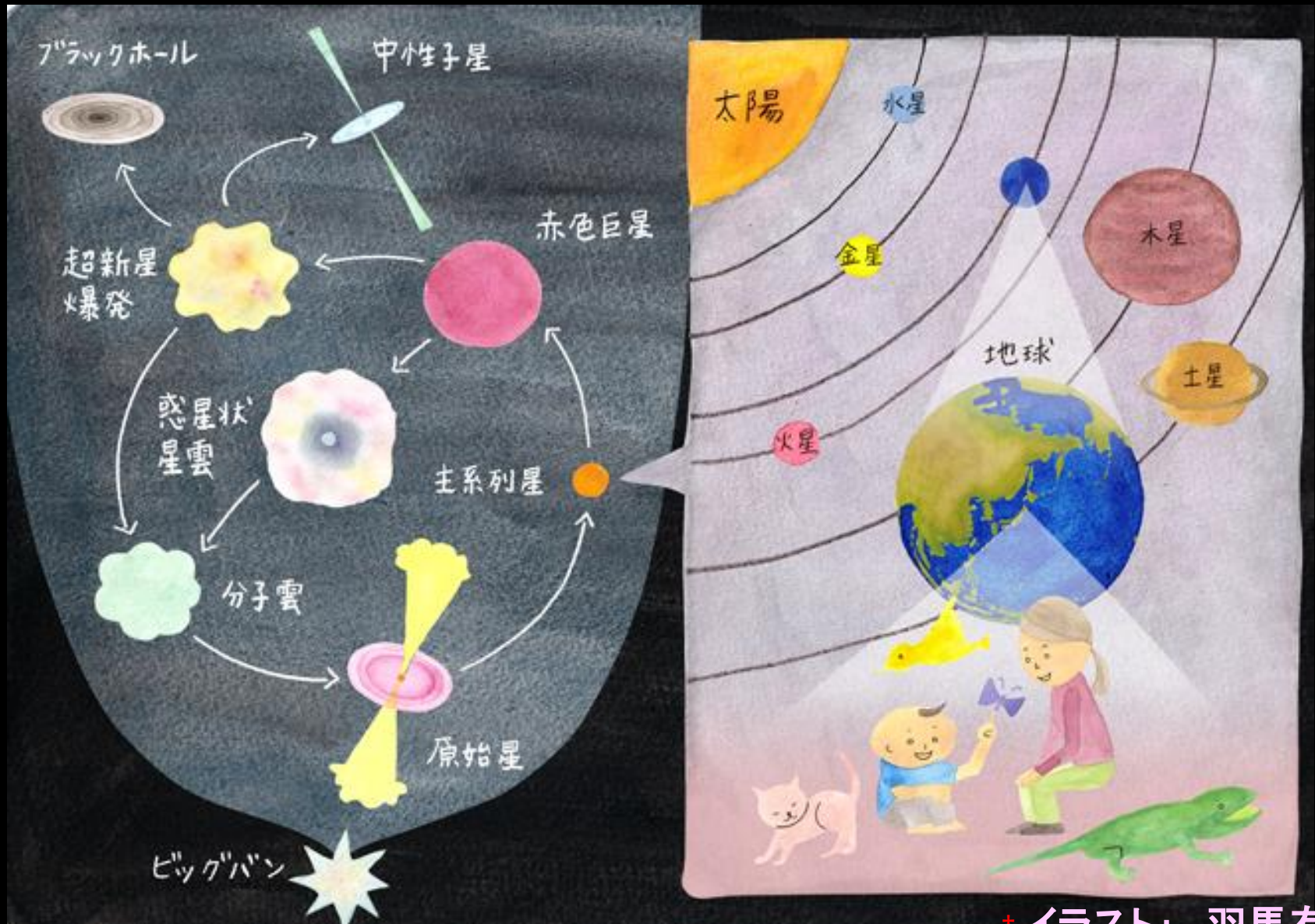


目次

- 10/14** ① 物理屋の世界観
- ② 我々は何も知らなかった
- 10/21** ③ 宇宙の組成と物質の起源
- ④ 太陽系外惑星の世界
- 10/28** ⑤ 宇宙における偶然と必然
- ⑥ 科学は世界をどこまで記述できるか

「※:このマークが付してある著作物は、第三者が有する著作物ですので、同著作物の再使用、同著作物の二次的著作物の創作等については、著作権者より直接使用許諾を得る必要があります。」

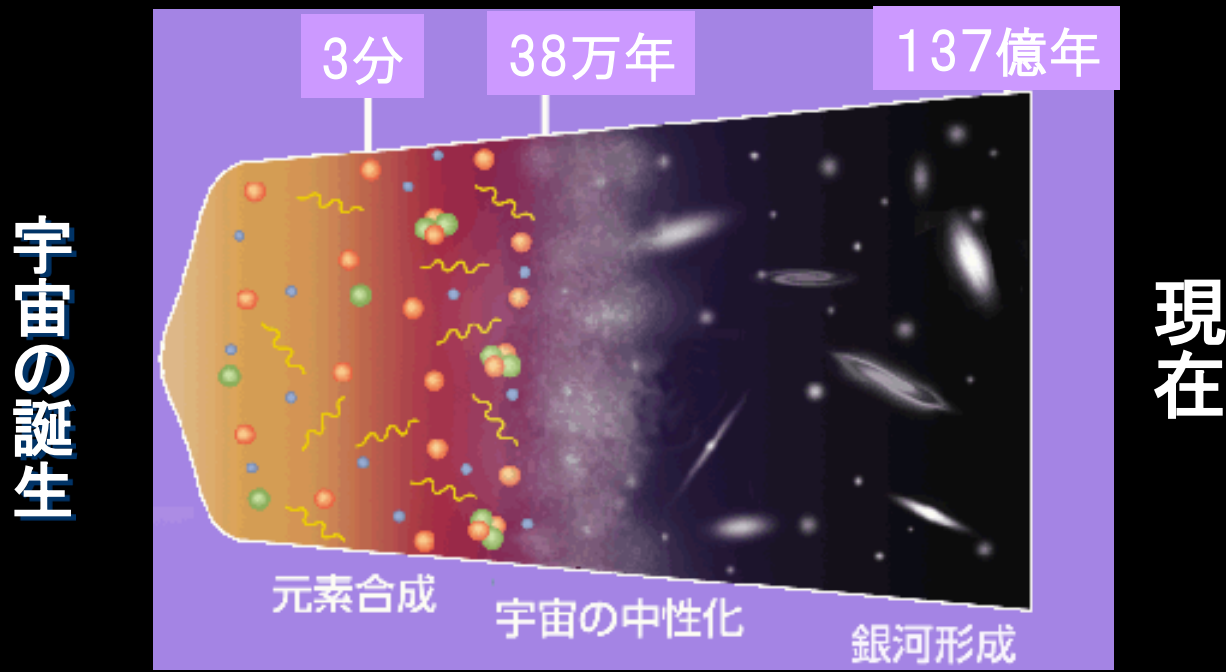
③ 宇宙の組成と物質の起源



✦ イラスト： 羽馬有紗

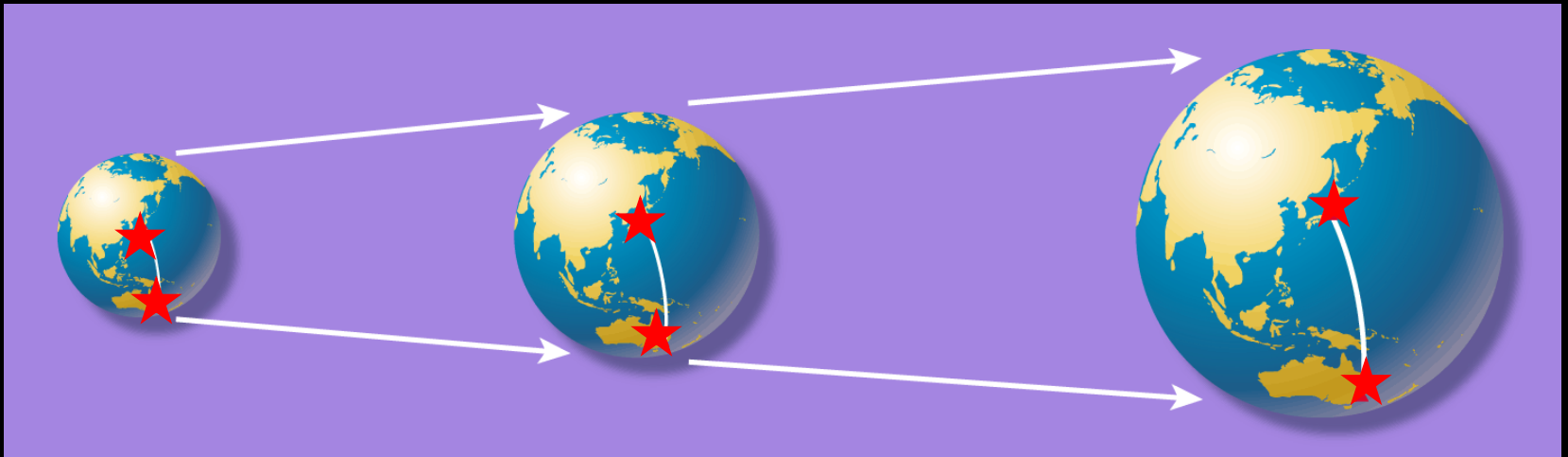
ビッグバン宇宙論： 宇宙膨張と物質世界の進化

- 宇宙膨張によって密度と温度が下がる
 - 光が支配する宇宙から物質が支配する宇宙へ
- $t \doteq 3$ 分：軽元素(ヘリウム)合成
- $t \doteq 38$ 万年：電離した宇宙が中性化（陽子+電子 から 水素原子）
- $t \doteq 4$ 億年：第一世代天体の誕生
- $t \doteq 10$ 億年 ~ 137億年：星形成(重元素合成)、銀河・銀河団形成



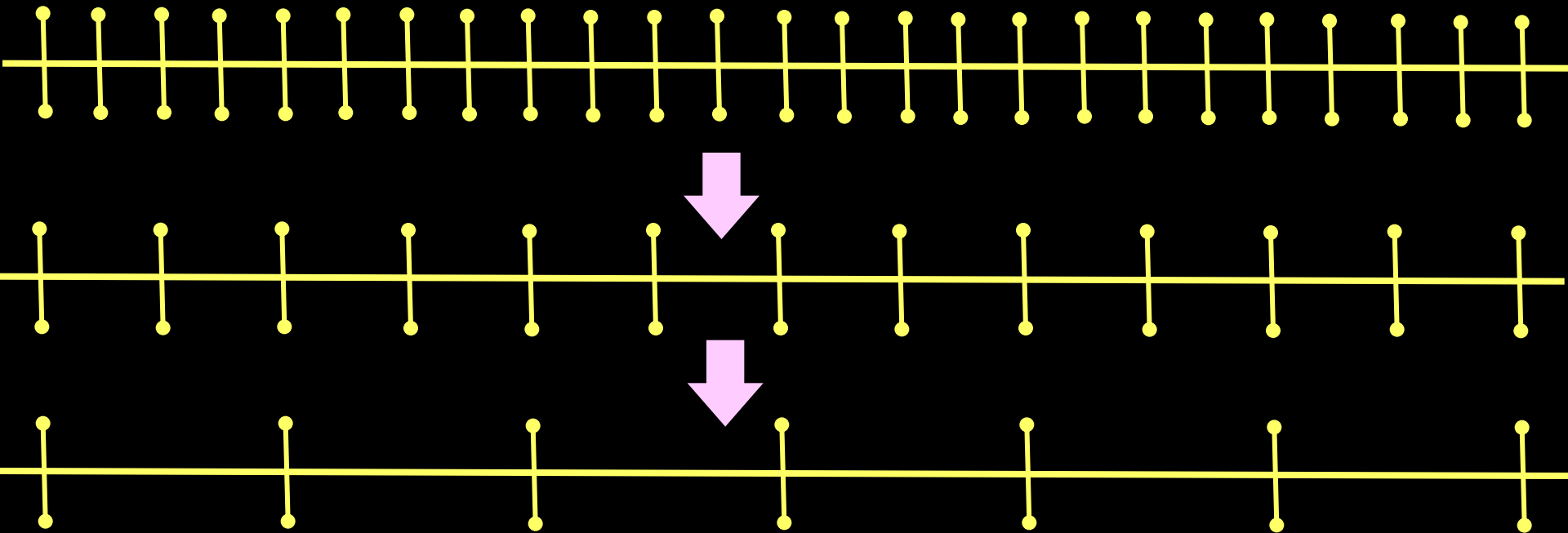
ハッブルの法則と宇宙膨張

- **ハッブルの法則 $v=H_0d$ (H_0 :ハッブル定数)**
 - 遠方銀河は我々に対して遠ざかっている
 - 後退速度 v と銀河までの距離 d が比例
 - **我々の銀河系に対してだけではなく宇宙のどこでも成り立つ**
 - 個々の銀河の運動ではなく、宇宙そのものが全体として一様等方に膨張していることを示している



何に対して膨張している？

- すべての場所を中心に膨張していると言ってもよいが、中心があるわけではないし、何に対してでもない。あらゆる場所が等しく相似的に膨張している。
- 風船の表面の例がかえって混乱させてるらしい。むしろ、無限に伸びた一本のゴムひもを例として考えるほうが誤解が少ないかもしれない。端がないことも重要。



ハッブルの法則と宇宙年齢

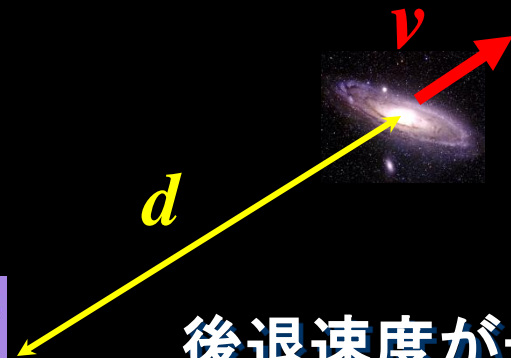
- ハッブル定数の逆数は宇宙年齢の目安

$$H_0 = 100h \text{ km/s/Mpc} \\ \approx 1/(100h^{-1} \text{ 億年})$$



$$t_H = \frac{d}{v} = \frac{d}{H_0 d} = \frac{1}{H_0} \approx 100h^{-1} \text{ 億年}$$

$$h = 0.71 \text{ の場合 } t_H \approx 140 \text{ 億年}$$



後退速度が一定ならば、 d/v だけ過去に遡れば宇宙全体が一点に集まる



宇宙には始まりがある！進化する！

宇宙・物質史 (主に物理法則から予想・推定)

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
0	137億年前	宇宙の誕生
10^{-43}秒 ~10^{-30}秒	137億年前	宇宙の指数関数的膨張(インフレーション)と、それ にともなう宇宙の熱化(ビッグバン宇宙)
10^{-6}秒	137億年前	陽子と反陽子の対消滅
1秒	137億年前	電子と陽電子の対消滅
3分	137億年前	ヘリウムの合成(ビッグバン軽元素合成)
38万年	137億年前	宇宙の中性化(陽子と電子が結合して荷電中性の 水素原子になる)
~4億年?	~133億年前?	最初の星の誕生、それ以降現在まで星の中心で 炭素、酸素、、、鉄などの重元素が合成され、星の 最期に星間空間にばら撒かれる(元素循環)
8億年	129億年前	現在知られている最古の銀河、 中性化した宇宙が再び電離
71億年	66億年前	ダークエネルギーが宇宙を支配し、それ以降、宇 宙膨張が減速から加速に転ずる

ジョージ・ガモフ

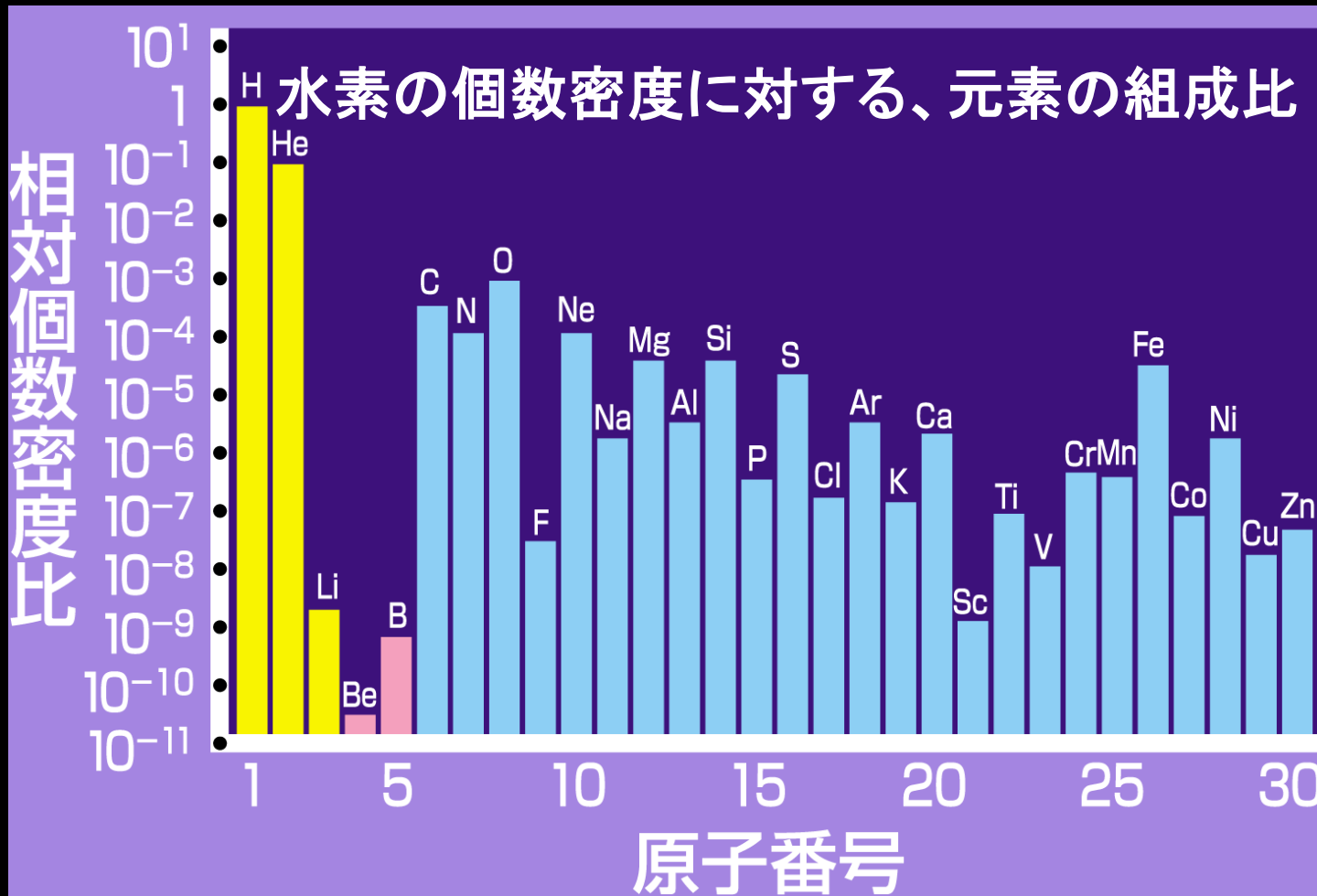


http://en.wikipedia.org/wiki/File:GamovGA_1930.jpg

- ビッグバン理論の提唱者
- その帰結として、宇宙マイクロ波背景輻射の存在を予言
- 原子核物理、宇宙論、分子生物学等の多岐の分野にわたり、極めて独創的なアイデアを発表するとともに、優れた啓蒙書を著した

宇宙における元素の存在量

- 宇宙には大量のヘリウムが存在(実は自明ではない)



ヘリウムが全元素に占める割合は個数にして10%、質量にして25%

原子核反応は高温・高密度が必要
⇒元素の起源は宇宙初期？それとも星の内部？

元素の起源: $\alpha\beta\gamma$ 理論(1948)

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 73, NUMBER 7

APRIL 1, 1948

Letters to the Editor

PUBLICATION of brief reports of important discoveries in physics may be secured by addressing them to this department. The closing date for this department is five weeks prior to the date of issue. No proof will be sent to the authors. The Board of Editors does not hold itself responsible for the opinions expressed by the correspondents. Communications should not exceed 600 words in length.

