

# 太陽系外惑星 I

## 現状と展望



理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

2012年6月28日 16:30-18:00@1322教室

駒場総合科目「宇宙・惑星科学の最前線」第11回

# 講義内容

1. 雑談的序
2. 天文学・宇宙物理学に残された課題
3. 太陽系外惑星探査の歴史と現状
4. トランジット惑星専用探査機ケプラーの成果
5. バイオマーカー
6. 我々の研究の紹介
7. まとめと展望
8. レポート課題

# 1 雜談的序

# 文学部と理学部の接点

- 「文学部か、いいなあ」
- 「え、どうしてです」
- 「思い残すことがないでしょう」

私は《文学部しかない》と決めていて、それが何のためとは思わなかった。しかし、勉強が、それ自体のためというより、ステップであるということも当然あるわけだ。いや大学という存在の《機能》を考えたら、そちらの方が自然なのかもしれない。

北村薫『六の宮の姫君』(東京創元社)



**All truths are easy to understand  
once they are discovered;  
the point is to discover them.**

Hale Telescope at the Palomar Observatory

Photograph of 200-inch Hale telescope and dome.

Image Credits: Peter Savel and Charles H. Cahill

**- Galileo Galilei**

2010年10月7日@カリフォルニア工科大学天文学教室講堂



*If the stars should appear one night in a thousand years,  
how would men believe and adore, and preserve for  
many generations the remembrance of the city of God?*

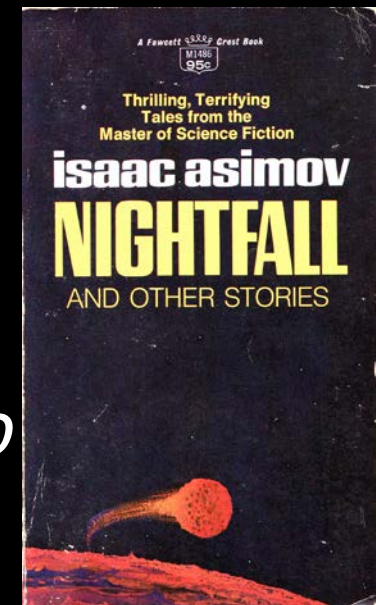
Ralph Waldo Emerson



2012年5月21日 7:34@安田講堂前広場

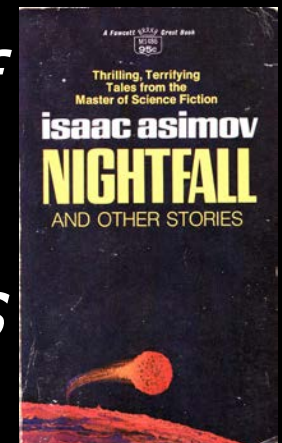
# アイザック アシモフ: Nightfall (1)

- *Lagash's own sun. Alpha, the one about which it revolved, was at the antipodes, as were the two distant companion pairs. The red dwarf Beta -- Alpha's immediate companion -- was alone, grimly alone.*
- *Aton's upturned face flushed redly in the sunlight. "In just under four hours," he said, "civilization, as we know it, comes to an end. It will do so because, as you see. Beta is the only sun in the sky."*



## アイザック アシモフ: Nightfall (2)

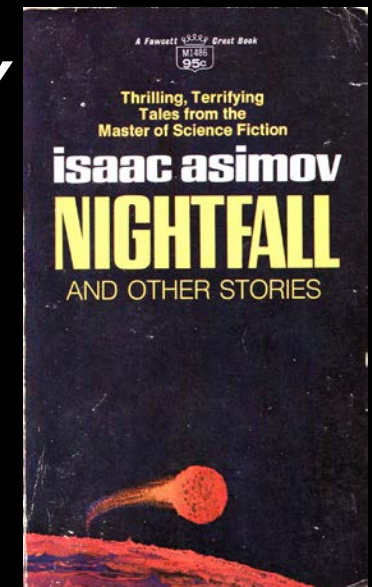
- *We've located series of civilizations, nine of them definitely, and indications of others as well, all of which have reached heights comparable to our own, and all of which, without exception, were destroyed by fire at the very height of their culture.*
- *And no one could tell why. All centers of culture were thoroughly gutted by fire, with nothing left behind to give a hint as to the cause.*





# アイザック アシモフ: Nightfall (3)

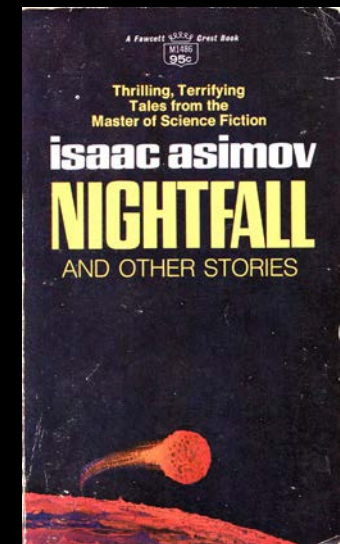
- *The Cultists said that every two thousand and fifty years Lagash entered a huge cave, so that all the suns disappeared, and there came total darkness all over the world! And then, they say, things called **Stars** appeared, which robbed men of their souls and left them unreasoning brutes, so that they destroyed the civilization they themselves had built up.*





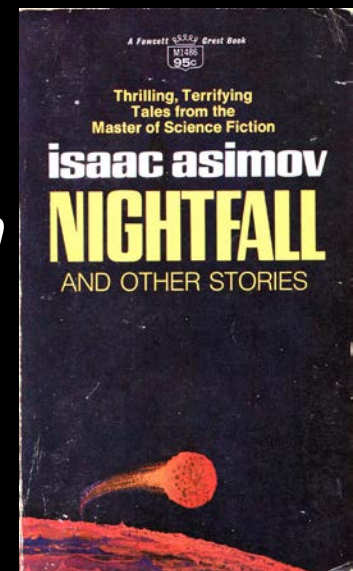
# アイザック アシモフ: Nightfall (4)

- *Beta! And it has been shown that the eclipse will occur only when the arrangement of the suns is such that Beta is alone in its hemisphere and at maximum distance, at which time the moon is invariably at minimum distance. **The eclipse that results, with the moon seven times the apparent diameter of Beta, covers all of Lagash and lasts well over half a day, so that no spot on the planet escapes the effects. That eclipse comes once every two thousand and forty-nine years.***



# アイザック アシモフ: Nightfall (5)


- “Light !” he screamed. Aton, somewhere, was crying, whimpering horribly like a terribly frightened child.
- *“Stars -- all the Stars -- we didn't know at all. We didn't know anything.”*
- *Someone clawed at the torch, and it fell and snuffed out. In the instant, the awful splendor of the indifferent Stars leaped nearer to them.*
- *On the horizon outside the window, in the direction of Saro City, a crimson glow began growing, strengthening in brightness, that was not the glow of a sun.*
- *The long night had come again.*



青空のムコウには何かがあるのか







「我々は何も知らなかった」  
でもこれですべて？

(すばる観測所、田中壺氏撮影)

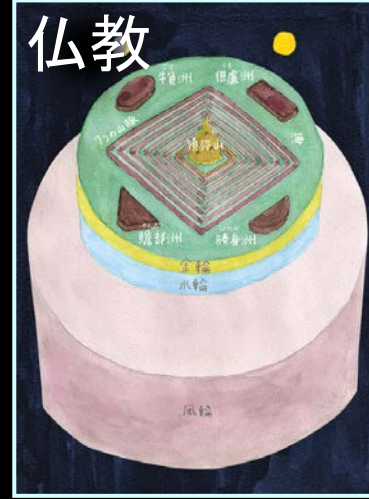
## 2 天文学・宇宙物理学 に残された課題



# 天文学の目標： 夜空のムコウの世界を探る

## ■ 我々の世界はどうなっているのか

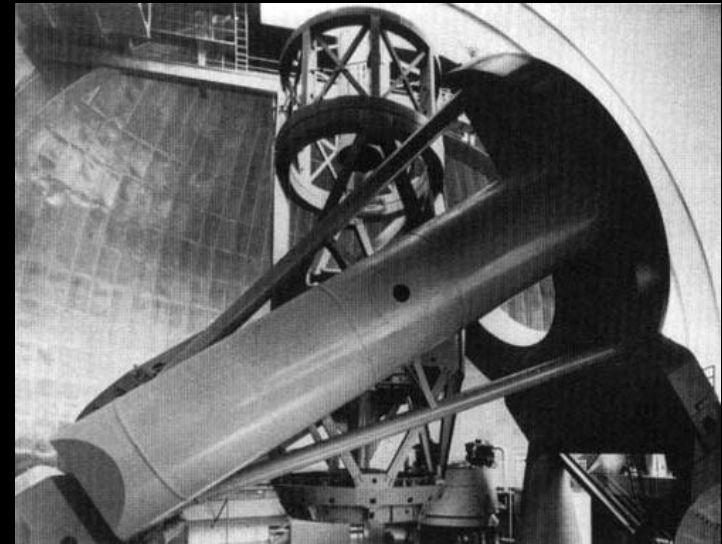
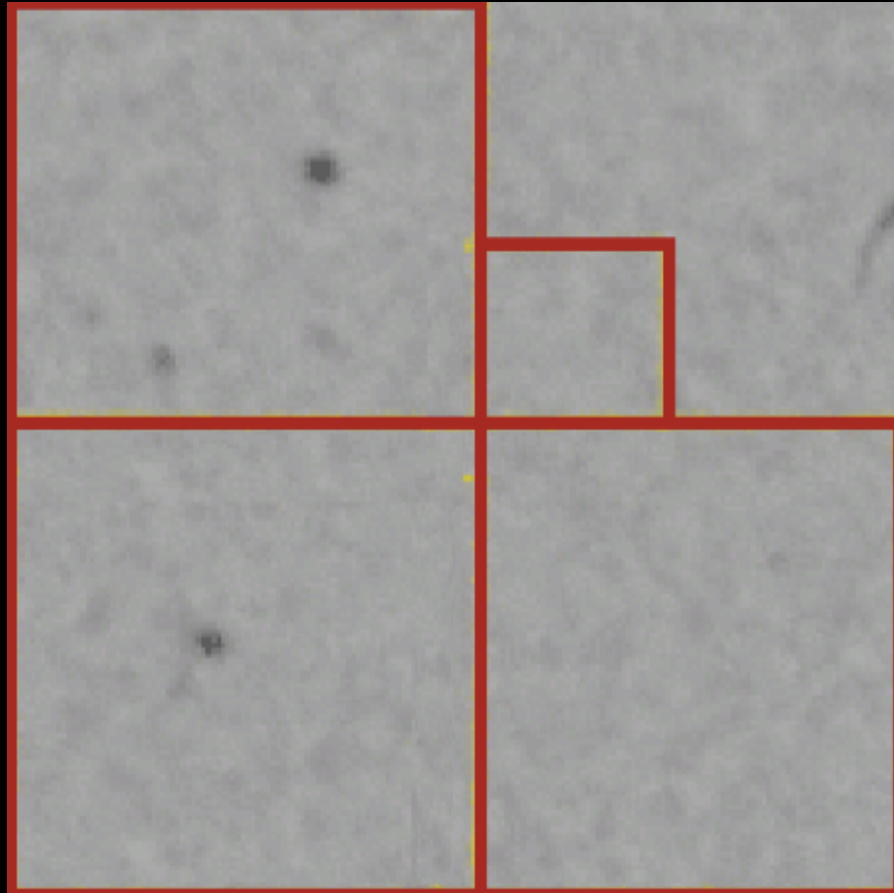
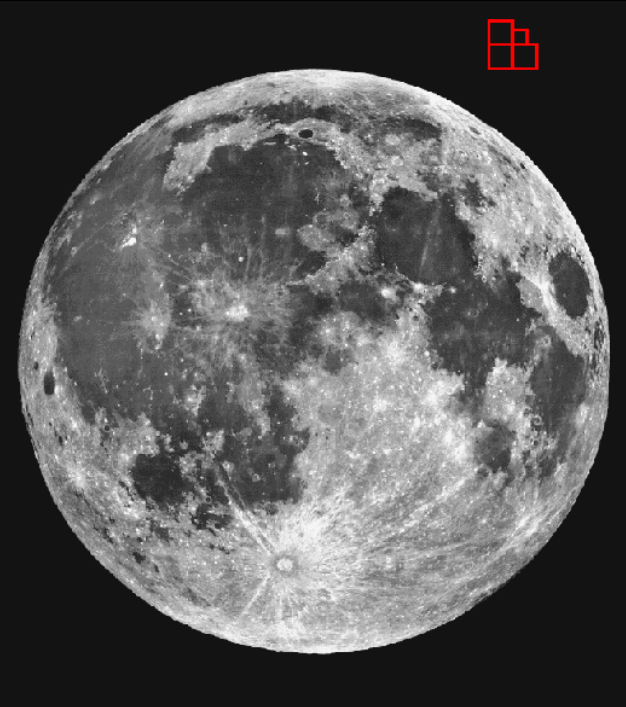
イラスト：羽馬有紗



## ■ 直接役に立つわけではなくとも人生を豊かにしてくれる“invaluable”な疑問に挑戦する

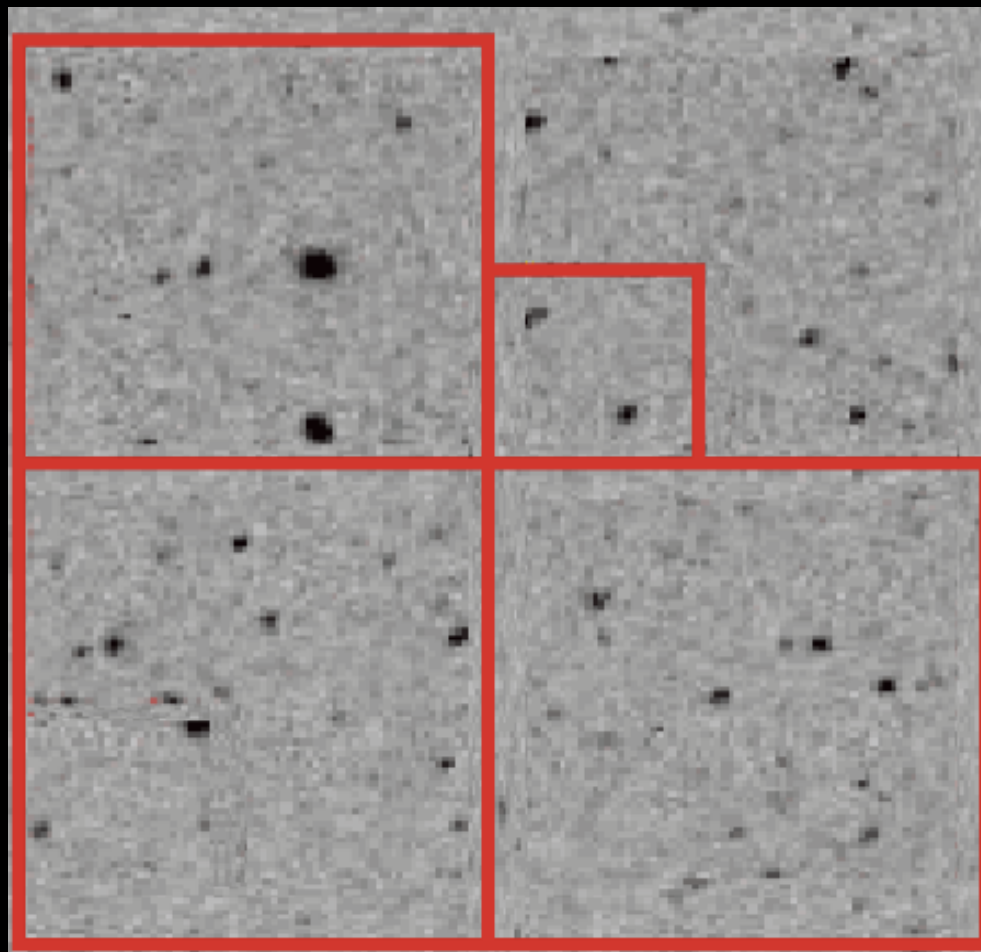
- 宇宙は何からできているか？（宇宙論）
- もう一つの地球はあるか？（太陽系外惑星）
- 生命はいかにして誕生したのか？（宇宙生物学）

