

■本資料のご利用にあたって(詳細は「利用条件」をご覧ください)

本資料には、著作権の制限に応じて次のようなマークを付しています。
本資料をご利用する際には、その定めるところに従ってください。

***** : 著作権が第三者に帰属する著作物であり、利用にあたっては、この第三者より直接承諾を得る必要があります。

CC : 著作権が第三者に帰属する第三者の著作物であるが、クリエイティブ・コモンズのライセンスのもとで利用できます。

 : パブリックドメインであり、著作権の制限なく利用できます。

なし : 上記のマークが付されていない場合は、著作権が東京大学及び東京大学の教員等に帰属します。無償で、非営利的かつ教育的な目的に限って、次の形で利用することを許諾します。

- I 複製及び複製物の頒布、譲渡、貸与
- II 上映
- III インターネット配信等の公衆送信
- IV 翻訳、編集、その他の変更
- V 本資料をもとに作成された二次的著作物についての I からIV

ご利用にあたっては、次のどちらかのクレジットを明記してください。

東京大学 UTokyo OCW 学術俯瞰講義
Copyright 2015, 永原裕子

The University of Tokyo / UTokyo OCW The Global Focus on Knowledge Lecture Series
Copyright 2015, Hiroko Nagahara

5/12/2015

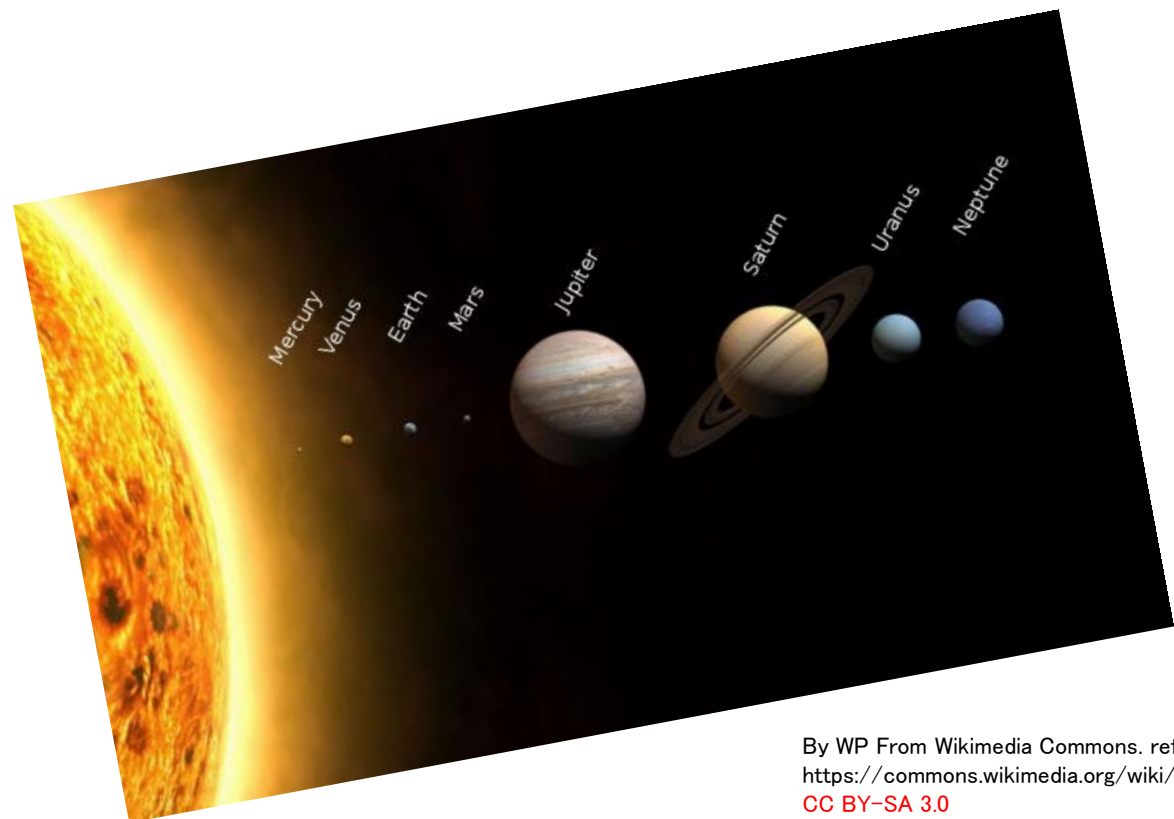
学術俯瞰講義 ”宇宙・物質・社会”

宇宙の進化と 惑星や生命を作るもの

理学系研究科 地球惑星科学専攻
永原 裕子

目次

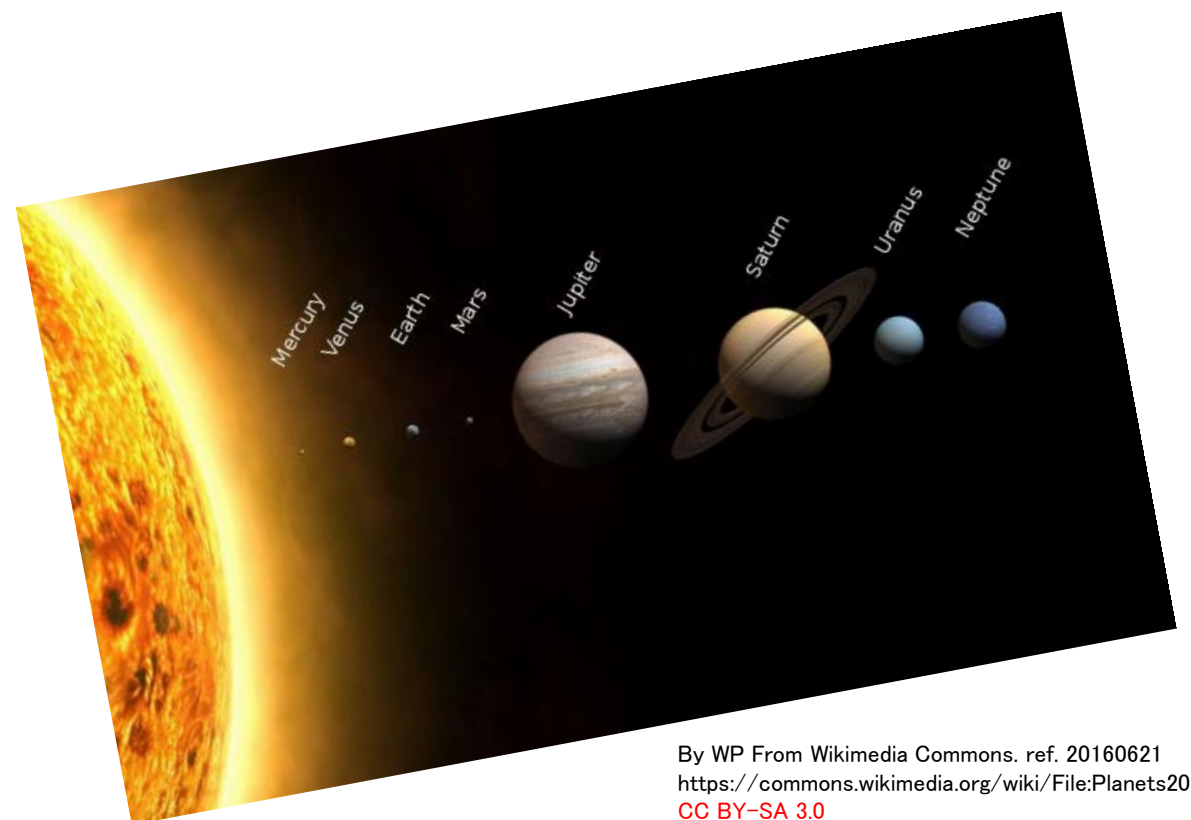
1. イントロダクション
2. 宇宙の進化と惑星や生命の材料
3. 星の誕生と惑星形成
4. 惑星を作る物質
5. 生命を作る物質



By WP From Wikimedia Commons. ref. 20160621
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013.svg>
CC BY-SA 3.0

目次

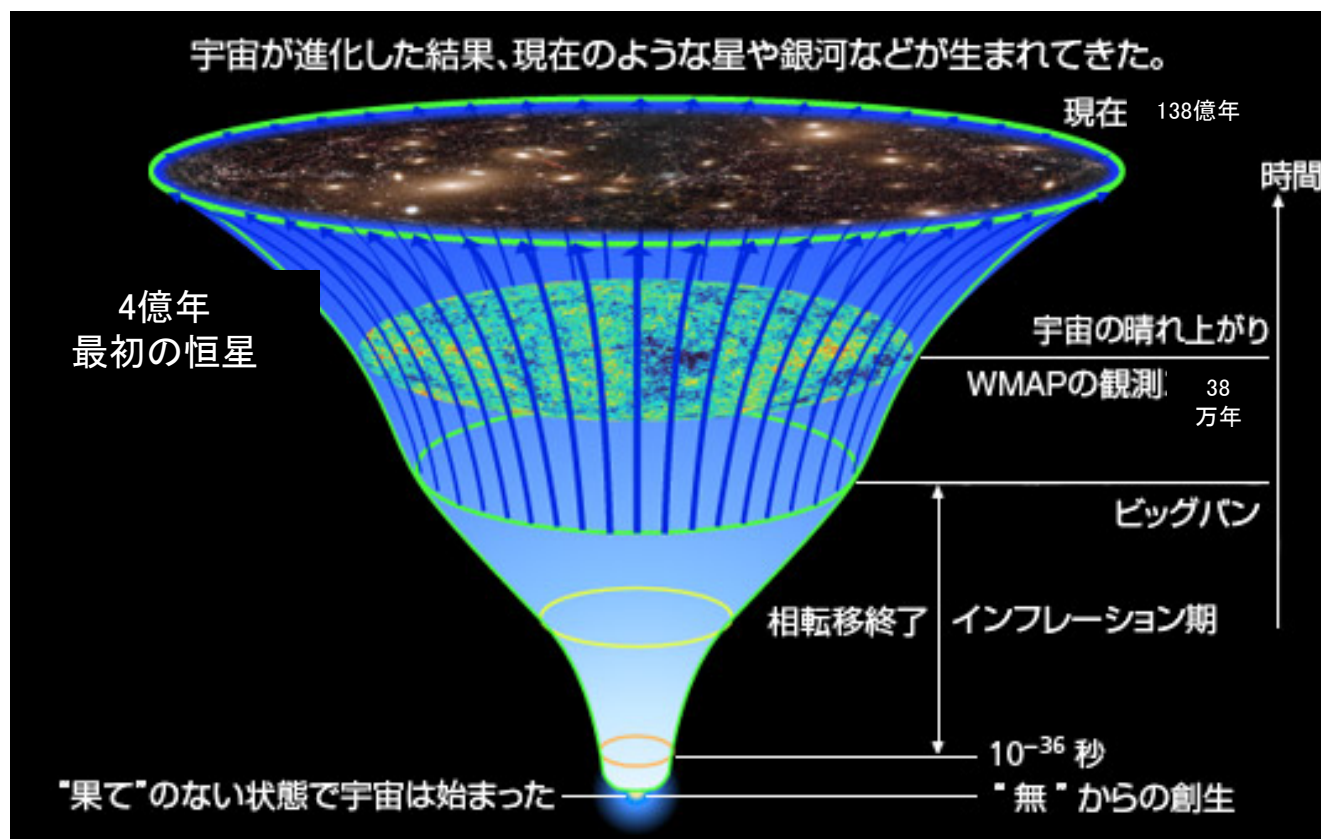
1. イン트로ダクション
2. 宇宙の進化と惑星や生命の材料
3. 星の誕生と惑星形成
4. 惑星を作る物質
5. 生命を作る物質



By WP From Wikimedia Commons. ref. 20160621
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013.svg>
CC BY-SA 3.0

20世紀の科学の最大の成果

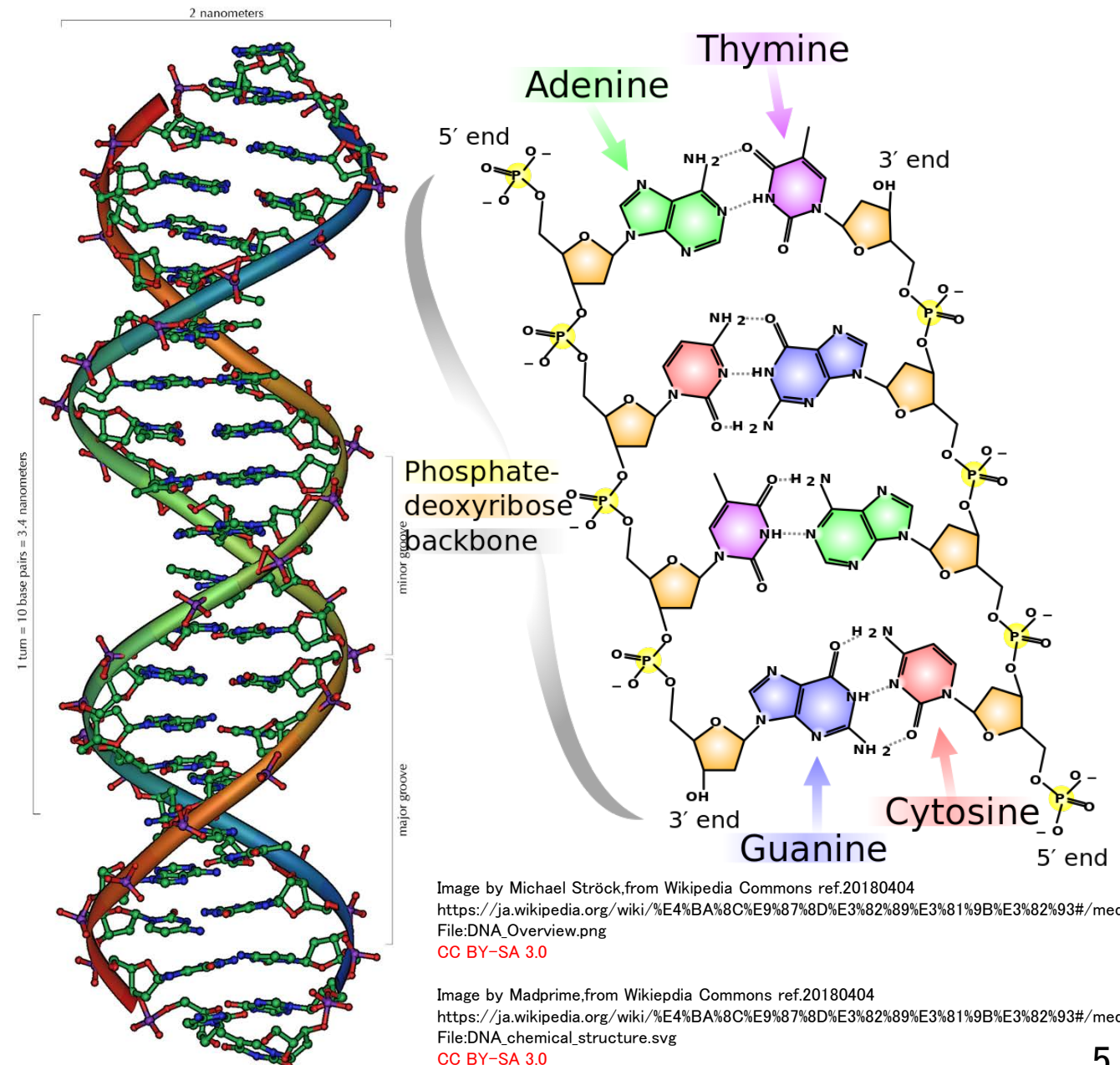
宇宙膨張の発見 宇宙には始まりがあった



*

提供: 学術振興会学術システム研究センター長佐藤勝彦先生

二重らせんの発見 DNAによる遺伝情報伝達



宇宙と生命をつなぐもの 惑星

宇宙膨張の発見
宇宙には始まりがあった

二重らせんの発見
DNAによる遺伝情報伝達

宇宙が進化した結果、現在のよう

4億年
最初の恒星

惑星

Thymine

Adenine

3' end

5' end

Guanine

Cytosine

2 nanometers

* 提供: 学術振興会学術システム研究センター長佐藤勝彦先生

* ©NASA

Image by Michael Ströck, from Wikipedia Commons ref.20180404
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E9%87%8D%E3%82%89%E3%81%9B%E3%82%93#/media/File:DNA_Overview.png
CC BY-SA 3.0

Image by Madprime, from Wikipedia Commons ref.20180404
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E4%BA%8C%E9%87%8D%E3%82%89%E3%81%9B%E3%82%93#/media/File:DNA_chemical_structure.svg
CC BY-SA 3.0

21世紀の科学の最前線：宇宙と生命

ALMA望遠鏡
チリ アタカマ砂漠

- 宇宙で最初の銀河
- 惑星系形成
- 生命起源分子

NASA astrobiology
– Life in the Universe –

NASAと全米12研究所
Understand the nature and
distribution of habitable
environments in the universe



*

©NASA/Topspin Design Works

FIG. 1. Artist's representation of a habitable planet orbiting another star. Courtesy of Cheryse Triano, Topspin Design Works.6 <https://astrobiology.nasa.gov/roadmap/> (2008)

https://nai.nasa.gov/media/medialibrary/2013/09/AB_roadmap_2008.pdf

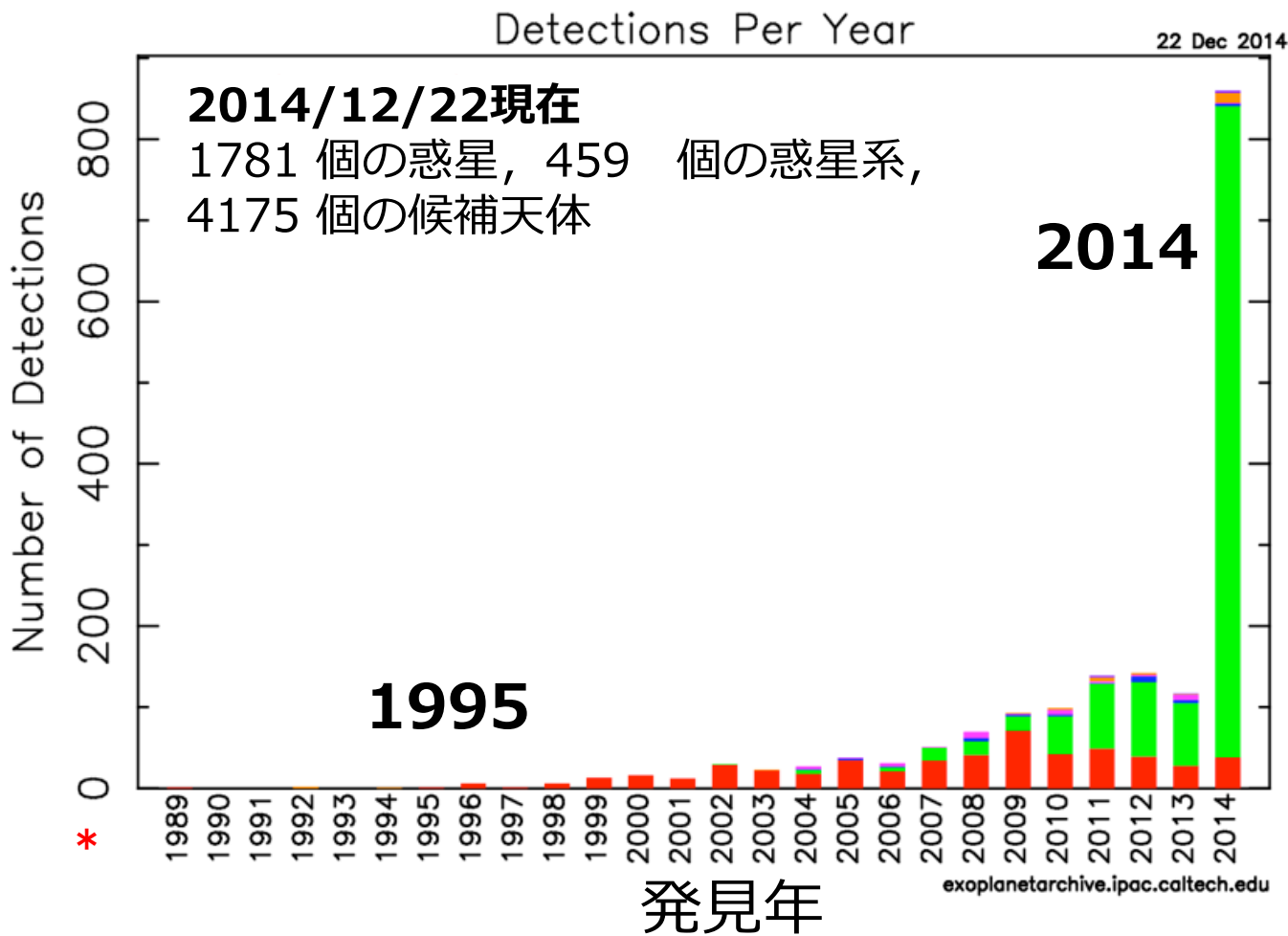
なぜ今 宇宙と生命 なのか？

- 古代より人類のもつ究極のテーマであった
- 系外惑星研究の爆発的進展
宇宙における惑星存在の普遍性
大型望遠鏡の新設
- 太陽系内惑星探査の進展・宇宙物質研究の進展
隕石中にアミノ酸発見
火星・タイタン・エンセラダス・エウロパ
- 地質学研究の進展
地球と生命の共進化の様相が明らかに

