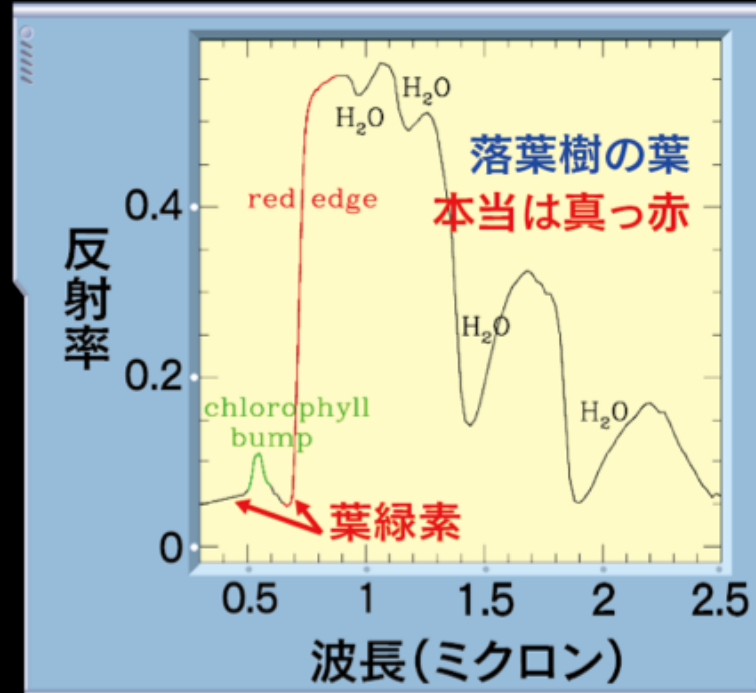
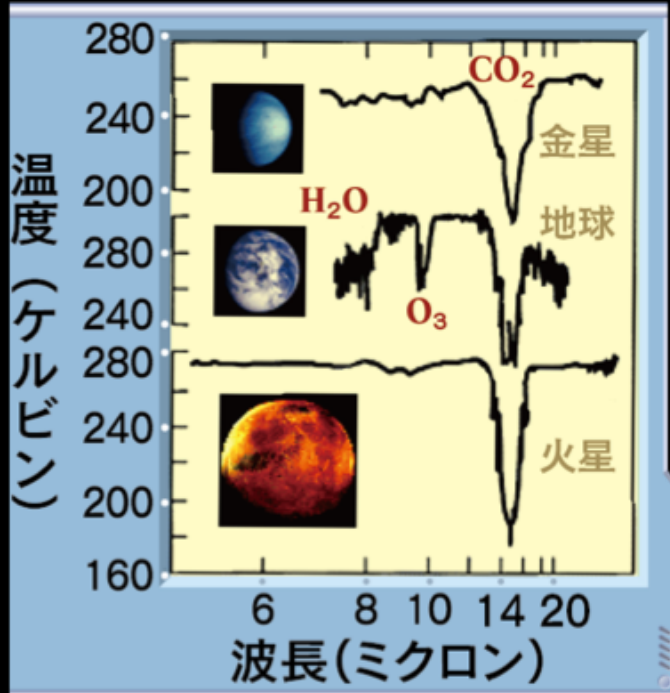


# 太陽系外惑星から宇宙生物学へ

[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2019j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2019j.html)



物理教室大学院ガイダンス  
A5 須藤研  
2019年5月24日  
11:00-11:20@小柴ホール



# 東大本郷キャンパスでの 宇宙物理学理論研究室

- 物理教室：宇宙物理学理論研究室
  - 教授：須藤靖、助教：大栗真宗
  - 教授：吉田直紀、助教：檜山和己
- ビッグバンセンター
  - 教授：横山順一、助教：鎌田耕平
  - 教授：Kipp Cannon、助教：西澤篤志
- 4 研究室が共同で研究活動を行っている
  - 木曜日に昼食会、ランチセミナー、定例セミナー
  - 学生間のゼミ、勉強会、議論、雑談、愚痴
  - サマースクール、遠足、飲み会
  - 新着論文紹介（月、水、金）

# 定年の関係で須藤研の博士課程には進学 できません

- そのまま博士課程に進学したいと考えている場合、別の研究室を志望してください
- その上で、須藤研でやっているテーマを紹介します
  - 原始惑星系円盤から出発した多重惑星系軌道進化
  - 重力3体問題の摂動解と連星ブラックホール探査
  - 星震学による惑星系の自転・軌道角運動量進化
  - 大循環モデルを用いた地球の気象シミュレーションと系外惑星バイオシグニチャー探査の可能性

# 宇宙は惑星で満ちていた

## A Jupiter-mass companion to a solar-type star

Michel Mayor & Didier Queloz

**Nature 378(1995)355**

Geneva Observatory, 51 Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

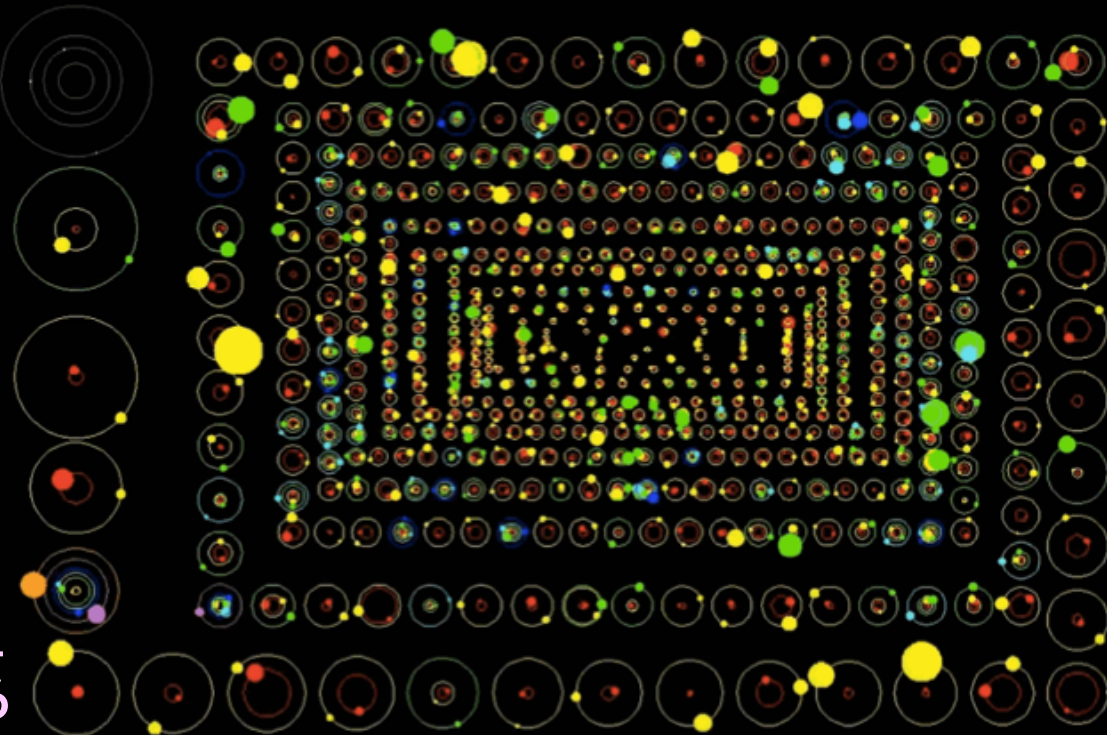
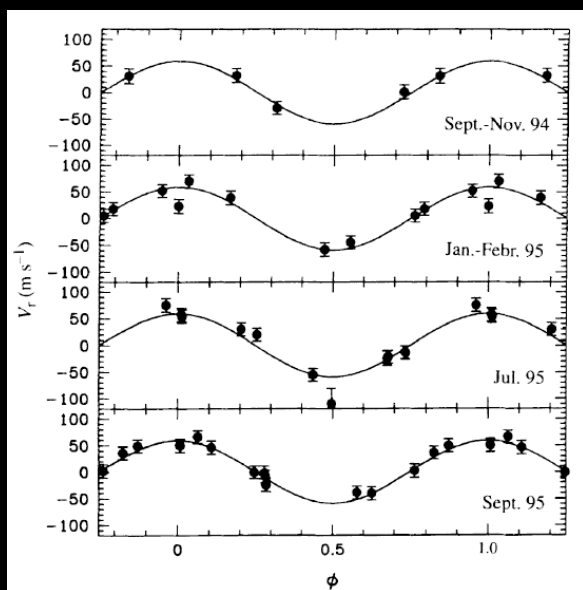
The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