# 宇宙を見る目の進歩 (1)

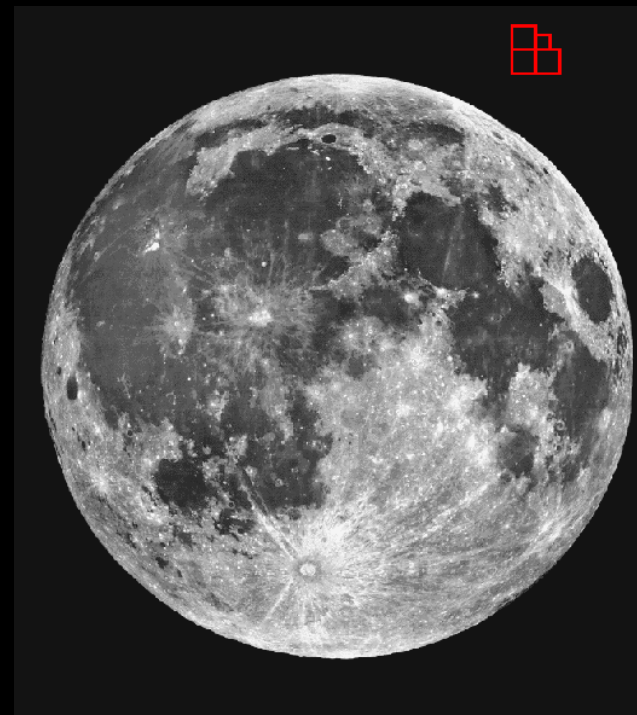


地上5m望遠鏡+写真乾板  
100万×人間の眼

# 宇宙を見る目の進歩 (2)

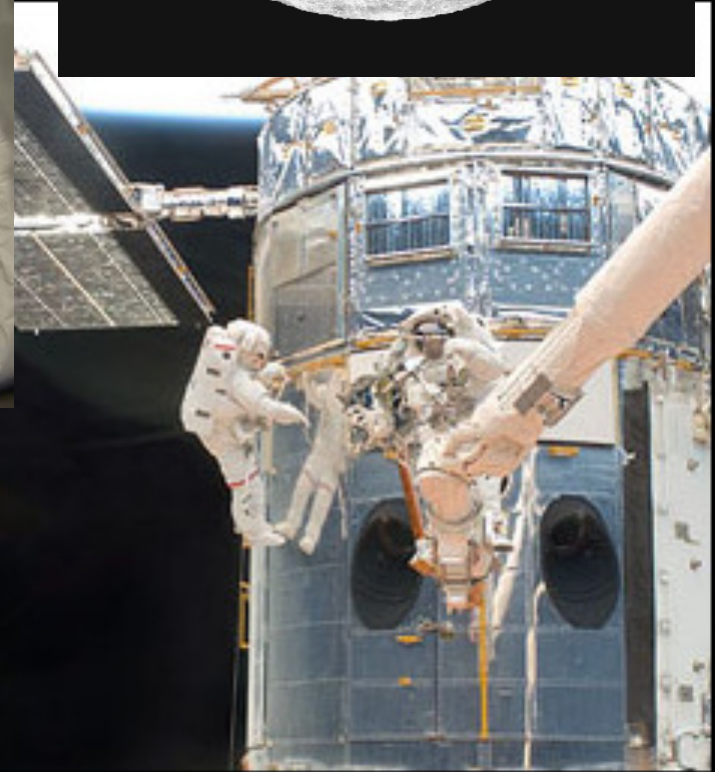
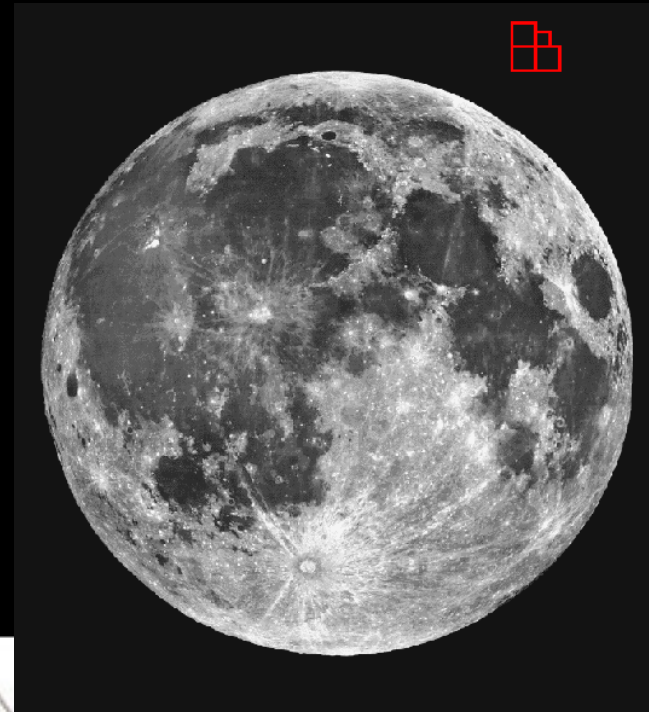


地上4m望遠鏡+CCD:  
100×写真乾板





# 宇宙を見る目の進歩 (3)



ハッブル宇宙望遠鏡



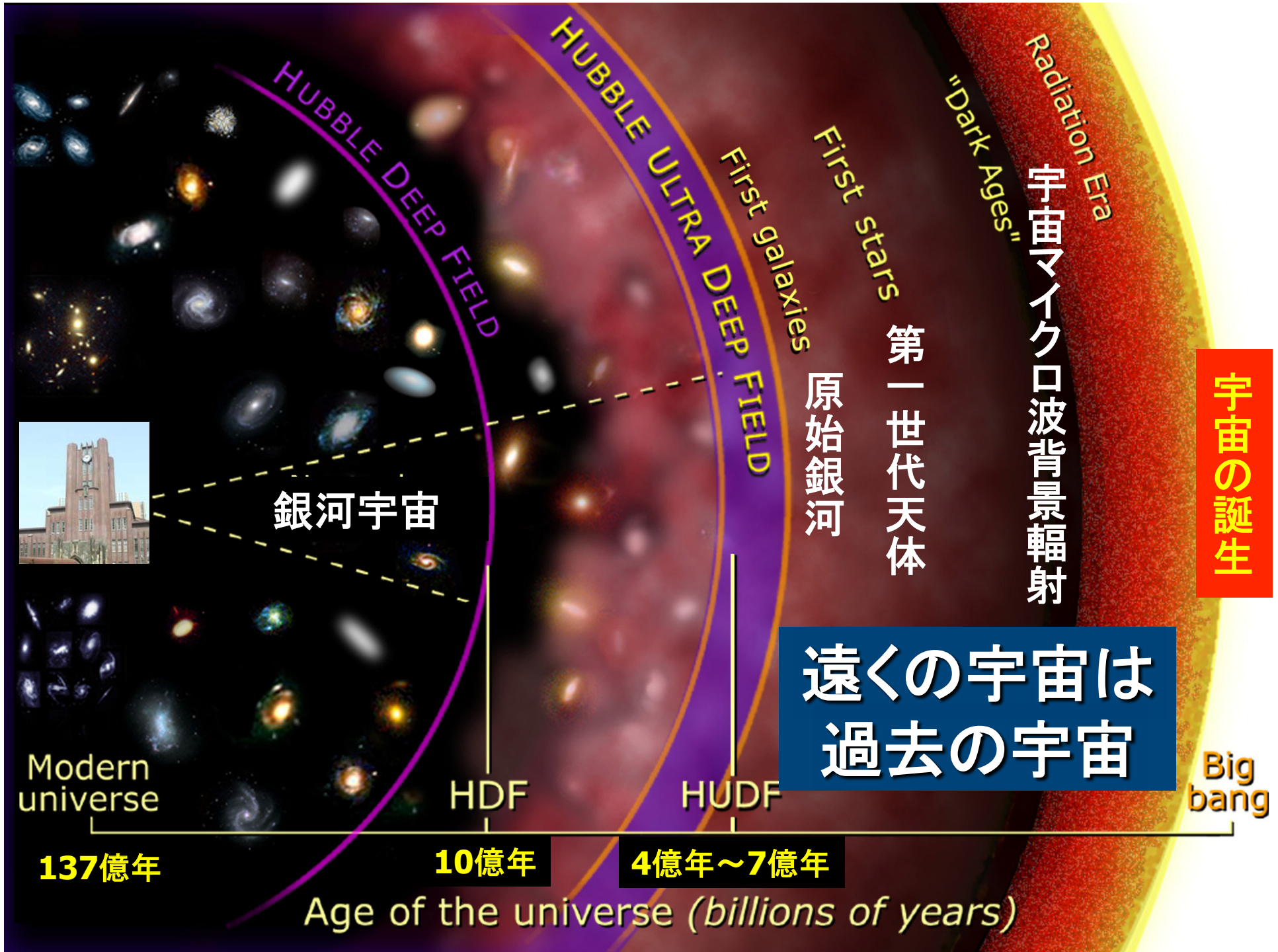
Hubble Deep Field  
ST ScI, STScI, January 15, 1996. R. Williams and the HDF Team (ST ScI and NASA)

HST WFC2

ハッブル宇宙望遠鏡+CCD:  
1000×地上望遠鏡







# 天文学・宇宙物理学研究対象と方法論： とにかく「いろいろ」

## ■ 対象別：「XX」の起源と進化

- 「XX」 = 惑星、太陽、恒星、星間物質、超新星、コンパクト天体、銀河系(天の川)、銀河、活動銀河核、銀河団、宇宙、時空、生命・文明

## ■ 波長別：「YY」天文学

- 「YY」 = 電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線、宇宙線、ニュートリノ、重力波

## ■ 手法別：

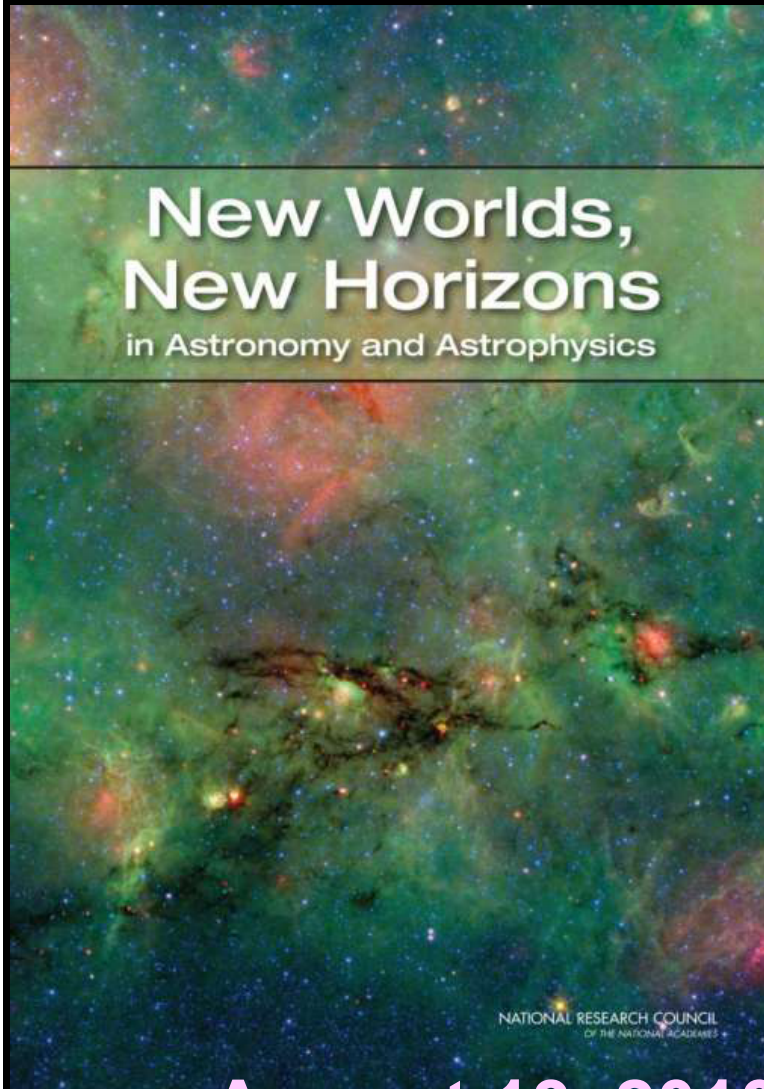
- 理論、観測(地上、気球、ロケット、衛星、地下)、実験、数値シミュレーション

# 宇宙もいろいろ・残された謎

- **宇宙の起源**
  - 素粒子物理学・量子重力理論の進展に依存
- **ダークマターの直接検出**
  - 天文学から高エネルギー物理学実験へ
- **ダークエネルギーの性質の解明**
  - 宇宙の加速膨張の起源
- **重力波の直接検出**
  - 一般相対論の検証から新しい天文学の窓へ
- **高エネルギー宇宙線の起源**
  - 粒子加速機構の解明、粒子線天文学の開拓
- **超新星爆発・ガンマ線バーストのメカニズム**
  - 大質量星進化の最終段階の理解
- **第一世代天体の発見・起源・進化**
  - 宇宙の果てを見通す、天体の起源、元素の起源
- **恒星・惑星の起源**
  - 星・惑星・コンパクト天体の形成と進化
- **地球型系外惑星の発見から宇宙生物学へ**
  - 第二の地球、生命・文明の起源、生物の普遍性



# Astro2010: decadal survey



August 13, 2010

[http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA\\_049810](http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810)

## ■ *Cosmic Dawn*

- 宇宙の夜明け: 第一世代天体・ブラックホールの探索

## ■ *New Worlds*

- 新世界: 近傍の居住可能惑星の探索

## ■ *Physics of the Universe*

- 宇宙の物理: 宇宙を支配する科学法則の理解

# The Science Frontier: discovery areas

and principal questions (1)

## ■ Discovery areas

- Identification and characterization of nearby habitable exoplanets 第二の地球
- Gravitational wave astronomy 重力波天文学
- Time-domain astronomy 突発・激変天体  
近地球接近天体
- Astrometry 銀河系・宇宙の精密測量
- The epoch of reionization 宇宙の再電離



# The Science Frontier: discovery areas and **principal questions (2)**

## ■ **Questions:**

- How did the universe begin?
- What were the first objects to light up the universe and when did they do it?
- How do cosmic structures form and evolve?
- What are the connections between dark and luminous matter?
- What is the fossil record of galaxy assembly and evolution from the first stars to the present?
- How do stars and black holes form?
- How do circumstellar disks evolve and form planetary systems?
- How do baryons cycle in and out of galaxies and what do they do while they are there?
- What are the flows of matter and energy in the circumgalactic medium?

