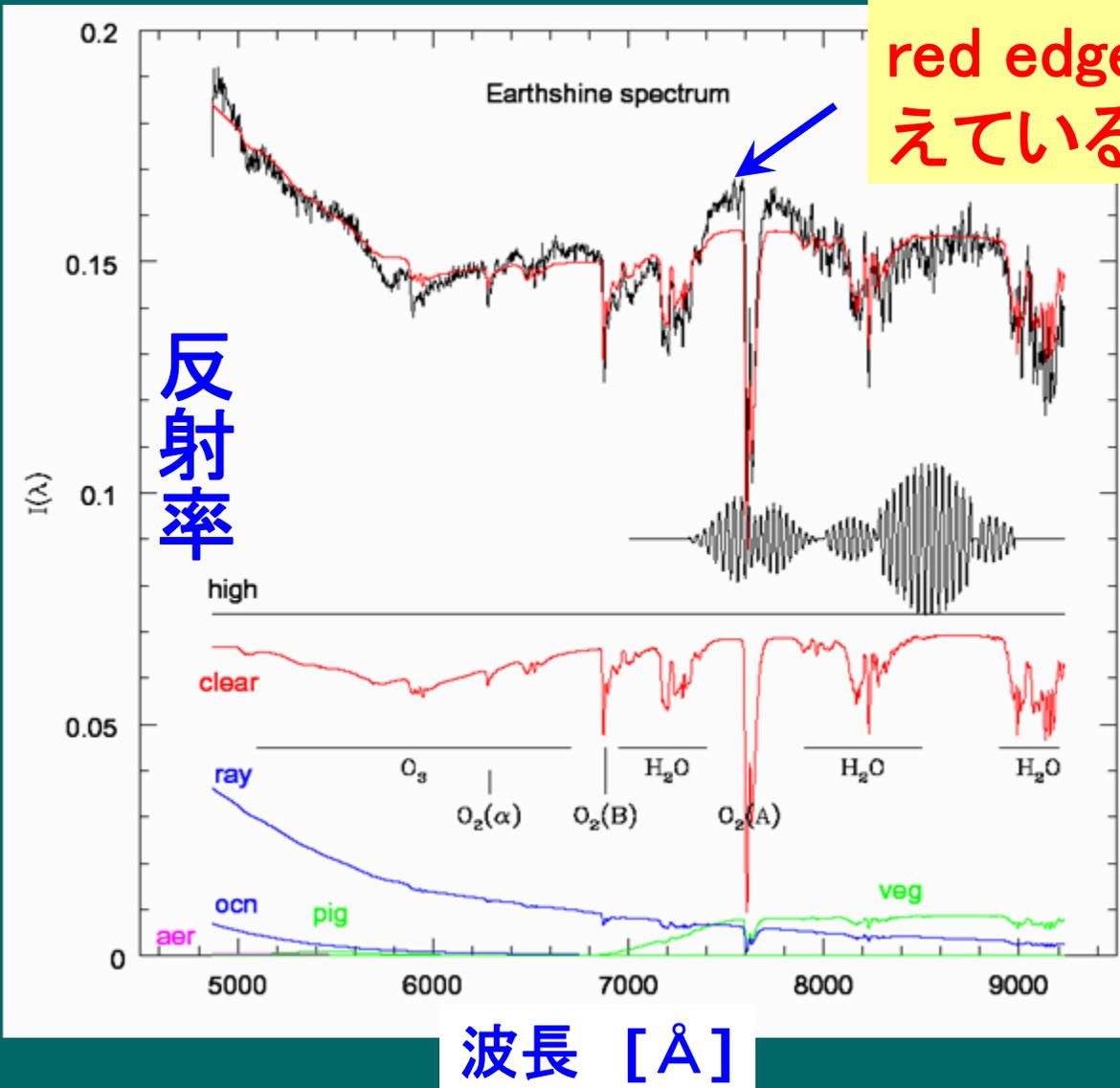
地球照観測

- 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