Kepler planets

August 3, 2015

NASA/Daniel Fabrycky

t[BJD] = 2455215



初めて発見された系外惑星  
51Peg b = 4.2日で公転する  
ホットジュピター

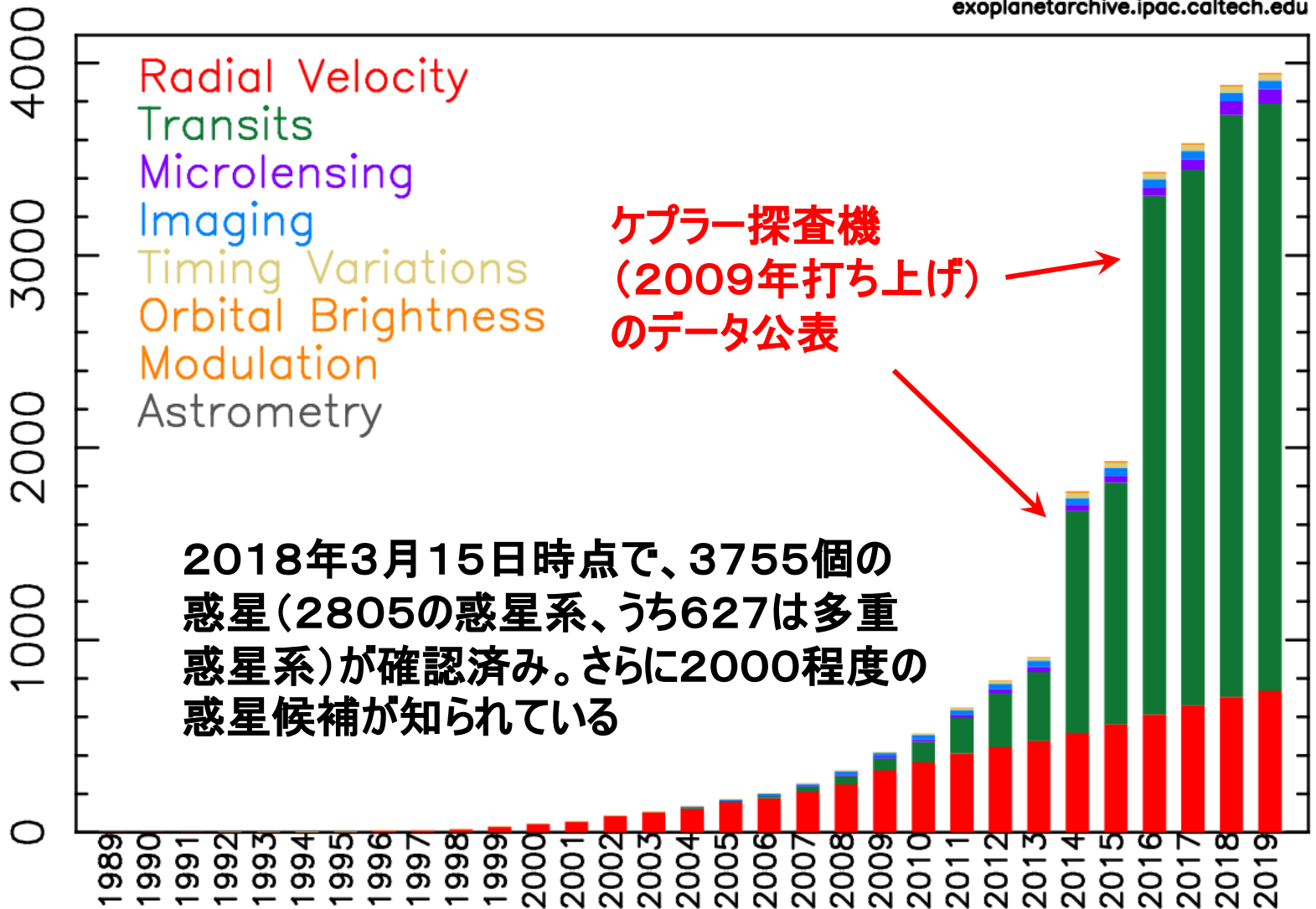
<https://solarsystem.nasa.gov/resources/311/kepler-orrery-iii/>



# 系外惑星の発見年表

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

発見総数

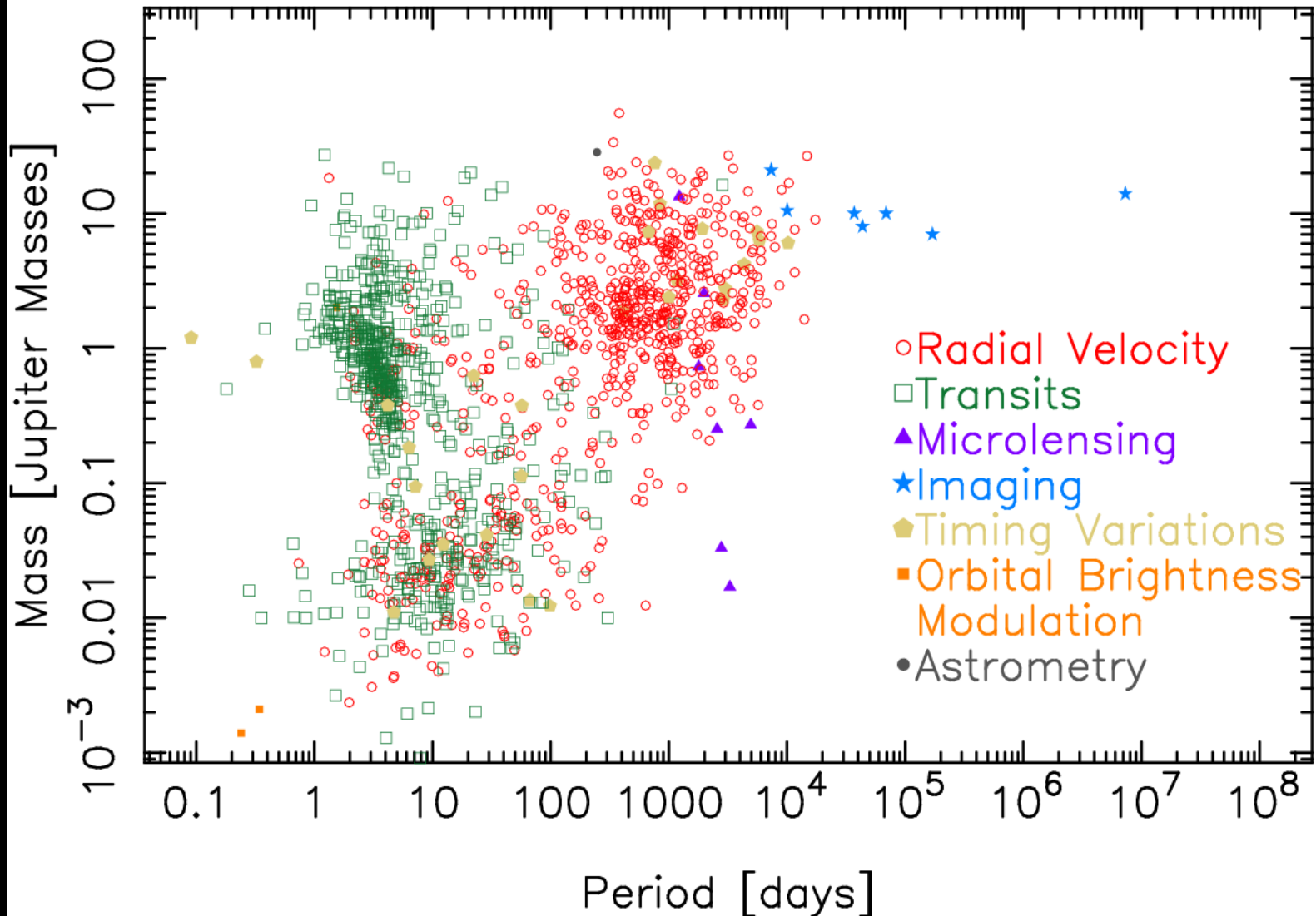


西暦

# 系外惑星の多様性：周期 vs. 質量

02 May 2019

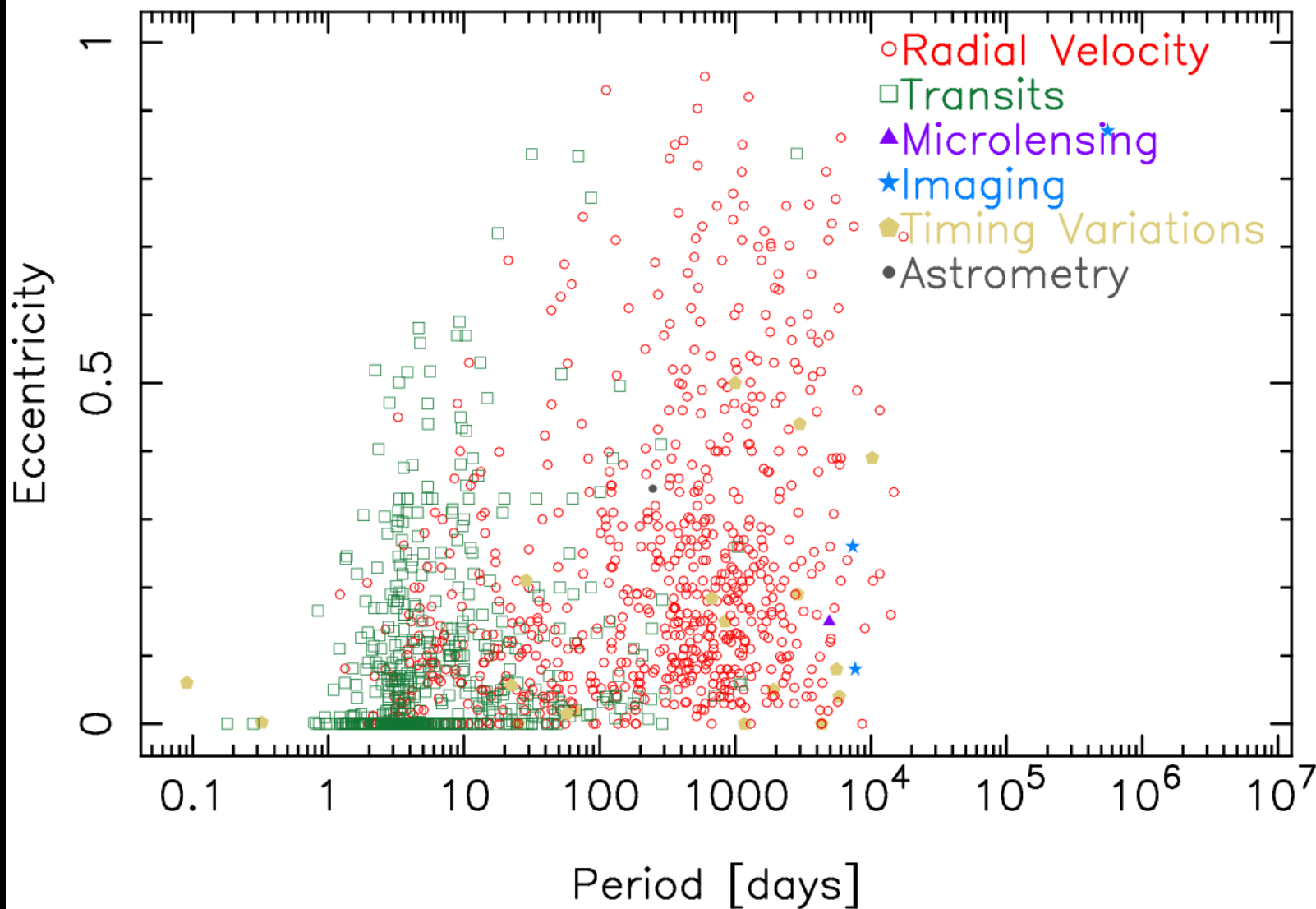
exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



