

# 惑星と系外惑星

Rosa M. Ros, Hans Deeg

*International Astronomical Union  
Technical University of Catalonia, Spain  
Canarian Astrophysical Institute, Spain*



# 目標

- 惑星のデータの表に示された数値を、モデルを通して理解する。
- 系外惑星の主な特徴を理解する。



# 太陽系

芸術、工芸に終わら  
せず、情報を含んだ  
モデルを作りたい。











# 科学的内容を示したモデル

科学的内容を表した  
モデル、具体的な特  
徴を示したモデルを  
作ろう。



# 活動1: 太陽からの距離のモデル

億 万

水星	5790 0000 km		6 cm	0.4 au
金星	1 0830 0000 km		11 cm	0.7 au
地球	1 4970 0000 km		15 cm	1.0 au
火星	2 2810 0000 km		23 cm	1.5 au
木星	7 7870 0000 km		78 cm	5.2 au
土星	14 3010 0000 km		143 cm	9.6 au
天王星	28 7650 0000 km		288 cm	19.2 au
海王星	45 0660 0000 km		450 cm	30.1 au



縮尺  
1兆分の1



# 活動2: 直径のモデル

万

太陽	139 2000 km		139.0 cm
水星	4878 km		0.5 cm
金星	1 2180 km		1.2 cm
地球	1 2756 km		1.3 cm
火星	6760 km		0.7 cm
木星	14 2800 km		14.3 cm
土星	12 0000 km		12.0 cm
天王星	5 0000 km		5.0 cm
海王星	4 5000 km		4.5 cm

縮尺 10億分の1



# 活動2: 直径のモデル



惑星の大きさ比べを  
プリントしたTシャツ



# 活動3: 直径と太陽からの距離

(同じ縮尺で表現すると)

万 億 万

	万	億	万		
太陽	139 2000 km				25.0 cm
水星	4878 km	5790 0000 km			0.1 cm 10 m
金星	1 2180 km	1 0830 0000 km			0.2 cm 19 m
地球	1 2756 km	1 4970 0000 km			0.2 cm 27 m
火星	6760 km	2 2810 0000 km			0.1 cm 41 m
木星	14 2800 km	7 7870 0000 km			2.5 cm 140 m
土星	12 0000 km	14 3010 0000 km			2.0 cm 250 m
天王星	5 0000 km	28 7650 0000 km			1.0 cm 500 m
海王星	4 5000 km	45 0660 0000 km			1.0 cm 800 m

校庭なら、普通は火星までがやっとだろう。

縮尺 60億分の1





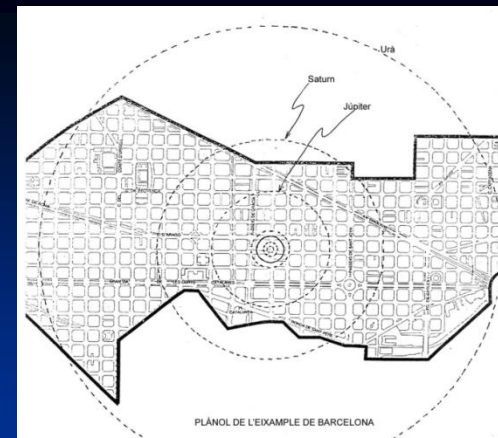
# 活動3: 運動場での、直径と距離のモデル



# 活動4: 街の中でのモデル

## (バルセロナでの例)

大きさ(中列)、距離(右列)



太陽	洗濯機	<i>Puerta Instituto</i>
水星	キャビアの卵	<i>Puerta Hotel Diplomatic</i>
金星	エンドウ豆	<i>Pasaje Méndez Vigo</i>
地球	エンドウ豆	<i>Entre Méndez Vigo y Bruc</i>
火星	トウガラシの粒	<i>Paseo de Gracia</i>
木星	ミカン(オレンジ)	<i>Calle Balmes</i>
土星	ミカン(タンジェリン)	<i>Pasaje Valeri Serra</i>
天王星	クリの実	<i>Calle Entenza</i>
海王星	クリの実	<i>Estación de Sans</i>

# フランス・メス市でのモデル



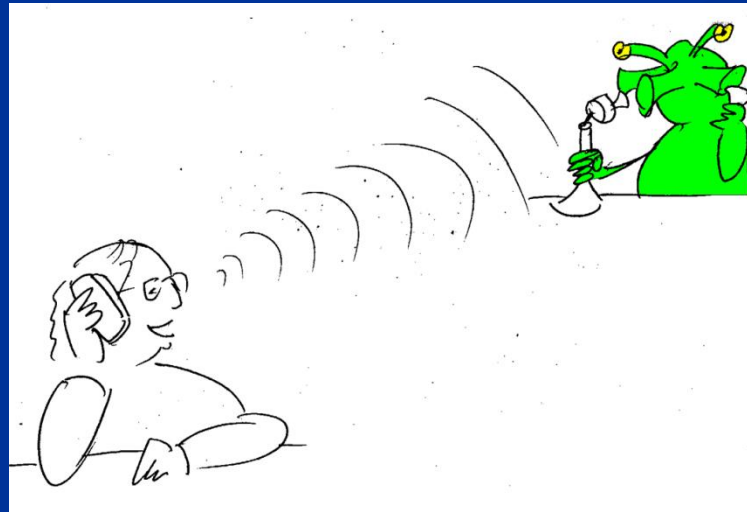
# 活動5: 時間のモデル

- $c = 30$ 万 km/s (光速度)

地球から月まで、光でかかる時間:

$$t = (\text{地球-月間距離}) / c = (38\text{万}4000 \text{ km}) / (30\text{万 km/s}) = 1.3 \text{ s}$$

