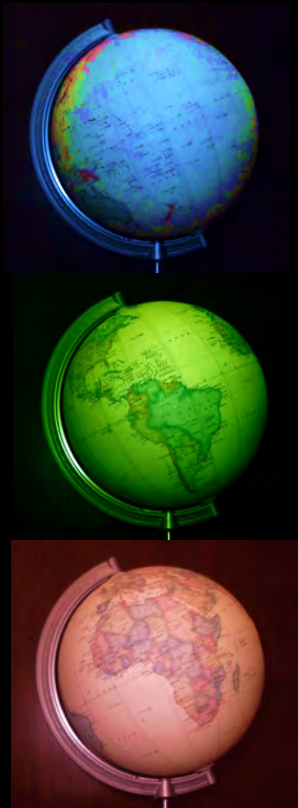
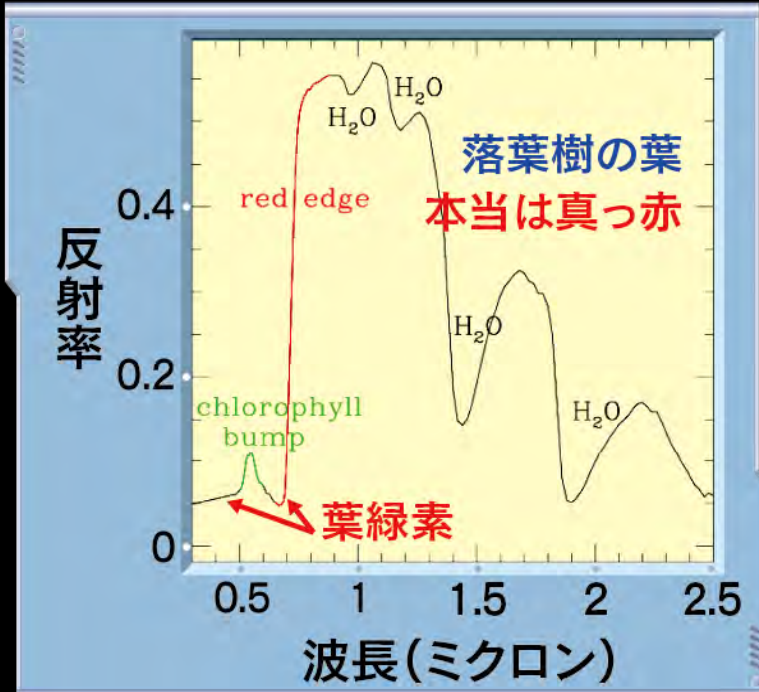
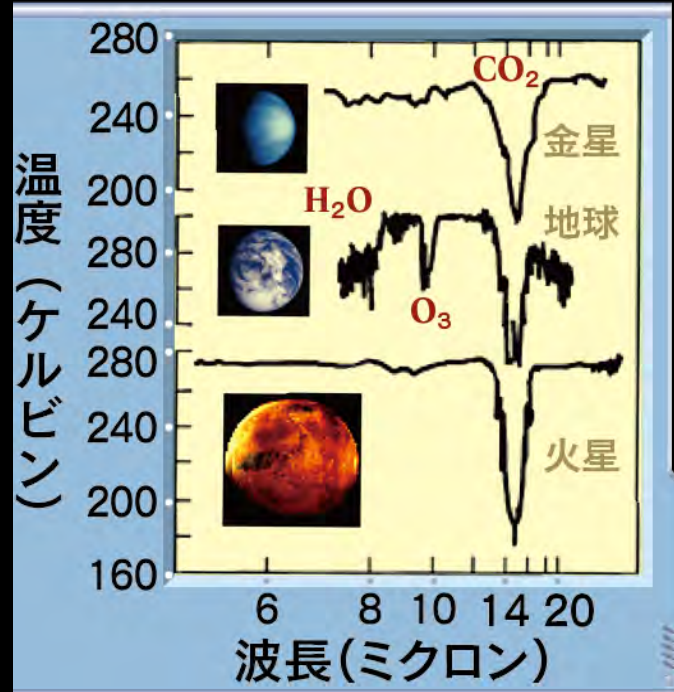


太陽系外惑星から宇宙生物学へ

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2016j.html



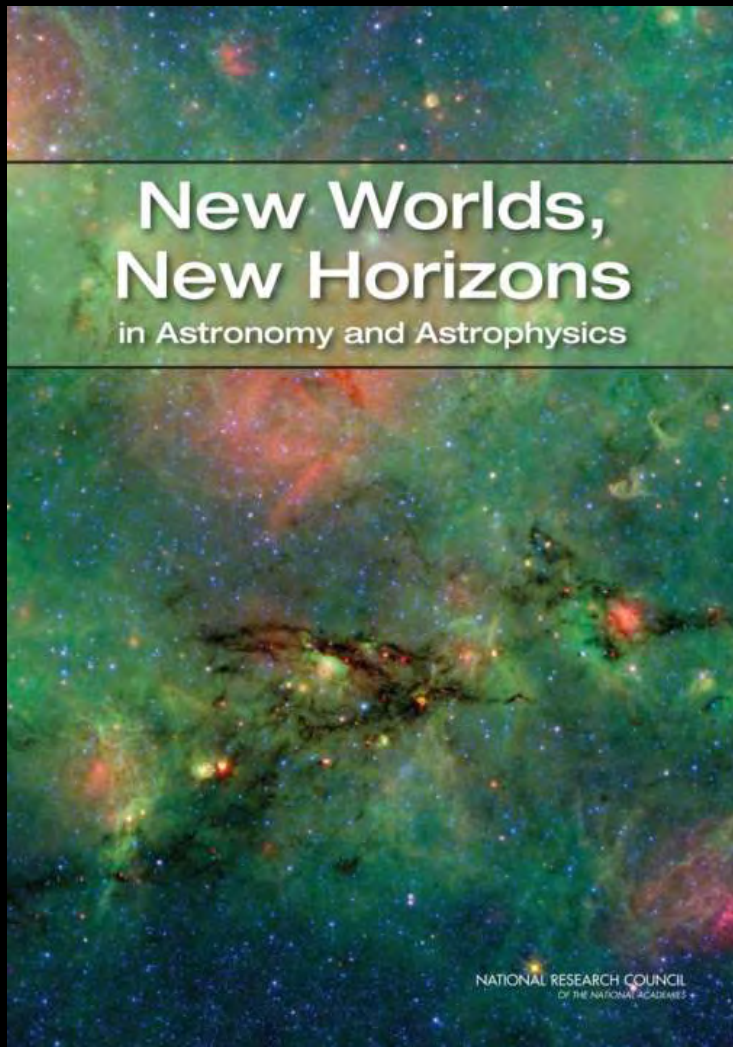
物理教室大学院ガイダンス
A5 須藤研
2016年5月27日
10:40-11:00@小柴ホール