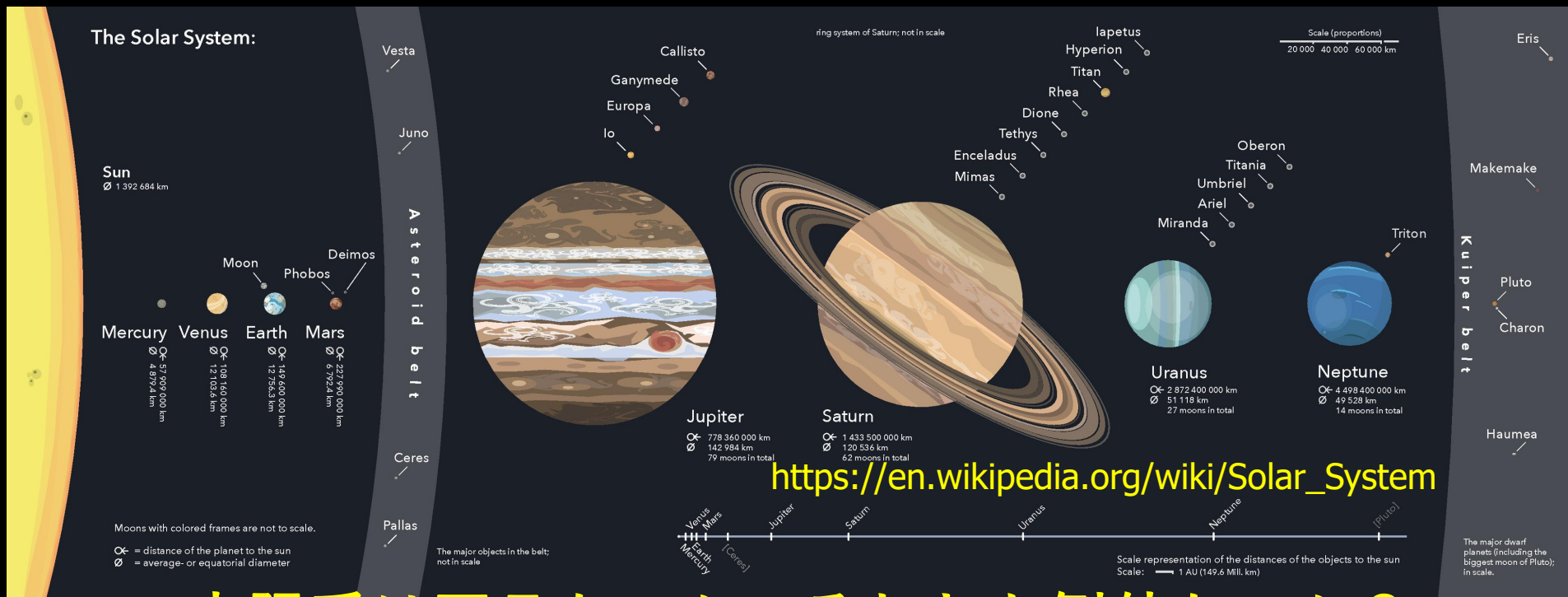
# 系外惑星の多様性：周期 vs. 離心率

02 May 2019

exoplanetarchive.ipac.caltech.edu



# 太陽系のアーキテクチャー



## ■ 太陽系は平凡なのか、それとも例外なのか？

- ほぼ同一平面上の円軌道をなす 8 重惑星系
- 内側に岩石惑星、外側に巨大ガス惑星
- 力学的に極めて安定（約100億年程度は安定）
- ハビタブル惑星（地球）を持つ
- 惑星の多くは複数の衛星と環を持つ

# 見えてきた系外惑星系の姿

- **宇宙に惑星系は普遍的に存在する**
  - 太陽と似た恒星の7割以上が惑星を持ち、2割以上は複数の惑星を持つと推定されている
- **太陽系と似た系も全くかけ離れた系も存在**
  - 太陽の周りを数日で公転する巨大ガス惑星（ホットジュピター）
  - 大きな離心率を持つ楕円軌道の惑星
  - ハビタブル惑星候補（水が液体として存在できる温度）
  - 地球程度の岩石惑星（スーパーアース）が多数
- **普遍性と多様性⇒物理学**
- **我々の地球以外に生命が存在するか？⇒宇宙生物学**



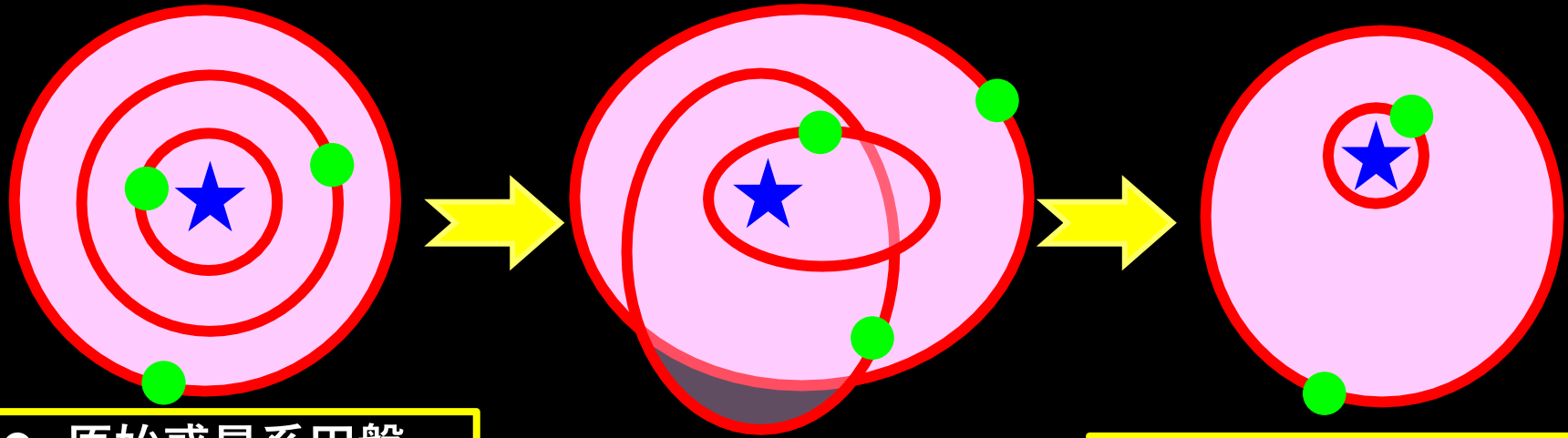
# おうし座HL星の原始惑星系円盤



[www.eso.org](http://www.eso.org)

Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)/NASA/ESA/N. Risinger ([skysurvey.org](http://skysurvey.org))