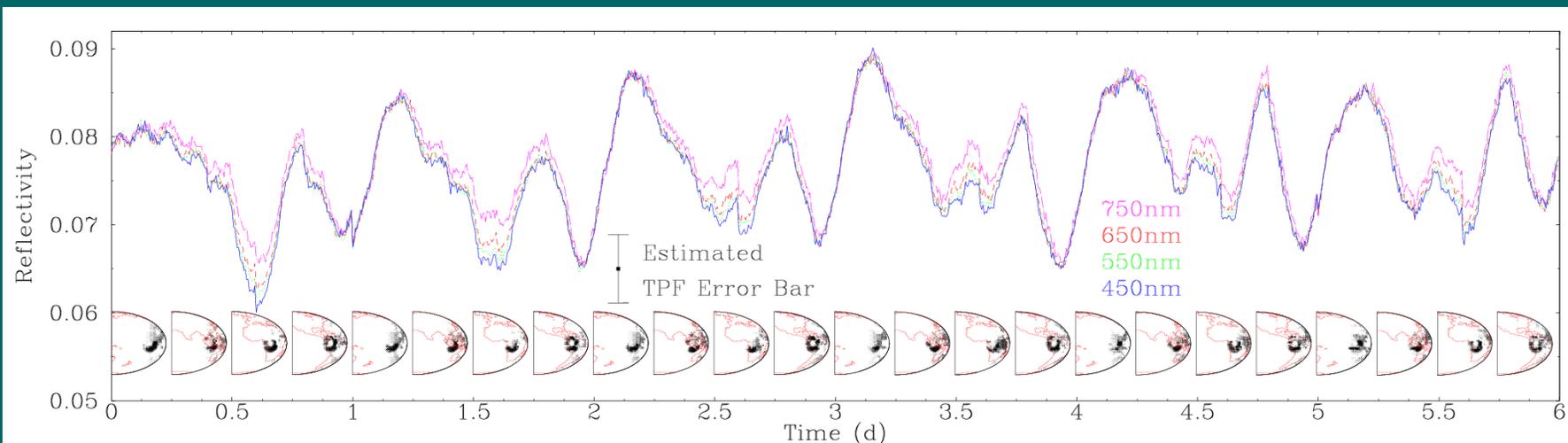
red-edge in a pale blue dot ?



red edge が見えている???