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：細川隆史
- ビッグバンセンター
 - 教授：横山順一、助教：須山輝明
 - 准教授： Kipp Cannon
- 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)
- IPMUの高田昌広教授のグループとも共同研究

Astro2010: decadal survey



- **Cosmic Dawn** ⇒ 吉田
 - 宇宙の夜明け: 第一世代天体・ブラックホールの探索
- **New Worlds** ⇒ 須藤
 - 新世界: 近傍の居住可能惑星の探索
- **Physics of the Universe** ⇒ 横山、Cannon
 - 宇宙の物理: 宇宙を支配する科学法則の理解

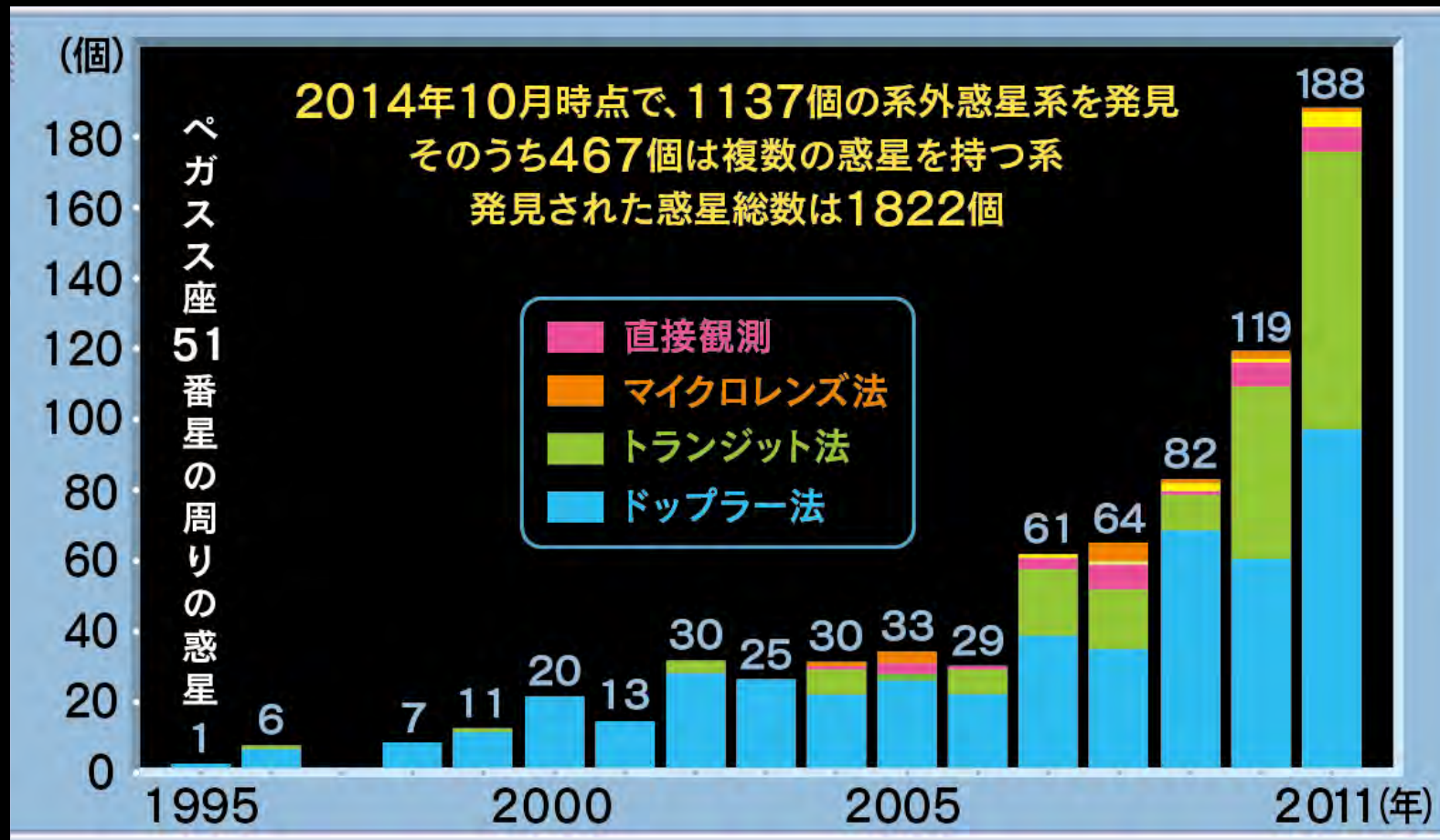
August 13, 2010

http://sites.nationalacademies.org/bpa/BPA_049810

須藤研で行っている研究テーマの例

- ずばる望遠鏡を用いた観測的宇宙論
- 重力レンズ天文学
- ダークマターハローの非球対称収縮力学モデル
- 多波長全天地図のスタッキング解析による銀河とクエーサーの統計的検出
- 太陽系外惑星系の主星-惑星潮汐相互作用を取り入れた力学モデルの構築
- 系外惑星系の衛星・リングの検出
- トランジット、星震学、視線速度観測を組み合わせた惑星系の自転・軌道角運動量の進化と起源
- 第2の地球のバイオマーカー探査可能性の探究