# 円盤-惑星、惑星-惑星、主星-惑星相互作用 ⇒ 惑星系の多様性



- 原始惑星系円盤
- ダスト沈殿・成長
- 微惑星形成・合体
- 円軌道の原始惑星
- ガス降着によるガス惑星の誕生

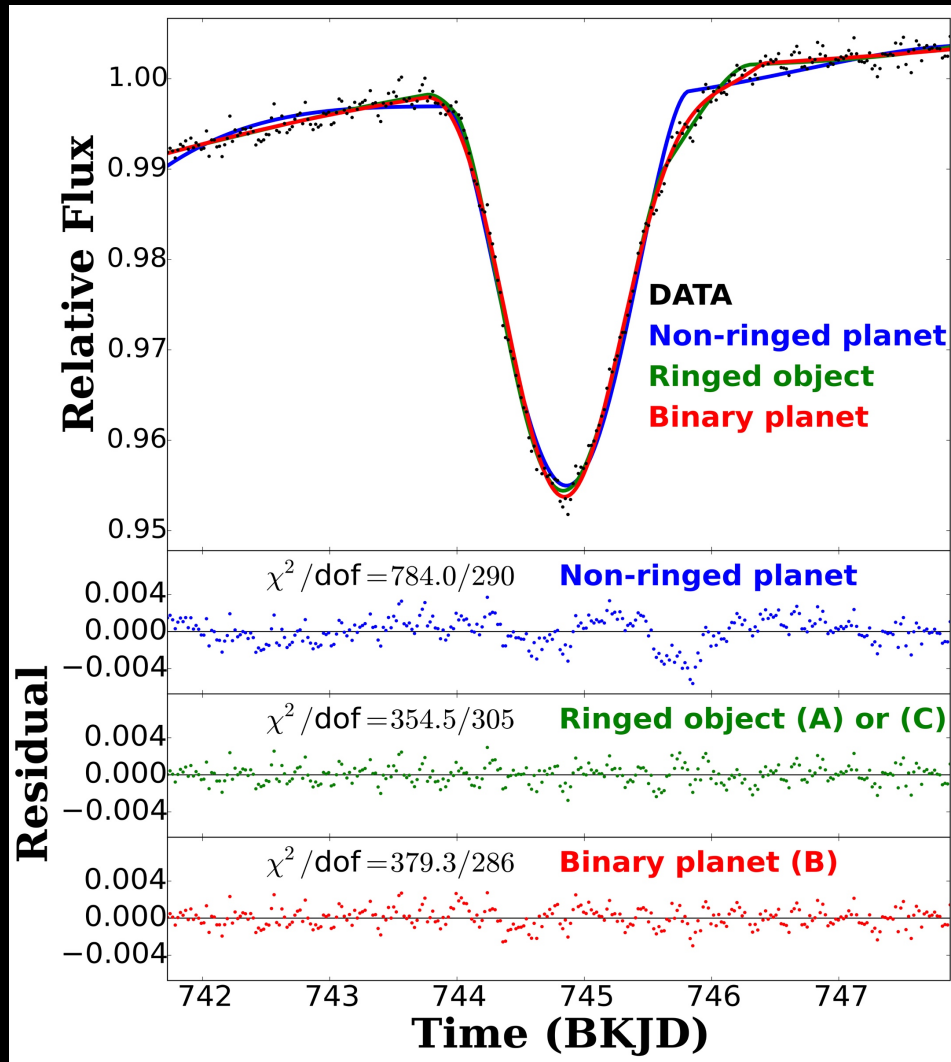
太陽系形成標準モデル  
(京都モデル・林モデル)

- ガス円盤-原始惑星相互作用
- ガス円盤消失
- 惑星重力少数多体系
- カオス的力学進化
- 近接散乱
- 軌道交差
- 惑星放出

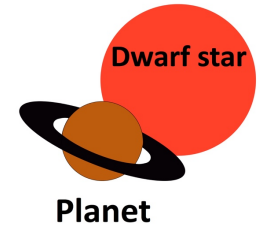
- 古在機構
- 主星自転軸と惑星公転軸のずれ
- 主星-惑星潮汐作用
- 軌道収縮
- 円軌道化
- ホットジュピターの誕生

# 系外惑星 リング の発見？

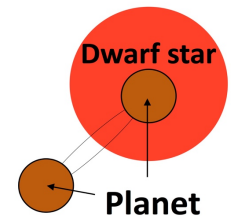
逢澤正高  
修士論文  
(2017)