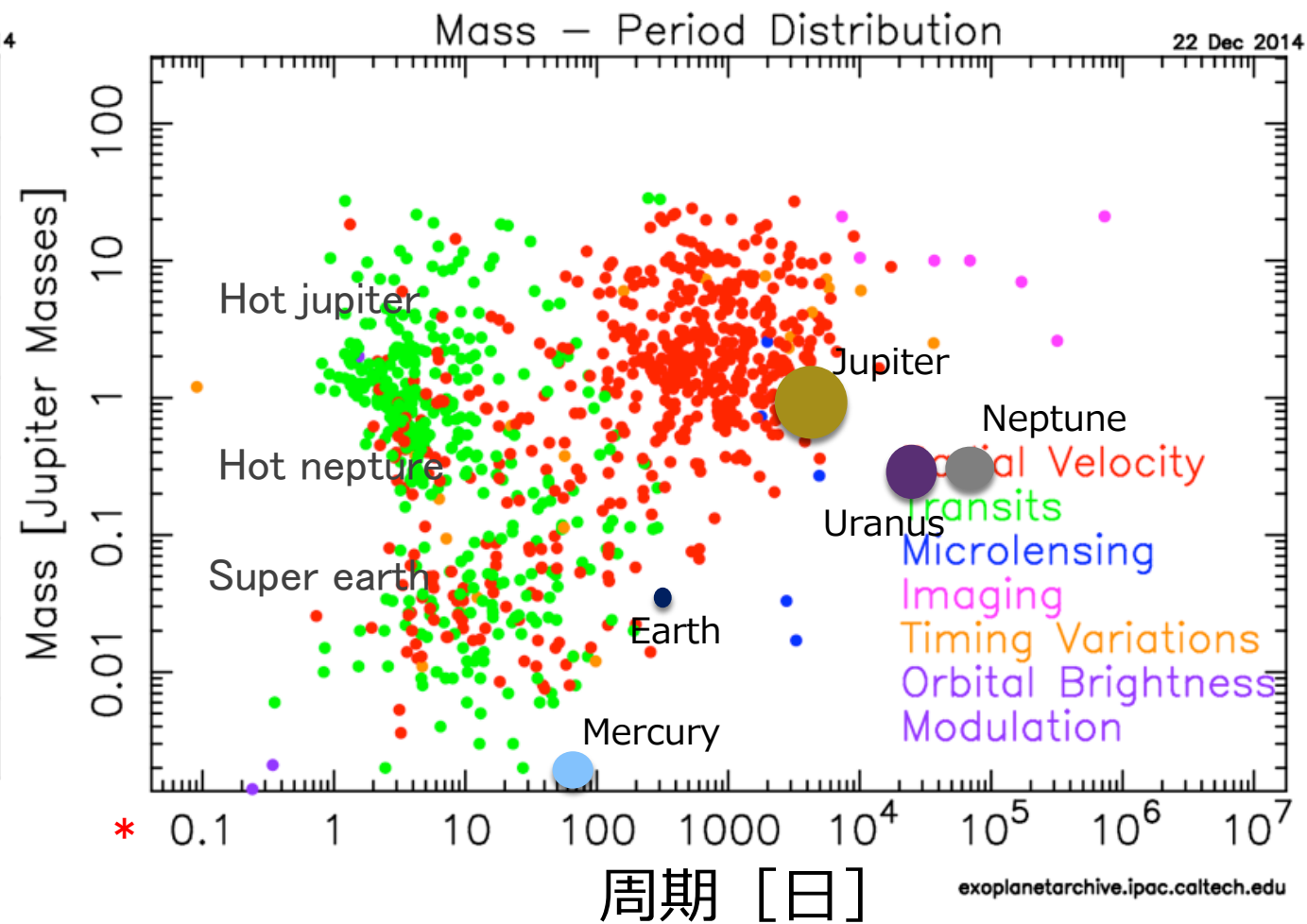
系外惑星 exoplanets

太陽系以外の惑星

個数



惑星質量 (M_{Jupiter})



Courtesy NASA/JPL-Caltech

系外惑星

- 地球によく似た惑星も存在
大きさ, 成分?
観測のターゲット ハビタブル惑星(表層に水が存在)
生命存在の証拠は?
- 似ても似つかぬ惑星も存在
大きいのに密度がきわめて小さい
何でできているのか?
- まだまだ多様な惑星が発見される可能性
従来の惑星形成理論の不十分点が次々と明らかに

今日の話

太陽系の材料は何で、どのように形成されたのか？

惑星と生命はどのように進化してきたのか？

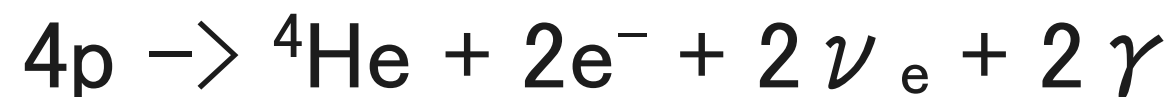
- 真実は誰にもわからない：
過去に起きたこと
(他の惑星系においても)直接見ることができない
仮に見えても、時間スケールが人間の人生と合わない
実験してみることもできない
- そこで、その疑問にチャレンジするため
理論的に研究
宇宙の天文観測
過去を記録している実際の証拠(隕石, 彗星)
太陽系以外の惑星たちとの比較

恒星

- Hガスが自己重力で束縛
- 中心で核融合（自ら光る）
- 大きさが同じならどの恒星も同じ構造

”自己重力で束縛”： 外的な力も容器も存在せずに、ガスが飛散してしまわず、重力のために集合

核融合： 陽子原子核が融合して、ヘリウム原子核が形成



陽子

電子

ニュートリノ

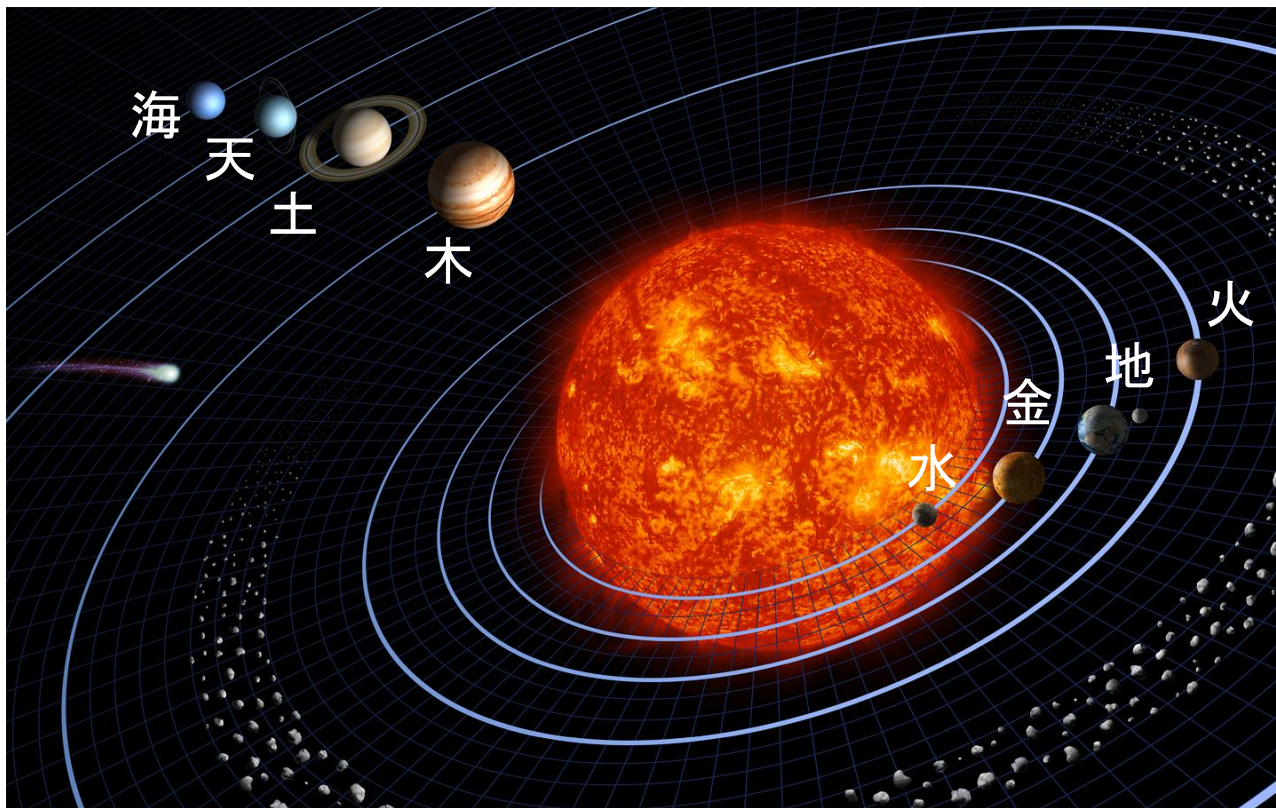
光子

この際エネルギーが発生

それぞれの粒子の質量を入れ、右辺から左辺を引くと、反応による質量変化 Δm が求まる. アインシュタイン相対性理論 $E = mc^2$ を用いると, $\Delta E = \Delta mc^2 = 26.65 \text{ MeV} = 4.32 \times 10^{-18} \text{ J}$. 太陽中心では $3.8 \times 10^{26} \text{ w/sec}$

惑星

- 恒星を回る褐色矮星以下の大きさの天体
- 恒星の光を反射して明るく見える
- 太陽系の場合：自己重力で丸い，周囲の軌道为天体を一掃している

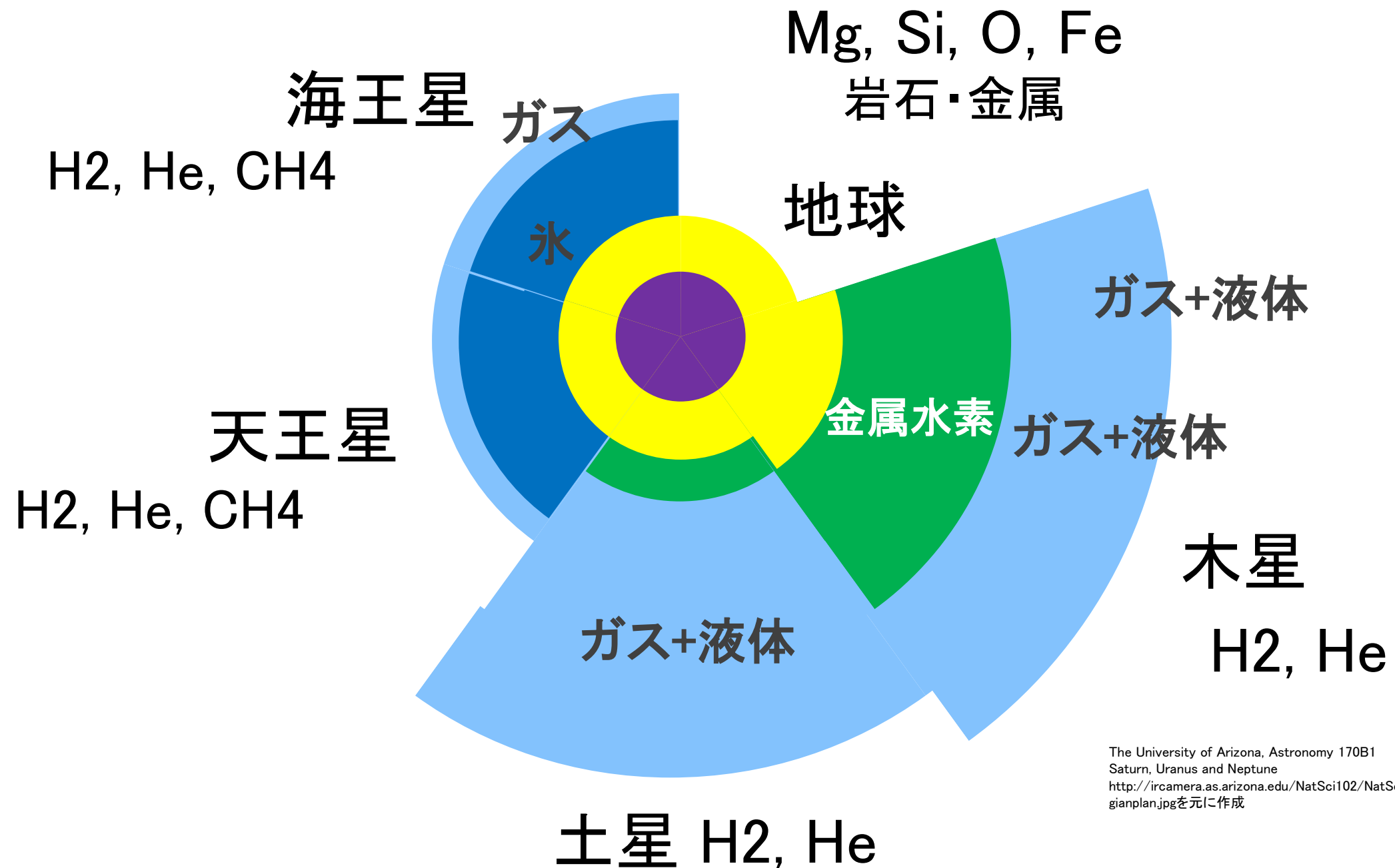


見かけの違い：
表層の物質(元素)・状態(固体/気体)の違い



惑星

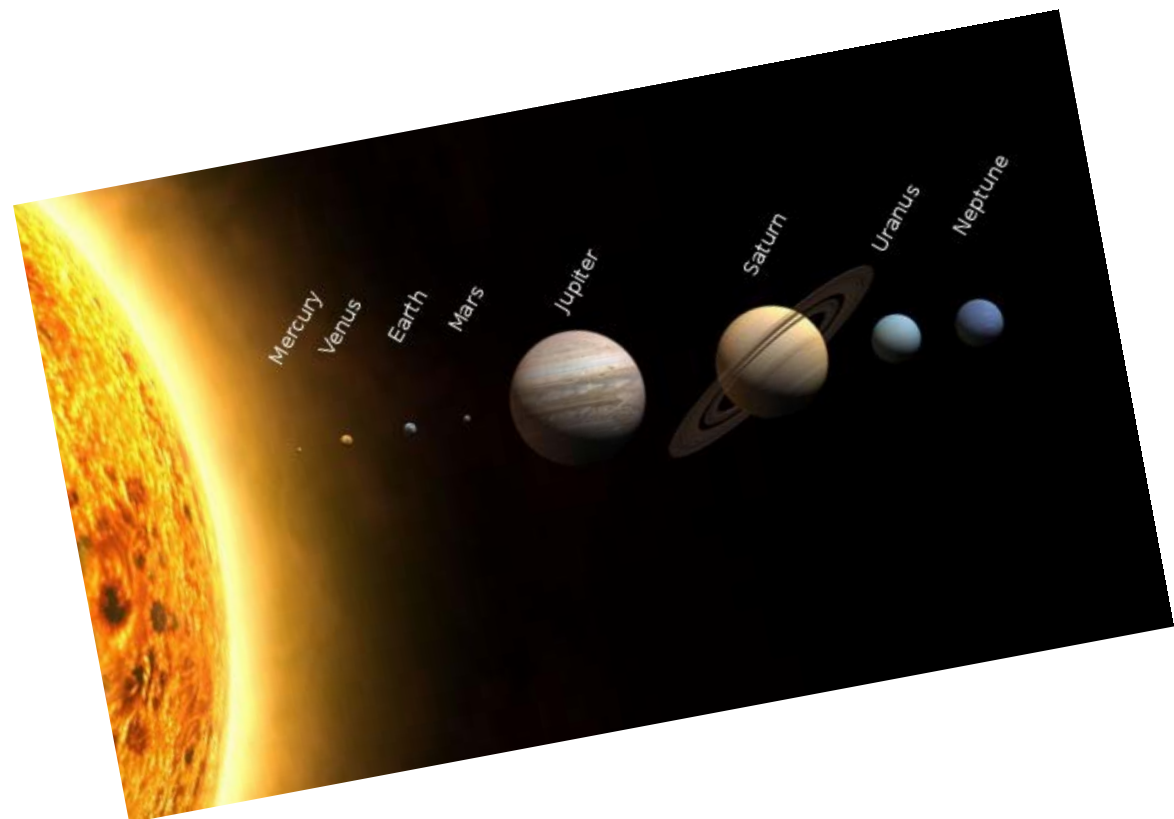
惑星ごとに組成・内部構造多様



The University of Arizona, Astronomy 170B1
Saturn, Uranus and Neptune
<http://ircamera.as.arizona.edu/NatSci102/NatSci/lectures/saturn.htm>
gianplan.jpgを元に作成

目次

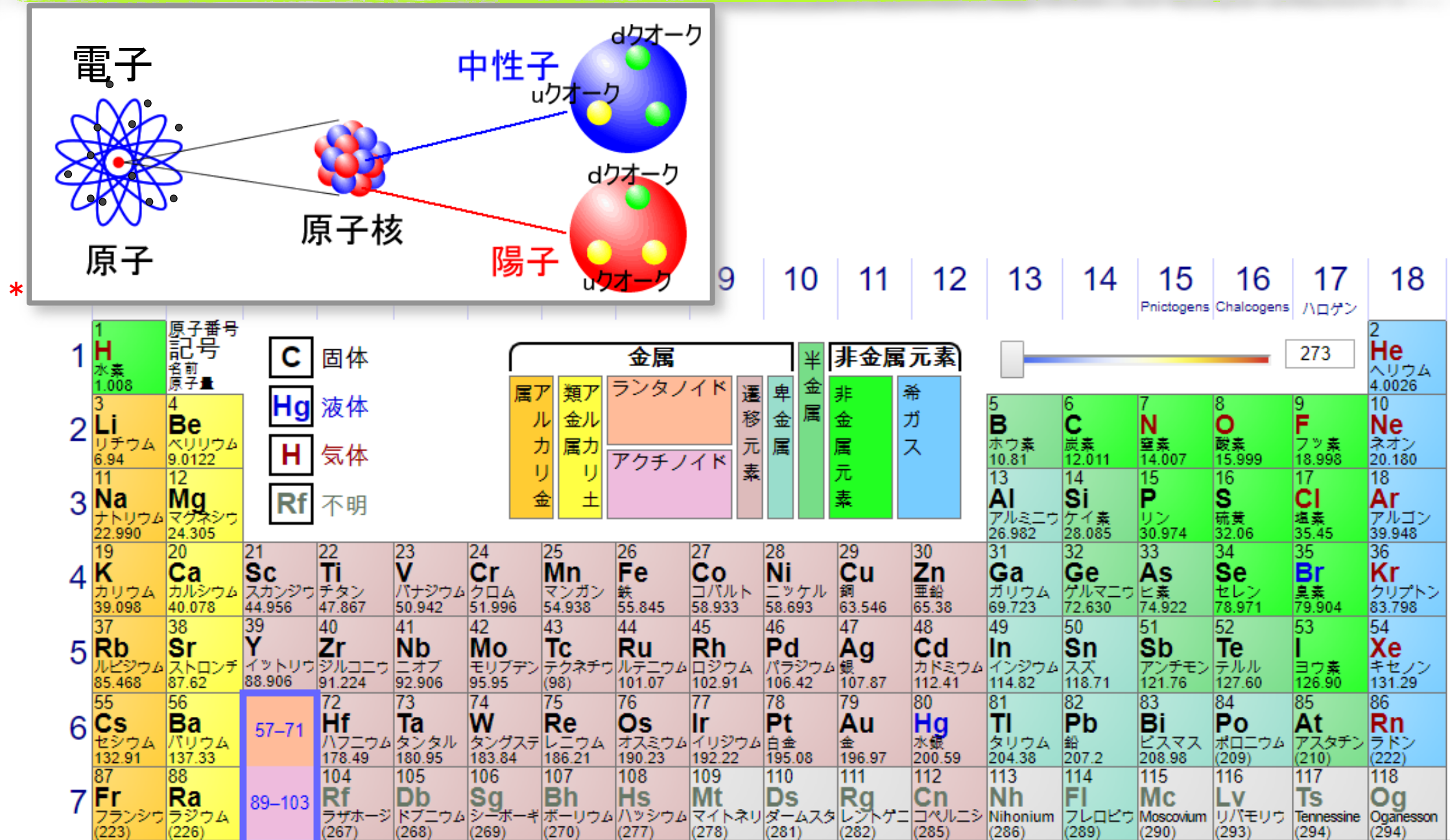
1. イントロダクション
2. 太陽系の材料
3. 星の誕生と惑星形成
4. 惑星を作る物質
5. 生命を作る物質



By WP From Wikimedia Commons. ref. 20160621
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013.svg>
CC BY-SA 3.0

元素

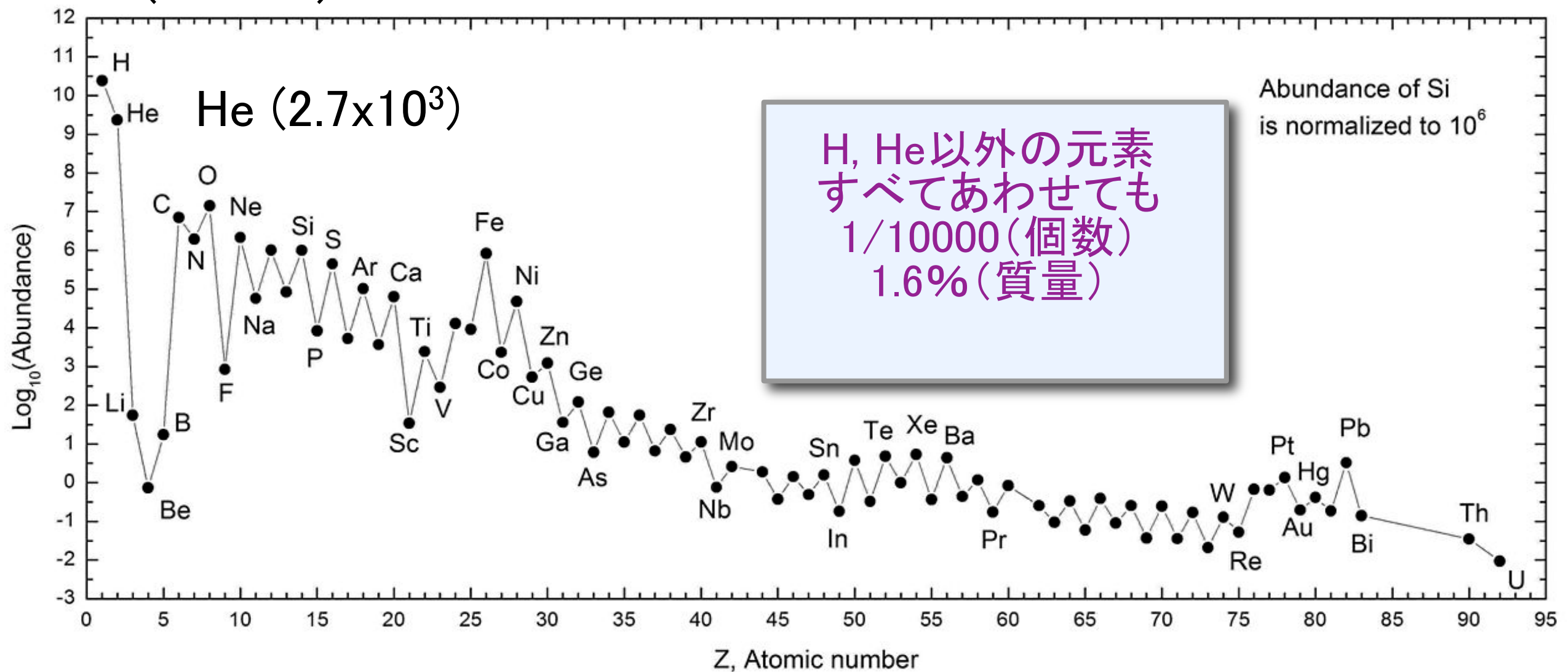
電気の歴史イラスト館
原子核の基礎知識
<http://www.geocities.jp/hiroyuki0620785/k0dennsikotai/3atomicnucleus.htm>



