

観測的宇宙論入門

—宇宙はどこまでわかったか—

岡村定矩
法政大学教授(理工学部創生科学科)
東京大学名誉教授

Week 1

現在の宇宙の姿

Week 2

ビッグバン宇宙論

Week 3

ダークマターとダークエネルギー

Week 4

太陽系外惑星と元素の起源

第4週：太陽系外惑星と元素の起源

- 4.1 太陽系外惑星の探し方
 - 4.2 ケプラー衛星による革命
 - 4.3 第二の地球を探す
 - 4.4 地上の元素は宇宙でできた
 - 4.5 星は元素の製造工場
 - 4.6 私たちは星の子ども
- } 太陽系外惑星
- } 元素の起源

このテーマは観測的宇宙論の直接のテーマではありませんが、近年の進歩が著しい「太陽系外惑星」と、惑星や私たちを含む生命のもととなっている「元素の起源」について解説し、
「**人類のルーツの根源は宇宙にある**」ことを認識します。

第4週：太陽系外惑星と元素の起源

4.1 太陽系外惑星の探し方

4.2 ケプラー衛星による革命

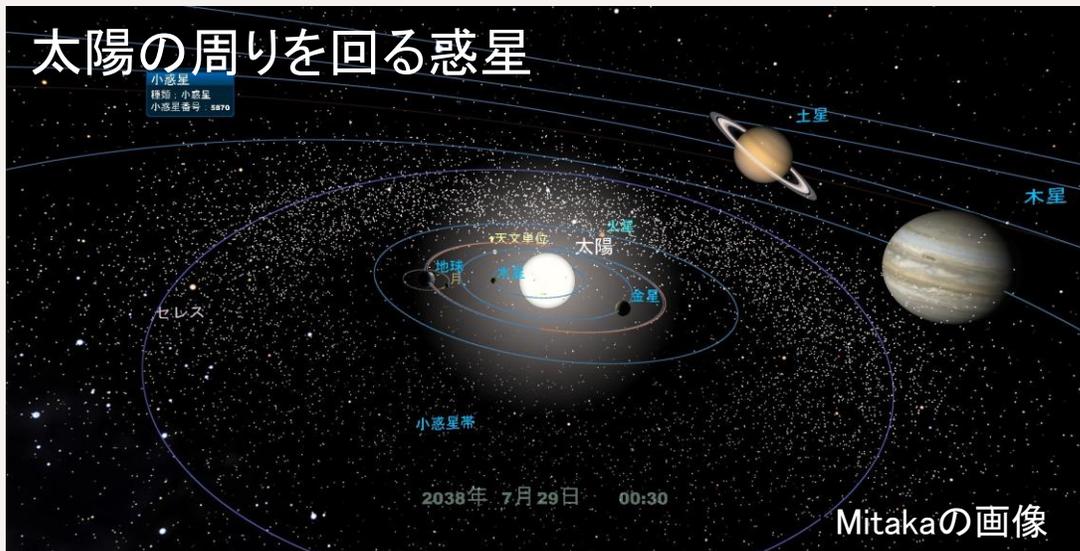
4.3 第二の地球を探す

4.4 地上の元素は宇宙でできた

4.5 星は元素の製造工場

4.6 私たちは星の子ども

太陽の周りを回る惑星



国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト提供

これら無数の星の周りにも惑星系があるに違いない

長い間探し求めて1995年によようやく見つかった。

↓
太陽系外惑星(系外惑星)

どのような方法で探すのか

太陽近傍の星々



国立天文台4次元デジタル宇宙プロジェクト提供

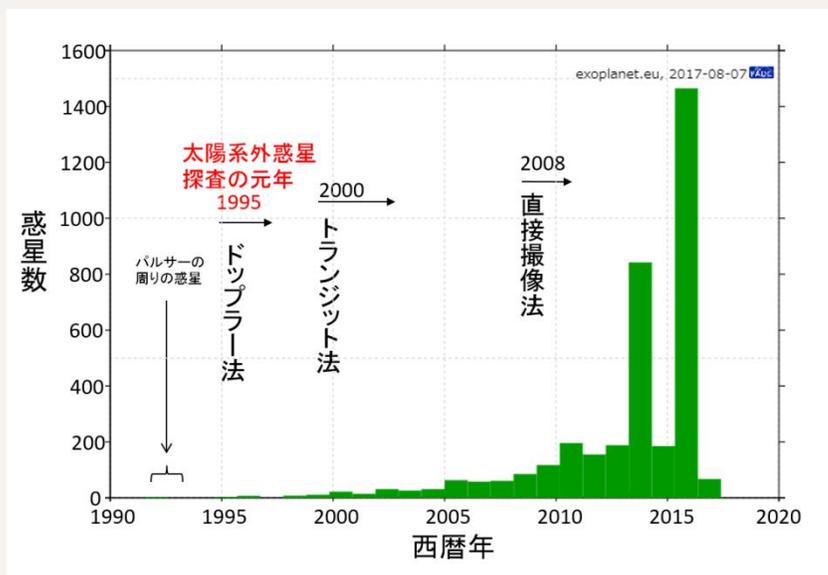
銀河系にある1000億個の星



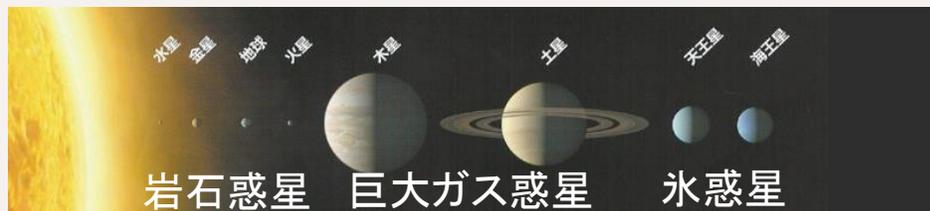
3640個の太陽系外惑星 (Aug. 7, 2017 現在)

方法	惑星数	恒星(主星)数	複数惑星系
ドップラー(+アストロメトリ)	720	541	129
トランジット	2733	2048	453
直接撮像	87	80	5
マイクロレンズ	59	57	2
パルサータイミング	24	19	4
Transit Timing Variation: TTV	7	6	1
総計	3640	2730	612
未確認	210	187	18

The Extrasolar Planets Encyclopaedia
(<http://exoplanet.eu/>) のデータ



太陽系とは全く異なる姿



井田 茂著「異形の惑星」
(NHK Books), 2003

・とても扁平な楕円軌道



扁平軌道の惑星
Eccentric planet

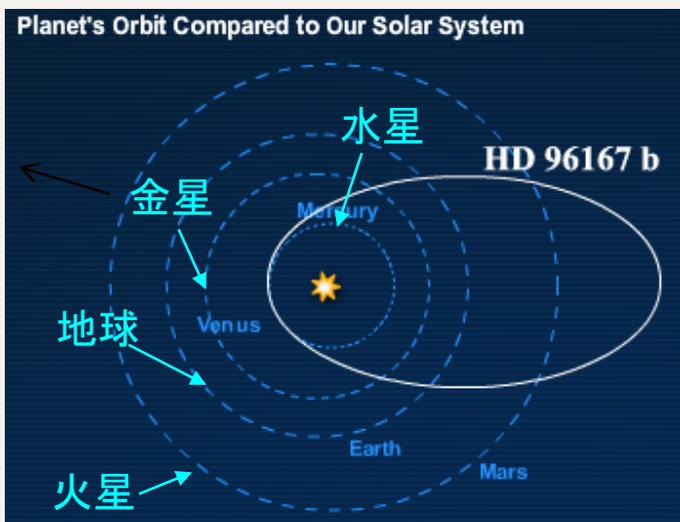
HD96167 b
公転周期 499日

・質量は木星の半分程度(巨大惑星)
・主星からの距離は水星軌道より近い

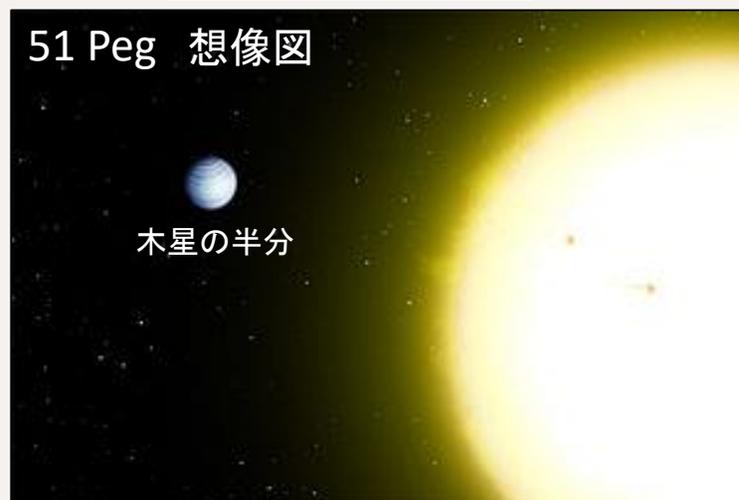


熱い木星
Hot Jupiter

51 Peg b
水星軌道の1/7
公転周期4日!



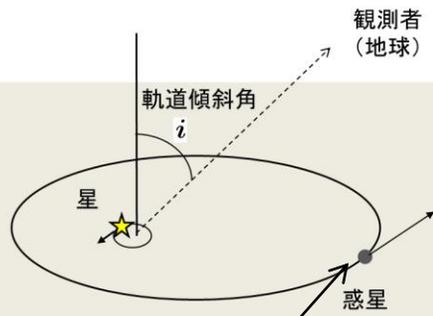
<https://en.wikipedia.org/> より



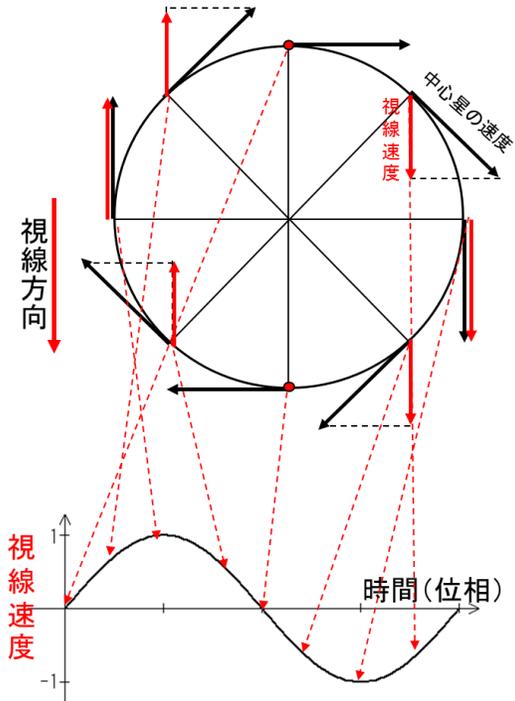
<https://ja.wikipedia.org/> より

ドップラー法(視線速度法)

(1995年に初検出)



惑星は見えていない!

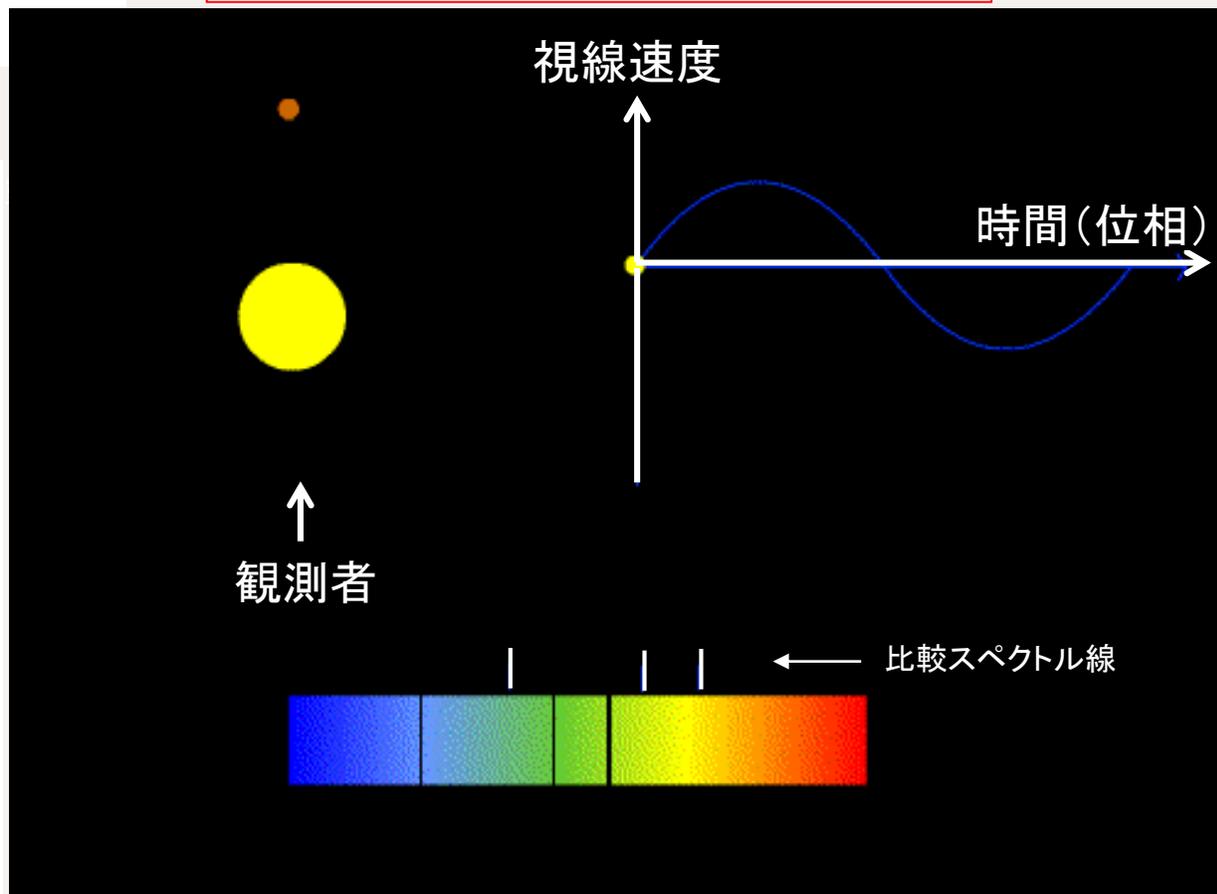
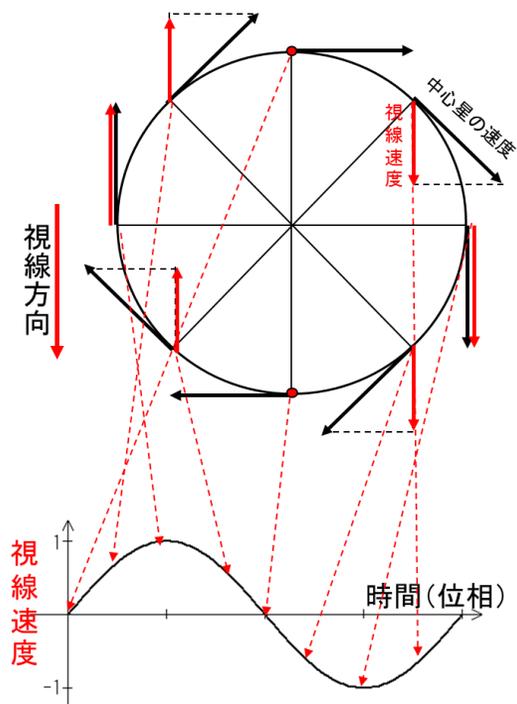