The Origin of Chemical Elements

R. A. ALPHER*

*Applied Physics Laboratory, The Johns Hopkins University,
Silver Spring, Maryland*

AND

H. BETHE

Cornell University, Ithaca, New York

AND

G. GAMOW

The George Washington University, Washington, D. C.

February 18, 1948

We may remark at first that the building-up process was apparently completed when the temperature of the neutron gas was still rather high, since otherwise the observed abundances would have been strongly affected by the resonances in the region of the slow neutrons. According to Hughes,² the neutron capture cross sections of various elements (for neutron energies of about 1 Mev) increase exponentially with atomic number halfway up the periodic system, remaining approximately constant for heavier elements.

Using these cross sections, one finds by integrating Eqs. (1) as shown in Fig. 1 that the relative abundances of various nuclear species decrease rapidly for the lighter elements and remain approximately constant for the elements heavier than silver. In order to fit the calculated curve with the observed abundances³ it is necessary to assume the integral of $\rho_n dt$ during the building-up period is equal to 5×10^4 g sec./cm³.

On the other hand, according to the relativistic theory of the expanding universe⁴ the density dependence on time is given by $\rho \approx 10^4/t^3$. Since the integral of this expression diverges at $t=0$, it is necessary to assume that the building-up process began at a certain time t_0 , satisfying the relation:

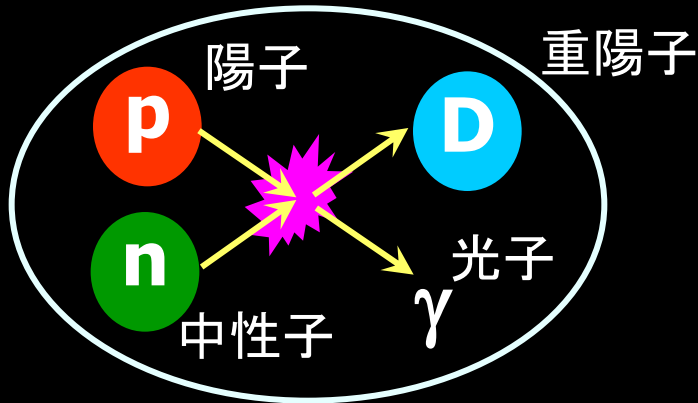
*The Origin of Chemical Elements", Phys. Rev. 73, 803 - 804 (1948)

アルファー、(ベータ)、ガモフの共著論文 1948年4月1日発表

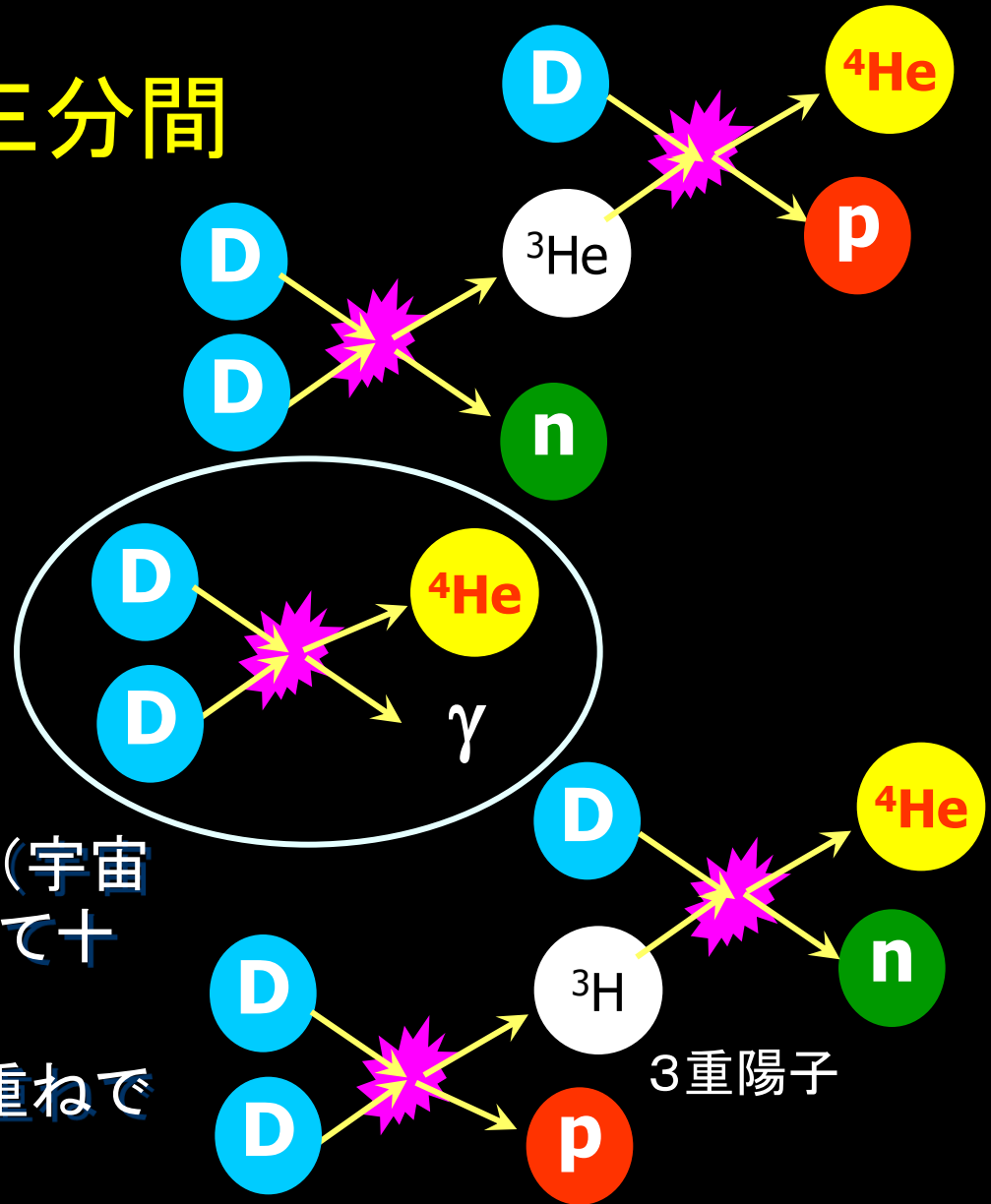
ビッグバン元素合成反応

■ 宇宙誕生最初の三分間

重水素合成が第一ステップ

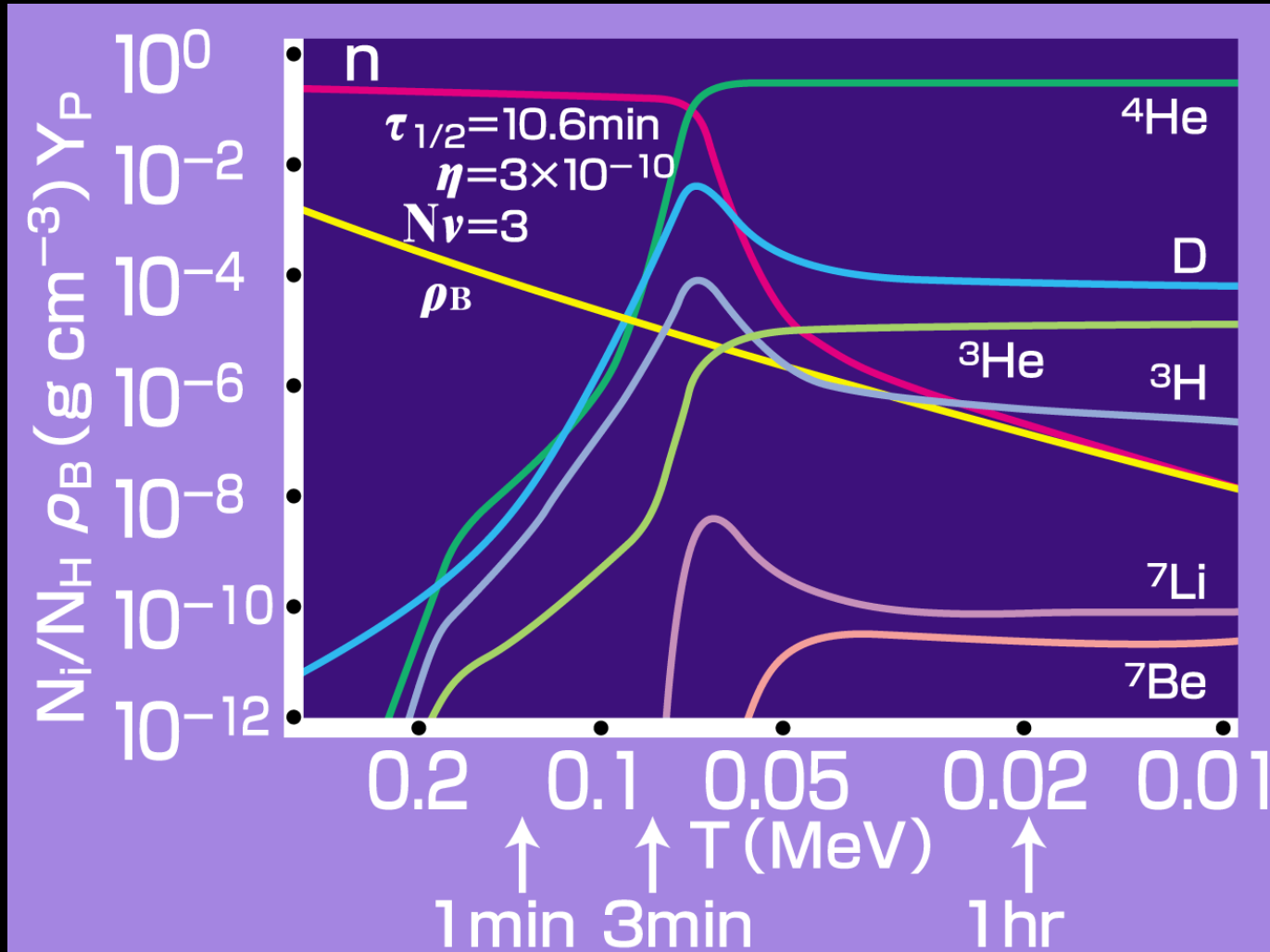


- 重陽子は壊れやすい
- 宇宙の温度が一億度以下(宇宙誕生後約3分後)となって初めて十分な重陽子が生成
- その後、二体反応の積み重ねでヘリウムが合成



初期宇宙の軽元素量進化

- ヘリウムの質量存在比 25%が自然に説明される



物理法則によって誕生後
1分の宇宙が記述できる

ヘリウムより重い元素の合成は難しい

p	1	2	A=5								
n	H	He	3	4	5	6	7	8	9	10	
0	¹ H	² He	Li	Be							
1	² D	³ He	⁴ Li	⁵ Be	B	C					
2	³ T	⁴ He	⁵ Li	⁶ Be	⁷ B	⁸ C	N	8			
3	⁴ H	⁵ He	⁶ Li	⁷ Be	⁸ B	⁹ C	¹⁰ N	O	9	10	
4	⁵ H	⁶ He	⁷ Li	⁸ Be	⁹ B	¹⁰ C	¹¹ N	¹² O	F	Ne	
5	⁶ H	⁷ He	⁸ Li	⁹ Be	¹⁰ B	¹¹ C	¹² N	¹³ O	¹⁴ F	¹⁵ Ne	11
6	⁷ H	⁸ He	⁹ Li	¹⁰ Be	¹¹ B	¹² C	¹³ N	¹⁴ O	¹⁵ F	¹⁶ Ne	Na
7		⁹ He	¹⁰ Li	¹¹ Be	¹² B	¹³ C	¹⁴ N	¹⁵ O	¹⁶ F	¹⁷ Ne	¹⁸ Na
8		¹⁰ He	¹¹ Li	¹² Be	¹³ B	¹⁴ C	¹⁵ N	¹⁶ O	¹⁷ F	¹⁸ Ne	¹⁹ Na

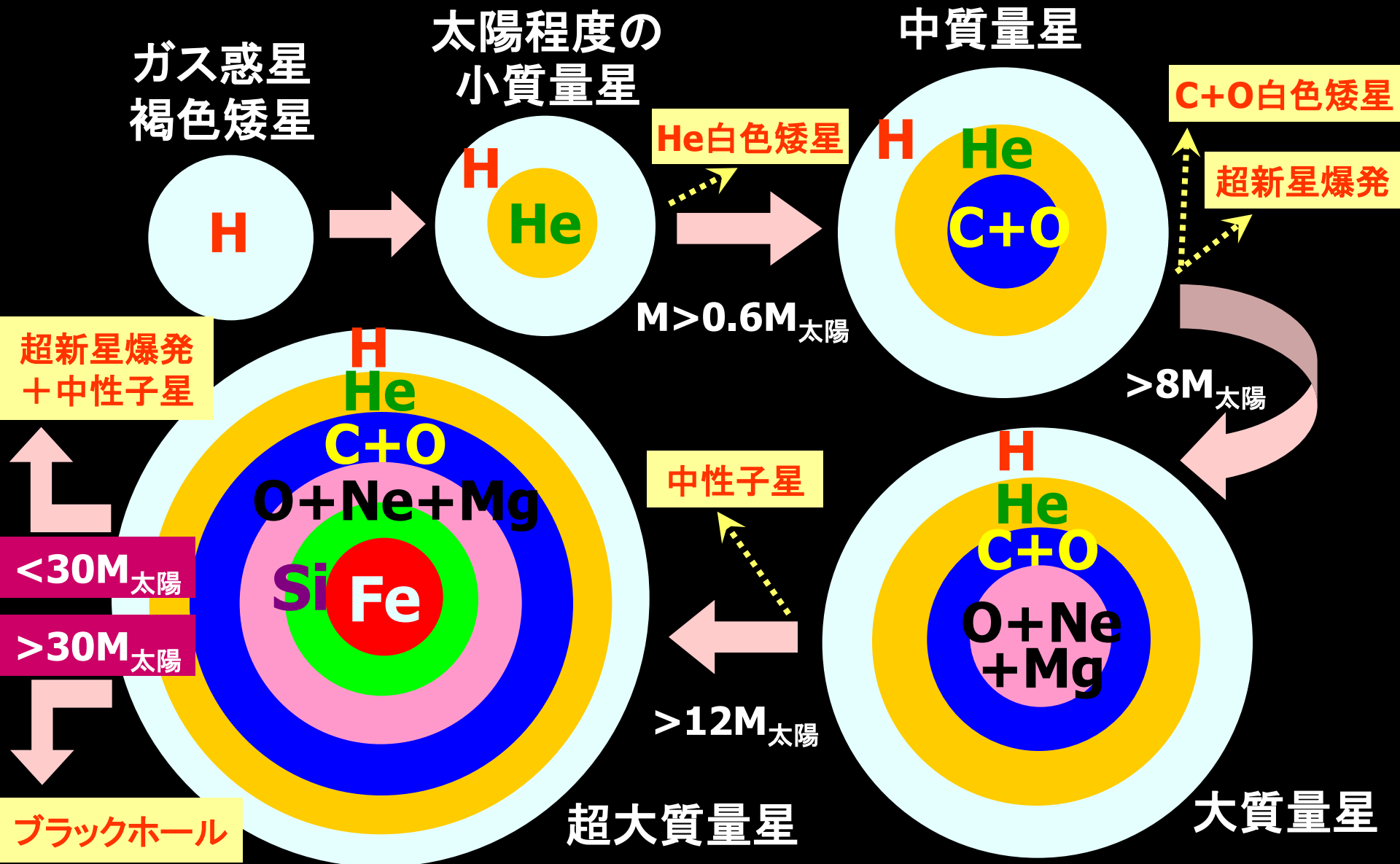
- 質量数5と8の安定元素がない！
- He+p, He+n, He+Heなどの反応は起こらない

不安定
半減期 10~100日
天然 放射性
安定

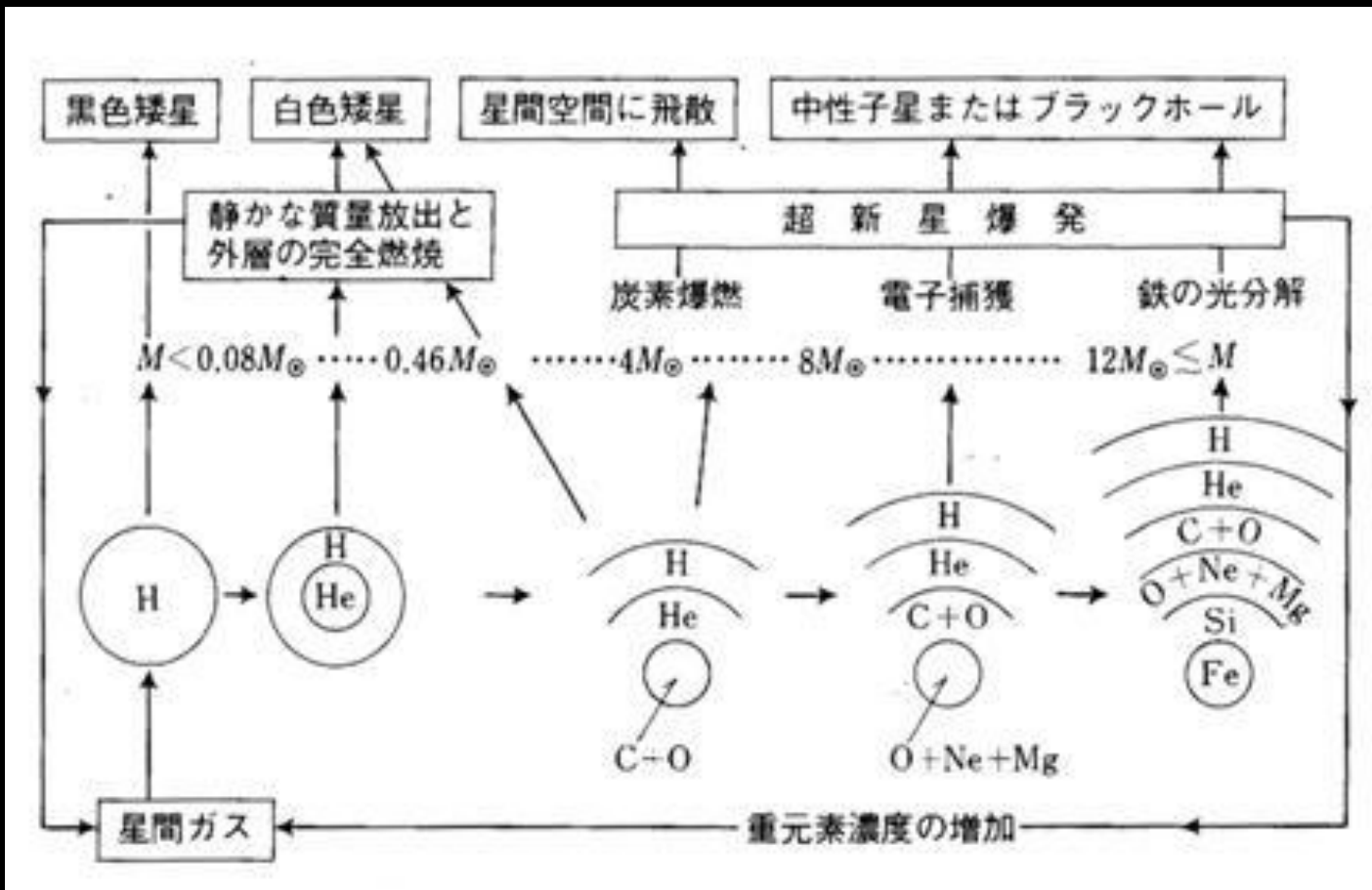
2つの元素合成理論の比較

	ビッグバン元素合成	星元素合成
場所	初期宇宙	星の内部
時間スケール	分	億年
温度	10億度 時間とともに 急速に下がる	1000万度 時間とともに ゆっくりと上昇
物質密度	0.00001 g/cc	100 g/cc
光子バリオン比	10^9	1以下
生成元素	軽元素 (ヘリウム、重水素、 リチウム)	重元素 (炭素、窒素、酸素、 など)

