

# 第二の地球は存在するか？

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
- 数年前に林祥介教授（現CPS副センター長）が北大から神戸大に移動
- 中川義次教授（CPSセンター長）と東京時代に隣室
- 神戸大-北大連携でGCOEプログラムを推進

5:19

## 地球と“うり二つ”惑星発見

Kepler 22b

- ▶ 地球から600光年の距離
- ▶ スペースシャトルで到達まで2200万年かかる

地球に似た惑星 発見  
“生命体”の存在は

ケプラー-22b

半径 地球の2.4倍  
表面温度 約20度

「液体の水」  
存在の可能性

太陽に似た星Kepler22 (はくちょう座、600光年) のハビタブルゾーンに、地球に近い大きさを持つ地球型惑星が発見された (2011年12月5日)

# Kepler-22 System

NASA

Solar System

Habitable Zone



Kepler-22b

Mercury

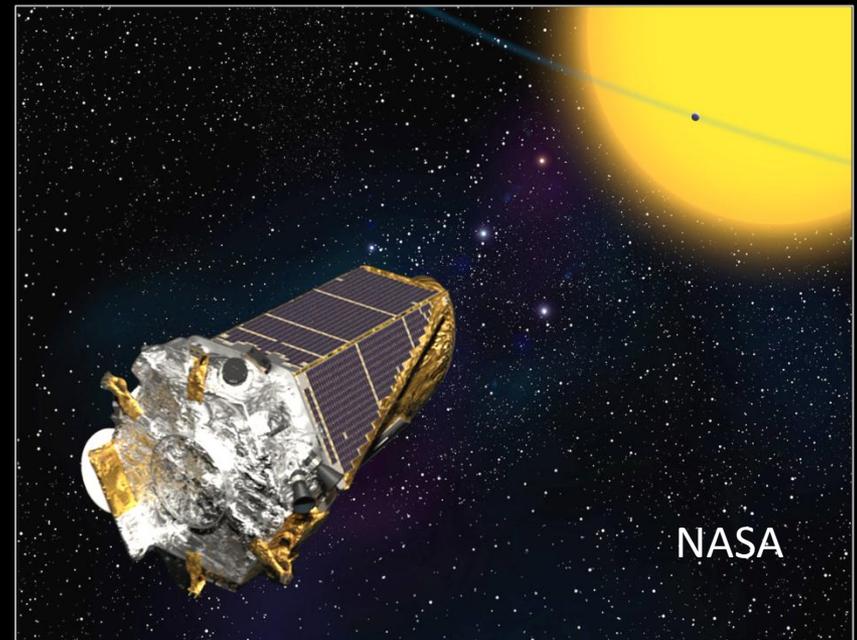
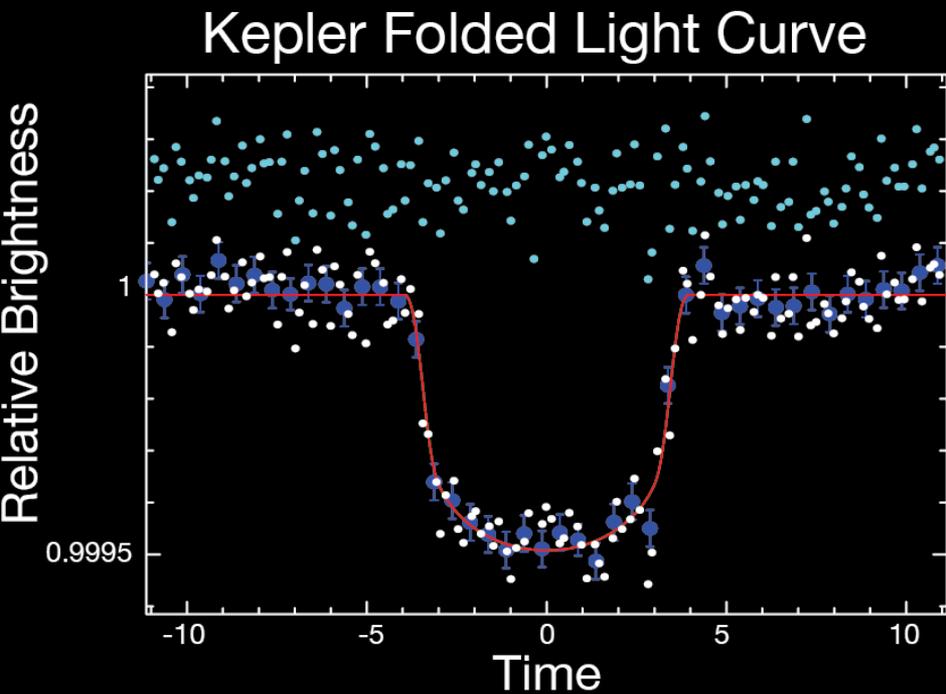
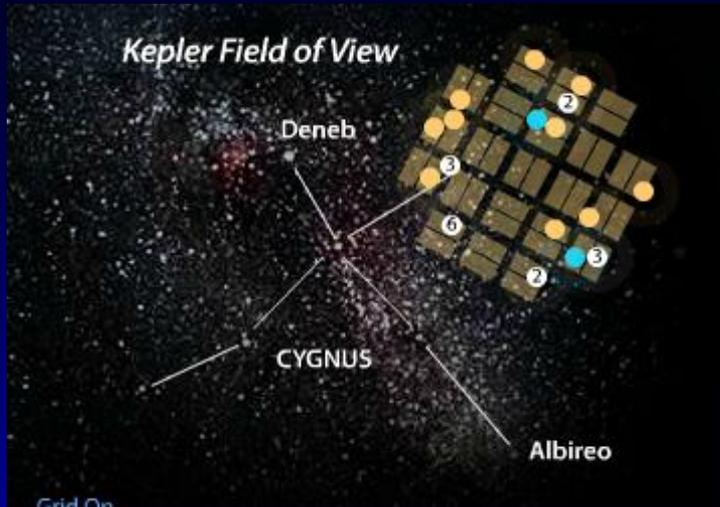
Venus

Earth

Mars

Planets and orbits to scale

岩石惑星か、海惑星かは現時点では不明



# 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



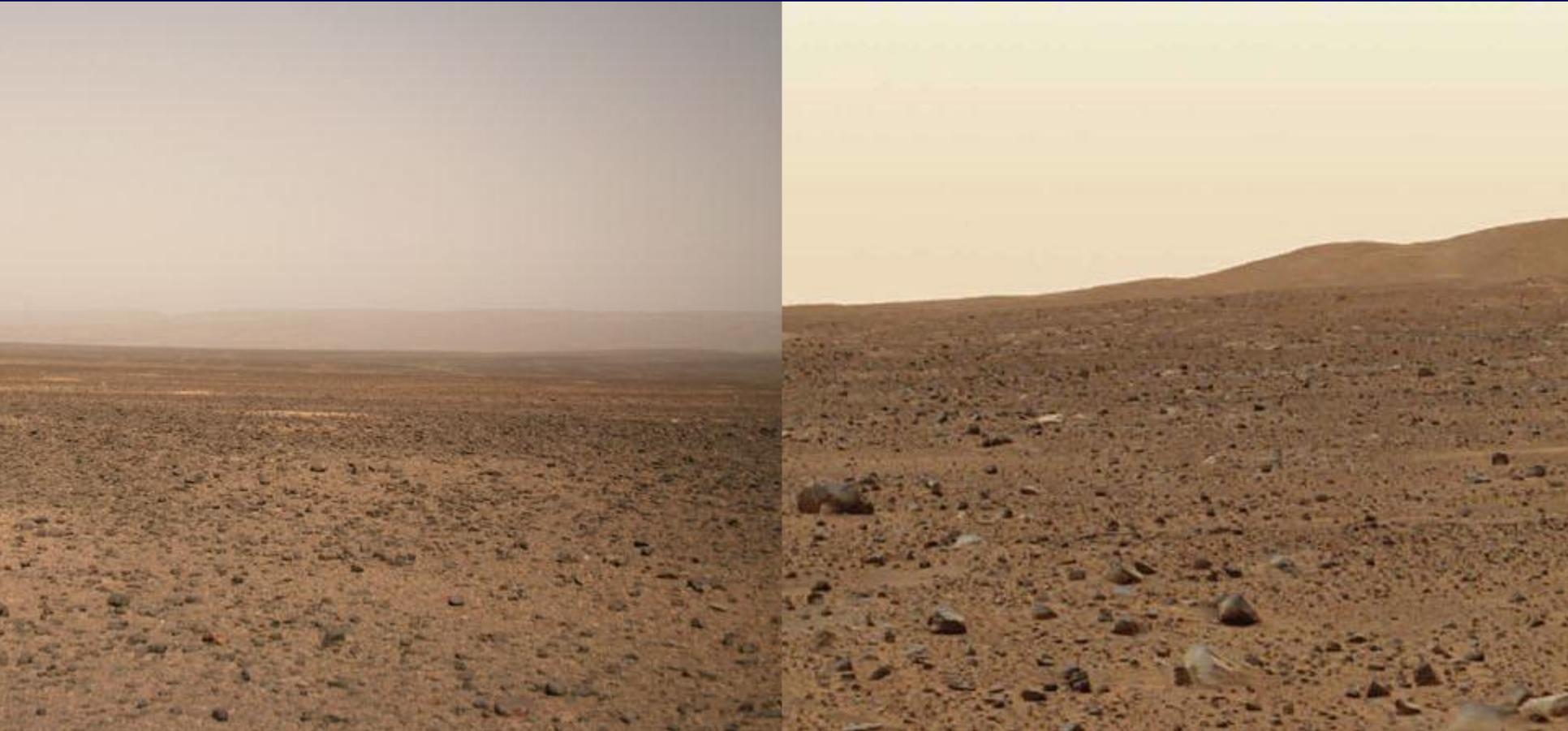
**Giordano Bruno** 1548 – 1600  
ローマ・カンポ・デ・フィオーリ  
広場に彼の像がある