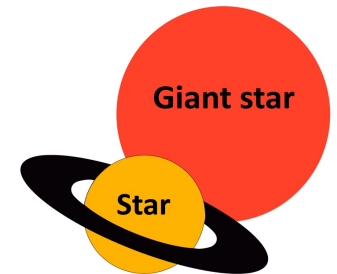
(A) Planetary ring



(B) Binary planet



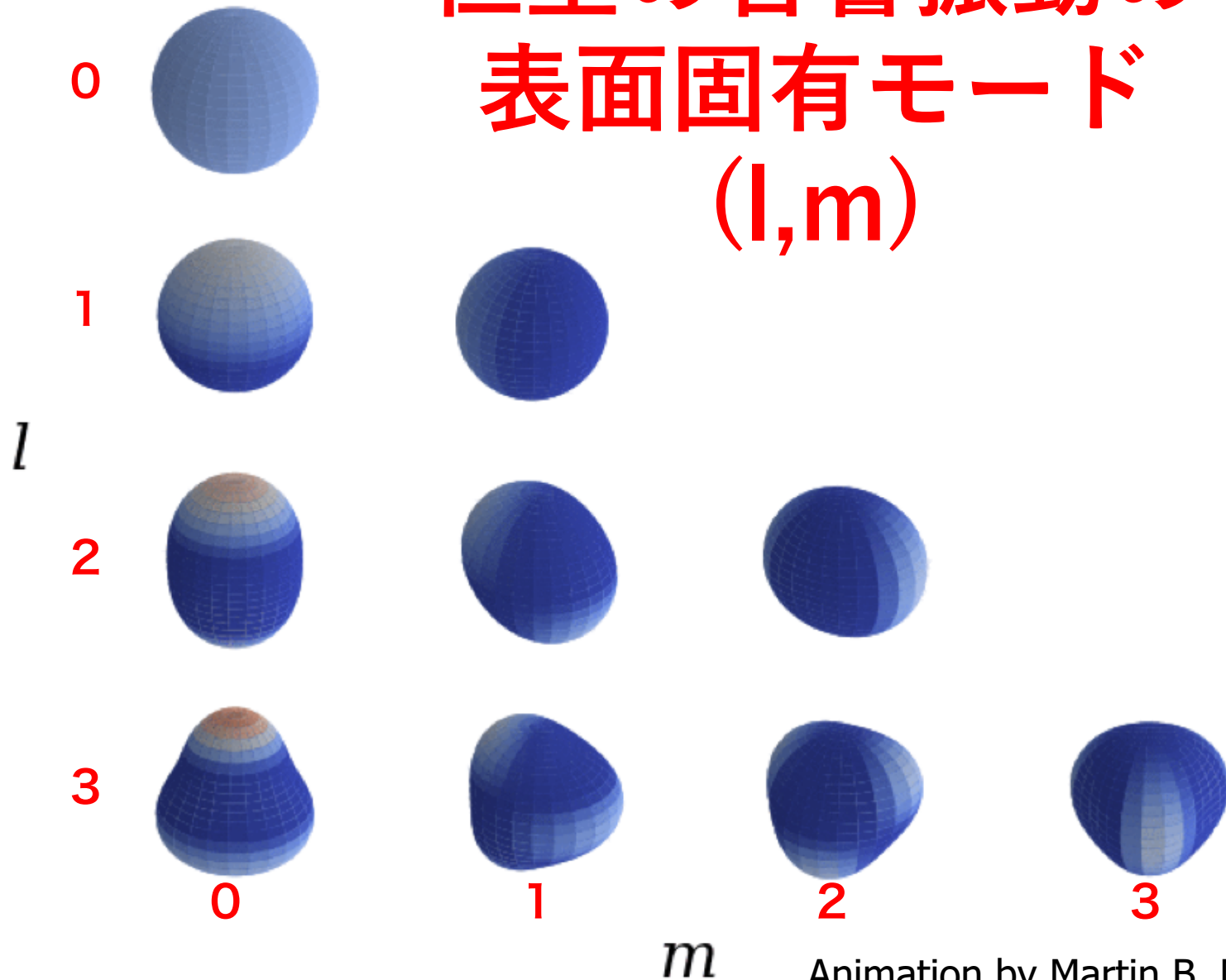
(C) Circumstellar disk



- ケプラー衛星のトランジット信号からアノマリーを探す

- <http://aasnova.org/2017/04/07/the-search-for-ringed-exoplanets/>

# 恒星の音響振動の 表面固有モード ( $l, m$ )



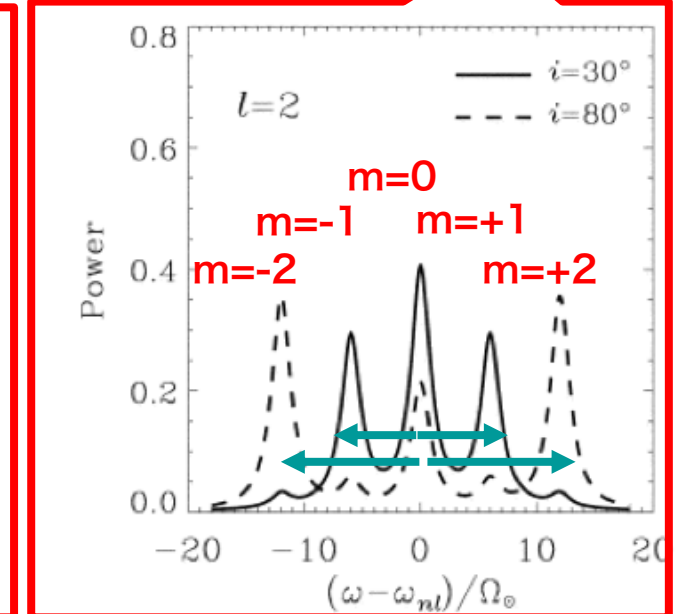
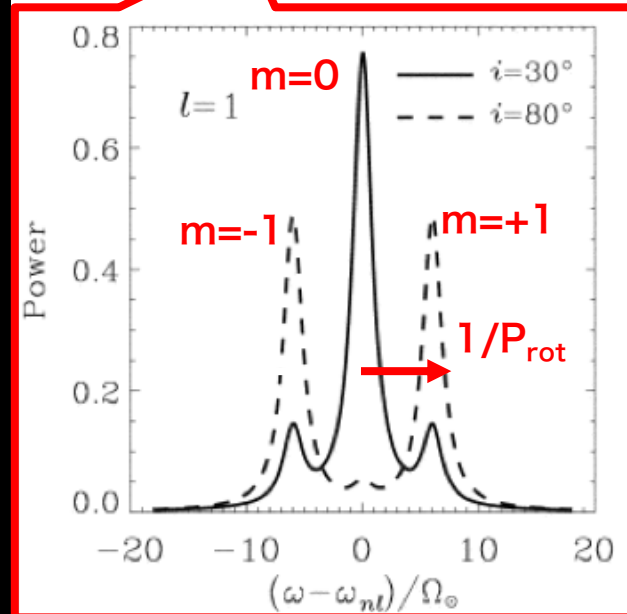
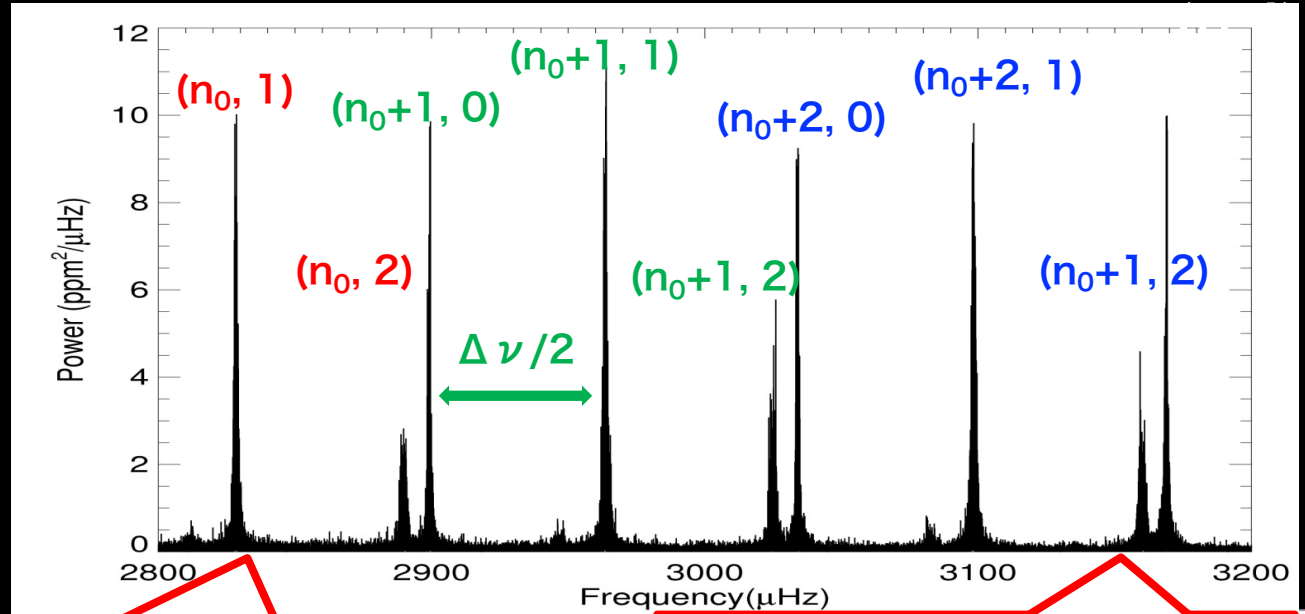
Animation by Martin B. Nielsen

# 恒星の自転がmの縮退を解く

$$\nu(n, l) = \Delta\nu \left( n + \frac{l}{2} + \alpha \right) + \varepsilon_{n,l}$$

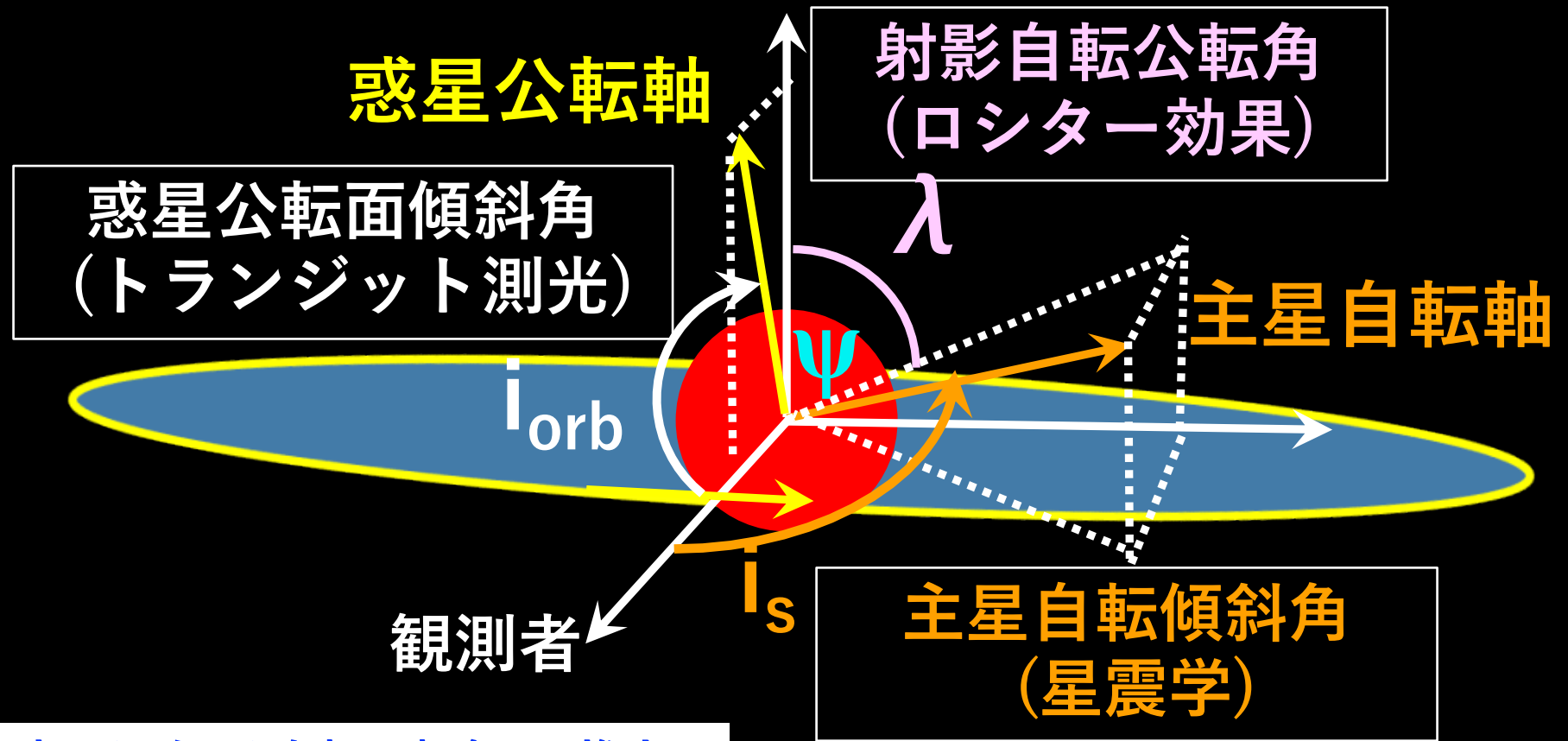
$$\nu(n, l, m) = \nu(n, l) + m\delta\nu_s(n, l)$$