星の内部のたまねぎ構造



星の進化＝元素合成＋元素の循環



※ 啓林館 高校理科・地学1改訂版 より引用

http://www.keirinkan.com/kori/kori_earth/kori_earth_1_kaitei/contents/ea-1/4-bu/4-2-3.htm

「ユーザーの広場」(指導書Web) 2011年1月18日現在

惑星状星雲

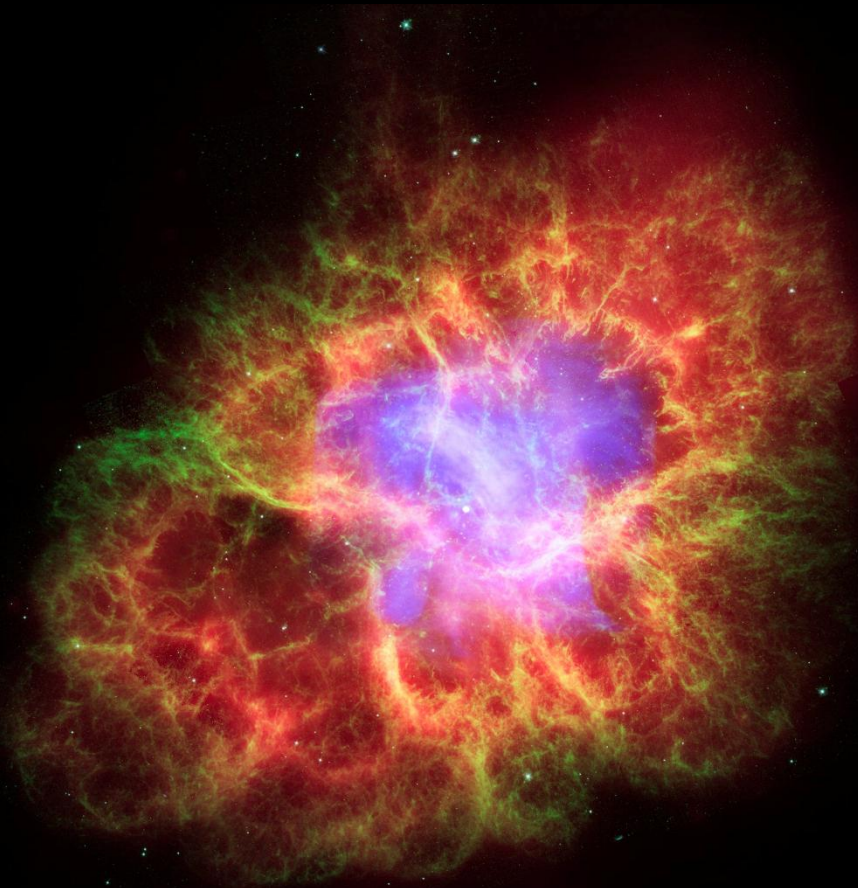
- 赤色巨星の最期に放出されたガスが中心の白色矮星からの紫外線をうけて輝く



Helix Nebula
HST画像

超新星爆発

- 太陽の8倍以上の質量の星の終末



かに星雲

1054年に起こった超新星爆発の残骸

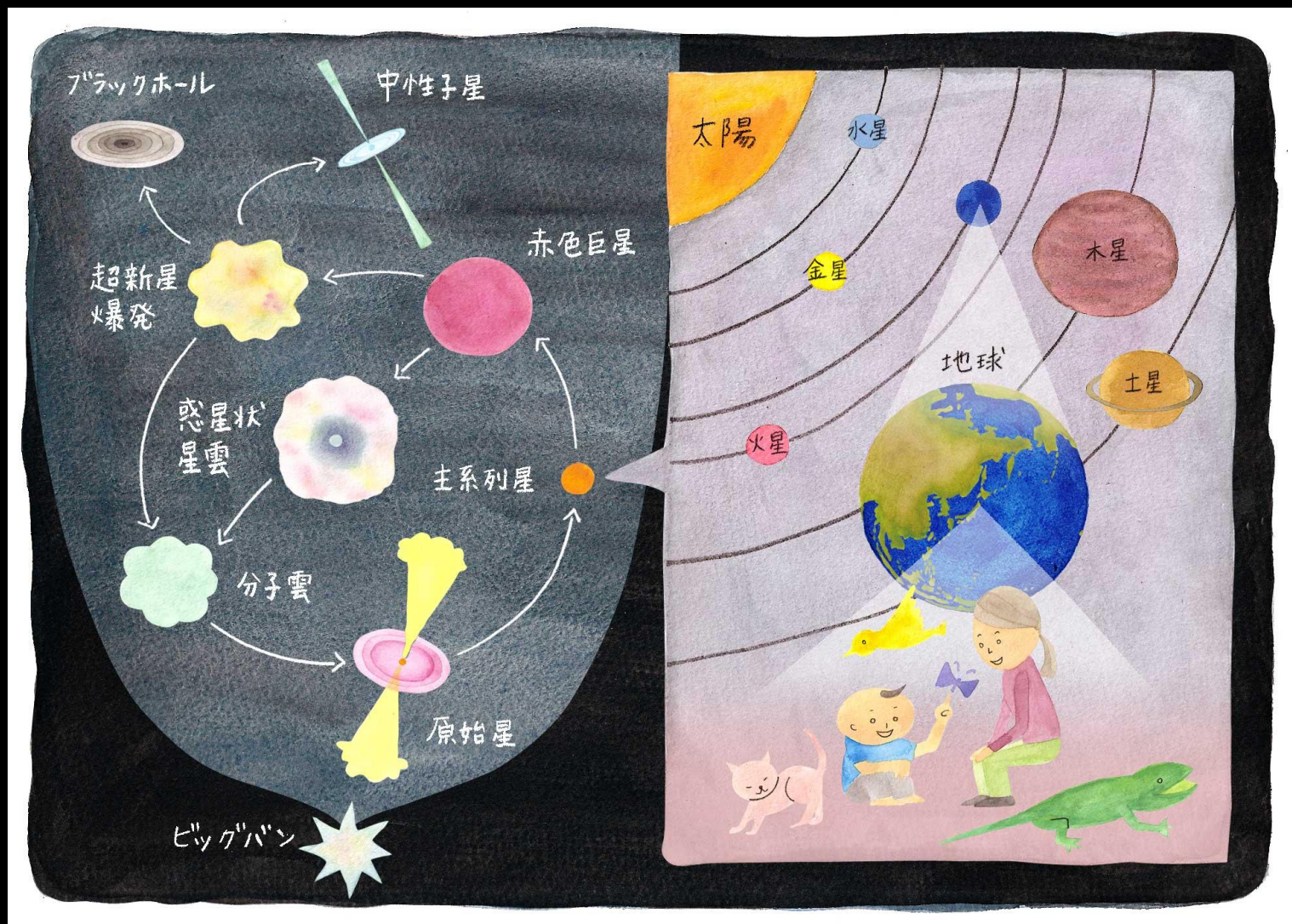
X線 Chandra

可視光 HST

赤外 Spitzer

の合成画像

宇宙・天体・物質・生命の共進化



我々は星の子供：宇宙の元素循環

- ビッグバン後、最初の3分間で合成された軽元素から、数億年後に**第一世代の星**が誕生
- **星の内部で重元素が合成され、それが星の進化の最終段階で宇宙にばらまかれる**
- それを材料として**次の世代の天体**が誕生
- この過程の繰り返しが宇宙での元素循環
- **我々は、かつて宇宙のどこかで生まれた星の内部で合成された重元素、さらには宇宙最初の3分間で合成されたヘリウムを材料としている！**

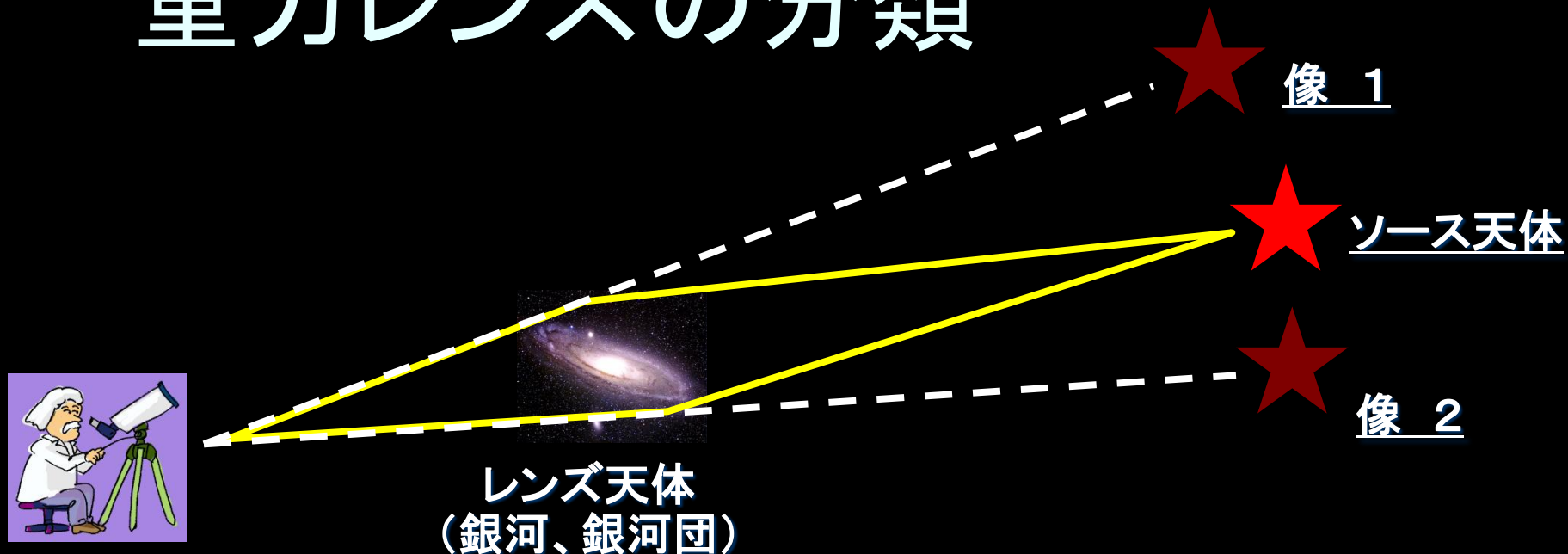
宇宙は元素だけでできているか？

- 宇宙論における最も基本的質問の一つ
- 20世紀天文学観測の予想外の大発見
 - 宇宙には大量のダークマターが存在
 - 実はさらに大量のダークエネルギーが存在
- 宇宙はダーク成分に支配されている

宇宙のダークマター

- 実は、光り輝く天体の周りには光ることのないダークマターが満ちている
- **ダークマターの存在は、その周囲を通過する光の軌道を変化させる**
 - アインシュタインの一般相対論にもとづく重力レンズ効果によって実証されている
- その正体は、未発見の素粒子であると考えられている(天文学による微視的世界の発見)

重力レンズの分類



- 光線は重力場によって曲げられる
 - 天体が多重像をつくる(強い重力レンズ)
 - 天体の形状が変形を受ける(弱い重力レンズ)
 - 天体の見かけの明るさが増光する(マイクロレンズ)

100億光年先からの一般相対論的蟹気楼 (SDSS J1004+4112)

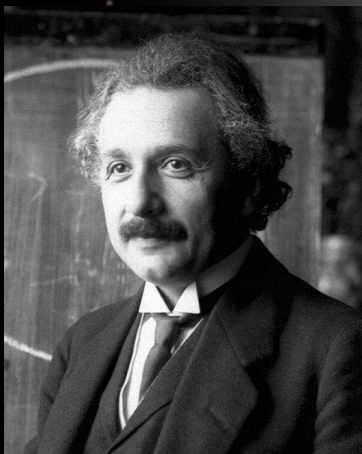
2003年に東京大学の稲田直久と大栗真宗がSDSSで発見、すばるで確認
Inada et al. Nature 426(2003)810



銀河団周辺の重力で光線が曲げられ、
みかけ上5つの異なる天体をつくる
(ダークマターの存在)

98億光年先にある
クエーサー(中心に
ブラックホール)

62億光年先にある
銀河団まわりの
ダークマター



† http://en.wikipedia.org/wiki/File:Einstein1921_by_F_Schmutzer_4.jpg

重レンズ天体
SDSS J1004+4112 :
一般相対論的蜃気楼





宇宙のダークエネルギー

- 宇宙のあらゆる空間を一様に満たしているものは存在するか
 - 仮にあるとしてもそのようなものは観測可能か
 - 「真空」には本当に何も無いのか
 - 相対的でない測定はあり得るか
- ダークエネルギーは、空間的には一様分布していてもその密度は時々刻々変化する
 - 宇宙膨張は宇宙の密度の絶対的な値（何かとの差ではなく）によって決まる
 - 宇宙膨張の時間依存性を測定する
 - 時間軸に沿った相対的な測定は可能

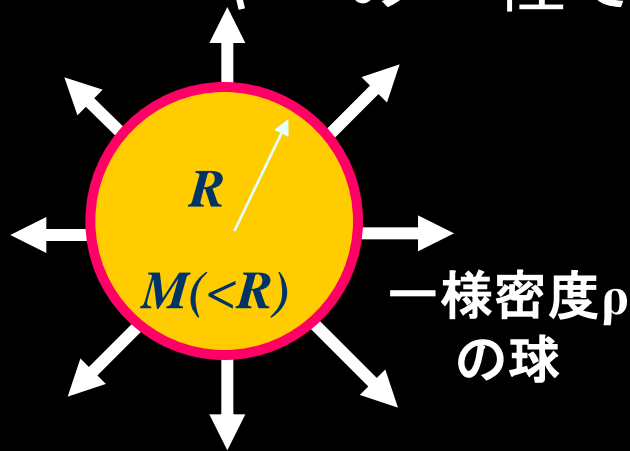
宇宙膨張の方程式

■ ニュートン力学による運動方程式

$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{GM(<R)}{R^2} = -\frac{G}{R^2} \left(\frac{4\pi}{3} \rho R^3 \right) = -\frac{4\pi G}{3} \rho R$$

■ 一般相対論による宇宙膨張の方程式もほぼ同じ

- 質量密度 ρ のみならず圧力 p もまた重力源となる
- 万有斥力に対応する「宇宙定数」(Λ : ダークエネルギーの一種でその有力候補)が存在し得る

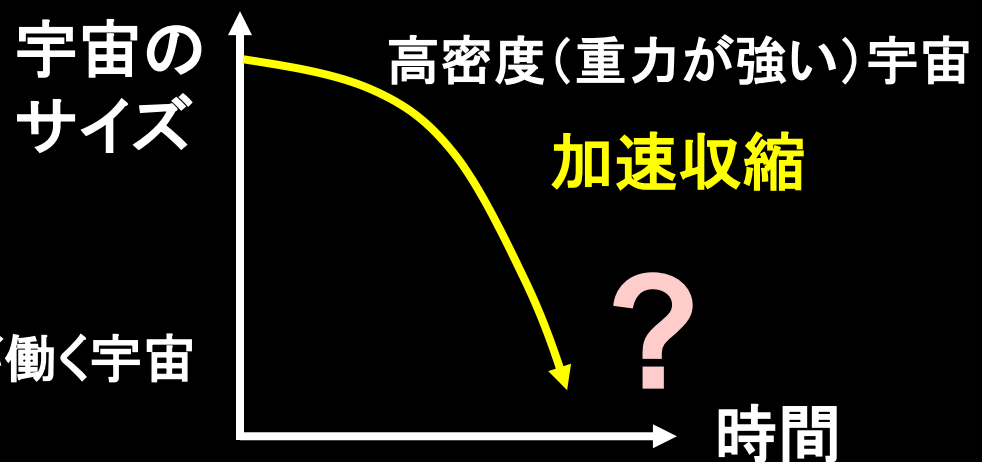
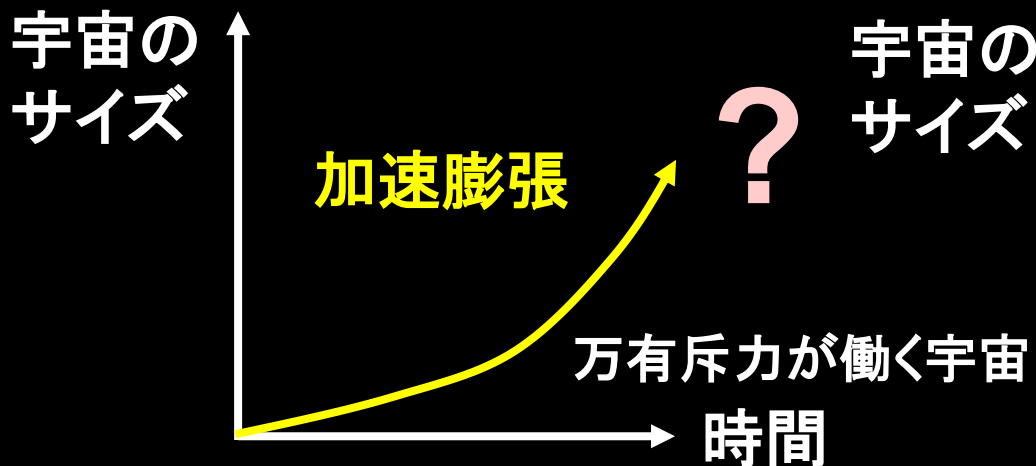
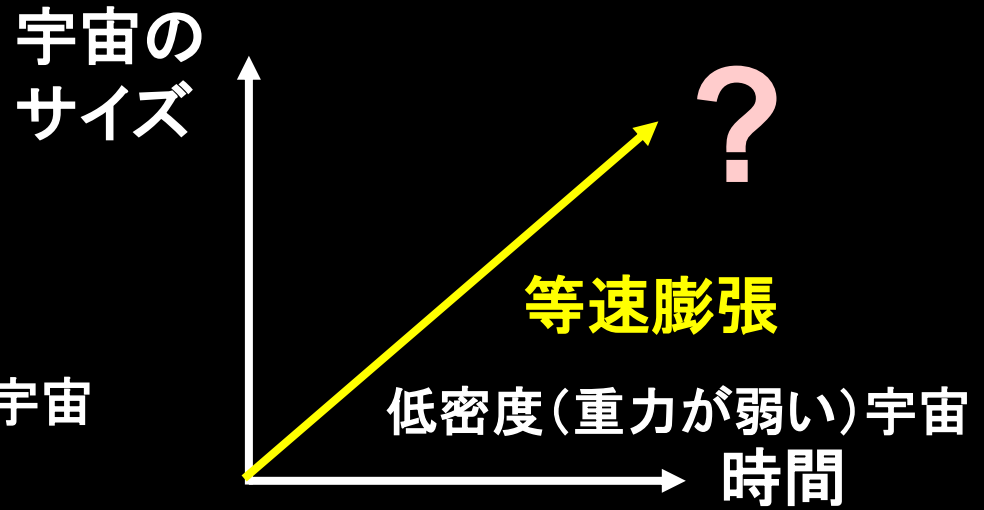
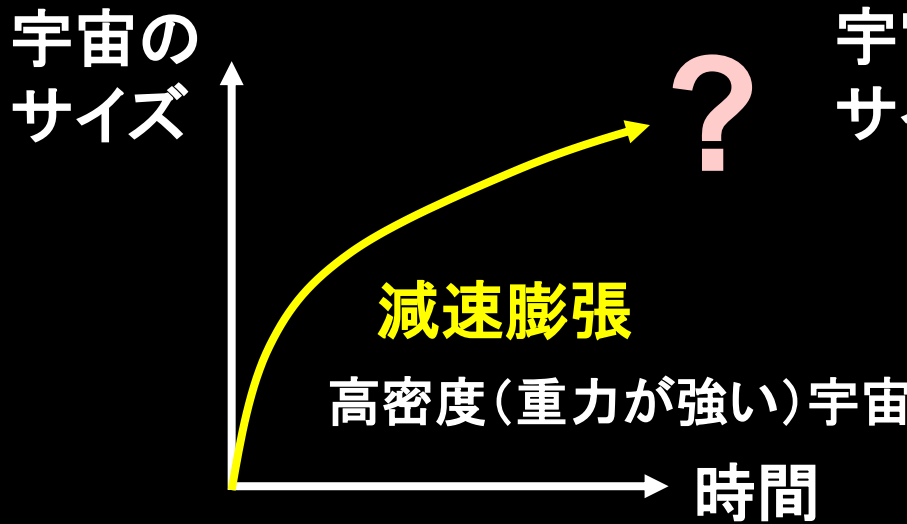


$$\frac{d^2 R}{dt^2} = -\frac{4\pi G}{3} \left(\rho + 3p - \frac{\Lambda}{4\pi G} \right) R$$

