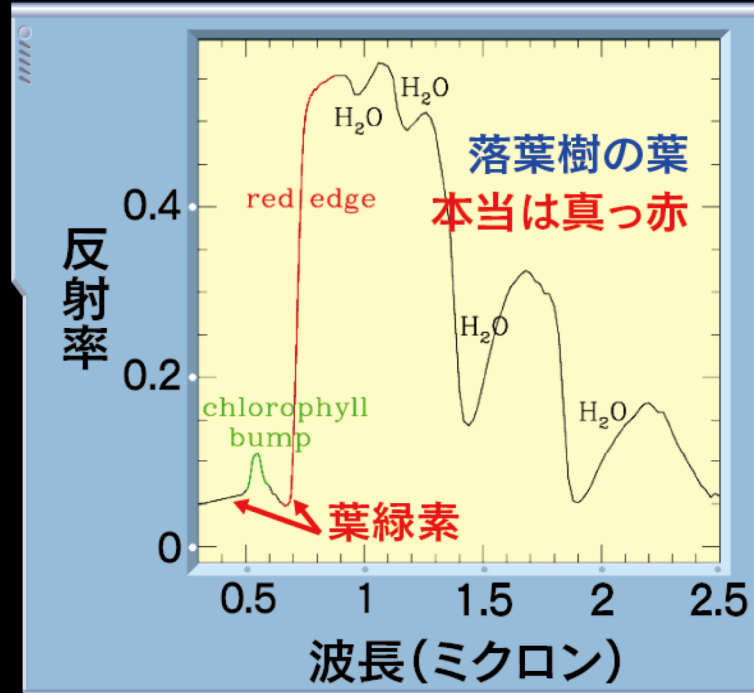
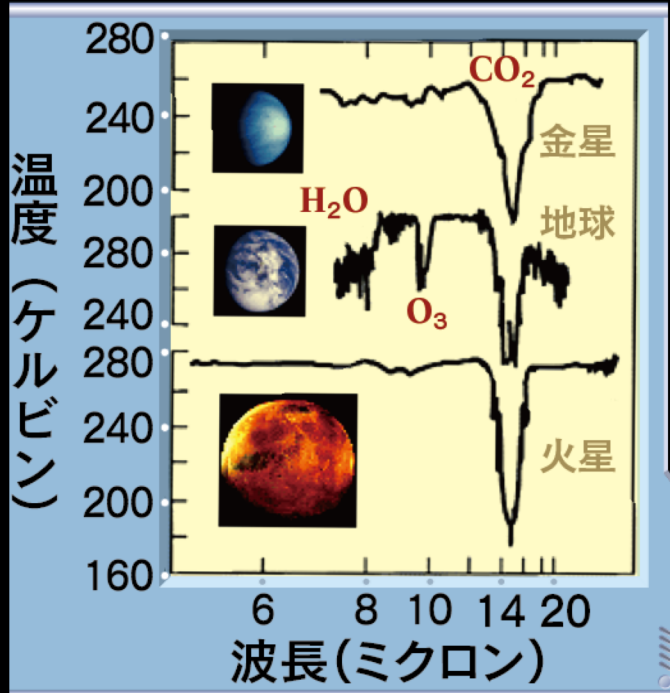


# 太陽系外惑星から宇宙生物学へ

[http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation\\_2018j.html](http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2018j.html)



物理教室大学院ガイダンス

A5 須藤研

2018年5月25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：公募中
  - 准教授：Kipp Cannon、助教：公募中
- 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)



# 須藤研で行っている研究テーマの例

## ■ 宇宙論

- すばる望遠鏡を用いた観測的宇宙論(大栗助教)
- 重力レンズ天文学(大栗助教)
- 銀河・銀河団の非球対称性の起源と進化

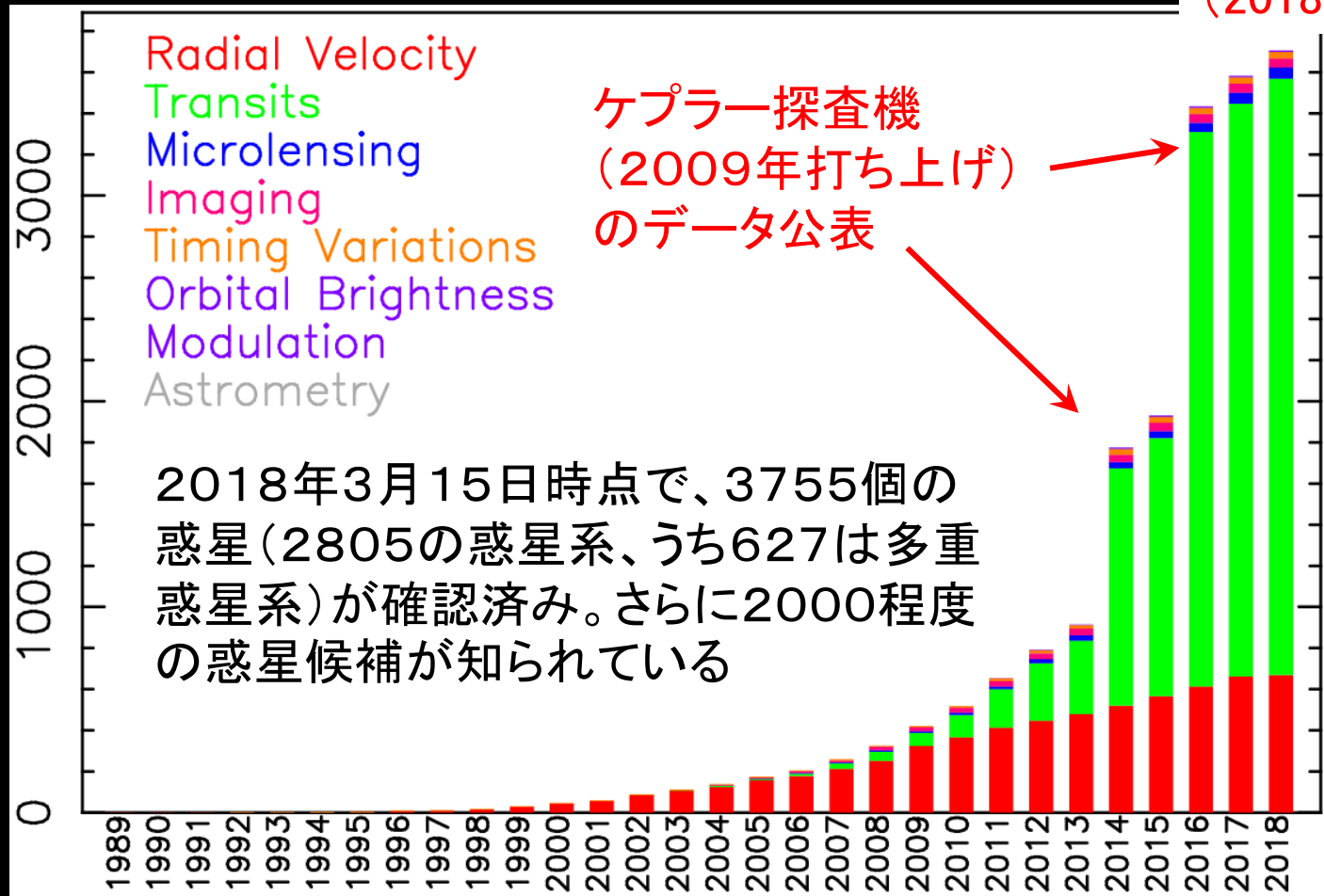
## ■ 系外惑星

- 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
- 系外惑星系の衛星・リングの検出
- 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