# 地球は奇跡？ありふれている？

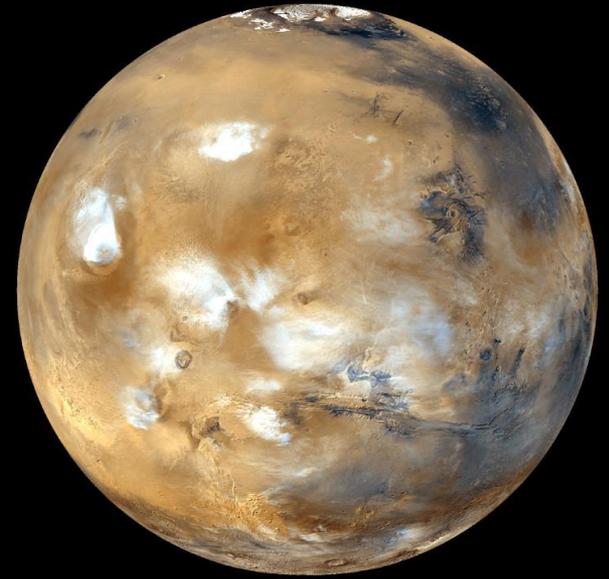
- 生命や知性を育む惑星は、自然界の基本法則に従って生まれたのは疑いない
- 確率は？
  - 宇宙SFでも両方の立場がある
  - 楽観論、未知の法則論

宇宙戦艦ヤマトのイスカンダル星のような惑星はあるだろうか？

# どちらが火星？

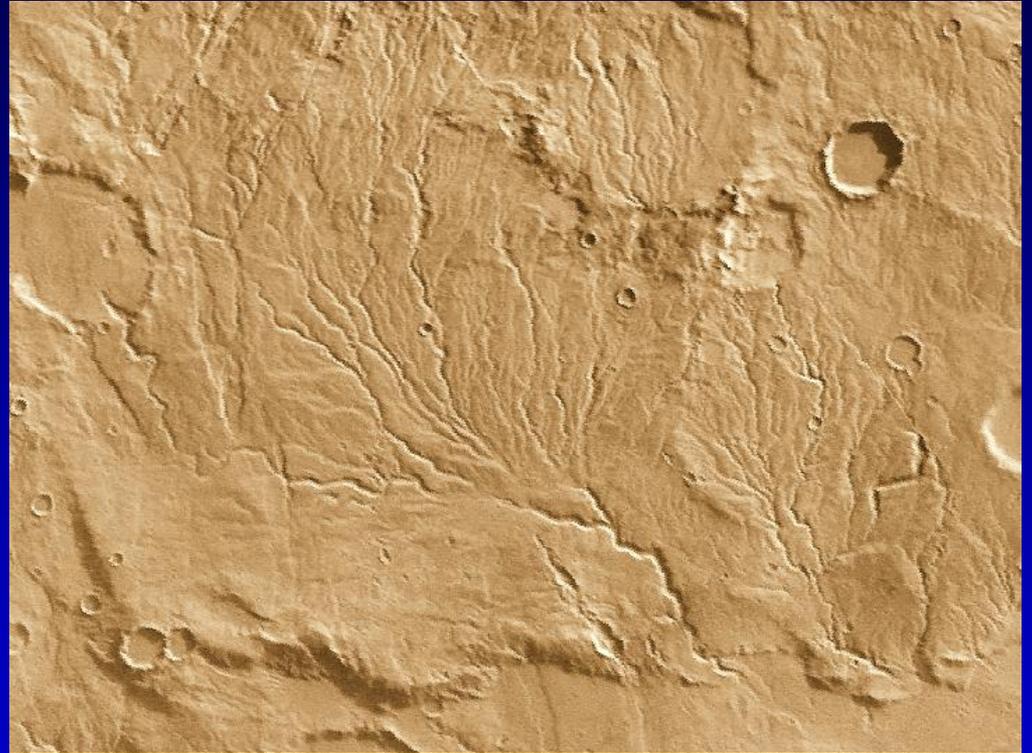
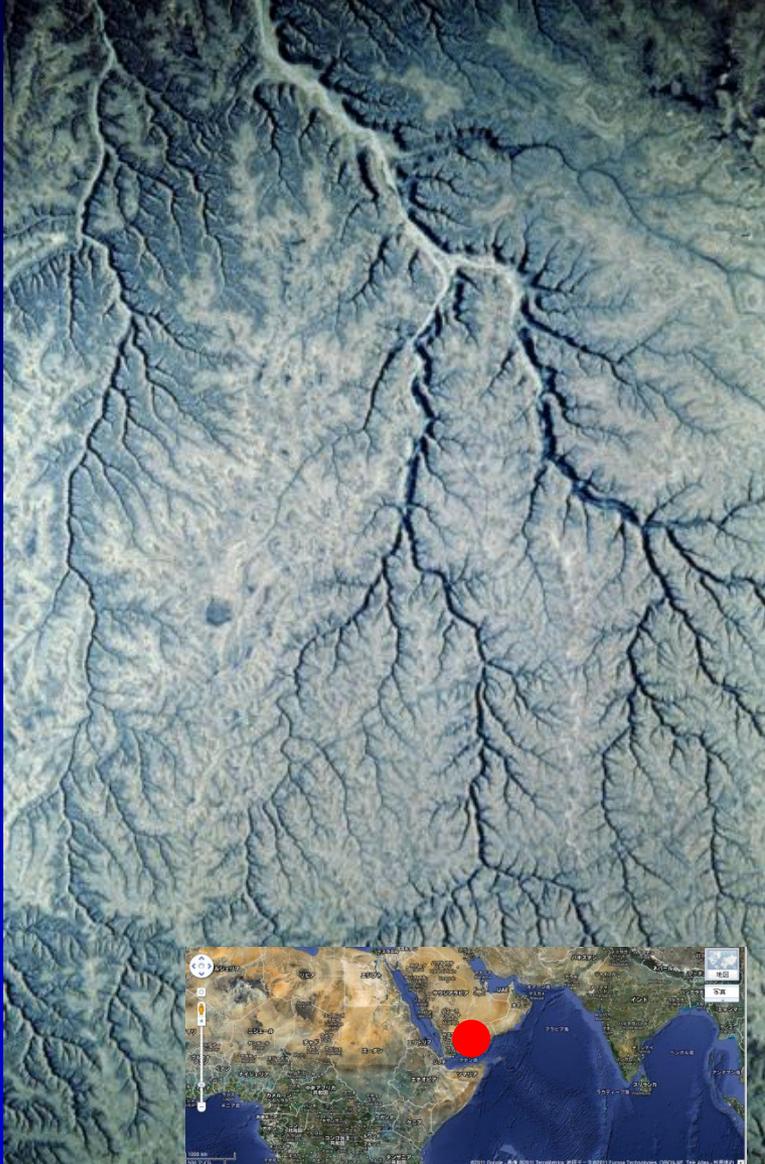