一般相対論的宇宙の運動方程式

宇宙の組成と宇宙膨張の未来

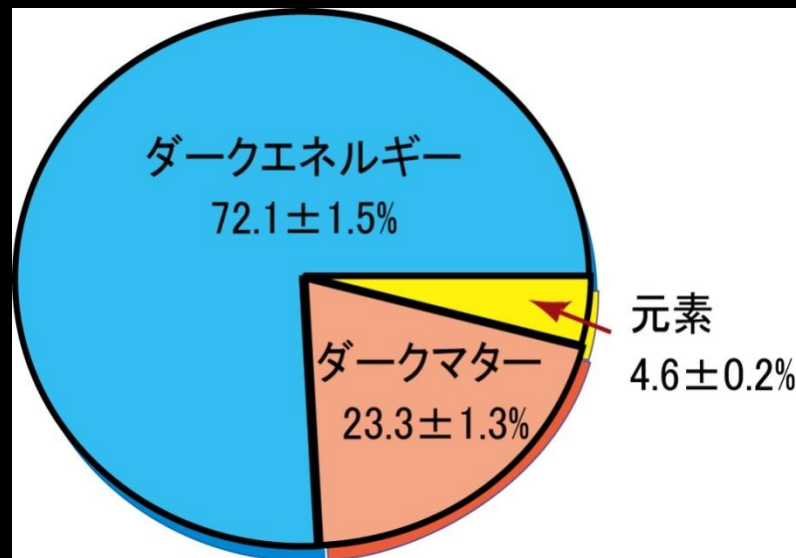
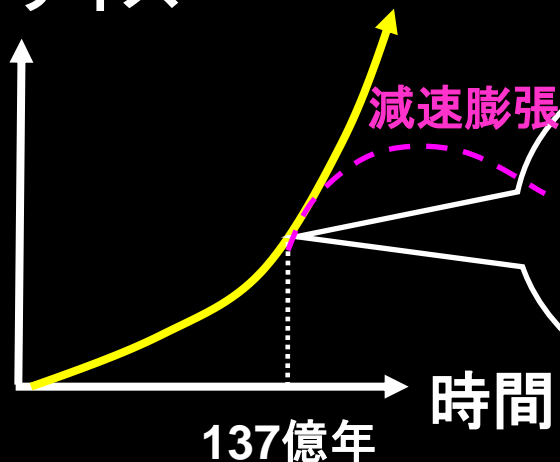
- 宇宙膨張の進化の観測を通じて、宇宙を一様に満たしている成分の存在が検出できる



宇宙の95%以上が正体不明

宇宙の
サイズ

宇宙の加速膨張



■ ダークエネルギーの正体は何か？

- 万有斥力を及ぼす奇妙な物質(ダークエネルギー)?
 - アインシュタインの宇宙定数 (1917年)?
 - 「真空」がもつエネルギー? 21世紀のエーテル?
- 宇宙論スケールでの一般相対論(重力法則)の破綻

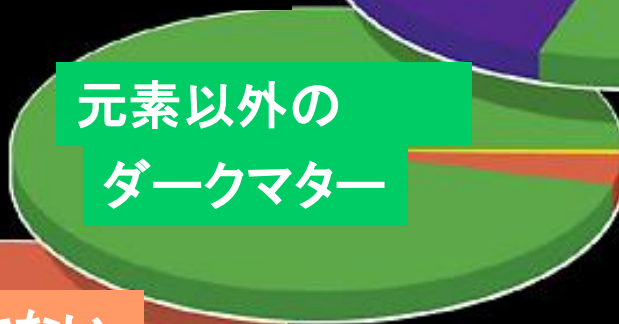
■ 我々は何も知らなかった

宇宙の組成観の変化

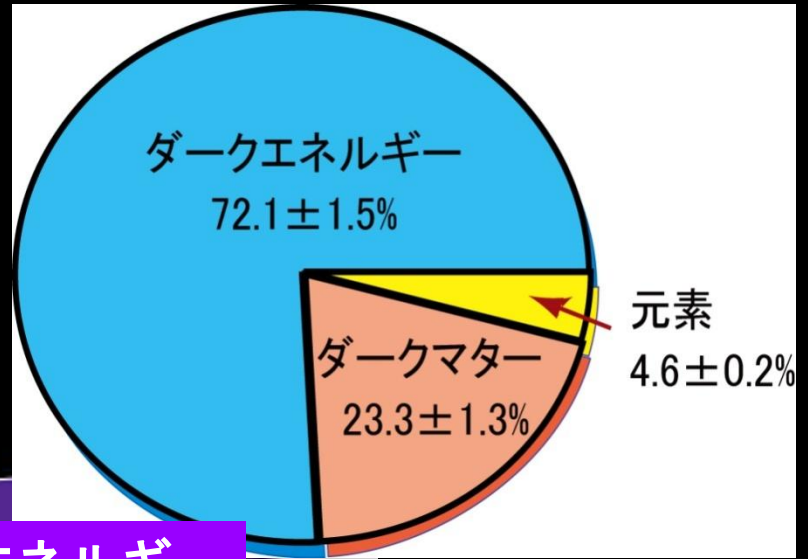
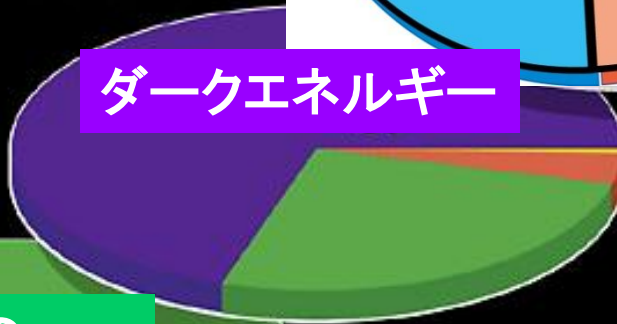
1970年代



1980年代

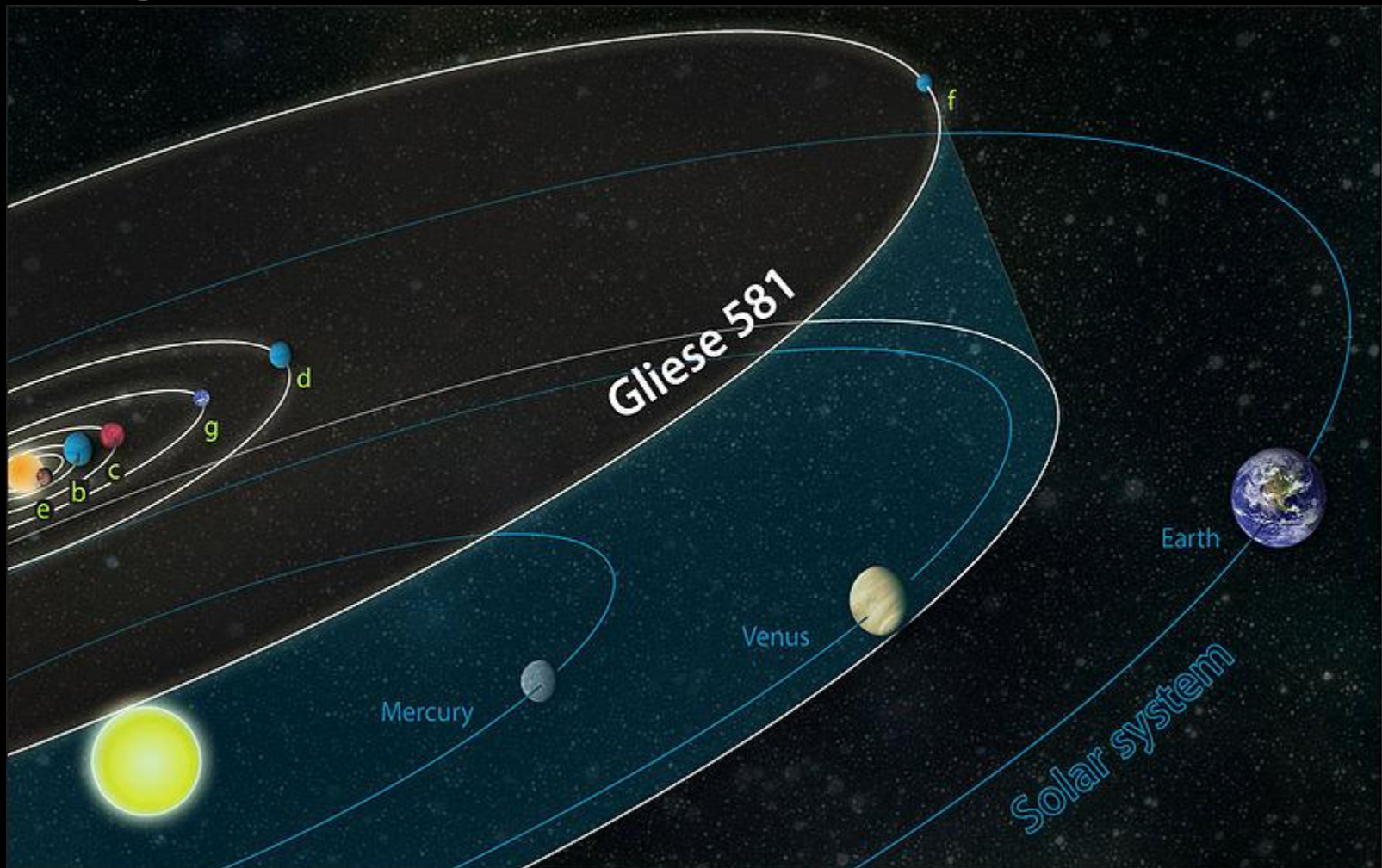


1990年代



21世紀初頭

④ 太陽系外惑星の世界

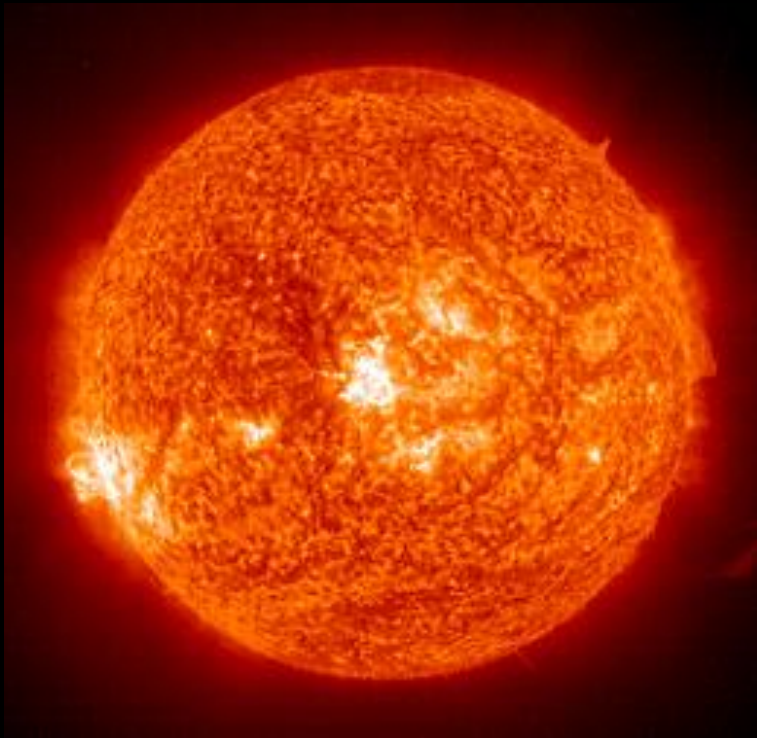


‡ (Credit: Zina Deretsky, [アメリカ国立科学財団](http://www.nasa.gov/topics/universe/features/gliese_581_feature.html))

http://www.nasa.gov/topics/universe/features/gliese_581_feature.html

もうひとつの宇宙の果て： 銀河系のどこかに生命を宿した惑星はあるのか？

■ 宇宙の果てと太陽系外惑星



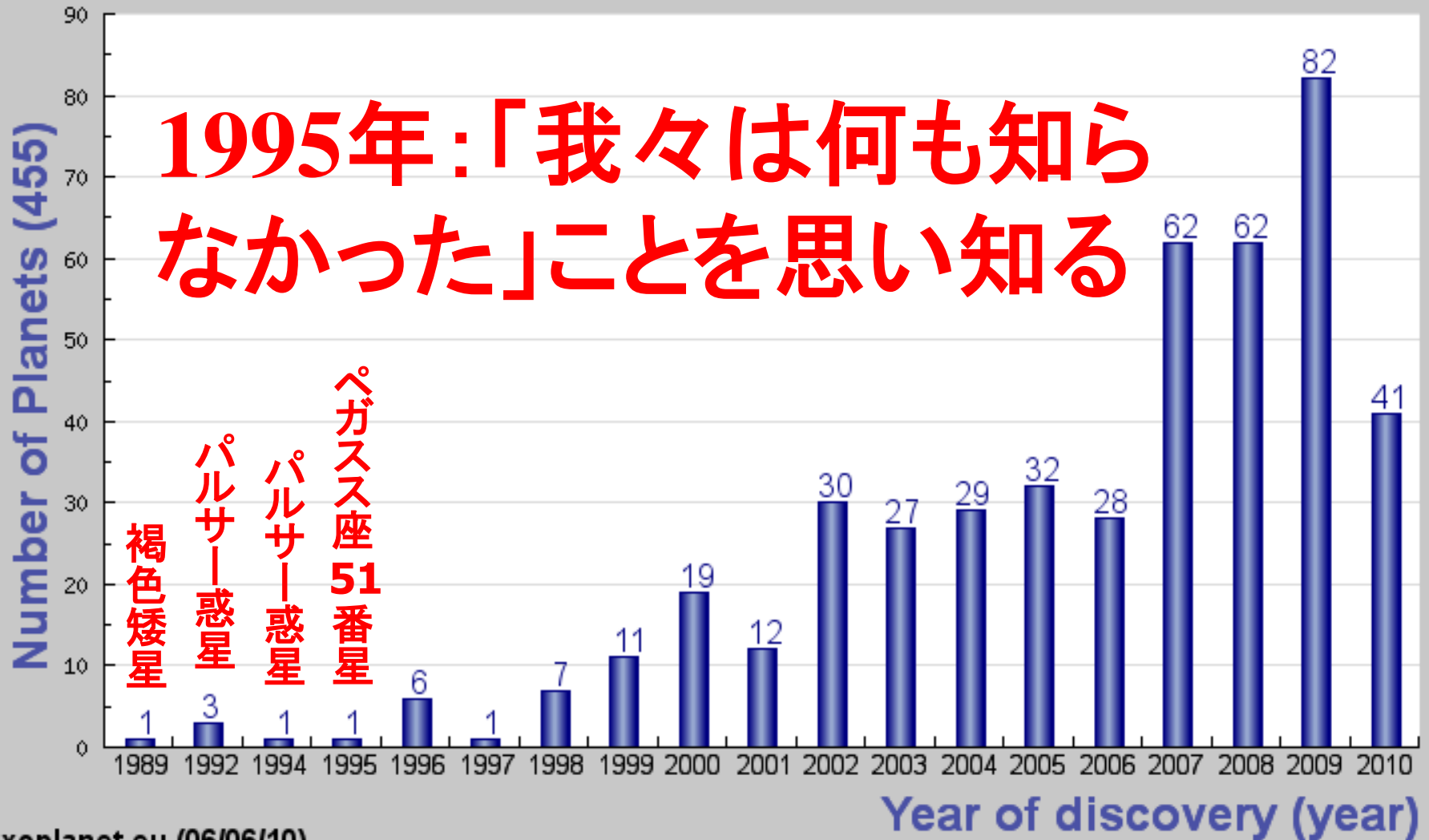
- 大望遠鏡は「暗い」天体を観測できる
 - 本当は明るいのだが遠く
にあり暗く見える天体
⇒ **宇宙の果てにある銀河**
 - すぐ近くにあるのだが本
当に暗い天体
⇒ **銀河内にある系外惑星**

太陽系外惑星とは？

- 水金地火木土(天海冥)のその先？
- わが太陽系の拡大
 - 1781年：天王星の発見
 - 1846年：海王星の発見
 - 1930年：冥王星の発見
- 1995年：初めての太陽系外惑星の発見
- 哲学から科学へ
 - この宇宙とよく似た宇宙も全く異なる宇宙も無限に存在する
 - エピキュラス（紀元前341年～270年）
 - 我々以外の宇宙は存在し得ない
 - アリストテレス（紀元前384年～322年）

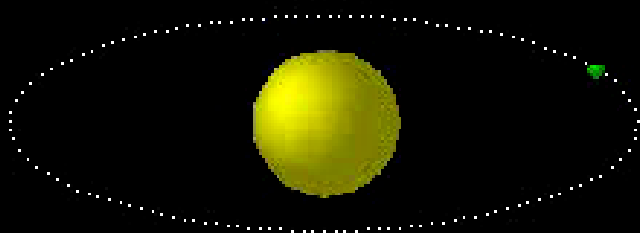
太陽系外惑星（候補）の発見年表

Number of planets by year of discovery



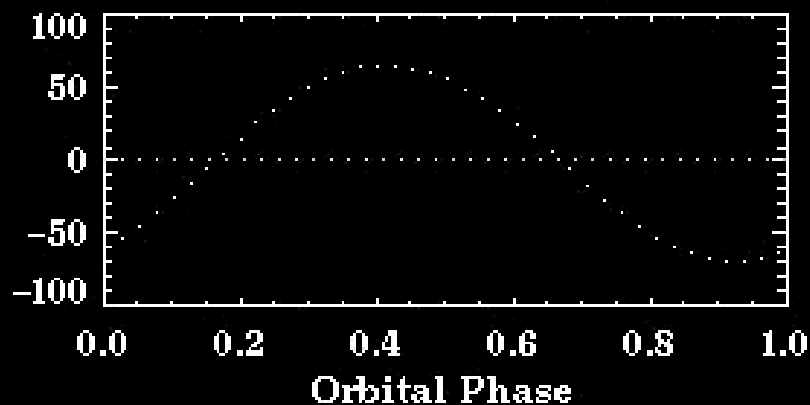
どうやって見つけたのか？

Circular Orbit: rho CrE



$K = 67.4 \text{ m/s}$ $e = 0.03$
 $\omega = 210.0 \text{ deg.}$ $\sin(i) = 0.3$ (*)

