

系外惑星にみるハビタビリティ

倉本 圭

北海道大学

大学院理学研究院自然史科学部門

理学院宇宙理学専攻

理学部地球惑星科学科

自己紹介

- 室蘭市出身
- 登別市鷺別小学校・浦河町堺町小学校（化石採集に熱中）
札幌市平岸小学校
- 平岸中学校（地学部で天文・気象・岩石漬）
- 札幌南高校（帰宅部）
- その後東京で13年修業（恩師=松井孝典）、1997年(運よく)北大Uターン就職
- 宇宙科学が弱いと言われていた北大・北海道で宇宙科学を広めたい
- 北大での講義
 - 熱力学（一年生）
 - 地球惑星科学I（固体地球の地学、一年生教養）
 - 大気と星の構造学（三年生）
 - 情報実習（二・三年生）
 - 惑星システム学特論（大学院）
 - そのほかオムニバス講義・アウトリーチ講義

3. 計画研究の内容と期待される成果

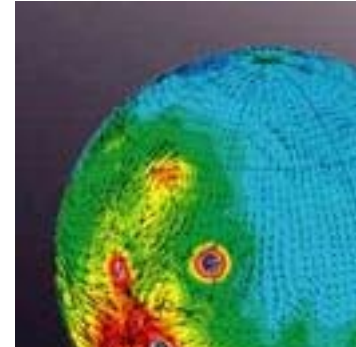
計画研究A02 (代表: 倉本 圭)

系外惑星大気の数値モデリングと形成進化理論

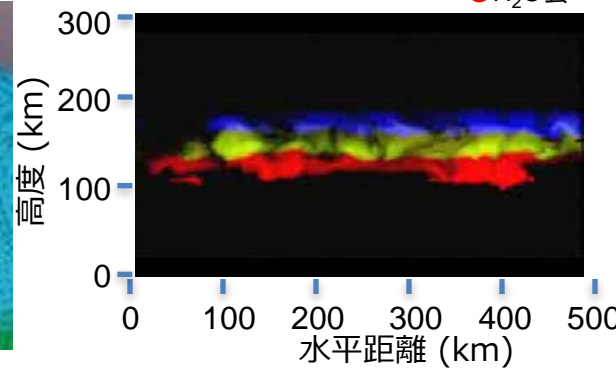
- NH₃雲
- NH₄SH雲
- H₂O雲

- 整合性を持つ大気モデル群の開発
→ **大気循環と熱収支**を再現
- 惑星放射スペクトルモデルの構築
→ 系外惑星の**特徴付け**と惑星**進化論**的解釈
- ハビタブル水惑星大気形成進化理論の拡張 → **大気進化の多様性**を解明

3D全球循環

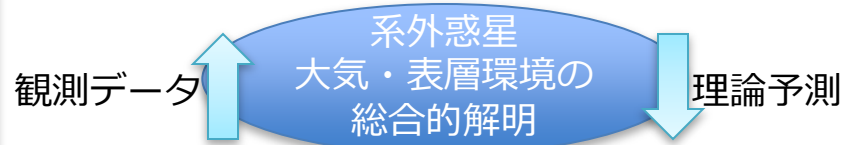


2D雲対流



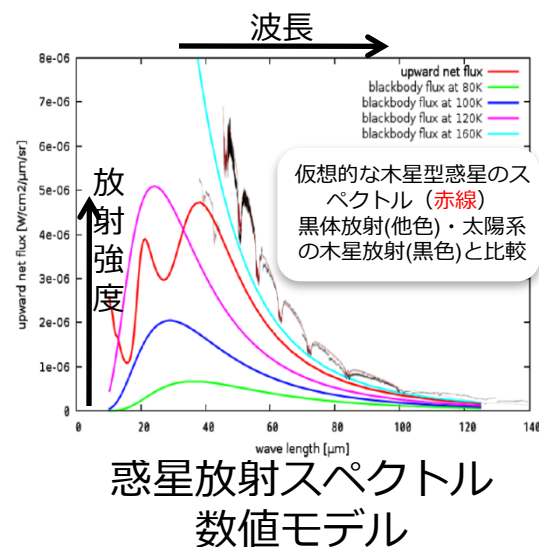
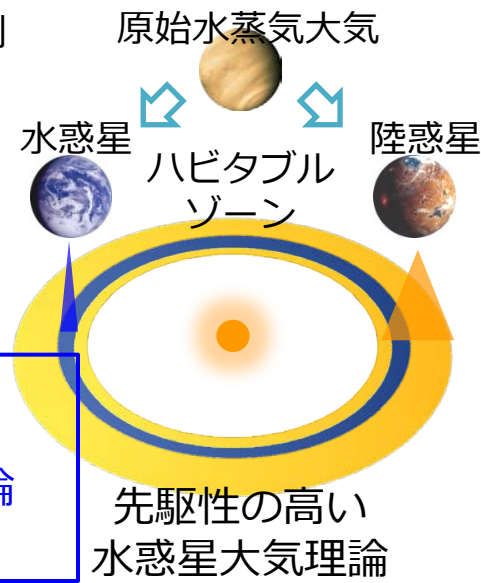
階層的大気数値モデル群

解像度・次元・変数を階層的に設定、相互の整合化により再現性向上



観測データ ↑ 系外惑星 大気・表層環境の 総合的解明 ↓ 理論予測

観測研究 A01
ガス惑星直接撮像・分光
系外地球型惑星検出



- 大気形成・進化論の構築は、
- B01 円盤から惑星へ
 - B02 ハビタブル地球型惑星の形成理論との密接に共同

宇宙・地球のつくりと成り立ち

- 階層性

惑星

太陽

太陽系

星団・星間雲

銀河

銀河団



1

百倍

百万倍

一億倍

十兆倍

一京倍

- ビッグバン宇宙

- 超高温の火の玉（ばらばらな素粒子と激光のスープ）から宇宙は出発

- 宇宙史=冷却と分化（複雑化）の歴史

- 地球のような生命をはぐくむ惑星の形成条件？

水の惑星・奇跡の旅立ち

- 1987年NHK番組「地球大紀行」
 - 12回シリーズの第1回目のタイトル
 - 松井と阿部による水惑星誕生の理論がベース
- 私のかつての学生（視聴時小学3年生）
 - 地球は奇跡の存在だと思った
- 当時、地球物理学科にいた私もそういう印象
 - わくわく感
 - 一方で、「奇跡」で片つけてしまうのはちょっとね、という抵抗感も