太陽系(=近くの宇宙)元素存在度

元素の存在量(相対比)をSi=1
として現したもの
(太陽光球～太陽系～現在から
100億年以内の宇宙)

H (2.8×10^4)



H, He以外の元素
すべてあわせても
1/10000(個数)
1.6%(質量)

Abundance of Si
is normalized to 10^6

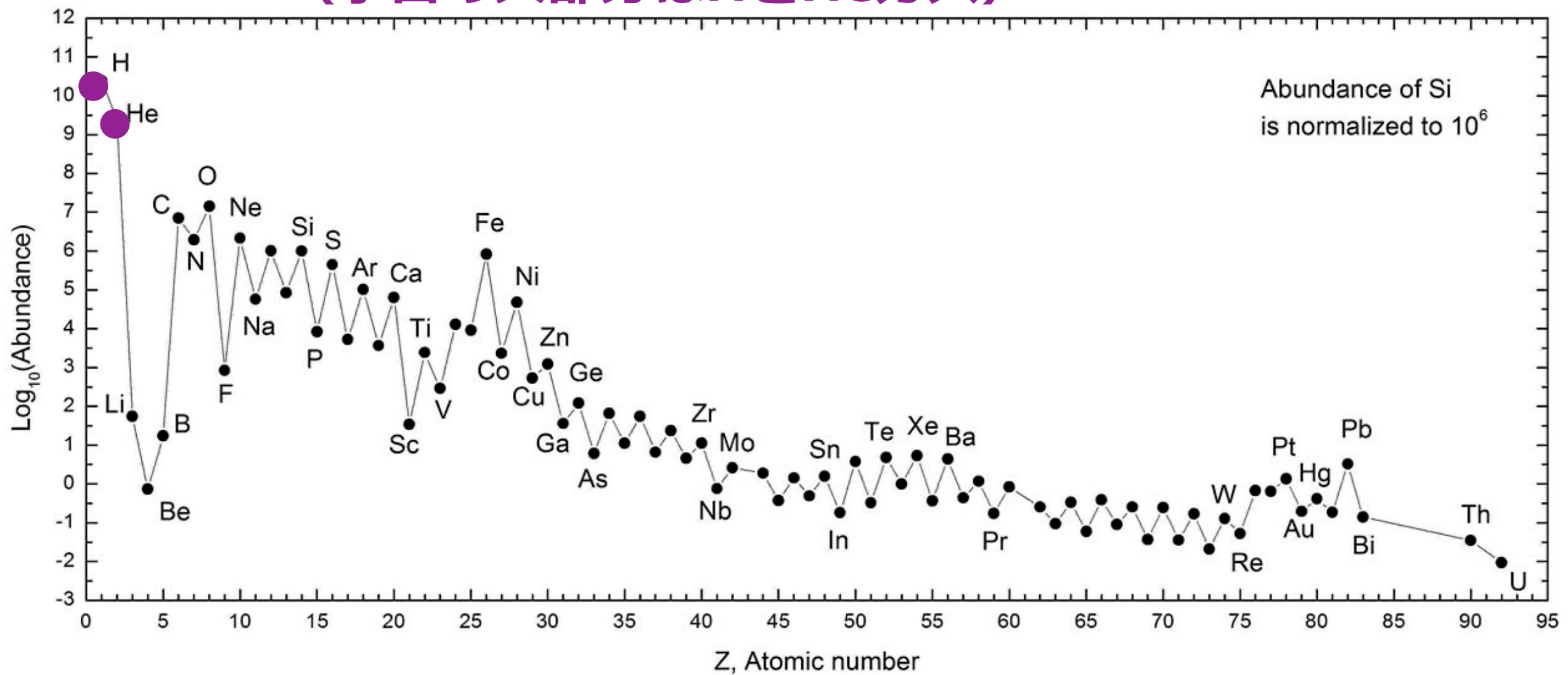
By Orionus From Wikimedia Commons. ref. 20160712.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarSystemAbundances.jpg?uselang=ja>
 CC BY-SA 3.0

原子番号

太陽系 (=近くの宇宙) 元素存在度

H, He : 宇宙主要元素
(宇宙の大部分はHとHeガス)

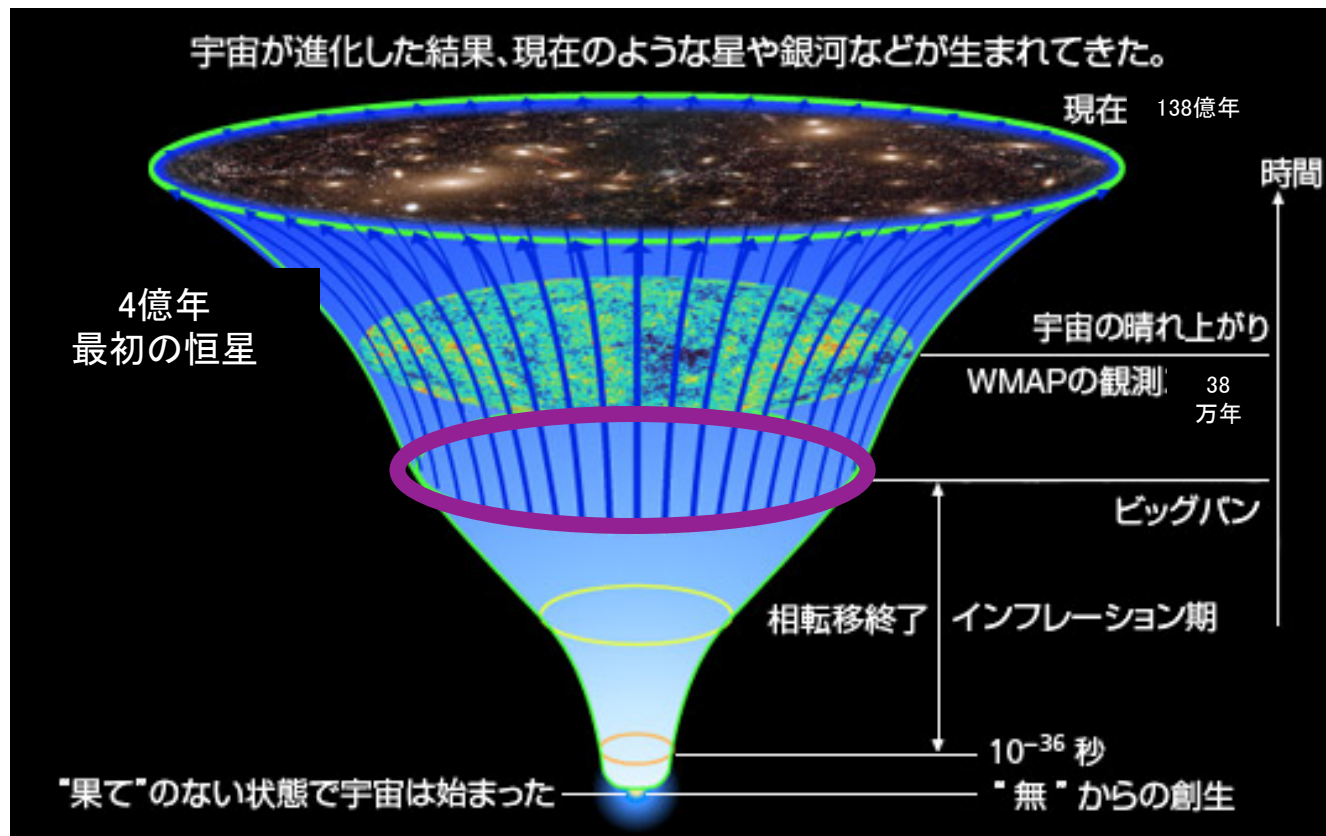
存在量 (Si = 1)



原子番号

H, He の起源

宇宙の始まり(概念図)



*

提供:学術振興会学術システム研究センター長佐藤勝彦先生

➤ ビッグバンから1秒

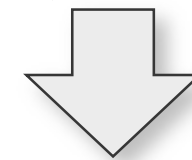
中性子 (n) の数が固定

➤ ビッグバンから100秒

陽子(H⁺)と中性子から重水素²D,
D2個からHeが合成

➤ ビッグバンから10分

中性子はすべてHeに



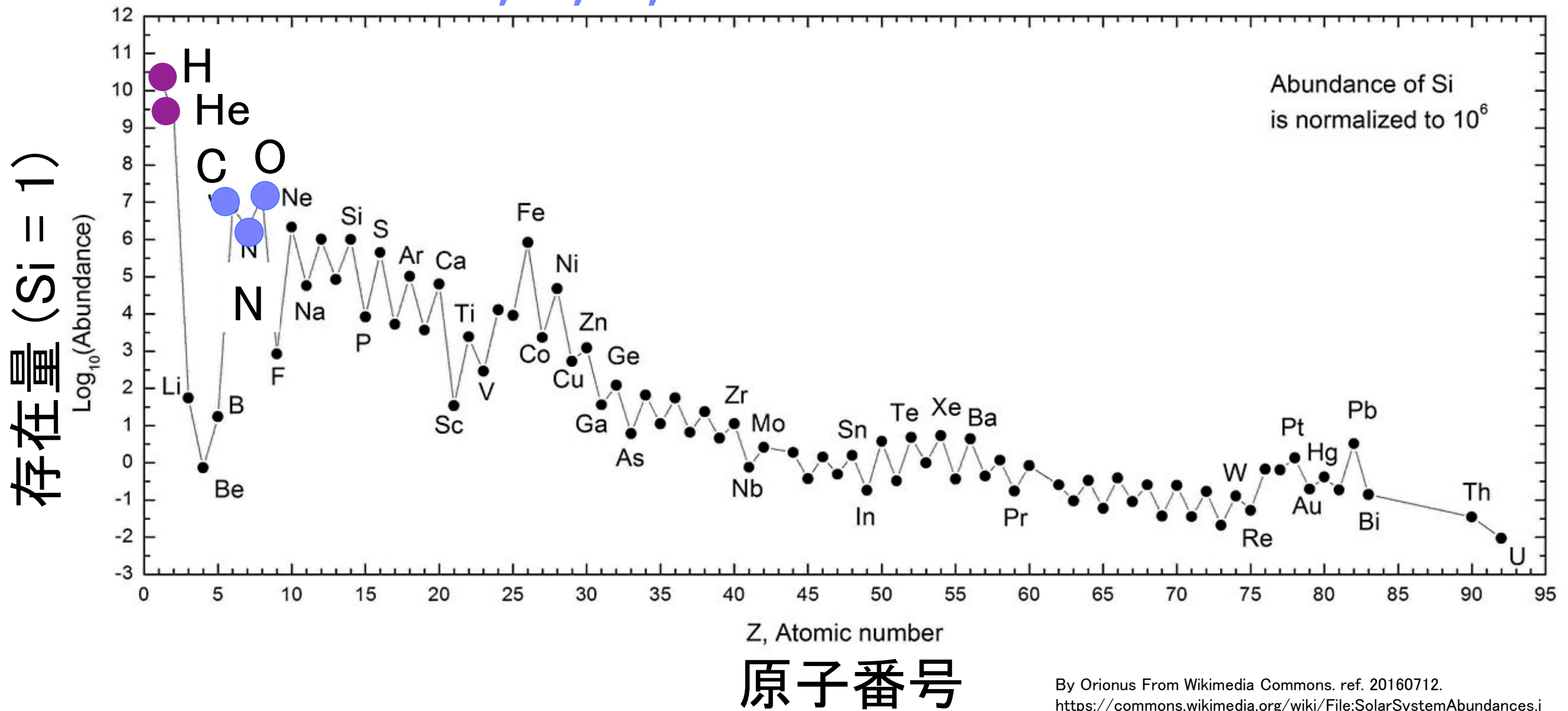
宇宙のH:He~0.92:0.08

これが宇宙のすべての物質の源
これが星の源

宇宙(=太陽)元素存在度

H, He : 宇宙主要元素

C, O, H, N : 生命主要元素



By Orionus From Wikimedia Commons. ref. 20160712.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarSystemAbundances.jpg?uselang=ja>
CC BY-SA 3.0

宇宙(=太陽)元素存在度

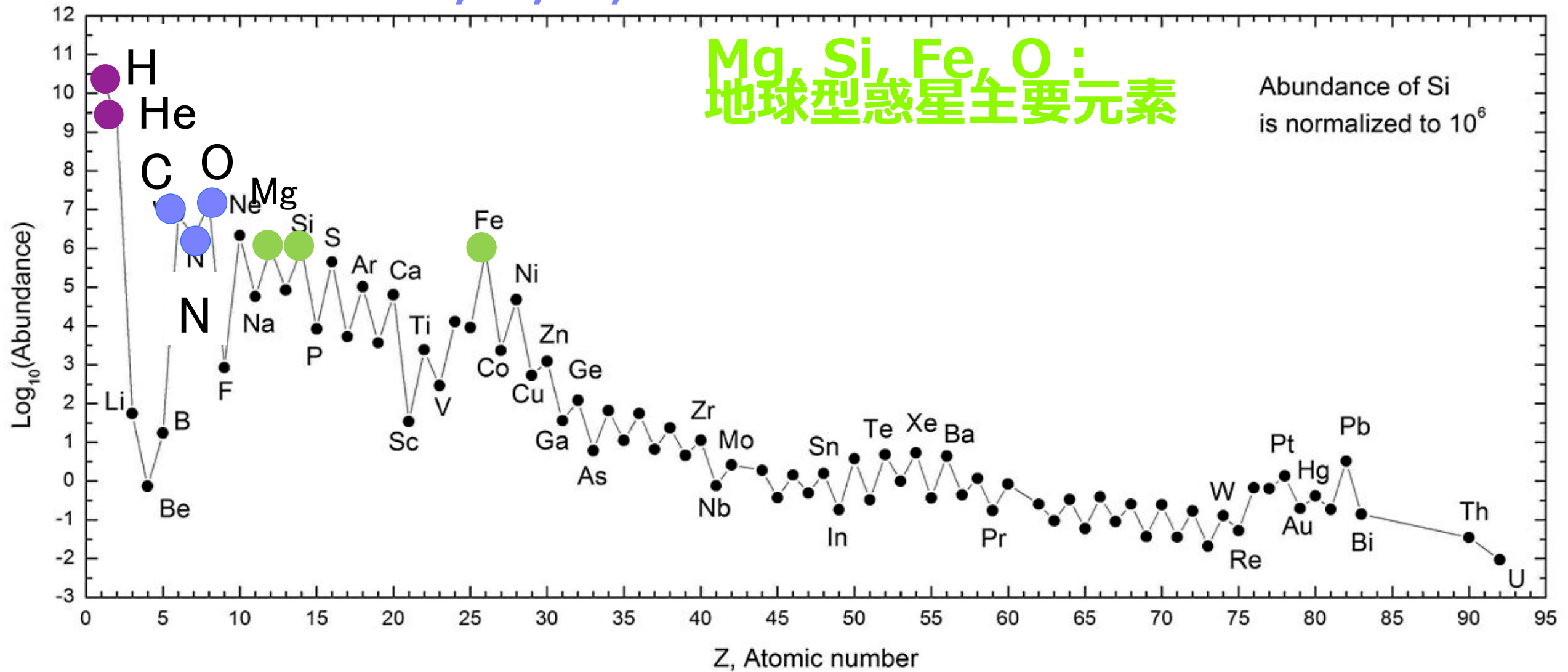
H, He : 宇宙主要元素

C, O, H, N : 生命主要元素

Mg, Si, Fe, O :
地球型惑星主要元素

Abundance of Si
is normalized to 10^6

存在量 (Si = 1)

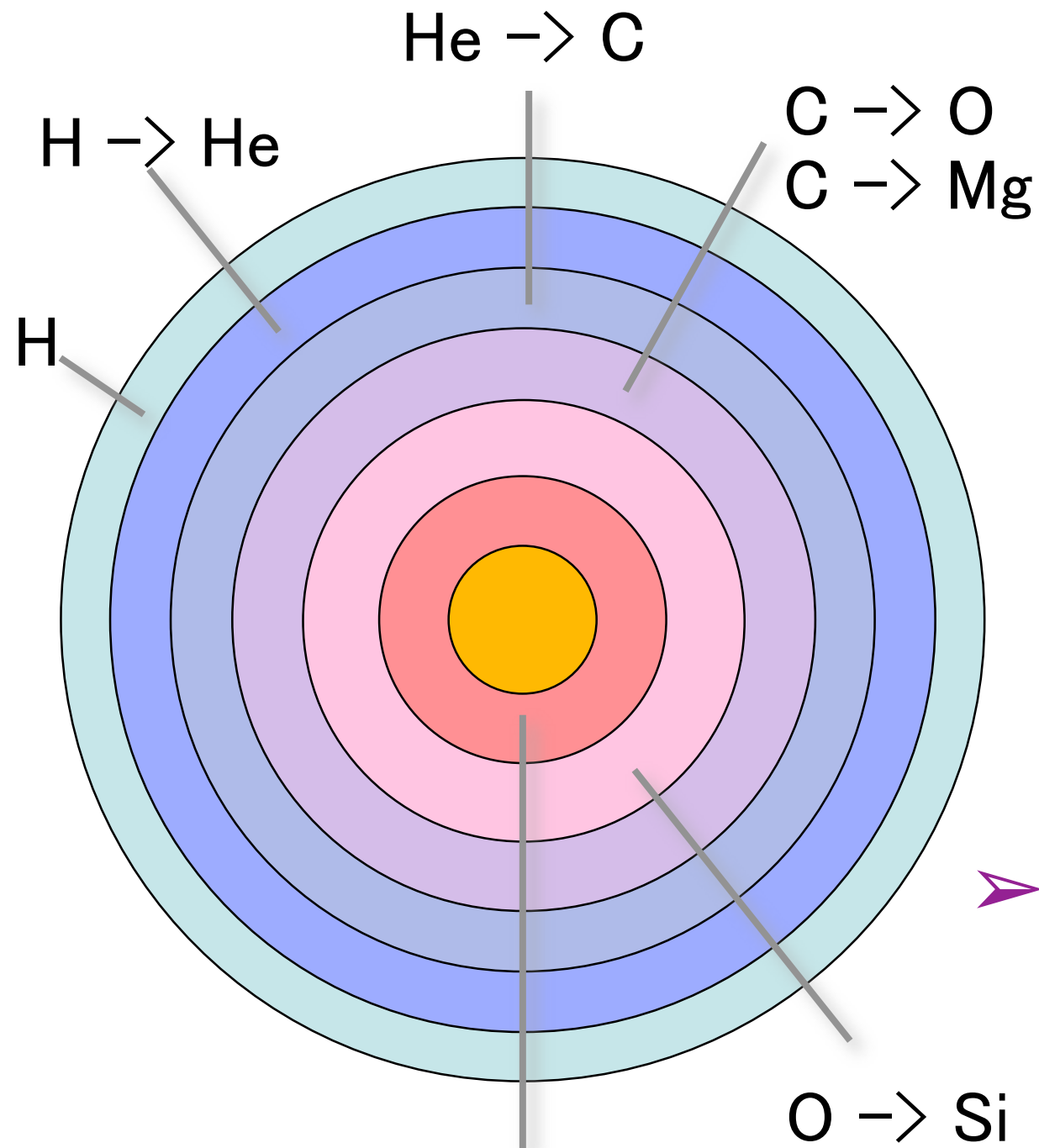


原子番号

By Orionus From Wikimedia Commons. ref. 20160712.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarSystemAbundances.jpg?uselang=ja>
CC BY-SA 3.0

H, He以外の元素(原子核)の起源 [1]

末期の星の内部構造



*星の大きさによる

反応	温度	継続時間
H $\rightarrow$ He		10^{10} 年*
He $\rightarrow$ C	$T > 10^8$ K	(赤色巨星) ~100万年
C $\rightarrow$ O C $\rightarrow$ Mg	$T > 6 \times 10^8$ K	
O $\rightarrow$ Si	$T > 1.5 \times 10^9$ K	0.5 - 1 年
Si $\rightarrow$ Fe	$T > 3 \times 10^9$ K	1 日