わが太陽系の外で、初めて惑星が発見されたのはわずか20年前



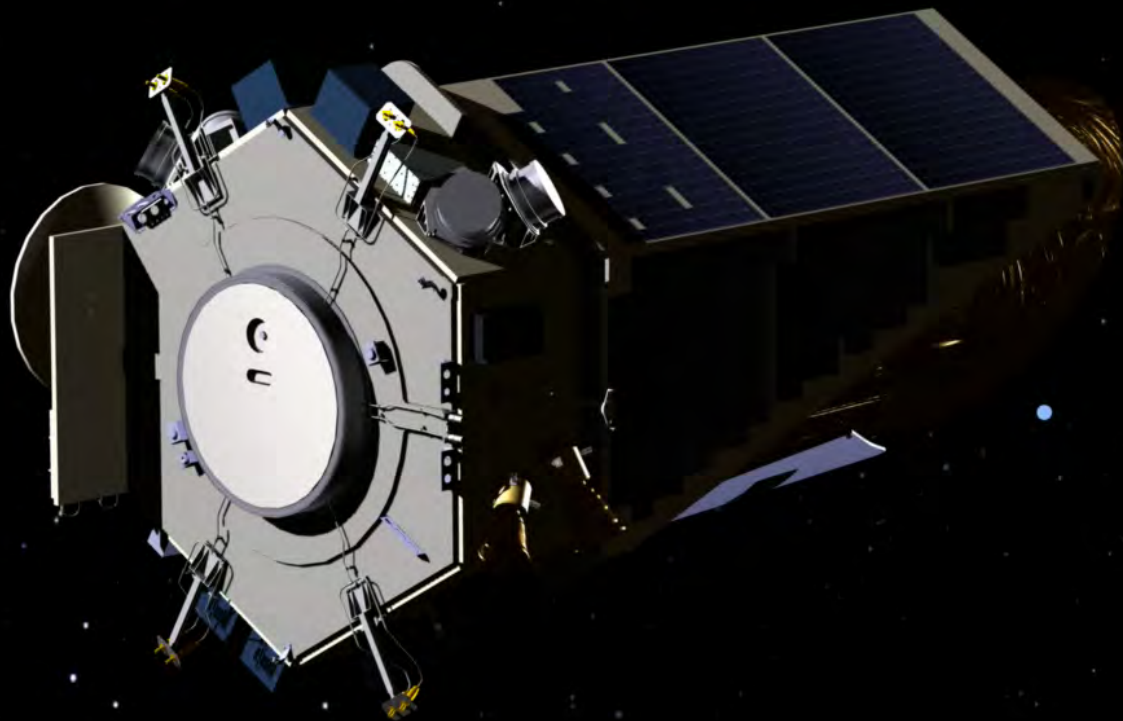
2016年6月時点では

8重惑星系:太陽系のみ、7重惑星系:3、6重惑星系:2、5重惑星系:15、
4重惑星系:49、3重惑星系:99、2重惑星系 300個以上

2015年京都賞受賞者 マイヨール教授
(初めての太陽系外惑星の発見者
ジュネーブ大学研究協力者の一人)



Kepler mission (March 6, 2009 launch)
Photometric survey of transiting planets
Searching for terrestrial/habitable planets

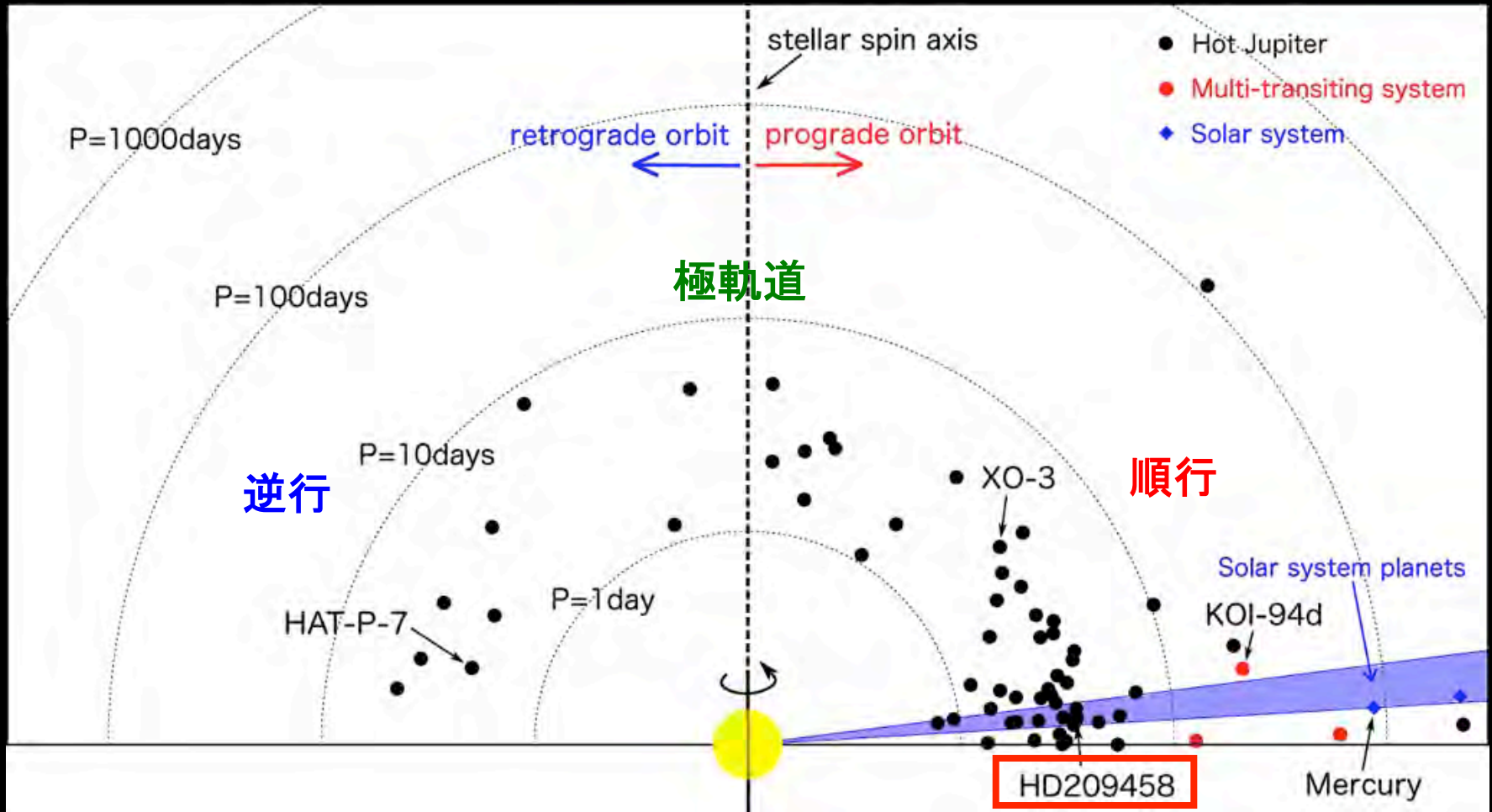


<http://kepler.nasa.gov/>

太陽系とは異なる特徴

- 発見されている惑星の約7%(ドップラー速度法)から20%(トランジット法)が、**公転周期一週間以内の巨大ガス惑星(ホットジュピター)**
- ホットジュピターはほとんど円軌道だが、より長周期の惑星には**高離心率軌道**が多い
- 標準太陽系形成モデル(原始惑星系円盤⇒ダスト成長⇒微惑星集積)によると、ガス惑星は氷境界とよばれる公転周期10年程度以遠でしか形成されないはず
- **ではどうやって惑星を移動させるか？**