異なるmモード  
の振幅比から $i_\star$   
が測定できる





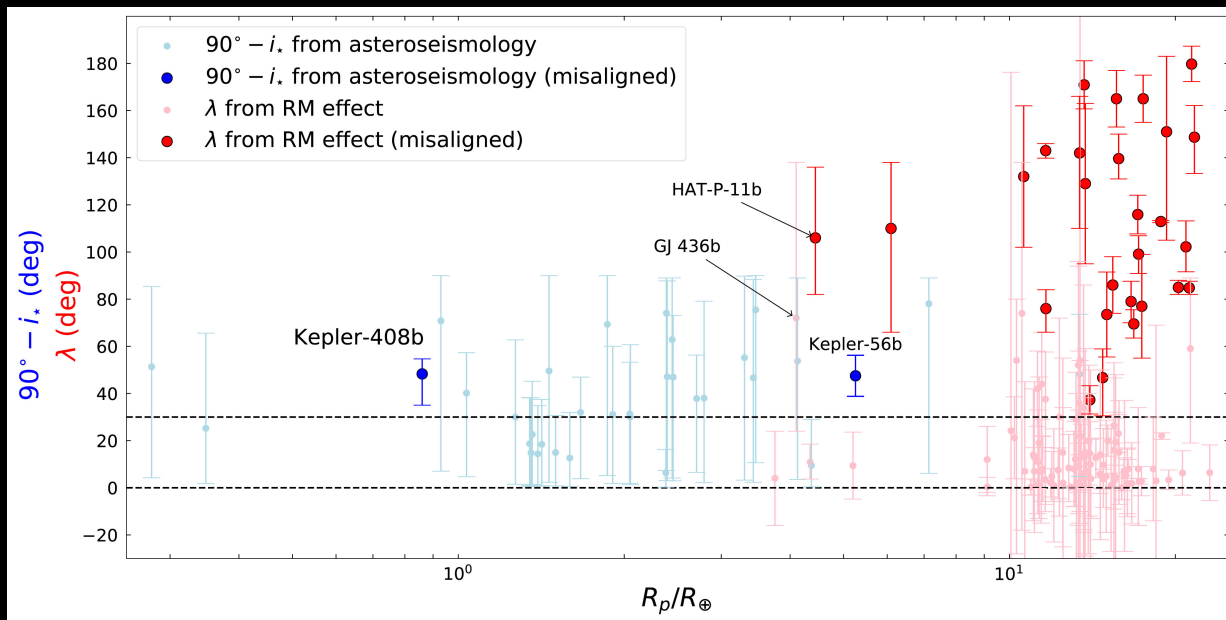
# 主星自転軸と惑星公転軸の関係



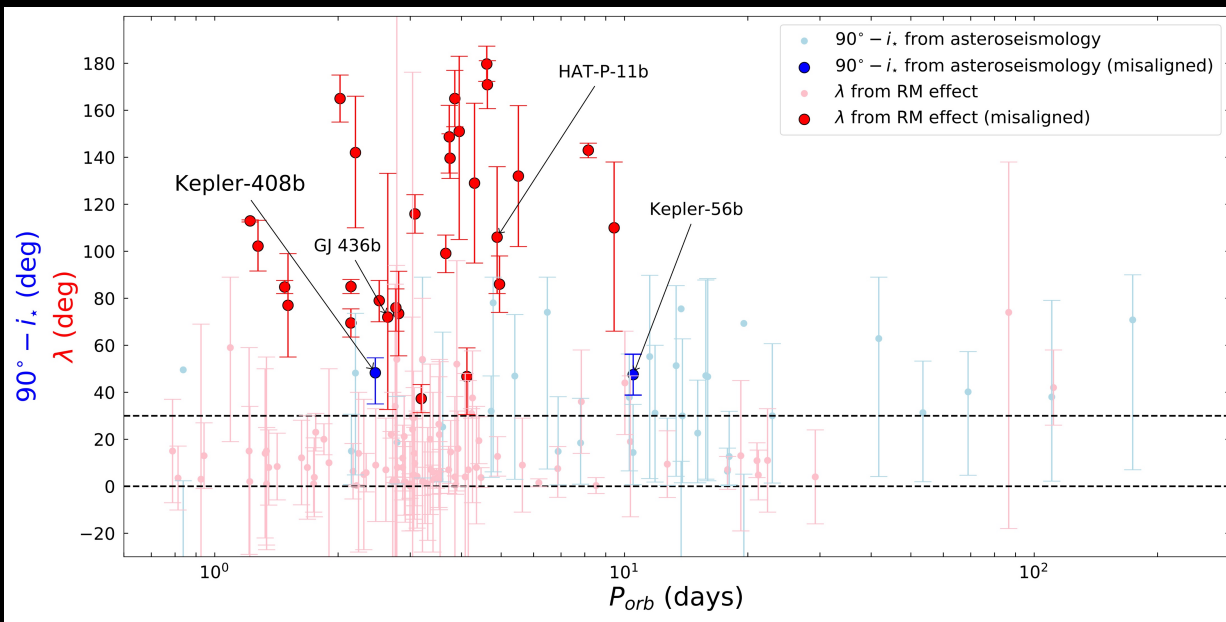
真の(3次元)自転公転角 $\Psi$ の推定

$$\cos \Psi = \sin i_s \sin i_{orb} \cos \lambda + \cos i_s \cos i_{orb} \\ \approx \sin i_s \cos \lambda$$

# 2019年時点での自転公転角分布のまとめ



上赤翔也  
博士論文  
(2019)

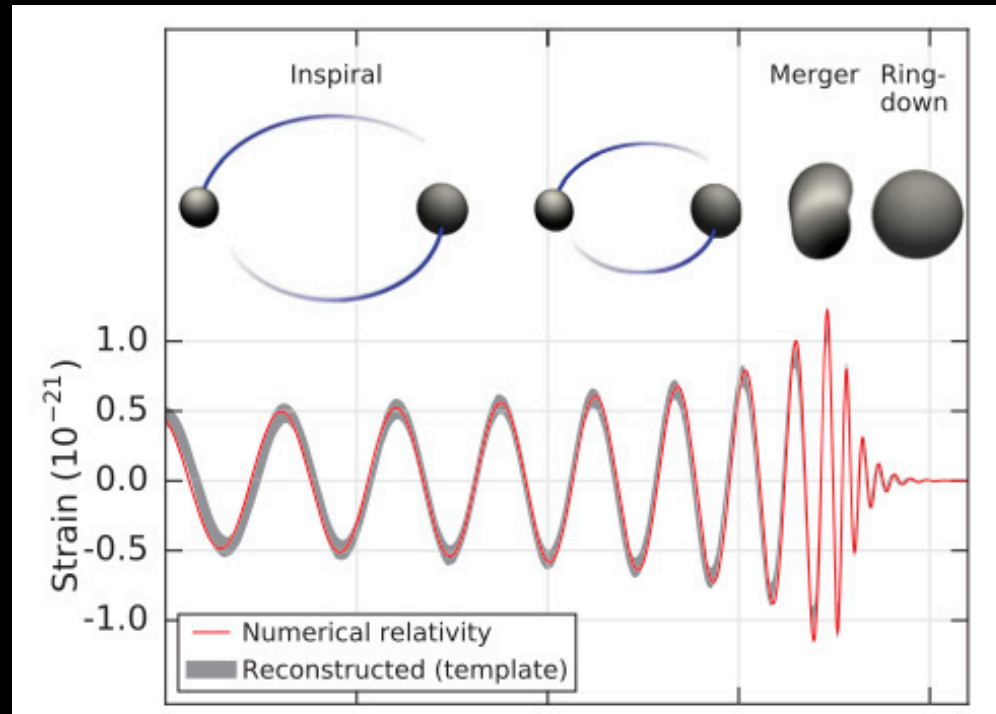
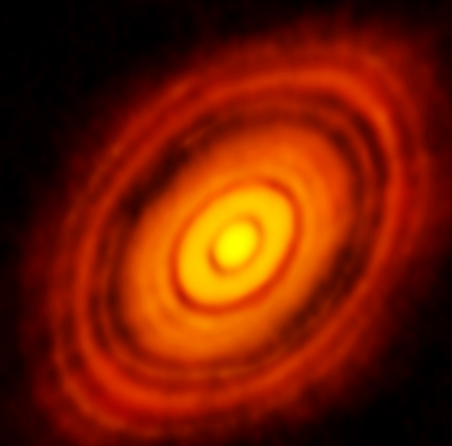


Kamiaka, Benomar & Suto  
MNRAS( 2018)