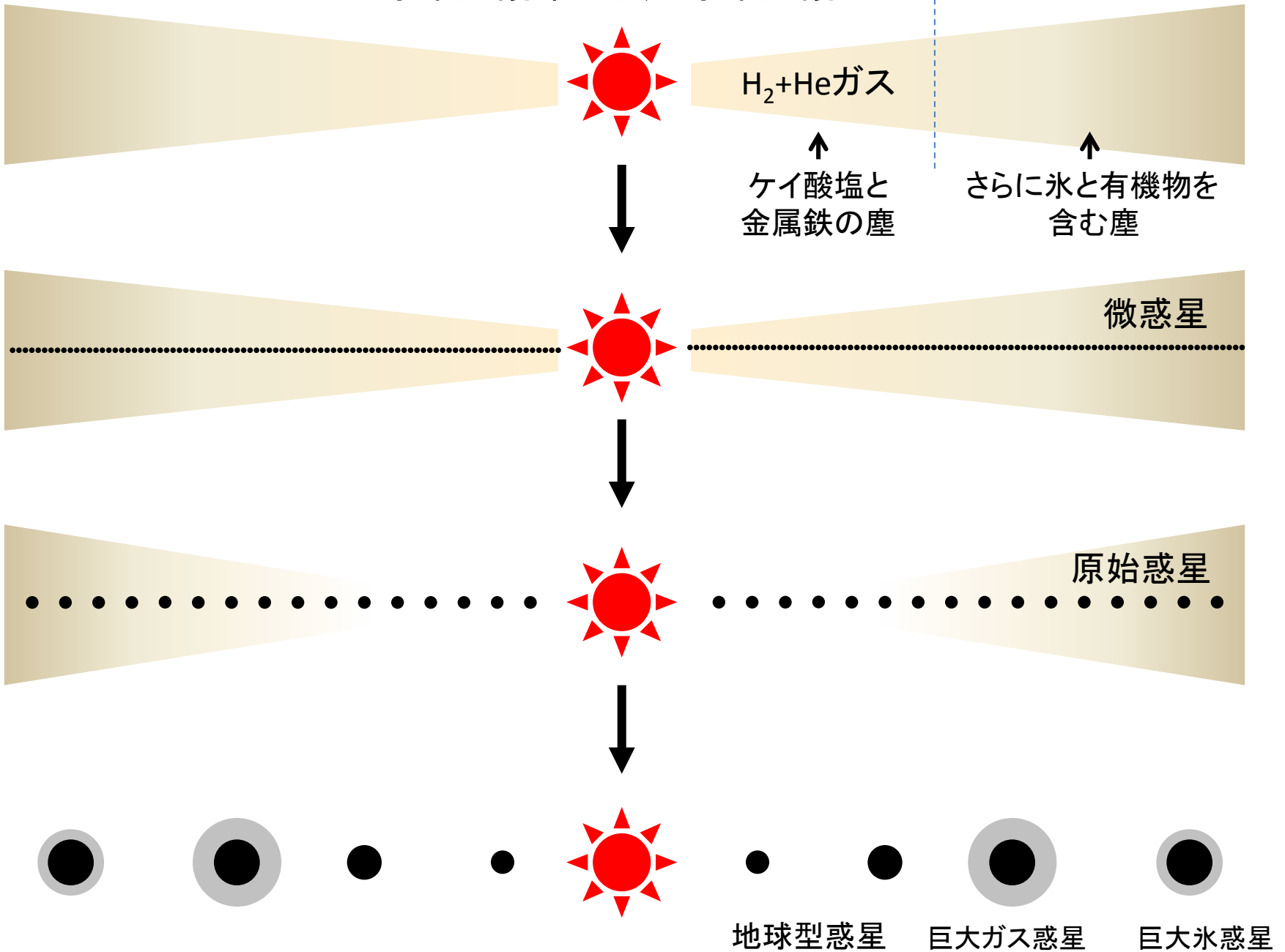


地球大紀行

水惑星の理論

- 松井と阿部によるシリーズ論文
 - Evolution of an impact-induced atmosphere and magma ocean on the accreting Earth, *Nature*, 319, 303–305 (1986)
 - Impact-induced atmospheres and oceans on Earth and Venus, *Nature*, 322, 526–528 (1986)

原始太陽系星雲と原始太陽



地球中心

宇宙空間

地球形成の開始

大気の形成

マグマオーシャンの形成

核の形成

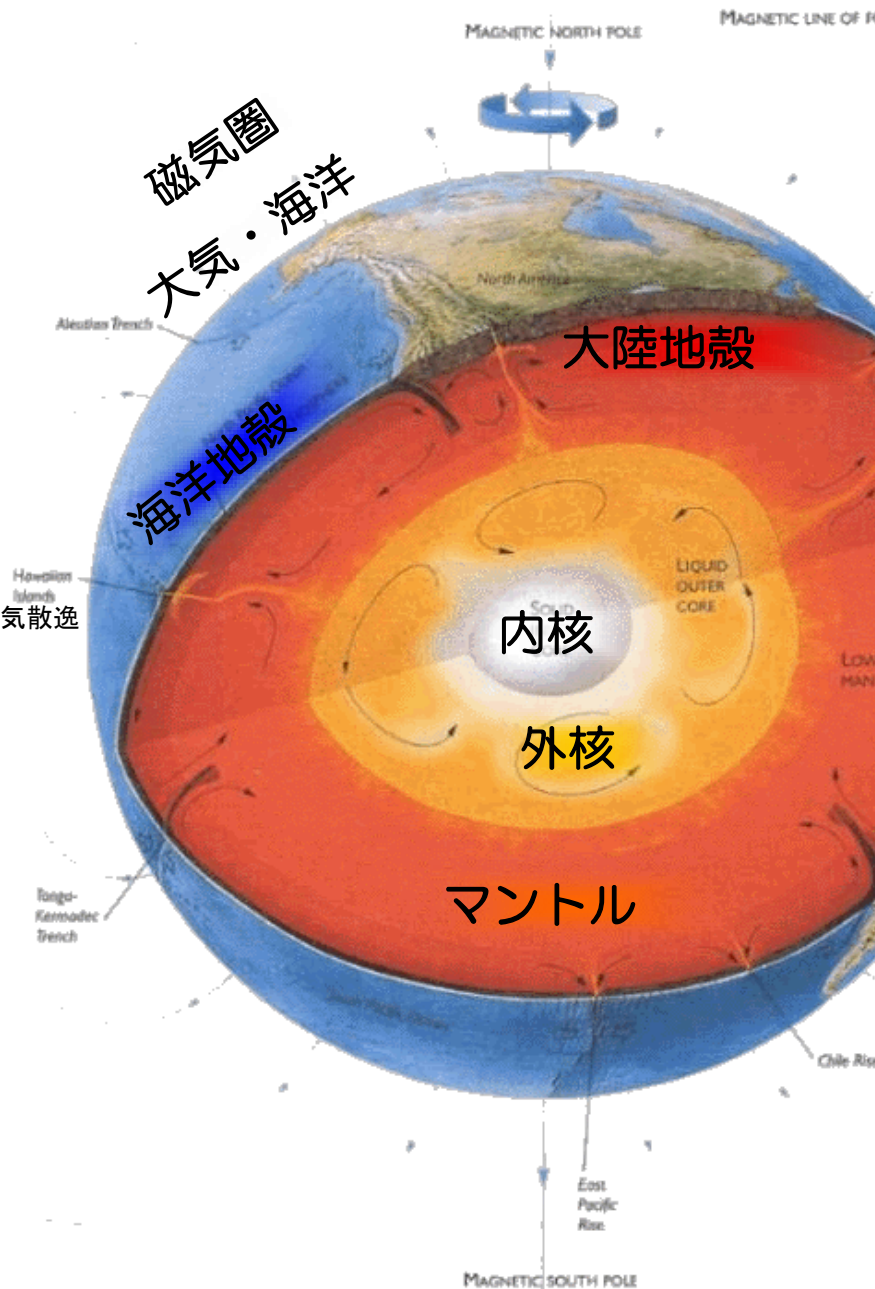
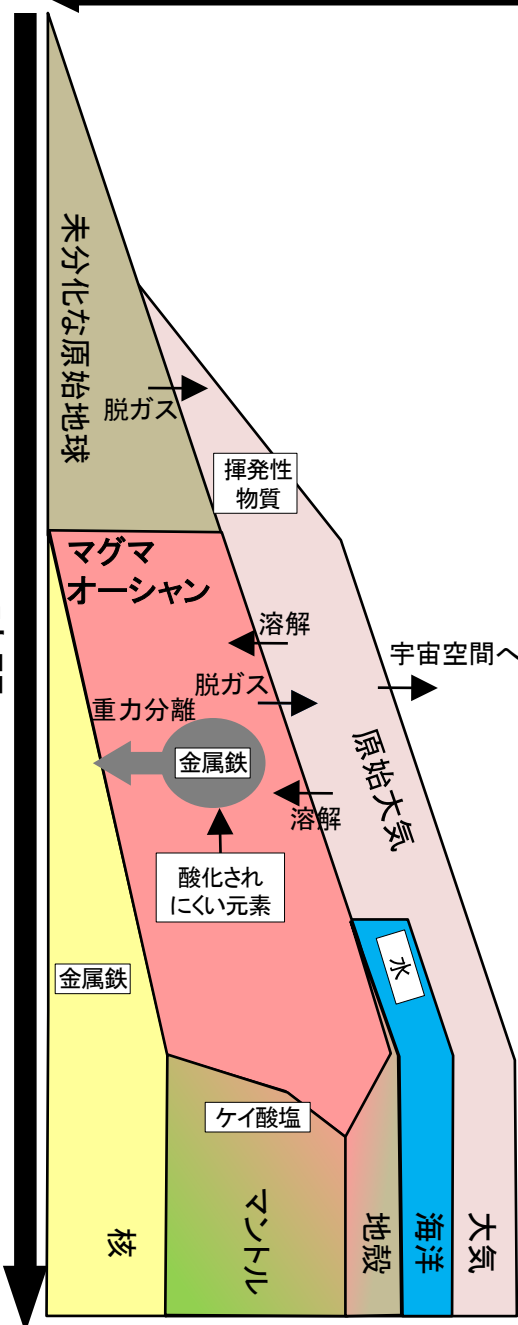
海洋の形成