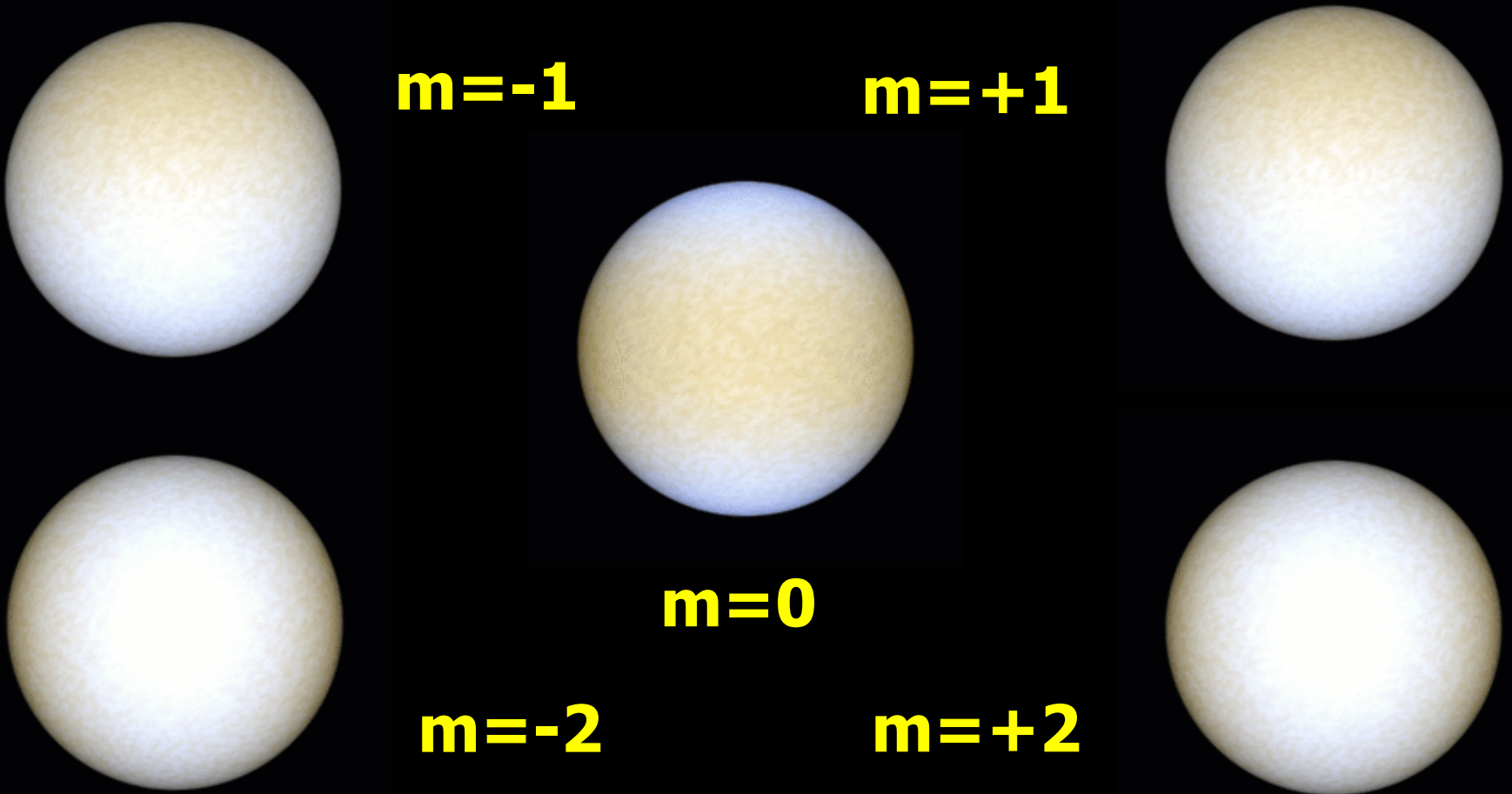
主星自転軸と惑星公転軸のまとめ (天球上の射影角なので3次元角度ではない)



2013年6月時点でRM効果が測定されたトランジット惑星70個中29個が $\pi/8$ 以上の有意なずれ。うち、8個が極軌道、7個が逆行軌道。

Xue et al. (2014)

Non-radial oscillations $Y_{lm}(\theta, \varphi)$ (spherical degree $l=2$)

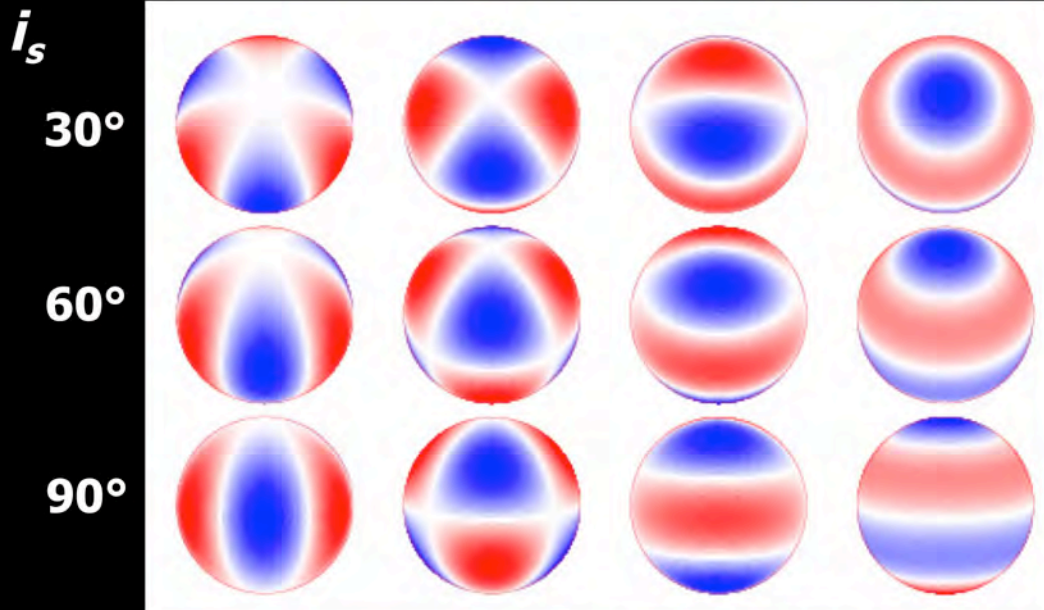


星震学と系外惑星系

- 星の非球対称振動モードの解析から、中心星の自転傾斜角 i_s を決定 (Benomar et al. 2014)

$Y_{lm}(\theta, \varphi)$ と Stellar inclination ($l=3$)