ドップラー法(視線速度法)

(1995年に初検出)

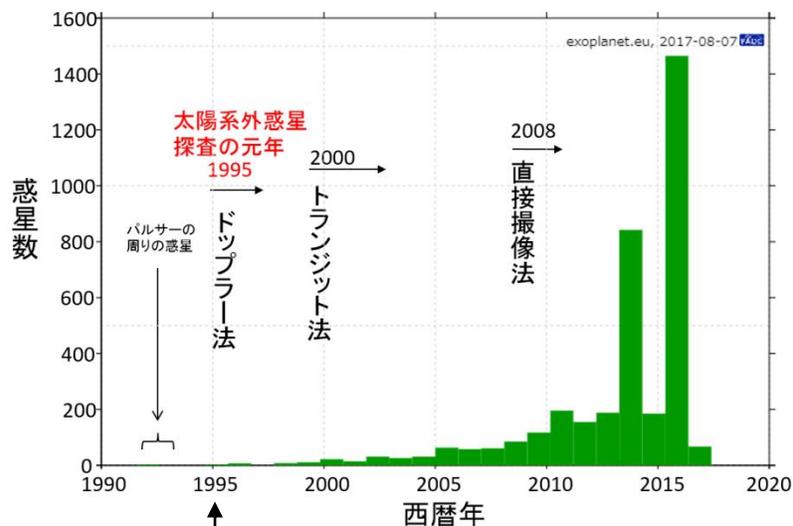
質量の推定が可能(ただし、軌道傾斜角は不明) → **質量の下限値**

惑星は見えていない!



太陽系外惑星探査元年 (1995年)

(ドップラー法による発見)

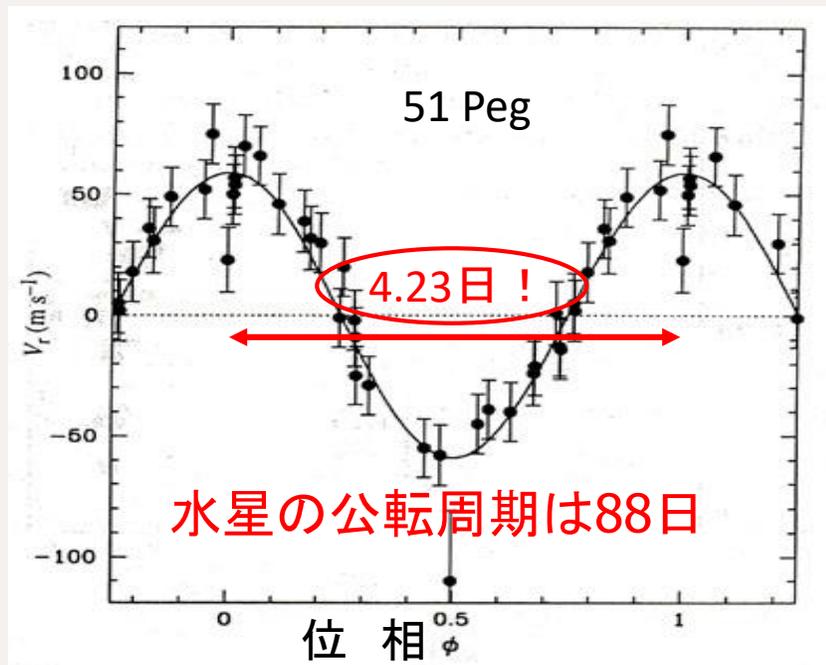


1995
(51 Peg)



ホットジュピター

視線速度



Mayor, M. & Queloz, D. 1995, Nature, 378, 355



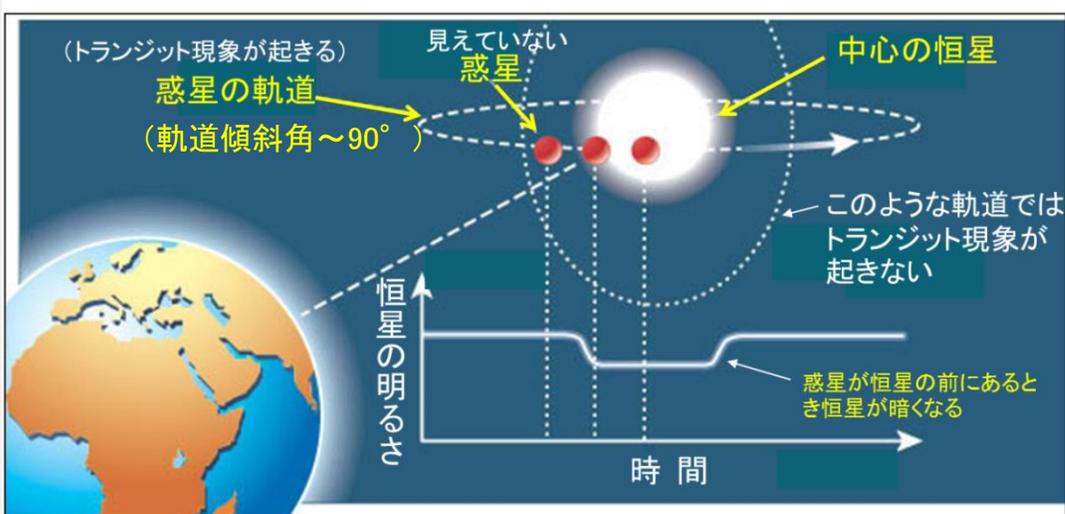
ペガサス座51番星(51 Peg)のデータ
普通の恒星の周りにおける惑星系
の最初の確実な検出

「びっくり仰天の発見」で惑星探査元年

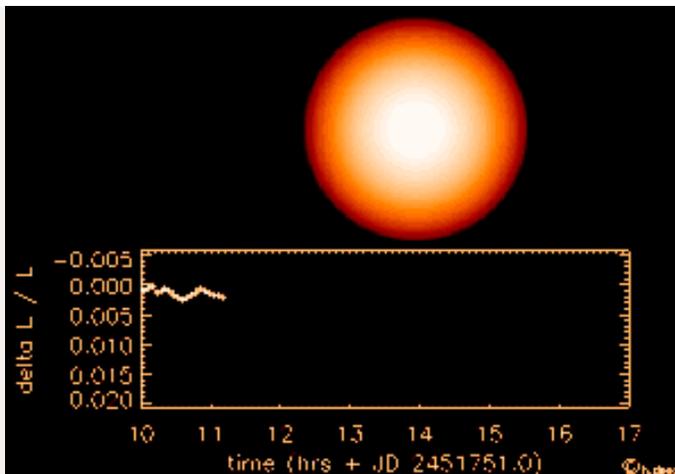
トランジット法

(2000年に初検出)

惑星は見えていない!



(T. M. Brown, 2003, Nature 421, 488-489)



<https://polytechexo.wordpress.com/how-detect-an-exoplanet/the-method-of-transit/>

半径の推定が可能

+

ドップラー法 (視線速度法)

トランジット惑星の場合は
軌道傾斜角がほぼ90°

質量の推定が可能

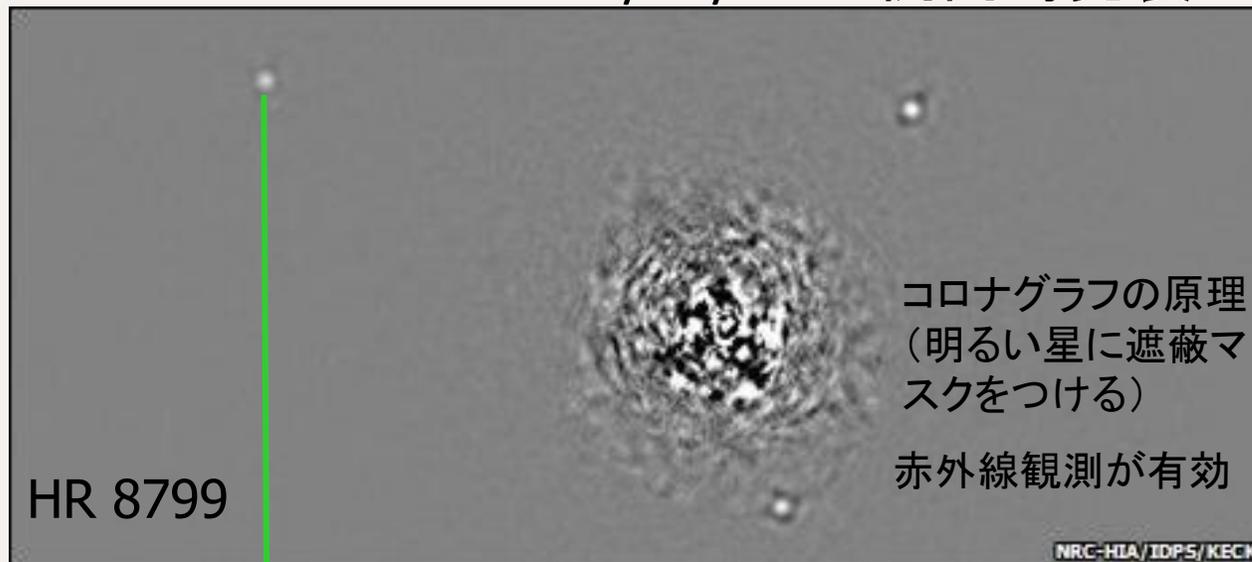


惑星の密度がわかる
(ガス惑星 / 岩石惑星)

直接撮像法

(2008年に初成功)

2008/11/13 2例同時発表

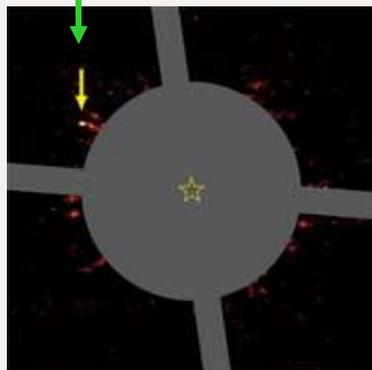


HR8799
(ペガサス座、
距離129光年、A5V)
ジェミニ望遠鏡

フォーマルハウト
(みなみのうお座、
距離25光年、A3V)
ハッブル宇宙望遠鏡

<http://www.whillyard.com/science-pages/our-solar-system/hr-8799.html>
Credit&Copyright NRC-HIA, IDPS, Keck Observatory

(2004年と2008年の近赤外画像で確認)