Radial Velocity Curve
of the Star [m/s]



S.G. Korzennik (CBA, © 1997)

■ ドップラー法

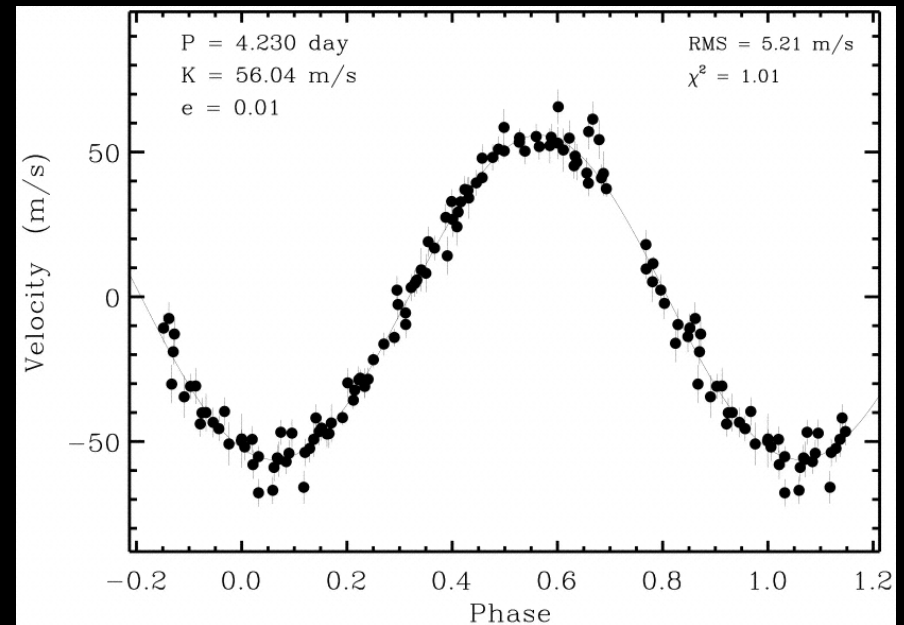
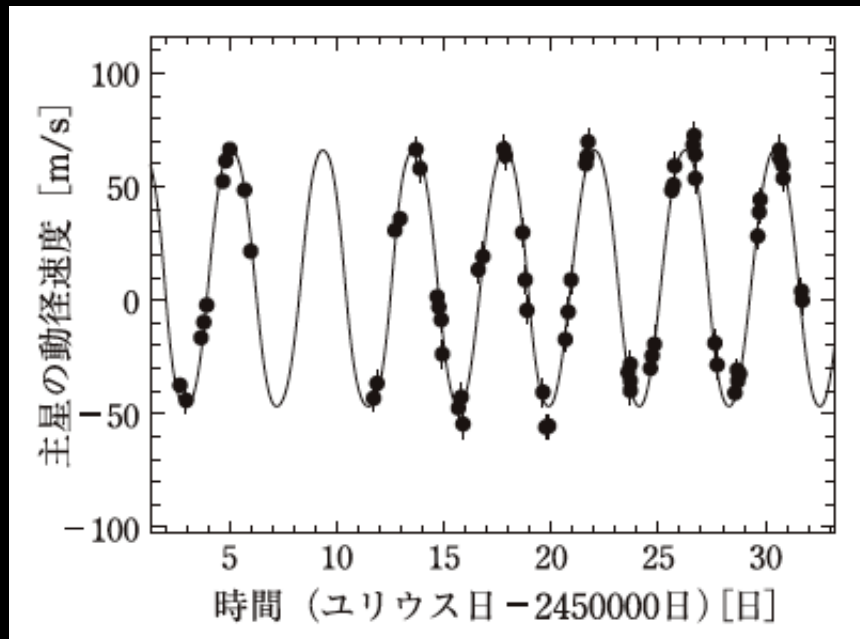
- 中心星の速度が毎秒数十メートル周期的に変動

■ トランジット法

- (運がよければ) 中心星の正面を惑星が横切ることによって星の明るさが1パーセント程度周期的に暗くなる

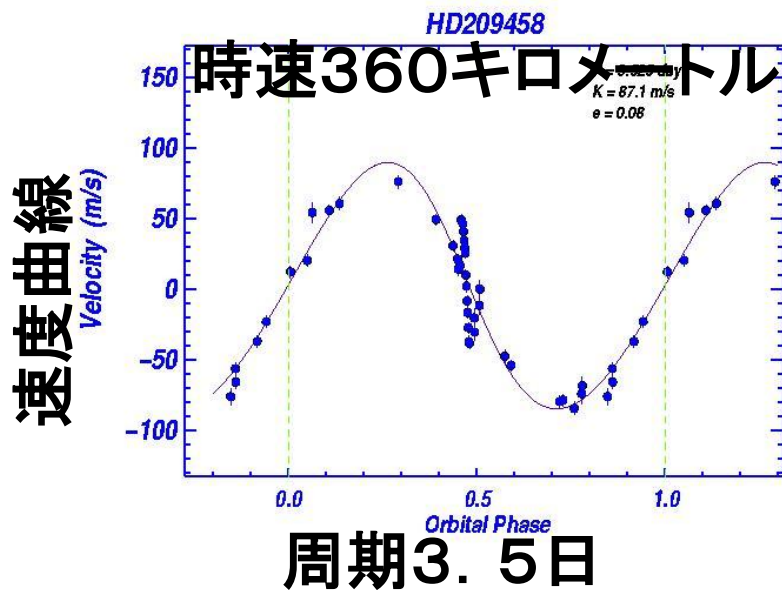
ペガサス座51番星： 初めての太陽系外惑星 (1995年発表)

わずか4.2日で一周！



初めてのトランジット惑星HD209458b (2000年発表)

- 速度変動のデータに合わせた惑星食の初検出

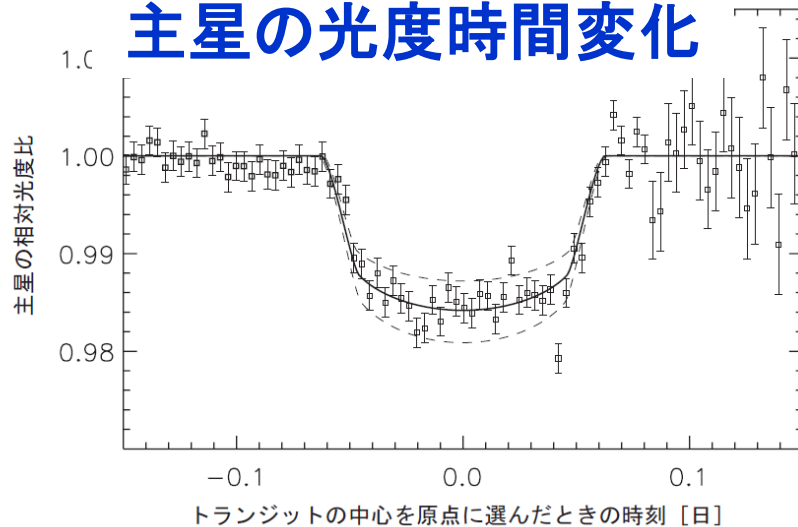


http://astro.berkeley.edu/~gmarcy/hd/hd209458_vel.jpg

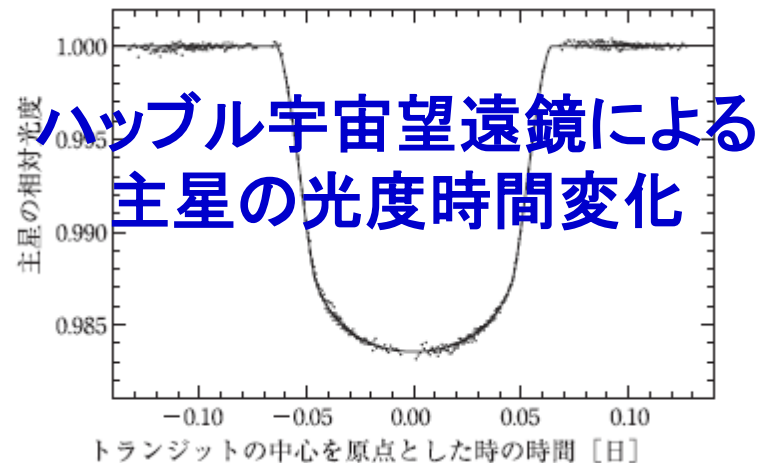
地上望遠鏡による 主星の速度時間変化

「ものの大きさ—自然の階層・宇宙の階層 (UP Physics)」須藤 靖 (著)

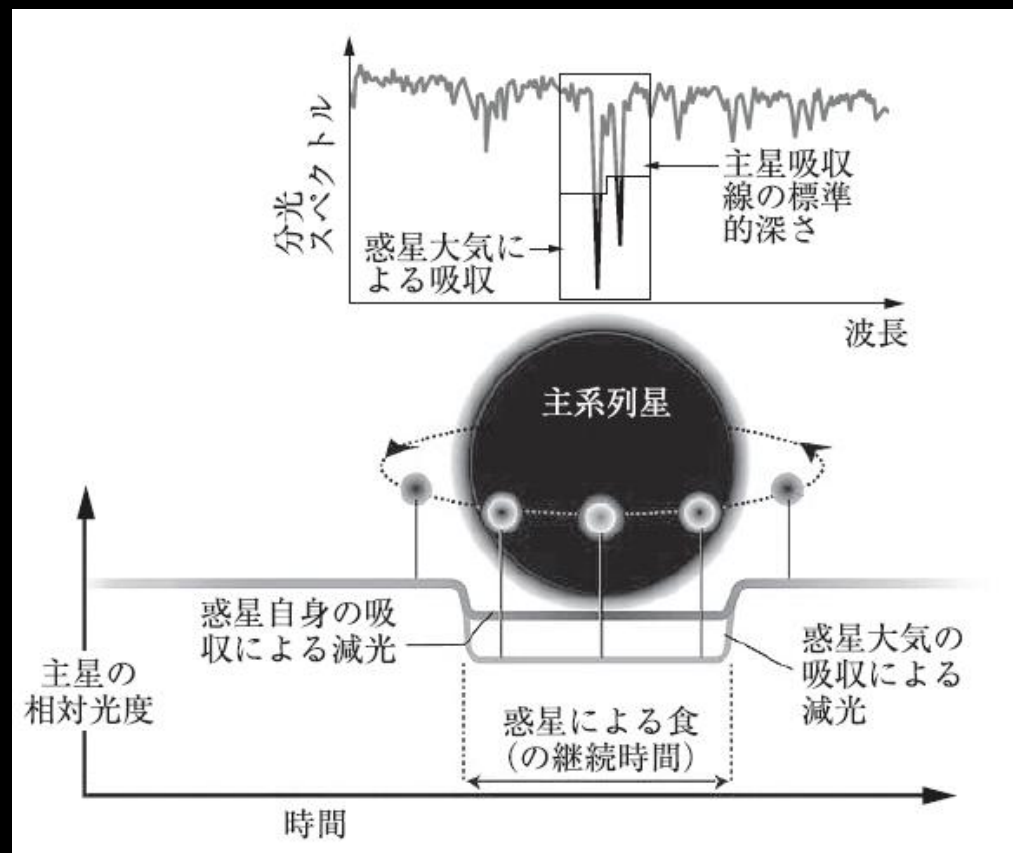
地上望遠鏡による 主星の光度時間変化



「ものの大きさ—自然の階層・宇宙の階層 (UP Physics)」須藤 靖 (著)

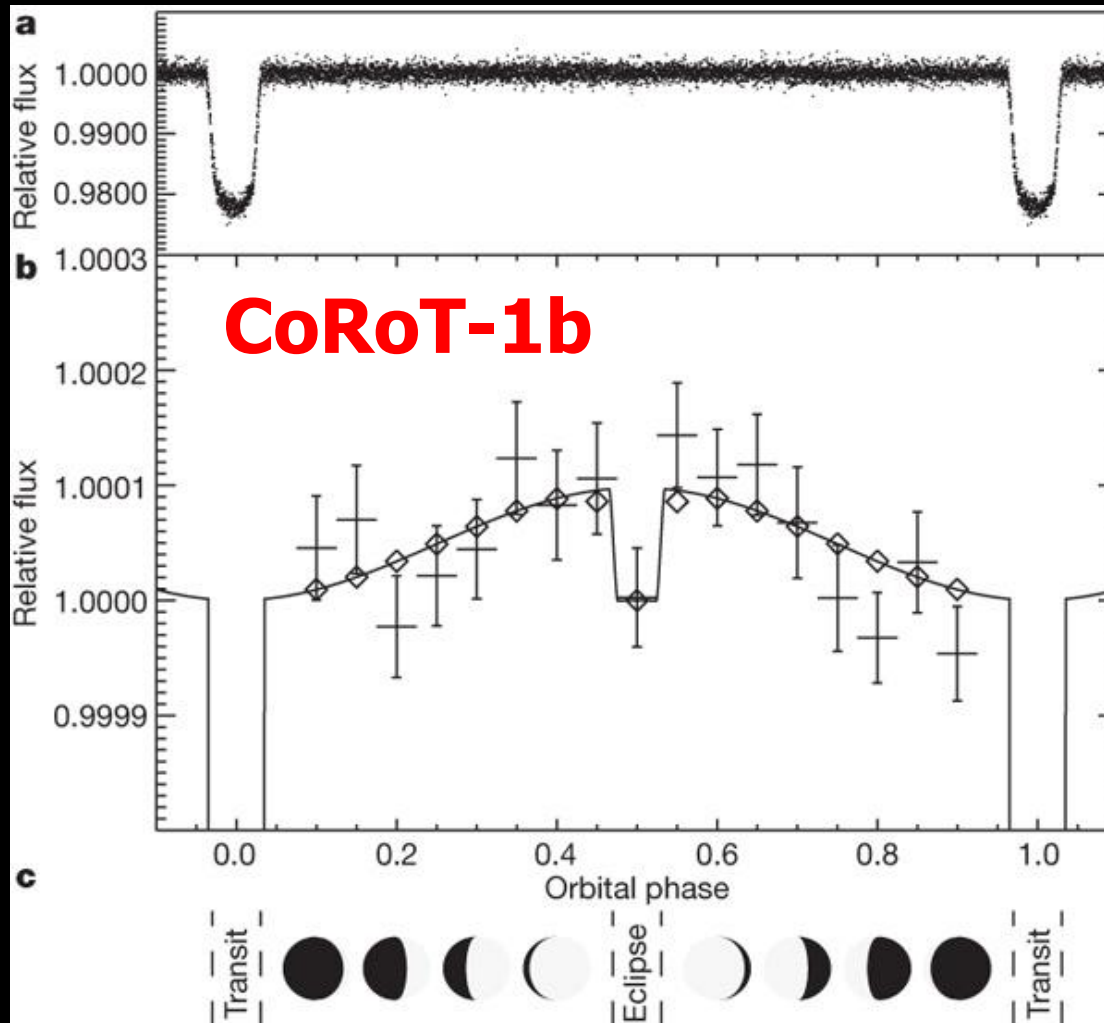


HD209458bの 惑星大気初検出 (2001年)



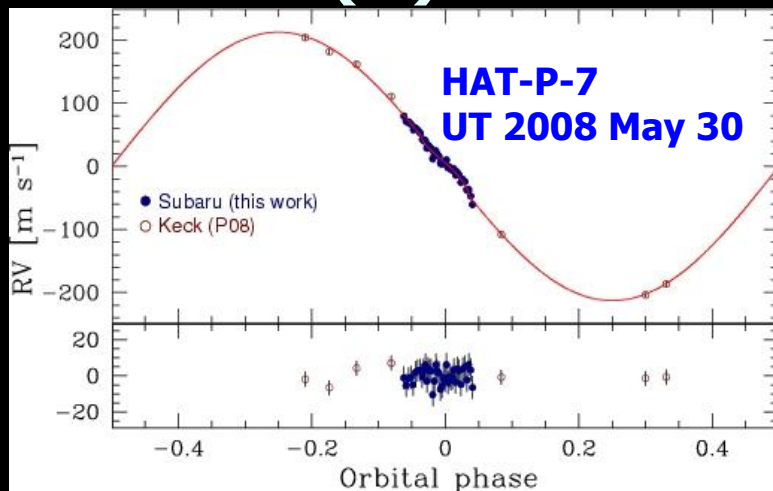
- 2000年 系外惑星の食を検出 ※「ものの大きさ—自然の階層・宇宙の階層 (UP Physics)」
須藤 靖 (著) fig03-12
 - 惑星の大きさがわかる
 - 質量の観測データとあわせて密度を 0.4g/cc と推定
 - 巨大ガス惑星であることの確認
- 2001年11月 この惑星大気中にナトリウムを発見 (Charbonneau et al.)