# 太陽系外惑星発見年表

TESS探査機  
打ち上げ  
(2018年)

発見  
総数

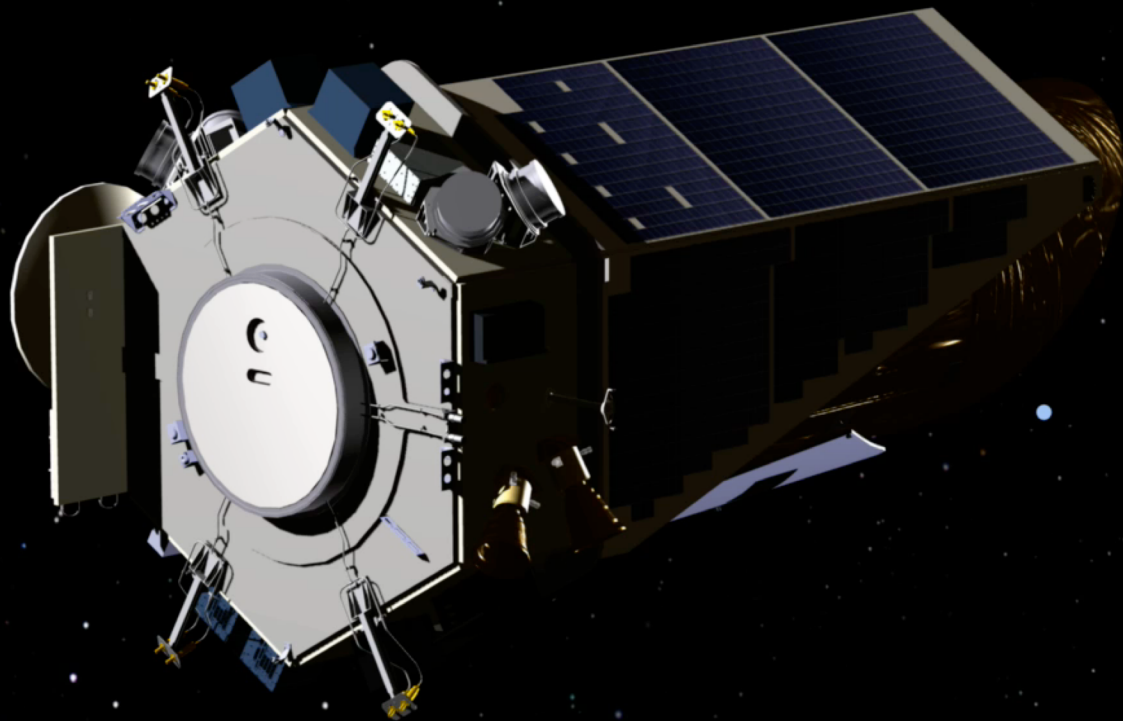


2016年6月時点では

西暦

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

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、ガス惑星は公転周期10年程度以遠でしか形成されない
- **少数多体系の力学進化とカオス**



# GAIA



→ HOW MANY STARS WILL THERE BE

position & brightness on the sky

**1 692 919 135**

parallax and proper motion

**1 331 909 727**

radius & luminosity

**76 956 778**

amount of dust along  
the line of sight

**87 733 672**

**14 099**  
Solar System  
objects

radial velocity

**7 224 631**

**550 737**  
variable sources

- 系外惑星系
- ブラックホール





# Transiting Exoplanet Survey Satellite

## Launch Vehicle



- SpaceX Falcon 9 Full Thrust
- High Earth Orbit (HEO)

## Observatory



- Orbital LEOStar-2
- Instrument-in-the-loop attitude control

## Science Instrument



- Four Wide Field-of-View CCD Cameras
- 24°x 24° Field-of-View
- Well defined spacecraft interfaces

## Project Overview

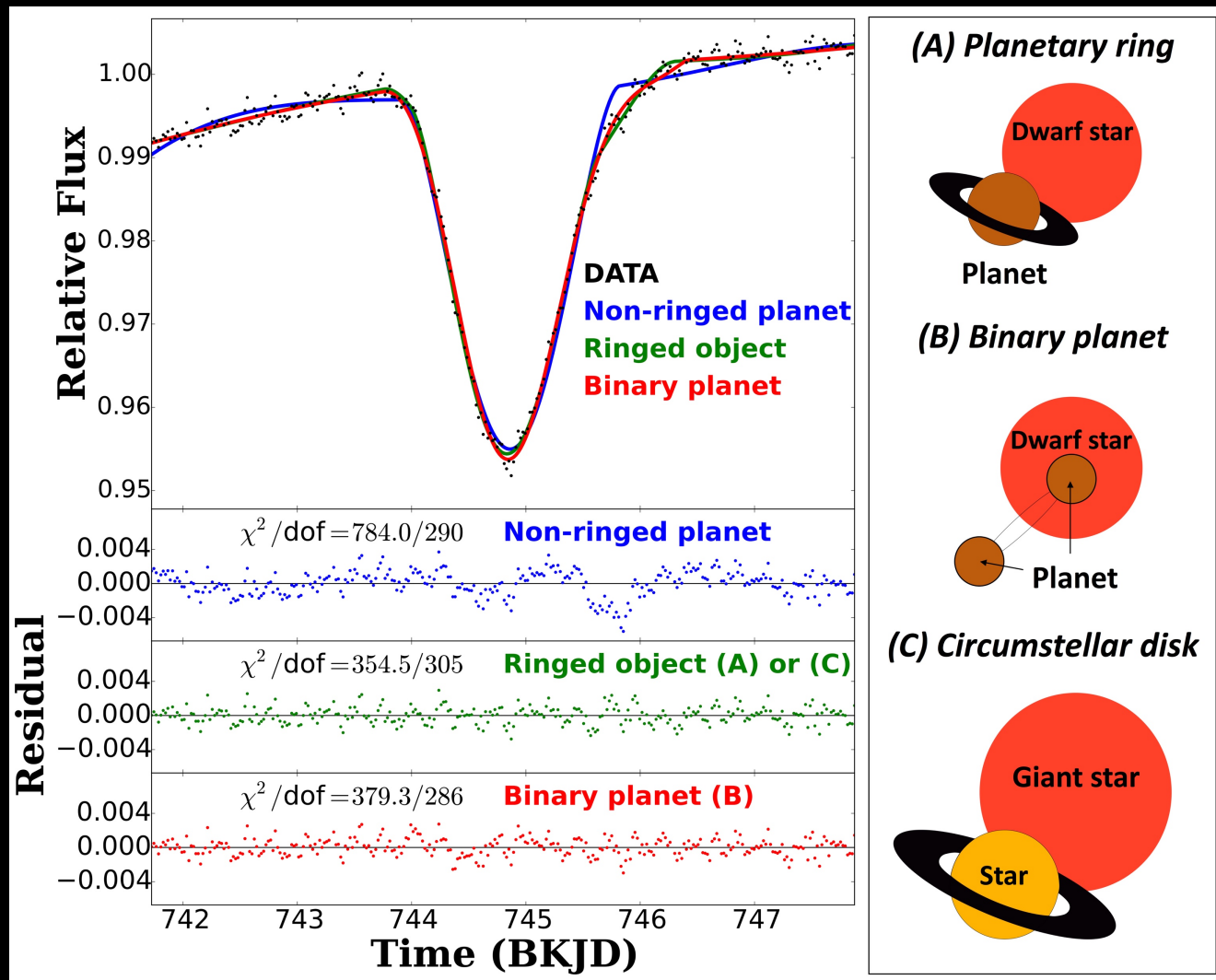
- Transiting exoplanet discovery mission
- 2 month Commissioning period
- 2 year all-sky survey (3 year science mission)
- Identifies best targets for follow-up characterization
- Deep Space Network (DSN) primary support
- Category II, Class C
- Launch Readiness Date: March 2018
  - Agency Baseline Commitment: June 2018
- PI Cost Cap: \$228.3 M (RYS)