← 2002年にすばる望遠鏡で
撮影した画像を再解析

<http://subarutelescope.org/Pressrelease/2009/05/21/index.html>

第4週の第1回はここまでです。

第4週：太陽系外惑星と元素の起源

4.1 太陽系外惑星の探し方

4.2 ケプラー衛星による革命

4.3 第二の地球を探す

4.4 地上の元素は宇宙でできた

4.5 星は元素の製造工場

4.6 私たちは星の子ども

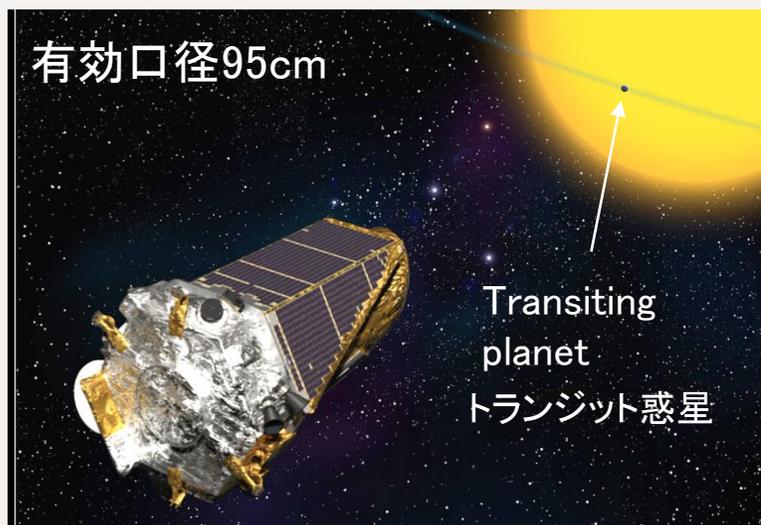
Kepler 衛星

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

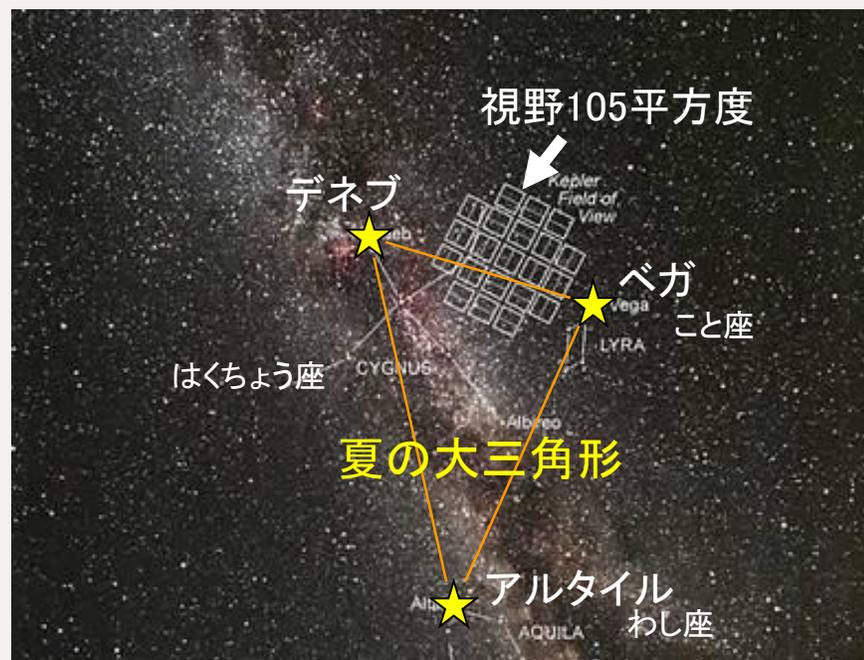
2009年3月7日 打ち上げ

2013年8月
主観測終了

ハビタブルゾーン(生命居住可能域)にある地球型惑星の探査



<https://www.nasa.gov/content/kepler-multimedia>



<https://www.nasa.gov/content/kepler-multimedia>より改変

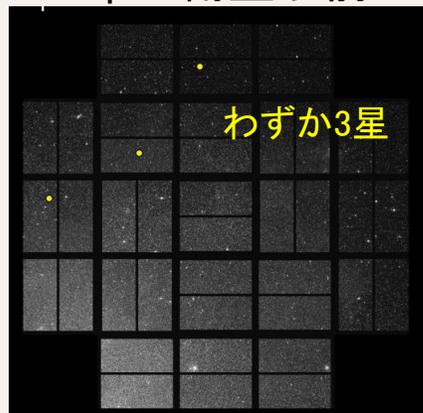
- ・10万個の恒星の明るさを3.5年以上に渡ってモニターする。
- ・1万分の1の明るさの変化を観測
 - 惑星のトランジット現象
 - 星震学(asteroseismology)

→ 中心星の質量、半径、年齢

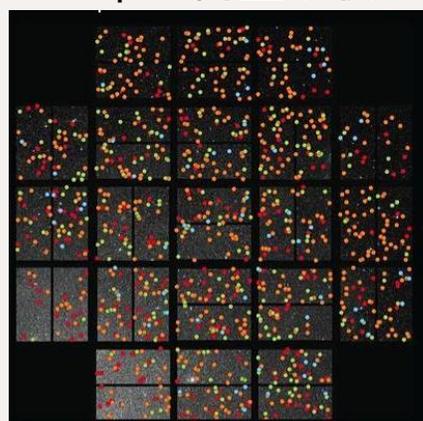
あっという間の大成果！

- ・わずか13ヶ月間の観測から1235個の候補が見つかった! ➡ その後も続々と発見
- 16ヶ月データと改良された解析から2300以上、
- その内1091個は確実な惑星 (Batalha et al. 2013, ApJS, 204, 24)

僅3星
Kepler衛星以前

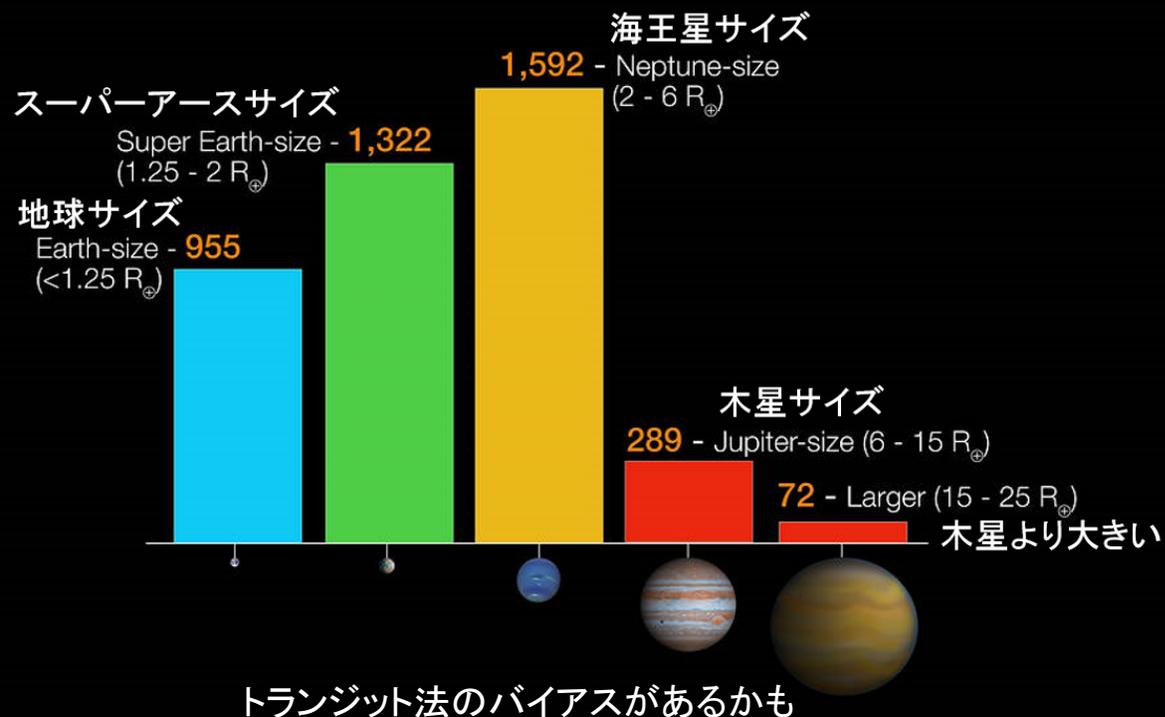


Kepler衛星以後



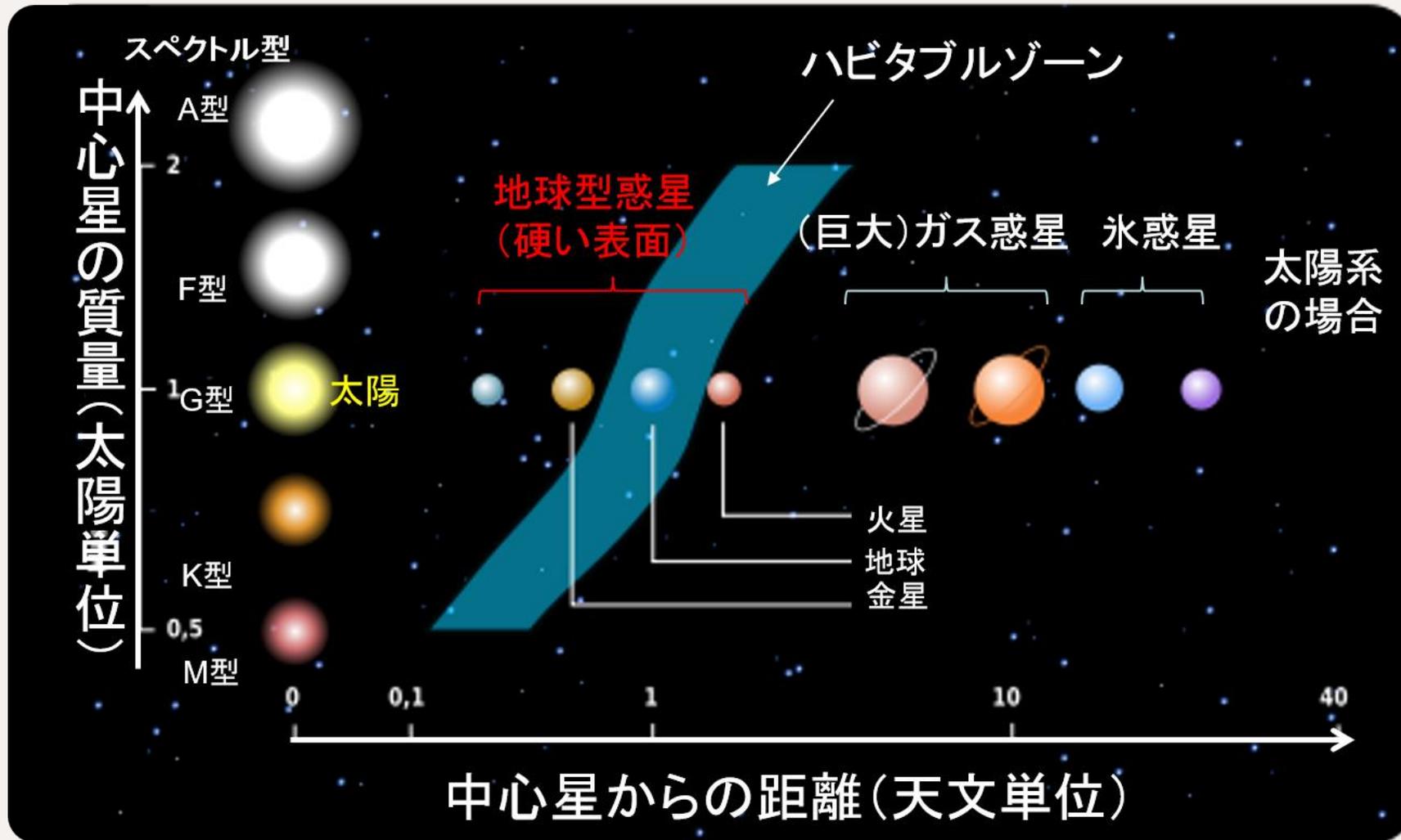
ケプラー衛星による惑星候補の大きさ

2015年7月現在



ハビタブルゾーン(生命居住可能域)

惑星の表面で液体の水が存在できる範囲



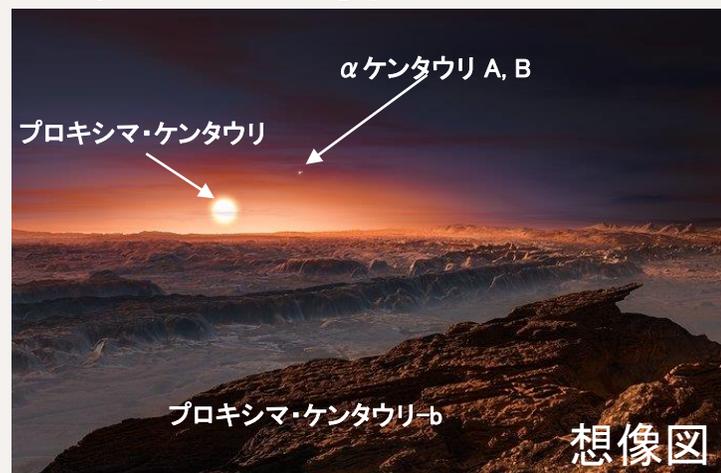
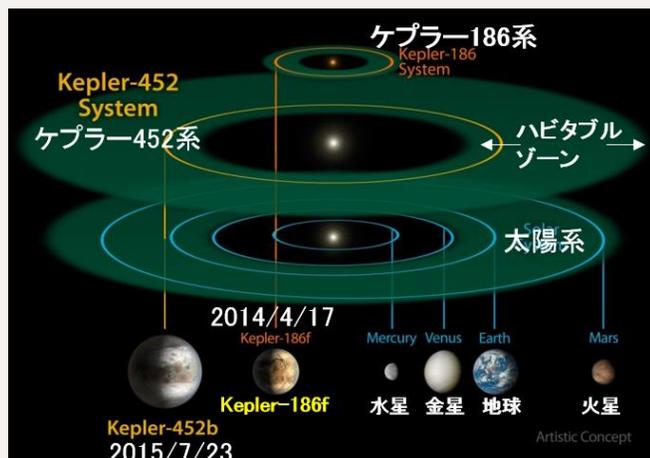
ハビタブルゾーンにある地球の「いところ」

NASAの記者発表 (2015/7/23)

<http://www.nasa.gov/press-release/nasa-kepler-mission-discovers-bigger-older-cousin-to-earth>

ヨーロッパ南天天文台 (ESO) の記者発表 (2016/8/24)

<http://www.eso.org/public/news/eso1629/>



居住に適した地球に似た系外惑星の一覧 (ウィキペディアより 2017/8/10閲覧)