<http://apod.nasa.gov/apod/ap050412.html>



火星は  
冷たい乾燥した惑星

# 38億年前の火星は暖かった

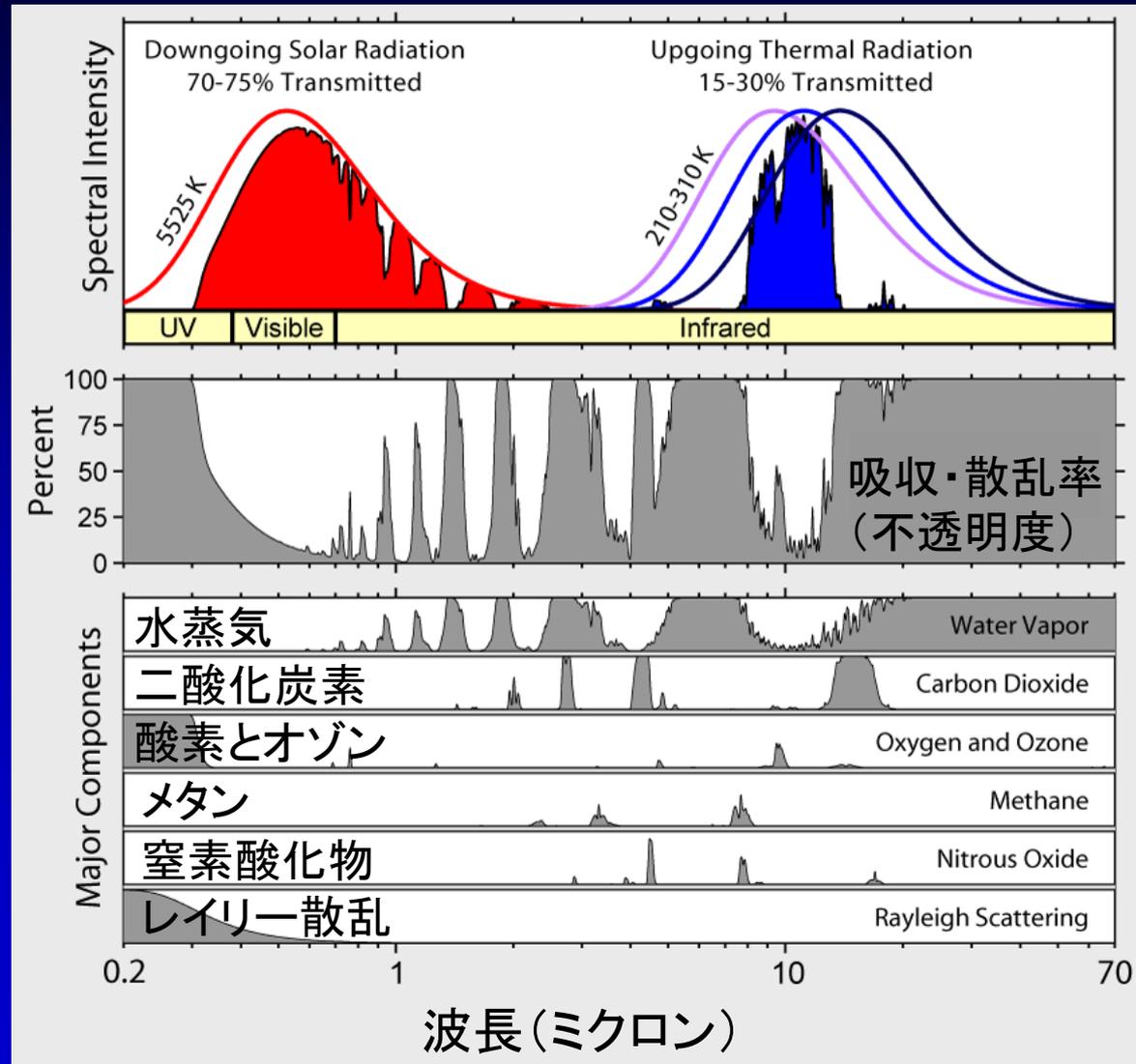


<http://www.astro.washington.edu/courses/labs/clearinghouse150/labs/Mars/comgeol.html>

# なぜ火星は冷えたのか？

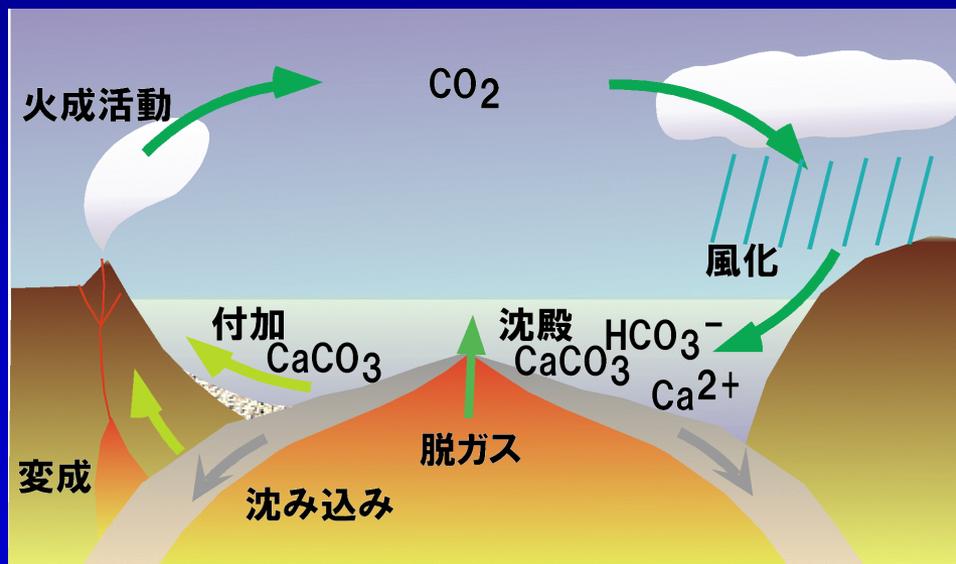
⇔なぜ地球は暖かい？

- 地球の全球平均気温 =  $15^{\circ}\text{C}$
- 大気の温室効果で約  $30^{\circ}\text{C}$  上昇
- 地球大気から  $\text{CO}_2$  を完全に取り除いたとする。地球の平均気温は何度になる？



# 地球を凍結から救った炭素循環

- 海洋：カルシウムイオン+二酸化炭素→炭酸カルシウム（大気二酸化炭素の「固定」）
- カルシウムイオンの供給率を決めている風化作用は気温が低いと不活発、逆に高いと盛んになる。
- 気温低下→海洋へのカルシウム供給が減少→炭酸塩ができにくくなる→大気中に二酸化炭素が蓄積→気温上昇



田近 (1992)を改変

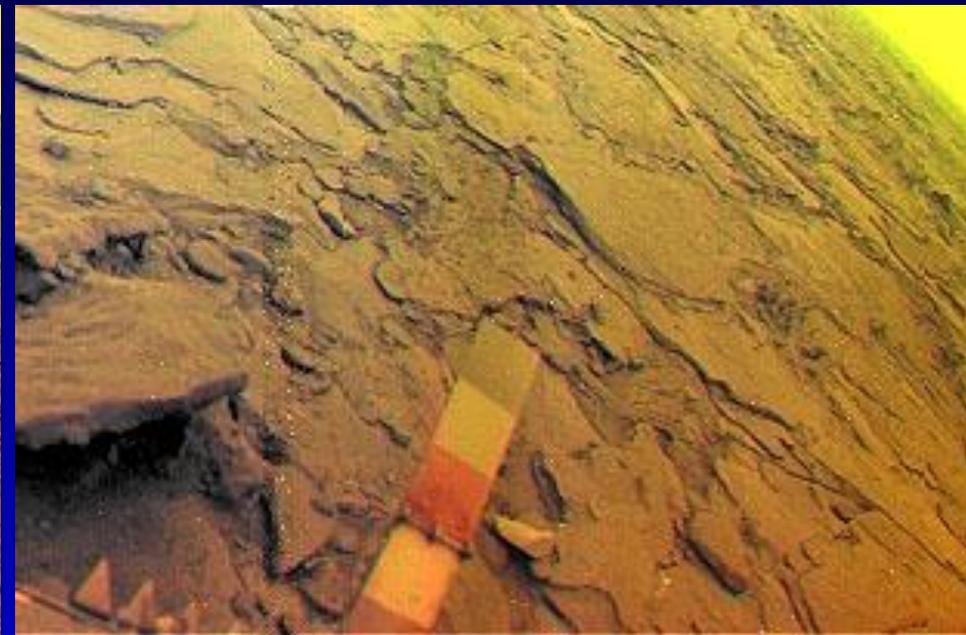


Contact between glacial marine Ghaub Fm (DF, debris flows; IRD, ice-rafted debris) & Keilberg Mb (CD, post-glacial cap dolostone) on Otavi foreslope, northern Namibia.