Kamiaka, Benomar, Suto  
et al.  
AJ 157(2019)137

Suto, Kamiaka & Benomar  
AJ 157(2019)172

# 古くて新しい 重力3体問題



## ■ ALMAによる原始惑星系 円盤の詳細構造

- これを初期条件とした惑星系の力学的多様性の予言
- **Shijie Wang 修士論文 (2019)**

## ■ LIGOによる連星ブラック ホールが発見

- GAIA + 視線速度法による長周期連星ブラックホール発見の可能性
- **林利憲 修士論文 (2019)**

# ハビタブル惑星候補



# バイオシグニチャー —生物が存在する兆候—

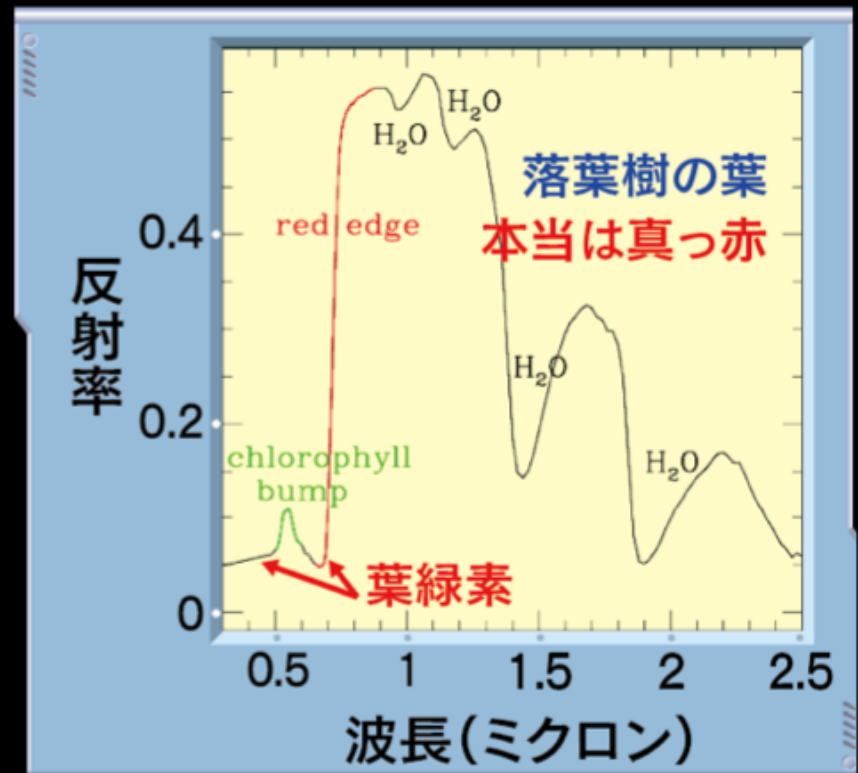
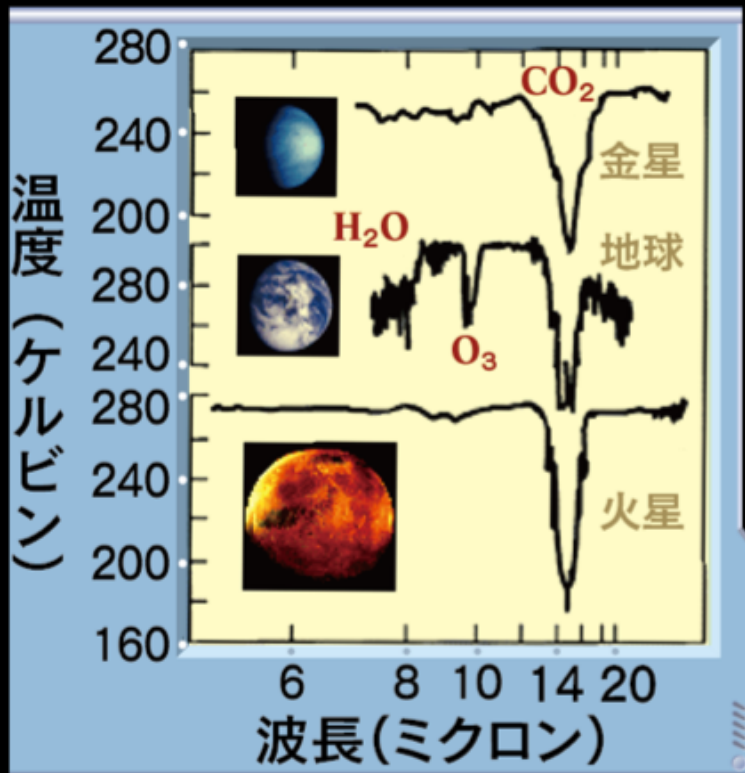
- **何が決定的バイオシグニチャーなのか？**
  - 地球外での生命の定義？
  - 地球上での生命の指標
    - 生物由来の大気成分（酸素、オゾン、メタン）
    - 植物のレッドエッジ
    - 知的生命体からの電磁波
- **いずれにせよ検出は天文学観測しかない**
  - 天文学で検出可能な限界は何か
  - どのような検出器・望遠鏡を作るべきか



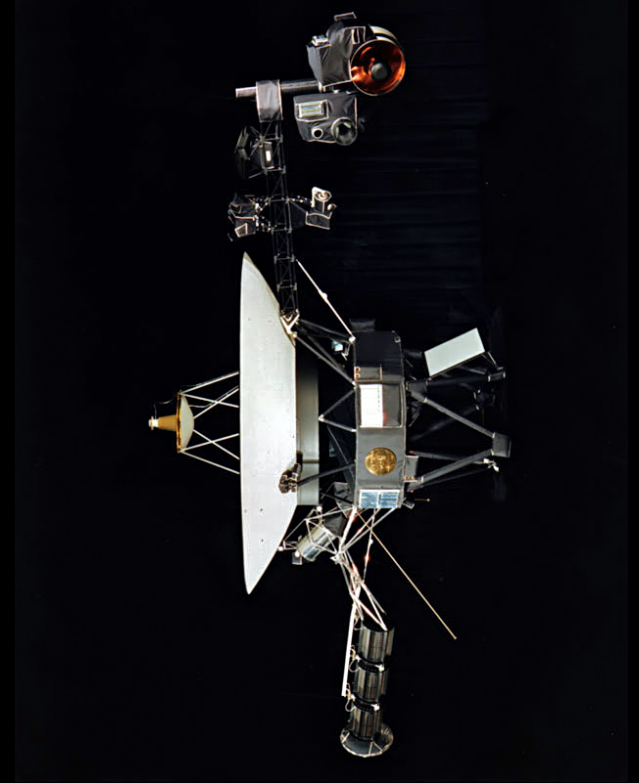
# 天文学から宇宙生物学へ

## ハビタブル惑星に生命の兆候を探す

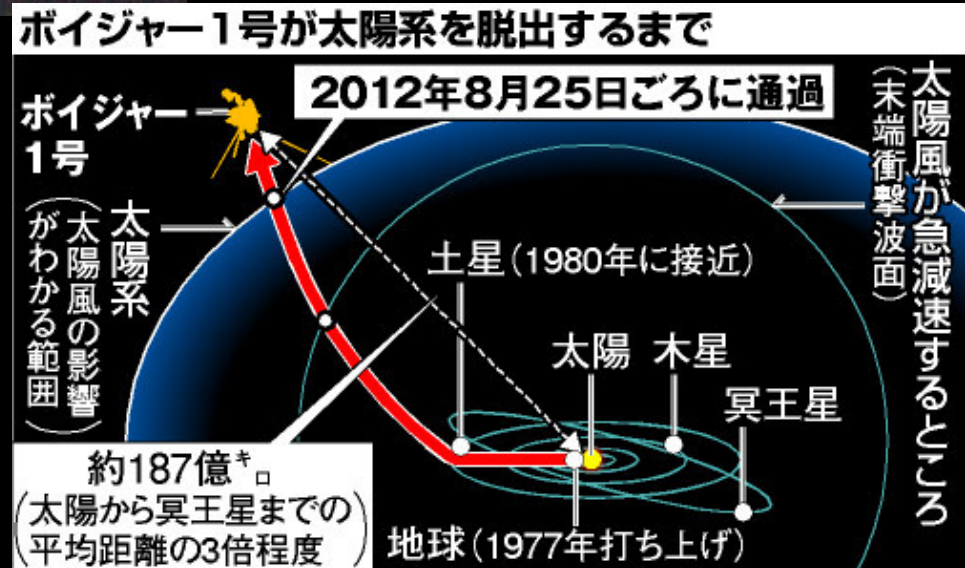
- 水とオゾンの吸収が観測されるのは地球のみ
- 地上の植物のほとんどは700nmより長波長で反射率が急激に増加する（レッドエッジ）