順位	惑星名	主星名	主星型	ESI ^[15]	質量 (M _E)	半径 (R _E)	放射束 (F _E)	表面温度 (K)	公転周期 (日)	距離 (光年)	出典
-	地球	太陽	G2V	1.00	1.00	1.00	1.00	255	365.25	0	[16]
1	プロキシマ・ケンタウリ b	プロキシマ・ケンタウリ	M5.5Ve ^[17]	0.87	$\geq 1.27^{+0.19}_{-0.17}$	-	0.70	234	$11.186^{+0.001}_{-0.002}$	4.2	[18]
2	TRAPPIST-1e	TRAPPIST-1	M8 ^[19]	0.86	0.62 ± 0.58	0.918 ± 0.039	0.67	251.3	$6.099615 \pm 0.11 \times 10^{-4}$	39.4 ± 0.3	[20]
3	グリーゼ667Cc	グリーゼ667C	M1.5V ^[21]	0.84	$\geq 3.709 \pm 0.682$	-	0.88	247	28.143 ± 0.001	22.3 ± 1.3	[22]
3	ケプラー-442b	ケプラー-442	K	0.84	-	$1.34^{+0.11}_{-0.18}$	0.70	260	$112.3053^{+0.0024}_{-0.0028}$	1115^{+62}_{-72}	[23][24]
5	グリーゼ667cf*	グリーゼ667C	M1.5V ^[21]	0.77	$\geq 2.7^{+1.4}_{-1.2}$	-	0.56	221	$39.026^{+0.194}_{-0.211}$	22.3 ± 1.3	[25]
6	ケプラー-1229b	ケプラー-1229	M	0.73	-	$1.12^{+0.13}_{-0.22}$	$0.35^{+0.12}_{-0.14}$	213	86.829	769	[26]
7	TRAPPIST-1f	TRAPPIST-1	M8 ^[19]	0.68	0.68 ± 0.18	1.045 ± 0.038	0.38	219	$9.206690 \pm 0.15 \times 10^{-4}$	39.4 ± 0.3	[20]
8	カプタインb*	カプタイン	*印は未確認 ^[7]	0.67	$\geq 4.8^{+0.9}_{-1.0}$	-	0.43	205	$48.616^{+0.036}_{-0.032}$	12.75 ± 0.05	[28]
8	ケプラー-62f	ケプラー-62	K2V ^[29]	0.67	<35	1.41 ± 0.07	0.39	208	267.291 ± 0.005	~1200	[30]
10	ケプラー-186f	ケプラー-186	M1V ^[31]	0.61	~1.4	$1.11^{+0.14}_{-0.13}$	0.29	188	129.9459 ± 0.0012	492.3 ± 58.7	[32]
11	グリーゼ667ce*	グリーゼ667C	M1.5V ^[21]	0.60	$\geq 2.7^{+1.6}_{-1.4}$	-	0.30	189	62.24 ± 0.55	22.3 ± 1.3	[25]
12	TRAPPIST-1g	TRAPPIST-1	M8 ^[19]	0.58	1.34 ± 0.88	1.127 ± 0.041	0.26	198.6	$12.35294 \pm 0.12 \times 10^{-3}$	39.4 ± 0.3	[20]

地球類似指数

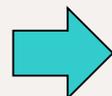
ケプラー衛星がこれまでで最多数の惑星発見を報告

NASAの記者発表 16-051 (2016/5/11)

<https://www.nasa.gov/press-release/nasas-kepler-mission-announces-largest-collection-of-planets-ever-discovered>

ケプラー衛星の
2015年のカタログ

4,302 個の惑星候補



550 個は地球のような岩石惑星
の可能性がある

9個はハビタブルゾーンにある



統計的な解析



既知のもの
と合わせて

1,284 (>99% 確実)

1,327 (多分惑星)

707 (多分違う)

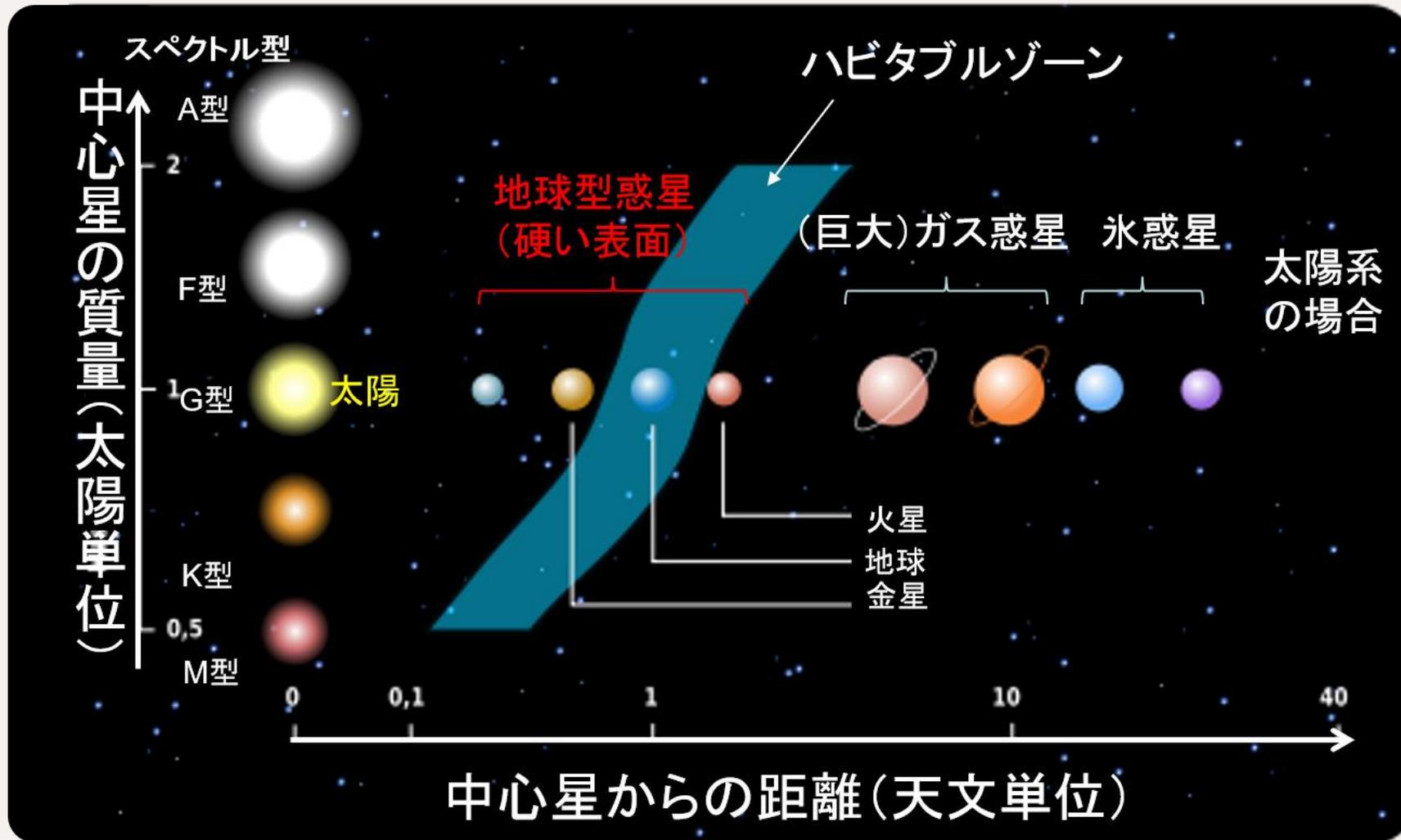
984 (他でも確認済)

21 個の惑星がハビ
タブルゾーンにある

←ハビタブルゾーン→

ハビタブルゾーン(生命居住可能域)

惑星の表面で液体の水が存在できる範囲



ハビタブルゾーン(生命居住可能域)

ケプラー衛星が発見したハビタブルゾーンにある岩石惑星

スペクトル型

2016/5/11
NASA PR

2016年5月11日現在

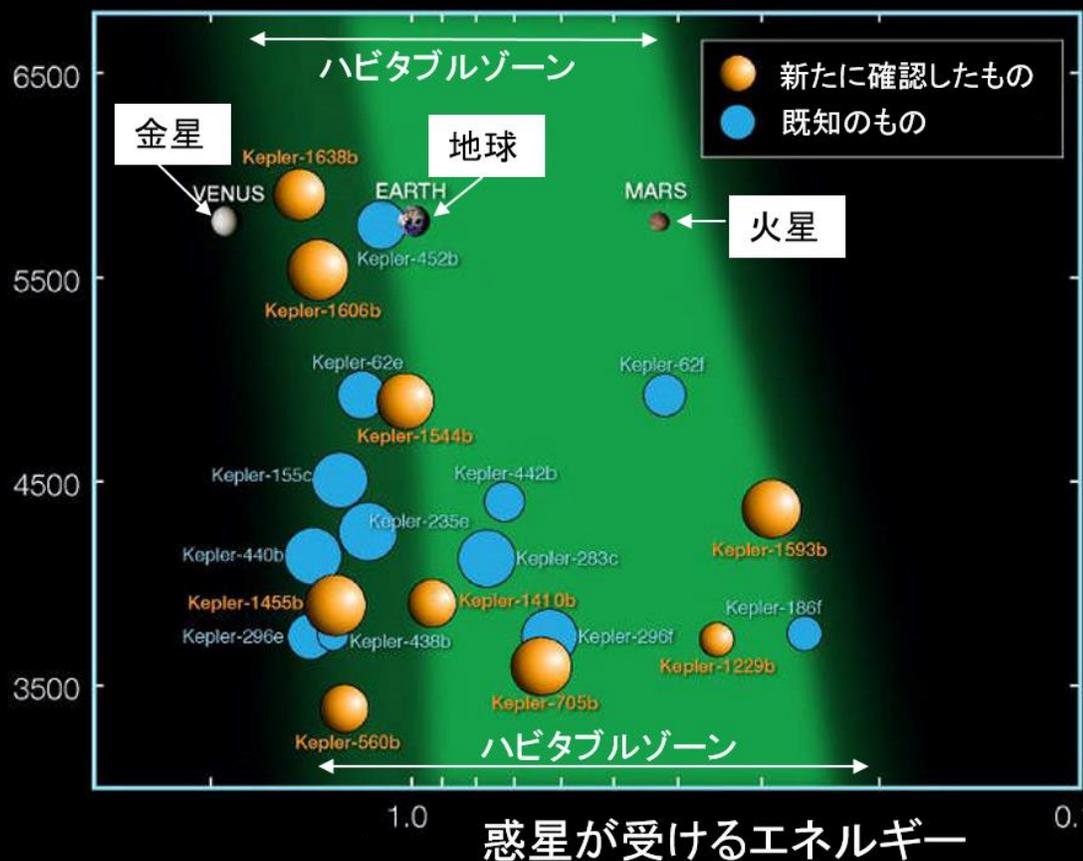
F型

太陽
G型

K型

M型

中心星の表面温度



第4週の第2回はここまでです。

第4週：太陽系外惑星と元素の起源

4.1 太陽系外惑星の探し方

4.2 ケプラー衛星による革命

4.3 第二の地球を探す

4.4 地上の元素は宇宙でできた

4.5 星は元素の製造工場

4.6 私たちは星の子ども

7個の地球サイズの惑星系を発見

NASA 記者発表 (2017年2月23日)

<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-telescope-reveals-largest-batch-of-earth-size-habitable-zone-planets-around>

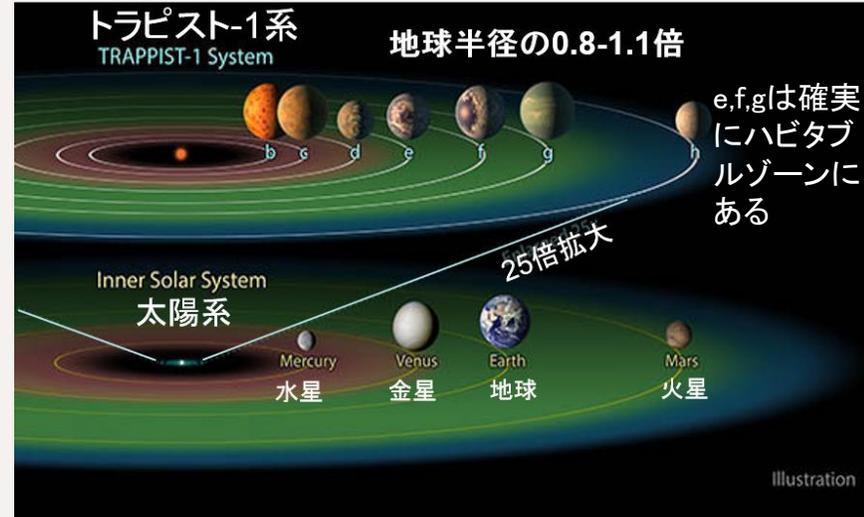
TRAPPIST+VLT+Spitzer+HSTなど多数の望遠鏡



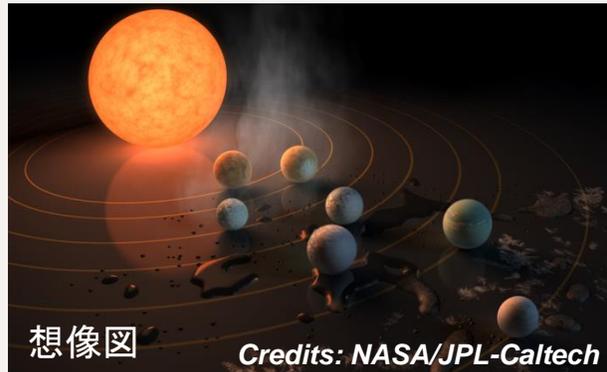
Transiting Planets and Planetesimals Small Telescope (TRAPPIST) リエージュ大学がチリで運用する 60cm ロボット望遠鏡

<https://en.wikipedia.org> より

TRAPPIST-1 (トラピスト-1)
みずがめ座 距離約**40光年**
スペクトル型 M8
表面温度 約2500度(K)
直径:太陽の0.117倍(木星の1.1倍)



<https://www.thestar.com/news/world/2017/02/22/what-to-know-about-the-newly-discovered-trappist-1-solar-system.html>



想像図

Credits: NASA/JPL-Caltech

近距離にあるので今後の詳細な追究観測に期待



TRAPPIST-1f 表面の想像図

Credits: NASA/JPL-Caltech

今後の追究観測

水(海洋)、大陸、植物、生命の指標 を探す
(**バイオシグナチャー**)