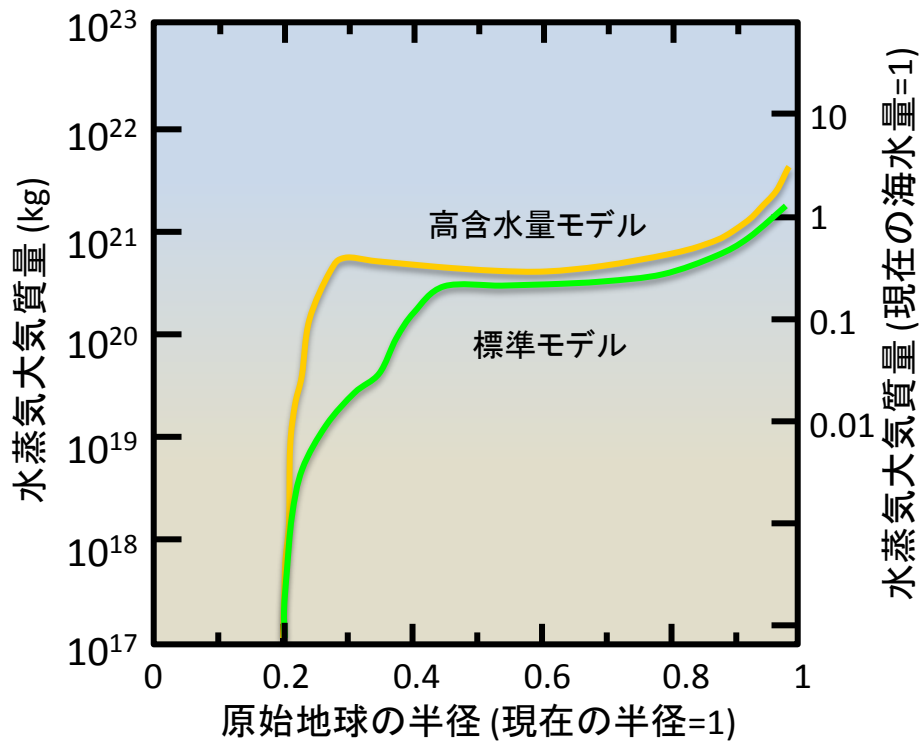
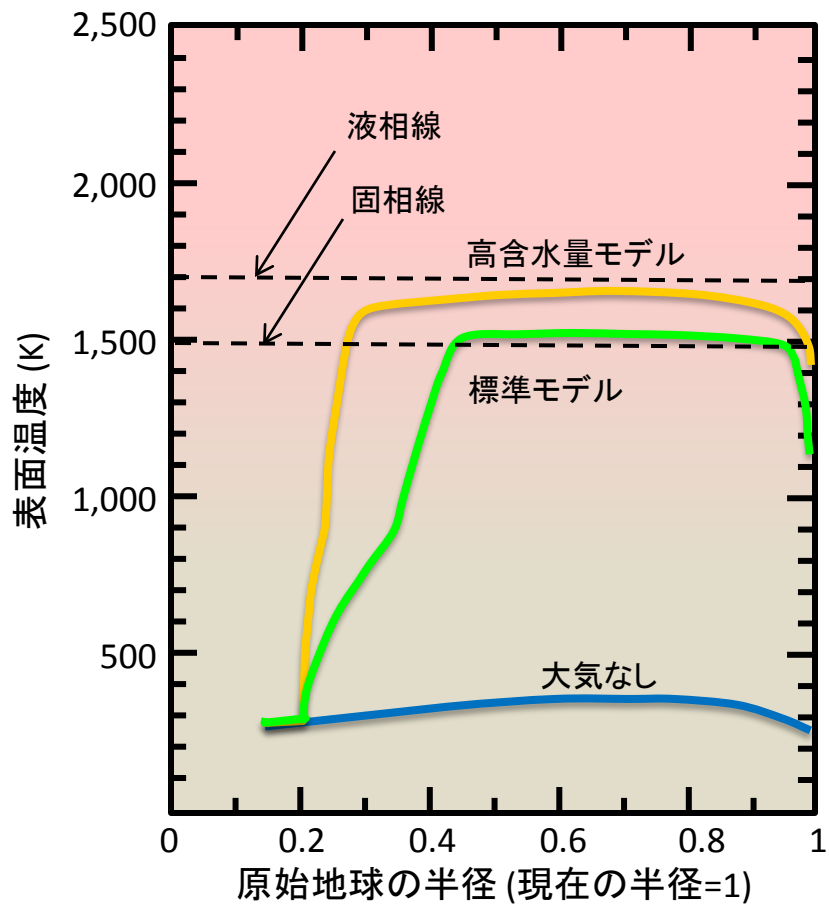
原始地殻の形成