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

地球が30光年先にあるとして何がどこまでわかるか？

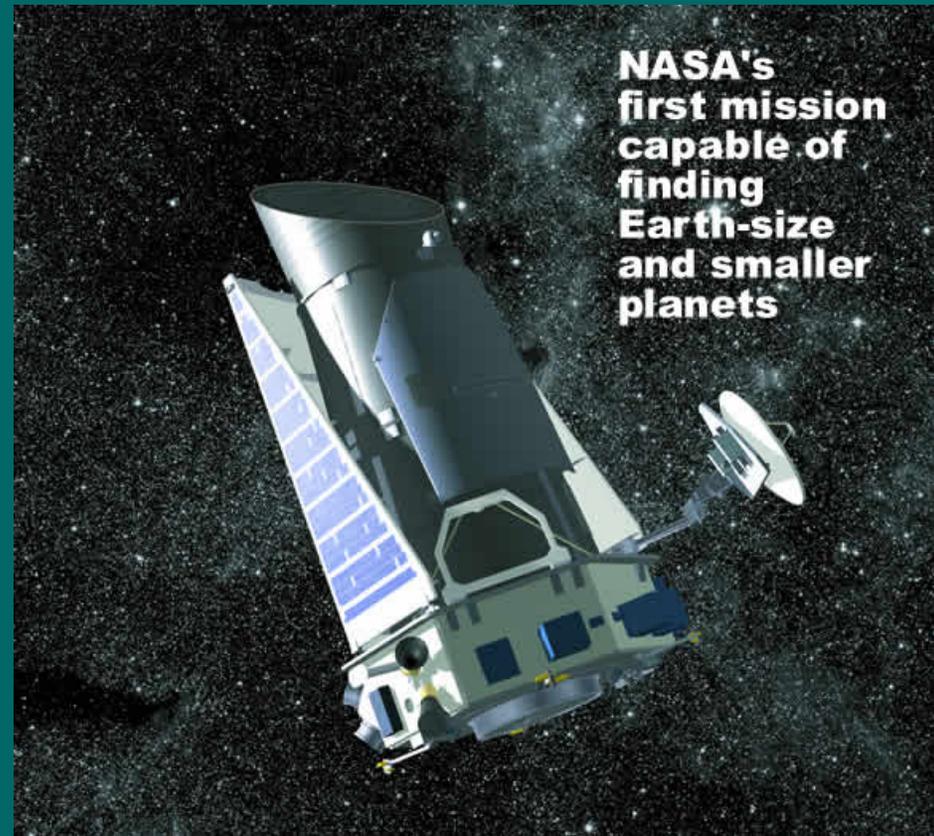
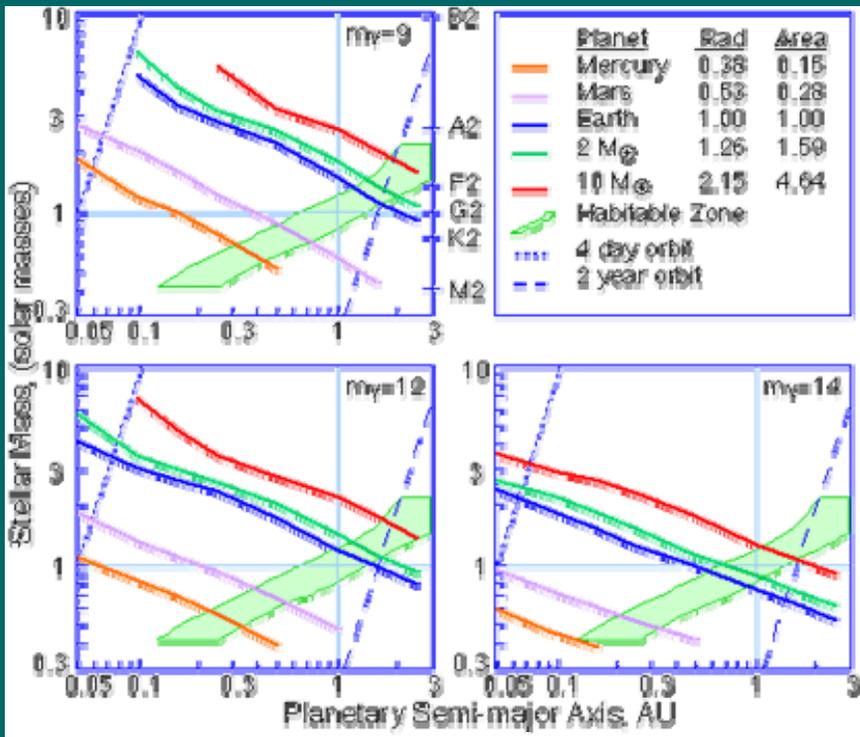