➤ **重力収縮 -> 温度上昇 -> 元素合成**
この繰り返しで、元素番号の大きい元素を合成, Fe(Ni) まで

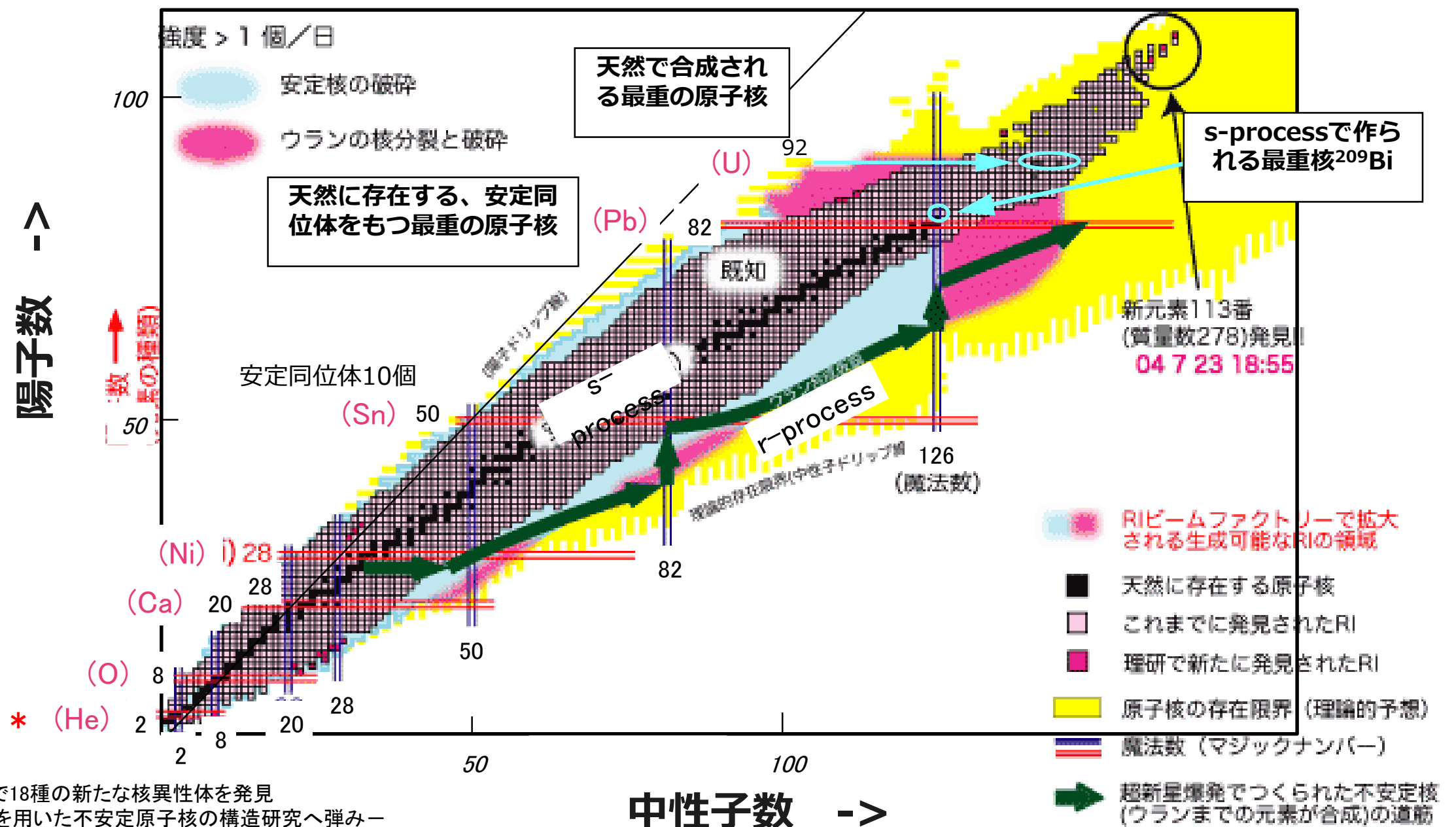
Si $\rightarrow$ S $\rightarrow$ Ar $\rightarrow$ Ca $\rightarrow$ Ti $\rightarrow$ Cr $\rightarrow$ Fe $\rightarrow$ Ni

H, He以外の元素(原子核)の起源 [2]

超新星爆発 → さらなる温度上昇 → 重元素合成

中性子の添加により, ^{26}Fe から ^{92}U までの重元素(周期律表の後半の元素)合成

原子核図表



作られた元素のゆくえ

膨張 → 温度低下 → 鉱物微粒子(ミクロン以下)の形成 → 宇宙空間へ放出(鉱物粒子はH, He以外の元素からなる)
赤色巨星(膨張, 温度低下)

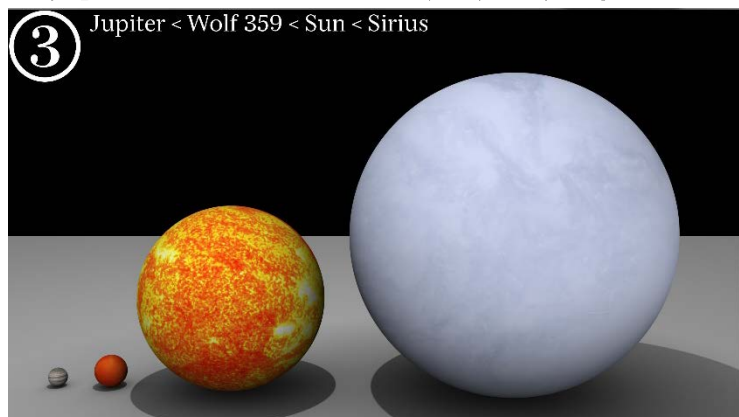
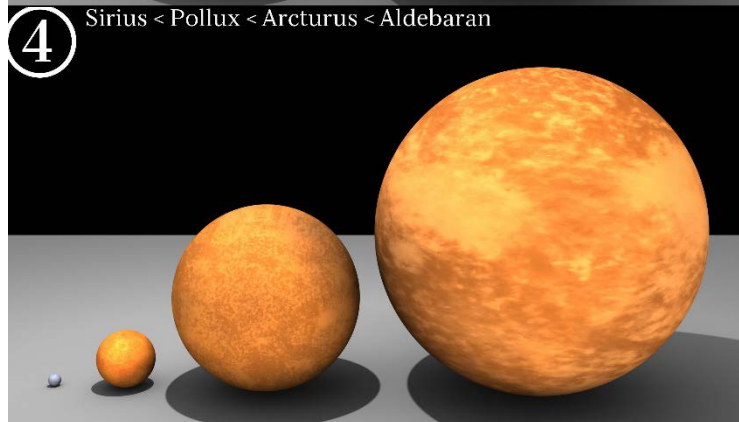


Image by Dave Jarvis, from Wikipedia Commons
ref.20180409
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%99%E3%83%86%E3%83%AB%E3%82%AE%E3%82%A6%E3%82%B9#/media/File:Star-sizes.jpg>
CC BY-SA 3.0

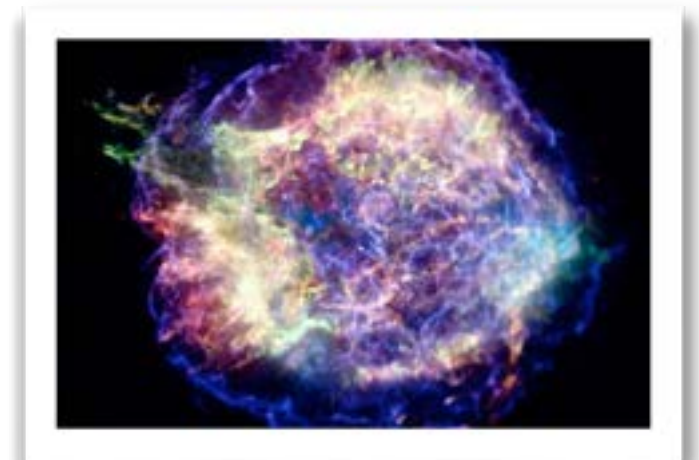


アンタレス

ベテルギウス

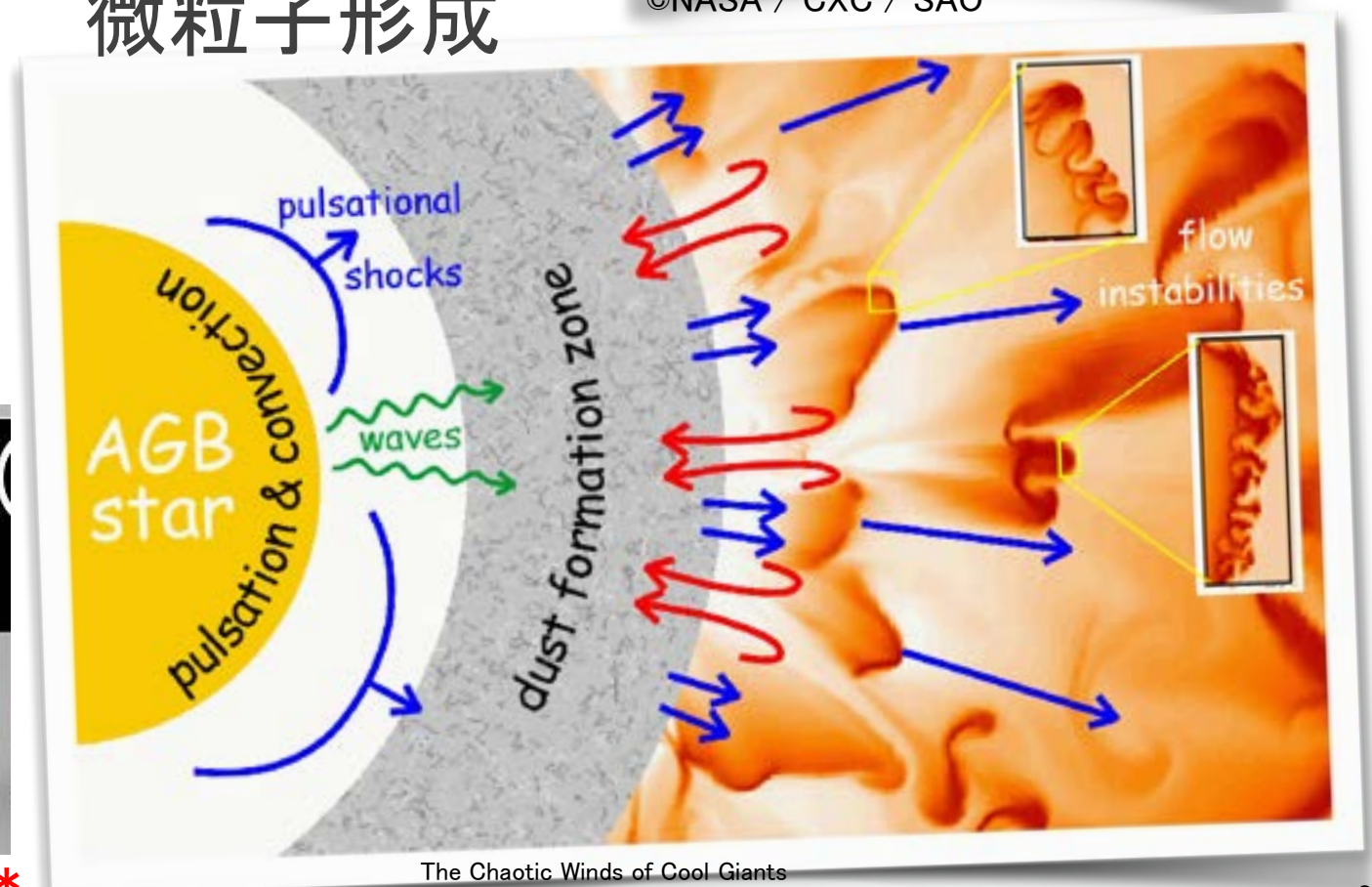
*

超新星爆発



©NASA / CXC / SAO

微粒子形成



The Chaotic Winds of Cool Giants
http://www-star.st-and.ac.uk/~pw31/AGB_popular.html
chaotic scenario for dust-driven AGB star winds (AGBchaos.gif)

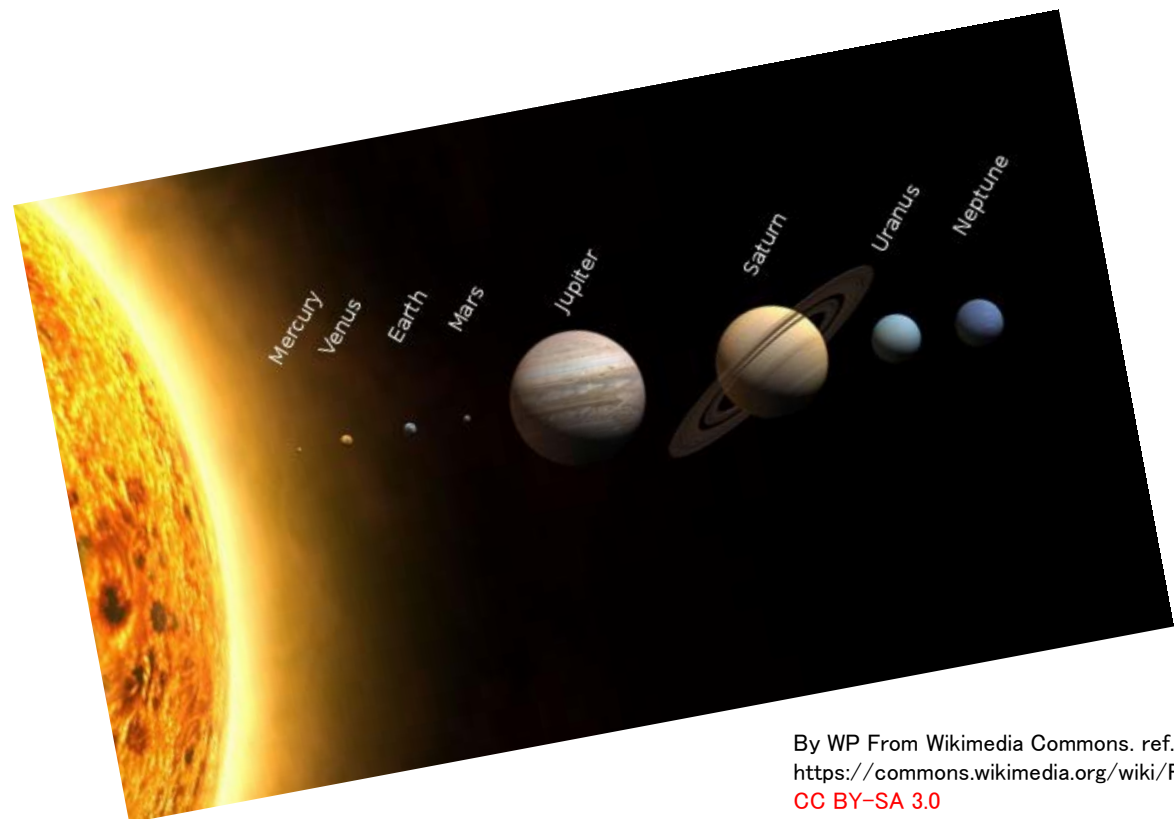
ここまでのまとめ

- 宇宙における生命 – 自然科学の最先端テーマ
- 生命は惑星に宿る
- ハビタブル惑星がとりわけ関心に

- 宇宙はH, Heで始まり
- 星が作られ
- 星の末期にHeの融合によりC合成
- 核融合を積み重ねFeまでの元素
- 大きな星の最後超新星爆発時, 中性子捕獲によりUまでの元素(原子核)合成
- 重元素は星周風中で元素となり, 固体となる
- 分子雲にとりこまれ, 次世代の恒星-惑星となる

目次

1. イントロダクション
2. 太陽系の材料
3. 星の誕生と惑星形成
4. 惑星を作る物質
5. 生命を作る物質

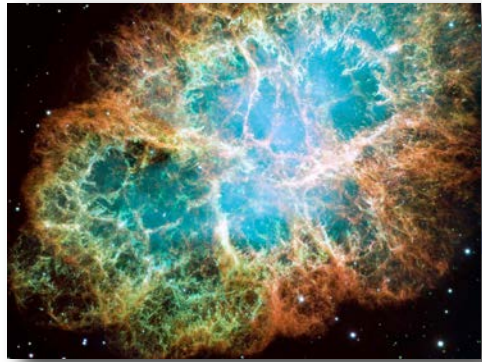


By WP From Wikimedia Commons. ref. 20160621
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013.svg>
CC BY-SA 3.0

新たな星・惑星へ

超新星爆発

©NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU)



*

鉱物微粒子

元素合成

分子雲

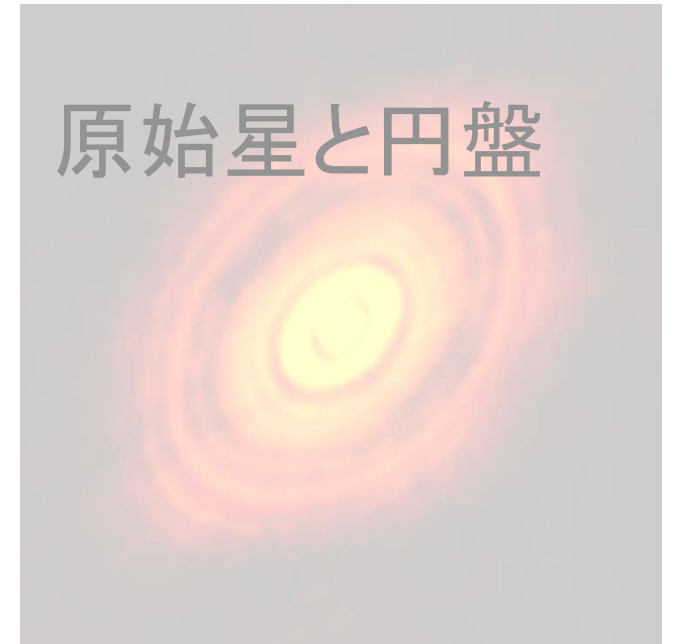


*

©N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF

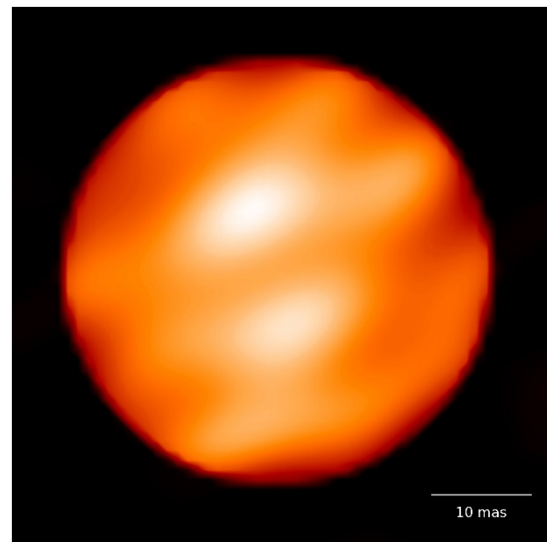
太陽系の場合
～100 万年

原始星と円盤



*

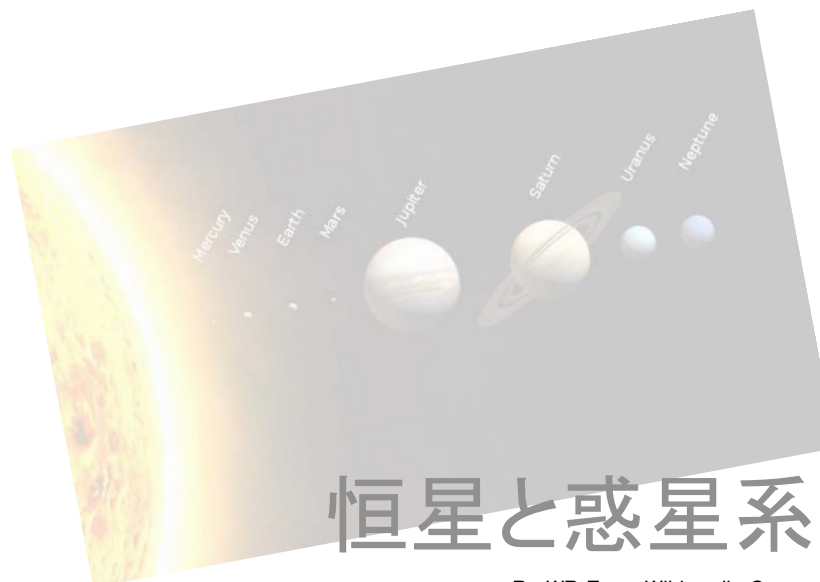
©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



*

©Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.