# 系外惑星 リング の発見？

逢澤正嵩  
修士論文  
(2017)

7月にすばる  
望遠鏡で  
追観測予定！



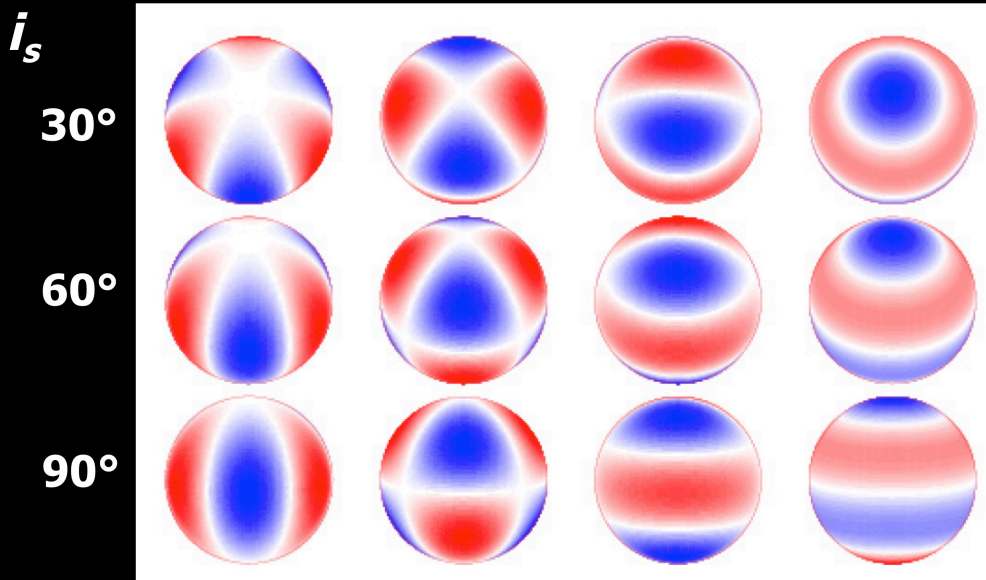
- ケプラー衛星データのトランジット信号からアノマリーを探す
- <http://aasnova.org/2017/04/07/the-search-for-ringed-exoplanets/>

# 星震学と系外惑星系の構造

- ケプラーデータ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)**

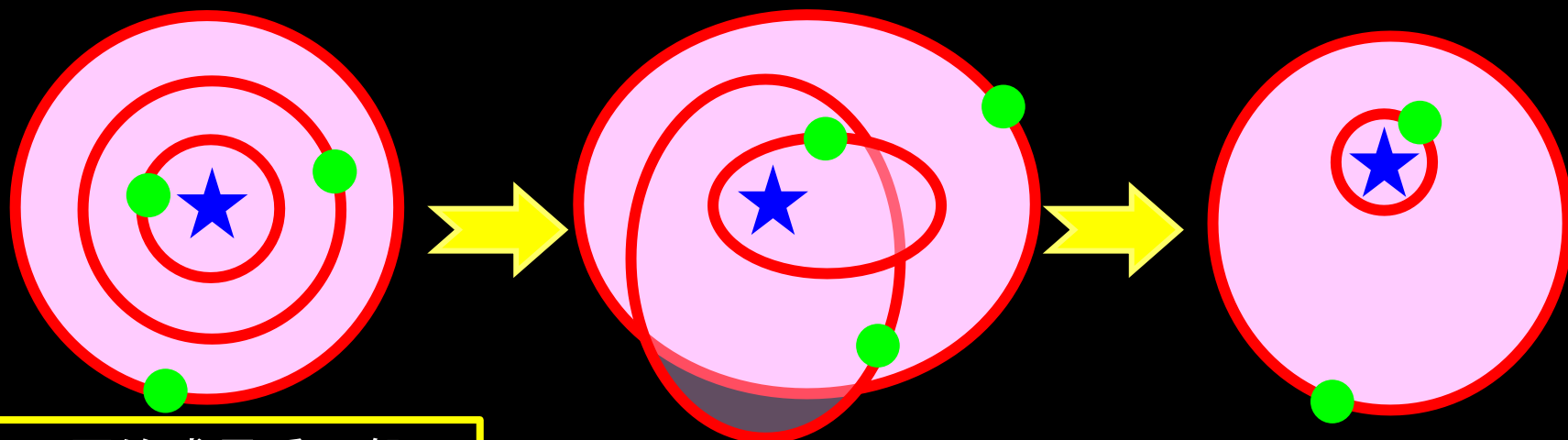
- $i_s = 65.4^\circ \quad +12.1^\circ \quad -7.4^\circ$
- 射影角  $\lambda = 9.4^\circ \pm 7.1^\circ$
- 3次元角  $\psi = 26.9^\circ \quad +7.0^\circ \quad -9.2^\circ$

- **HAT-P-7 (逆行惑星候補)**

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

上赤翔也 博士論文 (2019)