# The Science Frontier: discovery areas and **principal questions (3)**

## ■ **Questions:**

- What controls the mass-energy-chemical cycles within galaxies?
- How do black holes work and influence their surroundings?
- How do rotation and magnetic fields affect stars?
- How do massive stars end their lives?
- What are the progenitors of Type Ia supernovae and how do they explode?
- How diverse are planetary systems and can we identify the telltale signs of life on an exoplanet?
- Why is the universe accelerating?
- What is dark matter?
- What are the properties of the neutrinos?
- What controls the masses, spins and radii of compact stellar remnants?

# 湯川学の科学観

東野圭吾『真夏の方程式』 文藝春秋社 p.411

- この世界には現代科学では解けない謎がいくつもある。しかし科学の発展と共に、いずれも解かれていくだろう。では科学に限界はあるのだろうか。あるとすれば、何がそれを生み出すのだろうか
- それは人間だ。人間の頭脳だ。たとえば数学の世界では、何か新しい理論を発見した時には、正しいかどうかをほかの数学者に検証してもらう。だが発見される理論は益々高度化していく。そうすると当然検証できる数学者もかぎられてくる。ではもし理論が難解すぎて、ほかの誰も理解できなかつたらどうだろう。それが理論として定着するには、別の天才が現れるまで待たねばならない。人間の頭脳が科学の限界を生み出すというのはそういう理由からだ。



# 湯川学の人生観

東野圭吾『真夏の方程式』 文藝春秋社 p.412

- **どんな問題にも答えは必ずある。** だけどそれをすぐに導き出せるとはかぎらない。人生においてもそうだ。今すぐには答えを出せない問題なんて、これから先、いくつも現れるだろう。そのたびに悩むことには価値がある。しかし焦る必要はない。答えを出すためには、自分自身の成長が求められている場合も少なくない。だから人間は学び、努力し、自分を磨かなさ



# 3 太陽系外惑星探査の 歴史と現状

# 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？

## ■ 宇宙の果てと太陽系外惑星

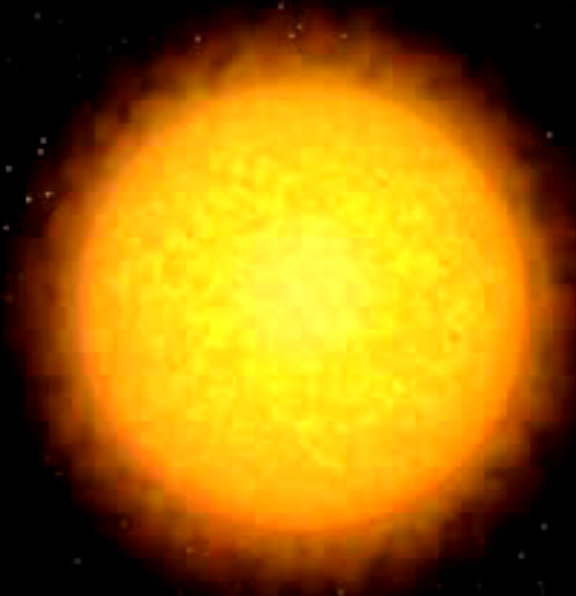
### ■ 大望遠鏡は「暗い」天体を観測できる

- 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

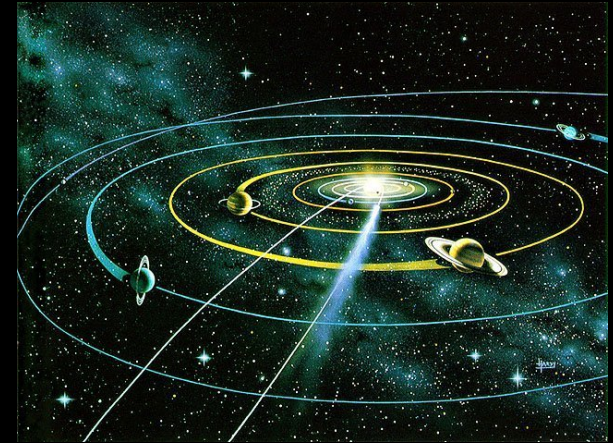
⇒ 銀河内にある系外惑星



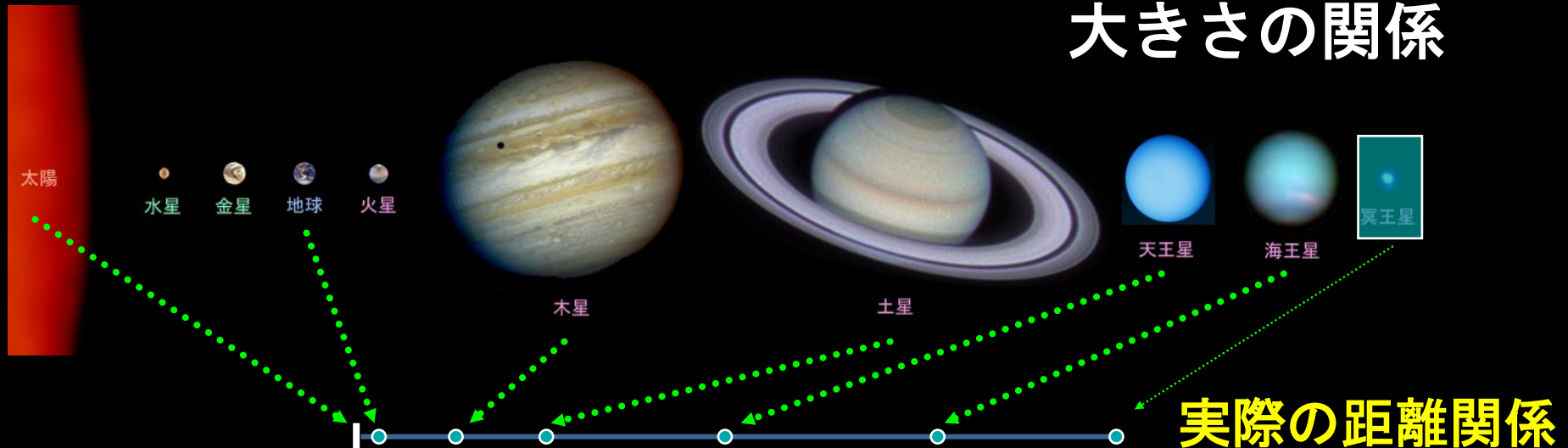


# 太陽系惑星のおさらい

- 岩石惑星：地球、火星、金星、水星
- ガス惑星：木星、土星
- 氷惑星：天王星、海王星
- 準惑星/太陽系外縁天体：冥王星など
- 太陽は惑星ではなく恒星(星)
  - 核融合で自らエネルギーを生成
  - 惑星≠星 (planet ≠ star)



## 大きさの関係



# 太陽系惑星から太陽外惑星へ

- かつての世界＝太陽系：水金地火木土
- 哲学的世界観
  - 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  
(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)
  - 宇宙は無限であり、太陽系以外にも無数の惑星がある  
(ジョルダノー・ブルーノ：1548－1600、その『罪』で火刑)
- わが太陽系の拡大
  - 1781年：天王星の発見
  - 1846年：海王星の発見
    - 天王星の観測＋ニュートン力学によって予測され発見
  - 1930年：冥王星の発見
    - 海王星の観測＋ニュートン力学によって予測され発見されたのだが、実は海王星の観測データの解釈が間違っていたため偶然の発見であると考えられているらしい
- 1995年：初めての太陽系外惑星の発見

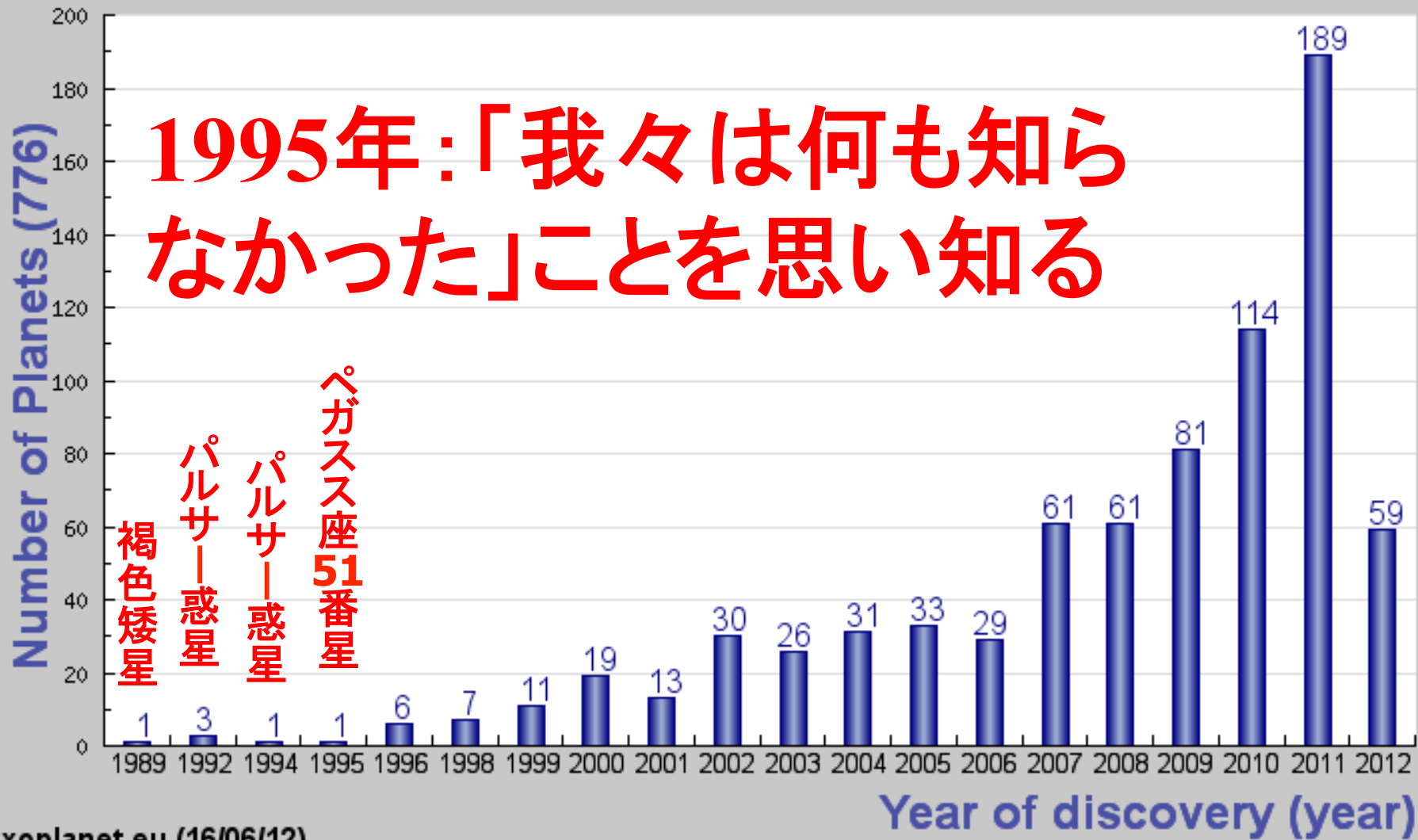
# 太陽系外惑星発見史

- 1963年 バーナード星に惑星を発見！（ピーター・バンデキャンプ）と報告したが、後に間違いとわかる
- 1995年8月：カナダのゴードン・ウォーカーのグループが12年にもわたる観測の結果、21個の恒星のまわりに巨大惑星は存在しないことを発表
- 1995年10月：スイスのミシェル・メイヨールとその学生デディエ・ケロズが太陽に似た恒星ペガサス座51番星を周期4日で公転している巨大惑星を発見
  - 前年4月に新装置で探査開始したばかり！
  - 直後に、過去7年惑星探査を続けていた、アメリカのジェフ・マーシーとポール・バトラーらがこのデータを確認
- 2011年6月16日時点で776個の系外惑星



# 太陽系外惑星の発見年表

Number of planets by year of discovery



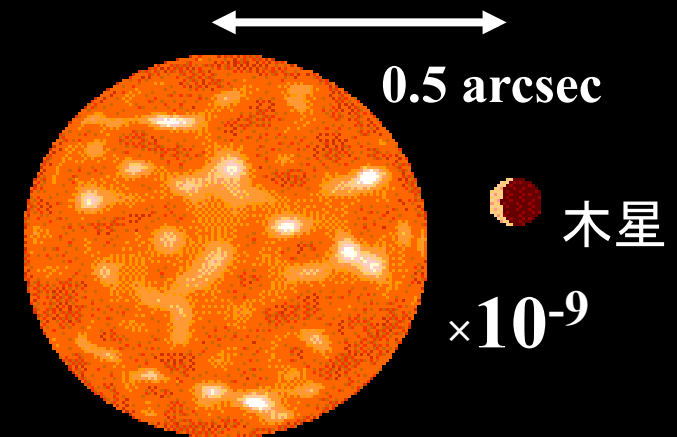
2012年6月16日時点 <http://exoplanet.eu/>

# 惑星は直接見えるか？

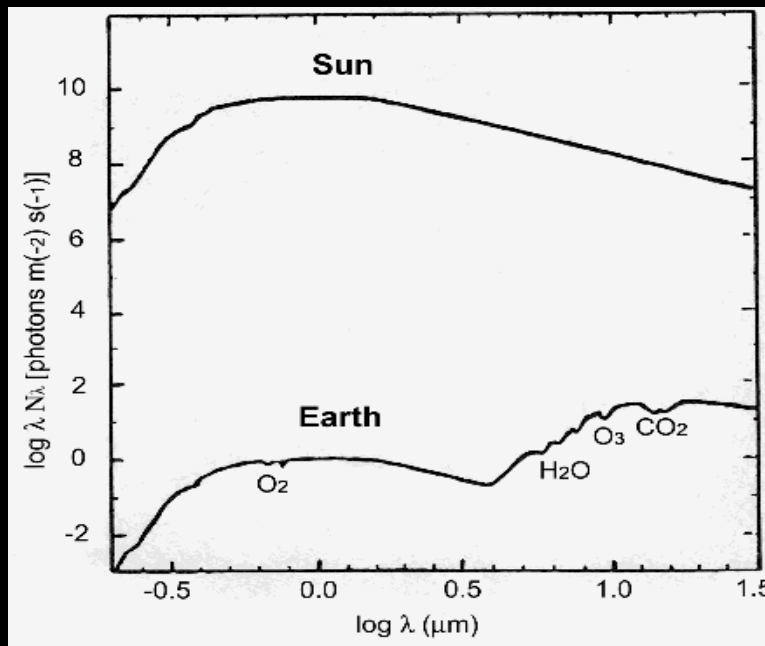
## 30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級 (可視域)