6億年前の全球凍結とその後の温暖化を示す地層(ナミビア) <http://www.snowballearth.org>

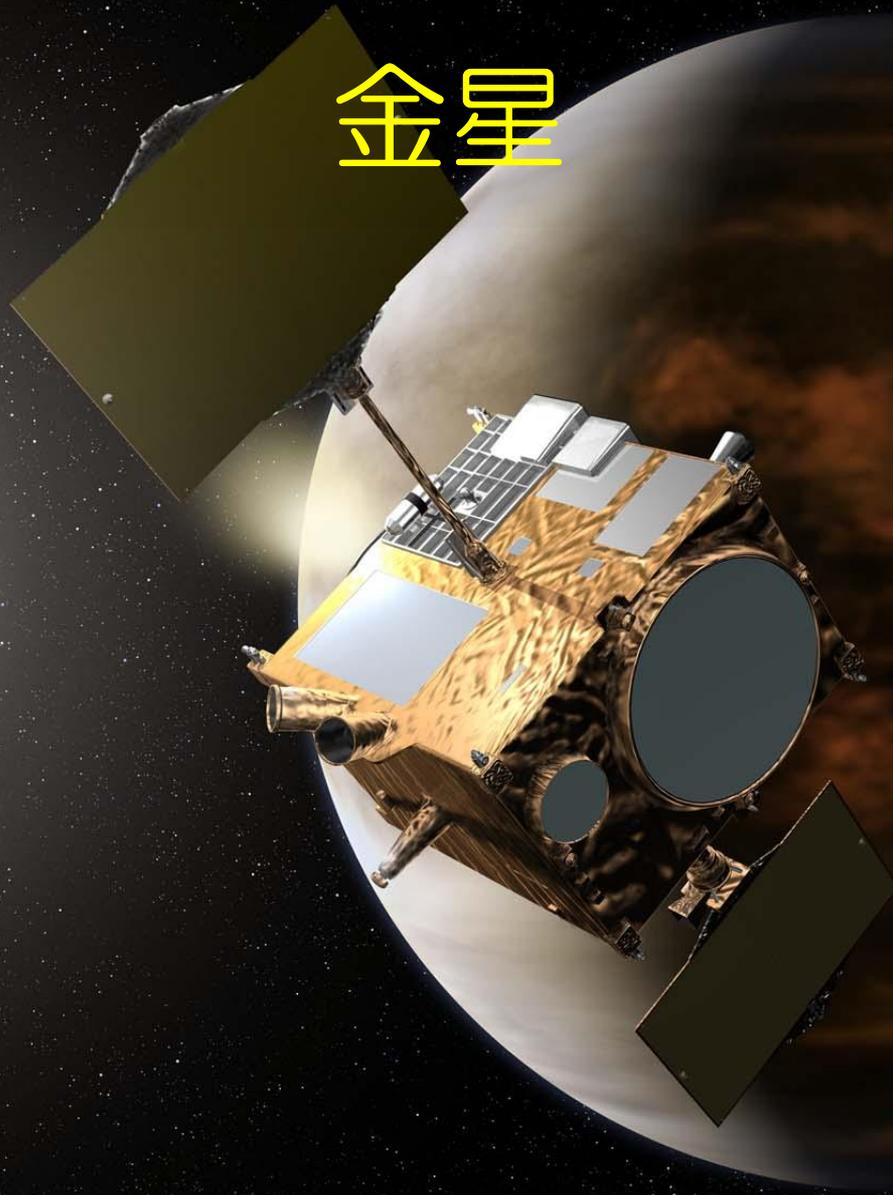
# 火星はなぜ冷えた？

- ① サイズが小さく、火山活動の衰えが速かった
- ② 大気が宇宙空間に失われた



<http://www.molossia.org/vesperia.html>

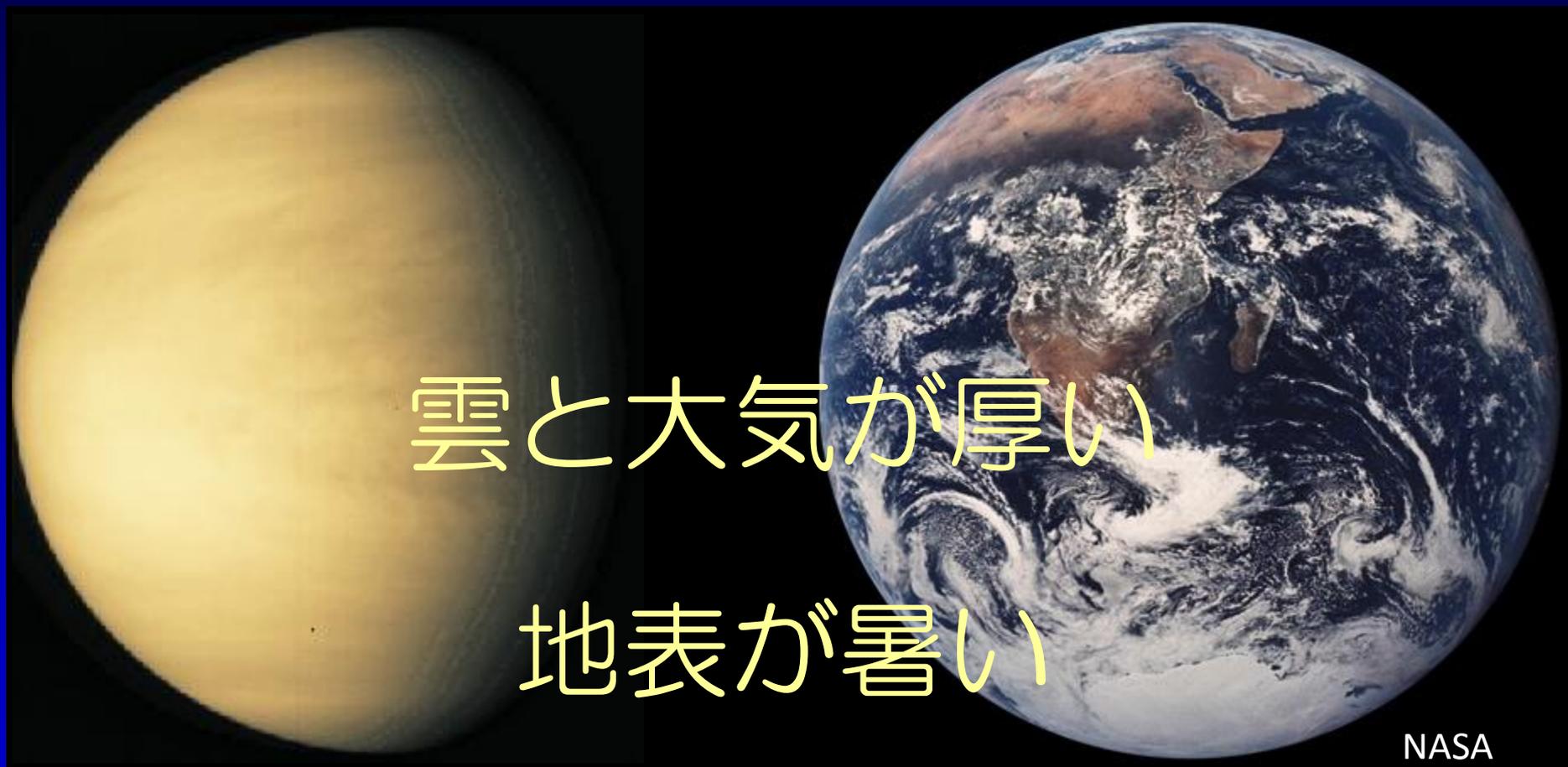
# 金星



JAXA

*Shizuka*

# 金星は“あつい”



雲と大気が厚い

地表が暑い

NASA

# なぜ“あつい”？

海がないため  
二酸化炭素が固定されない

仮にはじめ海が  
あっても全蒸発

# ハビタブルゾーン

生命存在可能領域

重い星

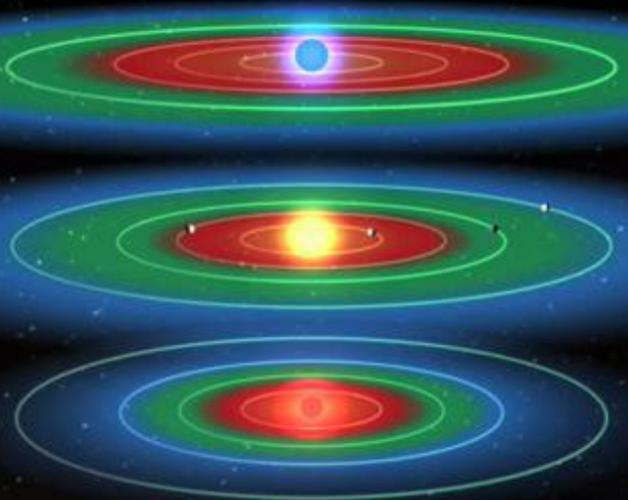
Hotter Stars

太陽

Sun-like Stars

軽い星

Cooler Stars



NASA

- 地球と同程度の大きさの惑星に、液体の水が安定に存在できる軌道範囲
- 太陽系では 0.8~1.5AU

1AU=太陽から地球までの距離 1億5千万キロメートル

# イस्कन्दルは存在し得る？

## 作品での設定

- 大マゼラン星雲サンザー太陽系第8番惑星
- 軌道半径約3億km
  - 2AU
- 直径1万6,600km
  - 地球のおよそ1.3倍
- 地球と同じ大気組成
- 惑星自身が年老いており大陸の大部分が水没している
- ガミラス星と連星