$m=\pm 3$ $m=\pm 2$ $m=\pm 1$ $m=0$



T.L. Campante, arXiv:1405.3145

- **Kepler-25 (2重トランジット惑星系)**

- $i_s = 65.4^\circ \text{ }^{+12.1^\circ}_{-7.4^\circ}$
- 射影角 $\lambda = 9.4^\circ \pm 7.1^\circ$
- 3次元角 $\psi = 26.9^\circ \text{ }^{+7.0^\circ}_{-9.2^\circ}$

- **HAT-P-7 (逆行惑星候補)**

- $i_s = 27^\circ \text{ }^{+35^\circ}_{-18^\circ}$
- 射影角 $\lambda = 186^\circ \text{ }^{+10^\circ}_{-11^\circ}$
- 3次元角 $\psi = 122^\circ \text{ }^{+30^\circ}_{-18^\circ}$

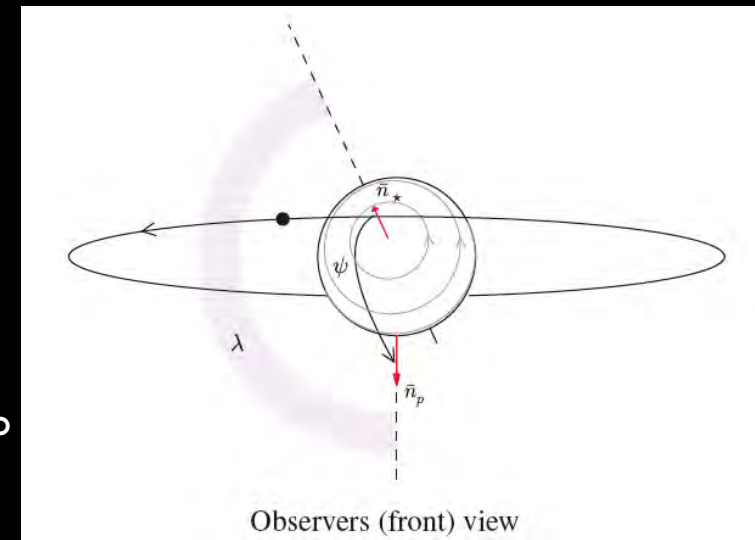
Kepler-25とHAT-P-7のspin-orbit角

■ Kepler-25 (2重トランジット惑星系)

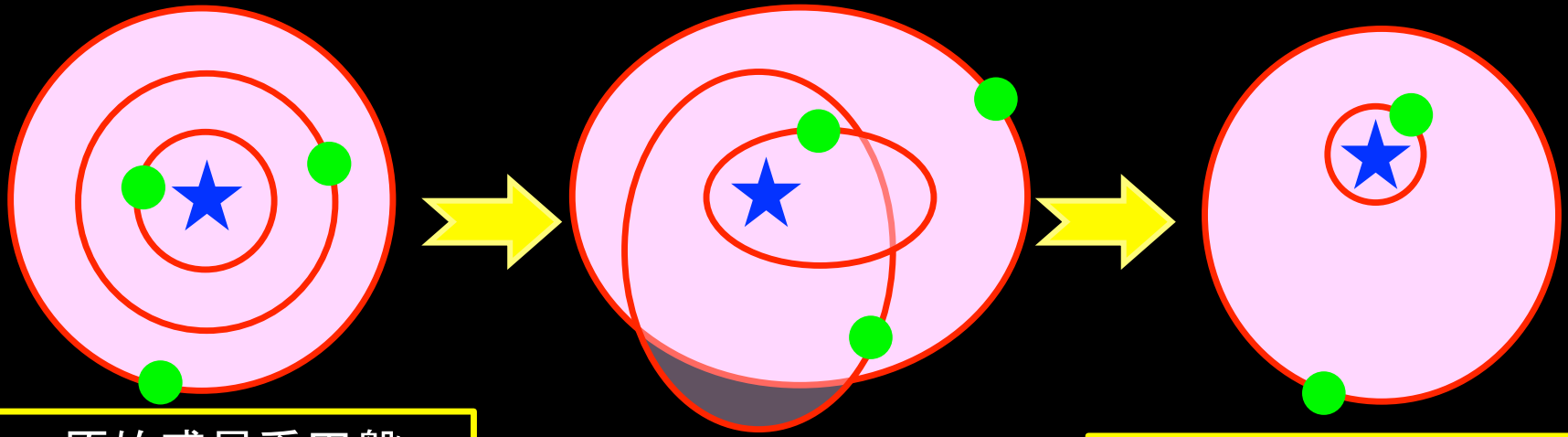
- 主星自転傾斜角 $i_s = 65.4^\circ \text{ }^{+12.1^\circ}_{-7.4^\circ}$
- 射影角 $\lambda = 9.4^\circ \pm 7.1^\circ$
- 3次元角 $\psi = 26.9^\circ \text{ }^{+7.0^\circ}_{-9.2^\circ}$

■ HAT-P-7 (逆行惑星候補)

- 主星自転傾斜角 $i_s = 27^\circ \text{ }^{+35^\circ}_{-18^\circ}$
- 射影角 $\lambda = 186^\circ \text{ }^{+10^\circ}_{-11^\circ}$
- 3次元角 $\psi = 122^\circ \text{ }^{+30^\circ}_{-18^\circ}$



惑星間重力散乱 + 主星・惑星潮汐作用 = 円軌道のホットジュピター + 遠方の高離心率軌道の惑星



- 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

- 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

太陽系形成標準モデル
(京都モデル・林モデル)