主星との角距離: 0.5秒角



太陽

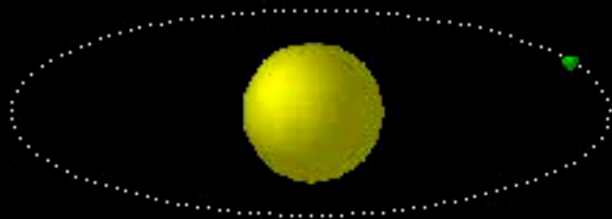


地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能  
(だった: 後述)

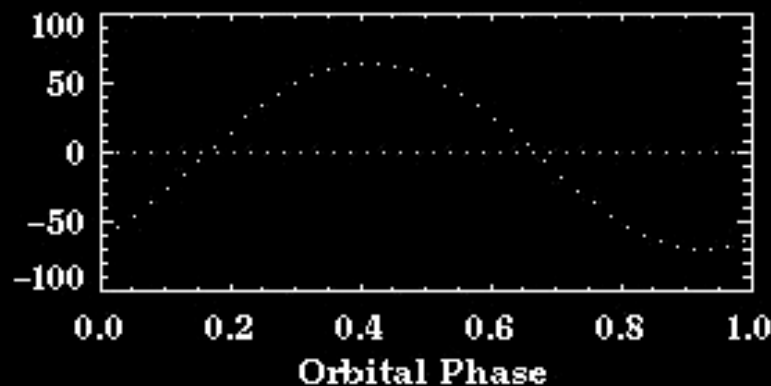
# ではどうやって見つけたのか？

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]



S.G. Korzennik (CfA, © 1997)

## ■ ドップラー法

- 中心星の速度が毎秒数十メートル程度、周期的に変動(←ニュートン力学)

## ■ トランジット法

- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることで星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

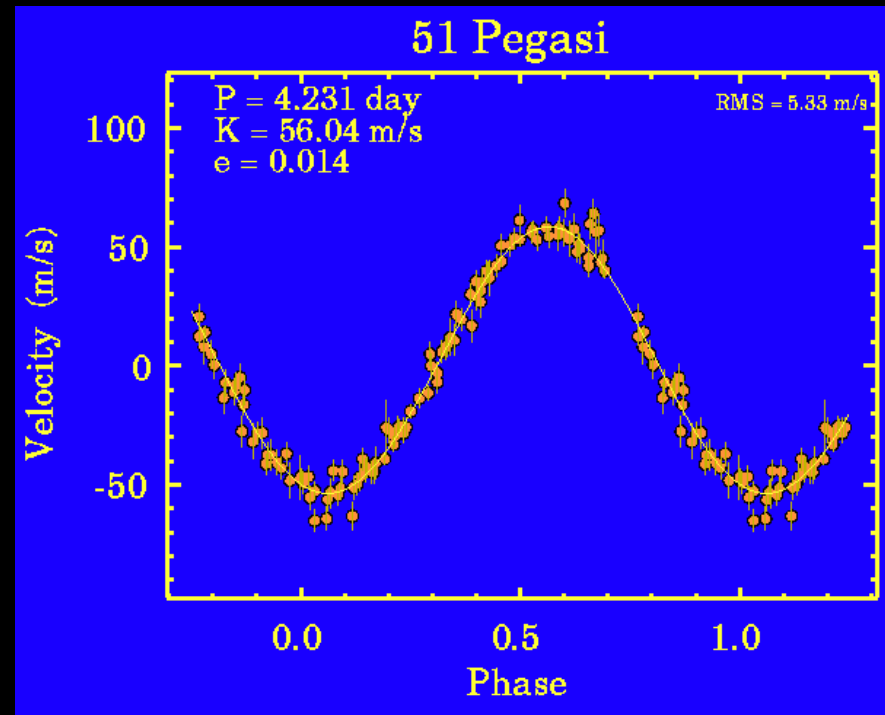
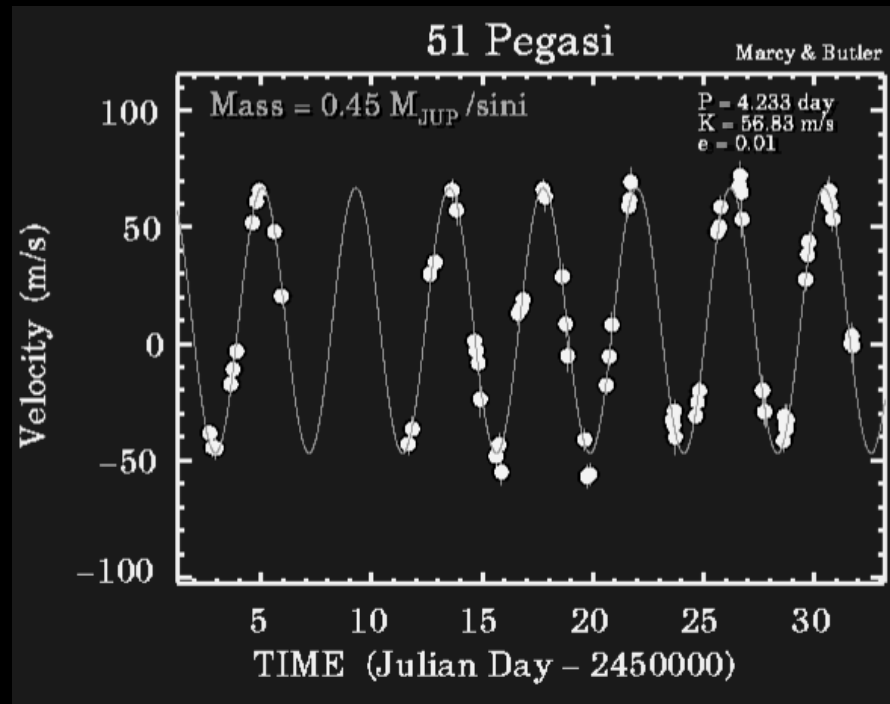


# ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！

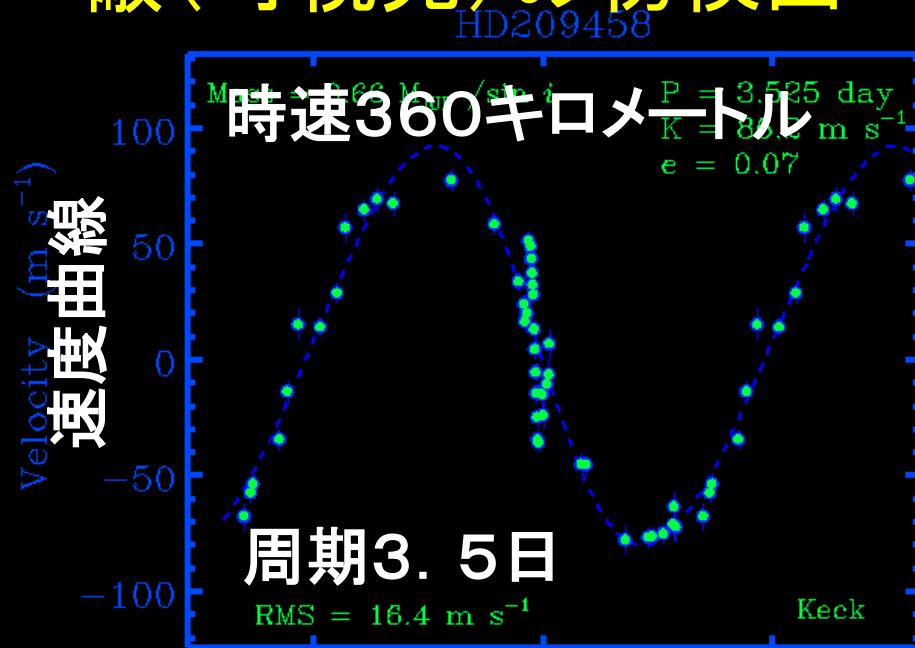


ミッシェル・メイヨール



# 初めてのトランジット惑星HD209458b

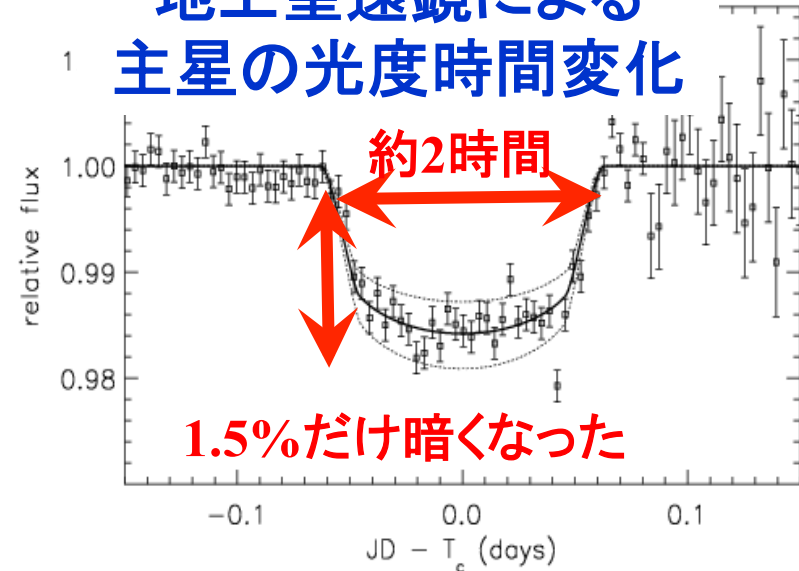
- 速度変動のデータに合わせた惑星による主星の掩蔽(可視光)の初検出



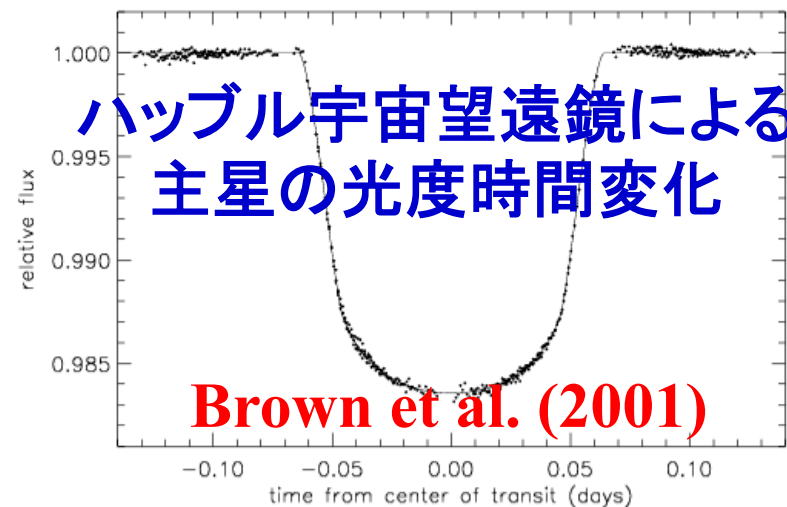
地上望遠鏡による  
主星の速度時間変化

Henry et al. (1999), Charbonneau et al (2000)

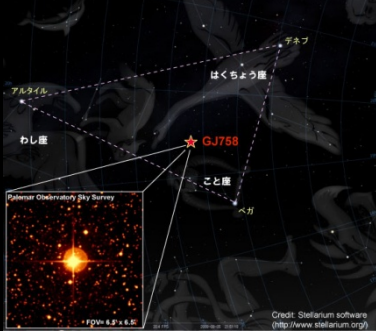
地上望遠鏡による  
主星の光度時間変化



ハッブル宇宙望遠鏡による  
主星の光度時間変化

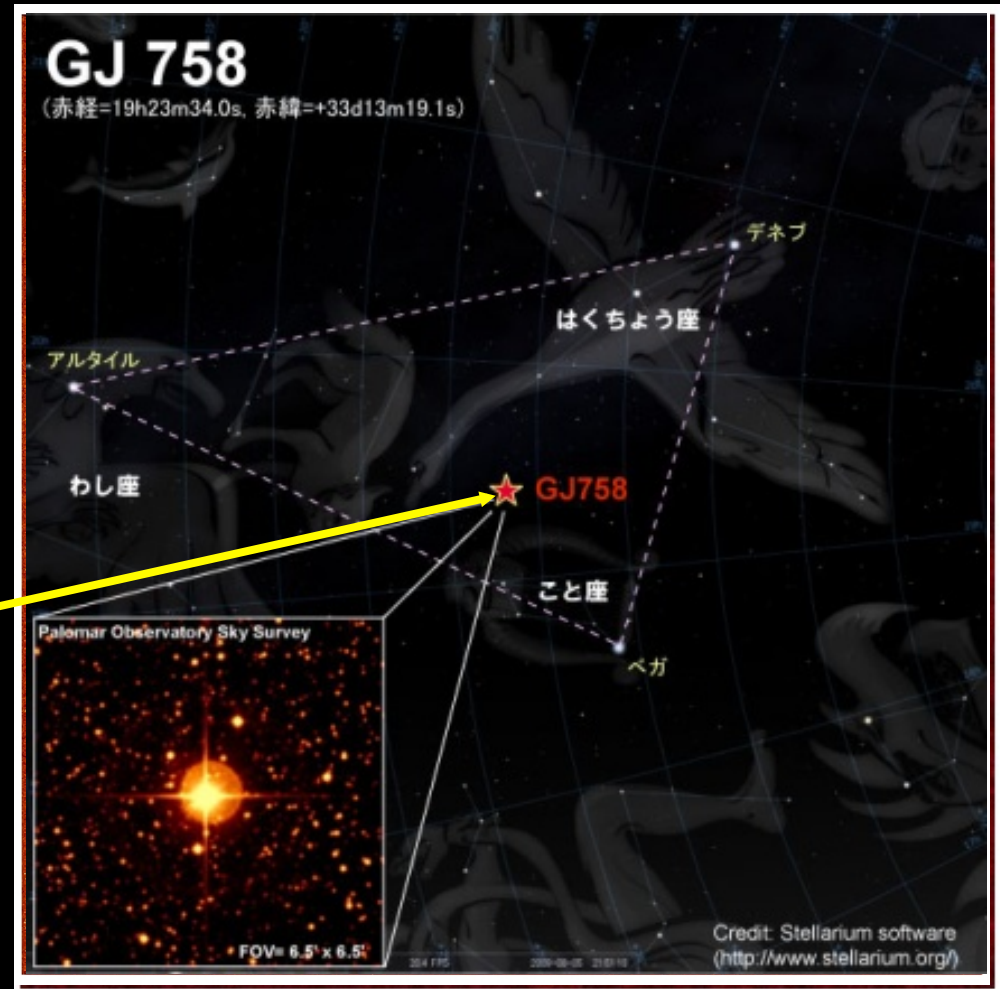


GJ 758  
(赤経=19h23m34.0s, 赤緯=+33d13m19.1s)