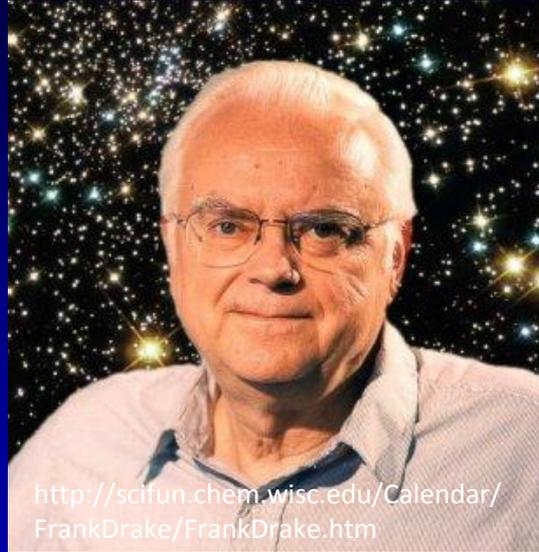
## 推理

- サンザー星は太陽よりも約4倍明るいはず
  - 太陽質量の1.4倍
  - 寿命は30億年
  - 30億年以内では惑星はまだ活動的



# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式  
(1961)



<http://scifun.chem.wisc.edu/Calendar/FrankDrake/FrankDrake.htm>

*Frank Drake* (米)  
1930 - 電波天文学者  
木星電波の研究の他、  
1960年に世界初の地球外文明探査を実施。  
74年には球状星団 M13に向けメッセージを送信。宇宙人へのメッセージボードをパイオニア10号と11号に搭載した。

$$N = R * f_p n_e f_l f_i f_c L$$

銀河系内の電波交信の可能な  
地球外文明の個数を求める式

# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式



銀河系の星の  
総数と宇宙年  
齢から

$$N = R^* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

1年あたりに生まれる星の総数

約10

# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式

$$N = R * f_p n_e f_l f_i f_c L$$

星が惑星を持つ確率

1/2

# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式

$$N = R * f_p n_e f_l f_i f_c L$$

一つの惑星系で生命の存在可能な  
惑星数 2

# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式

$$N = R^* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

生命の進化が起こる確率

1

# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式

$$N = R^* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

知的生命体が進化する確率  
0.01

# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式

$$N = R * f_p n_e f_l f_i f_c L$$

電波交信技術を獲得する確率

0.01

# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式

$$N = R * f_p n_e f_l f_i f_c \mathbf{L}$$

技術文明が継続する時間

1万年

# 宇宙に生命を育む 惑星はいくつある？

ドレイク方程式

$$N = R * f_p n_e f_l f_i f_c L$$
$$= 10$$

いま電波交信の可能な惑星数

違う方法でやってみる

# 宇宙に生命を育む惑星はいくつある？



新しく考案した方程式

地球 宇宙に浮かぶ奇跡の惑星 なぜ、「水と生命」に恵まれたのか？  
ニュートンムック

$$N = N_G f_{met} f_{age} f_{single} f_{disk} f_{hz}$$

銀河系内の生命を育む惑星の個数

# Milky Way Galaxy

Kepler Search Space

← 3,000 light years →

Sagittarius Arm

Sun

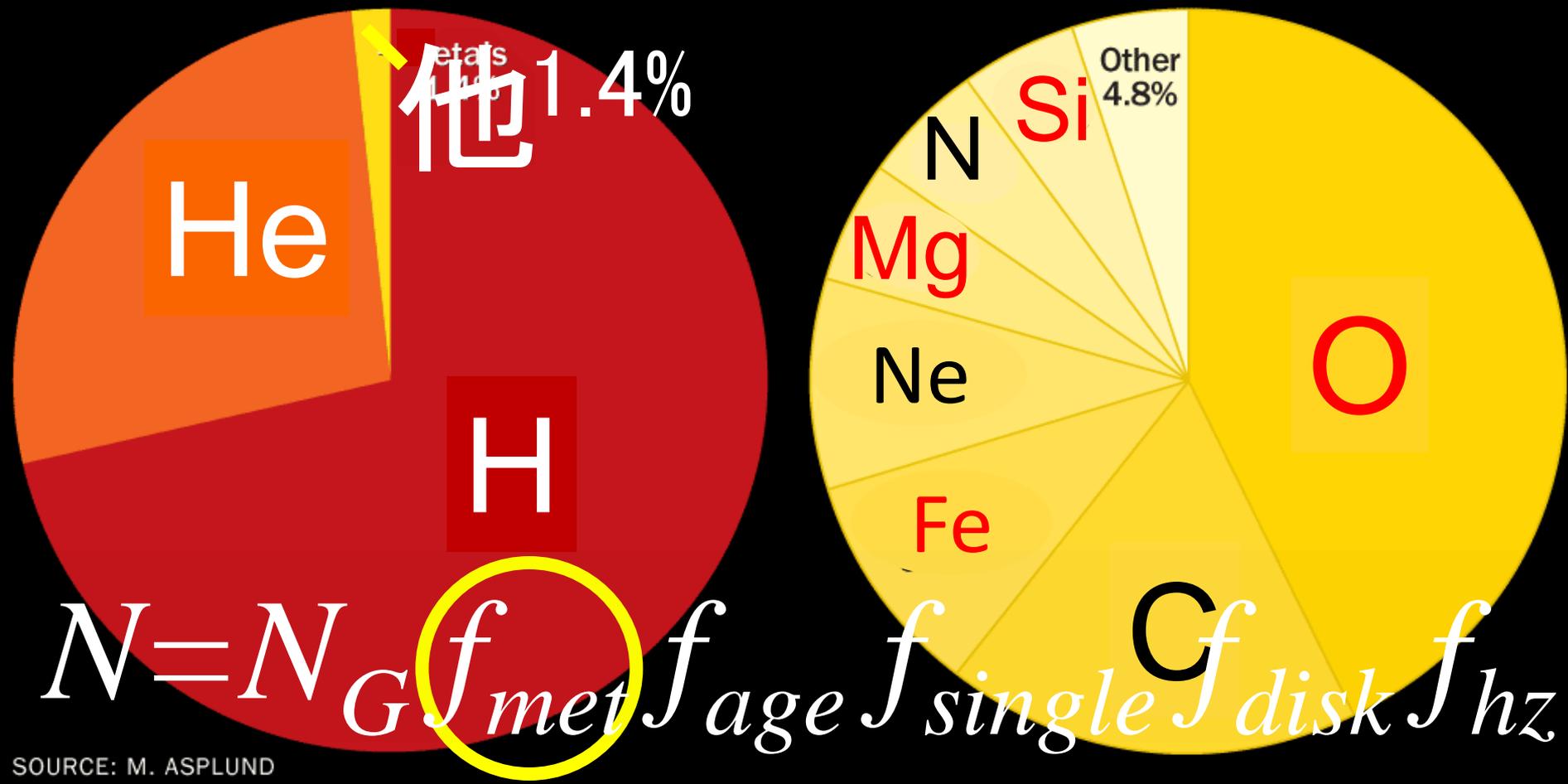
Orion Spur

Perseus Arm

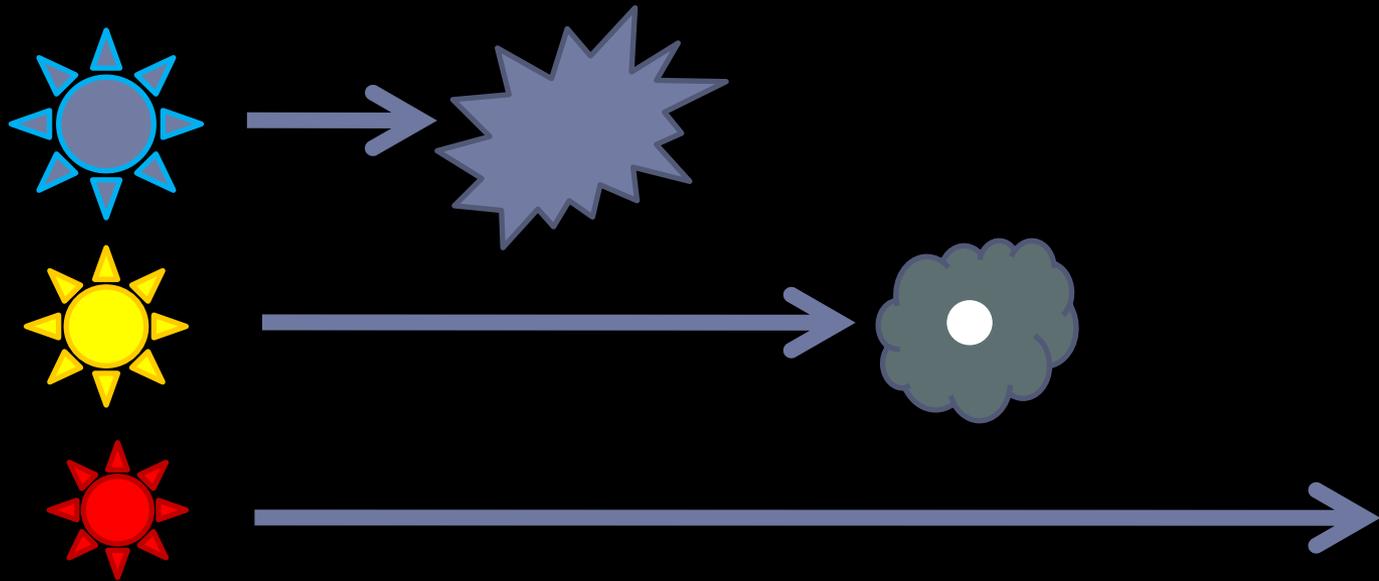
$$N = N_G f_{met} f_{age} f_{single} f_{disk} f_{hz}$$