トランジット惑星CoRoT-1bからの 反射光の検出

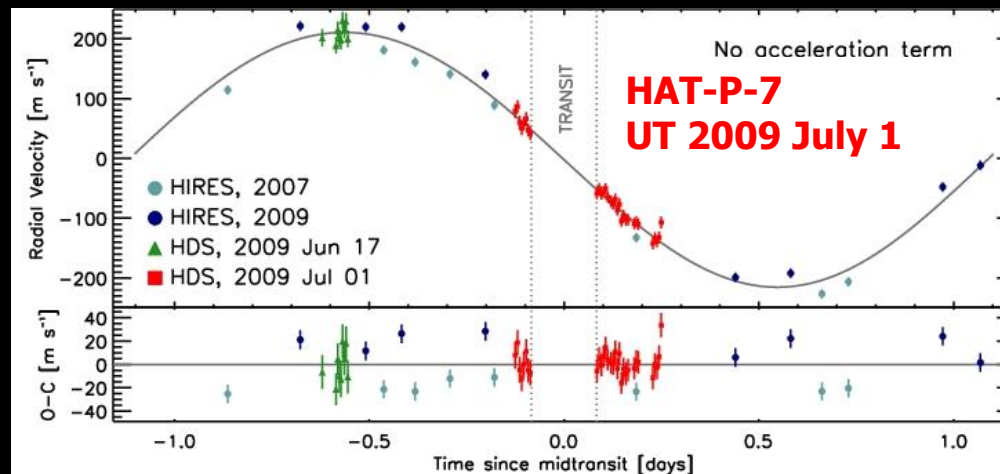


- CoRoT-1b: トランジット惑星(周期=1.5日)
- Convection, Rotation and planetary Transit (2006年12月27日打ち上げ)
- 55日間測光モニター
 - 反射光(7100 Å)検出
 - 表面温度 2430K
 - $0.02 < \text{albedo} < 0.2$

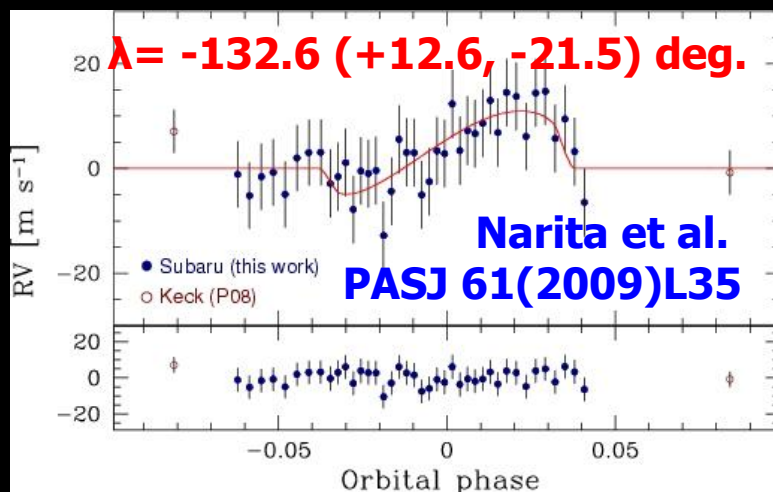
逆行(?)系外惑星(HAT-P-7)の発見



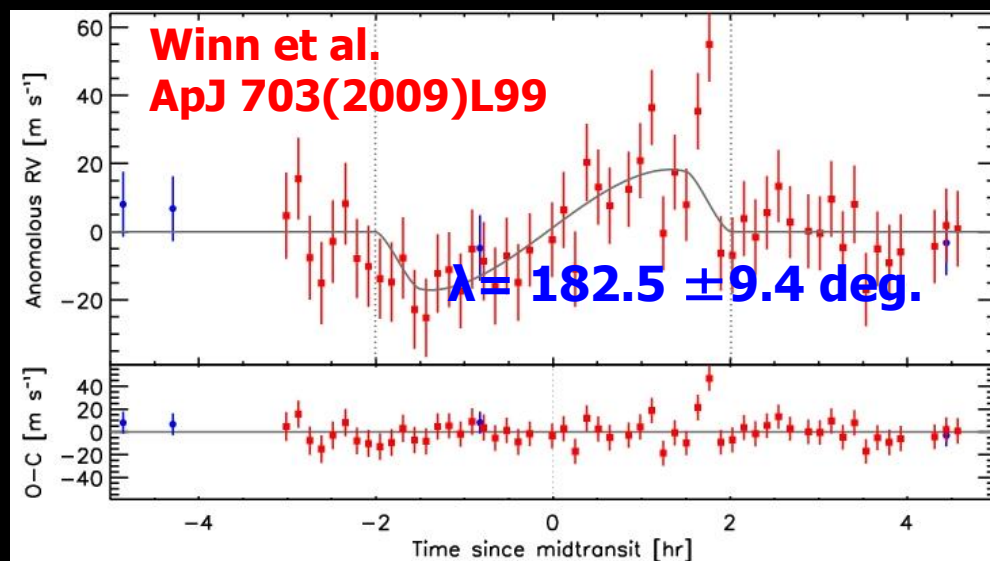
† Narita et al. 2009, PASJ, Vol.61, No.5, pp.L35-L40



† Winn et al. 2009, Journal, ApJ, Vol.703, No. 2



† Narita et al. 2009, PASJ, Vol.61, No.5, pp.L35-L40



† Winn et al. 2009, Journal, ApJ, Vol.703, No. 2

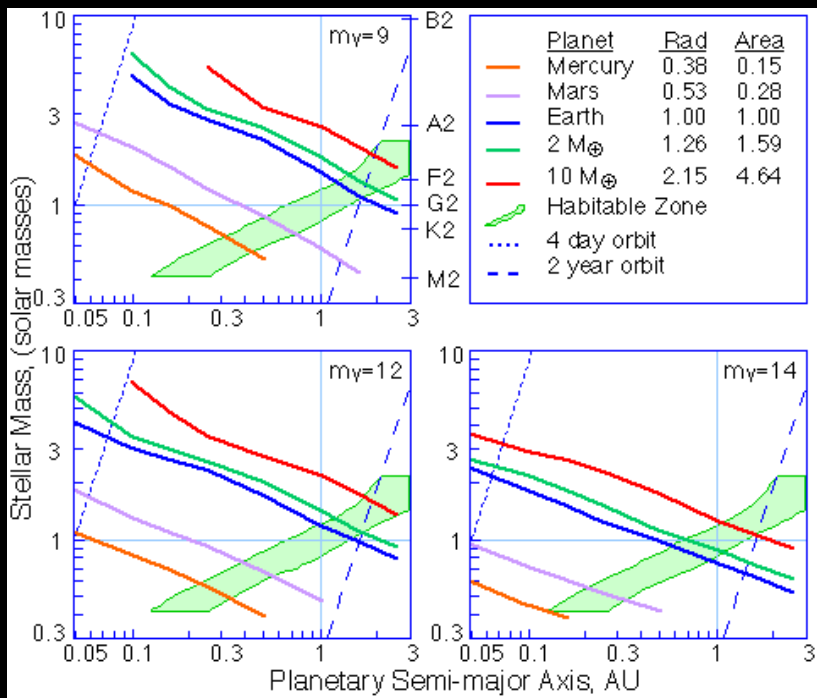
■ すばる望遠鏡の成果

■ 惑星形成・進化モデルに大きなインパクト

ケプラー衛星 (米国2009年3月6日打ち上げ)

トランジット惑星の測光サーベイ: 地球型(±ハビタブル)惑星の発見をめざす

NASA



#

NASA

<http://kepler.nasa.gov/multimedia/AnimationsandMore/animations/keplerlaunchanimations/?ImageID=43>



#

NASA

<http://kepler.nasa.gov/multimedia/Images/graphics/?ImageID=32>

第一回公開データ

706個のトランジット惑星候補 (Borucki et al. arXiv:1006.2799)

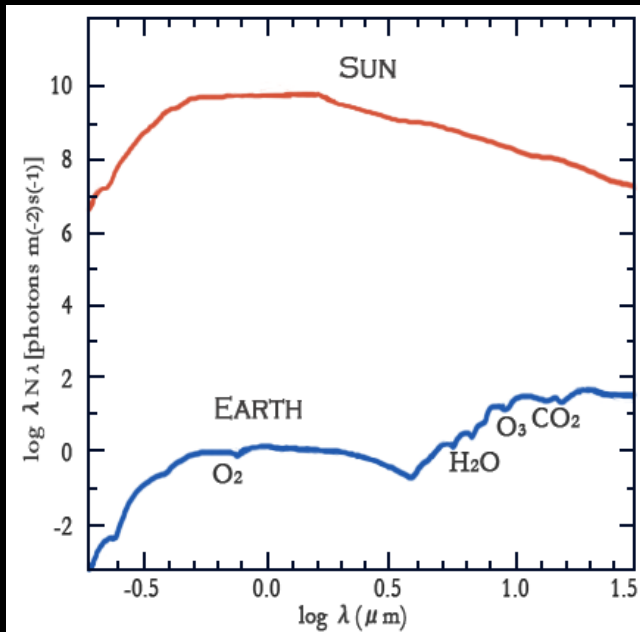
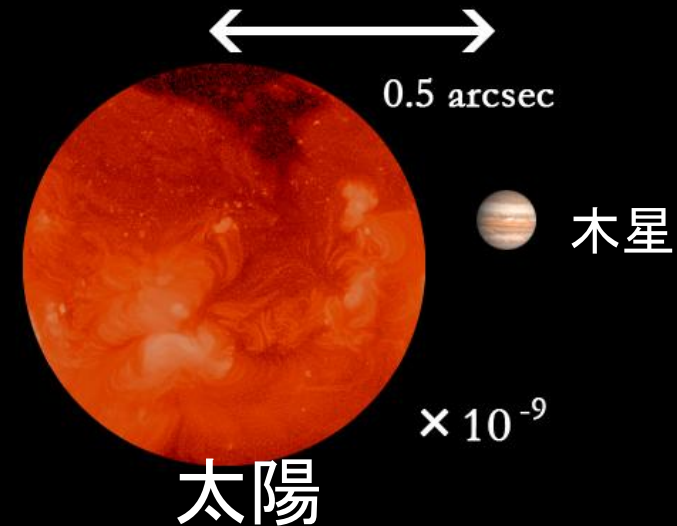
<http://kepler.nasa.gov/>

惑星は直接見えるか？

30光年先から観測した木星

明るさ: 27等級(可視域)

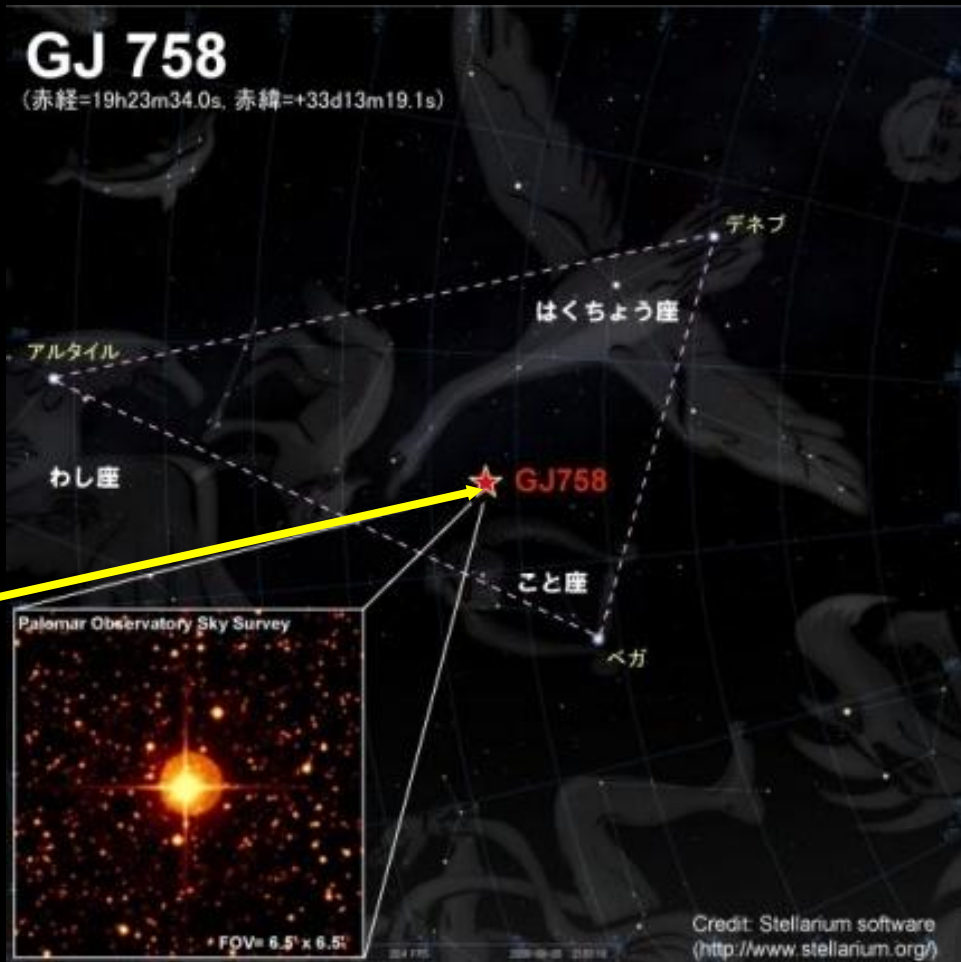
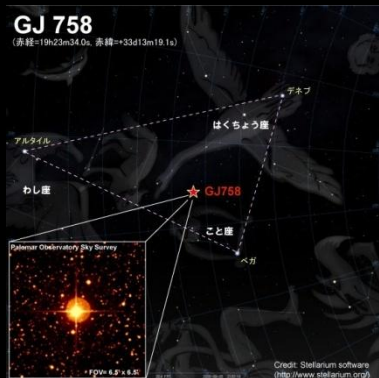
主星との角距離: 0.5秒角



地上から観測できる分解能の大きさ内で、9桁も明るい主星の隣にある27等級の暗い天体を検出する

⇒ ほとんど不可能
(だった)

世界初、太陽型の星をめぐる惑星を撮像 (国立天文台、田村元秀氏のグループ)

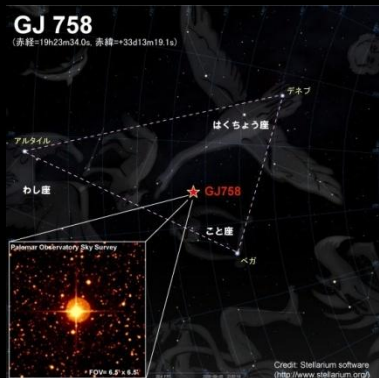


- こと座の方向
- 距離: 50光年
- G9型恒星
 - 可視光で6等星
 - 質量: 0.97太陽質量
- 明るい中心星の影響を抑える観測およびデータ解析法を駆使

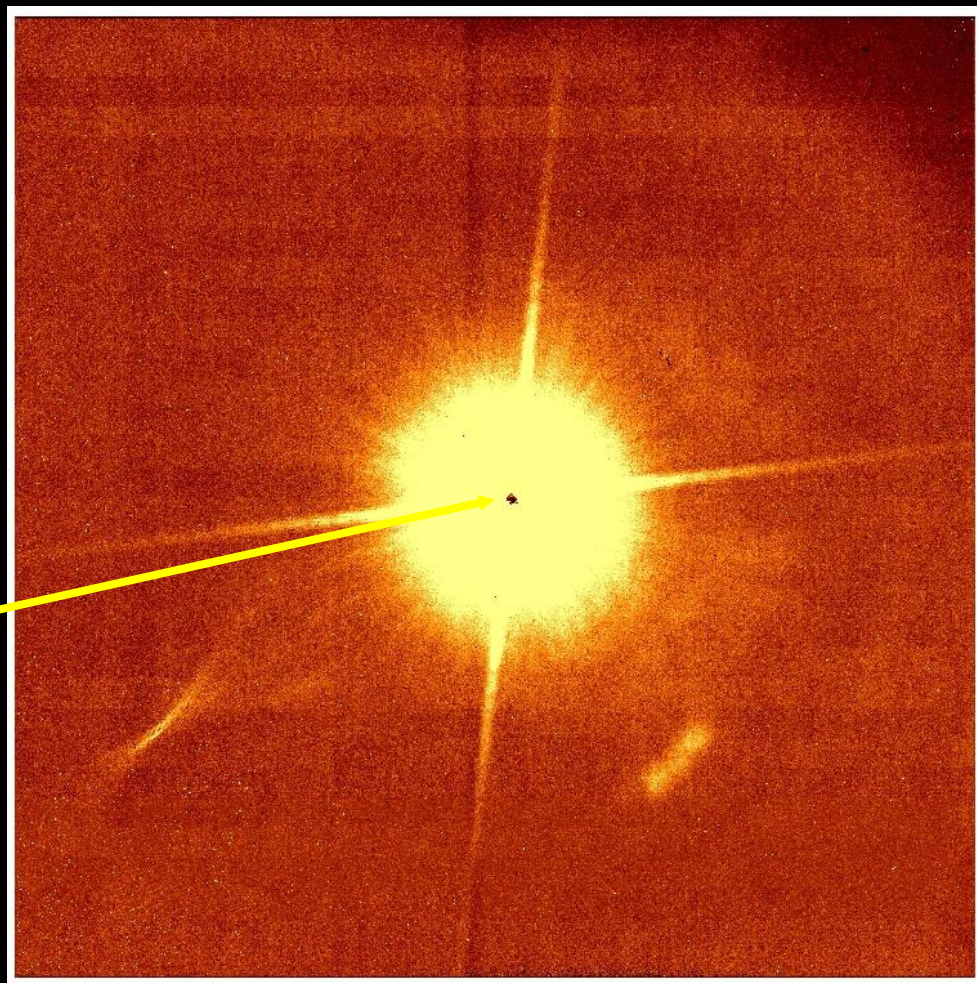
中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ
(スペckルノイズ)

惑星の放つ熱が波長1.6ミクロンの
赤外線として見えている (反射光ではない)
また、白が明るく、黒が暗い意味の色 (実際の色ではない)

世界初、太陽型の星をめぐる惑星を撮像 (国立天文台、田村元秀氏のグループ)



提供:
国立天文台
田村元秀氏

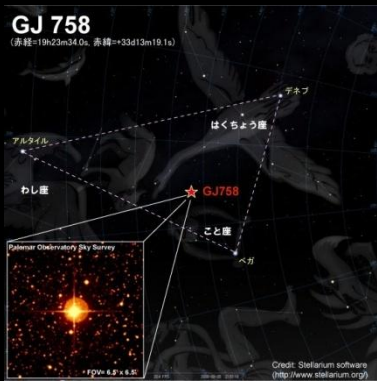


- こと座の方向
- 距離: 50光年
- G9型恒星
 - 可視光で6等星
 - 質量: 0.97太陽質量
- 明るい中心星の影響を抑える観測およびデータ解析法を駆使

中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ
(スペckルノイズ)

惑星の放つ熱が波長1.6ミクロンの
赤外線として見えている (反射光ではない)
また、白が明るく、黒が暗い意味の色 (実際の色ではない)

世界初、太陽型の星をめぐる惑星を撮像 (国立天文台、田村元秀氏のグループ)

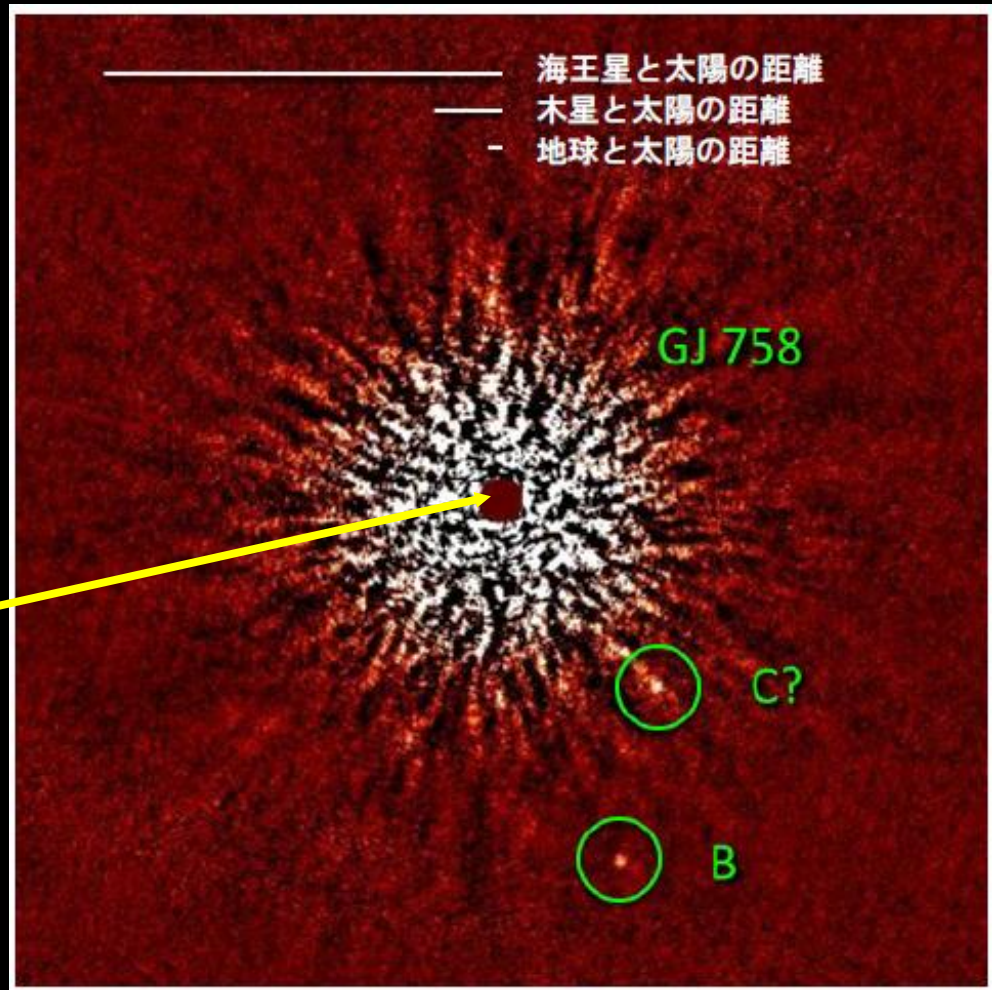


- こと座の方向
- 距離: 50光年
- G9型恒星
 - 可視光で6等星
 - 質量: 0.97太陽質量
- 明るい中心星の影響を抑える観測およびデータ解析法を駆使