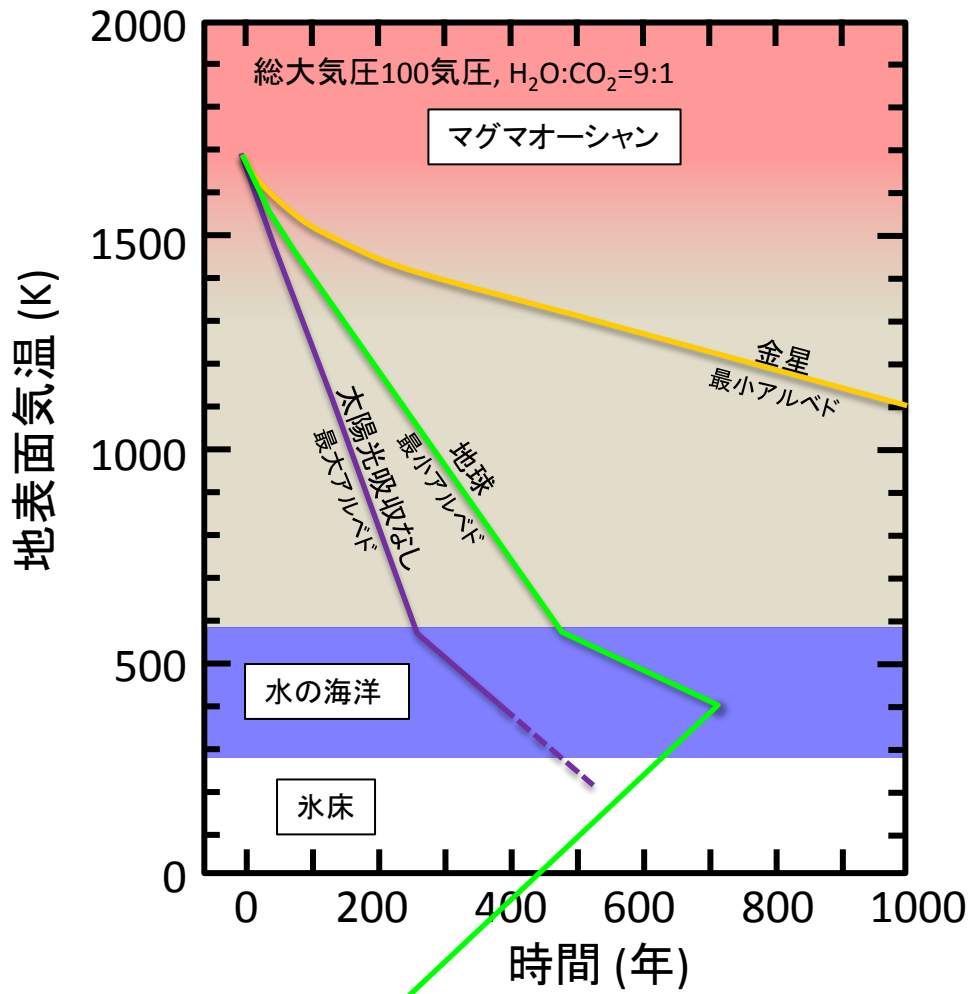
マグマオーシャンの消失

安定な地殻の形成

時間





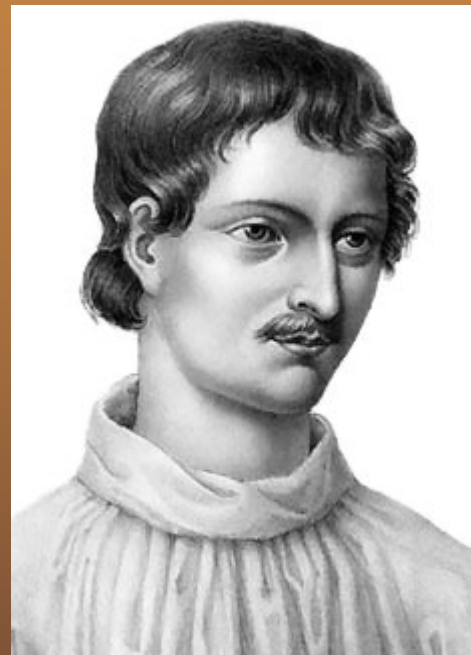


奇跡ではない, というのが本当の主張

- 出発条件をいじっても結果は大体一緒
 - 大体現在の海洋質量の水蒸気大気ができ、日射が適度なら惑星表面に凝結
- つまり水惑星ができることは、結構な確率であり得る
 - 水惑星の誕生そのものは奇跡ではない
 - 私はこれで納得がいった（地球が水惑星であることの科学的な説明になっている）
 - ただし、理論の前提の正しさについては疑いの余地がある

思想の自由を貫いた ジョルダノー・ブルーノの鋭い直感

- コペルニクスの地動説をさらに進めた
 - コペルニクス説は太陽中心説
- 宇宙は無限に広がっており、恒星は太陽と同じ天体ではないかと論じた。また恒星には惑星が存在すると考えた。
- 神学も独創的で、主張を曲げなかったため、ローマ教皇庁から異端とされて火あぶりの刑にされた
- 後に再評価



Giordano Bruno 1548 – 1600
ローマ・カンポ・デ・フィオーリ
広場に彼の像がある

地球生命進化の大ステップ

推定年代	出来事	ステップ
> 35 億年前	生命誕生	自己複製する分子集団→ 原始細胞
27 億年前	シアノバクテリアの出現 好気性バクテリアの出現	内部依存型生命圏→太陽 依存型生命圏
20 億年前	真核生物の出現	原核生物→真核生物
5.5 億年前	多細胞動物の出現	単細胞生物→多細胞生物
4.7 億年前 4 億年前	植物の上陸 動物の上陸	海洋生命圏→汎地球生命 圏
0.0025 億年前	ヒトの出現/ 言語能力の獲得	情報伝達: DNA→ DNA+ミーム

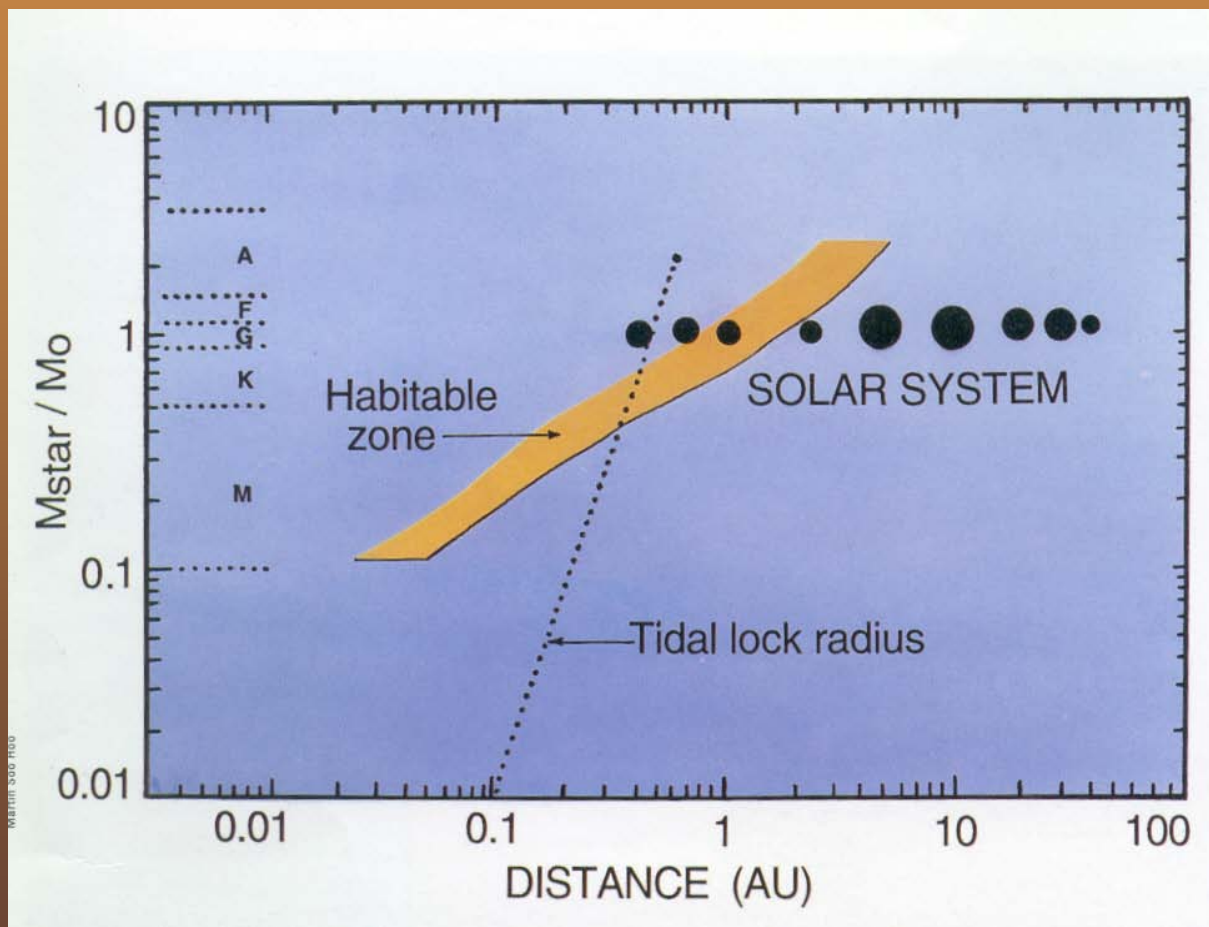
地球の表層環境の進化と深く関係・偶然性の重要性

地球の「奇跡感」について(余談)

- アクション映画主人公理論
 - 主人公は敵にどんなに弾を撃たれても当たらない、当たってもも死なない
 - 途中で死んでしまっただけでは話にならない
 - 生き残った人間の物語が映画になっていると思えば納得できる
- 地球と自己の存在の同一視が奇跡感の根源？
 - 生命の合目的性は奇跡におもえる
 - 進化論が奇跡に頼らない説明を与えた