惑星間テレビ会議は、  
どんな感じに  
なるだろうか。

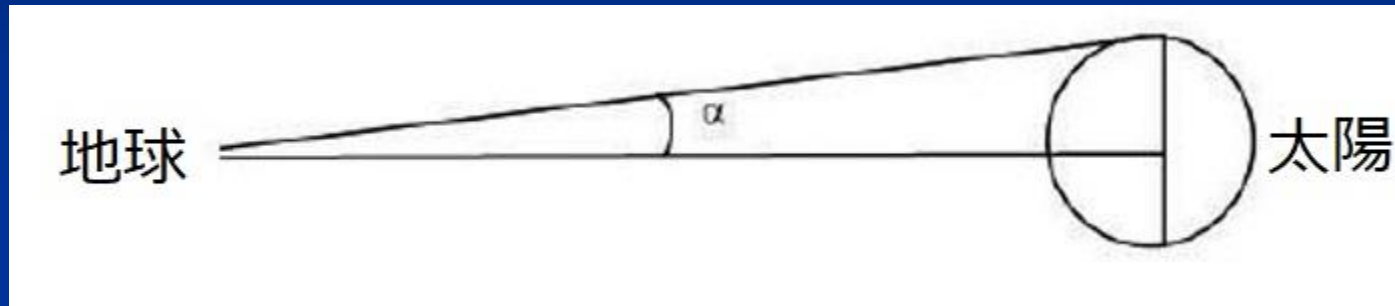


# 太陽光が届くまでの時間

億 万

水星	5790 0000 km		3.3 分
金星	1 0830 0000 km		6.0 分
地球	1 4970 0000 km		8.3 分
火星	2 2810 0000 km		12.7 分
木星	7 7870 0000 km		43.2 分
土星	14 3010 0000 km		1.32 時間
天王星	28 7650 0000 km		2.66 時間
海王星	45 0660 0000 km		4.16 時間

# 活動6: 惑星から見た太陽の大きさ

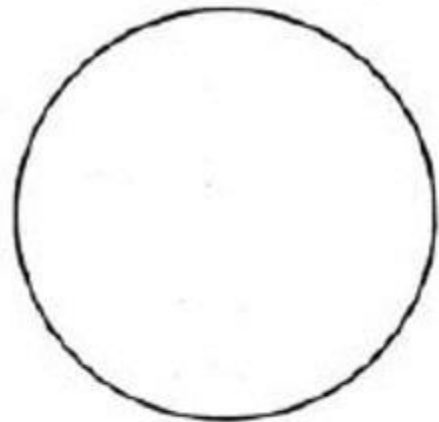


- $\alpha = \tan \alpha = \text{太陽半径} / \text{太陽までの距離}$

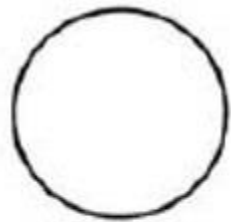
地球から:  $(70 \text{ 万 km}) / (1 \text{ 億}5000 \text{ 万 km}) = 0.0045 \text{ ラジアン} = 0.255^\circ$

- 地球から見た太陽視直径  $2 \alpha = 0.51^\circ$

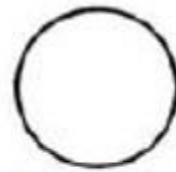
# 活動6: 惑星から見た太陽の大きさ



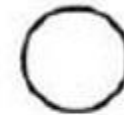
水星から



金星から



地球から



火星から



木星から



土星から



天王星から



海王星から

# 活動7: 密度のモデル

太陽	1.41 g/cm <sup>3</sup>	⇒	硫黄 (1.1 - 2.2)
水星	5.41 g/cm <sup>3</sup>	⇒	黄鉄鉱 (5.2)
金星	5.25 g/cm <sup>3</sup>	⇒	黄鉄鉱 (5.2)
地球	5.52 g/cm <sup>3</sup>	⇒	黄鉄鉱 (5.2)
火星	3.90 g/cm <sup>3</sup>	⇒	閃亜鉛鉱 (4.0)
木星	1.33 g/cm <sup>3</sup>	⇒	硫黄 (1.1 - 2.2)
土星	0.71 g/cm <sup>3</sup>	⇒	松の木 (0.55)
天王星	1.30 g/cm <sup>3</sup>	⇒	硫黄 (1.1 - 2.2)
海王星	1.70 g/cm <sup>3</sup>	⇒	粘土 (1.8 - 2.5)





# 活動8: 扁平を作るモデル

- 厚紙の帯を  $35\text{ cm} \times 1\text{ cm}$  で用意する。
- 長さ  $50\text{ cm}$  太さ直径  $1\text{ cm}$  の細い円柱の棒に付ける。帯の下の端は棒に固定せず、棒に沿って滑るようにしておく。
- 両手の手のひらで棒を持ち、右回り、左回りと速く回す。遠心力で、厚紙の帯が惑星のような形になる。



# 活動8：扁平度

惑星	(赤道半徑－極半徑) / 赤道半徑
水星	0.0
金星	0.0
地球	0.0034
火星	0.005
木星	0.064
土星	0.108
天王星	0.03
海王星	0.03



## 活動9: 公転のモデル

- 木の実をひもの一方に付け、ひもの他方を持って、頭の上でひもを回してみよう。
- ひもを長くすると、一周する時間が長くなる。
- ひもを短く持つと、一週の時間が短くなる。



# 地球の公転のデータ

平均公転速度  $v = 2\pi R / T$

地球では、

$$v = (2\pi \times 150 \times 10^6 \text{ km}) / 365 \text{ 日}$$

$$v = 258\text{万}2100 \text{ km / 日} = 10\text{万}7590 \text{ km/h} = 29.9 \text{ km/s}$$

太陽の銀河系中心周りの平均公転速度は 220 km/s  
言い換えると 80万 km/h



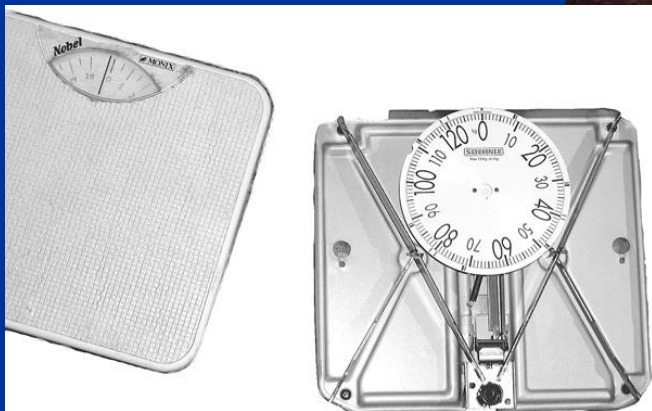
# 公転のデータ

惑星	公転周期 (日) 万	太陽からの 距離(km)	平均公転 速度(km/s)	平均公転 速度(km/h) 万
水星	87.97	$57.9 \times 10^6$	47.90	17 2440
金星	224.70	$108.3 \times 10^6$	35.02	12 6072
地球	365.26	$149.7 \times 10^6$	29.78	10 7208
火星	686.97	$228.1 \times 10^6$	24.08	8 6688
木星	4331.57	$778.7 \times 10^6$	13.07	4 7052
土星	1 0759.22	$1430.1 \times 10^6$	9.69	3 4884
天王星	3 0799.10	$2876.5 \times 10^6$	6.81	2 4876
海王星	6 0190.00	$4506.6 \times 10^6$	5.43	1 9558