すでに知られているハビタブル惑星候補

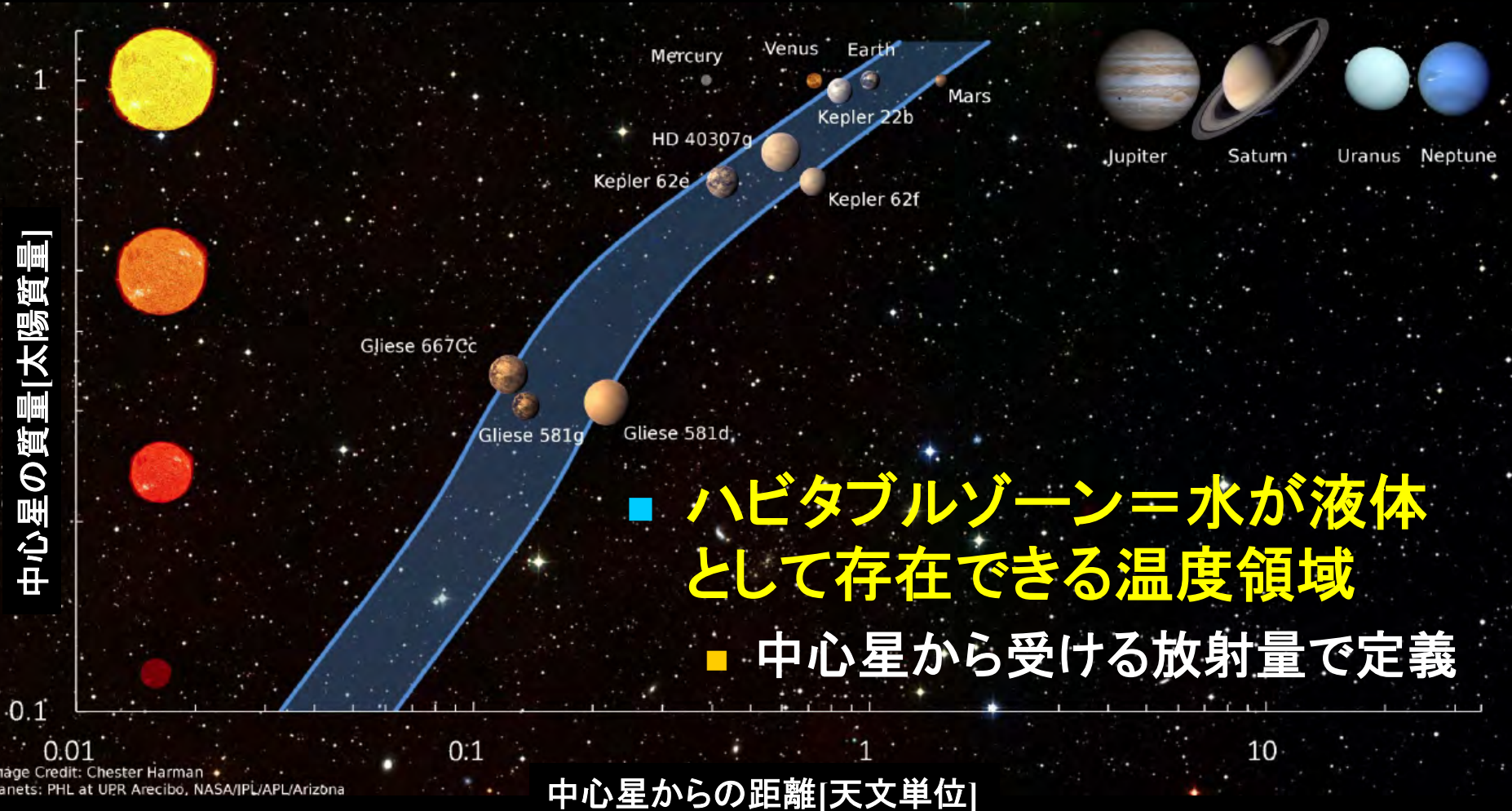


Image Credit: Chester Harman
Planets: PHL at UPR Arcibo, NASA/IPPL/APL/Arizona

Kasting, Kopparapu, Rameez & Harman (2013)

地球サイズのハビタブル惑星の存在確率

- **GK型星を公転する地球半径の1~2倍の惑星**
 - ケプラーのトランジット惑星検出数から、観測的選択効果を補正して推定
 - **11±4 % (地球上での太陽フラックスの1~4倍のもの)**
 - **5.7+2.2-1.7 % (公転周期が200~400日のもの)**

Table 1. Occurrence of small planets in the habitable zone

HZ definition	a_{inner}	a_{outer}	$F_{P,\text{inner}}$	$F_{P,\text{outer}}$	f_{HZ} (%)
Simple	0.5	2	4	0.25	22
Kasting (1993)	0.95	1.37	1.11	0.53	5.8
Kopparapu et al. (2013)	0.99	1.70	1.02	0.35	8.6
Zsom et al. (2013)	0.38		6.92		26*
Pierrehumbert and Gaidos (2011)		10		0.01	~50 [†]