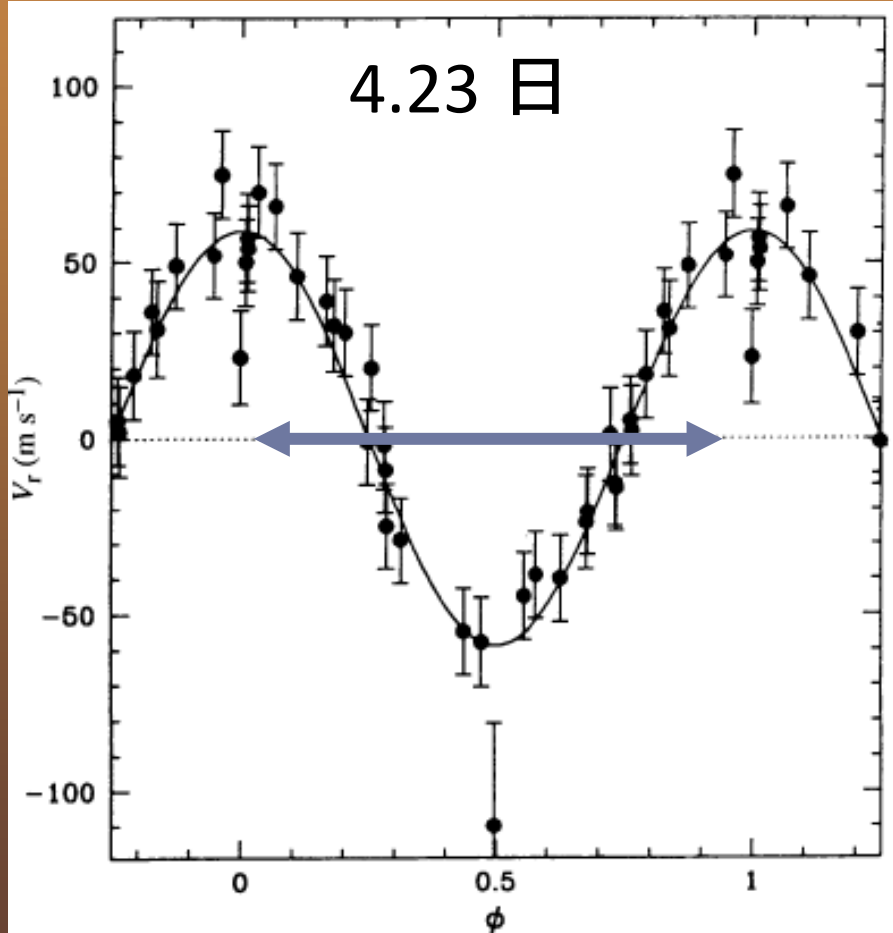
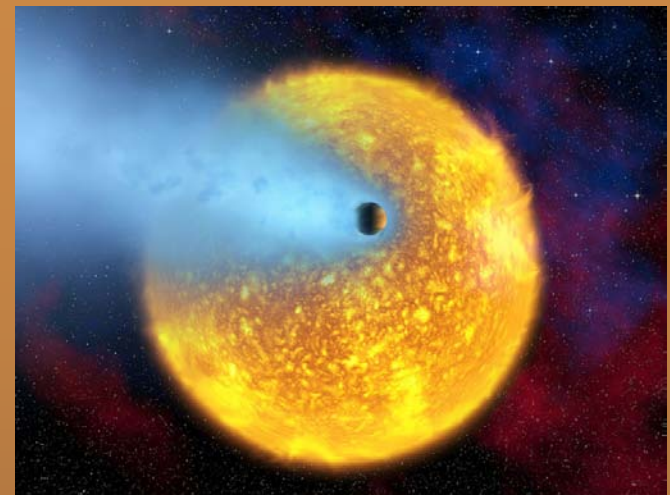
ハビタブルゾーン



- 地球と同様の組成と分化構造を持つ惑星を仮定
- ハビタブル=惑星表層に海を持つこと
- 太陽と同一光度の恒星の周りでは0.8~1.5 AUの範囲で液体の水が存在可能
 - 内縁と外縁は、暴走温室効果と全球凍結の発生条件で定まる
- 重さの違う恒星ではハビタブルゾーンの位置はシフト
- 軽いM型星では水星軌道よりも内側がハビタ

系外惑星の発見

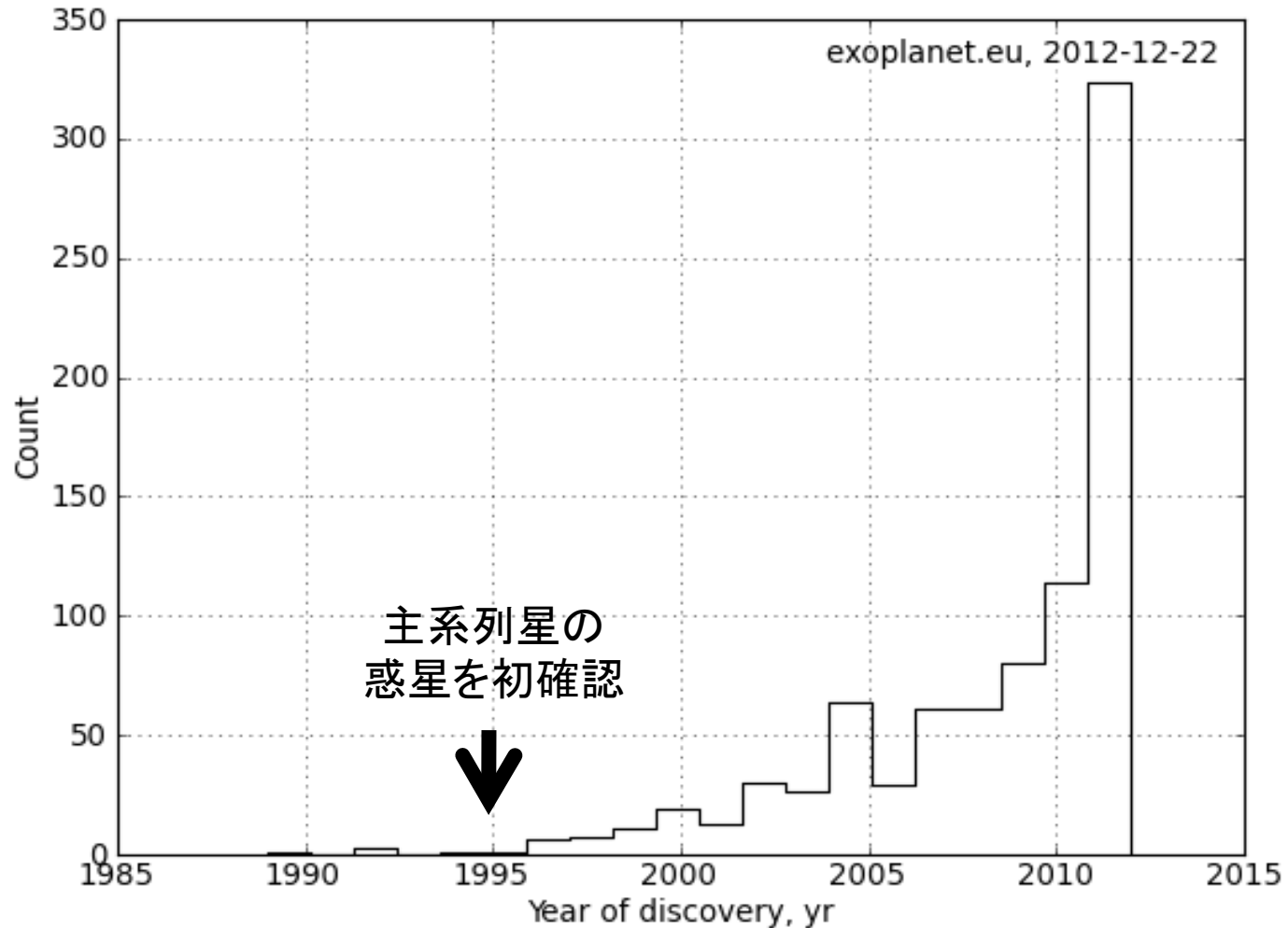
吸収スペクトル線のドップラー効果



- 初めて見つかった系外惑星
- ペガサス座51番星
– 老齢なG型星、5.5等、45光年
- $M \sin I = 0.468 M_{\text{jupiter}}$
- 主星の見かけの自転速度から考えて $\sin I$ の下限値は0.4