# 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

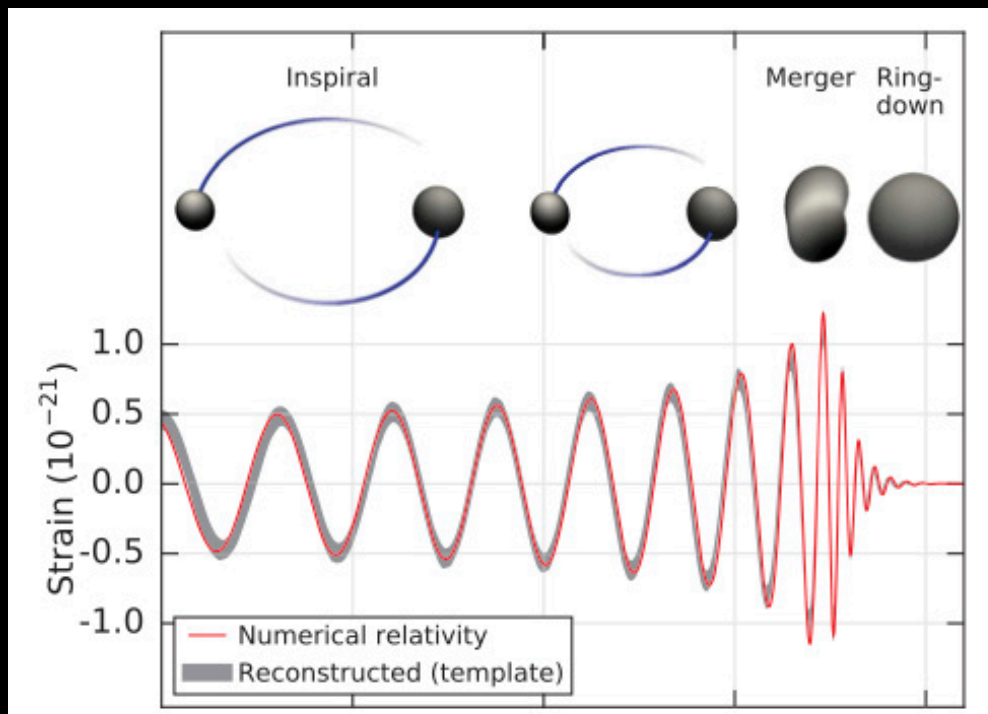
- 重力少数多体系
- カオス的力学進化
- 近接散乱
- 軌道交差
- 惑星放出

- 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)



# 古くて新しい 重力3体問題

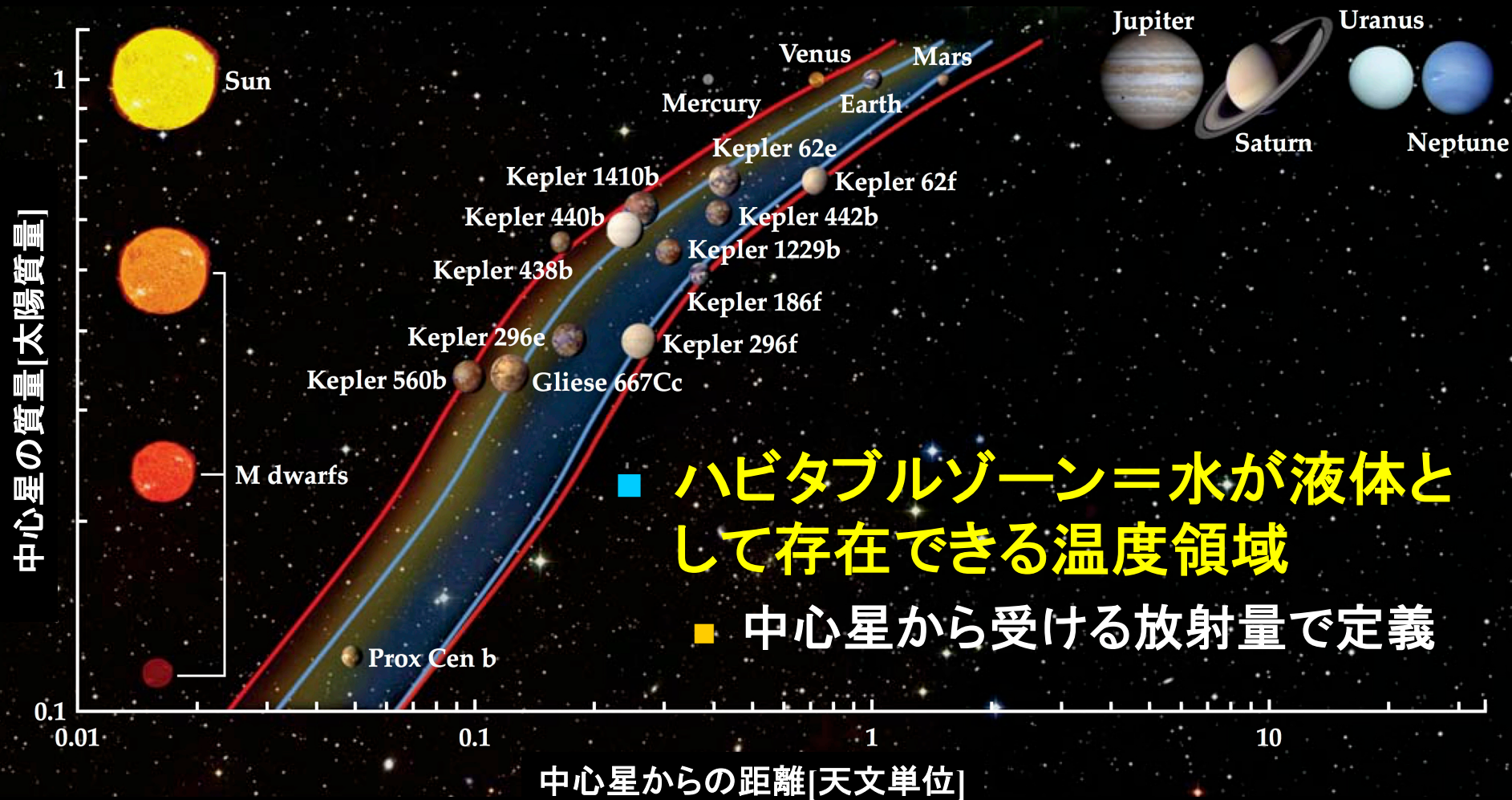


- ALMA望遠鏡による原始惑星系円盤の詳細観測
  - これを初期条件とした惑星系の力学的多様性の予言
  - Shijie Wang 修士論文 (2019)

- LIGOによる連星ブラックホールの発見
  - GAIA+視線速度法による長周期連星ブラックホール探査の可能性
  - 林利憲 修士論文 (2019)



# ハビタブル惑星候補



# 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	$a_{\text{inner}}$	$a_{\text{outer}}$	$F_{P,\text{inner}}$	$F_{P,\text{outer}}$	$f_{\text{HZ}}$ (%)
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 <sup>†</sup>