(1) 惑星の(反射光の)スペクトルを直接観測する。

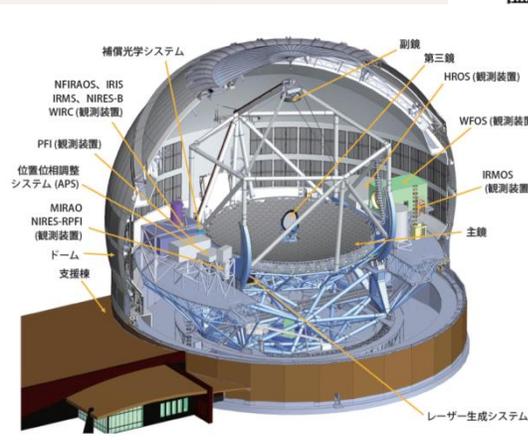
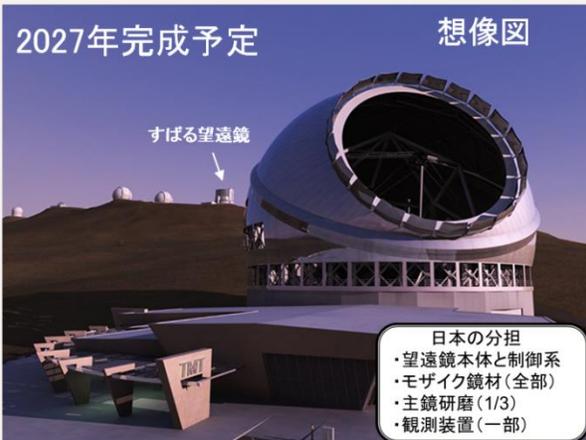
惑星は暗いので、既存の望遠鏡ではきわめて難しい。



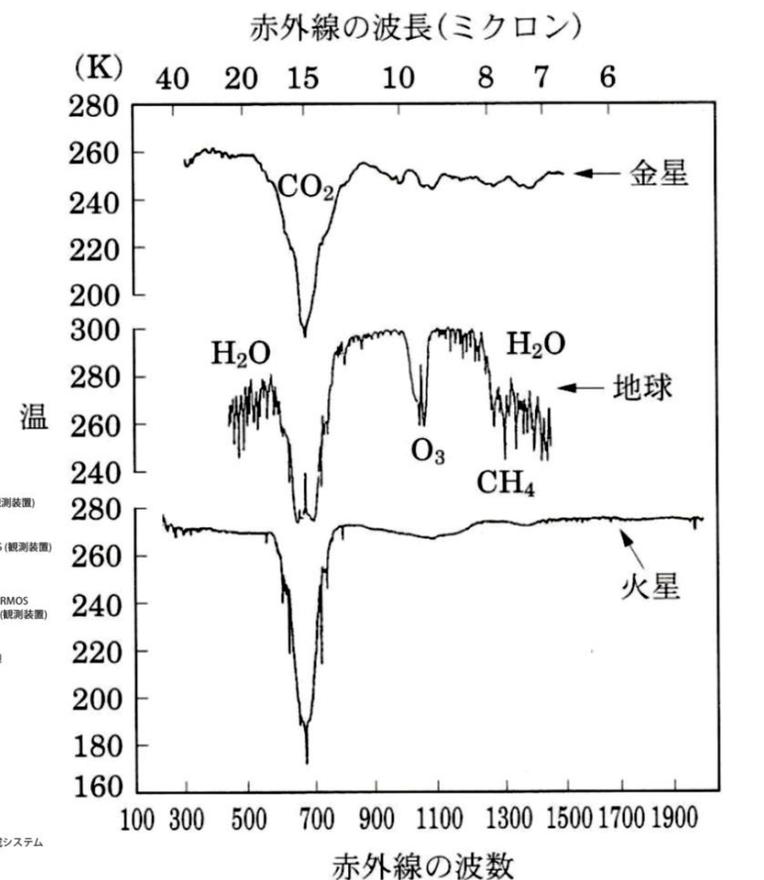
次世代大望遠鏡の重要な研究テーマ

TMT (Thirty Meter Telescope)

日本、アメリカ、カナダ、中国などの国際協力で、マウナケア山頂に口径30mの望遠鏡を設置



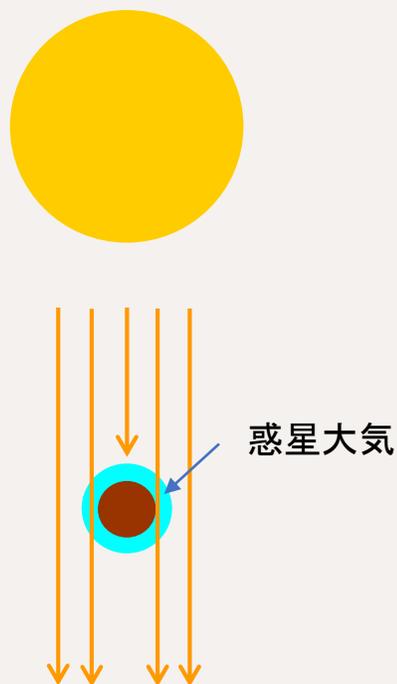
- 日本の分担
- ・望遠鏡本体と制御系
 - ・モザイク鏡材(全部)
 - ・主鏡研磨(1/3)
 - ・観測装置(一部)



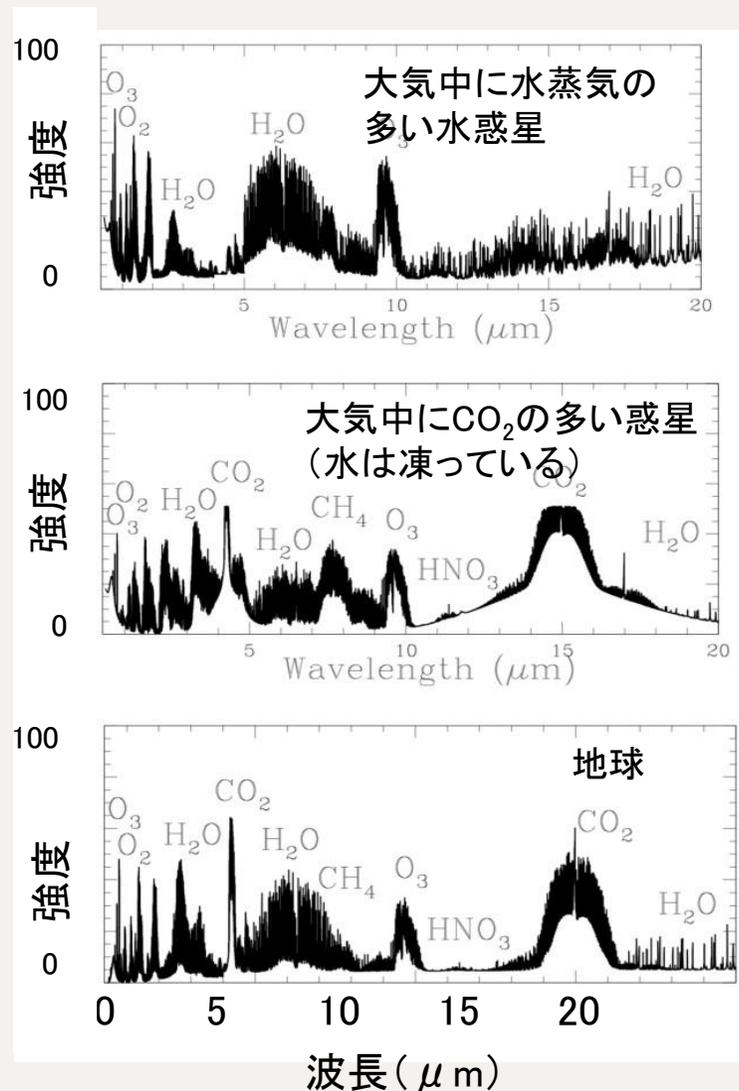
水(海洋)、大陸、植物、生命の指標を探す

(バイオシグナチャー)

(2) トランジット中のスペクトルを調べる



トランジット中の主星のスペクトルは惑星大気の情報を含んでいる。



第二の地球はどれくらいある？

ドレイクの式(1961)

$$N = R_* \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_l \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

N : 銀河系において地球との交信が可能な文明の数

R_* : 銀河系における年平均恒星形成数*11

f_p : その中で惑星を持つ恒星の割合

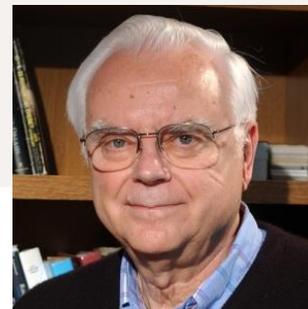
n_e : 惑星を持つ恒星の各々において、生命を宿し得る惑星の平均数

f_l : それら生命を宿し得る惑星の各々が、実際に生命を宿す割合

f_i : それら生命を宿した惑星の各々が、実際に知的生命を生み出す割合

f_c : それら知的生命の文明が、宇宙においてその存在を検出可能な電波通信信号を放つ技術を獲得する確率

L : そのような文明が宇宙に検出可能な信号を出し続ける時間.



フランク・ドレイク(1930 -)
<https://www.seti.org/happy-birthday-to-frank-drake>

↑
 高等文明

↑
 高等文明の寿命

$N = 0.03 - 1,000,000 !!$
 (人によってさまざま)

第二の地球はどれくらいある？

生命居住可能な地球型惑星のための条件

井田 茂著「異形の惑星」(NHKブックス) 2003

恒星/惑星	条件番号	生命居住可能な地球型惑星のための条件	確率
恒星の条件	条件 1	恒星質量が太陽の0.3~3倍	$S1=0.3\sim0.5$
	条件 2	恒星進化段階が主系列であること	$S2=0.5\sim0.8$
	条件 3	単一星、もしくは連星間隔が10天文単位以上か0.1天文単位以下	$S3=0.3\sim0.6$
	条件 4	重元素比が適切であること	$S4=0.2\sim0.5$
	合計	$S1 \times S2 \times S3 \times S4$	$S=0.01\sim0.1$

惑星の条件

(すべて独立条件のとき)	条件 1	ハビタブル・ゾーンに地球型惑星が入ること	$P1=0.01$
	条件 2	大気・海を保持できること(惑星質量が地球質量の0.3~3倍)	$P2=0.1$
	条件 3	高温から低温の海に変化すること(プレートテクトニクスがあること)	$P3=0.001$
	条件 4	強い磁場があること	$P4=0.1$
	条件 5	自転軸が安定していること	$P5=0.1$
	条件 6	巨大ガス惑星が外側にあること	$P6=0.1$
	合計	$P1 \times P2 \times P3 \times P4 \times P5 \times P6$	$P=10$ 億分の1
(従属条件を考慮に入れるとき)	条件 1 2 3 4 6	原始惑星系円盤の質量が太陽質量の100分の1~30分の1程度	$P'1=0.2\sim0.3$
	条件 5	上記のような円盤から生まれた惑星で自転軸が安定していること	$P'2=0.1\sim0.3$
	合計	$P'1 \times P'2$	$P'=0.02\sim0.1$

恒星の条件+惑星の条件

(惑星条件：独立を仮定)	$S \times P$	100億分の1 ~ 1000億分の1
(惑星条件：従属性を考慮)	$S \times P'$	0.0002~0.01

表5 地球型惑星の条件と確率：生命居住可能な地球型惑星が存在するための恒星と惑星の条件と確率。惑星条件は独立・従属性を考慮すると大きく変わる。

$(0.0002-0.01) \times (\text{銀河系の恒星数: } 1000\text{億})$

2000万から10億個！

第4週の第3回はこれで終わります。

第4週：太陽系外惑星と元素の起源

4.1 太陽系外惑星の探し方

4.2 ケプラー衛星による革命

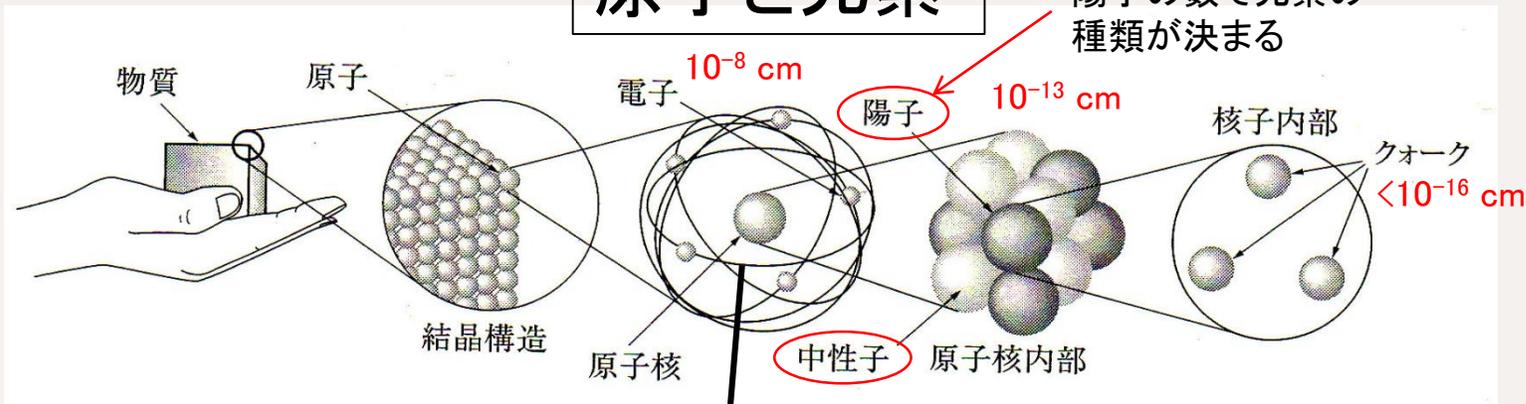
4.3 第二の地球を探す

4.4 地上の元素は宇宙でできた

4.5 星は元素の製造工場

4.6 私たちは星の子ども

原子と元素



陽子の数で元素の種類が決まる

須藤 靖著「ものの大きさ」(東大出版会)より転載

元素の周期表

地球上で天然に存在する元素: 84種類

安定な元素: 81種類

放射性元素: 3種類

(トリウム、ウラン、プロトアクチニウム)

これらの元素はいつどこでできたのか?