# 惑星を直接撮像することも可能になり始めてきた(国立天文台、田村元秀氏ら)

- こと座の方向
- 距離: 50光年
- G9型恒星
  - 可視光で6等星
  - 質量: 0.97太陽質量
- 明るい中心星の影響を抑える観測およびデータ解析法を駆使



中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ  
(スペckルノイズ)

惑星の放つ熱が波長1.6ミクロンの  
赤外線として見えている(反射光ではない)  
また、白が明るく、黒が暗い意味の色(実際の色ではない)



# 発見された系外惑星（候補）の統計

| 検出法        | 惑星  | 惑星系 | 多重惑星系 |
|------------|-----|-----|-------|
| ドップラー法     | 716 | 571 | 96    |
| トランジット法    | 239 | 205 | 30    |
| 重力レンズ      | 16  | 15  | 1     |
| 直接撮像（褐色矮星） | 31  | 27  | 2     |
| パルサータイミング  | 15  | 12  | 2     |
| 総計         | 778 |     |       |

2012年6月16日時点 <http://exoplanet.eu/>

# 惑星大気成分の 初検出 (2001年):

トランジット惑星

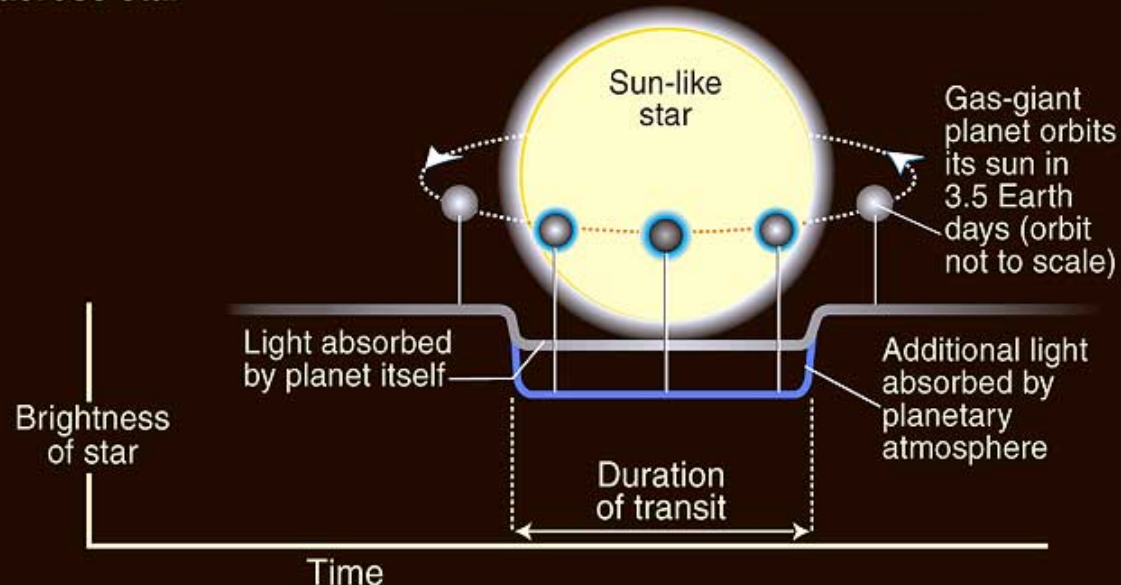
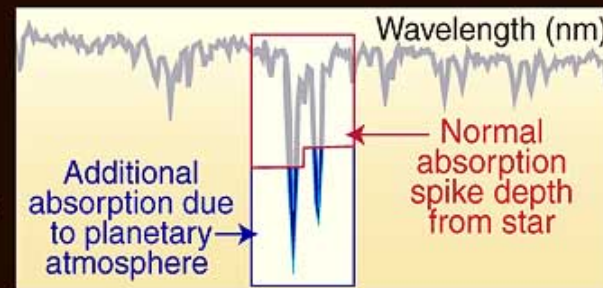
HD209458b

+ハッブル望遠鏡

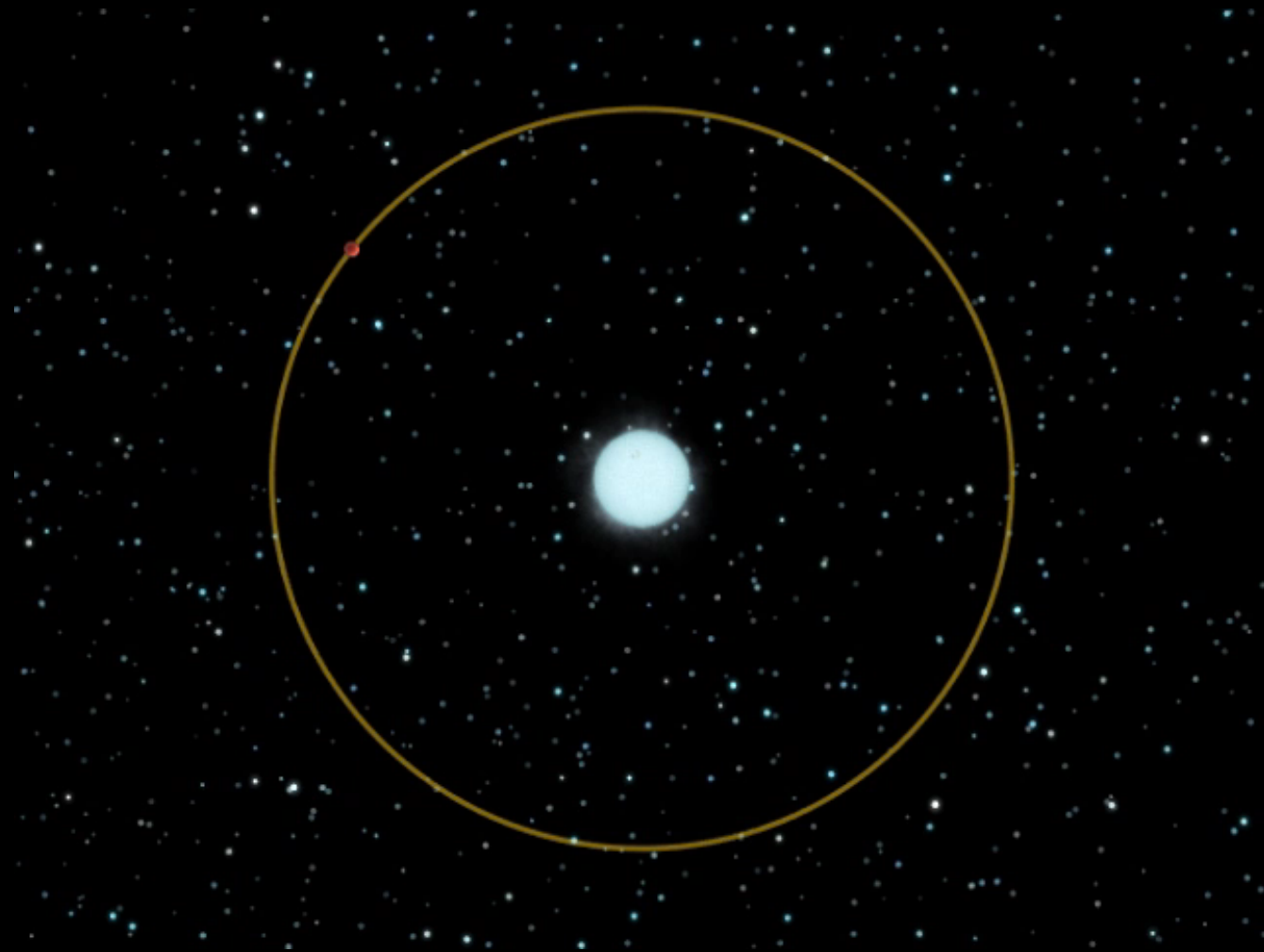
[http://hubblesite.org/  
newscenter/archive/  
2001/38/](http://hubblesite.org/newscenter/archive/2001/38/)

- 2000年 系外惑星HD209458bの食を検出
  - 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 (Charbonneau et al. 2001)