# 活動10: 表面重力のモデル

- 表面重力  $F = (GMm) / d^2$  ( $d$  は重力源からの距離)  
ここで  $m = 1$  (単位質量で考える)  $d = R$  (惑星半径) とすれば、  
表面の重力加速度  $g = GM / R^2$   
ここで  $M = \frac{4}{3}\pi R^3\rho$  を導入すれば、整理して:  $g = \frac{4}{3}\pi GR\rho$

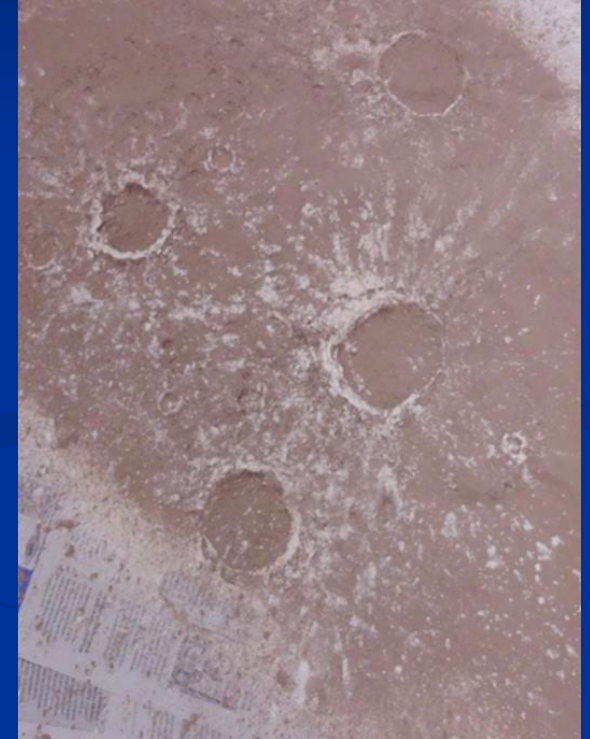


# 表面重力

惑星	赤道半径 万	密度		計算した重力	実際の重力	
水星	2439 km	5.4 g/cm <sup>3</sup>		0.378	3.70 m/s <sup>2</sup>	0.37
金星	6052 km	5.3 g/cm <sup>3</sup>		0.894	8.87 m/s <sup>2</sup>	0.86
地球	6378 km	5.5 g/cm <sup>3</sup>		1.000	9.80 m/s <sup>2</sup>	1.00
火星	3397 km	3.9 g/cm <sup>3</sup>		0.379	3.71 m/s <sup>2</sup>	0.38
木星	7 1492 km	1.3 g/cm <sup>3</sup>		2.540	23.12 m/s <sup>2</sup>	2.36
土星	6 0268 km	0.7 g/cm <sup>3</sup>		1.070	8.96 m/s <sup>2</sup>	0.91
天王星	2 5559 km	1.2 g/cm <sup>3</sup>		0.800	8.69 m/s <sup>2</sup>	0.88
海王星	2 5269 km	1.7 g/cm <sup>3</sup>		1.200	11.00 m/s <sup>2</sup>	1.12
月					1.62 m/s <sup>2</sup>	0.16

# 活動11:「衝突クレーター」のモデル

- 汚れ対策として、床に新聞紙を敷く。
- 底の浅い箱に小麦粉を深さ1~2 cm、こし器を使って表面を平らにするように入れる。
- 小麦粉の上に、こし器を使って数 mm の深さでココア粉を置いていく。
- 2 m の高さから、ココア粉スプーン1杯を落とし、衝突クレーターを作る。
- 小麦粉は実験材料として再利用できる。





# 活動12: 脱出速度

- $E_{\text{運動エネルギー}} = \frac{1}{2} m v^2$
- $E_{\text{位置エネルギー}} = - (G M_{\text{惑星}} m) / R_{\text{惑星}}$
- $E_{\text{力学的エネルギー}} = E_{\text{運動}} + E_{\text{位置}} = 0$
- $g_{\text{惑星}} = (G M_{\text{惑星}}) / R_{\text{惑星}}^2$

よって  $- (G M_{\text{惑星}} m) / R_{\text{惑星}} + \frac{1}{2} m v^2 = 0$

$$\frac{1}{2} m v^2 = g_{\text{惑星}} m R_{\text{惑星}}$$

よって脱出速度として、以下を得る:

$$v = \sqrt{2gR}$$



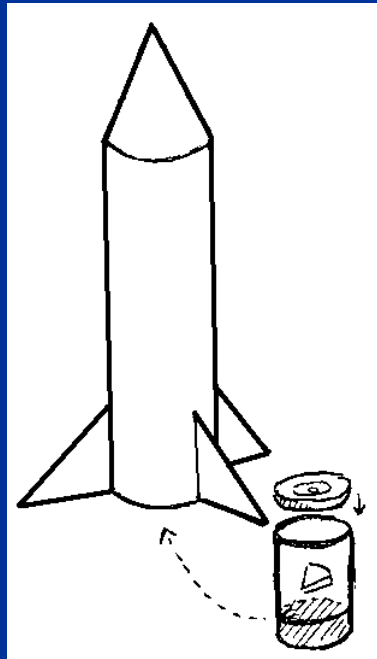
# 活動12: 脱出速度

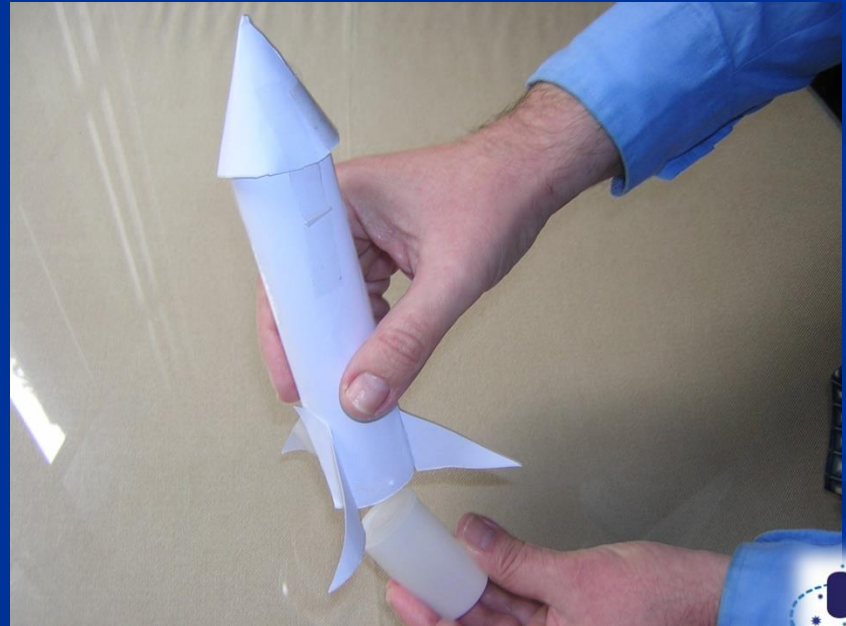
惑星	赤道半径 万	表面重力		脱出速度
水星	2439 km	0.378		4.3 km/s
金星	6052 km	0.894		10.3 km/s
地球	6378 km	1.000		11.2 km/s
火星	3397 km	0.379		5.0 km/s
木星	7 1492 km	2.540		59.5 km/s
土星	6 0268 km	1.070		35.6 km/s
天王星	2 5559 km	0.800		21.2 km/s
海王星	2 5269 km	1.200		23.6 km/s



# ロケット打ち上げ

- 厚紙
- 写真フィルム入れ
- 発砲する丸薬 ¼ 錠





# 太陽系外惑星系



1995年、ミツシエル・マイヨールとディディエ・ケローズはペガサス座51番星の周りを回る惑星を発見した。



2M1207b の直接撮像 (ESO)

2003年3月16日、  
系外惑星の最初の  
直接撮像



# 観測は、技術に依存している



1610年、ガリレオは初めて望遠鏡で土星を観測した。ガリレオの望遠鏡では土星の輪をはっきり認識することはできず、3体から成る天体に見えた。より性能のよい望遠鏡で輪と認識できたのは、1659年のホイヘンスの観測による。ルーベンスによる絵画(1636-1638年制作)では、ガリレオの影響で土星が3重の天体で描かれている。

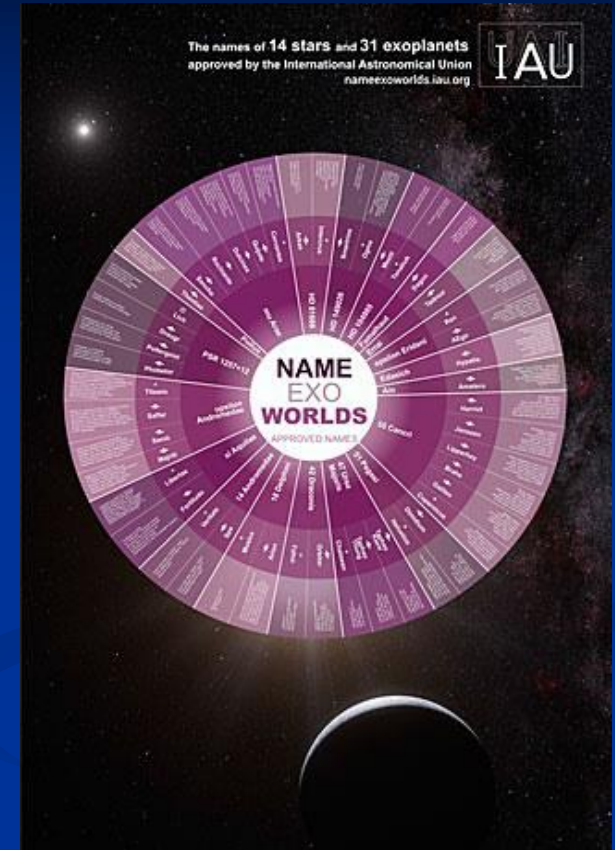


# 系外惑星の命名

中心の恒星の名にアルファベット1文字を添えて表現する。その系で最初に見つかった惑星には b を添える。

(例 ペガサス座51番星 b)

(51 Pegasi b)



続いて発見された惑星には、順に c, d, e, f... と添えられていく。  
(51 Pegasi c, 51 Pegasi d, 51 Pegasi e, 51 Pegasi f など)