113番元素

2015/12/31

(日本で作製・発見)

名前: ニホニウム(Nh)

2016/11 決定

4-4.地上の元素は宇宙でできた



ヒトに必須な常量の元素



ヒトに必須な微量の元素

岡村ほか編著「人類の住む宇宙」
2版（日本評論社）より



錬金術で金はできたか？



ブリュエゲルの銅版画 「錬金術師」

<https://www.wikiart.org/en/pieter-bruegel-the-elder/the-chemist>

錬金術で金はできたか？



錬金術で金は作れなかった。
(しかし、錬金術は現代の化学のルーツ)



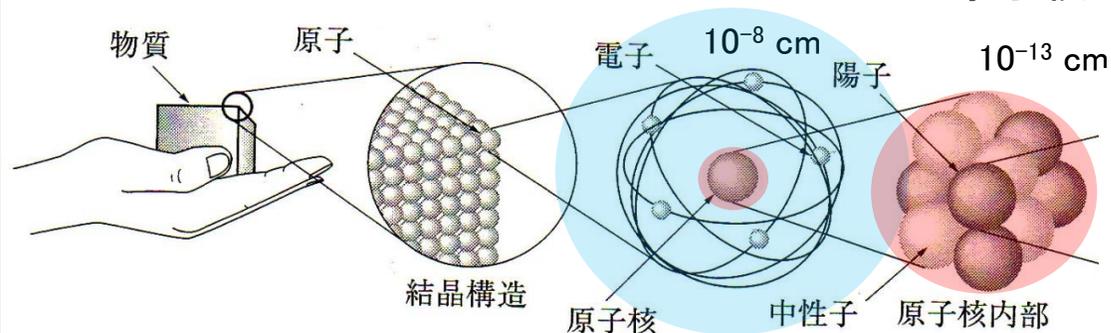
ブリューゲルの銅版画 「錬金術師」

<https://www.wikiart.org/en/pieter-bruegel-the-elder/the-chemist>

化学反応と原子核反応

須藤 靖著「ものの大きさ」(東大出版会)より転載

原子 4km ↔ 4cm 原子核

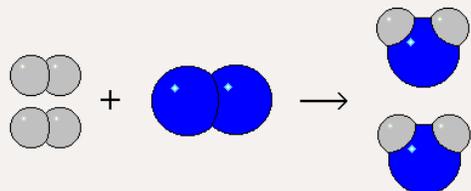
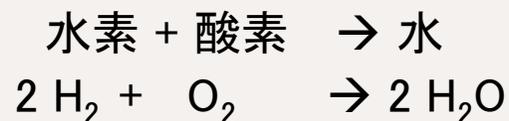


化学反応と原子核反応では
エネルギーが100万倍違う



地上の元素は宇宙でできた

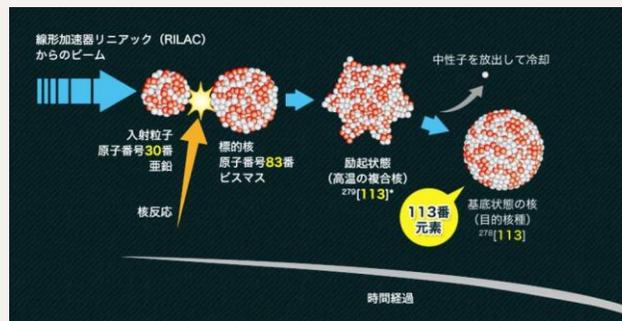
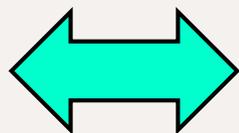
化学反応



原子(原子核)は変化していない

http://www9.big.or.jp/~akkun/kyouzai/matermas_jits/rct_form.htm

原子核反応



原子核の構造を変える必要がある

<http://www.nishina.riken.jp/113/approach.html>

第4週の第4回はここまです。

第4週：太陽系外惑星と元素の起源

4.1 太陽系外惑星の探し方

4.2 ケプラー衛星による革命

4.3 第二の地球を探す

4.4 地上の元素は宇宙でできた

4.5 星は元素の製造工場

4.6 私たちは星の子ども

(第2週の復習)

ビッグバン宇宙論(1946-48)

「ビッグバン」という言葉は、フレッド・ホイルがBBCのラジオ番組でガモフの理論を揶揄して言った言葉。ガモフはそれを気に入って、自ら使い始めた。

1. 宇宙は熱い火の玉(ビッグバン)から始まった ← 熱い**黒体放射**が宇宙を満たしていた
2. ビッグバンの高温高密度下でさまざまな元素が出来た ← 後にこれは間違いとわかる (アルファ、ベータ、ガモフ: $\alpha\beta\gamma$ 理論)



周期	1族																	18
1	1 H	2														10 Ne		
2	3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
6	55 Cs	56 Ba	57~71 ランタノイド	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
7	87 Fr	88 Ra	89~103 アクチノイド	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og

57~71 ランタノイド	57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
89~103 アクチノイド	89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 Ho	103 Lr

ガモフ(George Gamow, 1904 - 1968)

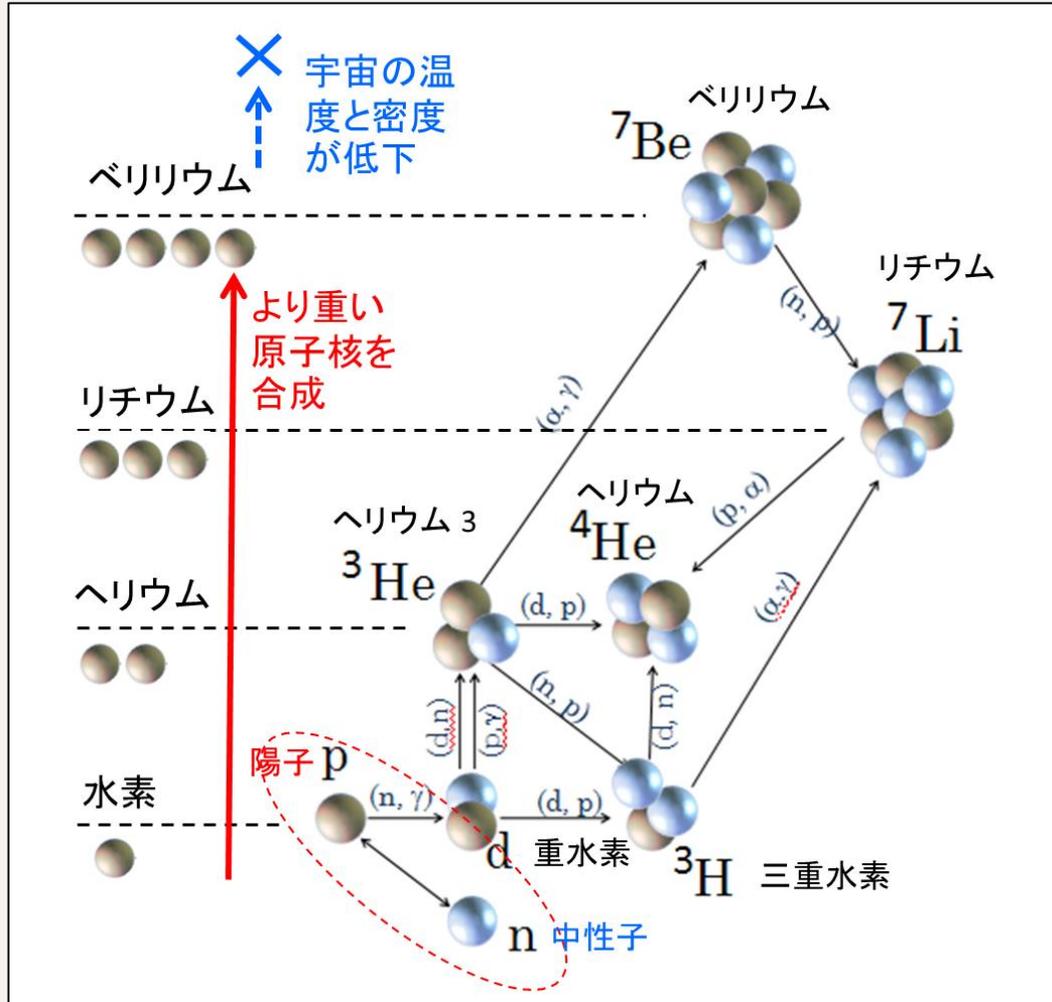
<http://www.nndb.com/people/349/000099052/>

シリーズ現代の天文学第1巻

「人類の住む宇宙」 日本評論社 2版より

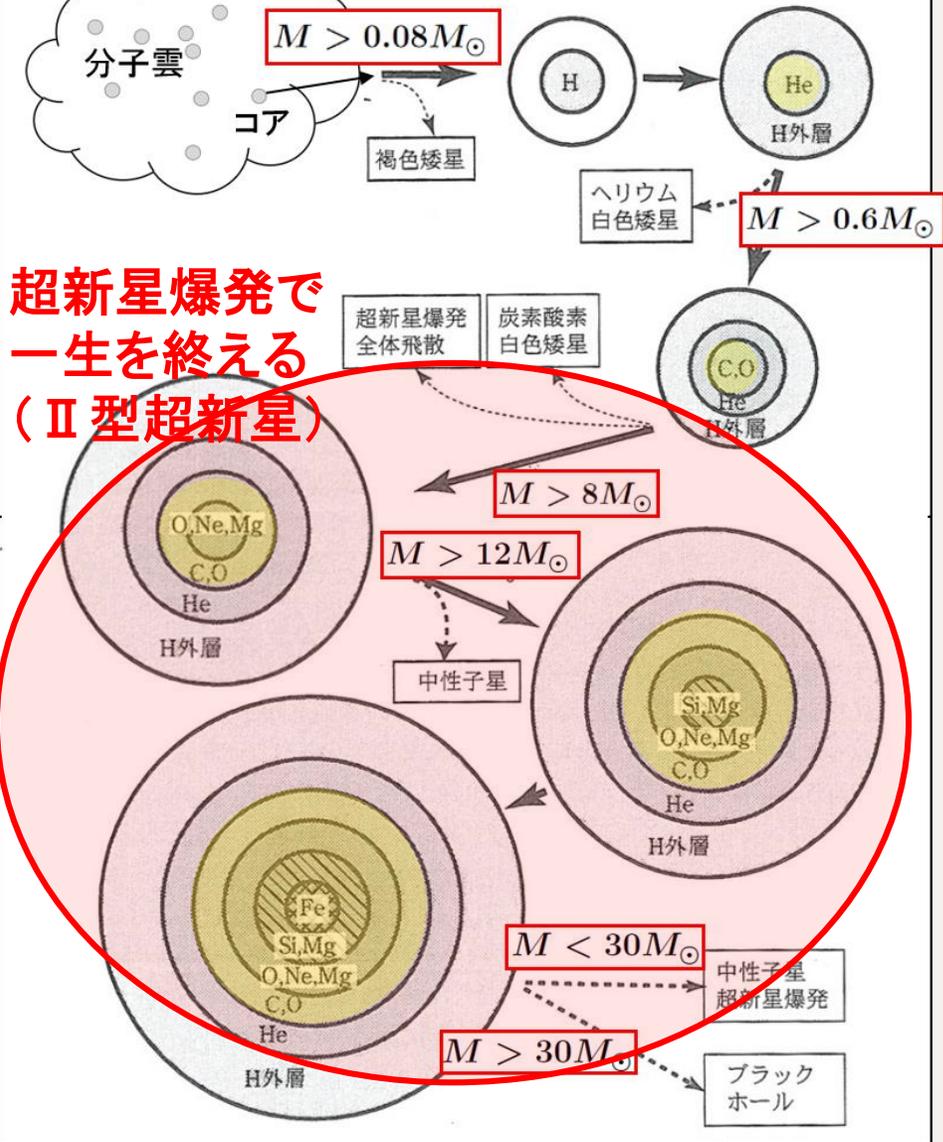
ビッグバン最初の3分間 (第2週の復習)

H, He, Li, Be (軽元素)しかできなかった



<http://astrog.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php/> 標準・非標準ビッグバンモデルにある図を改変

星の一生



超新星爆発で
一生を終える
(II型超新星)

重い元素はどこでできたか？



(ハッブル宇宙望遠鏡) (アングロオーストラリア天文台 David Malin撮影)

$M > 8M_{\odot}$ の星は超新星爆発(II型)で一生を終える。爆発時に鉄より重い元素もできる。

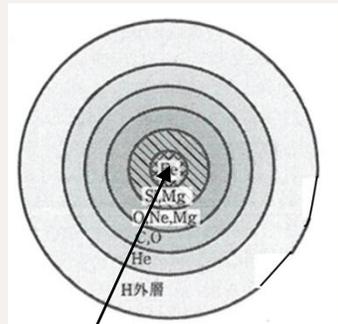
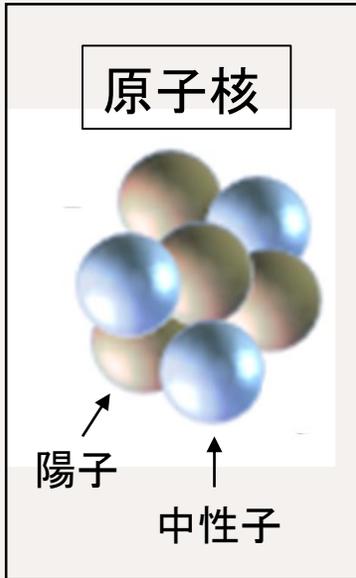
爆発によって重元素が星間空間にまき散らされる。