中心付近の白黒の斑点は除去しきれないノイズ
(スペックルノイズ)

国立天文台 すばる望遠鏡

† http://www.naoj.org/Pressrelease/2009/12/03/j_index.html

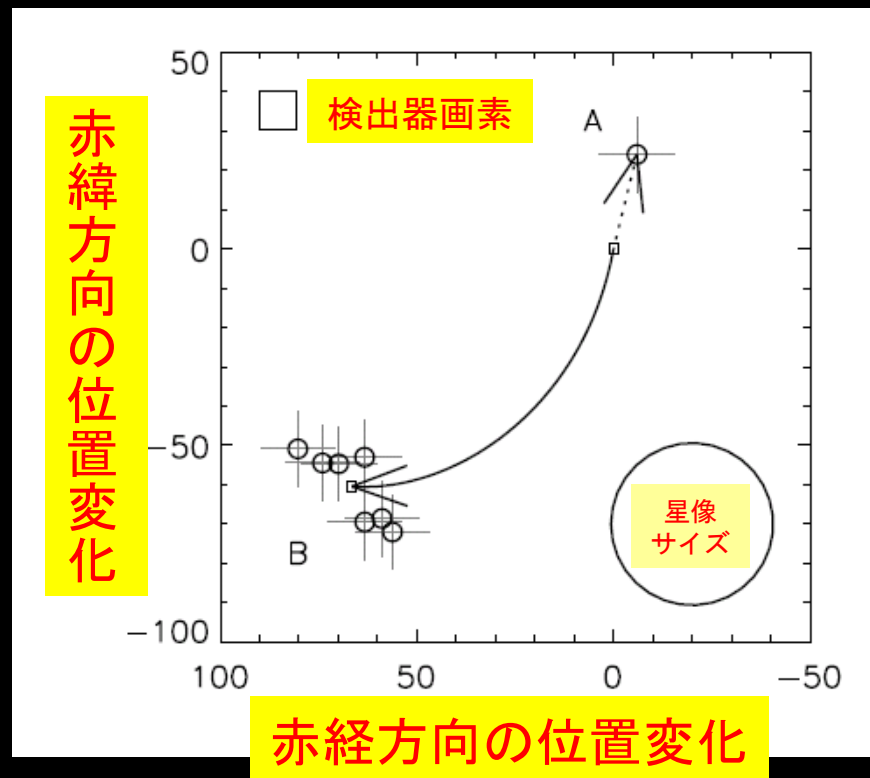
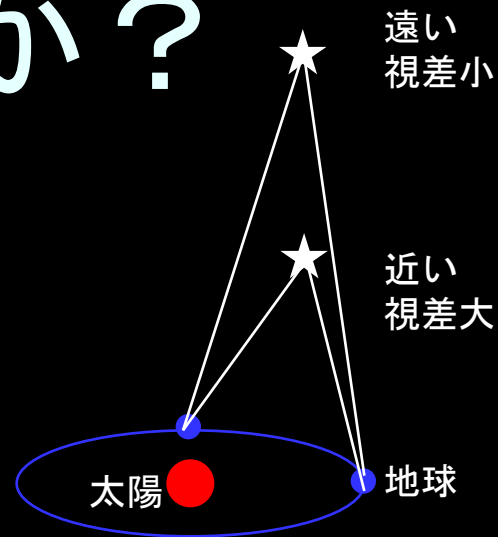


惑星の放つ熱が波長1.6ミクロンの
赤外線として見えている (反射光ではない)
また、白が明るく、黒が暗い意味の色 (実際の色ではない)

なぜ惑星と言えるか？

- 背景星ではない
 - 3ヶ月間の2回の観測で視差を検出(約0.1秒角)
 - 富士山頂にあるテニスボール一個分のズレを東京から検出
 - 視野内の7個の背景星と明確に異なる位置変動
 - 主星と同じ位置関係

(国立天文台、田村元秀氏提供)

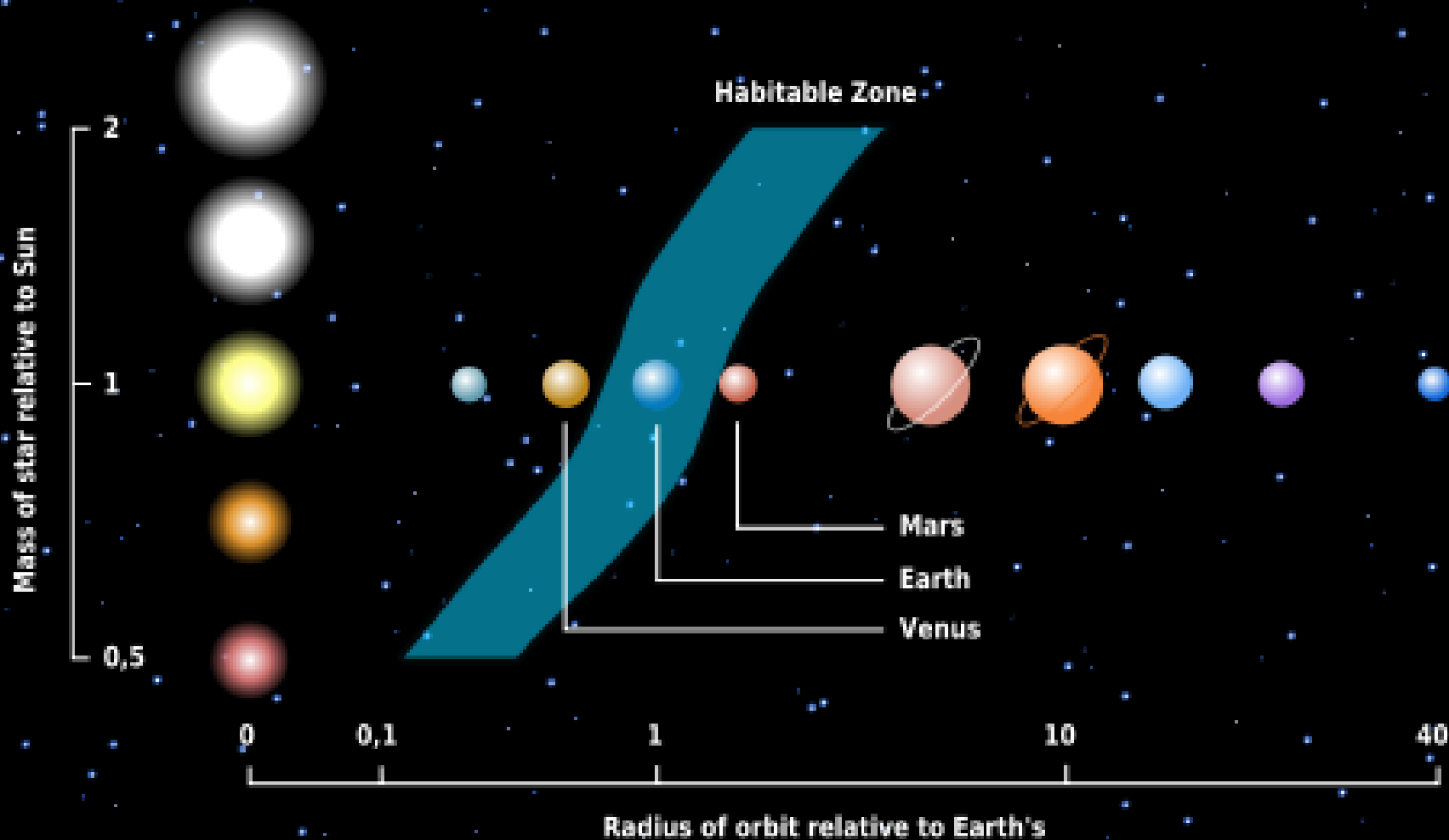


Gliese 581

- 地球から約20光年離れたM型星
 - 0.31x太陽質量、0.29x太陽半径、表面温度3500K
- 現時点で6つの惑星の存在が知られている
 - 581e : 1.9x地球質量、公転周期 3.1日
 - 581b : 15.7x地球質量、公転周期 5.4日
 - 581c : 5.4x地球質量、公転周期 12.9日
 - 581g : 3.1x地球質量、公転周期 36.6日
 - 581d : 7.1x地球質量、公転周期 66.8日
 - 581f : 7.0x地球質量、公転周期 433日
- 2010年9月29日 Gliese 581gがハビタブル惑星(水が液体として存在できる温度の領域)ではないかという報告がなされた

ハビタブル惑星(居住可能惑星)?

- **Gliese581g**: 3.1x地球質量、公転周期 36.6日



すでに学んだこと

- 惑星(系)は稀なものではなく普遍的存在
 - 太陽に似た恒星の10パーセント程度は惑星を持つ
- 惑星系の性質は多種多様
 - 太陽系と似た系もかけ離れた系も存在する
 - 惑星大気の発見
 - 惑星反射光の検出
 - 主星自転軸と惑星軌道軸とのずれ: 逆行惑星
- 様々な観測手法での相補的アプローチ
 - ドップラー法(精密分光)、トランジット法(精密測光)、重カレンズ(高時間分解能測光)、直接撮像

では次はどうする?

第二の地球はあるか？



- 生命が誕生するには
 - 適度な温度
 - 大気存在
 - 液体の水(ハビタブル:居住可能性条件)
 - +偶然？

■ 恒星の周りの地球型惑星を探せ！

†NASA

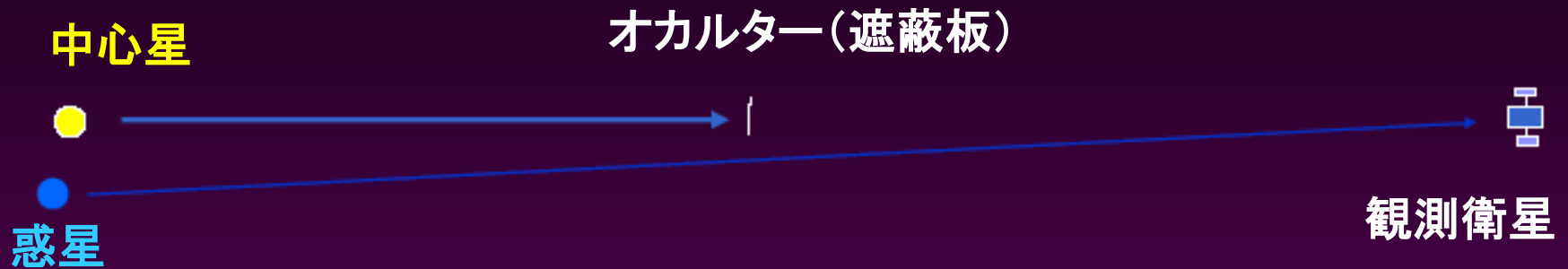
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_Earth_seen_from_Apollo_17.png

Terra衛星のMODIS検出器のデータ

<http://modarch.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.nasa.gov/home/index.html>

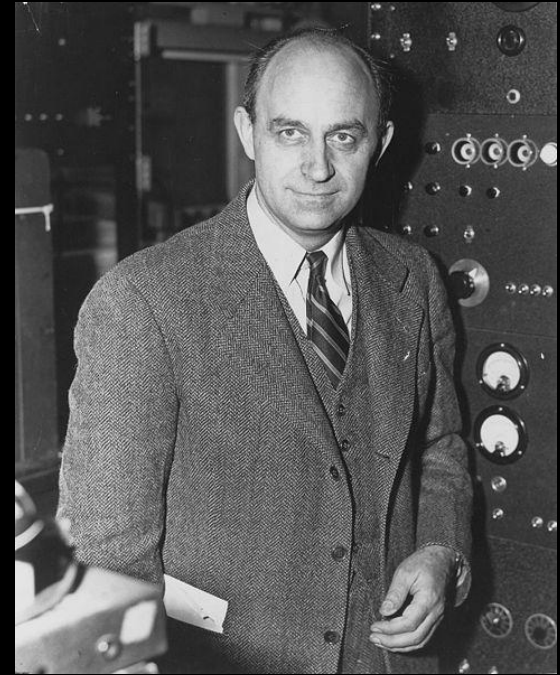
地球型惑星探査プロポーザル: *The New Worlds Mission*



<http://newworlds.colorado.edu/>

- 口径(2-4)mの可視光望遠鏡@L2点
 - 7万km先に中心星を隠すオカルター衛星をおく
 - 望遠鏡にはその星の周りの惑星から光のみが届く
 - 惑星の分光・測光モニターからのバイオマーカー検出
 - コロラド大学を中心とした米国と英国の共同計画
 - 同様の計画はプリンストン大学でも検討中(O₃)

フェルミの疑問 (フェルミのパラドクス)

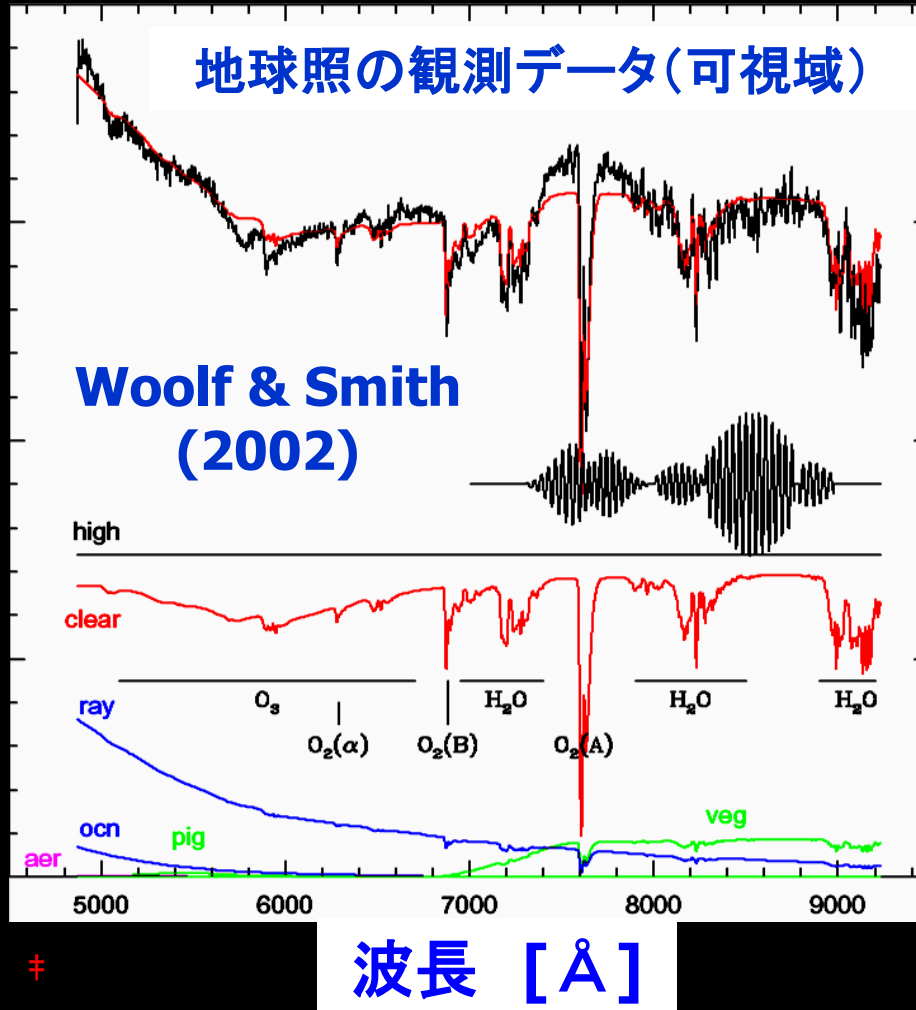


■ Where are *they*?

† http://en.wikipedia.org/wiki/File:Enrico_Fermi_1943-49.jpg

- 1950年、ロスアラモス研究所の昼食時にエンリコ・フェルミが問いかけたとされている

常識的バイオマーカー（生物存在の証拠）



■ 酸素

- Aバンド@0.76 μm
- Bバンド@0.69 μm

■ 水

- 0.72, 0.82, 0.94 μm

■ オゾン

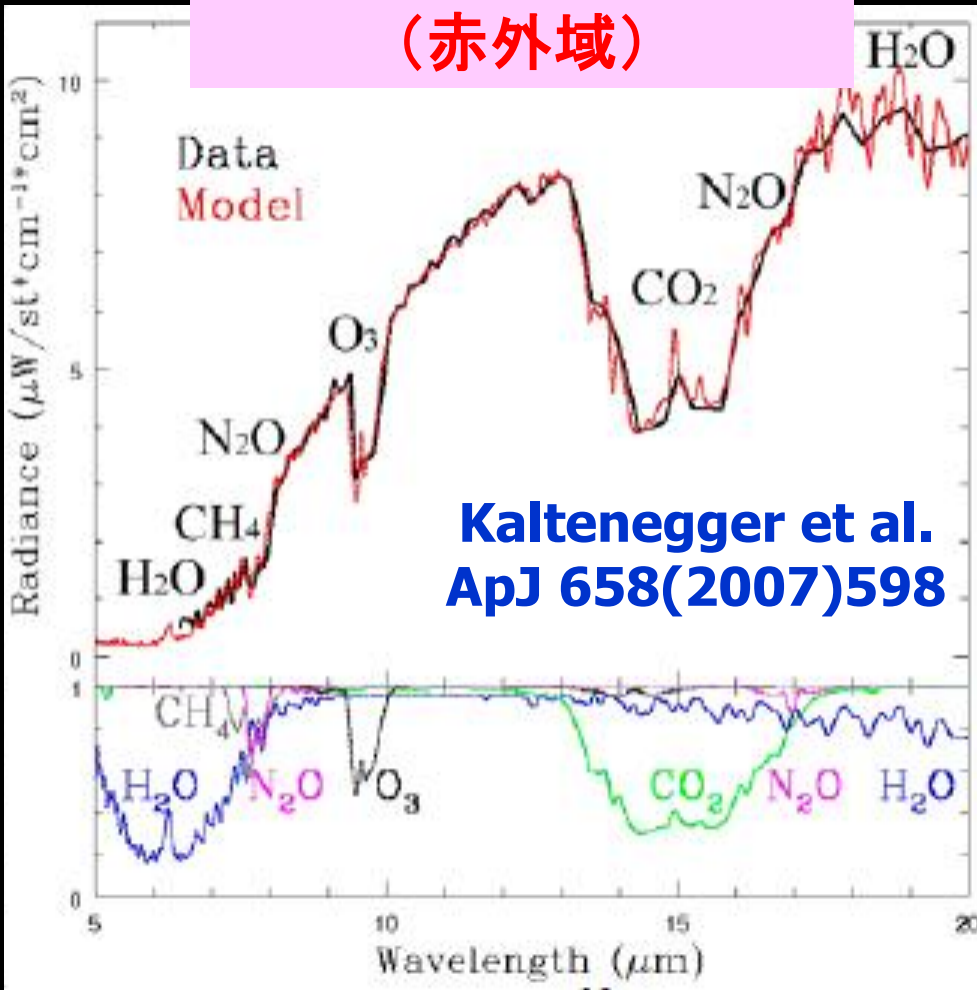
- Chappuis バンド
@ (0.5-0.7) μm
- Hartley バンド
@ (0.2-0.3) μm

Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

地球の赤外スペクトルとバイオマーカー

地球観測衛星データ
(赤外域)



- オゾン: @9.6 μm
 - 仮に酸素が少量であっても検出可能なので、酸素の良いトレーサー
- 水: <8 μm , >17 μm
- メタン@7.7 μm
 - 24億年以上前の地球にはまだほとんど酸素がなかったはず
 - メタン生成細菌由来?