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

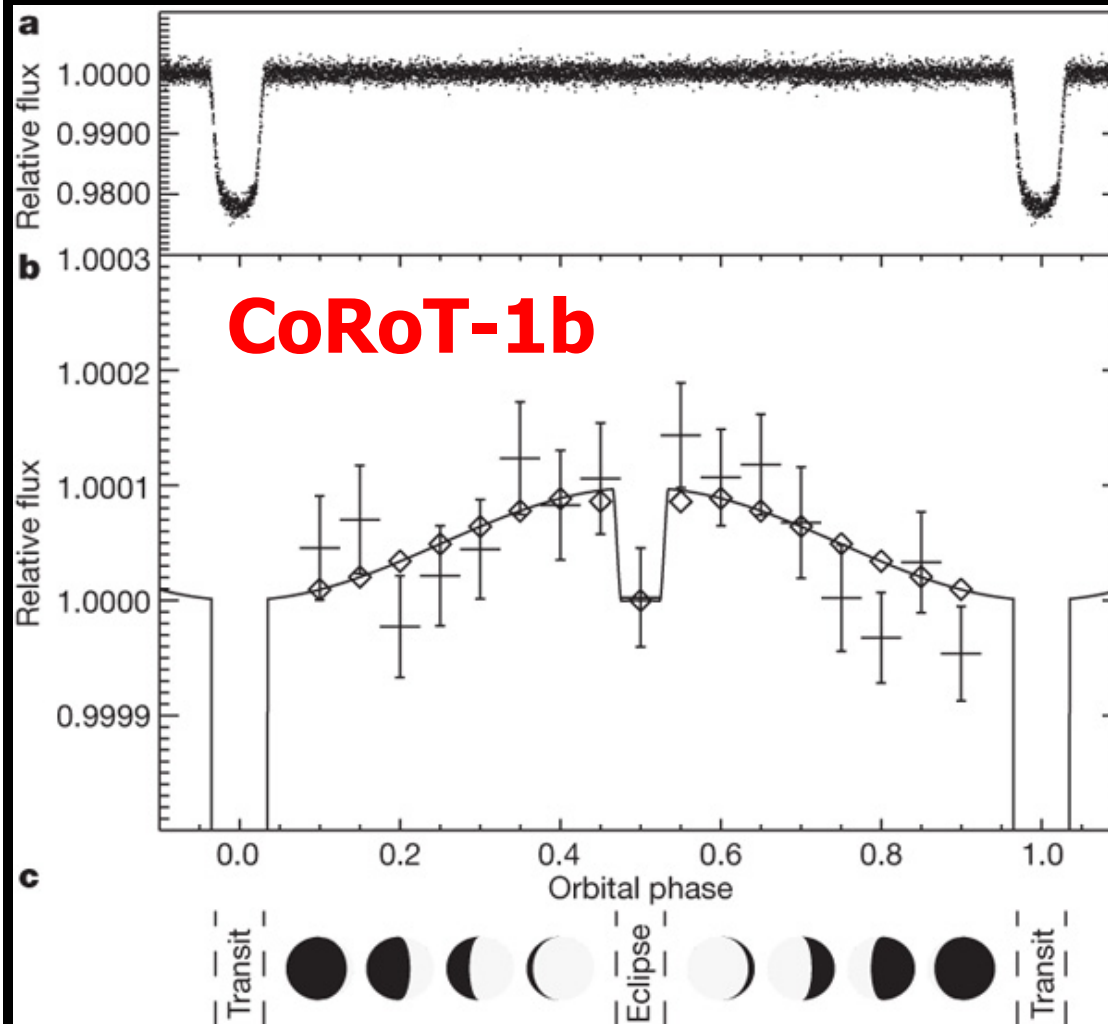


惑星からの赤外線輻射(スピッツァー衛星)  
Secondary eclipse of HD209458b



<http://www.spitzer.caltech.edu/Media/releases/ssc2005-09/release.shtml>

# 惑星の反射光の検出

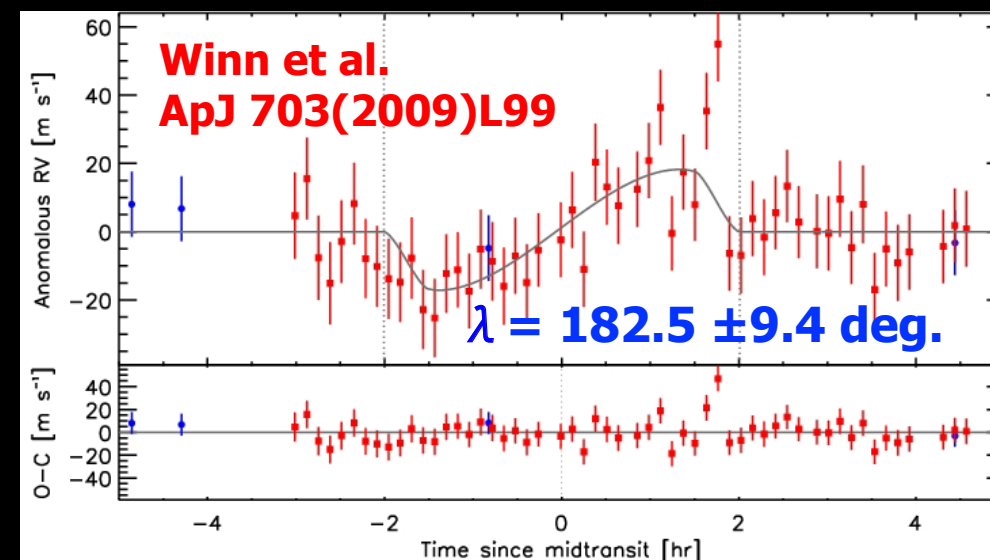
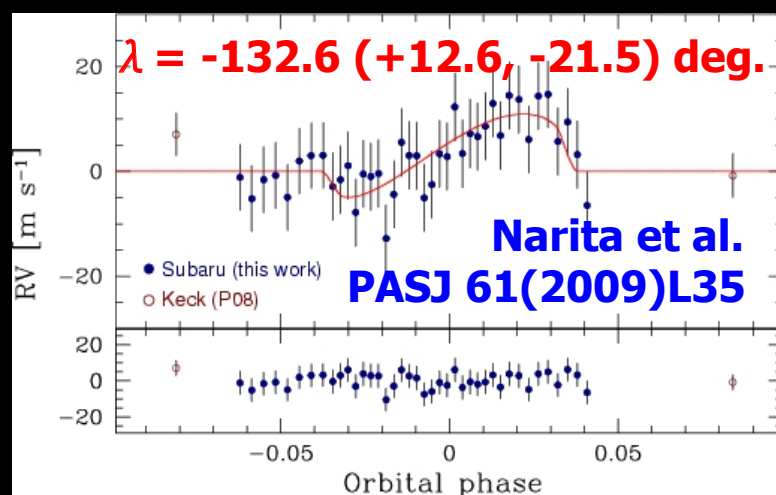
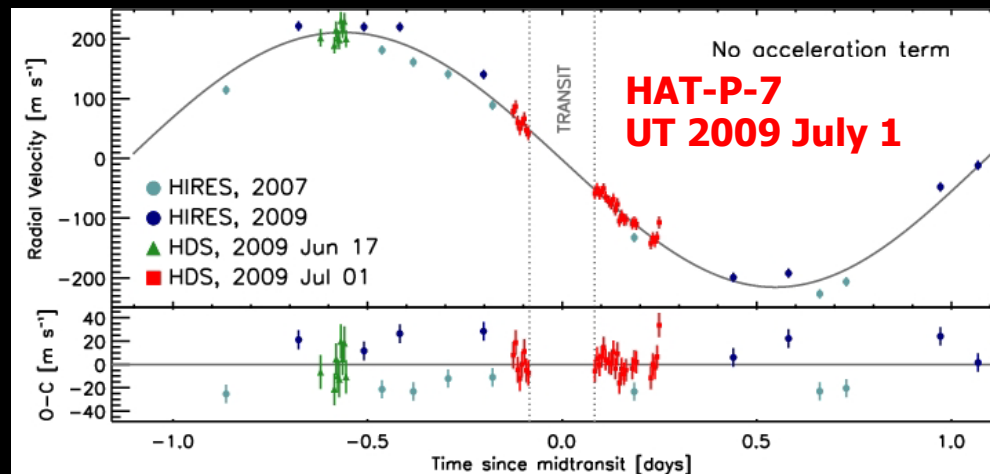
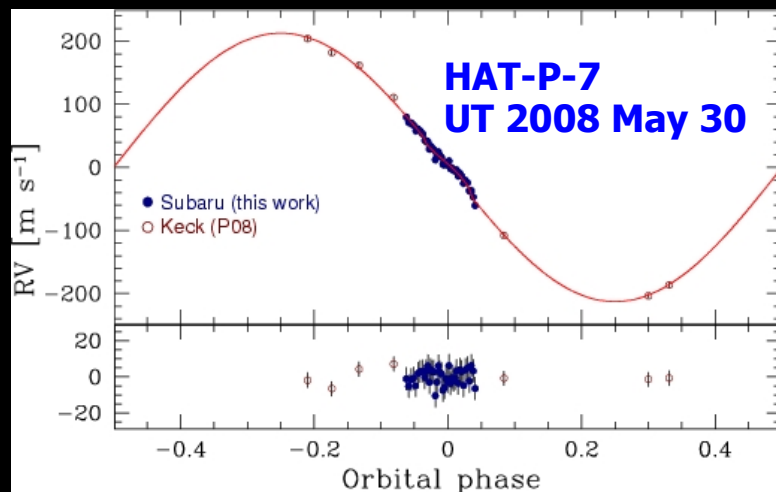


- CoRoT-1b: トランジット惑星(周期=1.5日)
- Convection, Rotation and planetary Transit (2006年12月27日打ち上げ)
- 55日間測光モニター
  - 反射光(7100Å)検出
  - 表面温度 2430K
  - $0.02 < \text{albedo} < 0.2$

Snellen, de Mooji & Albrecht: Nature 459(2009)543



# 中心星の自転と逆向きに公転する惑星



- とともにすばる望遠鏡の成果
- 起源は謎、惑星形成・進化モデルに大きなインパクト

# 4 トランジット惑星専用探査機 ケプラーの成果

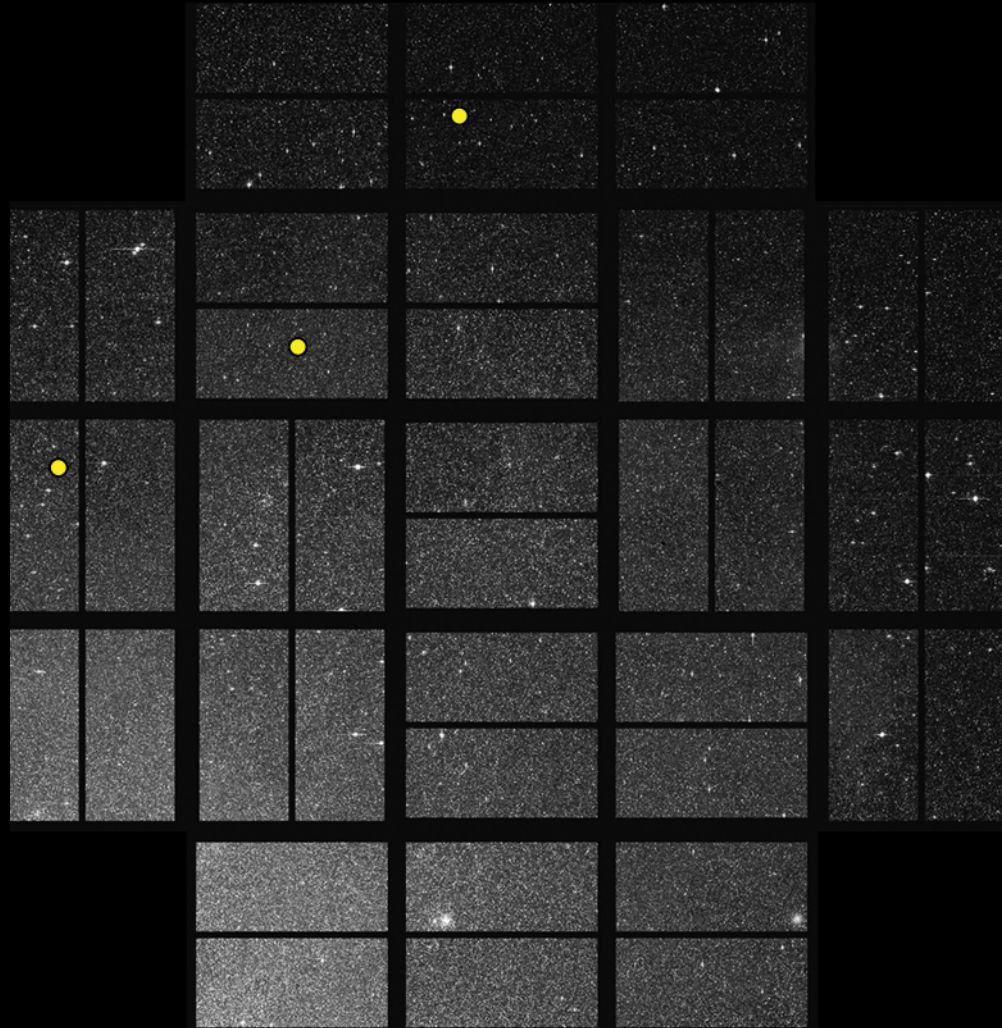
ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)  
トランジット(食を起こす)惑星の測光サーベイ  
地球型ハビタブル惑星の発見をめざす



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

# ケプラー衛星の観測領域

- 白鳥座・琴座付近の100平方度
  - 全天の400分の1
- 以前から知られていた惑星は3個（黄色の点）
- 4年間繰り返しモニター



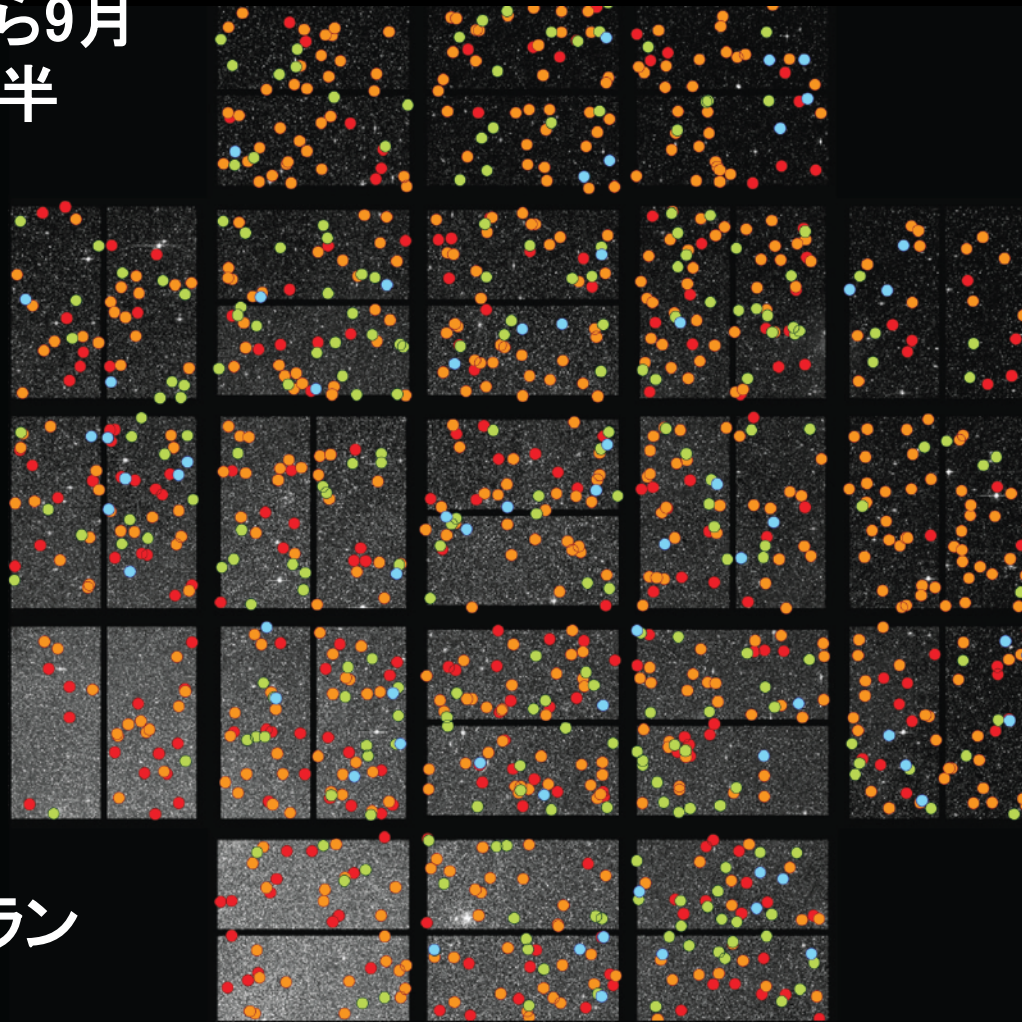


# 新たに発見された惑星候補

- 2009年5月2日から9月16日までの4ヶ月半

- Earth-size
- Super-Earth size  
1.25 - 2.0 Earth-size
- Neptune-size  
2.0 - 6.0 Earth-size
- Giant-planet size  
6.0 - 22 Earth-size

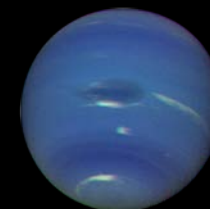
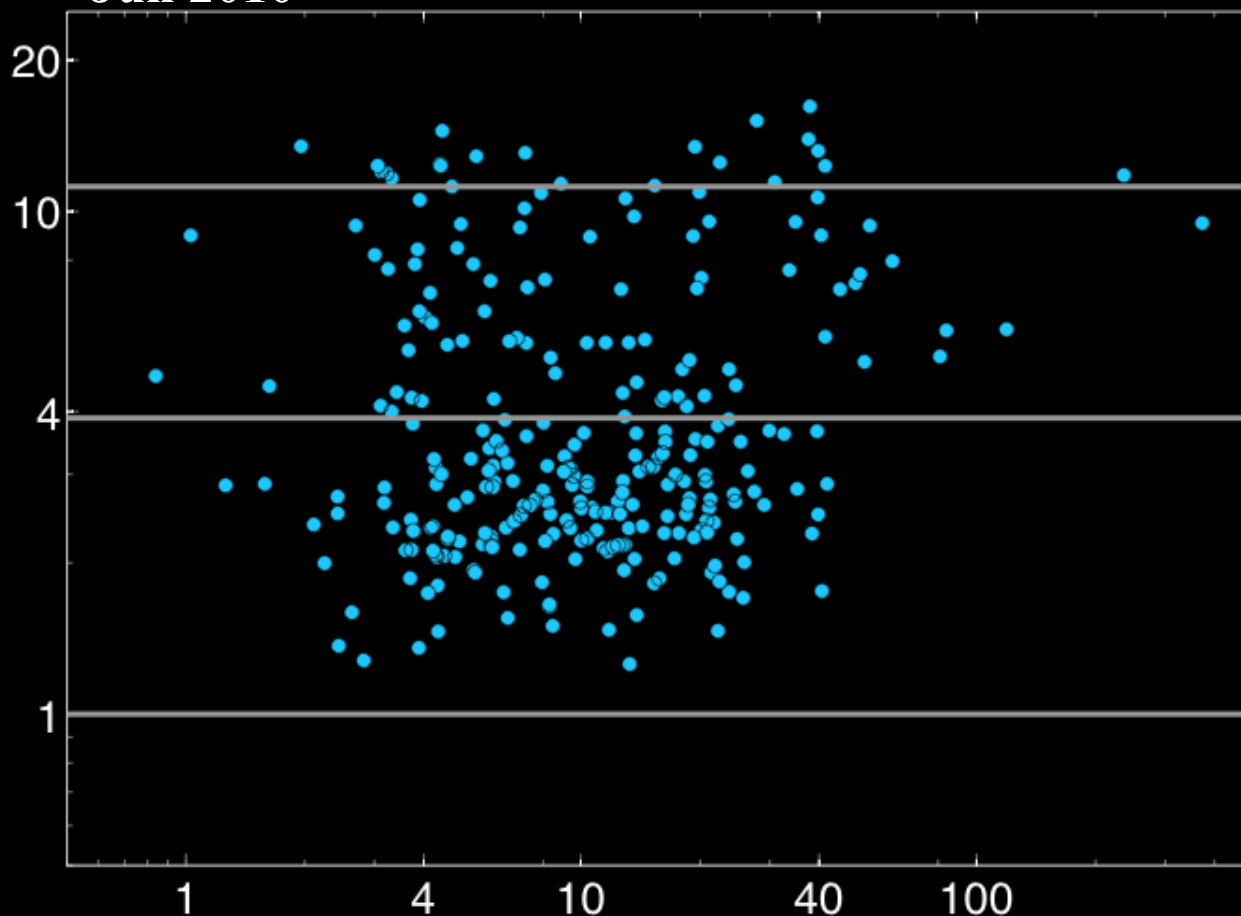
- 1200個以上のトランジット惑星候補