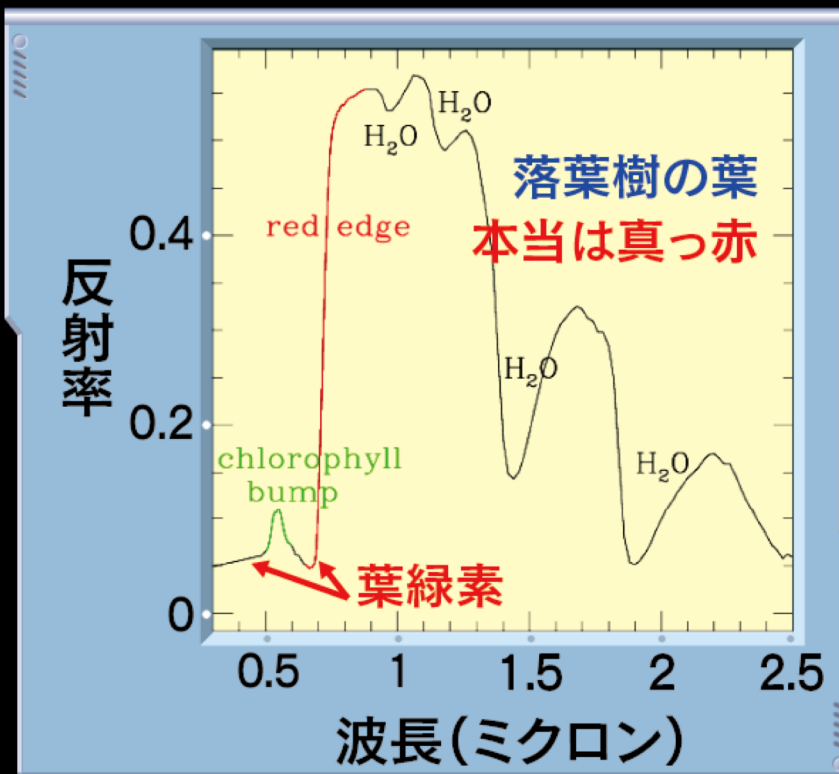
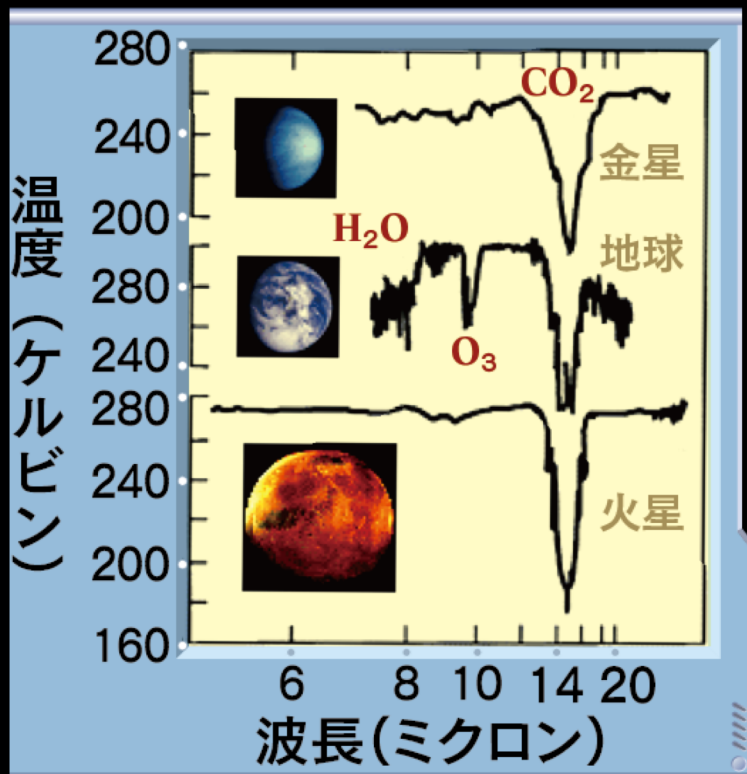
# バイオシグニチャー —生物が存在する兆候—

- 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

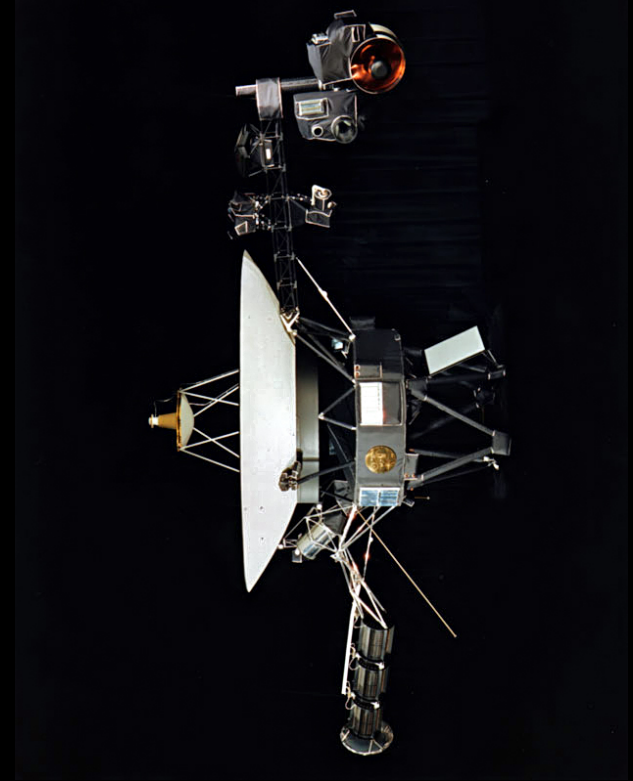
## ハビタブル惑星に生命の兆候を探す

- 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)