# 系外惑星の検出法

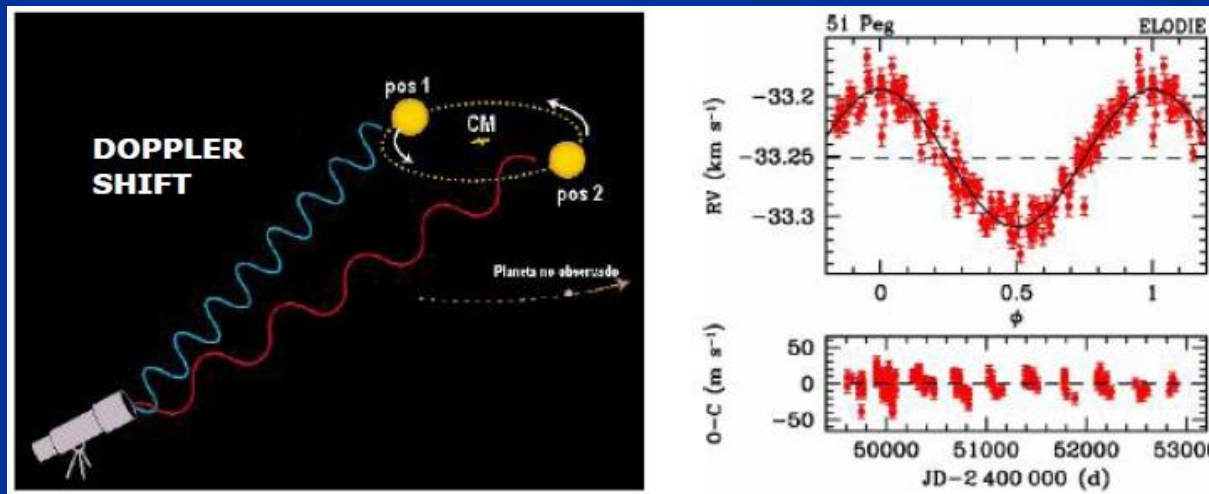
## 種々の検出法

- 視線速度法 (ドップラー法)
- トランジット法
- 重力レンズ法
- その他

# 検出法：視線速度法（ドップラー法）

中心の恒星の視線方向の揺れを検出する。惑星が周回すると、中心の恒星は系の重心の周りを公転する。そのドップラー効果を検出する。

系外惑星の最初の例であるペガサス座51番星bは、この方法で発見された。



# 活動13: 視線速度法(ドップラー法)

ドップラー効果は、音源が動く時の、受け取る音波の波長も変える。

カバンの中に目覚まし時計を入れてみよう。カバンのひもを持って水平に振り回してみよう。

時計が近づく時、音波の波長は短くなり、音程が高くなっていることがわかる。

時計が遠ざかる時、音波の波長は長くなり、音程が低くなっていることがわかる。

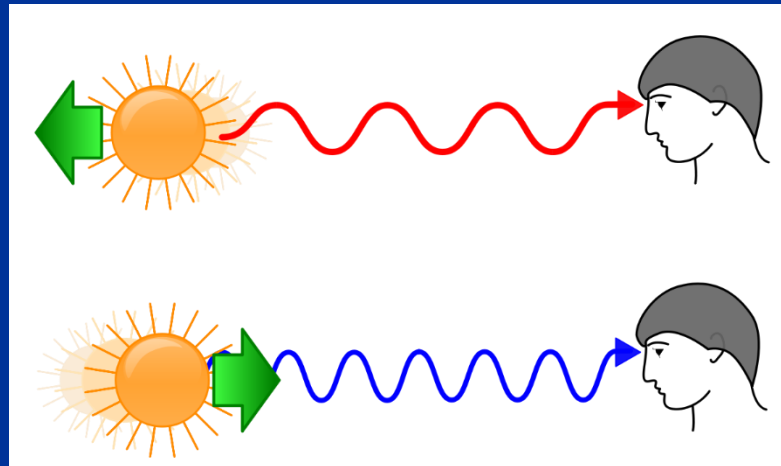
回転中心にある時、音程が変わらないことが分かる。



# 活動13: 視線速度法(ドップラー法)

光であれば:

光源が遠ざかる時、受け取る波長は伸び、  
光のスペクトルの赤い方へずれる。

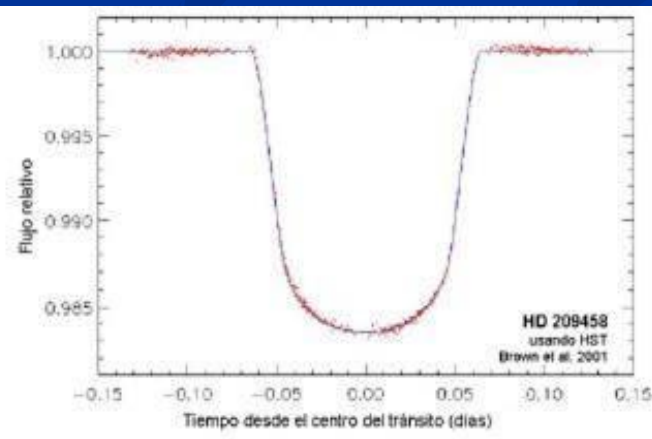
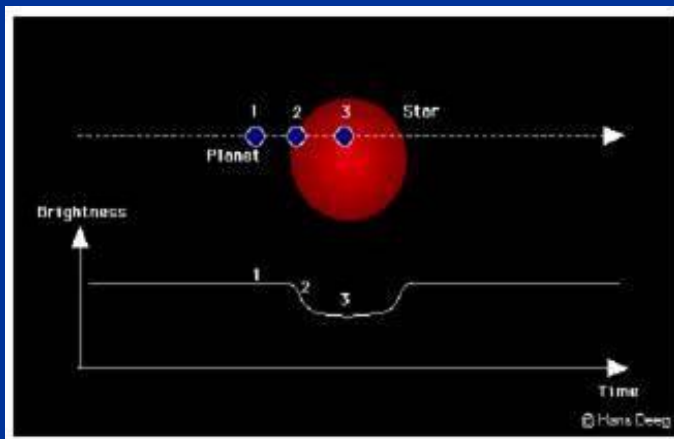