Ford, Seager & Turner: Nature 412 (2001) 885

- **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

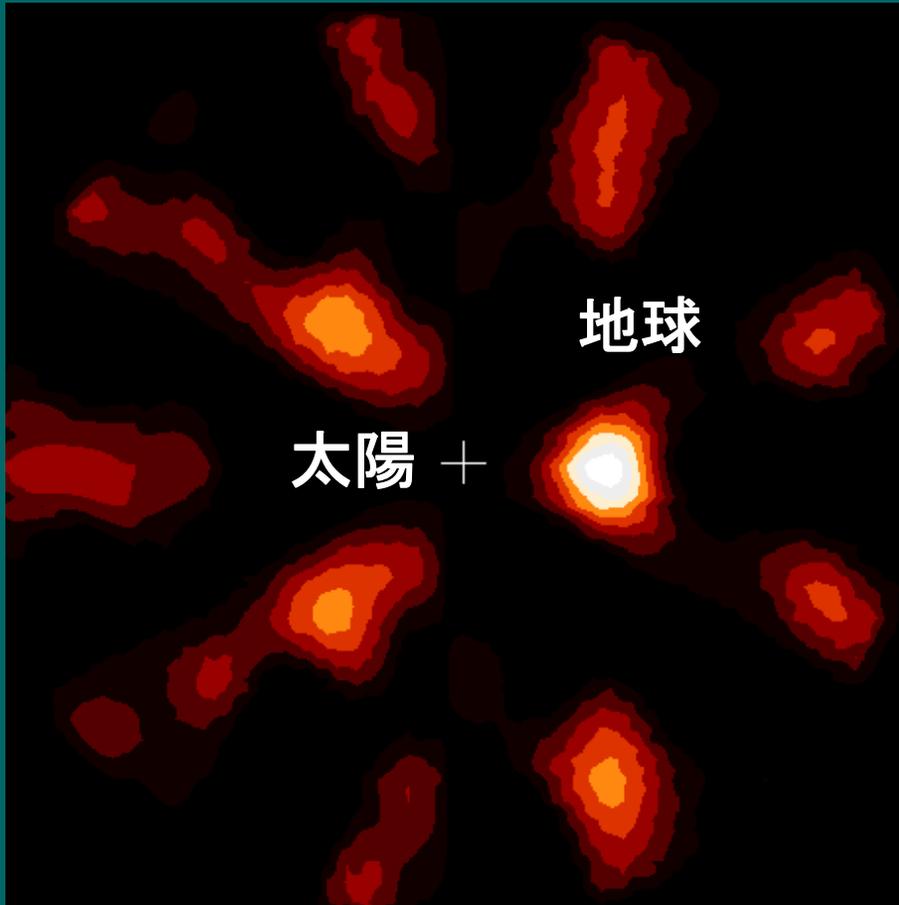


<http://kepler.nasa.gov/>

ダーウィン衛星

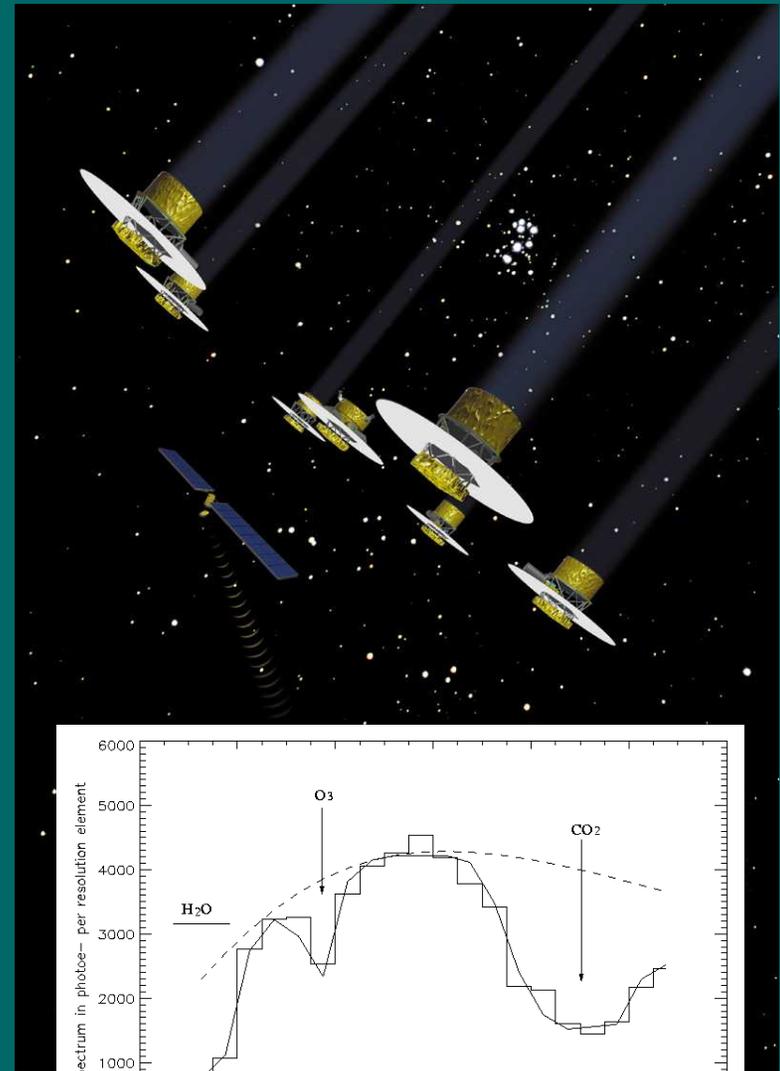
(欧州：2020年頃？打ち上げ)

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

「夜空のむこう」を探ることで、従来全く予想されていなかった新しい科学が発展しつつある

■ 宇宙の果ての観測から微視的世界の新しい階層が発見された

- 宇宙の96%の正体は理解されていない
- 暗黒物質と暗黒エネルギーの解明は新しい自然法則を探る本質的な鍵

■ 天文学から宇宙生物学へ

- 1995年初めての系外惑星発見
- 地球型居住可能(水が液体として存在する)惑星の発見へ
- 遠くの惑星に生物の兆候を探る天文学的試み