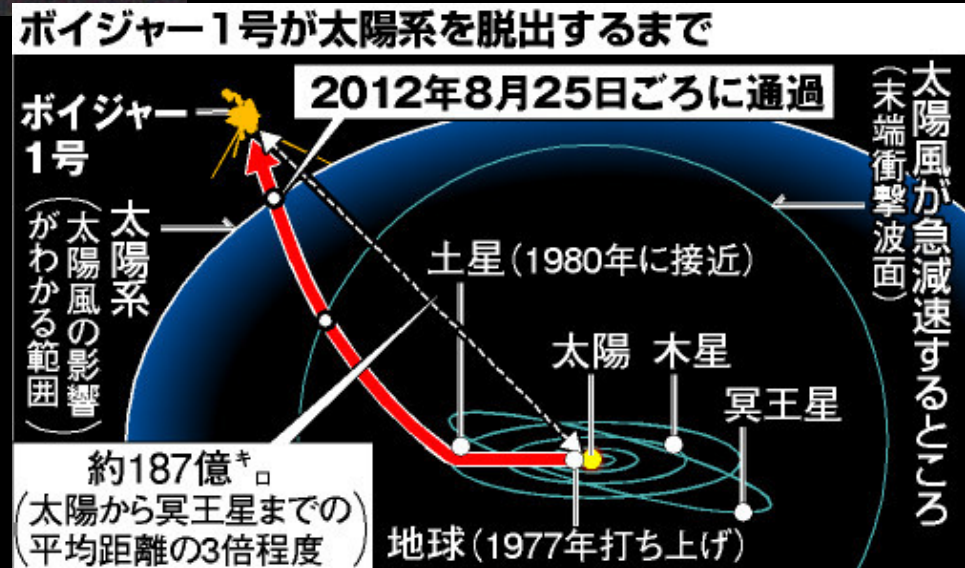




# ペイル・ブルー・ドット



- 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





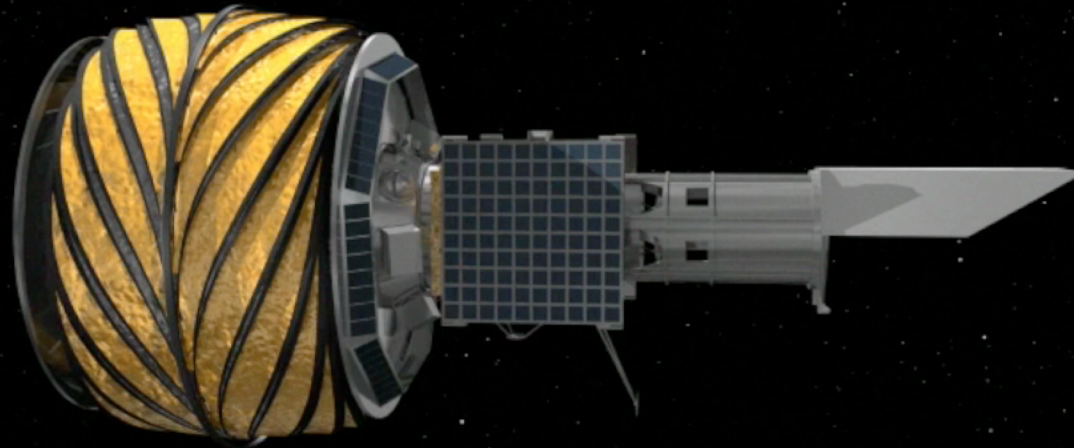
# 土星から 見た地球



- 土星探査機カッシーニが撮影した地球と月
  - 2013年7月20日(日本時間):2万人がこちらに手を振っている

View from Saturn (Cassini)  
900 million miles away

# Starshade project: 地球型惑星を直接見る



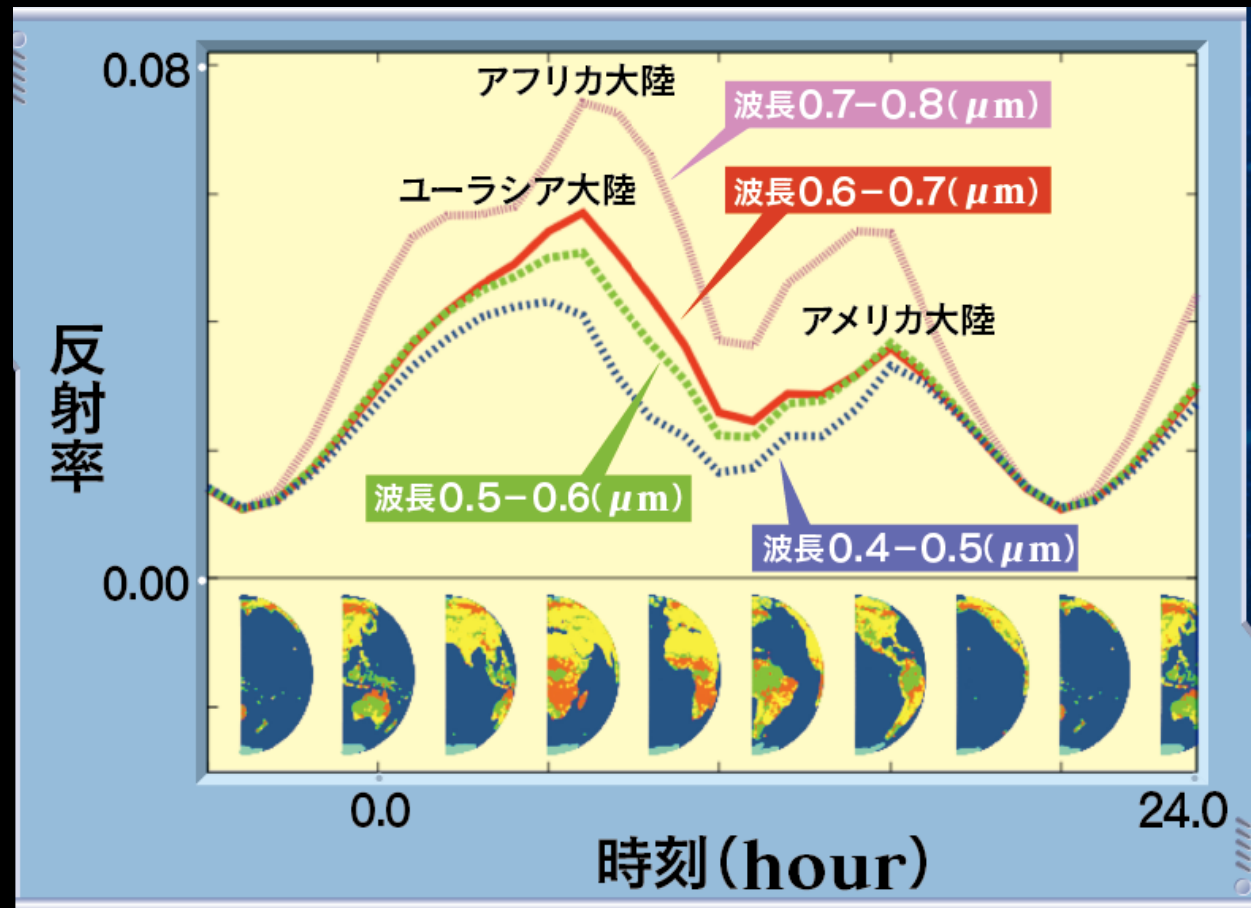
- 宇宙望遠鏡の5万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおき、惑星を直接撮像(プリンストン大学 J.Kasdinらのグループ)