恒星と惑星系



1000万～1億年

100 億年
(太陽系もあと～50億年
経過すると)

分子雲：星形成の場

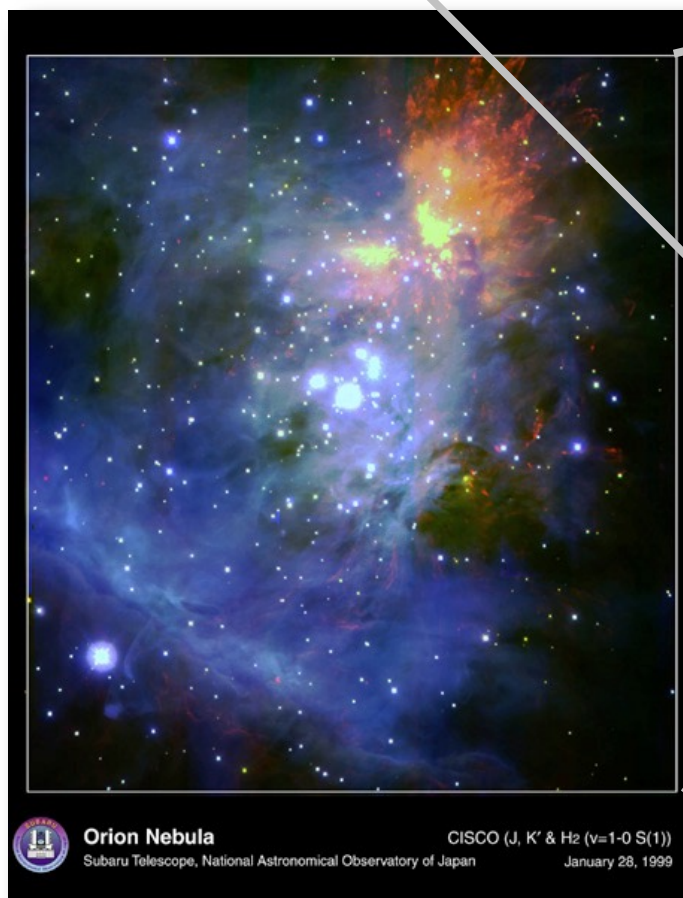
オリオン座



By Till Credner From Wikimedia Commons. ref. 20160713.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:OrionCC.jpg>
 CC BY-SA 3.0

M42 分子雲 (オリオン 大星雲)

近赤外線 (~2 um)



*

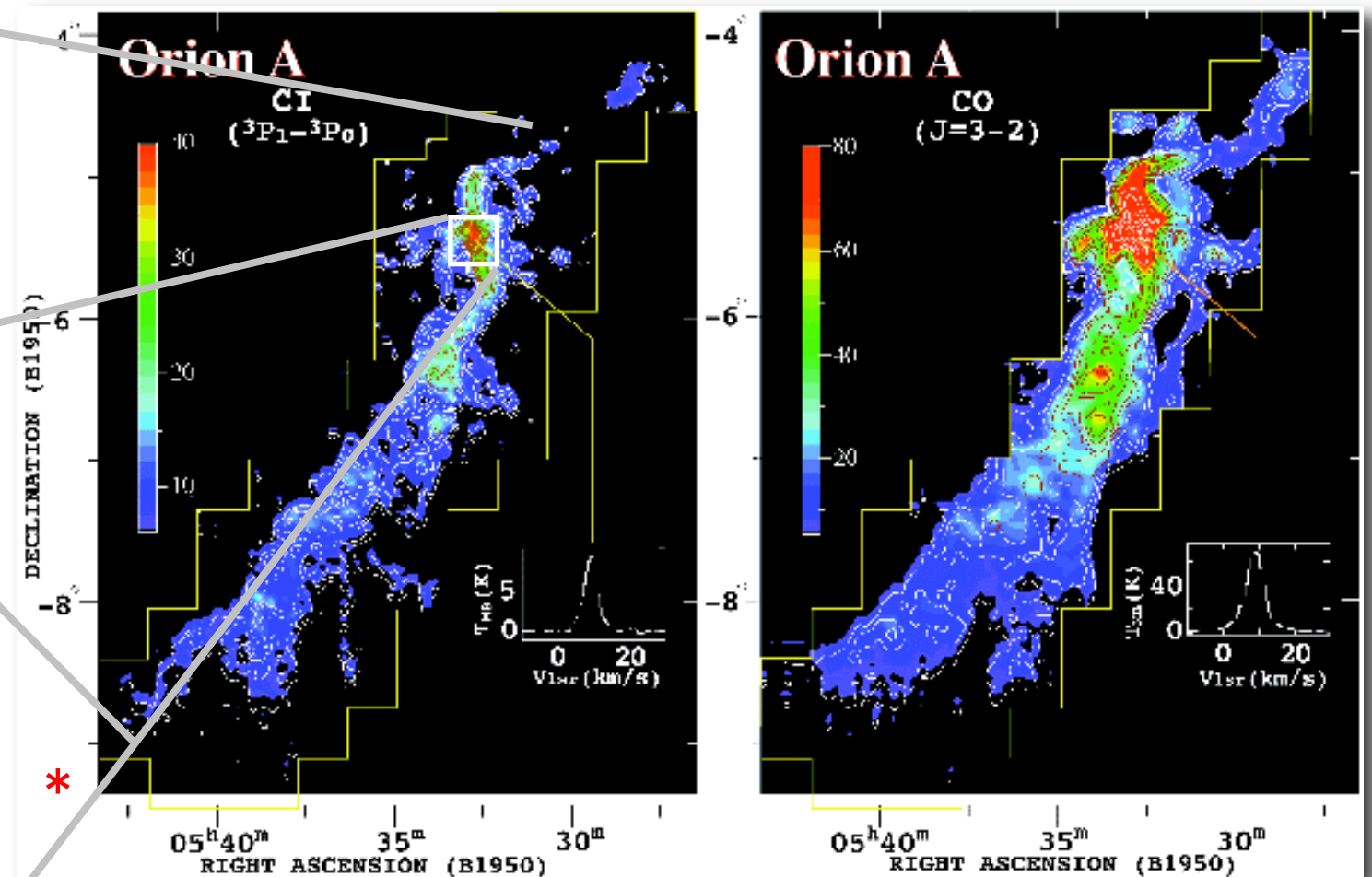
©国立天文台
 オリオン星雲
http://subarutelescope.org/Pressrelease/1999/01/28f/j_index.html

可視光

オリオンA 分子雲

C 電波 (~600um)

¹²CO 電波 (~870um)



東京大学理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター
<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~submm/mtfuji/page3.html>
 オリオン巨大分子雲における炭素原子(左)と一酸化炭素分子(右)の分布
 (fig7.gif)

分子雲：星形成の場

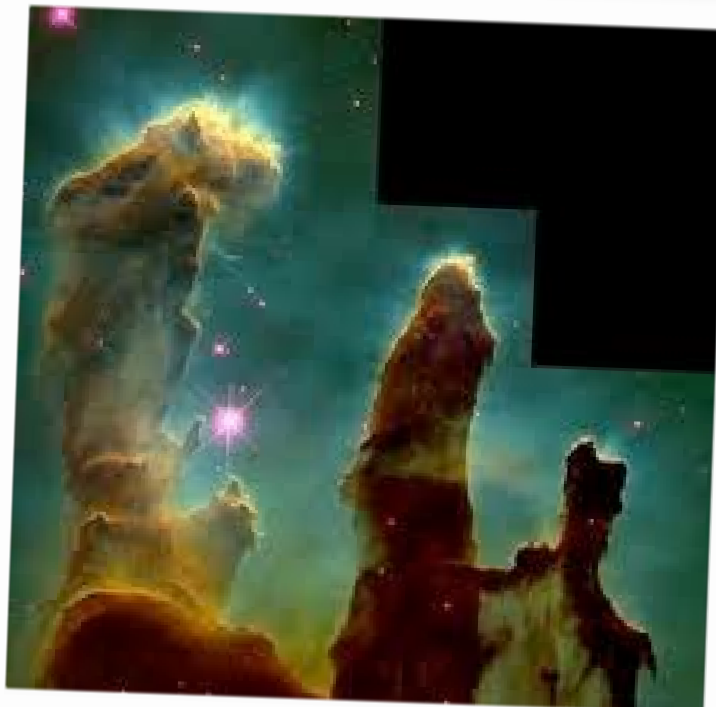


©Bill Schoening/NOAO/AURA/NSF



©N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF

大部分水素ガス
＋
それ以前の星で作ら
れた鉱物微粒子



©Robert Williams and the Hubble Deep Field Team (STScI) and NASA



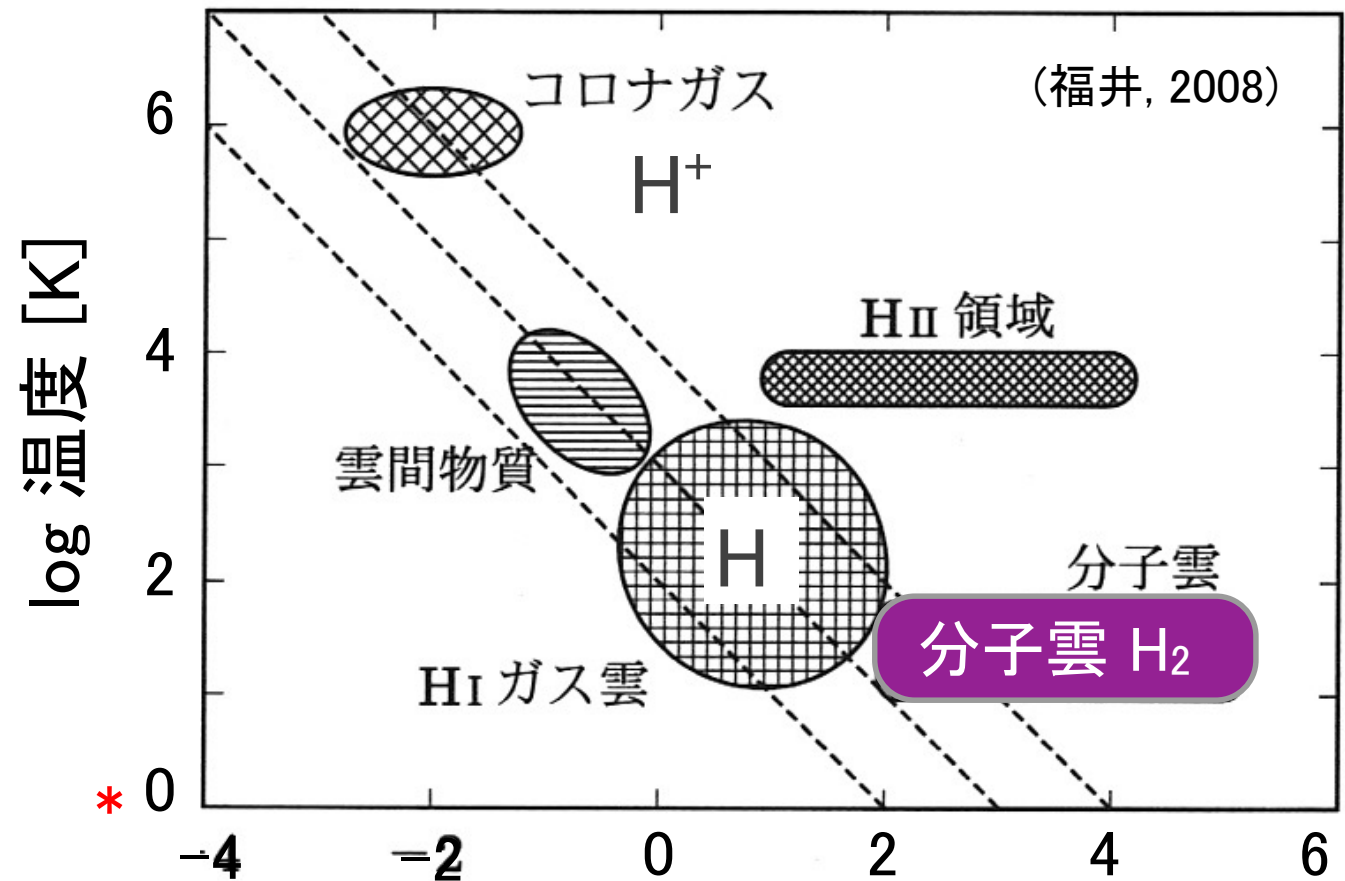
©Robert Williams and the Hubble Deep Field Team (STScI) and NASA

光が通過しないため
暗く見える
あるいは
星がたくさん誕生して
いるため明るく輝く

(ハッブル宇宙望遠鏡)

分子雲：星形成の場

宇宙空間



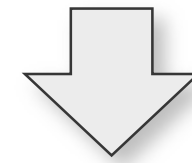
福井康雄ほか(編)『星間物質と星形成』シリーズ現代の天文学、第6巻、日本評論社、2008年、
p.5 図1.2「星間物質の密度圧力図」

log 水素個数密度
(1cm^3 あたりの水素の個数)

ちなみに1気圧の大気
分子数 2.7×10^{19}

宇宙の物質：大部分水素 H_2
少量の鉱物など

分子雲：宇宙空間としては
きわめて高密度



自己重力により収縮

これが星を作る力
どんどん小さい塊に分裂

分子雲：気相分子

多様な分子・化合物（イオン，不飽和有機分子，炭素鎖など）

➤ 簡単な水素化物，酸化物，硫化物，ハロゲン化合物など

H_2 , CO , NH_3 , CS , NaCl , HF , SiO , SiH_4 , -----

➤ ニトリル，アセチレン誘導体など

C_3 , HCN , CH_3CN , HNC , C_2H_2 , HC_3N , -----

➤ アルデヒド，アルコール，エーテル，ケトン，アミドなど

H_2CO , CH_3OC , HCOOH , CH_2NH , H_2C_3 , H_2CS , -----

➤ 環状分子

C_3H_2 , SiC_2 , SiC_3 , C_3H , $\text{C}_2\text{H}_4\text{O}$, -----

➤ 分子イオン

CH^+ , HCO^+ , HCNH^+ , H_3O^+ , HN_2^+ , -----

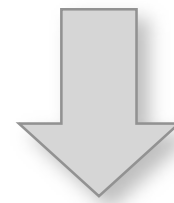
➤ ラジカル

OH , C_2H , CN , C_2O , C_2S , CH , C_3H , C_3N , -----

分子雲：固相物質

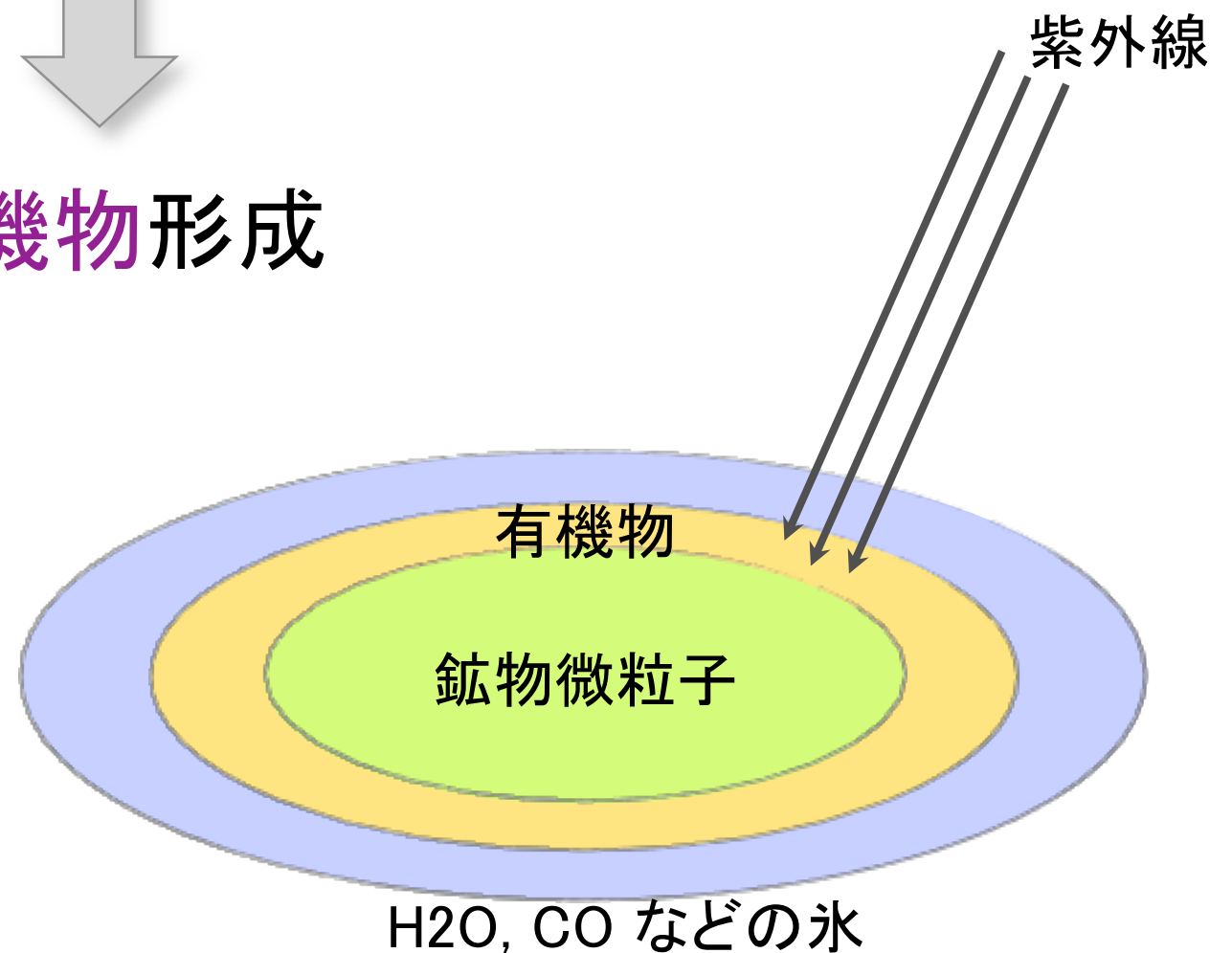
極低温のため，ほとんどの元素が**固体**状態

鉱物微粒子の上に凝縮した**氷**に紫外線照射



有機物形成

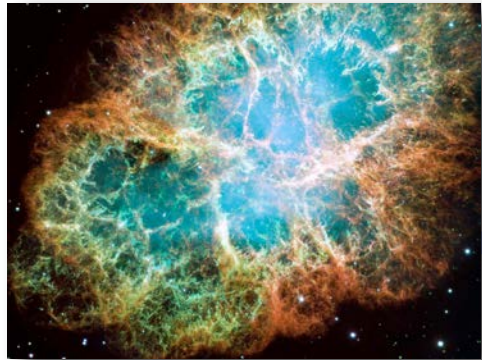
この粒子が，原始惑星系
円盤のダストの出発点



新たな星・惑星へ

超新星爆発

©NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU)



鉱物微粒子

元素合成

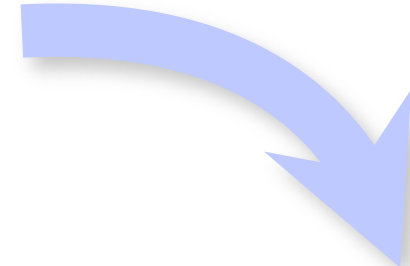


分子雲

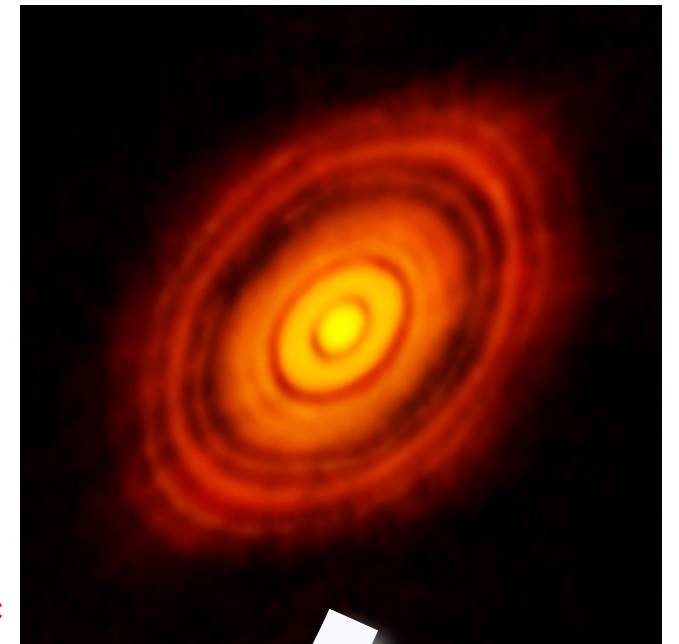


©N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF

太陽系の場合
～100 万年

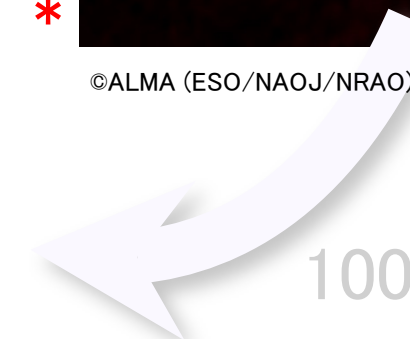


原始星と円盤

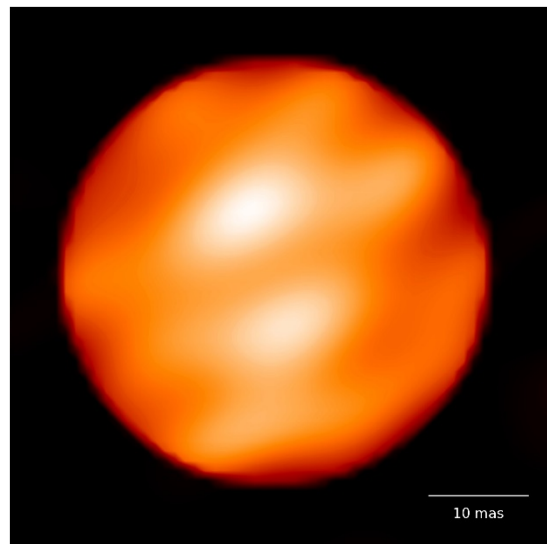
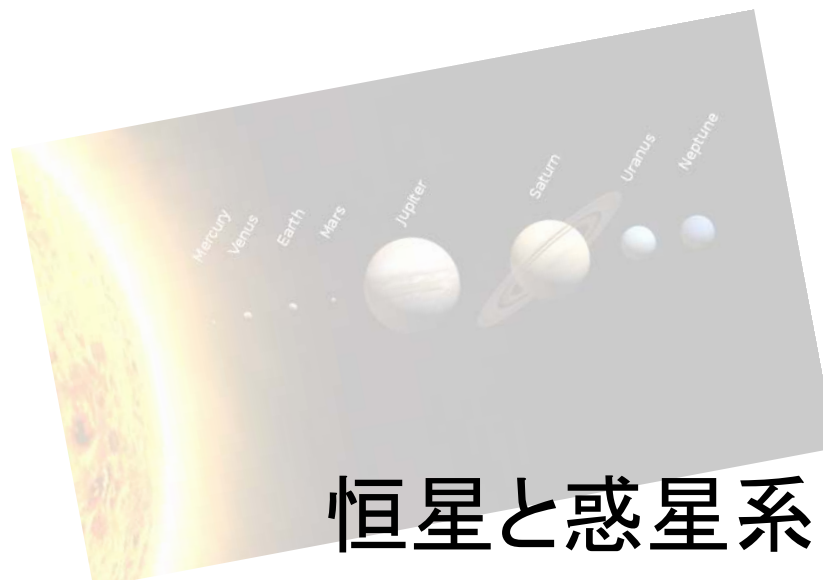


©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

1000万～1億年



恒星と惑星系



©Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.