光源が近づく時、受け取る波長は縮み、  
光のスペクトルの青い方へずれる。

# 検出法:トランジット法

系外惑星が中心の恒星の前面を通過する際、その恒星の明るさがわずかに減じて見える。

太陽類似の恒星、木星サイズの惑星を考えると、減光は約1%、地球型であればせいぜい約 0.03 %にしかない。



# 活動14:トランジット法

2つの球を用意する: 中心の恒星を模した大きな球と  
周回する惑星を模した小さな球。

惑星の公転面から見ると、惑星が恒星前面を通過  
する際、恒星の明るさが減じて見えることがわかる。

しかし惑星の公転面から傾いた方向から見れば、明  
るさの変化は見えない。

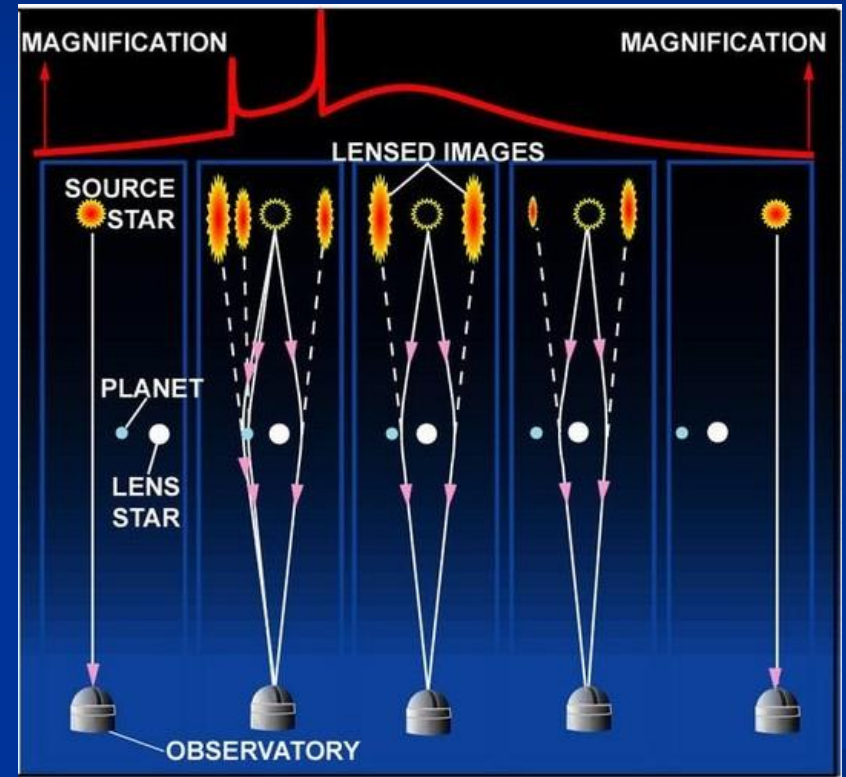


惑星の公転面から見る

惑星の公転面以外の方向から見る

# 検出法：重力レンズ法

系外惑星系と見かけの方向が重なった後方の天体が、重力レンズ効果をj受けるようすを誇張して示したもの。



地球、後方の天体、系外惑星系の3者が視線方向にちょうどそろった時に起こる現象。

# 活動15: 重力レンズ法



ワイングラスの足ひとつでは、単純な歪みで終わる。

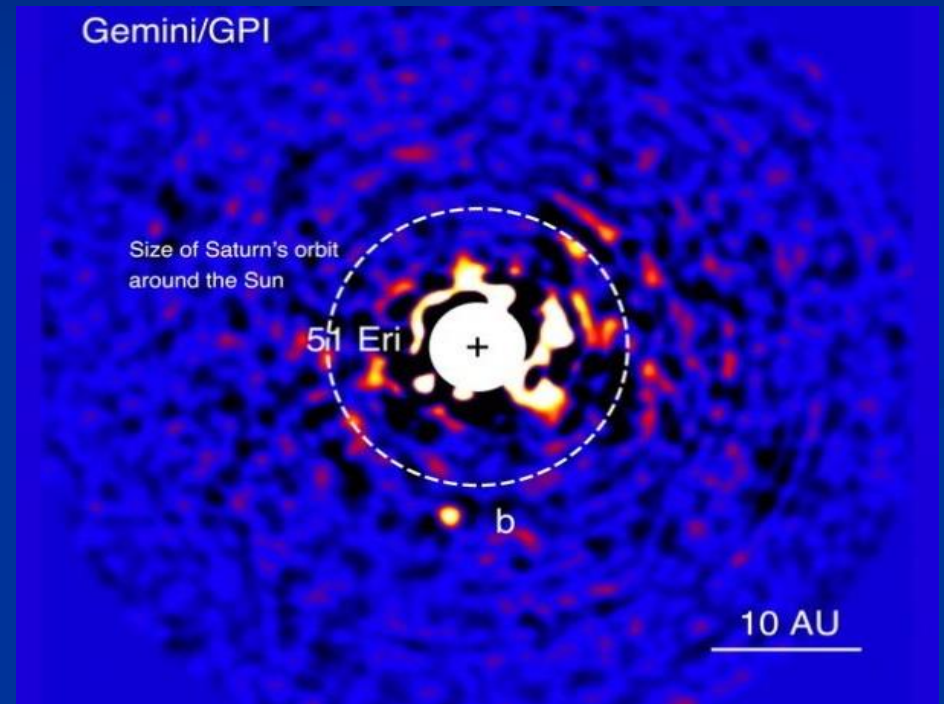


ワイングラスの足2つ重ねると:  
2つの重なり具合により、レンズ像が重なったり2つ見えたりする。

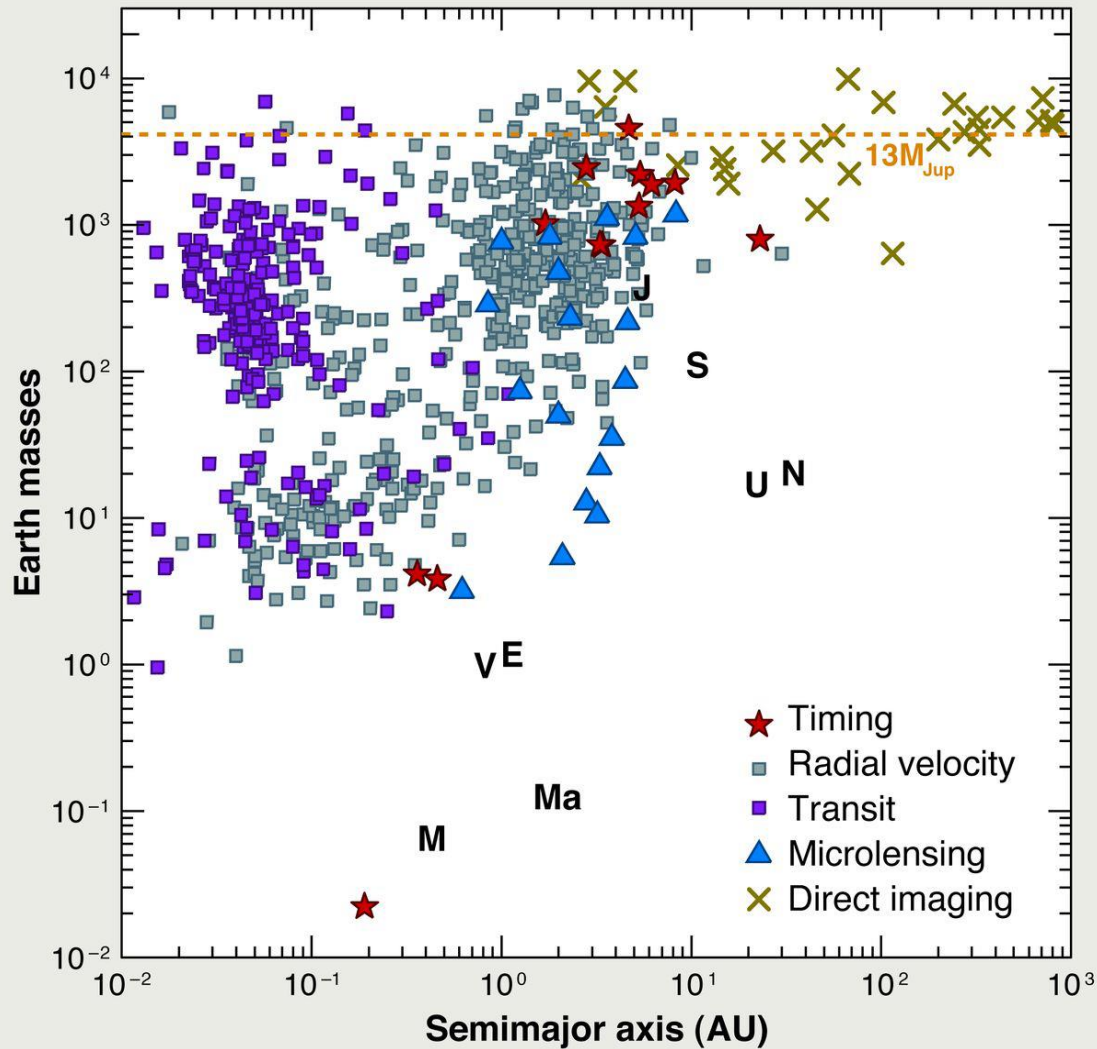


# 検出法：直接撮像法

直接撮像で、周囲の惑星を検出することができる場合がある。



中心の恒星の光量により、この方法は非常に困難な場合がある。



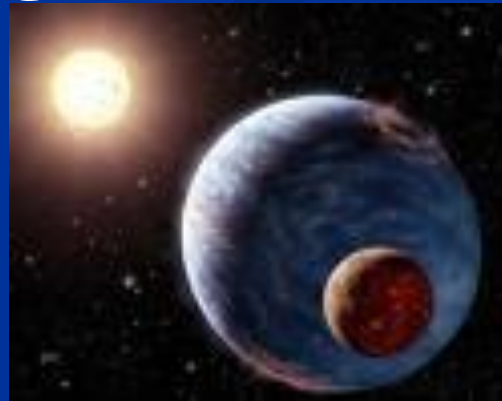
# 検出法ごとの 2013個の 系外惑星の特徴

# 系外惑星の姿

2000以上の系外惑星系が確定し、系外惑星の候補は数千にのぼる。

NASAジェット推進研究所 <http://planetquest.jpl.nasa.gov/>

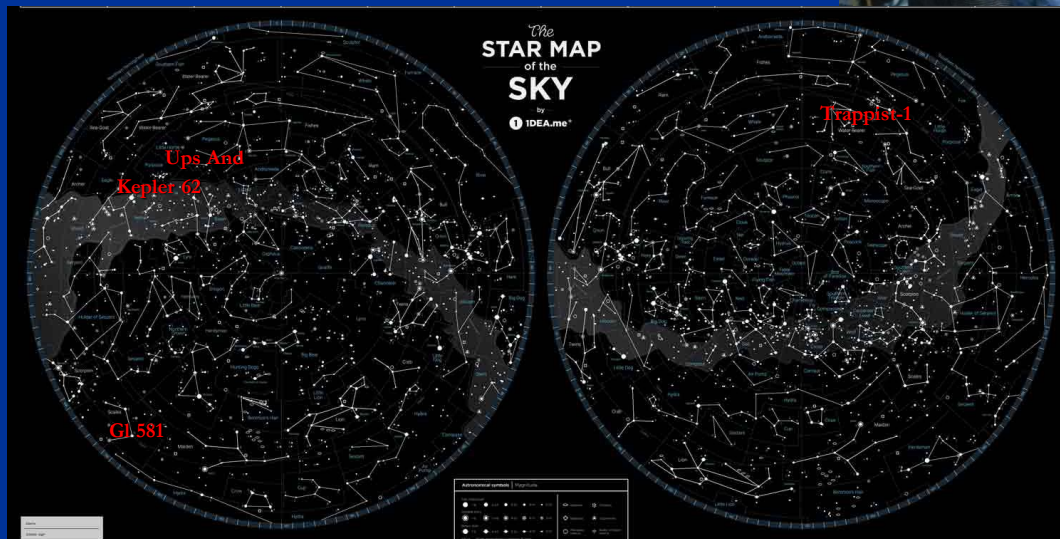
系外惑星の質量は、木星質量 ( $1.90 \times 10^{27}$  kg) や地球質量 ( $5.97 \times 10^{24}$  kg) と比較されることがある。



系外惑星検出の技術的限界にも注意が必要。



# 活動16: 系外惑星系のスケール・モデル



1 天文単位 = 1 m  
直径 10000 km = 0.5 cm

# 活動16: 太陽系のスケール・モデル

太陽系惑星	距離 au	直径 km	距離モデル	直径モデル
水星	0.39	4879	40 cm	0.2 cm
金星	0.72	1 2104	70 cm	0.6 cm