# 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

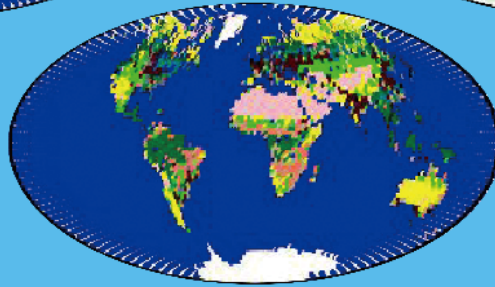
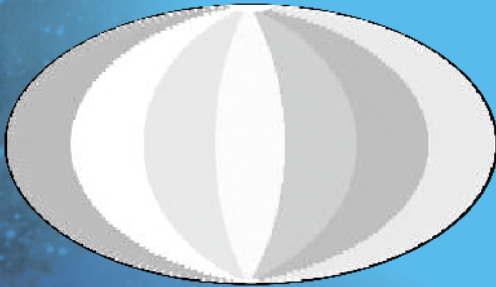
海



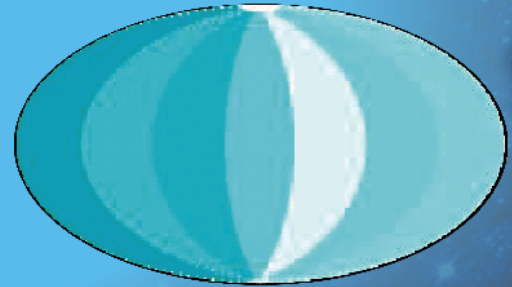
植生



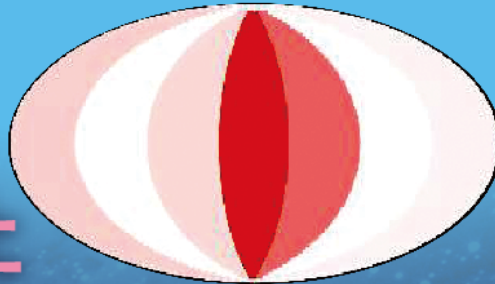
雲



雪



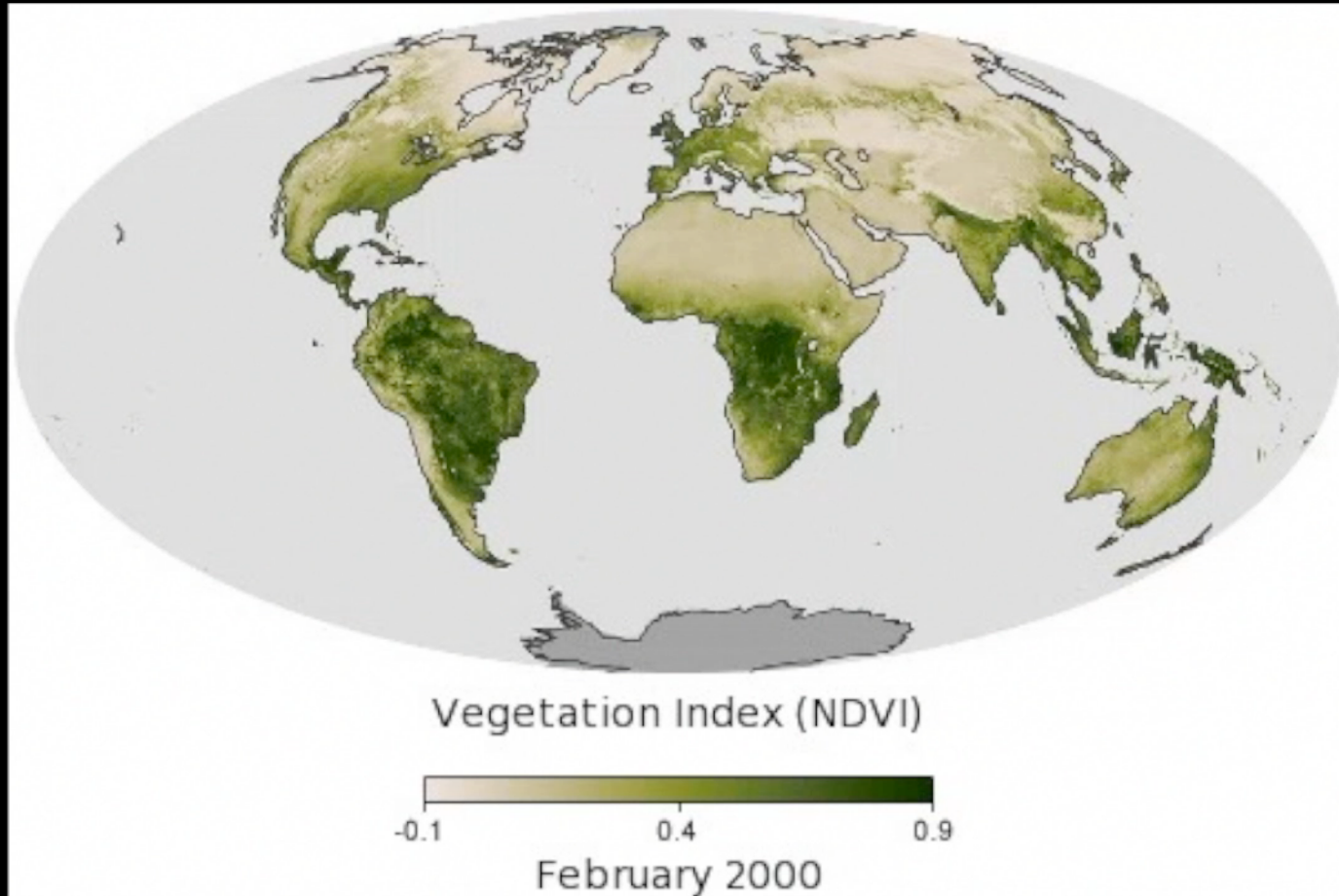
土



藤井友香  
博士論文(2013)

Fujii et al. (2011)