銀河系内の星の総数

100,000,000,000個



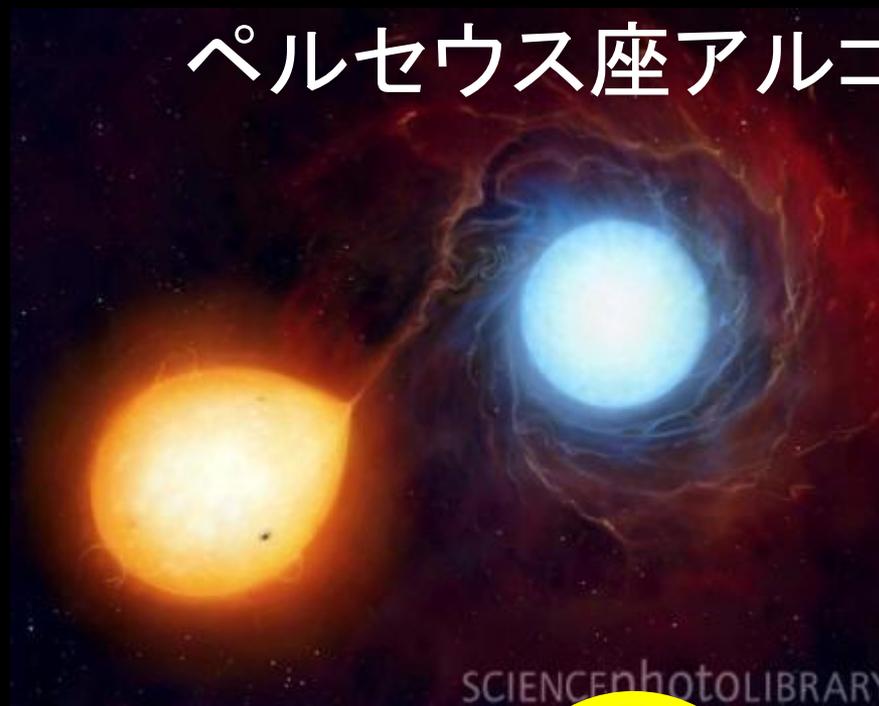
惑星材料元素を十分もつ確率  
4分の1



$$N = N_G f_{met} f_{age} f_{single} f_{disk} f_{hz}$$

寿命の長い恒星の割合  
およそ1

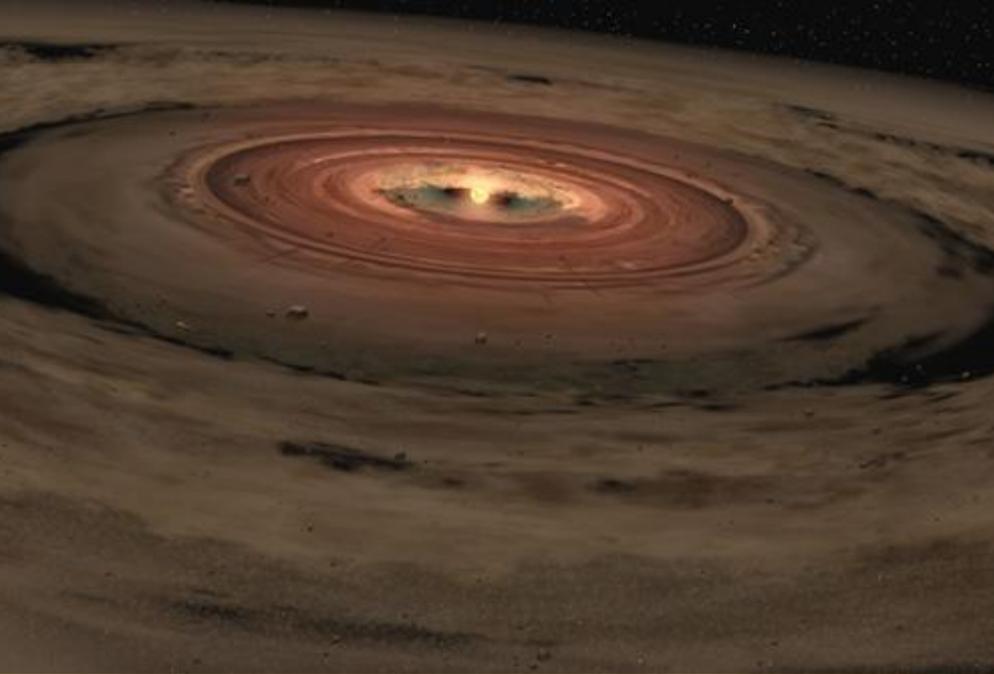
# ペルセウス座アルゴルの想像図



$$N = N_G f_{met} f_{age} f_{single} f_{disk} f_{hz}$$

単独星の割合

2分の1



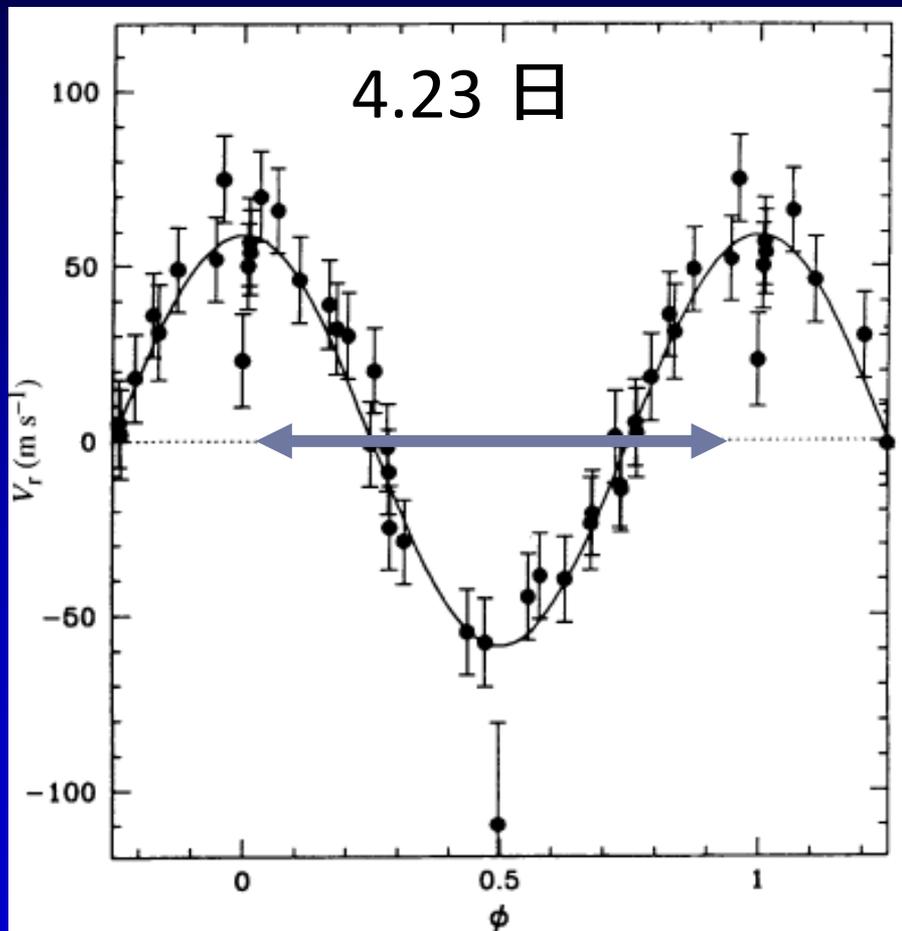
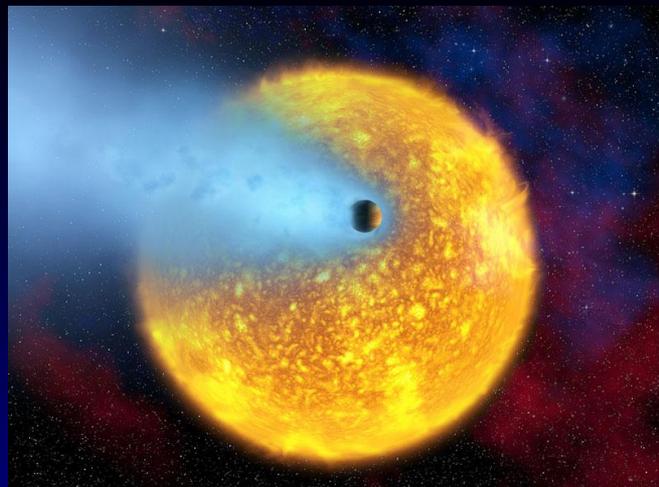
重い円盤からは巨大ガス惑星が3つ以上でき、互いの重力で軌道が乱れ、惑星系が壊れる