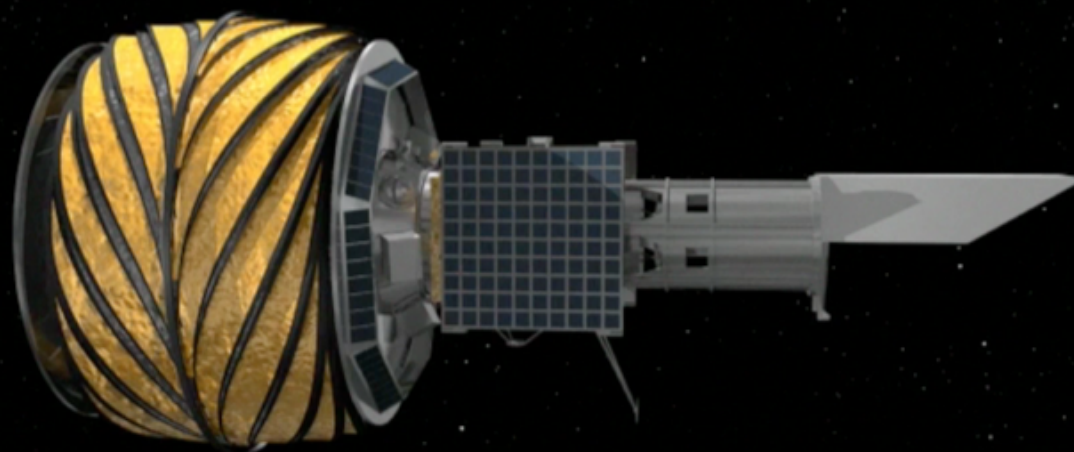
# ペイル・ブルー・ドット



- 1990年2月14日、ボイジャー1号が撮影
- カール・セーガンがPale Blue Dotと名付けた



# Starshade project : 地球型惑星を直接見る



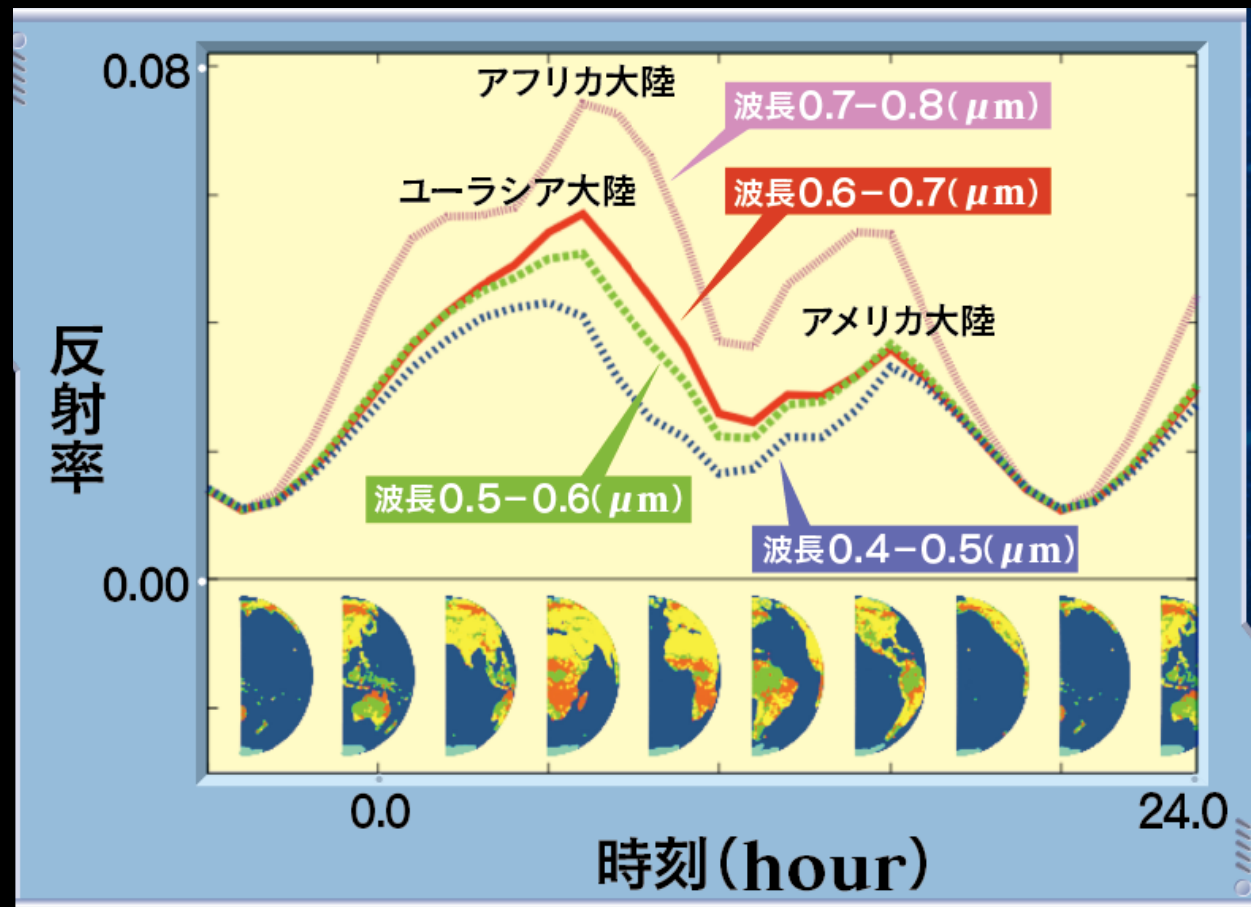
- 宇宙望遠鏡の5万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおき、惑星を直接撮像（プリンストン大学 J.Kasdinらのグループ）

# もうひとつの地球の色

- 自転にともなう地球の反射光の色の時間変化のシミュレーション



藤井友香  
博士論文(2013)





# 地球測光観測データから推定された地表面成分の経度分布地図

海



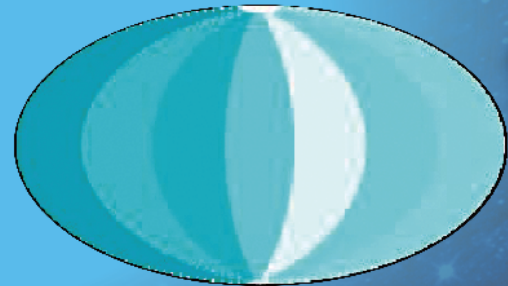
植生



雲

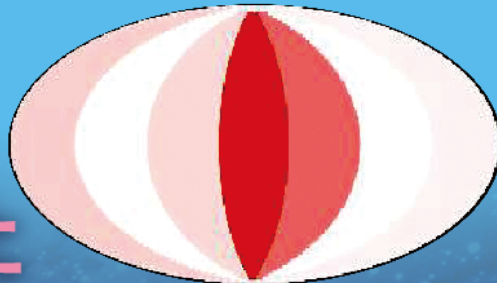


雪



藤井友香  
博士論文(2013)

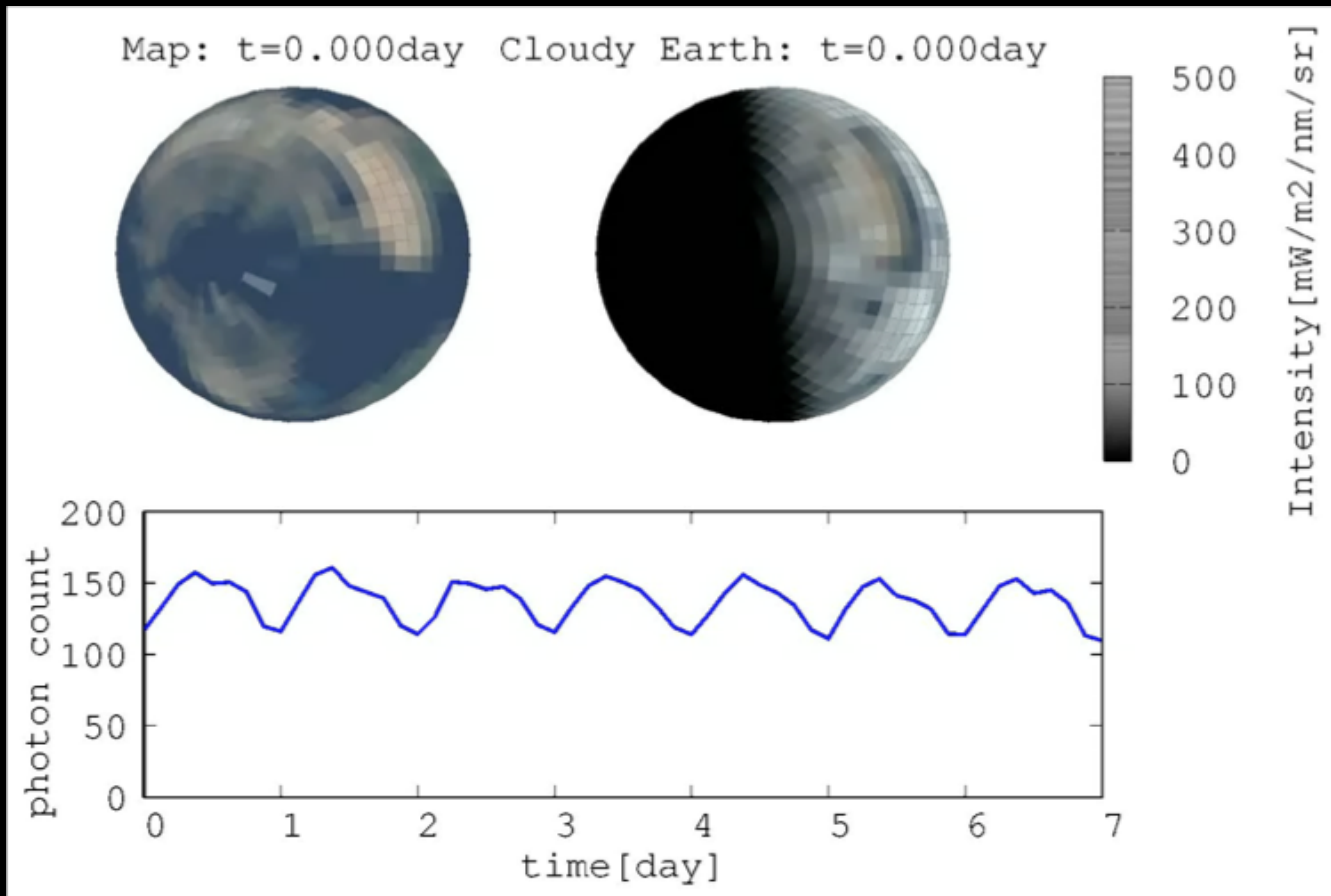
土



Fujii et al. (2011)



# 大循環モデルを用いた地球の気象シミュレーションによる雲分布と光度変化



- 第2の地球の模擬観測
- スピン（自転周期と軌道傾斜角）の決定
- 海と陸の存在
- バイオシグニチャーの同定

中川雄太 修士論文 (2018)



# 惑星科学国際研究ネットワーク



東京大学  
THE UNIVERSITY OF TOKYO

## 汎惑星進化史の構築から水と生命の起源へ

### 水



**第二の地球？**  
生命を育む惑星  
惑星を育む宇宙

宇宙の初期ゆらぎから生命へ  
惑星系の起源と進化

物質組成、水の起源と輸送、生命の兆候

太陽系内小天体  
始原物質探査

地球型惑星探査・  
大気分光

サンプルリターンによる始原物質の組成解明

系外惑星系の多様性と普遍性の解明

はやぶさ 2 (2014-2020)

OSIRIS-REx (2016-2023)

CHEOPS (2019-2022)



すばる



国立天文台  
NAOJ  
National Astronomical  
Observatory of Japan

# 結論：未解決の謎だらけ！

## ■ 惑星系の多様性の起源を探る

- Nature or Nurture (氏か育ちか?)
- 初期条件か力学的進化か
- 原始惑星系円盤から少数多体系のカオスへ
- 惑星－惑星重力散乱 主星－惑星潮汐相互作用
- 3体問題摂動論 数値シミュレーション データ解析

## ■ その先には宇宙生物学の地平線が！

HL Tau



太陽系