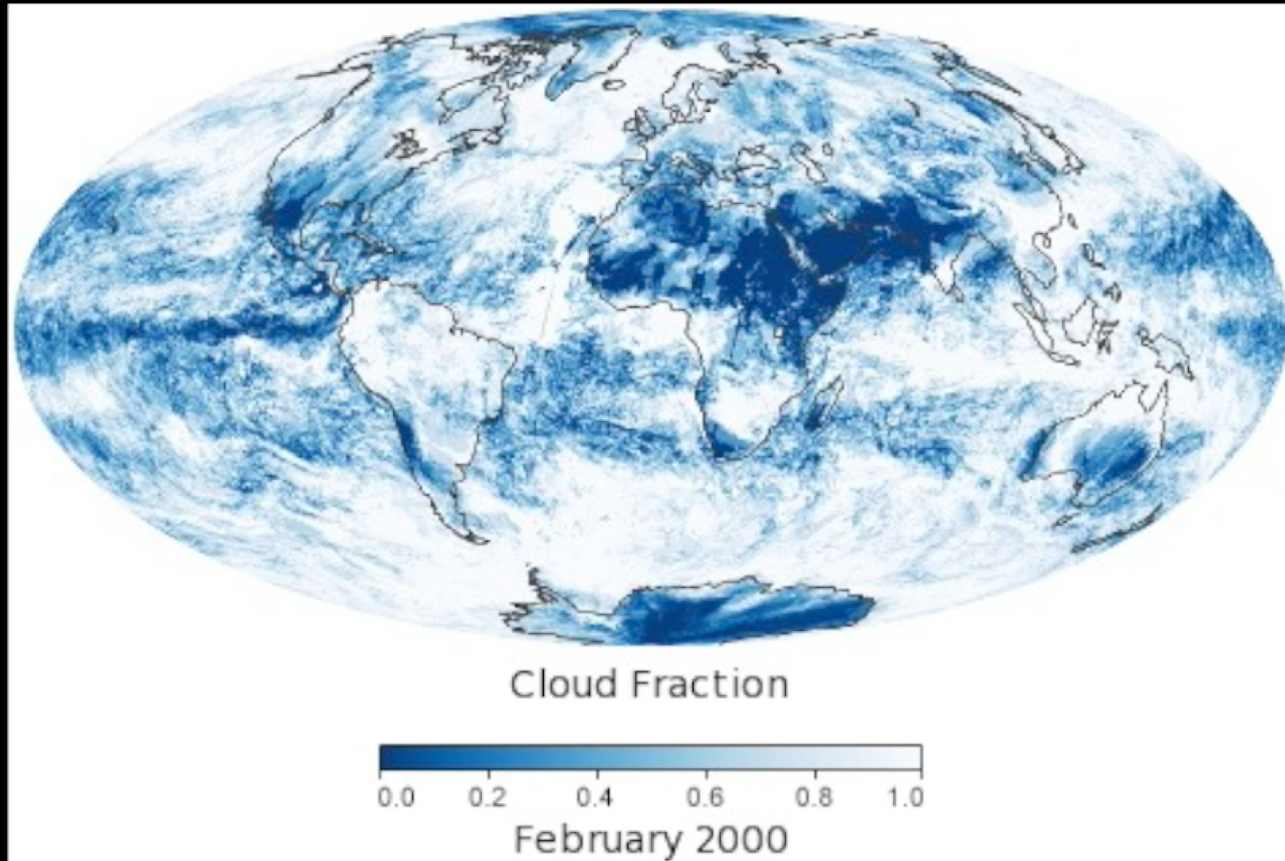
# 地球観測衛星Terraによる 植生分布地図の年次変化



<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>

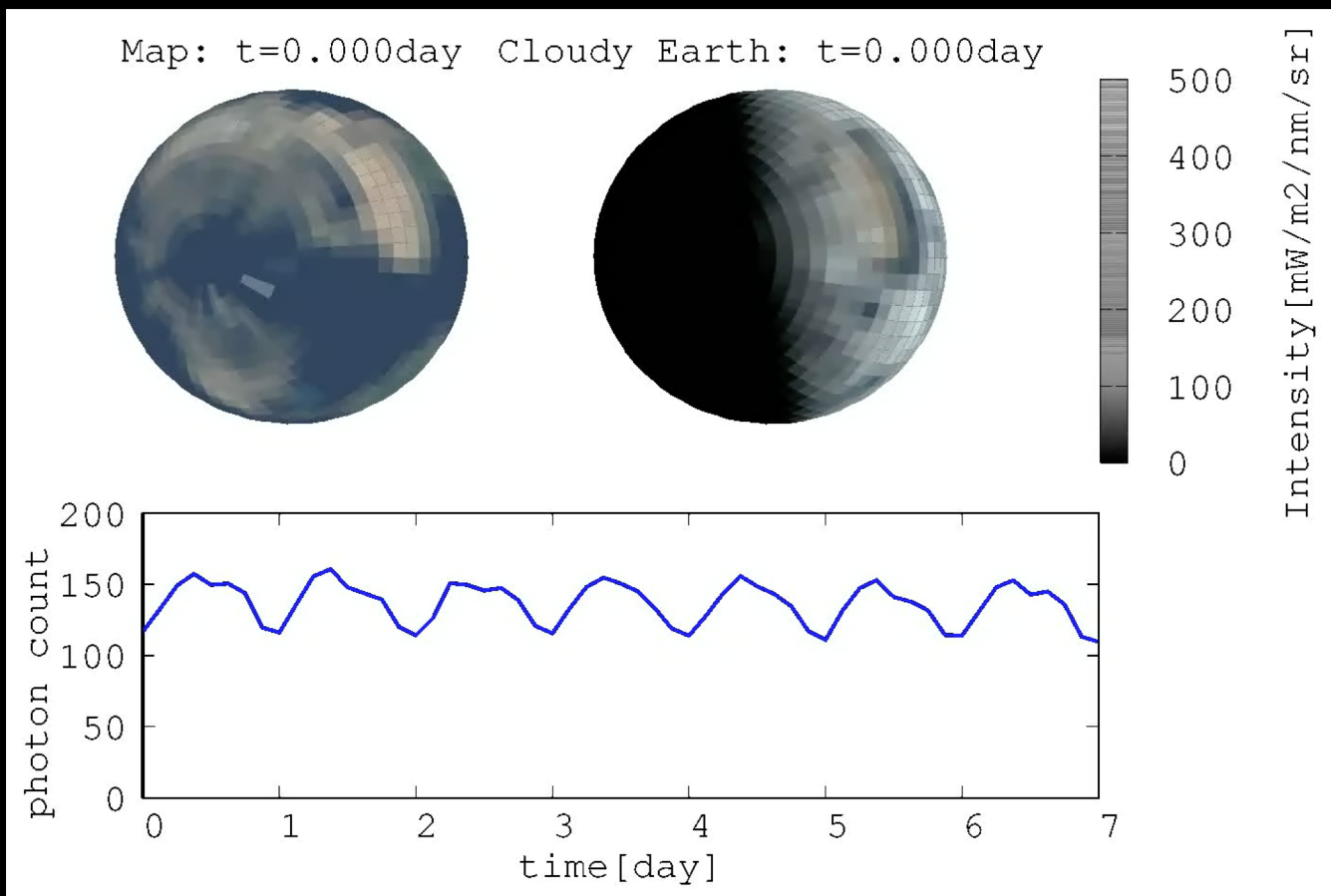


# 厄介なことに雲の存在が 地表面の情報を分かりにくくする



<http://earthobservatory.nasa.gov/GlobalMaps/>

# 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

# 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

系外惑星系の多様性と普遍性の解明



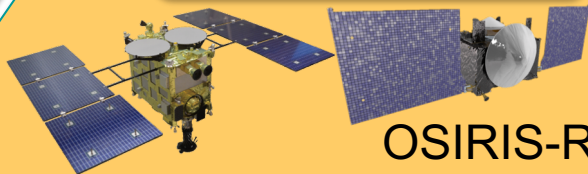
第二の地球？  
生命を育む惑星  
惑星を育む宇宙

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



OSIRIS-REx

はやぶさ2(2014-2020) (2016-2023)



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/~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