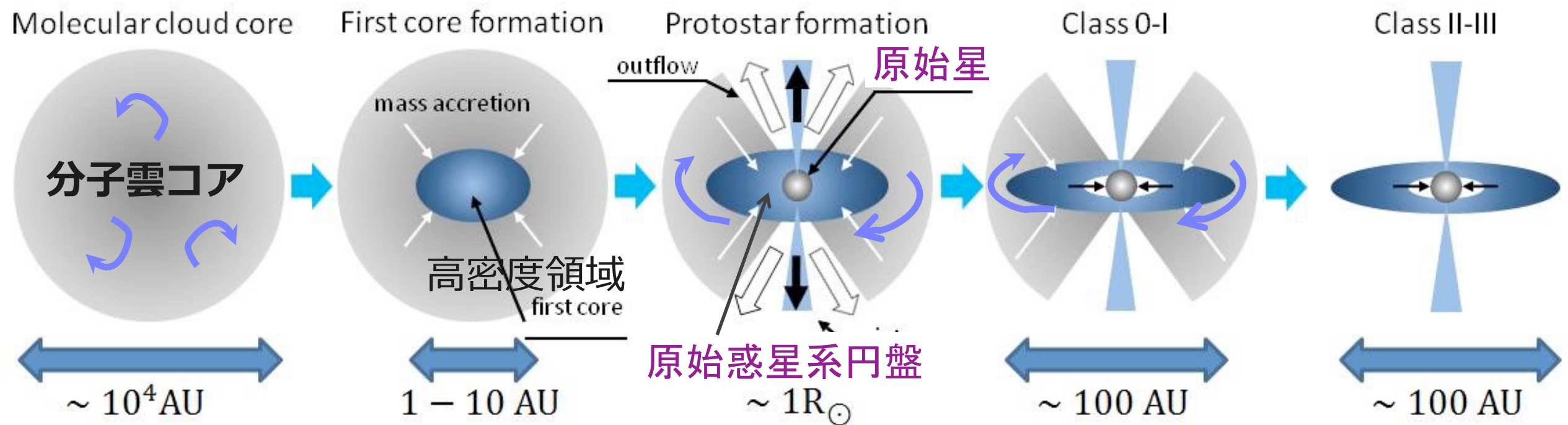
赤色巨星



100 億年
(太陽系もあと～50億年
経過すると)

分子雲から原始星へ：理論的研究

- 自己重力による収縮 -> 中心部高密度 -> 温度上昇
-> **原始星形成**
- 回転 -> 円盤の形成（重力と遠心力の釣り合い）

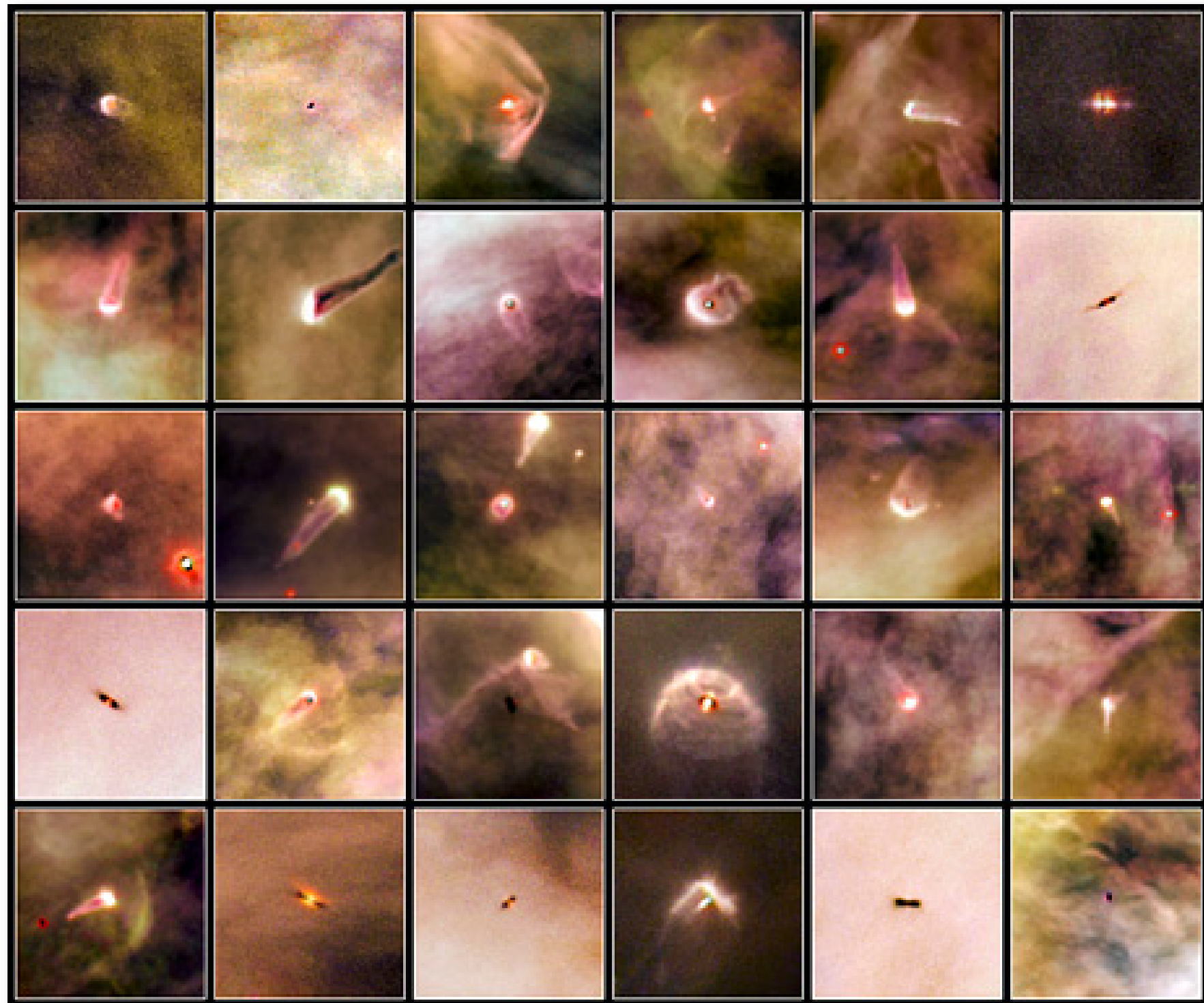


(c) Yusuke Tsukamoto

原始惑星系円盤観測

＜ 惑星が作られてゆく場面は直接観測できない ＞

オリオン星雲に
みられる原始
惑星系円盤



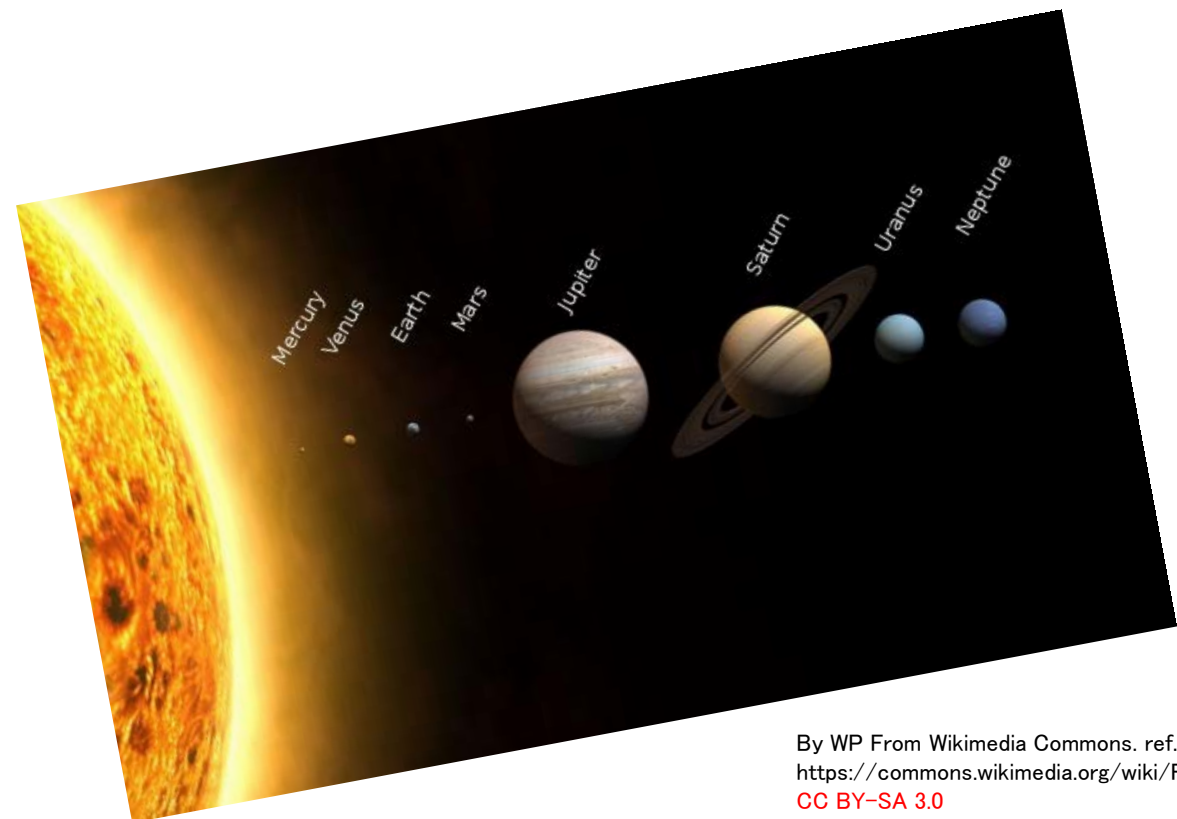
*

(Hubble Space Telescope)

©NASA/ESA and L. Ricci (ESO)

目次

1. イントロダクション
2. 太陽系の材料
3. 惑星系の形成
4. 惑星を作る物質
5. 生命を作る物質

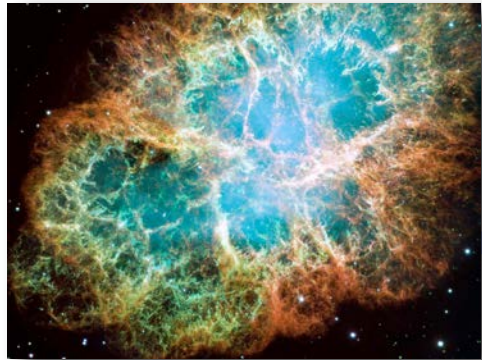


By WP From Wikimedia Commons. ref. 20160621
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013.svg>
CC BY-SA 3.0

新たな星・惑星へ

超新星爆発

©NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU)



鉱物微粒子

元素合成

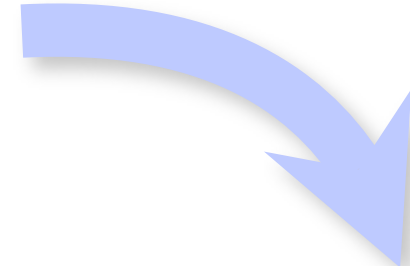


分子雲

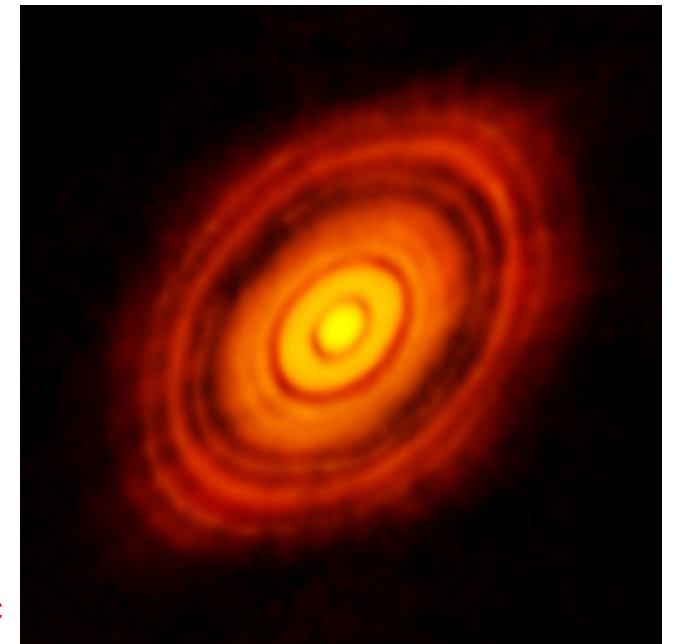


©N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF

太陽系の場合
～100 万年



原始星と円盤

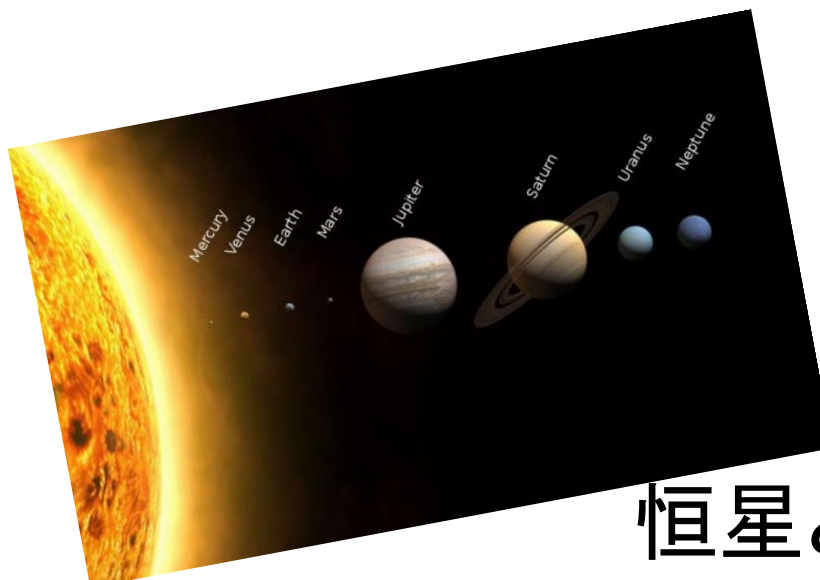


©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

1000万～1億年



恒星と惑星系



By WP From Wikimedia Commons. ref. 20160621
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013.svg>
CC BY-SA 3.0

*

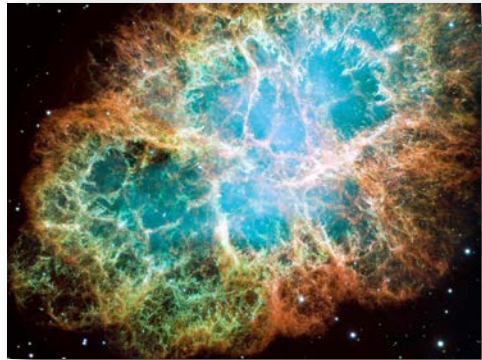
*

*

*

超新星爆発

©NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU)



鉱物微粒子

元素合成

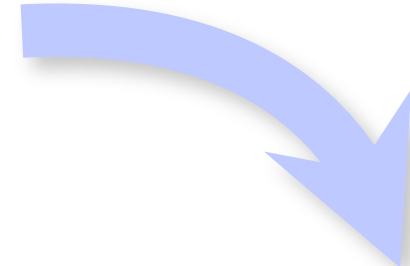


分子雲

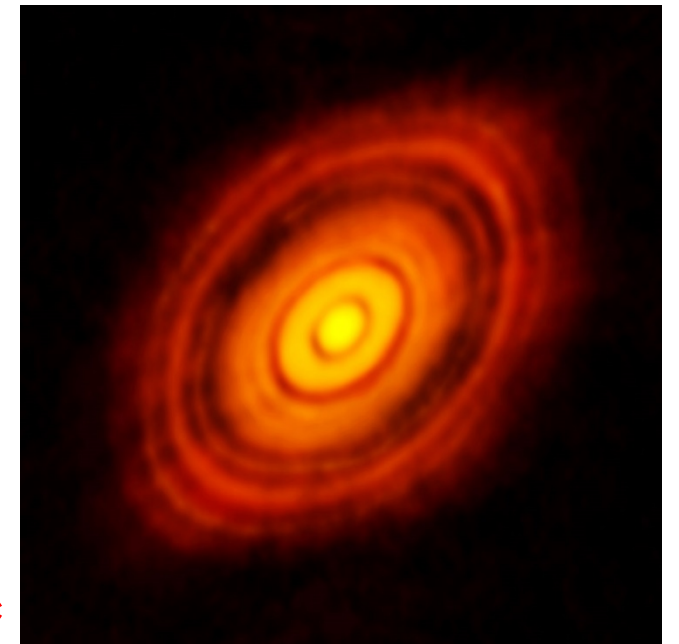


©N.A.Sharp/NOAO/AURA/NSF

太陽系の場合
～100 万年



原始星と円盤

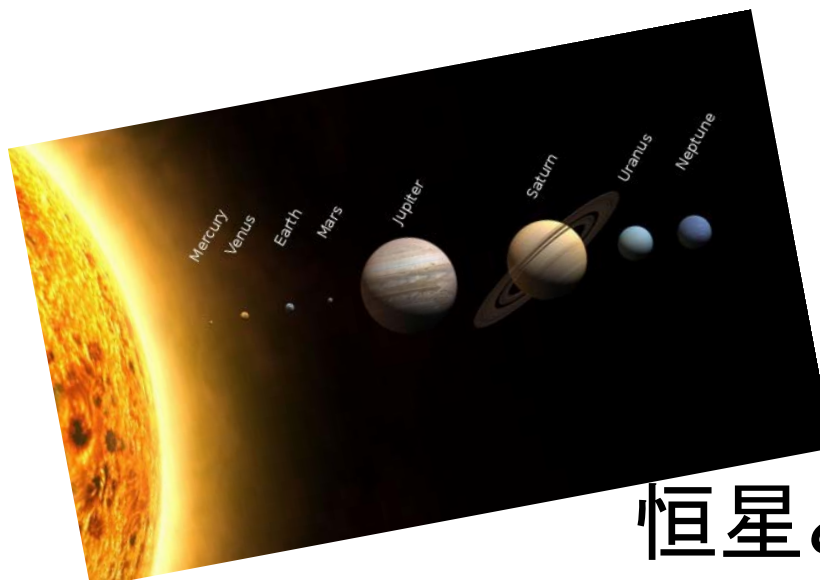


©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

1000万～1億年



恒星と惑星系



By WP From Wikimedia Commons. ref. 20160621
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013.svg>
CC BY-SA 3.0

*

*

*

*

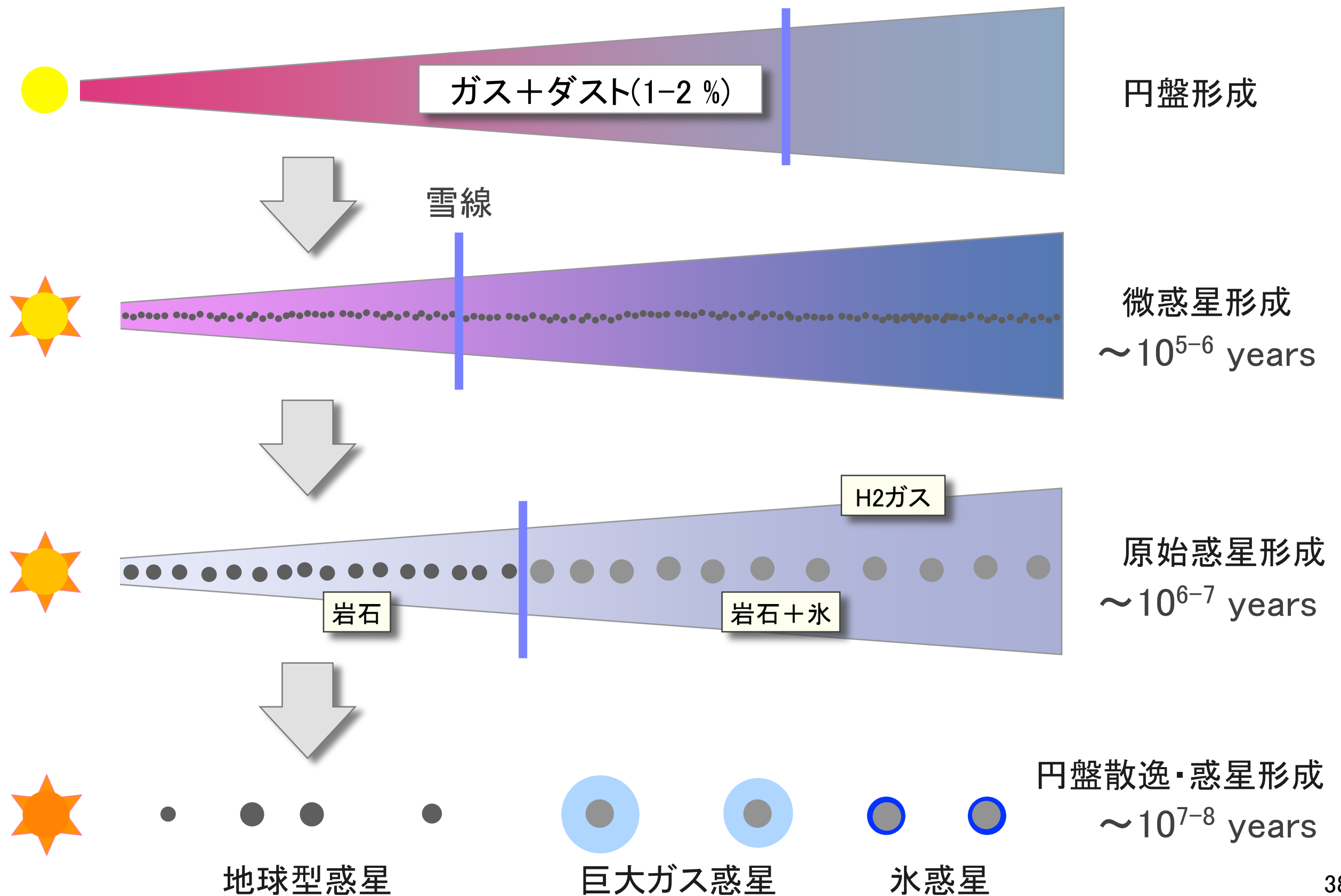
赤色巨星



100 億年

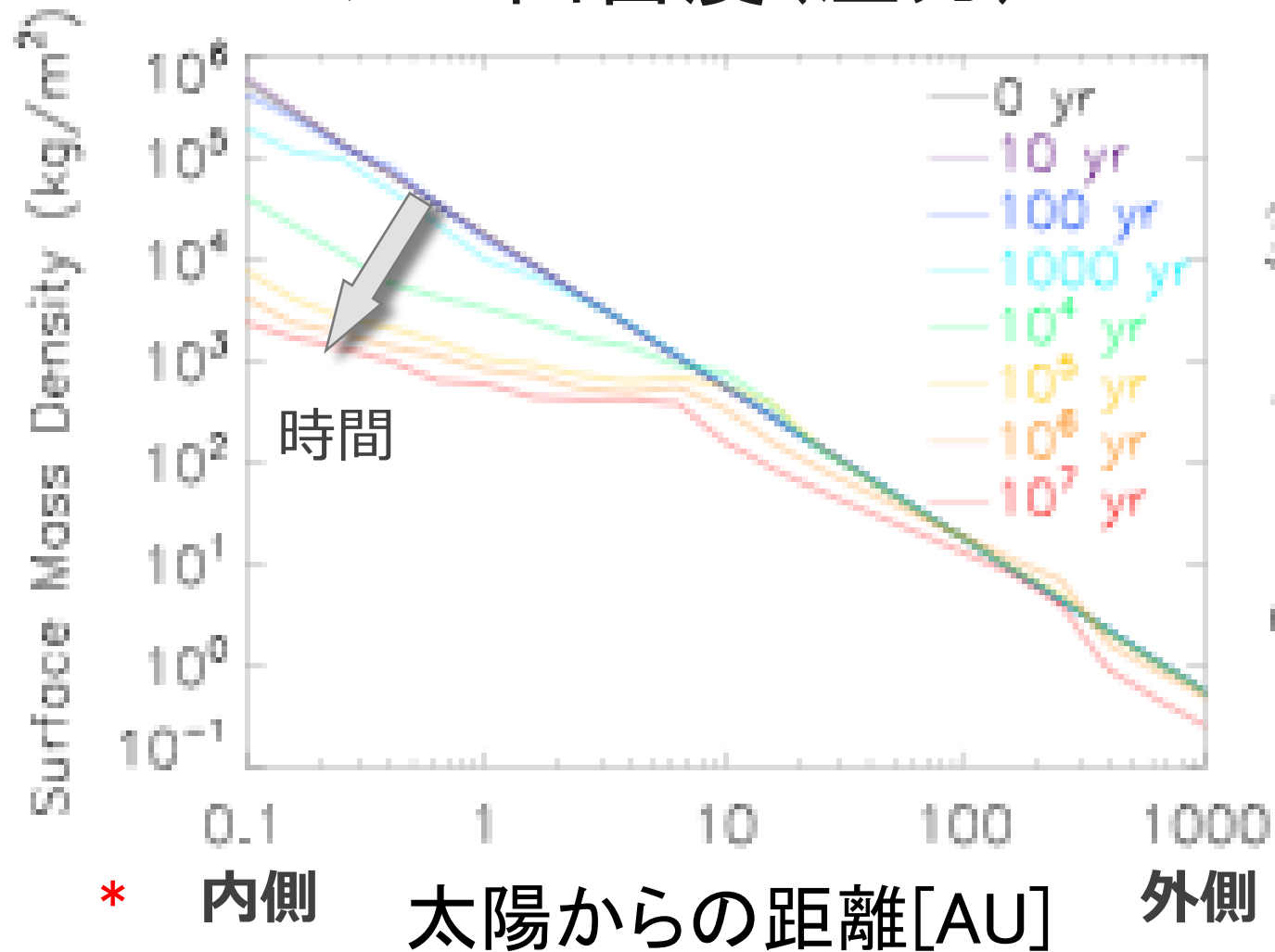
(太陽系もあと～50億年
経過すると)