$$N = N_G f_{met} f_{age} f_{single} f_{disk} f_{hz}$$

惑星系円盤が軽い割合  
2分の1

# ホットジュピター

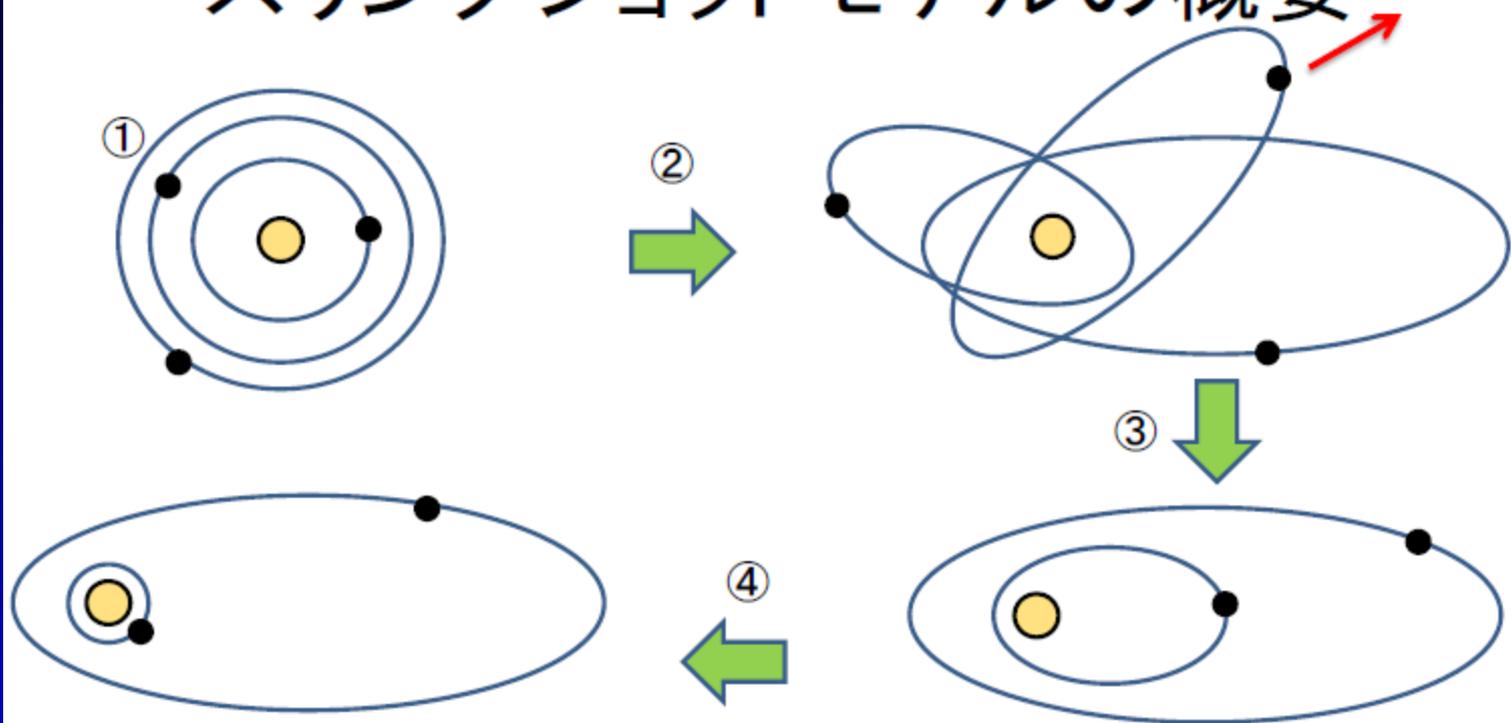
吸収スペクトル線のドップラー効果



- 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)

# スリングショットモデルの概要



- ① 太陽系標準モデルと同様に惑星形成
- ② 惑星間の重力相互作用による軌道不安定化
- ③ 1つの惑星が系の外へ飛んでいき、安定化
- ④ 中心星の潮汐作用によって円軌道化