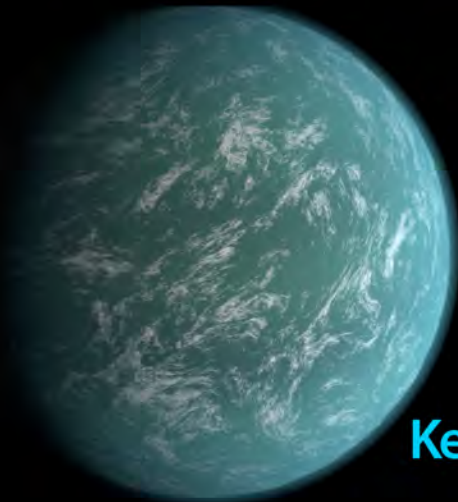
ハビタブル惑星候補の例

Kepler-22 System

もう一つの地球？ 生命は存在するのか？

Solar System

Habitable Zone



Kepler-22b



Mercury

Venus

Earth

Mars

Planets and orbits to scale

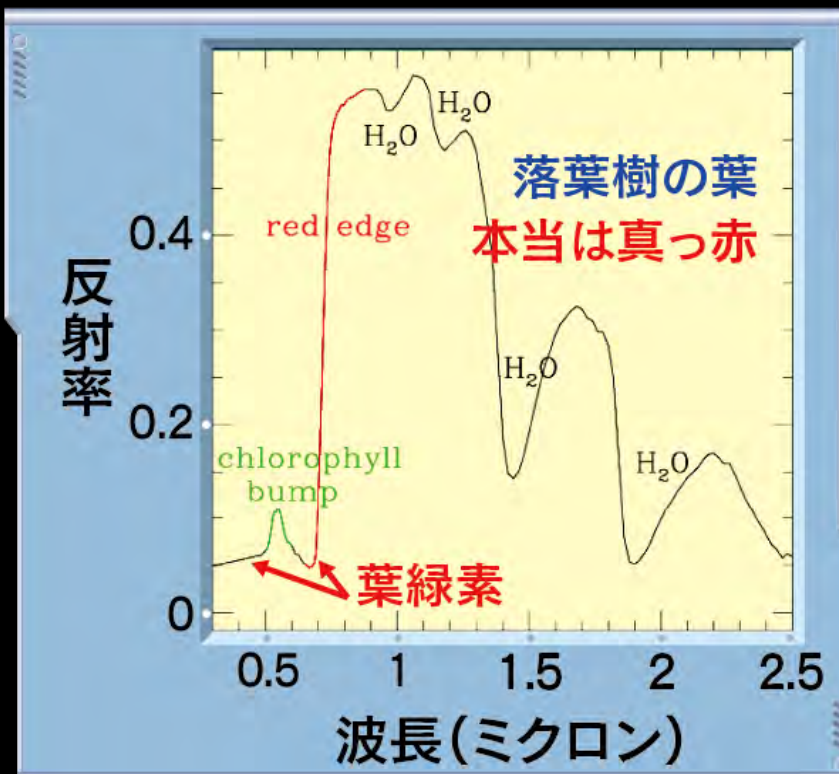
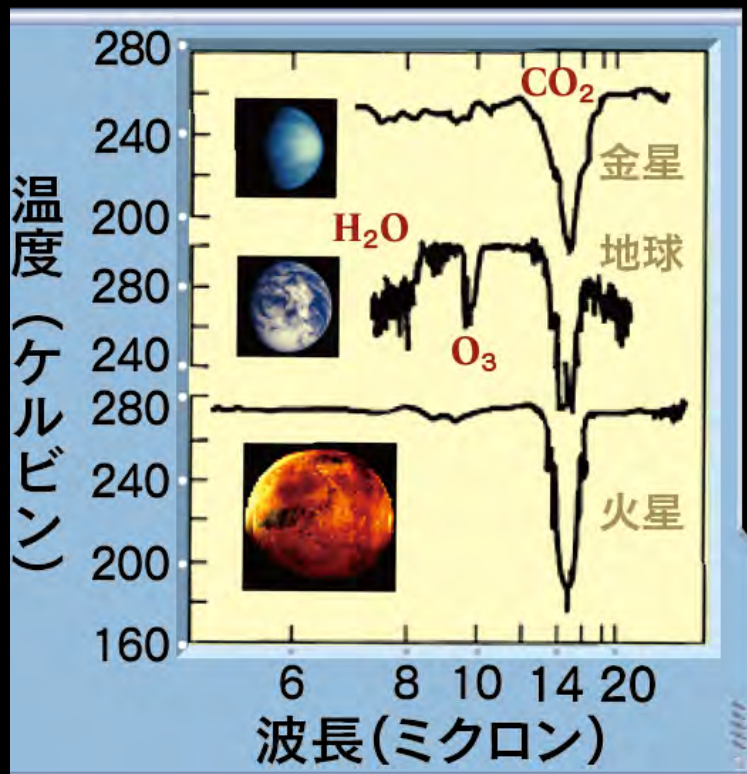
バイオマーカー：生物が存在する兆候

- 何が決定的バイオマーカーなのかは不明
 - 地球外での生命の定義？
 - 地球上での生命の指標
 - 生物由来と考えられる大気成分（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

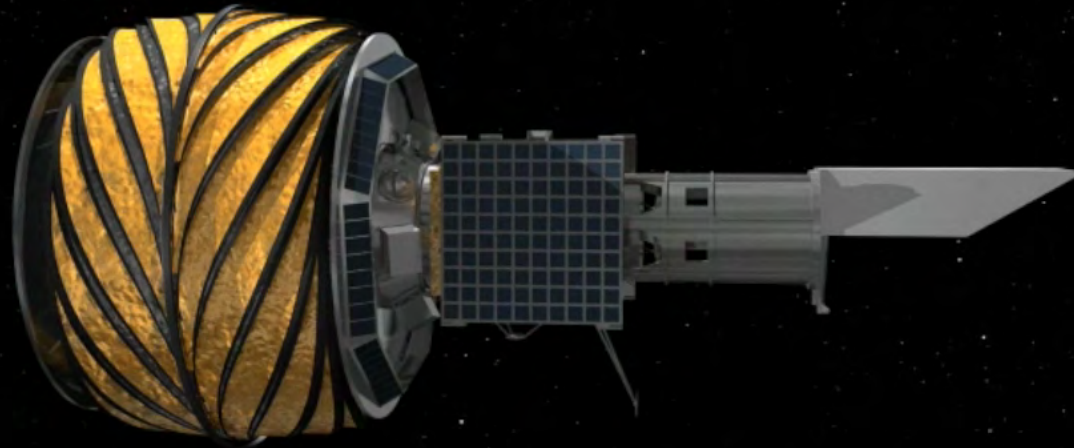
天文学から宇宙生物学へ

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)



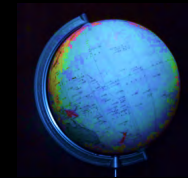
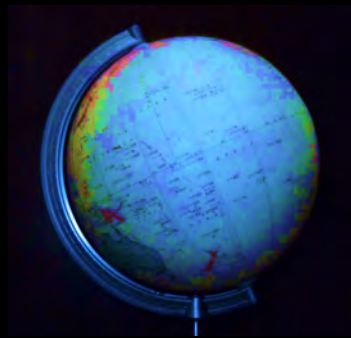
Starshade project: 地球型惑星を直接見る



- 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)