太陽系初期進化

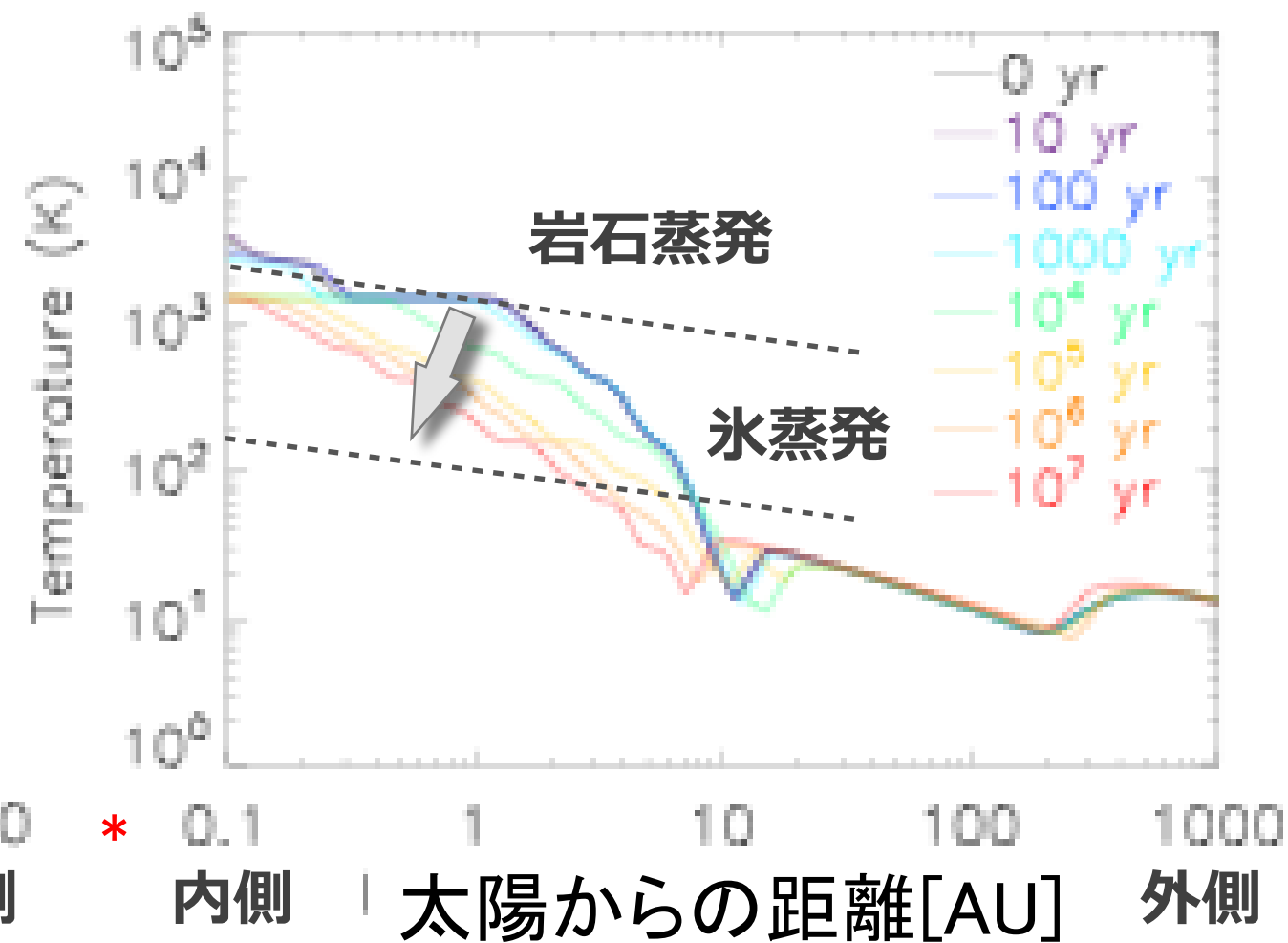


初期太陽系の物理条件

ガス面密度(圧力)



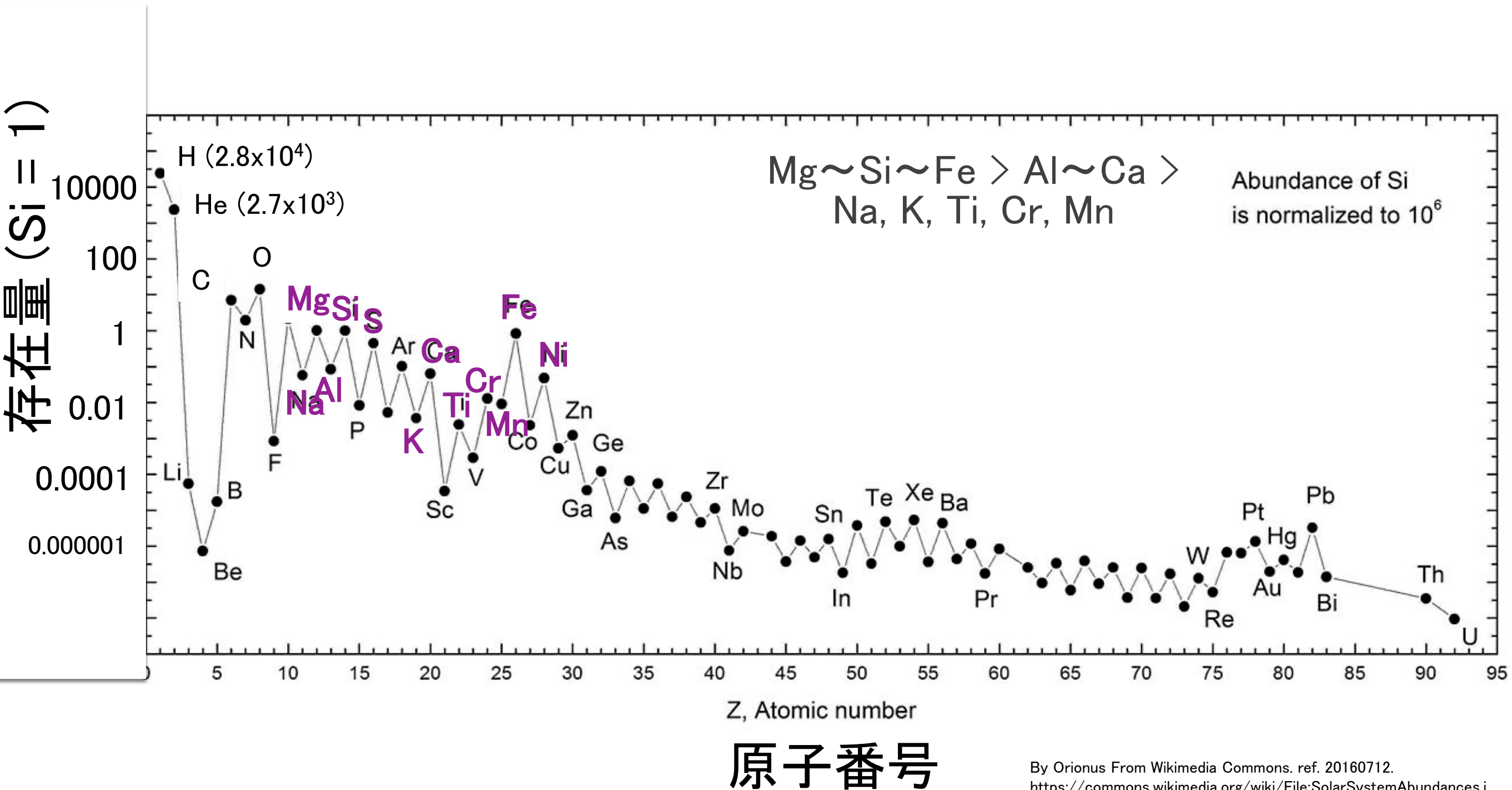
温度



K. Baillié, S. Charnoz, and E. Pantin(2015)Time evolution of snow regions and planet traps in an evolving protoplanetary disk, ASTRONOMY AND ASTROPHYSICS · MARCH 2015, A65, p. 1–12.
(URL: <http://www.aanda.org/articles/aa/abs/2015/05/aa24987-14/aa24987-14.html>)
Fig. 3, Fig. 5. に加筆

- 内側 -> 外側に, 圧力・温度とも減少
- 時間とともに, 圧力・温度とも減少

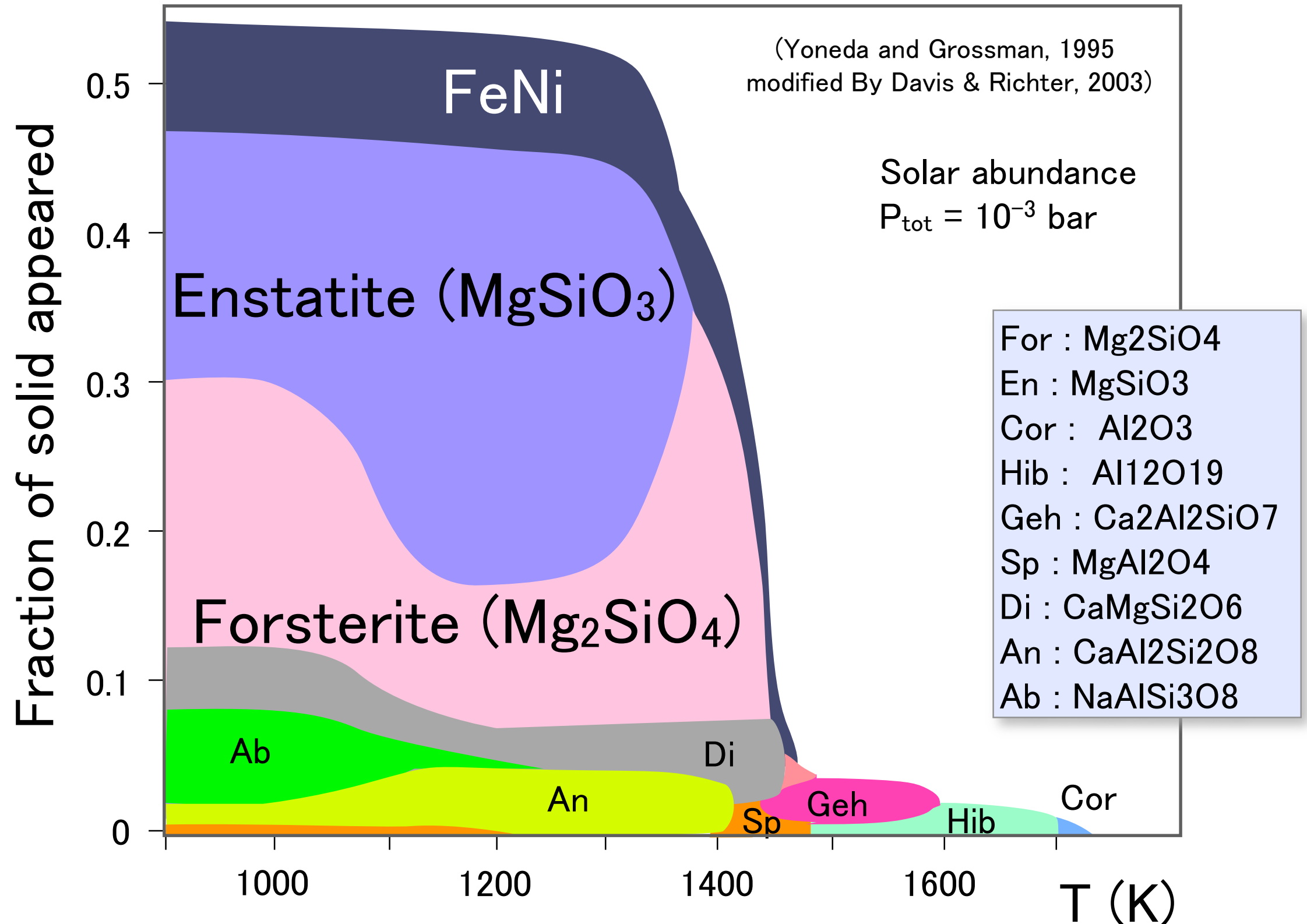
どのような物質が存在可能か？



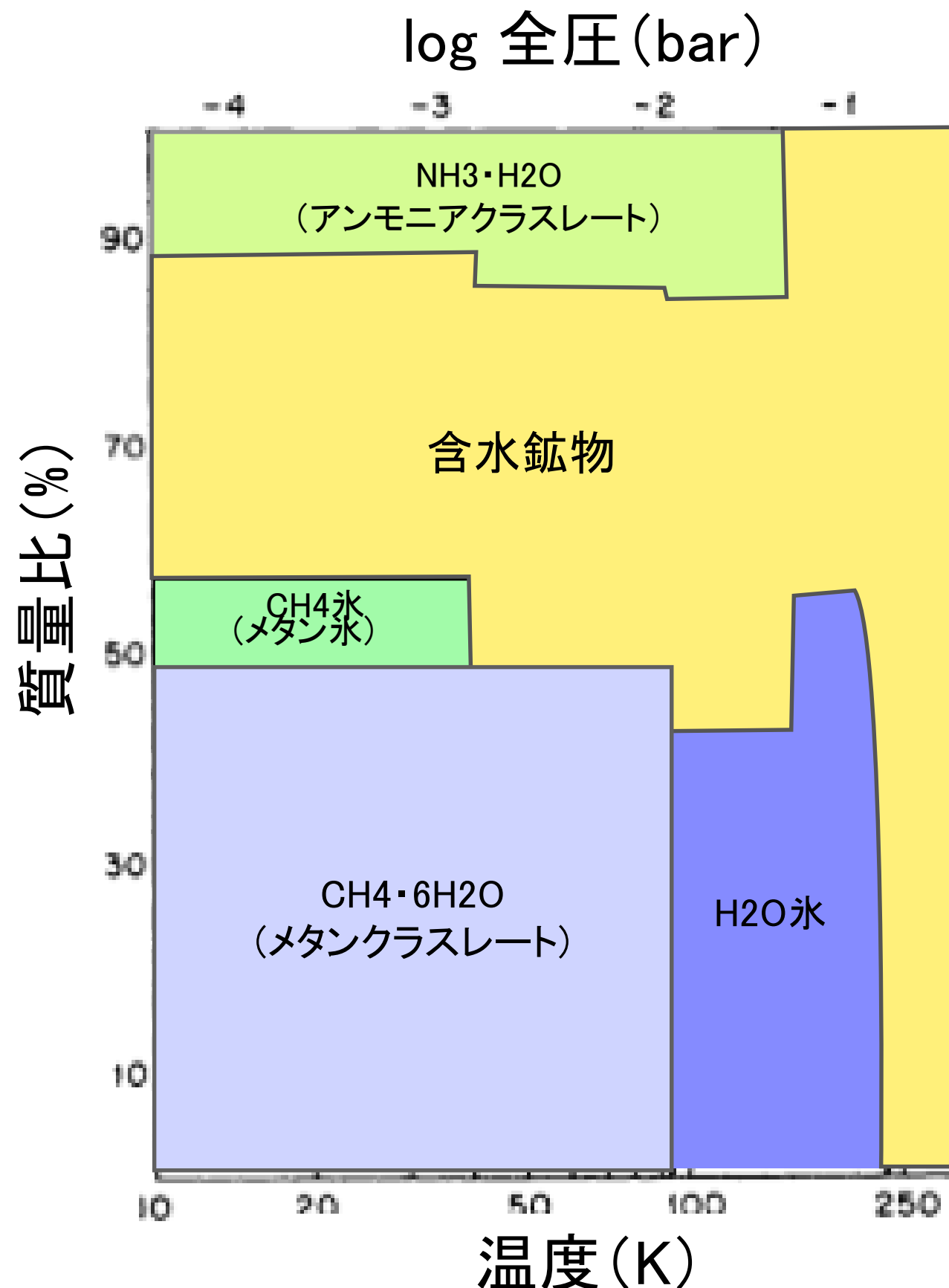
By Orionus From Wikimedia Commons. ref. 20160712.
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:SolarSystemAbundances.jpg?uselang=ja>
CC BY-SA 3.0

高温における安定物質

Yoneda and Grossman(1995)Condensation of CaOsingle bondMgOsingle bondAl₂O₃single bondSiO₂ liquids from cosmic gases, Geochimica et Cosmochimica Acta 59(16), August 1995, Pages 3413–3444.
(URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001670379500214K#>)
Fig1を元に作成



低温における安定物質



- H₂O氷・有機物氷
H₂O, CH₄, NH₃
- 含水鉱物
Mg₃Si₂O₅(OH)₄ など
- 質量比
鉱物/氷 ~ 1/3
密度を考えれば
体積比 鉱物/氷 ~ 1/10

ダストの移動・混合・合体

N体シミュレーション(異なる場所にあった小さな天体-条件が異なるので成分が異なる-がどのように惑星に合体成長してゆくか)

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

ダストの移動・混合・合体の分布図

Rebecca A. Fischer , Fred J. Ciesla(2014)Dynamics of the terrestrial planets
from a large number of N-body
simulations, Earth and Planetary Science Letters 392 (2014) p.28–38.

(URL:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0012821X14000843>)

Fig. 1.:

Orbital evolution of simulated bodies in simulation CJS33.