Mayor and Queloz (1995)

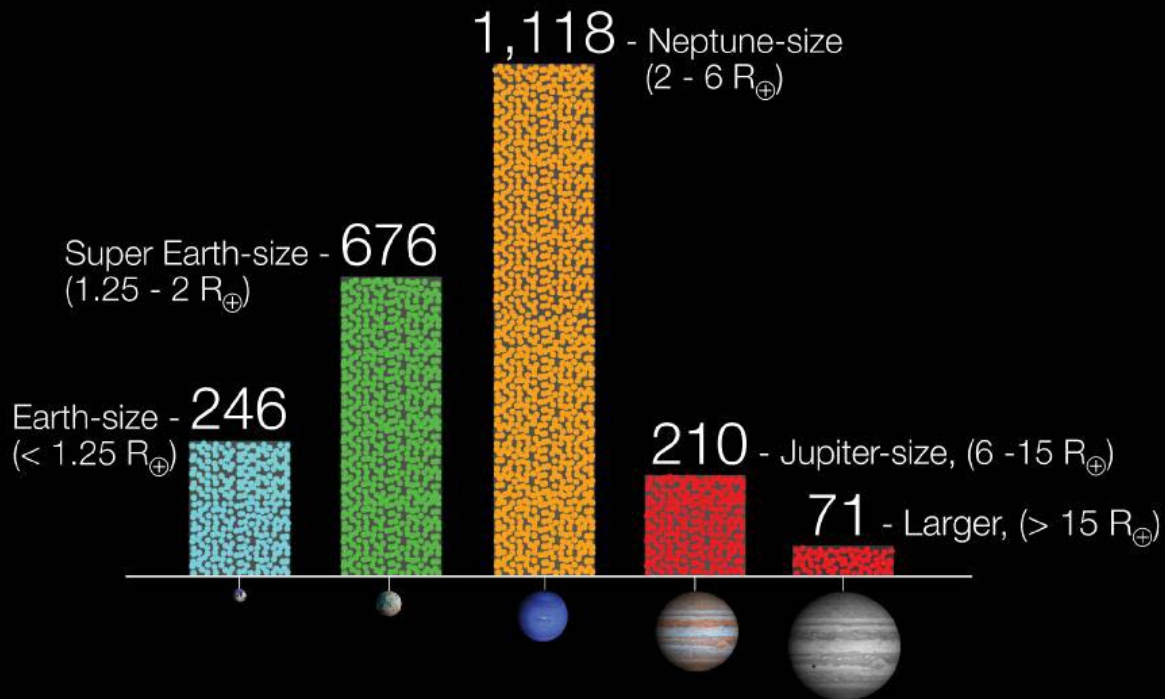
系外惑星科学の発展



Kepler

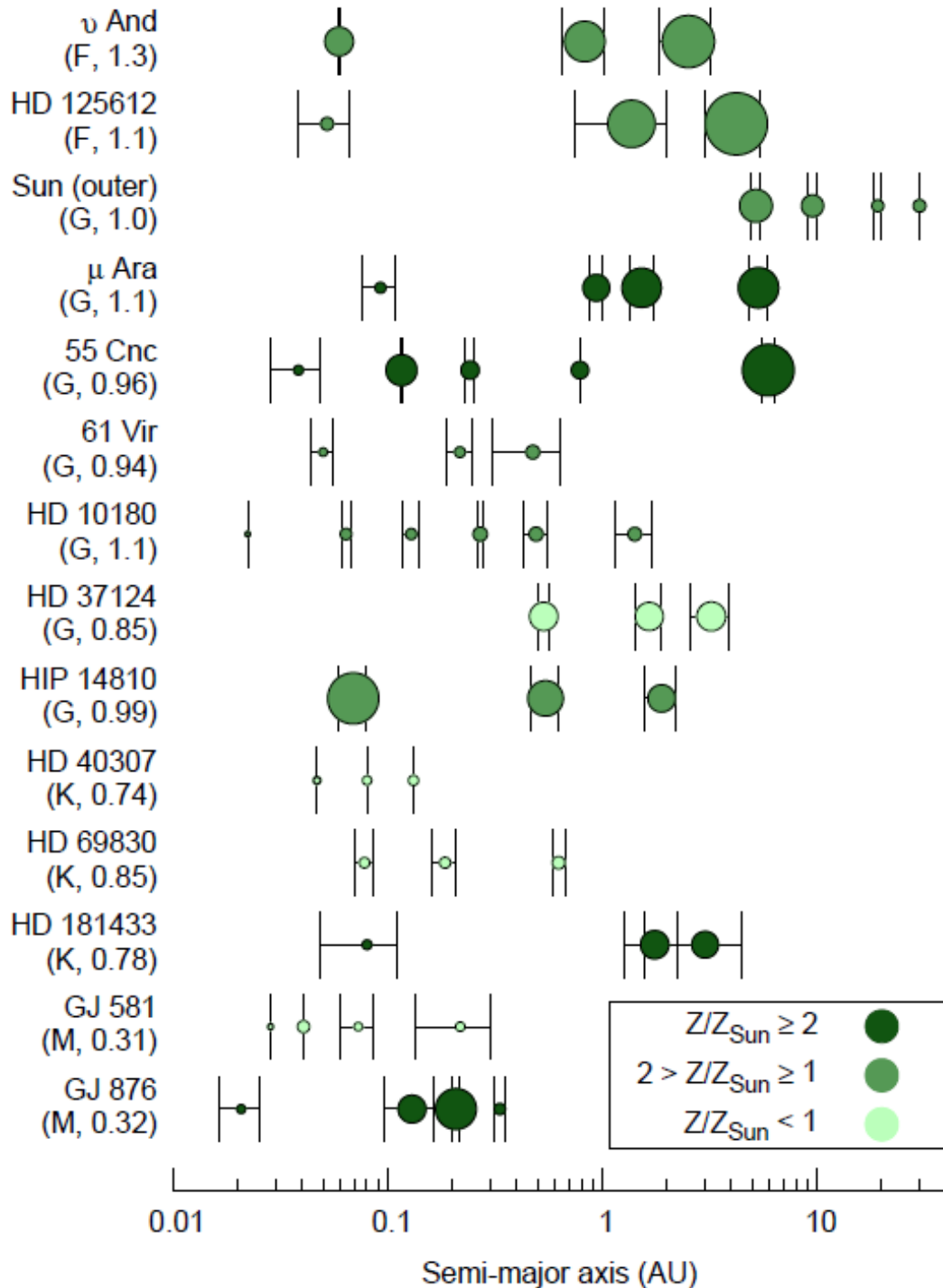
Sizes of Planet Candidates

As of February 27, 2012



系外惑星系

- 重く恒星のそばを回っているものが多い
 - ホットジュピター
 - 発見が容易
- より小さな惑星が複数存在する系も確認されている

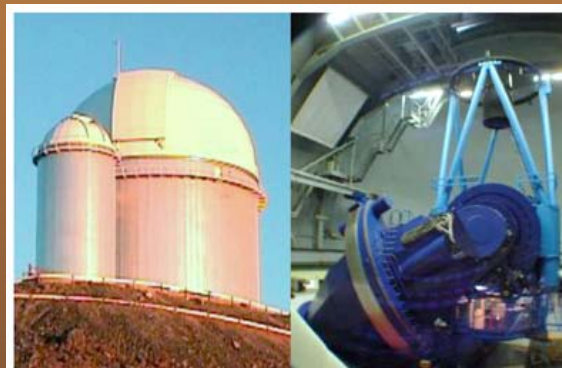