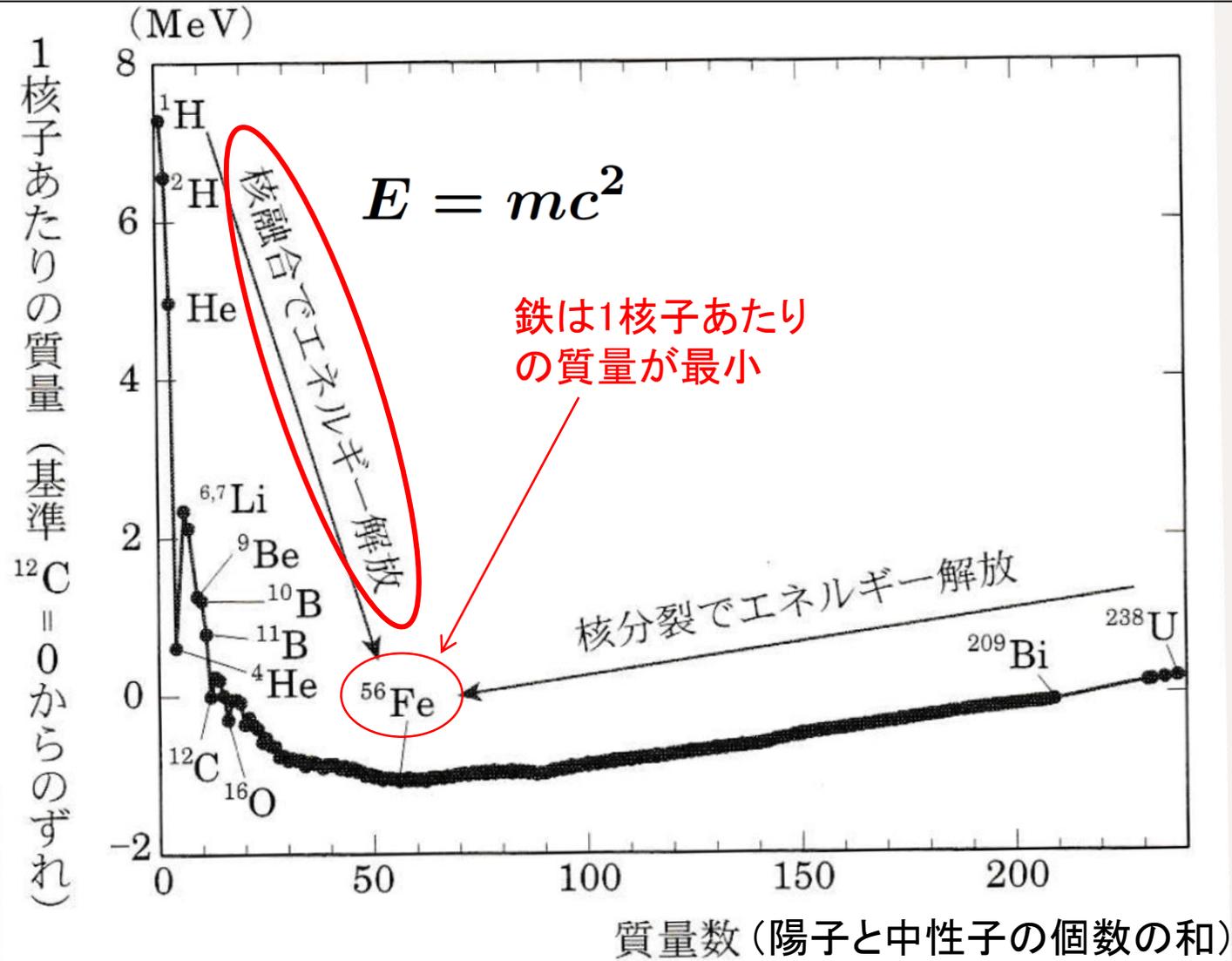
宇宙にある重元素は星の内部と超新星爆発(など)でできた

星は元素の製造工場

なぜ星の中心核では鉄までしか合成されないのか



鉄のコアができるともうエネルギーは出せない



第4週の第5回はここまでです。

第4週：太陽系外惑星と元素の起源

4.1 太陽系外惑星の探し方

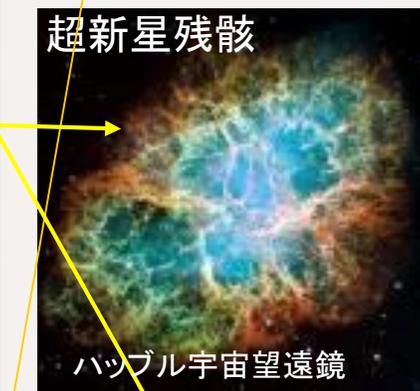
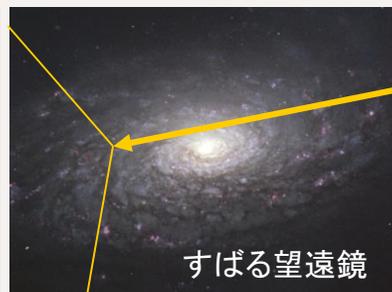
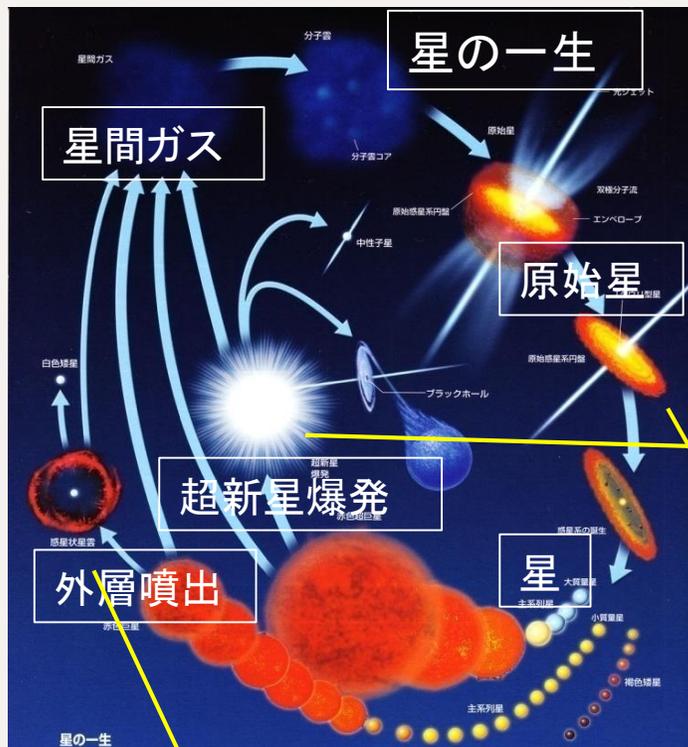
4.2 ケプラー衛星による革命

4.3 第二の地球を探す

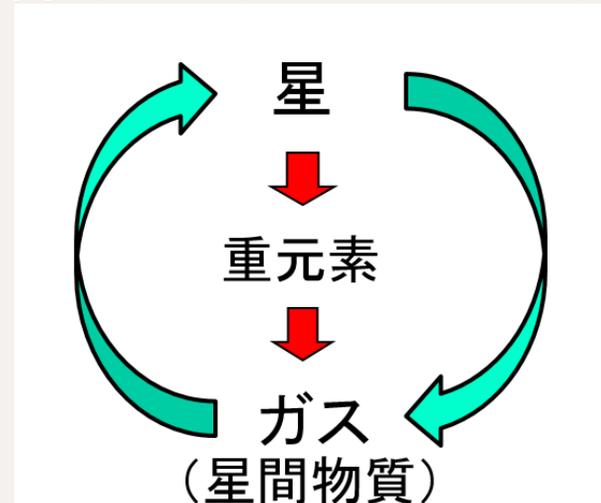
4.4 地上の元素は宇宙でできた

4.5 星は元素の製造工場

4.6 私たちは星の子ども



銀河の中では「星の誕生と死」の物語が繰り返られている。



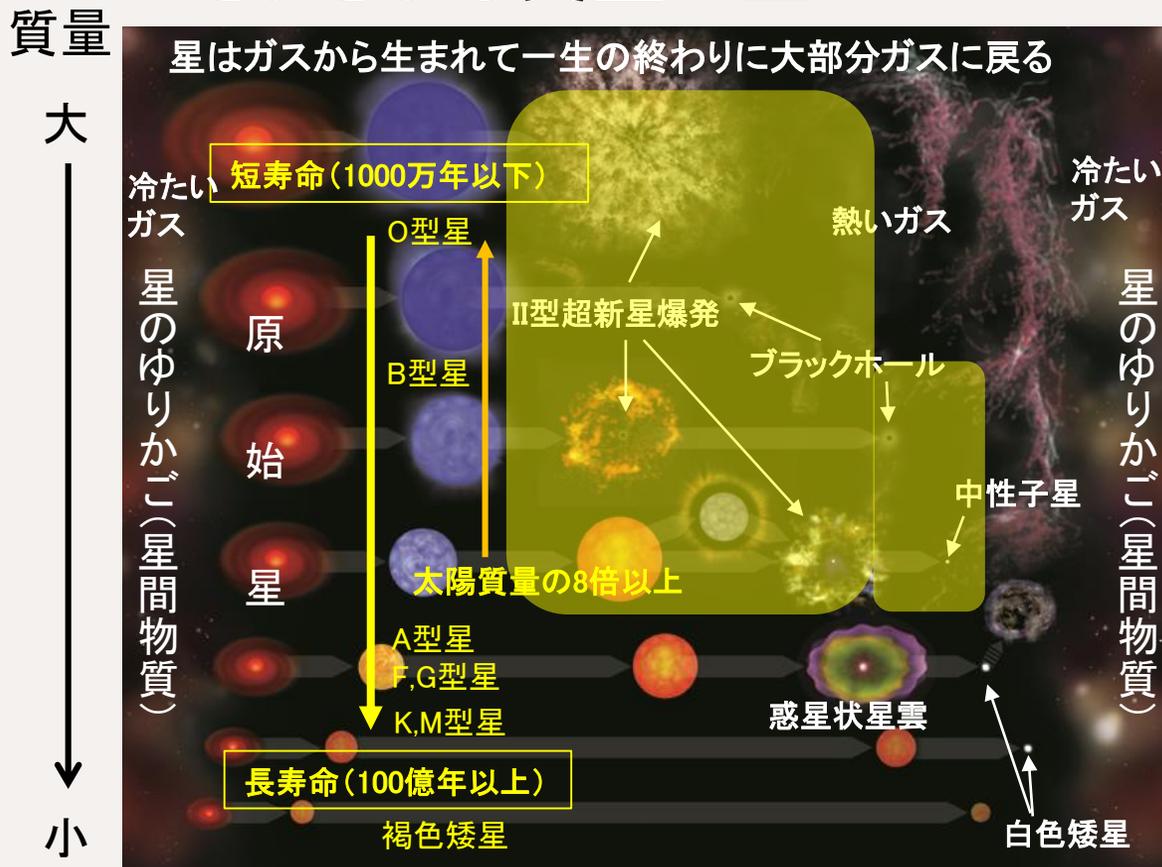
星はガスから生まれて一生の終わりに大部分ガスに戻る。

ガス中の重元素は増加

↑
銀河の化学進化



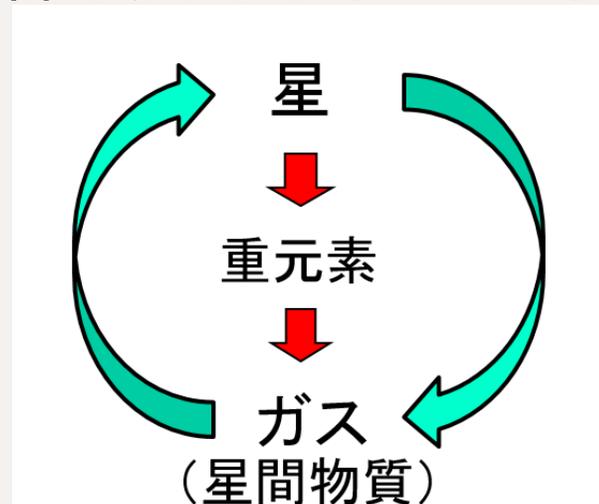
さまざまな質量の星の一生



http://chandra.si.edu/resources/illustrations/stellar_evolution.html の図を改変

(Illustration: NASA/CXC/M.Weiss)