地球	1	1 2756	1 m	0.6 cm
火星	1.52	6794	1.5 m	0.3 cm
木星	5.2	14 2984	5 m	7 cm
土星	9.55	12 0536	10 m	6 cm
天王星	19.22	5 1118	19 m	2.5 cm
海王星	30.11	4 9528	30 m	2.5 cm

太陽のスペクトル型は G2Vで、太陽半径はこのモデルで 35 cm

1 天文単位の距離 = 1 m    1万 km の直径 = 0.5 cm



# 活動16: 系外惑星系のスケール・モデル

アンドロメダ座 $\upsilon$ 星 Titawin	発見年	距離 au	直径 km 万	距離 モデル	直径 モデル
Ups And b / Saffar	1996	0.059	10 8000	6 cm	5.5 cm
Ups And c / Samh	1999	0.830	20 0000	83 cm	10 cm
Ups And d / Majriti	1999	2.510	18 8000	2.5 m	9 cm
Ups And e / Titawin e	2010	5.240	14 0000	5.2 m	7 cm

アンドロメダ座 $\upsilon$ 星のスペクトル型は F8V で、44 光年先  
半径は太陽の 1.28 倍なので、このモデルでは 45 cm

1 天文単位の距離 = 1 m    1万 km の直径 = 0.5 cm



# 活動16:「地球型惑星」のある 系外惑星系のスケール・モデル

Gliese 581	発見年	距離 au	直径 km 万	距離 モデル	直径 モデル
Gl.581 e	2009	0.030	1 5200	3 cm	0.8 cm
Gl.581 b	2005	0.041	3 2000	4 cm	1.6 cm
Gl.581 c	2007	0.073	2 2000	7 cm	1.1 cm

Gliese 581 のスペクトル型は M2.5V で、20.5 光年先(てんびん座)  
半径は太陽の 0.29 倍なので、このモデルでは 10 cm

1 天文単位の距離 = 1 m    1万 km の直径 = 0.5 cm



# 活動16: ハビタブルゾーンに地球型惑星がある 系外惑星系のスケール・モデル

Kepler 62	発見年	距離 au	直径 km 万	距離 モデル	直径 モデル
Kepler-62 b	2013	0.056	3 3600	5.6 cm	1.7 cm
Kepler-62 c	2013	0.093	1 3600	9 cm	0.7 cm
Kepler-62 d	2013	0.120	4 8000	12 cm	2.4 cm
Kepler-62 e	2013	0.427	4 0000	43 cm	2 cm
Kepler-62 f	2013	0.718	3 6000	72 cm	1.8 cm