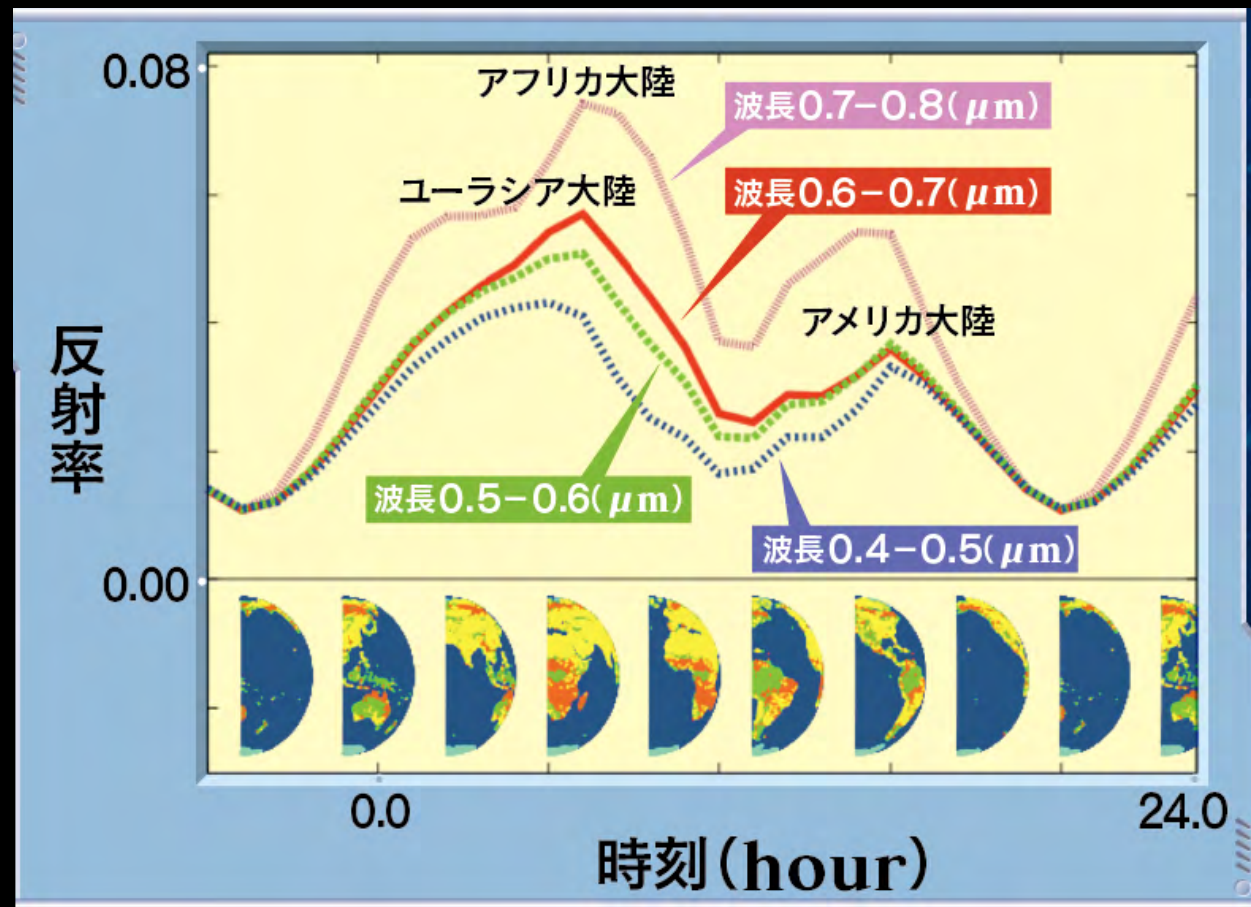
ペイルブルードットを超えて

- 系外惑星は「点＝ドット」としか見えない
- 表面を直接分解できない
- 自転周期による微妙な色の変化は観測可能



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 他(2010)

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

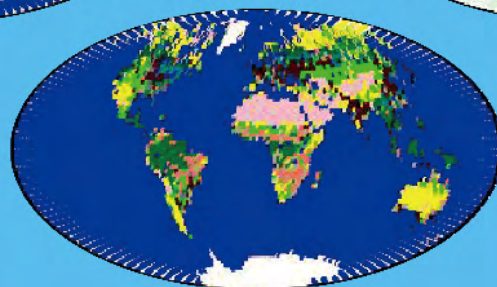
海



植生



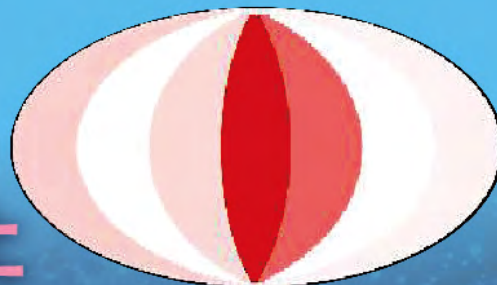
雲



雪



土



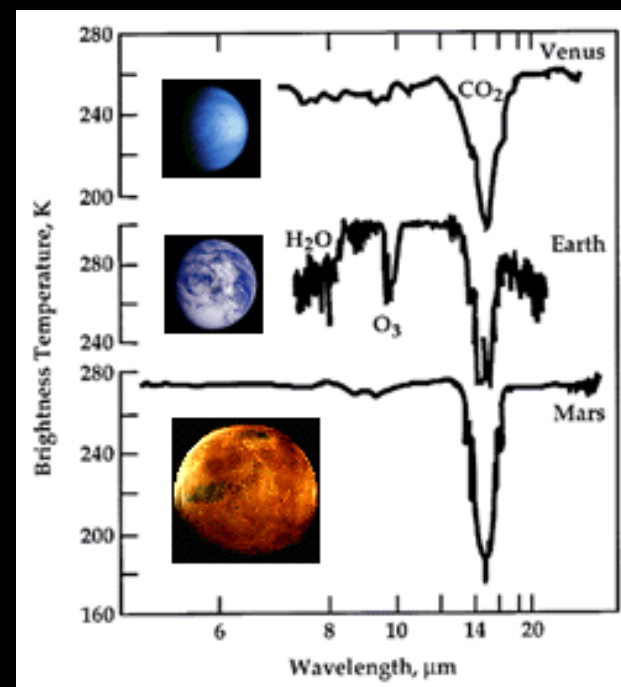
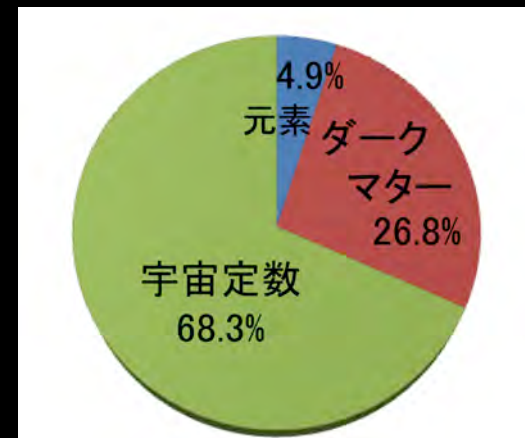
藤井友香 他(2011)

カッシーニ二探査機が見た地球



「夜空ノムコウ」を探り、新たな世界観を生み出す

- 過去の地球さらには全く異なる環境下での気象シミュレーションを用いた、惑星観測から生命の兆候を探る方法論の開拓
- 長周期トランジット惑星のまわりのリングの探索
- 星震学を応用した惑星系の自転軌道角の決定
- 天体力学的数値シミュレーションによる惑星移動機構の解明



惑星科学国際研究ネットワーク

汎惑星進化史の構築から水と生命の起源へ



東京大学
THE UNIVERSITY OF TOKYO



天

サンプルリターンによる始原物質の組成解明



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

系外惑星系の多様性と普遍性の解明

はやぶさ2(2014-2020) (2016-2023)

OSIRIS-REx

CHEOPS
(2018-2022)



すばる



国立天文台
NAOJ
National Astronomical
Observatory of Japan

一般的なアドバイス

- 須藤研で行われている研究の詳細に関しては、以下のホームページを参照のこと
 - <http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp>
 - <http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mytalks.html>
- 大学院進学を希望する研究室の先生にはメールで連絡してから、必ず直接話をうかがおう
 - 学部とは異なり大学院教育は各研究室単位。特に理系では、公私ともに研究室中心の生活になる
 - それぞれ独自の伝統、文化、雰囲気があるので、研究テーマはもちろん、それらとの相性も極めて大事