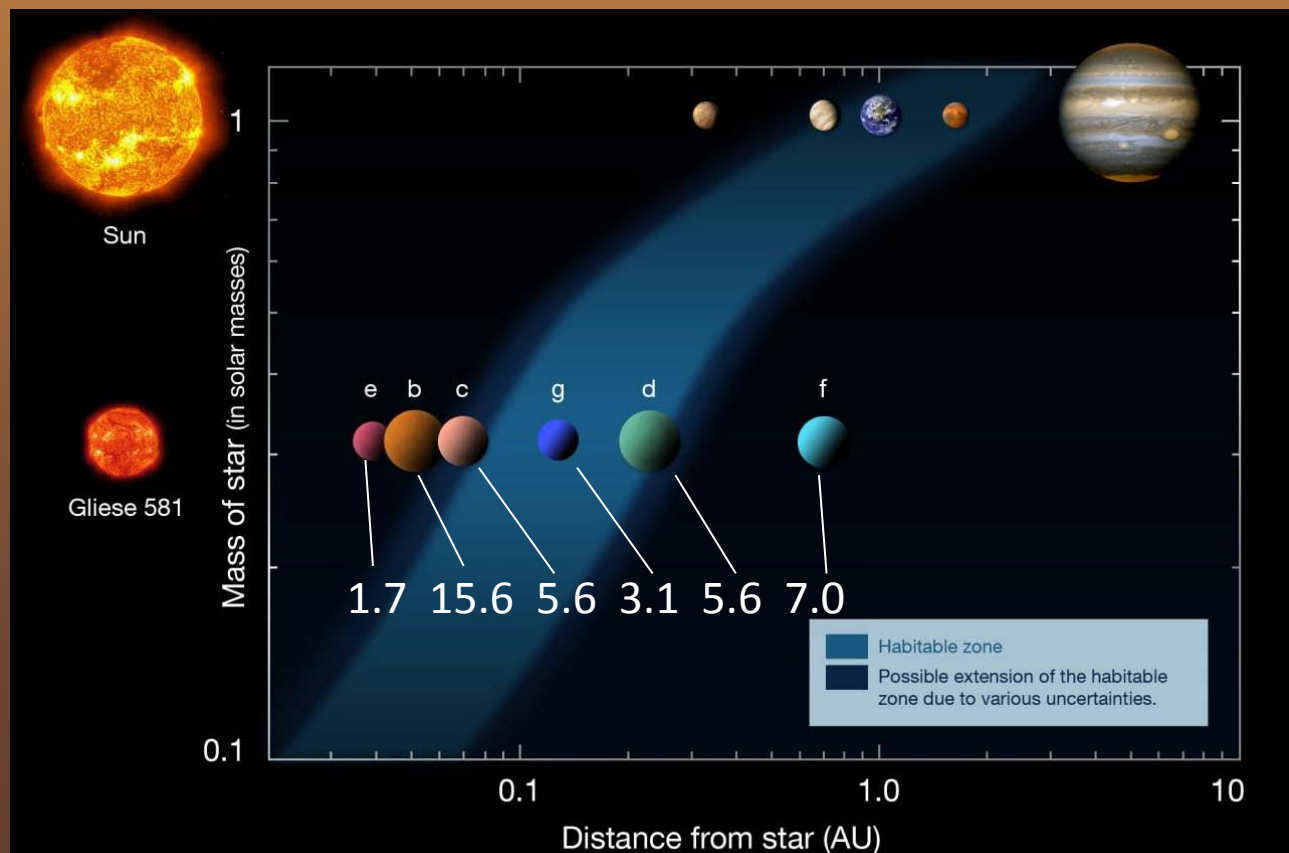


軽い星の周りにハビタブル惑星候補が多数見出されつつある

● Gliese 581

- 地球から20光年の位置(てんびん座)
- ドップラー法により複数の惑星の存在が確認
- c, g, d ハビタブルスーパーアースの可能性

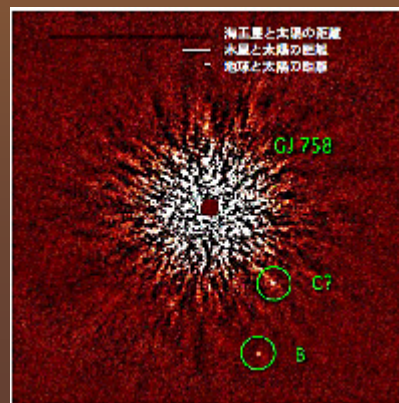
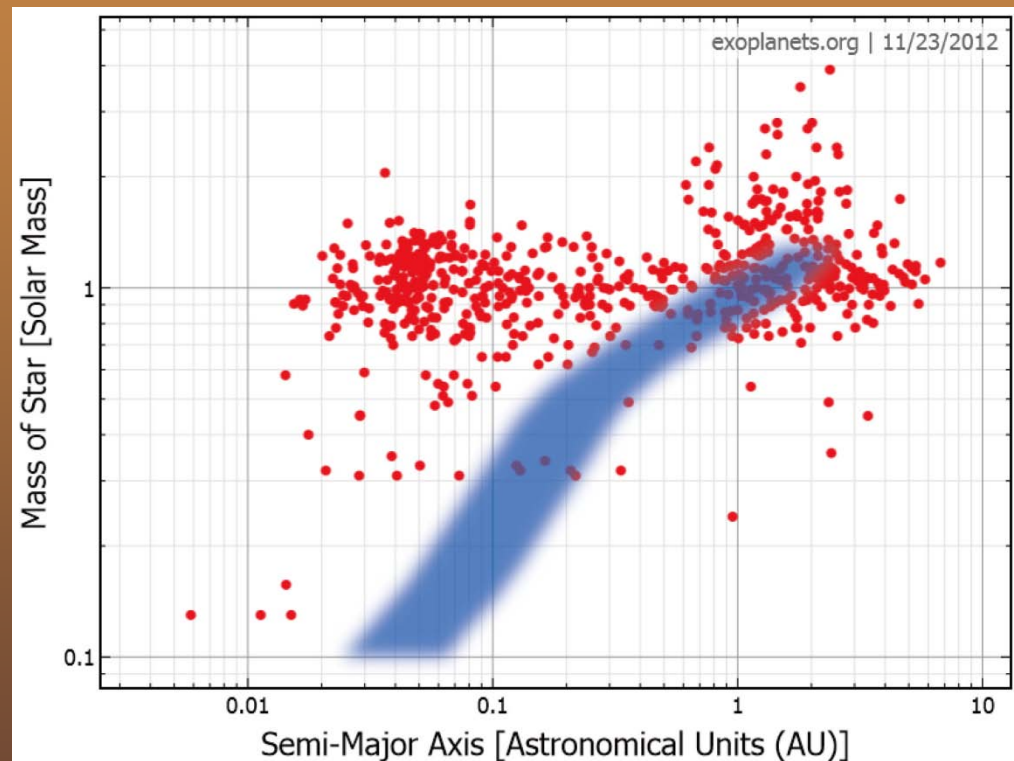
チリ、ラ・シャ天文台の高精度視線速度系外惑星探査装置 High Accuracy Radial Velocity Planet Searcher