⚡ Kasting et al. arXiv:0911.2936

“Exoplanet characterization and the search for life”

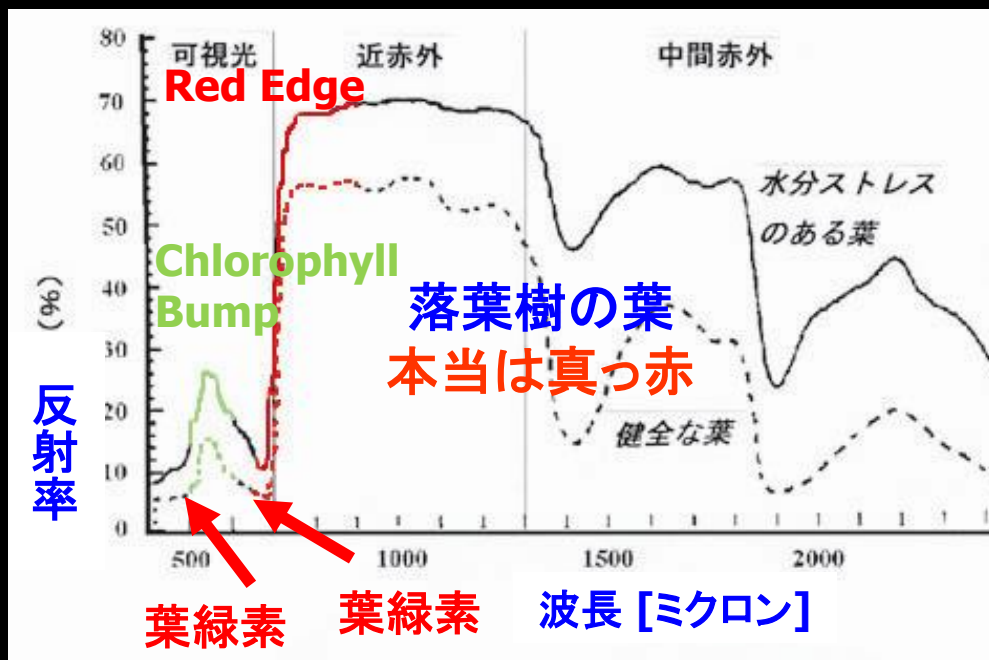
より過激(保守的?)なバイオマーカー

Extrasolar plants on extrasolar planets

■ (居住可能)地球型惑星を発見するだけでは、そこに生命があるかどうかはわからない

■ Biomarker の探求

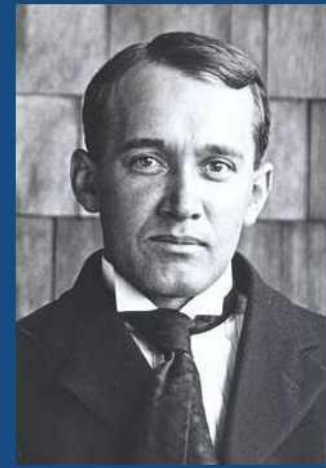
- 酸素、オゾン、水の吸収線
- 植物のred edge
- 地球のリモートセンシングではすでに確立



Seager, Turner, Schafer & Ford:
astro-ph/050330

† 出典: 農林水産省林野庁 森林総合研究所
「研究の森から」No.61 1997.09.25
<http://www.ffpri.affrc.go.jp/labs/kouho/mori/mori-61.html>

Vesto Melvin Slipher (1875-1969)



レッドエッジをバイオマーカーとして使う先駆的な試み

- “spiral nebulae”（今で言う銀河）の赤方偏移を発見
- ハッブルによる宇宙膨張の発見に本質的寄与

“Observations of Mars in 1924 made at the Lowell Observatory: II spectrum observations of Mars” PASP 36(1924)261

† http://www.lowell.edu/Research/library/paper/vm_slipher_pict.html

† http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mars_Valles_Marineris.jpeg



reflection spectrum. The Martian spectra of the dark regions so far do not give any certain evidence of the typical reflection spectrum of chlorophyl. The amount and types of vegetation required to make the effect noticeable is being investigated by suitable terrestrial exposures.

第二の地球の色から、海、陸、植生の占める面積の割合を推定する

- 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻
 - 藤井友香、河原創、樽家篤史、須藤 靖
- 東京大学気候システム研究センター
 - 福田悟、中島映至
- プリンストン大学
 - Edwin Turner

Fujii et al. *Astrophys. J* 715(2010)866, arXiv:0911.5621

<http://www.space.com/scienceastronomy/color-changing-planets-alien-life-100513.html>

地球は青かった？

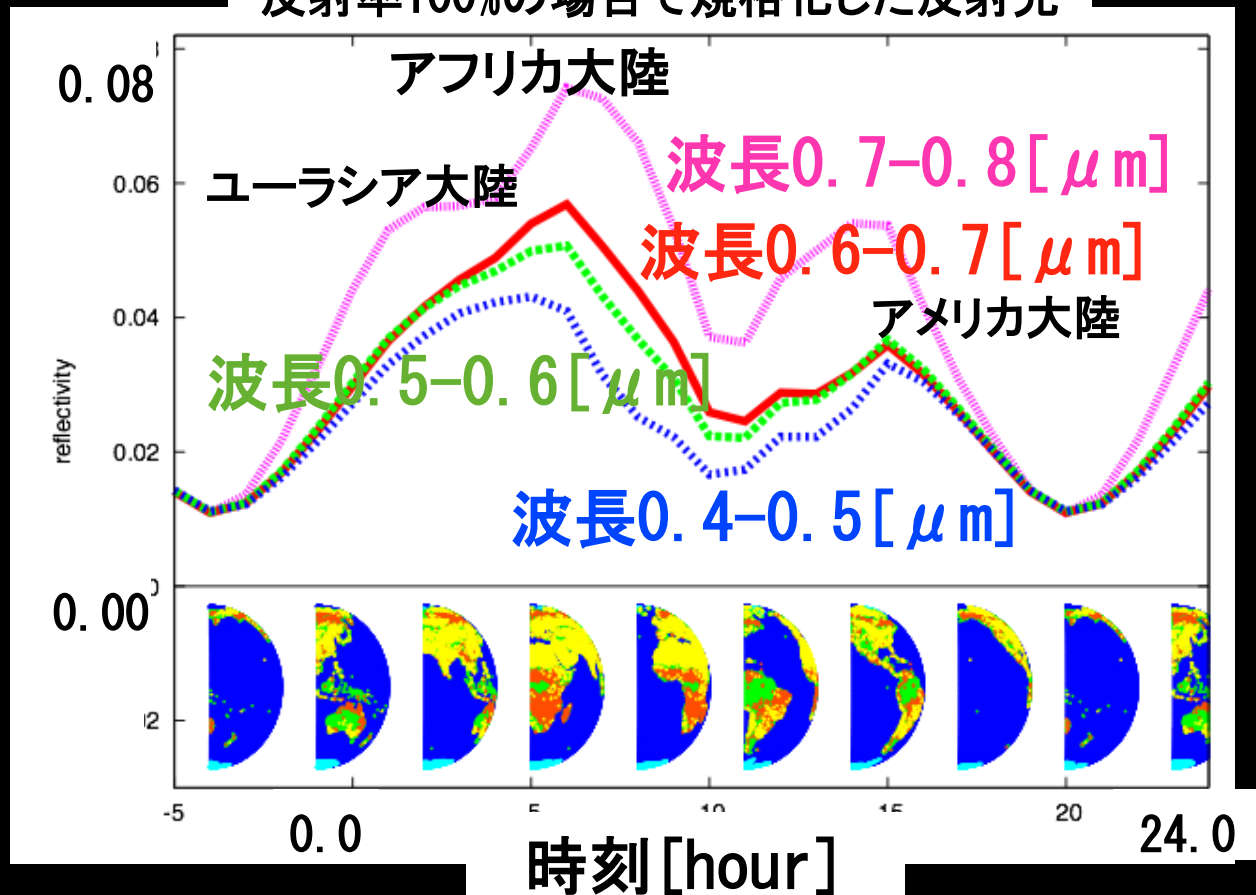
A pale blue dot



自転に伴う反射光の色の時間変動のシミュレーション

- 春分(3月)
- 自転軸に垂直な方向から観測
- 地球観測衛星のデータを用いて計算

反射率100%の場合で規格化した反射光

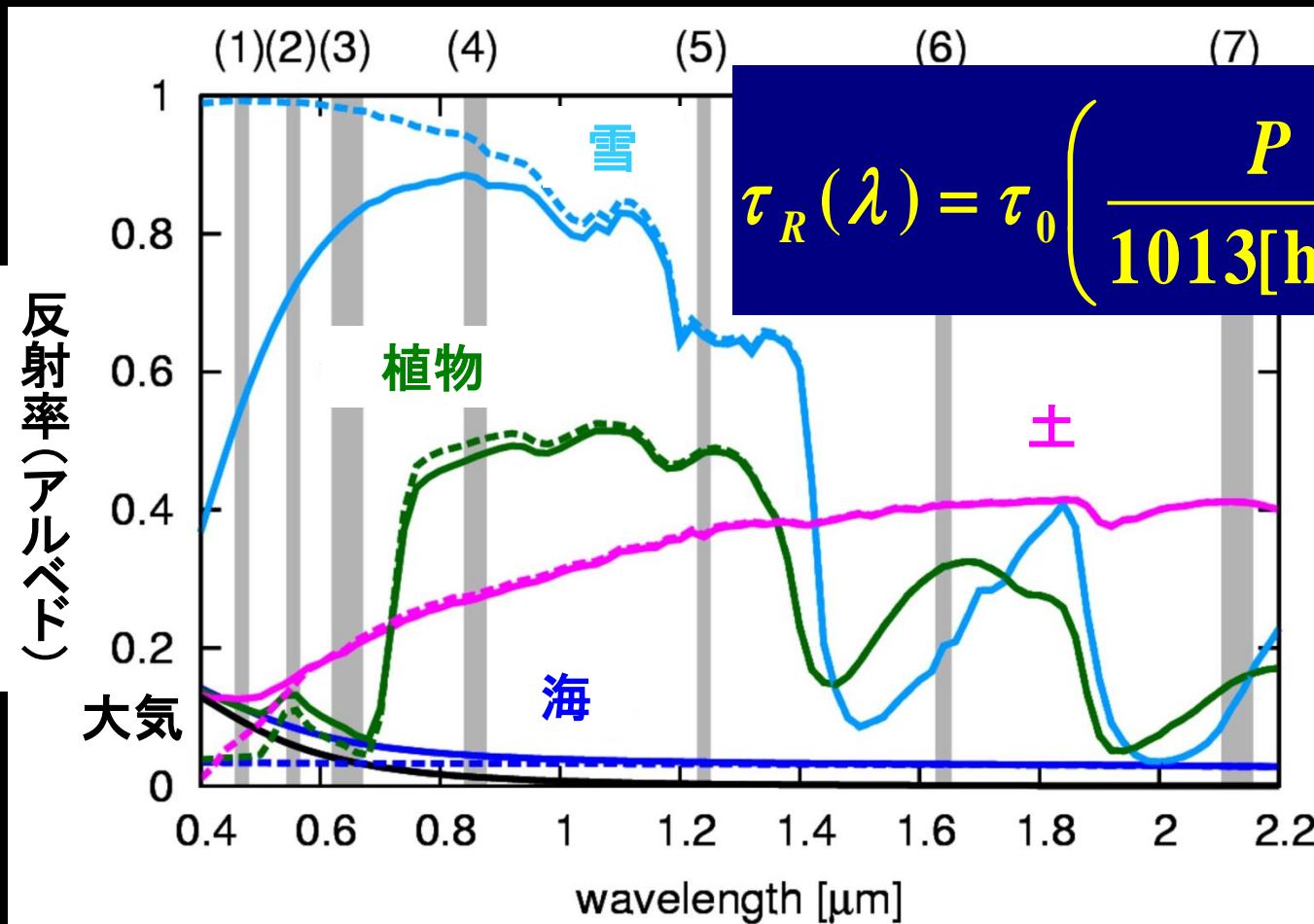


† 作成: 藤井友香

第二の地球の色：表面積の推定

- 得られた5バンドの模擬光度曲線を、等方散乱を仮定した4成分(海、土、植物、雪)だけでフィットして、それらの表面積の割合を推定する
 - 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測(各位相で1時間露出×7回)
 - 中心星の光がブロックされた理想的観測
 - 光子のポワソンノイズだけを考慮
 - 1週間の観測期間での公転の効果は無視
 - 1時間露出中の自転の効果も無視
 - 雲の存在も無視

4成分の反射率と大気の効果



† Fujii et al 2010 , A pJ, vol.715, no.2

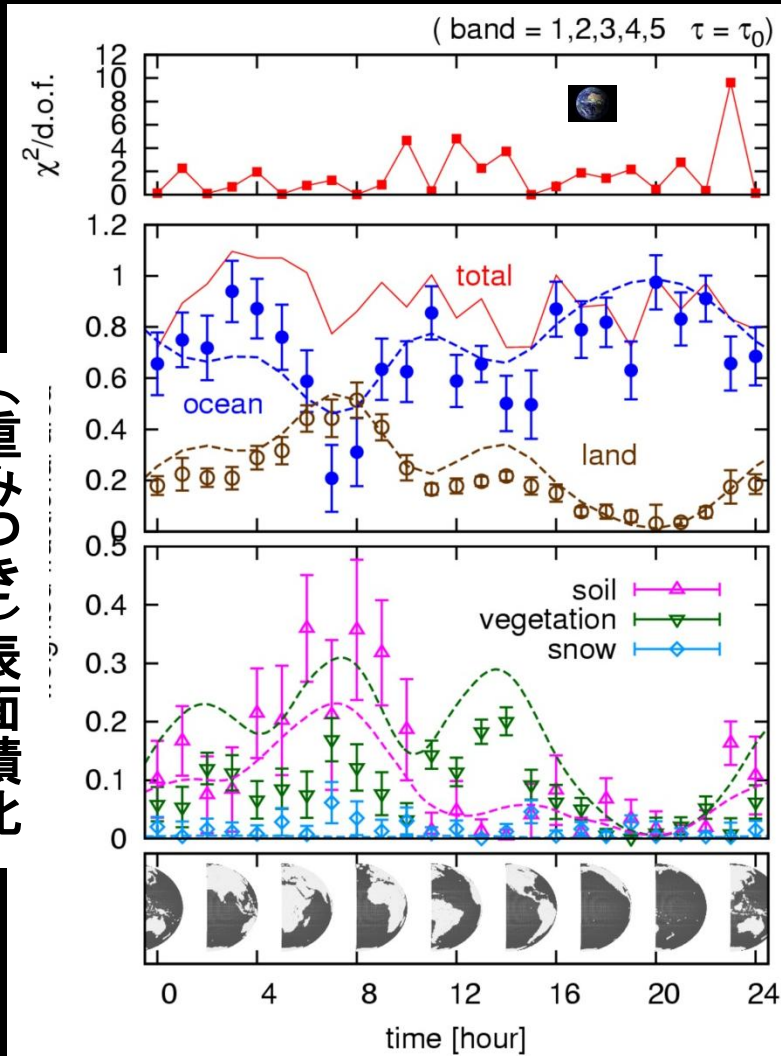
- 「空の青、海をあをにも染まずただよふ」
- 大気によるアルベドの波長依存性が重要

第二の地球の色から表面積を推定

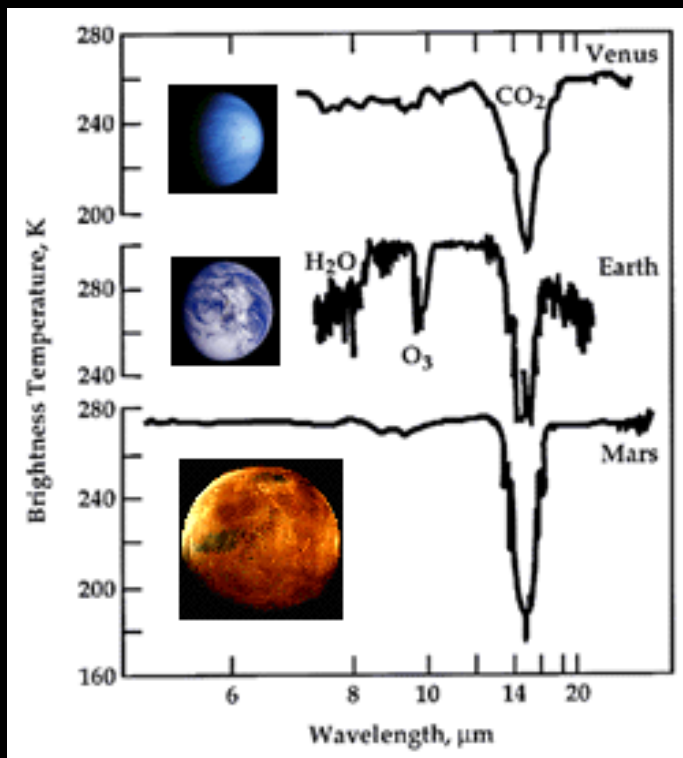
系外惑星リモートセンシング

- 中心星の光が完全にブロックできた場合
- 10pc先の地球を口径4mの宇宙望遠鏡で1週間観測
- 光子のポワソンノイズだけを考慮(雲を無視)
- レイリー散乱の一次近似
- 海、土、植物、雪の4つの成分の面積比を推定
- 結構イケテル！

(重みつき)表面積比



太陽系外惑星： そのさきにあるもの “天文学から宇宙生物学へ”



- 地球型惑星の発見
- 居住可能(ハビタブル)惑星の発見
 - 水が液体として存在する地球型惑星
- バイオマーカーの提案と検出
 - 酸素、水、オゾン、核爆発、、
- 超精密分光観測の成否が鍵！
 - 惑星の放射・反射・吸収スペクトルを
中心星から分離する

直接見てくることができない距離にある惑星に
生物が存在するかどうかを天文観測だけで説得
できるか？ Biomarker を特定できるか？

予想もできない展開が待っているはず

■ 最初に起こるのはどれだろう

- 地球外生物の痕跡の天文学的検出
- 実験室での人工生物の誕生
- 地球外文明からの交信の検出
- 地球文明の破滅（いったん発達した文明は、疫病、核戦争、資源の枯渇などの要因で不安定）

■ 交信できるレベルまで安定に持続した地球外文明の有無を知ることは、我々の未来を知ることに等しい

地球外比較文明論

- 毎日あたりまえであると考えていたことも、実は奇妙な習慣なのかもしれない
 - なぜお箸で食べるのか、なぜ納豆を食べるのか
 - 外国人との交流を通じて初めて不思議であることに気づく
- いくつかの例
 - 言語は存在するか、また音を用いてコミュニケーションするか
 - n という概念はあるか、その数値を知っているか
 - 男女の違いはあるか
 - 芸術が存在するか、それらに感動するか
 - 生きていて楽しいか
 - 「死」が存在するか
- 交信は非現実的(片道100年?)であるにしても、考えてみるのは面白い