# 2010年6月時点での惑星候補

● Jun 2010

惑星半径 / 地球半径

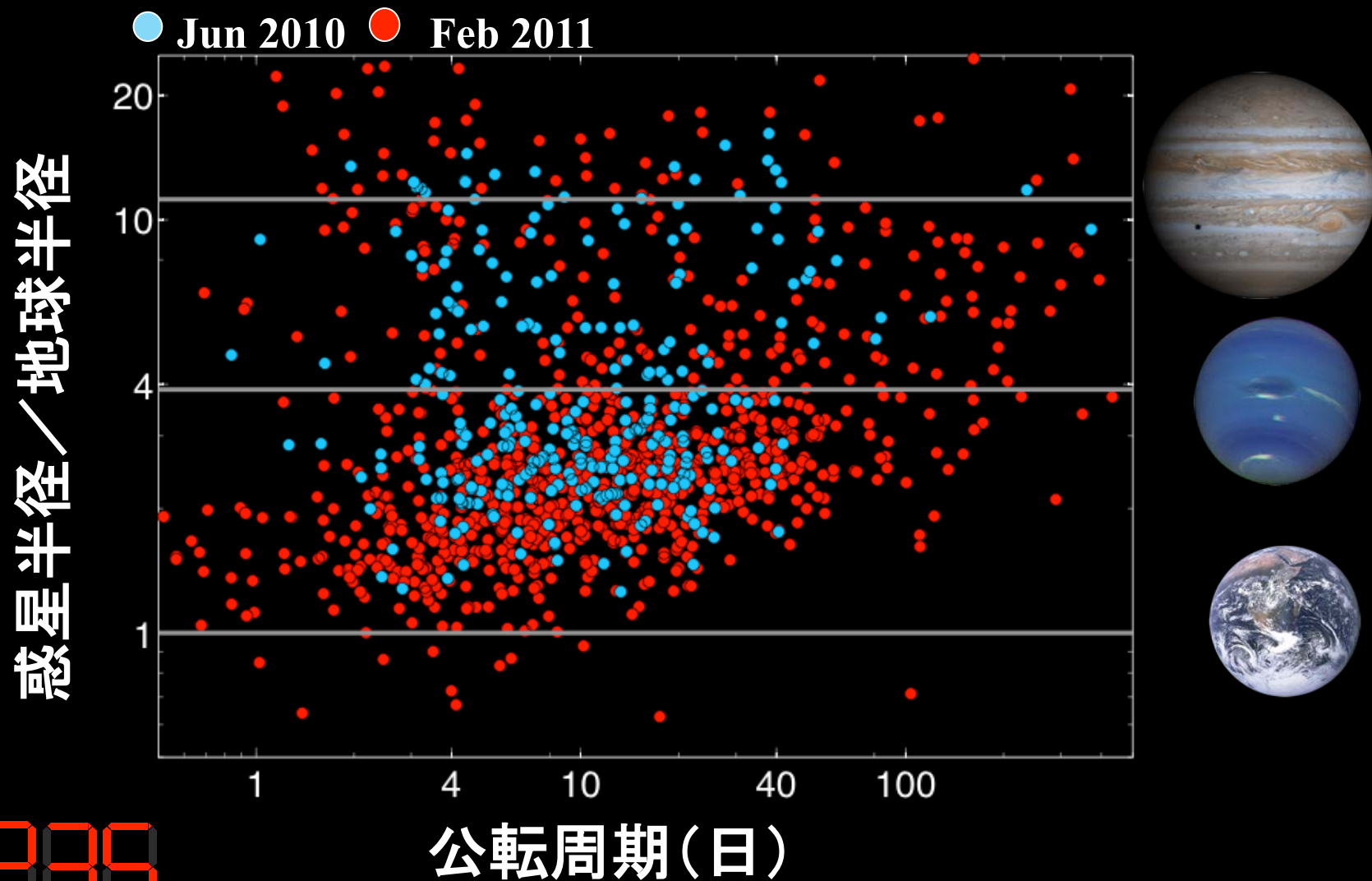


8888

公転周期(日)

Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

# 2011年2月時点での惑星候補

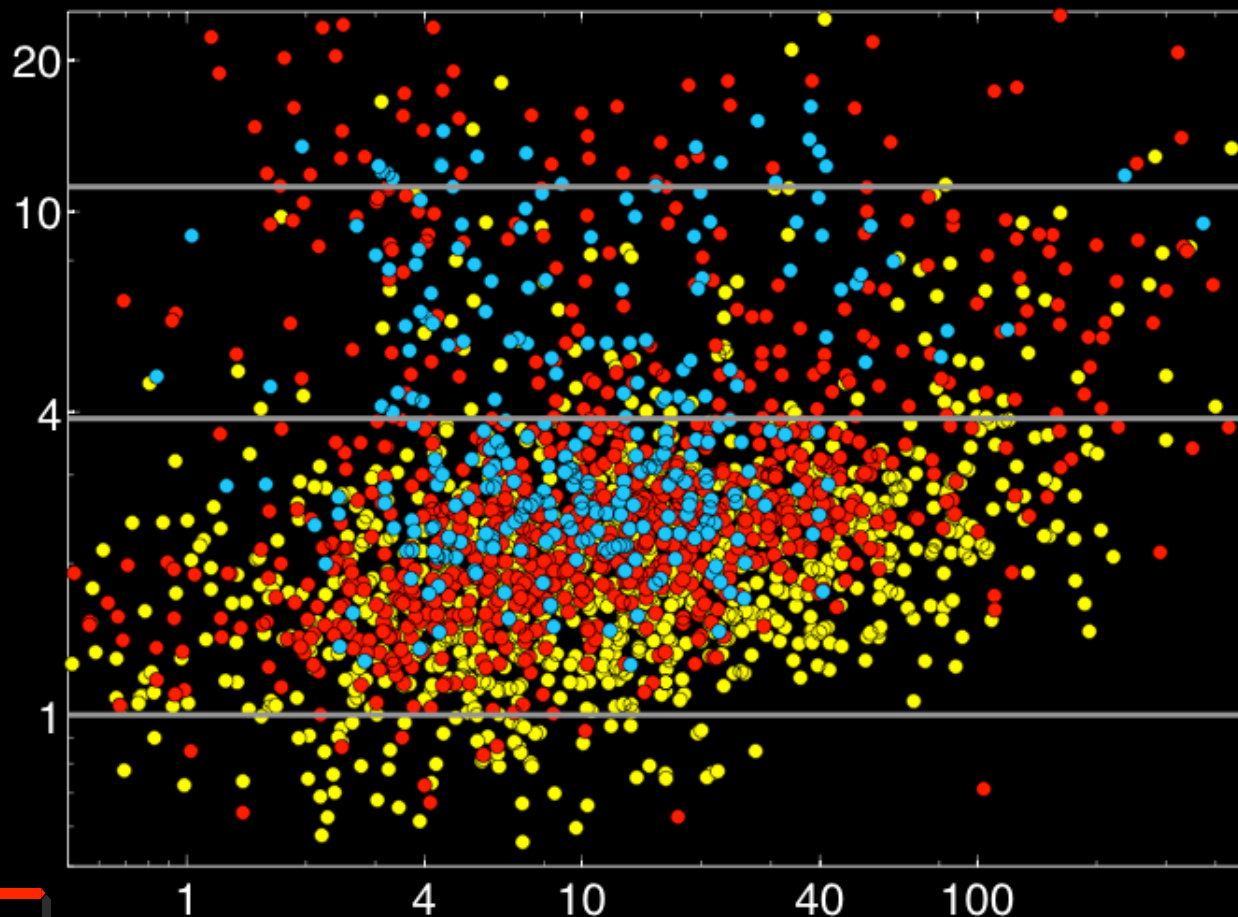


Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

# 2011年12月時点での惑星候補

● Jun 2010 ● Feb 2011 ● Dec 2011

惑星半径 / 地球半径

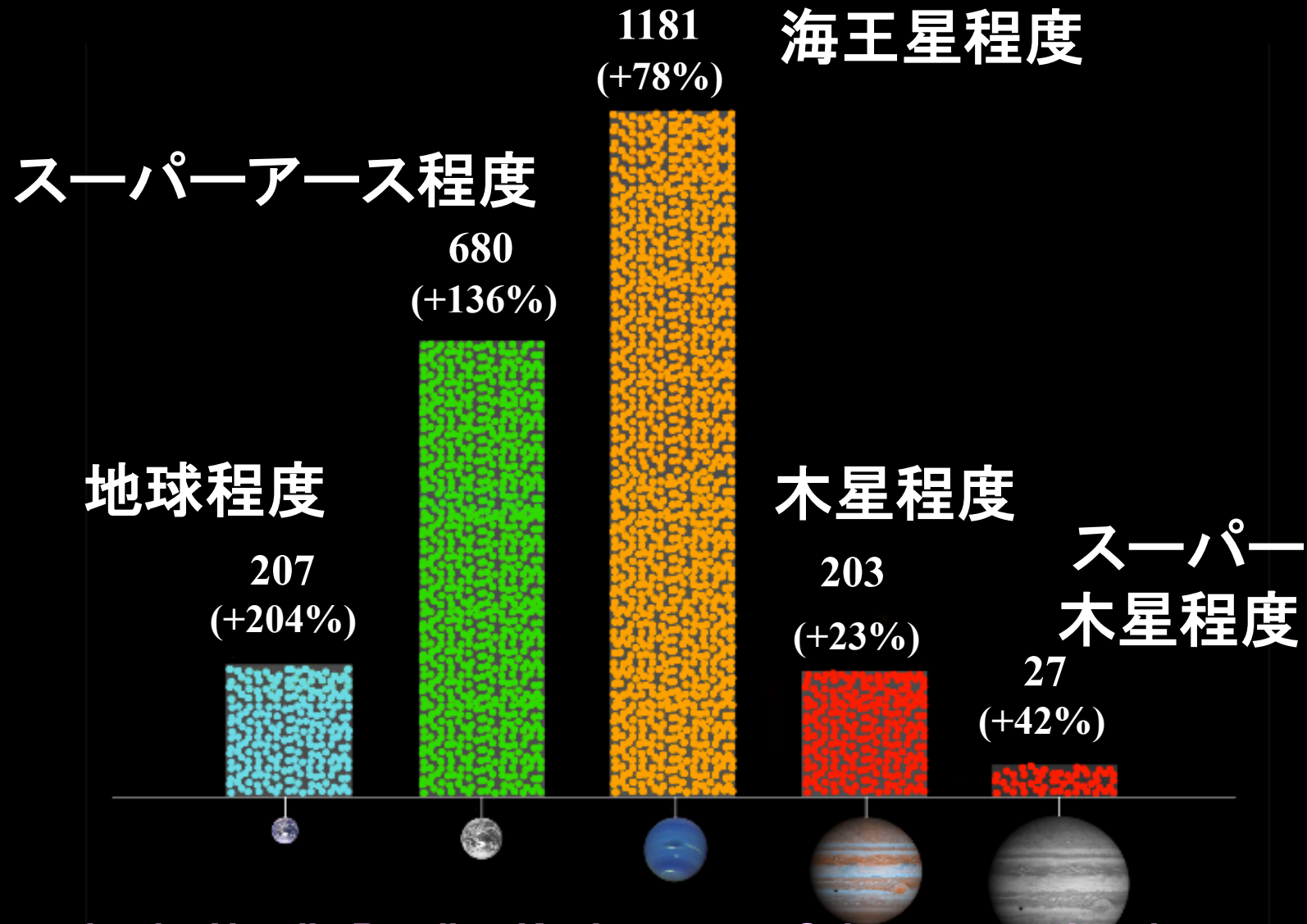


公転周期 (日)

Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead



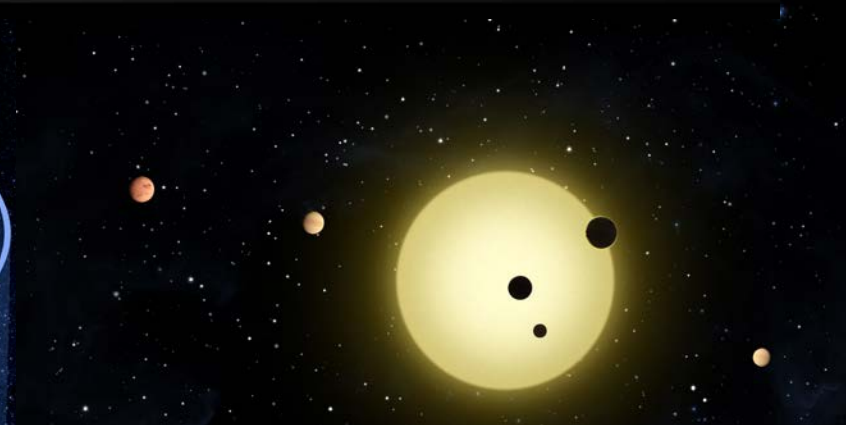
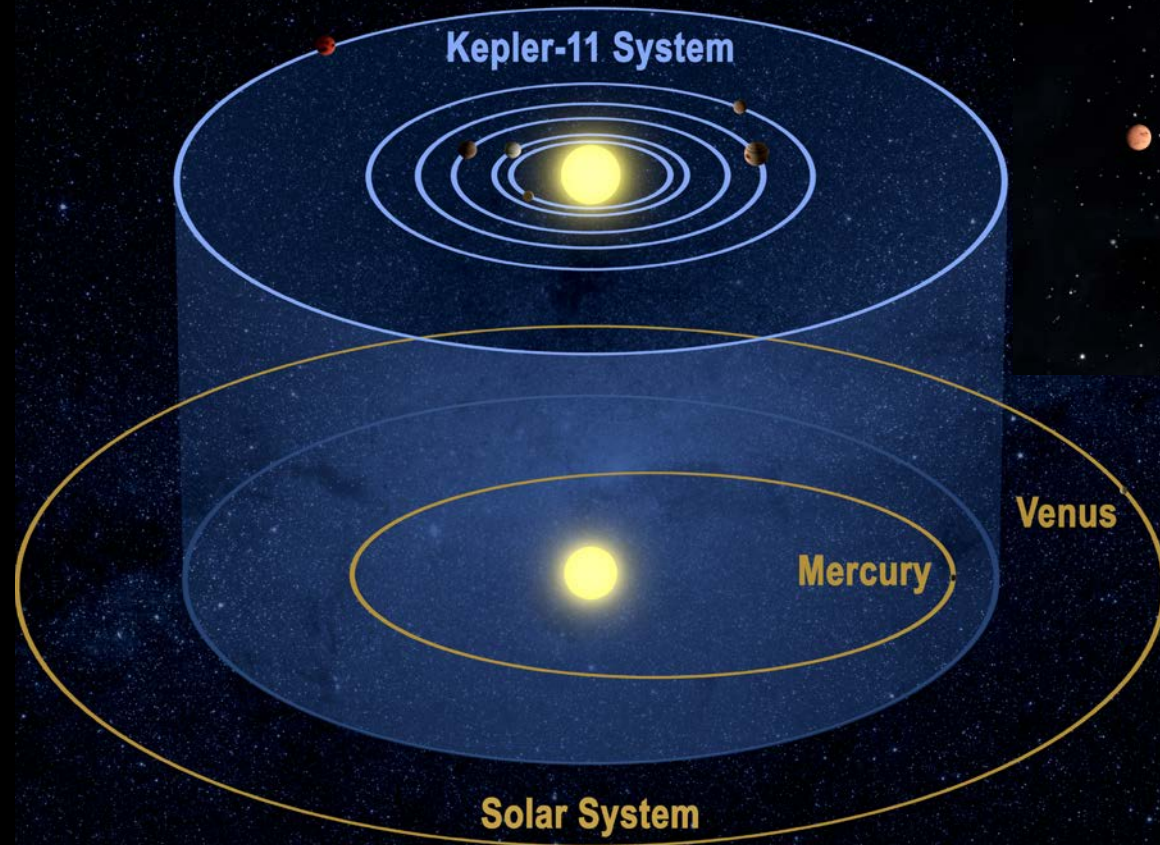
# 惑星候補の大きさのヒストグラム



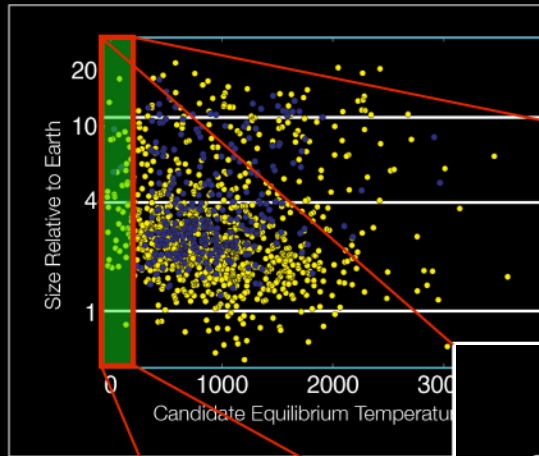
Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

# Kepler 11: 6重トランジット惑星系

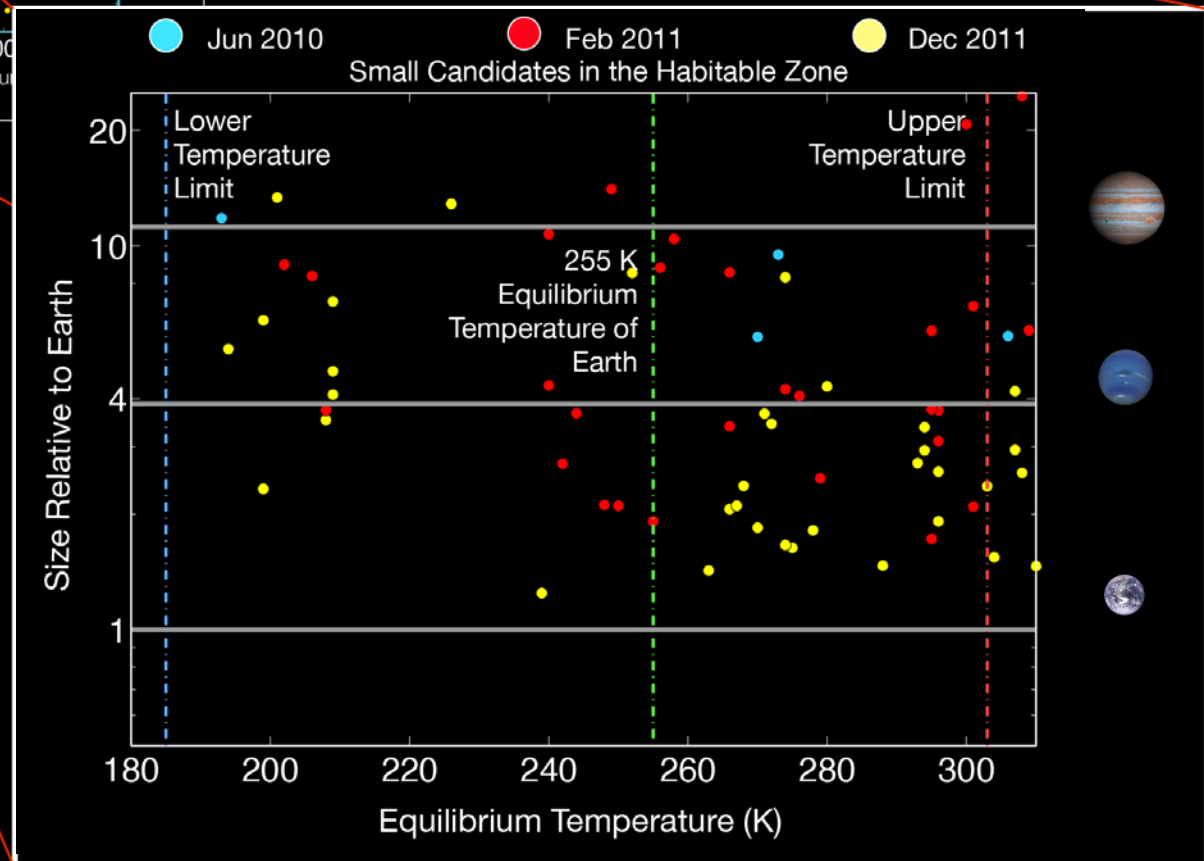
Kepler-11b Kepler-11c Kepler-11d Kepler-11e Kepler-11f Kepler-11g



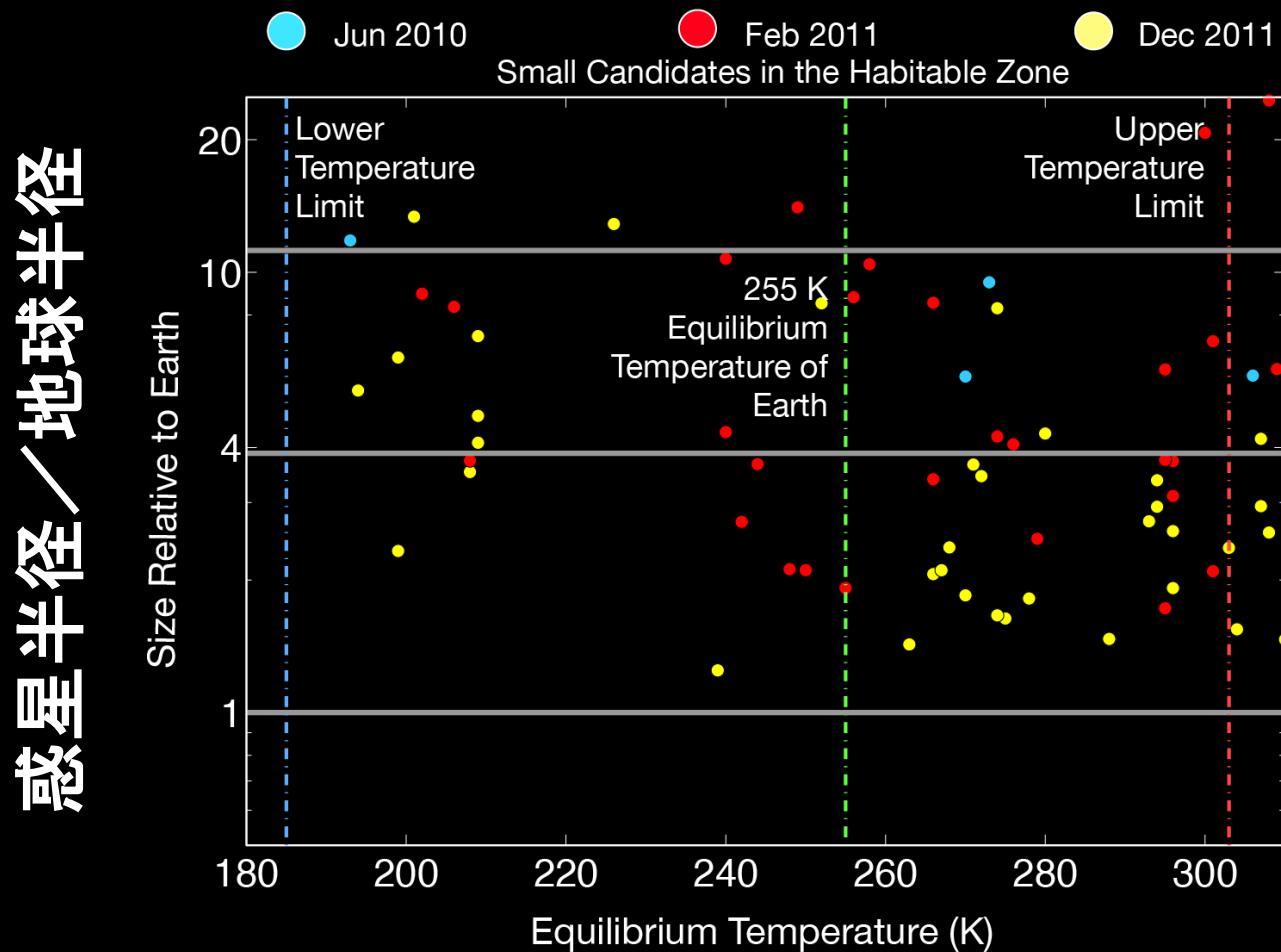
# ハビタブルゾーンにある 惑星候補



**ハビタブルゾーン:**  
惑星の温度が適度  
で水が液体として  
存在できる領域。  
主として、中心星の  
明るさと距離、惑星  
の反射率などで決  
まる



# ケプラー衛星による居住可能域に存在する惑星の発見(?)



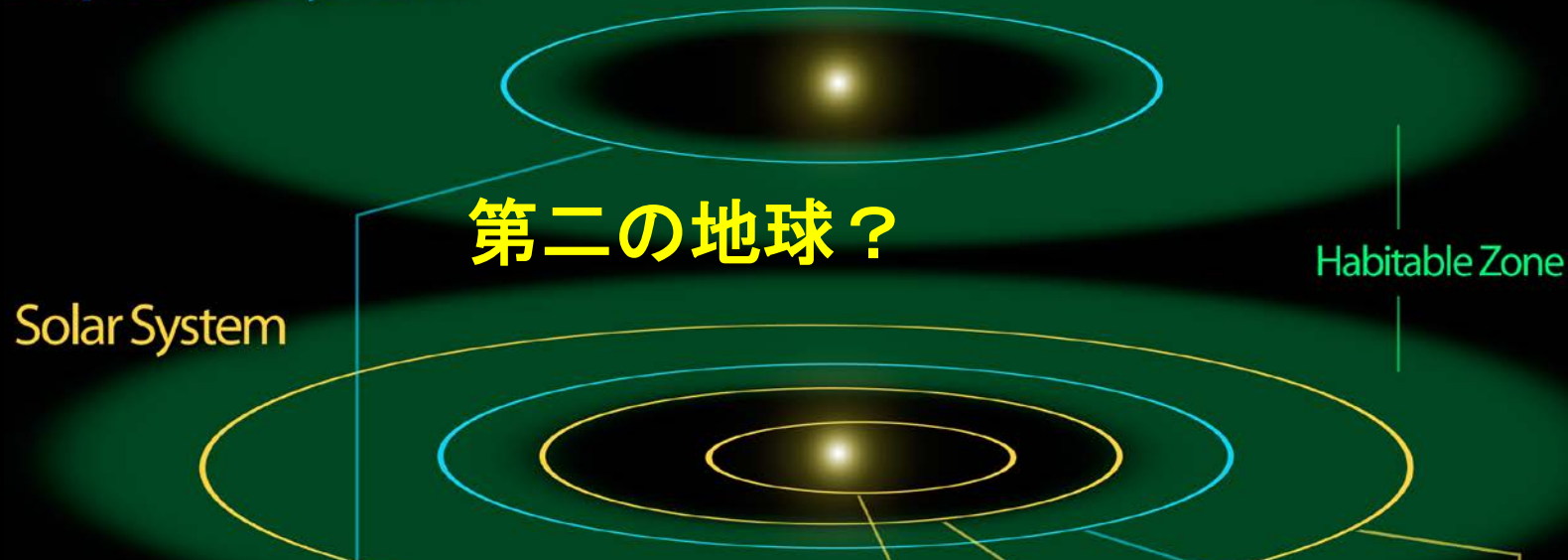
惑星表面の平衡温度 (K)

Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead



# 最初の地球型居住可能惑星の発見？ ケプラー22

Kepler-22 System



やっぱり「我々は何も知らなかった！」



Presentation by Natalie Batalha, Kepler Deputy Science Team Lead

Planets and orbits to scale

# すでに学んだこと: 惑星色々

- 惑星(系)は稀なものではなく普遍的存在
  - 太陽に似た恒星の30パーセント以上は惑星を持つ
- 惑星系の性質は多種多様
  - 太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
  - 惑星大気の発見
  - 惑星反射光の検出
  - 主星スピンと惑星軌道軸とのずれ: 逆行惑星
- 様々な観測手法での相補的アプローチ
  - ドップラー法(精密分光)、トランジット法(精密測光)、重カレンズ(高時間分解能測光)、直接撮像

では次はどうする?

# 系外惑星：今後の展望

- 巨大ガス惑星発見の時代 (1995)
  - 惑星大気の実見 (2001)
  - 惑星赤外線輻射の検出 (2005)
  - 惑星可視域反射光の検出 (2009)
- 

- **地球型居住可能惑星の実見**
- **系外惑星リング、衛星の実見**
- **地球型惑星の直接検出(測光&分光)**
- **バイオマーカー(生物存在の証拠)の同定**
- **地球外生命の実見**