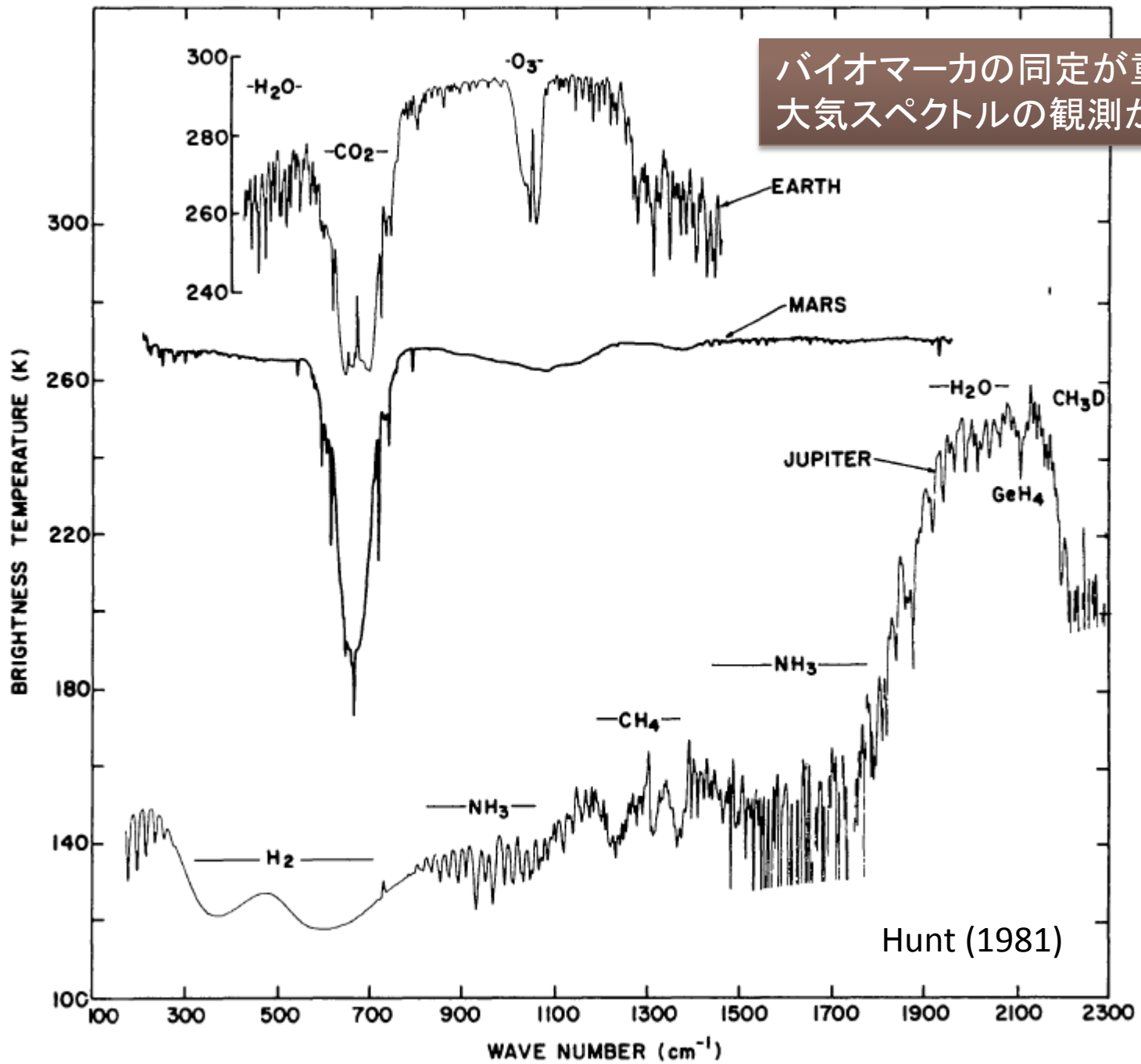
The HARPS Spectrograph and the 3.6m Telescope

第二の地球は存在するか

- 系外惑星は太陽系の惑星と異なる軌道、年齢、質量を持つ
- 個々の惑星のキャラクター化
- 惑星進化論だけでなく、生物学の一般性を試すことができる

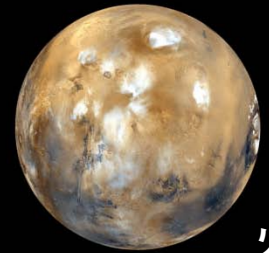


バイオマーカの同定が重要
大気スペクトルの観測が最有力

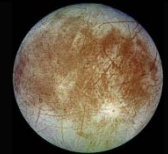


ハビタビリティの見直し

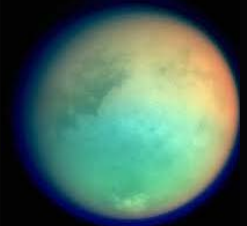
- スーパーアース
 - 水素残存問題
 - コア凍結問題
 - プレートテクトニクス問題
- 外部依存型生命圏と内部依存型生命圏



火星



エウロパ



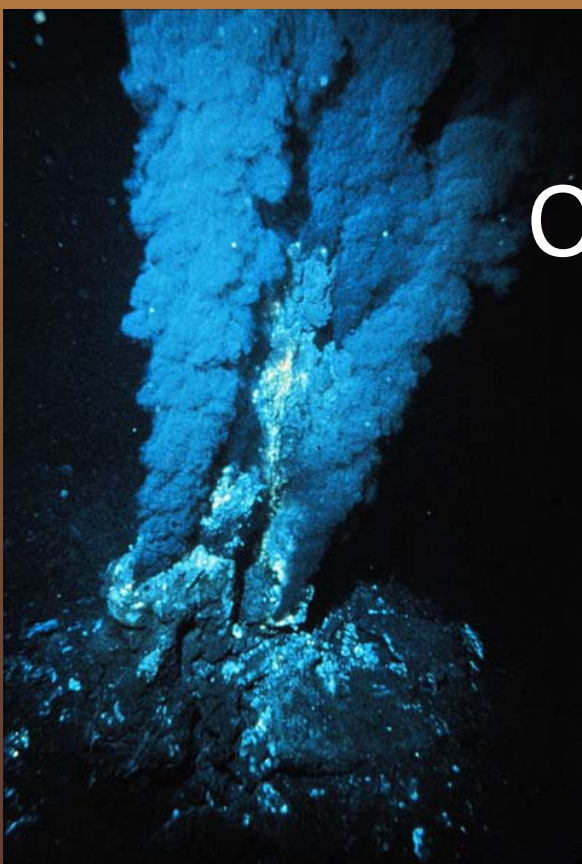
タイタン



エンセラダス

内部依存型生命圏

- 一次生産者＝化学合成独立栄養生物
- 惑星がハビタブルゾーンにある必要はない



CO_2



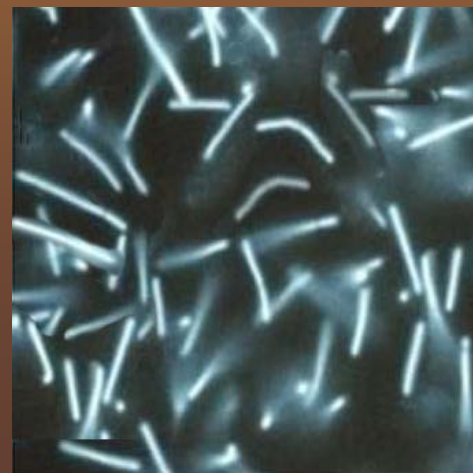
CH_4 , 有機物

$2\text{H} + \text{Fe}_2\text{O}_3$



岩石成分の
酸化

$2\text{H}_2\text{O}$



惑星科学の新時代

- 系外惑星の探索が、惑星科学の新展開をもたらしつつある
 - 惑星形成論の再考
 - 生命を宿す惑星の条件の再考
 - 惑星進化論、生命起源論の検証
 - 宇宙物理系の天文学者の参入
 - 発見からキャラクターリゼーションへ
 - 「惑星の科学」や地球科学に強い関心
- 地球や生命は普遍か特殊かという問題意識がベース