Kepler 62 のスペクトル型は K2V で、1200 光年先(こと座)  
半径は太陽の 0.64 倍なので、このモデルでは 22 cm

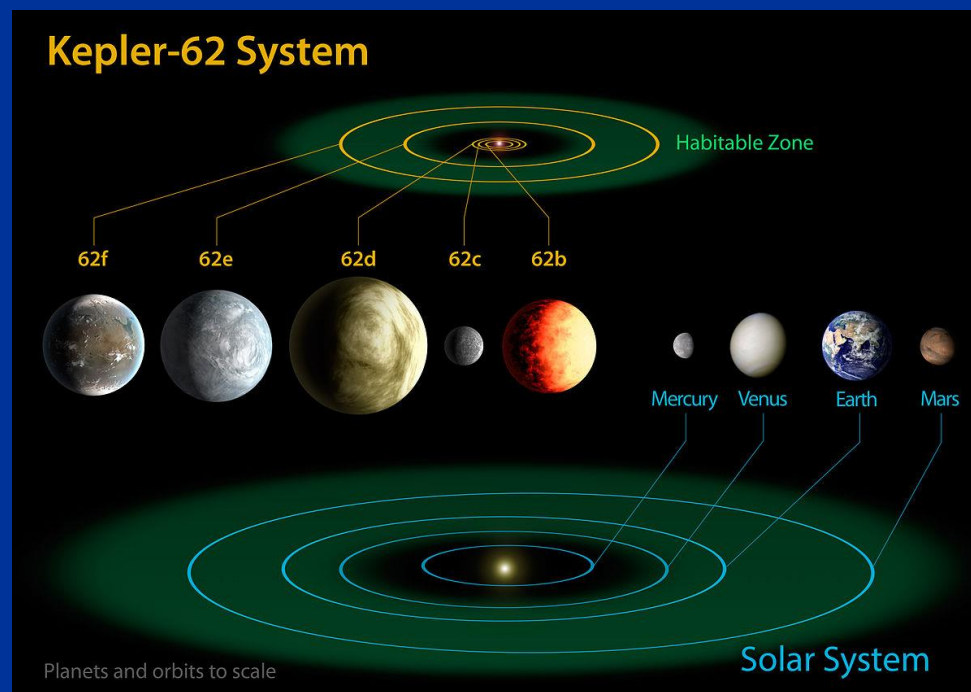
1 天文単位の距離 = 1 m    1万 km の直径 = 0.5 cm





# 系外惑星での生命居住可能性

- Kepler-62 のハビタブルゾーン(生命居住可能領域): 大気条件がよければ、液体の水が存在し得る惑星は2つあるかもしれない。もしかすると、完全に海洋になっている惑星かもしれない。Kepler-62e はハビタブルゾーンの内側の端に近いところにあり、表面が熱すぎない環境となるためには、反射率の高い雲が必要である。一方、Kepler-62f はハビタブルゾーンの外側領域に入っている。



# ハビタブルゾーンに地球型惑星がある 系外惑星系のスケール・モデル

Trappist-1	発見年	距離 au	直径 km 万	距離 モデル	直径 モデル
Trappist-1 b	2016	0.012	2 8400	1.2 cm	1.4 cm
Trappist-1 c	2016	0.016	2 8000	1.6 cm	1.4 cm
Trappist-1 d	2016	0.022	2 0000	2.2 cm	1.0 cm
Trappist-1 e	2017	0.030	2 3200	3.0 cm	1.2 cm
Trappist-1 f	2017	0.039	2 6800	3.9 cm	1.3 cm
Trappist-1 g	2017	0.047	2 9200	4.7 cm	1.5 cm
Trappist-1 h	2017	0.062	1 9600	6.2 cm	1.0 cm

Trappist 1 のスペクトル型は M8V で、40 光年先(みずがめ座)

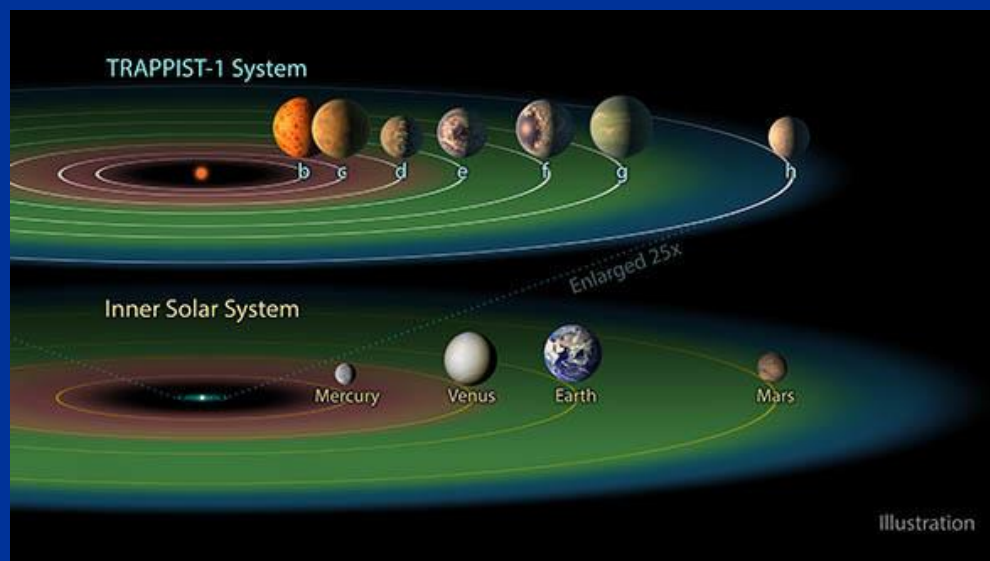
半径は太陽の 0.1 倍なので、このモデルでは 4 cm

1 天文単位の距離 = 1 m    1万 km の直径 = 0.5 cm



# 系外惑星での生命居住可能性

- Trappist 1 系は岩石惑星の系であり、それらの表面に大量の水（液体の水か、水蒸気か、氷）があるかもしれない。ハビタブルゾーンにある惑星で、磁気圏を作れるようしっかり分化した重い中心核があり、恒星風からの防御となる磁気圏を持てば、地球に似た環境となっているかもしれない。



# まとめ

- より具体的な惑星の知識
- 数値間の関係をよく見て、量的なものをよく理解できる
- 太陽系の中の空間は、すかすかである
- 系外惑星とその検出法



ありがとうございました