銀河の中では「星の誕生と死」の物語が繰り返り広げられている。

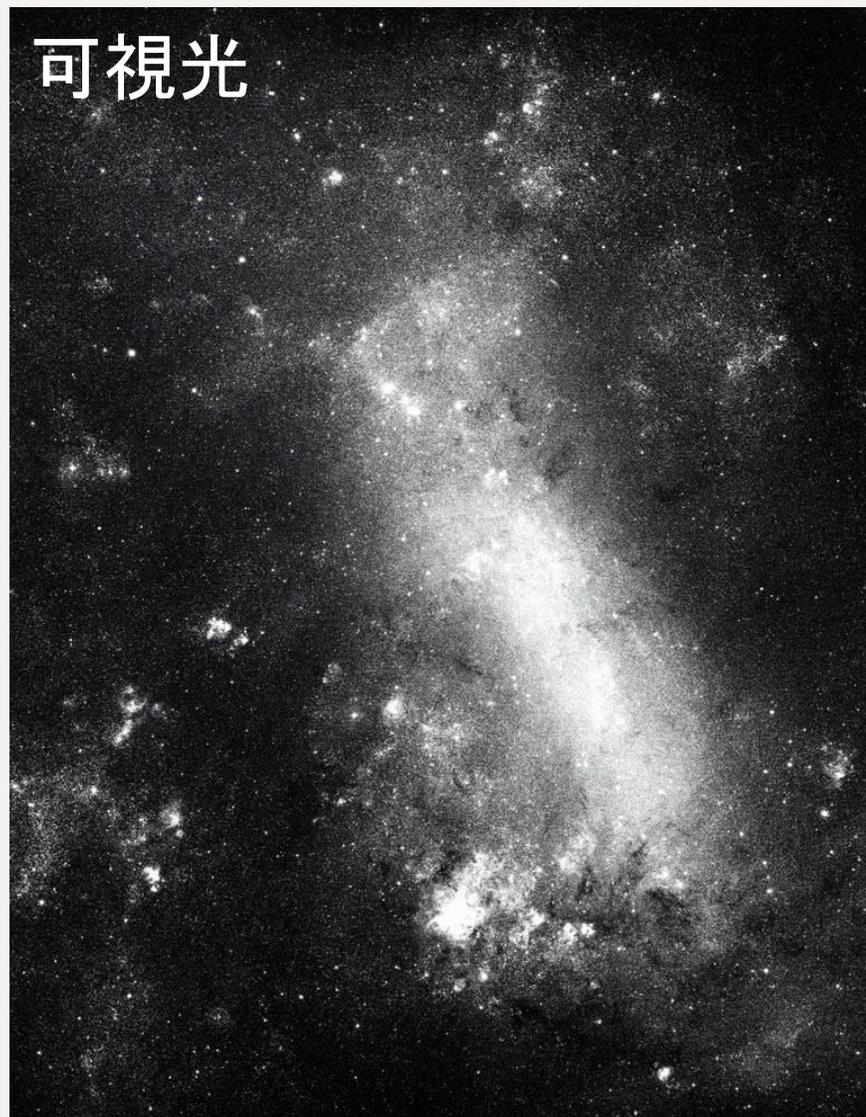


星はガスから生まれて一生の終わりに大部分ガスに戻る。

ガス中の重元素は増加

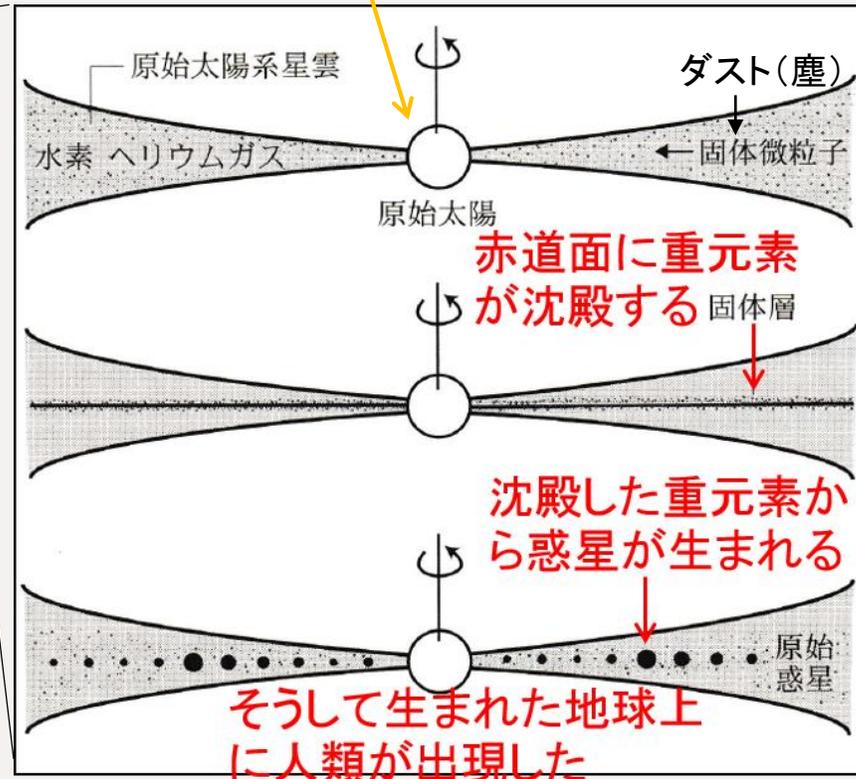
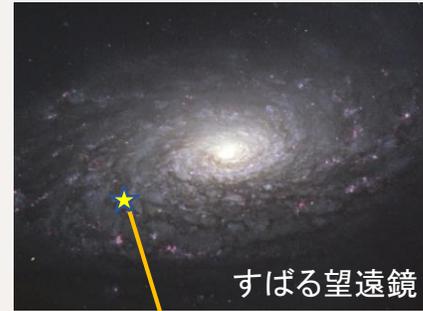
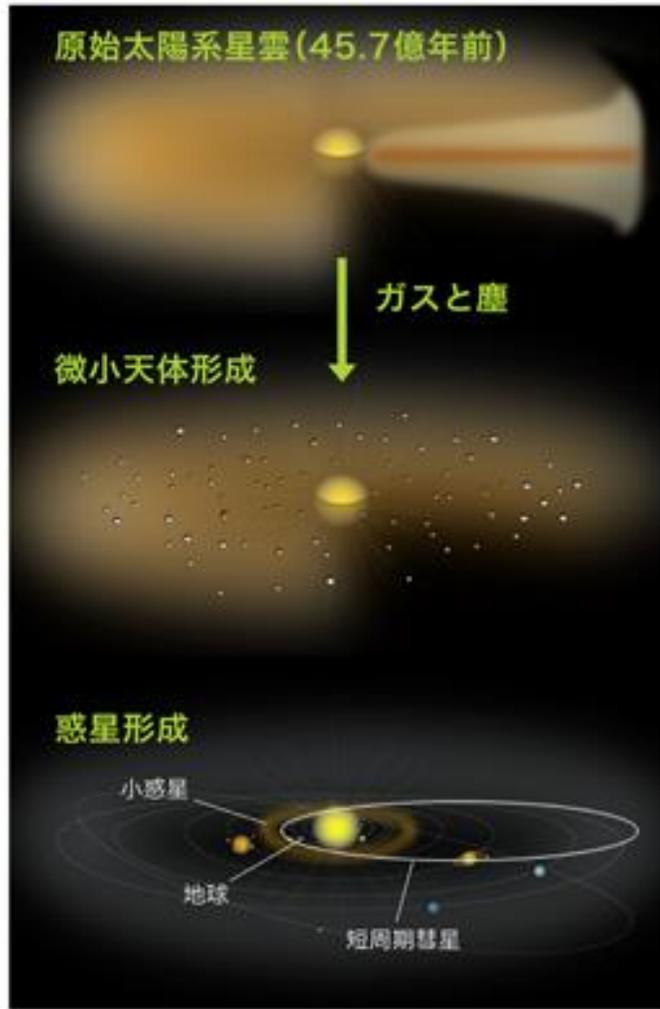
↑
銀河の化学進化

大マゼラン雲



UKシュミット望遠鏡で撮影

太陽系の誕生



東北大学大学院理学研究科地学専攻「初期太陽系進化学グループ」ホームページより

4-6. 私たちは星の子ども

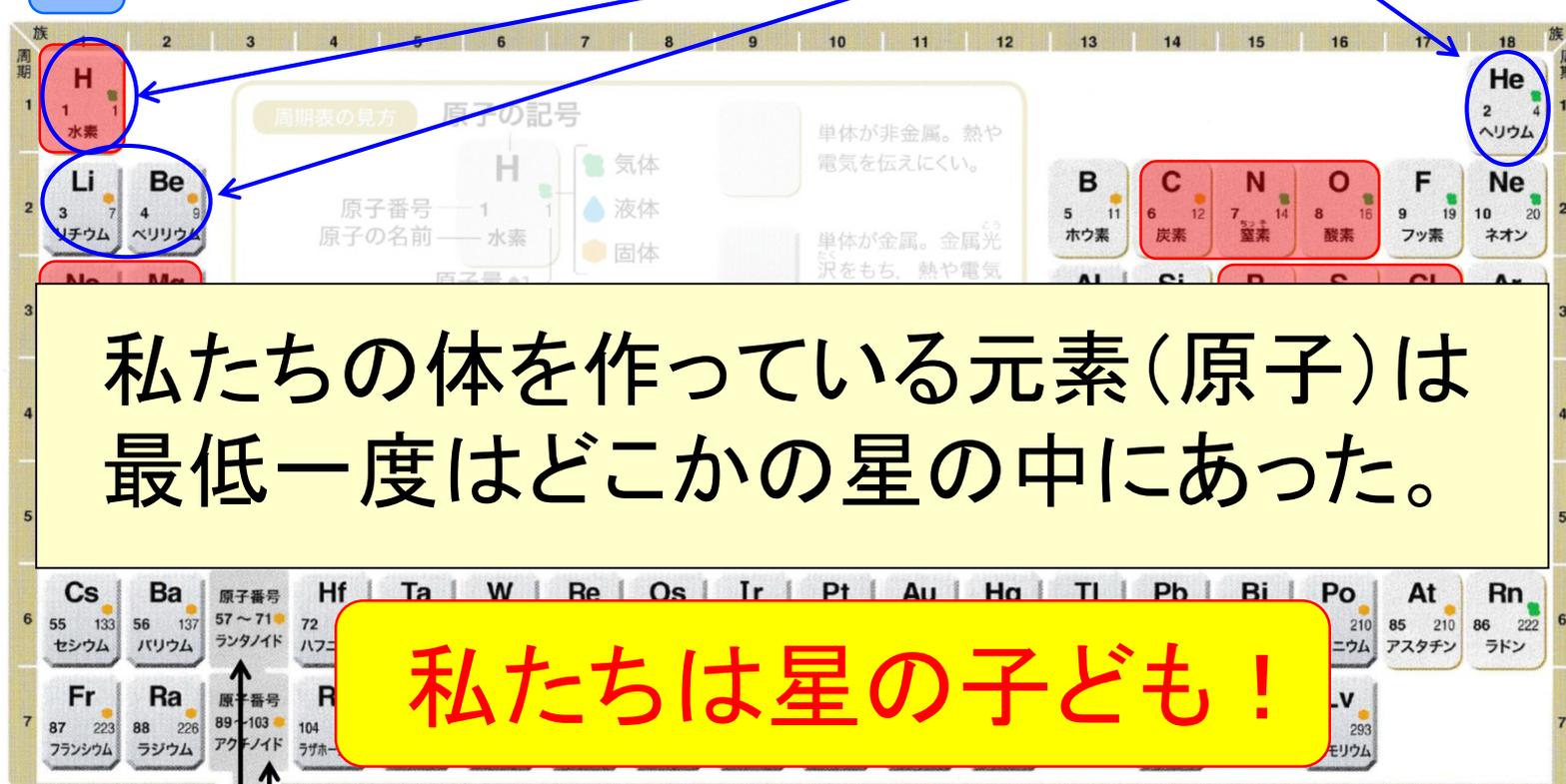


ヒトに必須な常量の元素



ヒトに必須な微量の元素

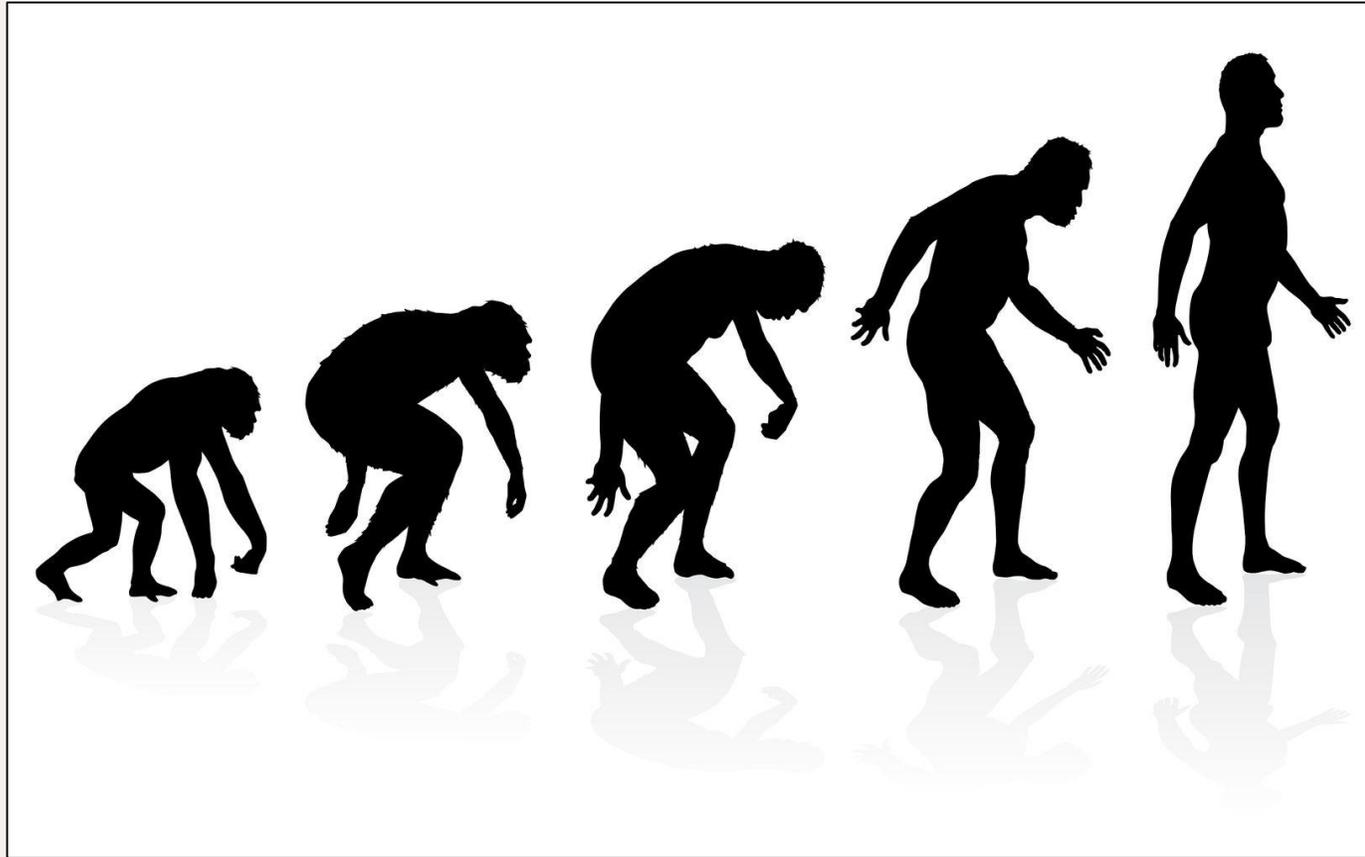
ビッグバン時にできた元素



ウラン

人類の究極のルーツは宇宙にある。

今から数百万年前に、太陽系の第3惑星「地球」に生まれた人類は、その**知的好奇心**によって、**自らのルーツは宇宙にある**ことを理解するに至ったのです。



https://jp.123rf.com/profile_jorgenmac

jorgenmac / 123RF 写真素材

以上で

観測的宇宙論入門
—宇宙はどこまでわかったか—

の講義を終わります。

聴講ありがとうございました。