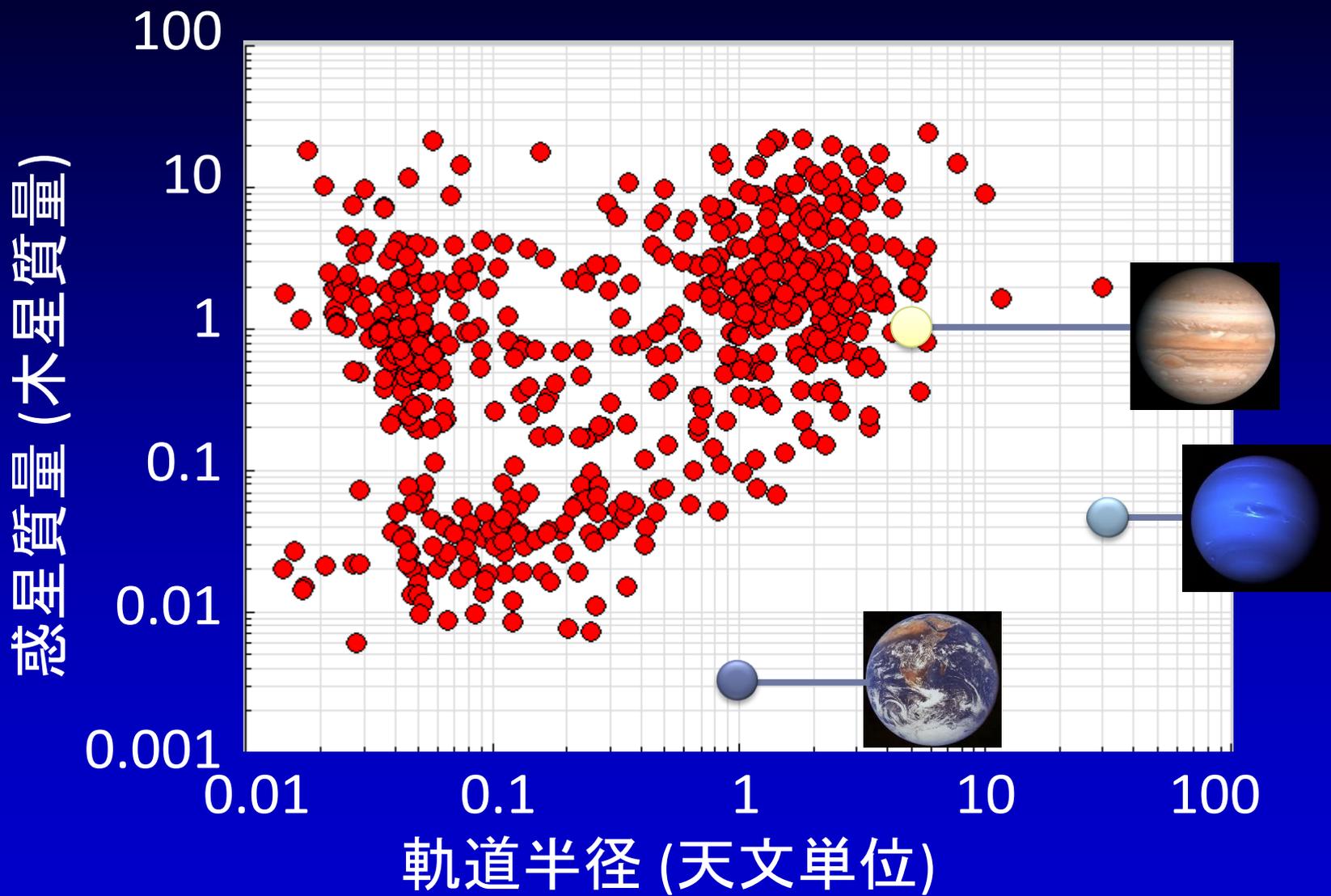
→ ホットジュピターの形成

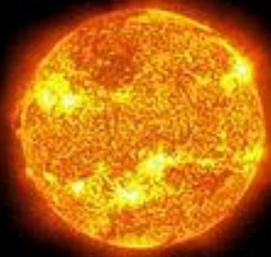
e.g. Rasio & Ford 1996

# ハビタブルゾーンに地球型惑星 が形成される割合

$$N = N_G f_{met} f_{age} f_{single} f_{disk} f_{hz}$$

約 1





Sun

1

太陽の星



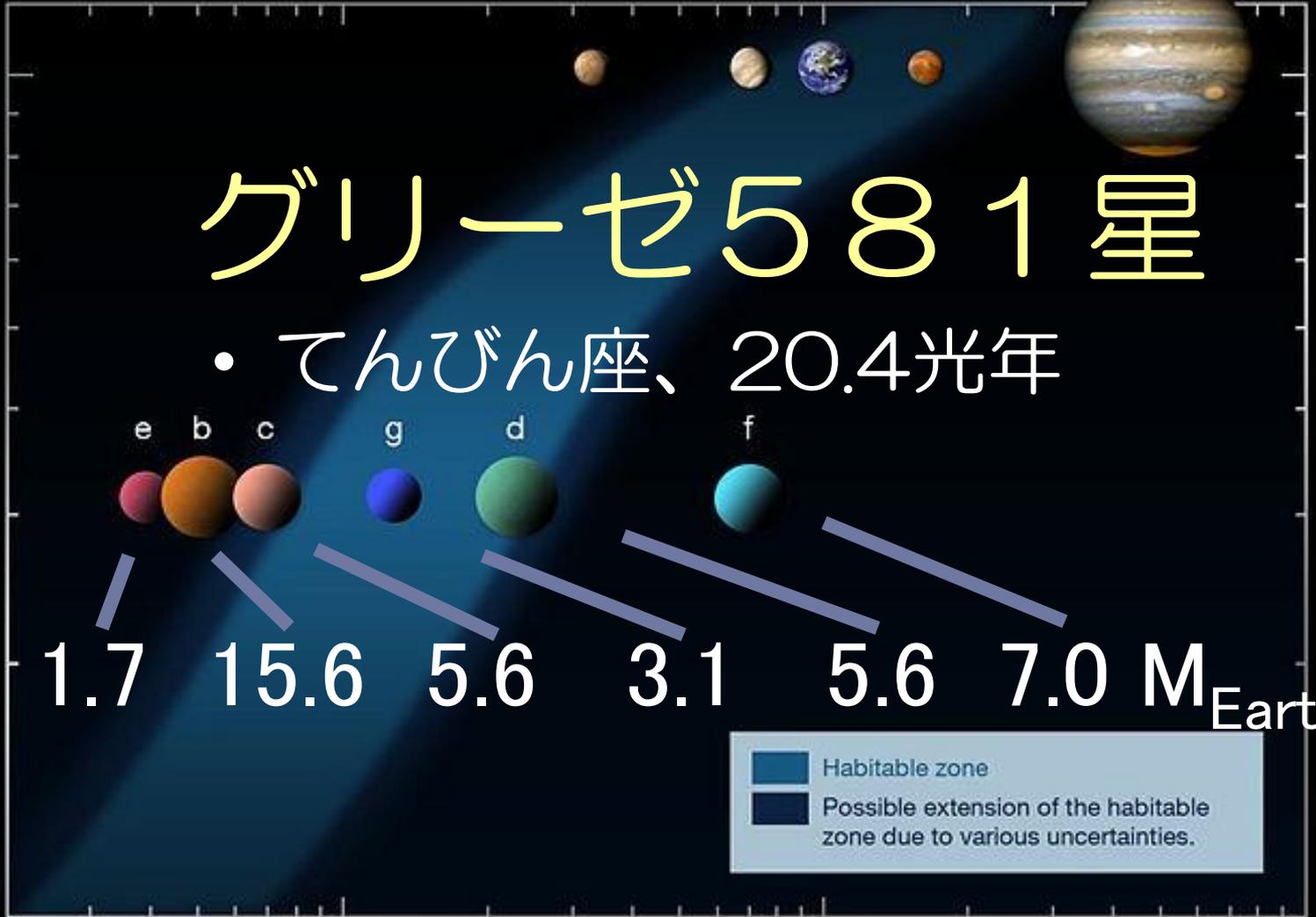
Gliese 581

0.1

Wikipedia

# グリーゼ581星

• てんびん座、20.4光年



 Habitable zone  
 Possible extension of the habitable zone due to various uncertainties.

0.1

1

10

## 中心星からの距離 (天文単位)

Milky Way Galaxy

# 生命の存在する惑星数

$$N = N_G \frac{1}{4} \frac{1}{2} \frac{1}{2} 1$$

← 3,000 light years →

Kepler Search Space

Sagittarius Arm

Sun

Orion Spur

$$= 1/16 \times N_G$$

≐ 60億！

宇宙は生命に満ちていてもおかしくない

# 地球外文明の数

60億をさらに絞る

60億 ×

$\frac{1}{2}$  × 0.01 × 1万 / 100億

知的生命の進化に十分な時間を  
経た惑星の割合

# 地球外文明の数

60億をさらに絞る

$$60\text{億} \times \frac{1}{2} \times 0.01 \times 1\text{万} / 100\text{億}$$

文明が現れる確率

# 地球外文明の数

60億をさらに絞る

$$60\text{億} \times \frac{1}{2} \times 0.01 \times 1\text{万}/100\text{億}$$

文明が現存する確率

# 地球外文明の数

生命の存在する惑星数

60億個

文明をもった惑星数

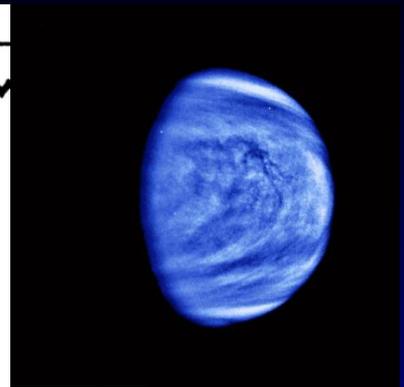
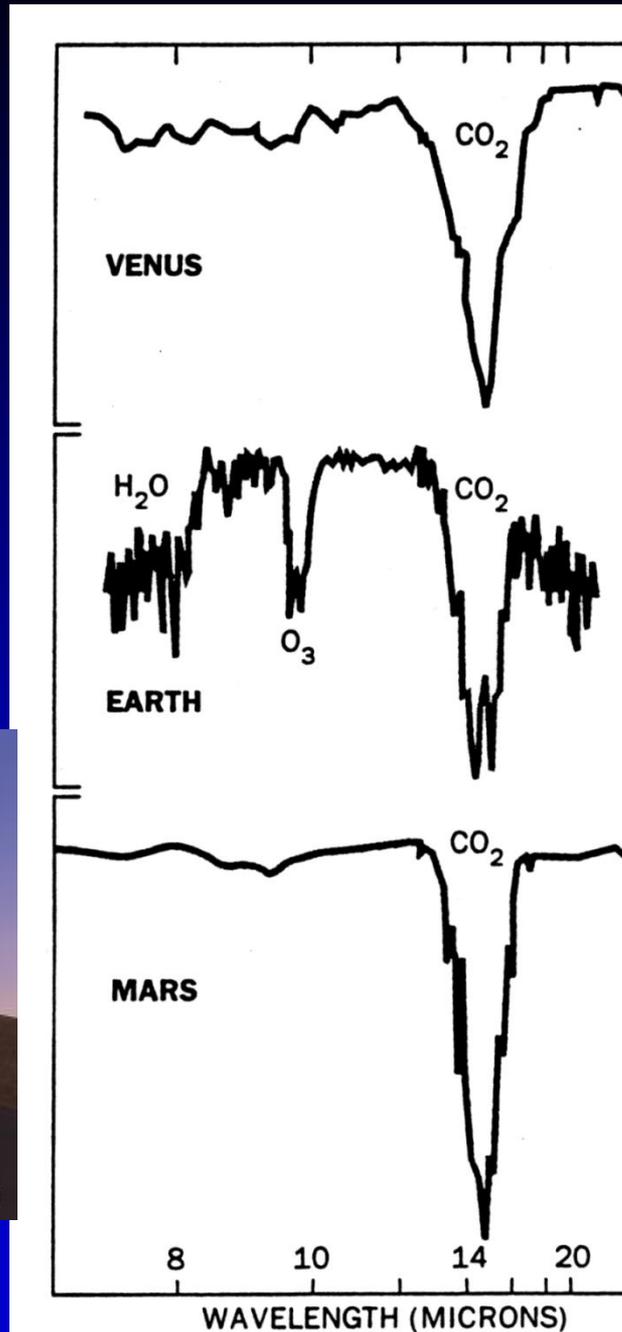
3千万個

文明が現存する惑星数

30個

# 太陽系外生命 の探索

- 惑星の光をキャッチして分析することで、生命の証拠を発見可



# 30m望遠鏡計画



2018年の稼働開始を目指し、米・加・欧・日・中・印などの国際協力活動が行われている

# まとめ

- 惑星の地表に長期間液体の水が存在するには、中心の星からの適度な距離と惑星サイズが必要
- そのような条件を満たす惑星が生まれる確率は低いと考えられる(数十分の1程度)
- 生命を持つ惑星は銀河系に数十億個存在する可能性がある
- 地球外生命発見の有望な手段を手にしつつある
- 高校理科の題材を豊富に含む