物質安定性まとめ

- 原始惑星系円盤内は温度、ガス密度(圧力)とも時空変化するため、安定に存在する物質が変化
- 太陽系元素存在度をもとに、化学熱力学を用い、安定な物質を推定することが可能
- 高温では Mg-Si-O 化合物(鉱物), FeNi金属
低温では含水鉱物, H₂O/NH₃/CH₄氷あるいはそれらのハイドレート(水分子に囲まれたNH₃やCH₄分子)
- 原始惑星系円盤内で粒子あるいは小天体は移動、衝突合体により、惑星の組成が多様化、ただし位置に応じたある程度の法則性

太陽系初期の記録：隕石と小惑星

隕石

地球に落下してくる岩石
小惑星帯から飛来
小惑星 最大～1000km
30 万個以上



By Nikita Plekhanov From Wikimedia Commons. ref. 20160628
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Chelyabinsk_meteor_trace_15-02-2013.jpg
CC BY-SA 3.0



Photo by Alexander Sapozhnikov ,from Wikipedia Commons
ref.20180409
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%83%81%E3%82%A7%E3%83%AA%E3%83%A3%E3%83%93%E3%83%B3%E3%82%B9%E3%82%AF%E9%9A%95%E7%9F%B3#/media/File:Chelyabinsk_meteor_parts_with_ruler.jpg
CC BY-SA 3.0

2013年3月ロシアに落下した隕石

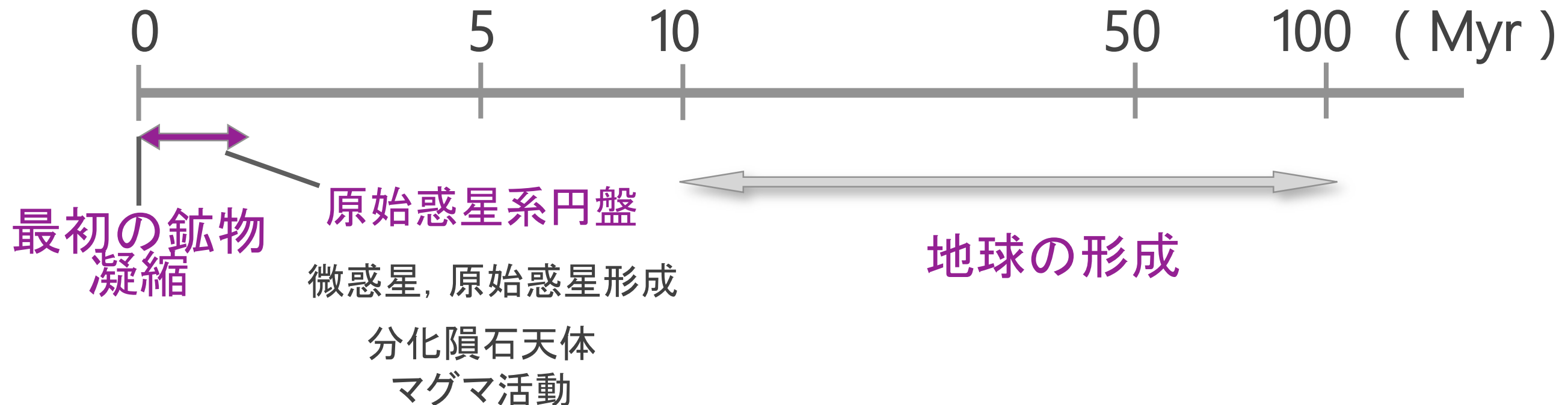
Kenneth R. Lang, The Cambridge guide to the solar system (Cambridge: Cambridge University Press, 2011)
p. 388 Fig. 12.23 Meteorite orbits

*

隕石からわかる太陽系の歴史

放射性同位元素の時計を用い

- $t_0 = 4.567$ Gyr (今から45.67億年前に最初の固体形成)
- 火山活動をする天体(微惑星)が 100 万年以内に形成
- その後 200-300 万年間円盤内で活発な高温イベント



隕石に残された太陽系初期物質

コンドライト隕石

- 太陽系最古の鉱物, CAI
CaとAlに富む酸化物, あるいは珪酸塩鉱物(SiO_4 化合物)数種の集合体 ($\sim 1\text{cm}$)
45.67 億年
- Mg_2SiO_4 , MgSiO_3
熔融状態から固結した状態
(chondrule) ($\sim 1\text{mm}$)
- FeNi
単独粒子 ($\sim 100\mu\text{m}$)



Photo by H. Raab, from Wikipedia Commons
<https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%88#/media/File:NWA869Meteorite.jpg>
CC BY-SA 3.0

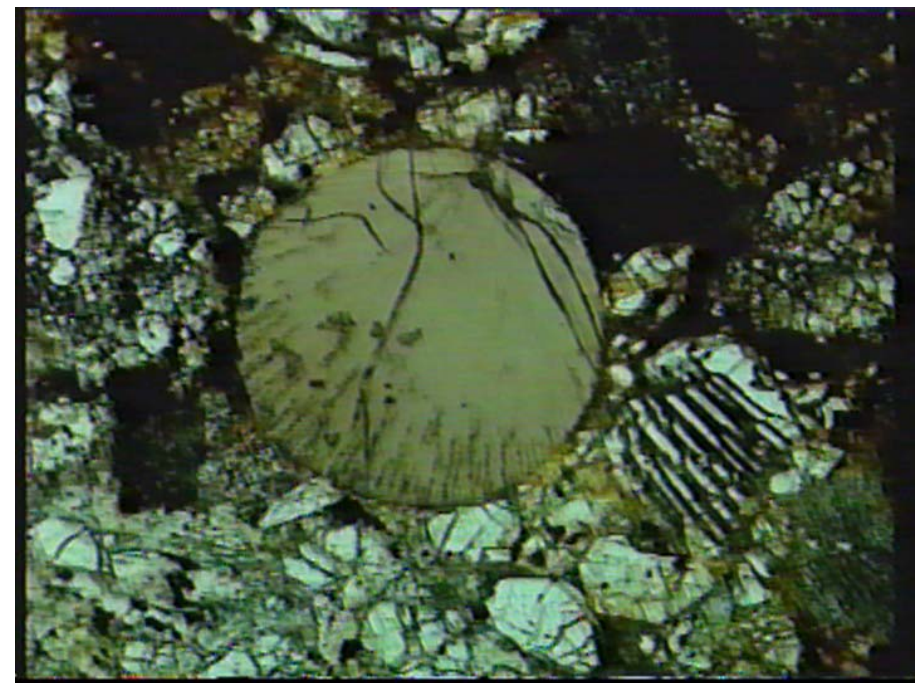


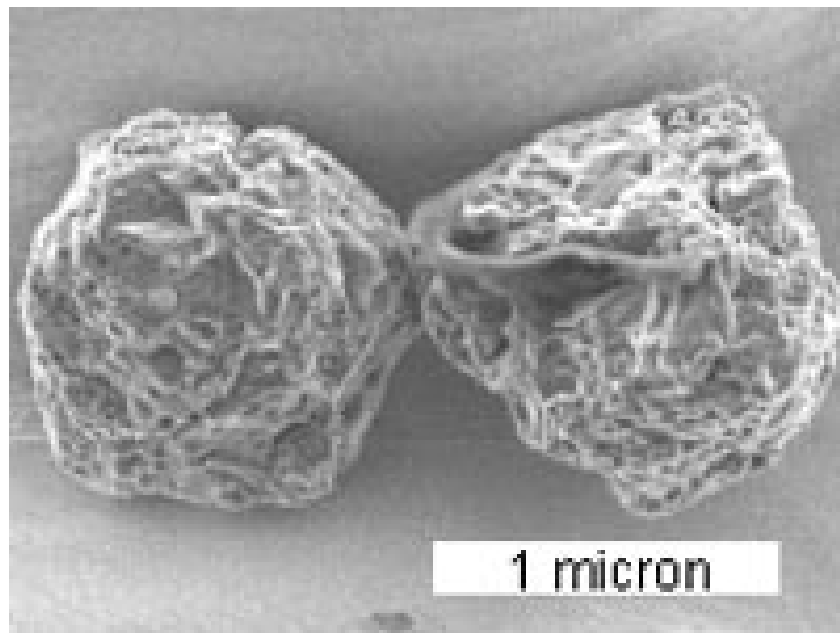
Photo by Bérczi Szaniszló, from Wikipedia Commons ref.20180409
https://ja.wikipedia.org/wiki/%E3%82%B3%E3%83%B3%E3%83%89%E3%83%A9%E3%82%A4%E3%83%88#/media/File:Glassy_chondrule.jpg
CC BY-SA 3.0

隕石に残された前太陽系の歴史

プレソーラー粒子

- ダイヤモンド, SiC, グラファイト(C): 太陽系では作り得ない
- アルミナ(Al_2O_3), ケイ酸塩鉱物(地球などと共通)
- 同位体組成が太陽系の物質とは大きく異なる

SiC from Murchison meteorite

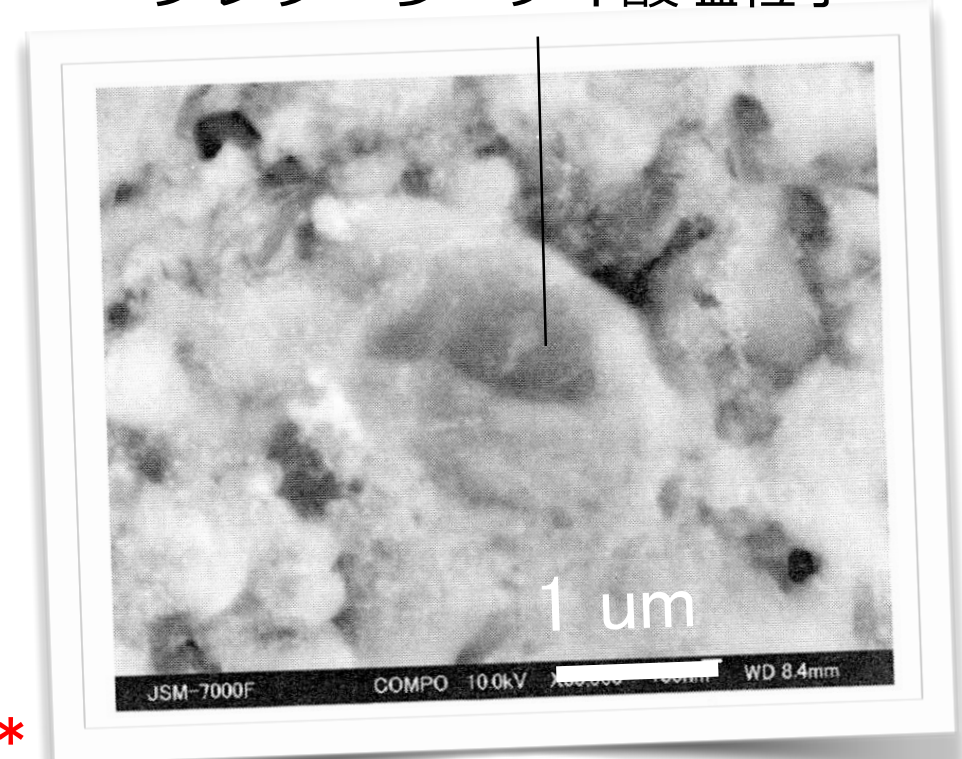


TiC in C

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しま
した

プレソーラー粒子(TiC)の画像
Presolar Grain Workshop, January 28
- 29, 2012 Washington University
http://presolar.wustl.edu/laboratory_for_space_sciences/Presolar_Grain_workshop_2012.html

プレソーラーケイ酸塩粒子

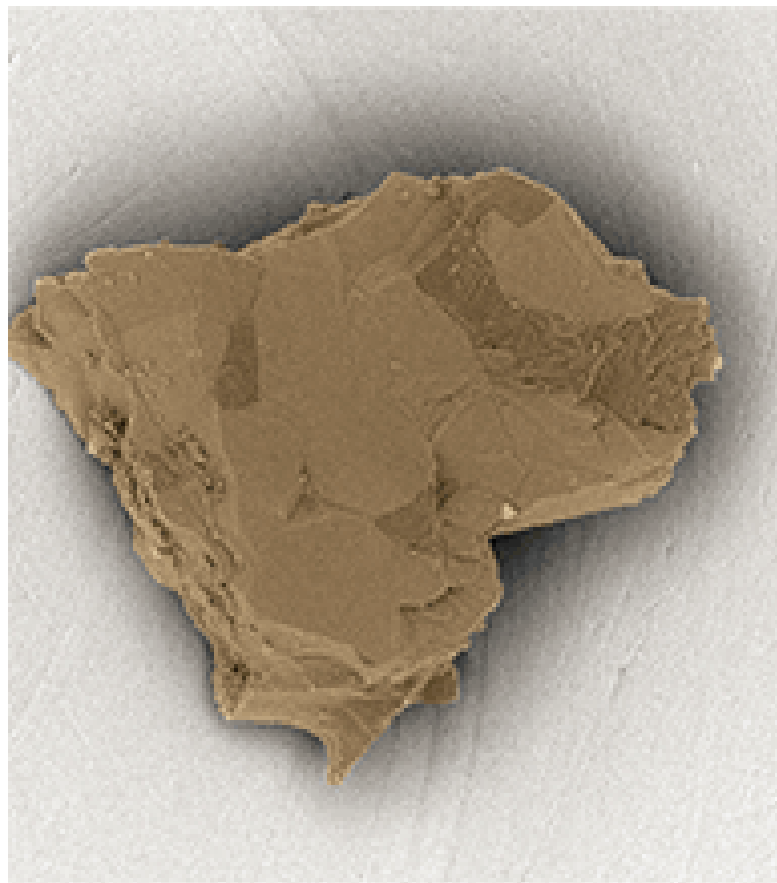


江端 新吾(2007)「隕石中のプレソーラー粒子」「地球外起源固体微粒子に関する総合研究」に関する小研究会 (January 26, 2007, 東大宇宙線研)
Fig.3

太陽系以前の赤色巨星や超新星爆発により形成された固体粒子が太陽系にとりこまれ、隕石の一部となった

ちなみに、はやぶさが採取した資料

コンドライト隕石(ただし、一旦天体で加熱、その後破壊、再び集積をしたらしい)



*

JAXA
<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/science/asteroids/>

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

コンドライト隕石の各角度からの画像

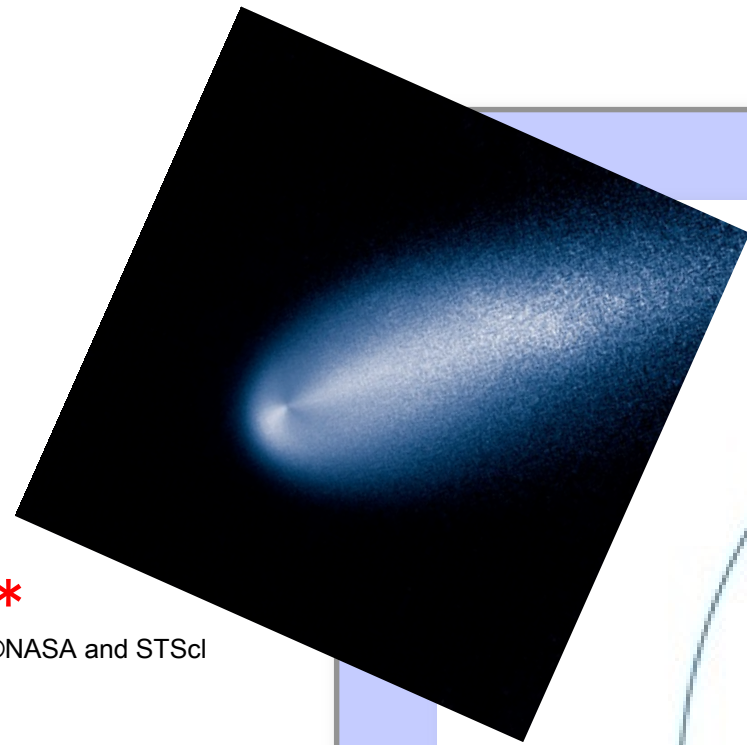
Akira Tsuchiyama et al., "Three-Dimensional
Structure of Hayabusa Samples: Origin and Evolution
of Itokawa Regolith" Science, 333(2011): 1125–1128
[http://science.sciencemag.org/content/333/6046/11](http://science.sciencemag.org/content/333/6046/1125)

25

P. 1127 Fig. 4

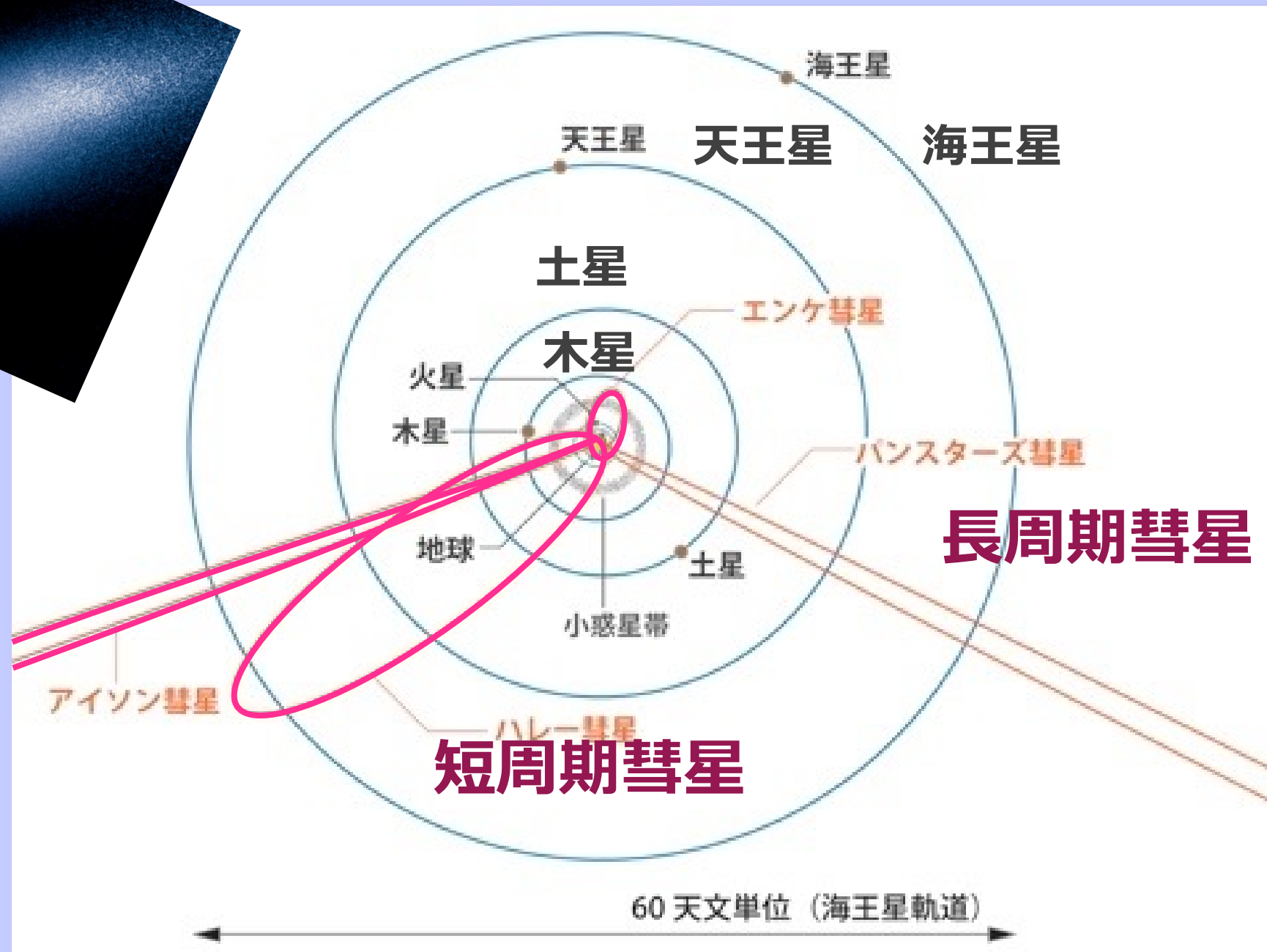
きわめて均質性の高い鉱物粒子集合体

彗星



*

©NASA and STScI



*

彗星から明かになった太陽系の歴史

- 隕石を構成する岩石成分が含まれる
CAIやchondrule 破片存在
- 分子雲に由来すると考えられる物質も含まれる
非晶質珪酸塩鉱物, 鉄微粒子, 有機物

理論予測をはるかに超える

原始惑星系円盤内での大規模な物質移動

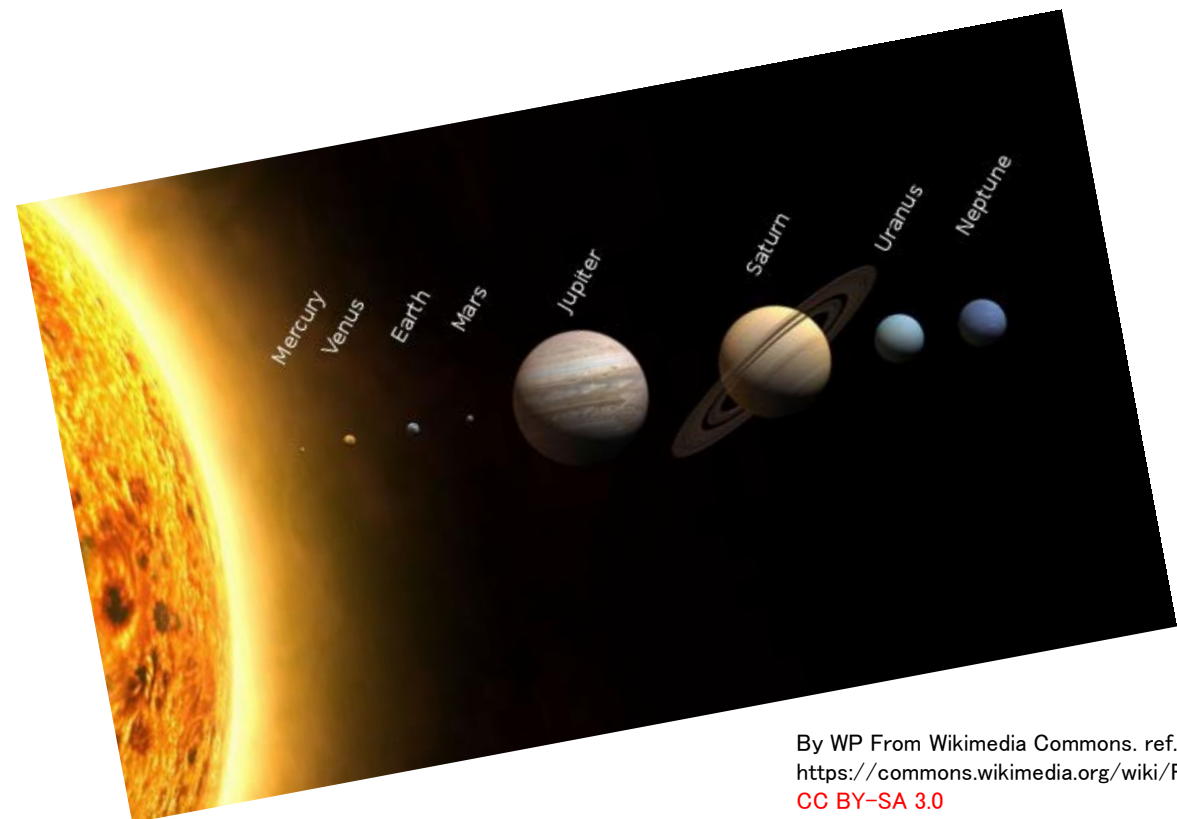
ただし, まだ長周期彗星の塵は調べられていない

隕石・彗星物質のまとめ

- **隕石**には初期太陽系の歴史が刻まれている
物事のおこった時間、物質が変化したプロセスへの手がかり、天体でのできごと
- **珪酸塩鉱物(Mg-Si-O化合物)と金属**は、合体、集合の結果、地球型惑星になった。あるいはガス惑星、氷惑星のコアに
ただし、原始惑星系円盤内で大規模な物質移動があり、その場でつくられた物質というわけではない

目次

1. イントロダクション
2. 太陽系の材料
3. 惑星系の形成
4. 惑星を作る物質
5. 生命を作る物質



By WP From Wikimedia Commons. ref. 20160621
<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Planets2013.svg>
CC BY-SA 3.0

隕石中の有機物

隕石中：流水中で形成された有機物

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

隕石中の有機物の画像

出典：Hitesh G. Changela (2015) Morphological study of Insoluble Organic Matter from carbonaceous chondrites: Correlation with petrologic grade, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 159: 285–297, p.294 Fig.8A, 8B, 8C
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016703715000800>

- グリシン, アラニン等の簡単なアミノ酸もあり
- 時に L 体過剰も（地球生命の起源なのか？）

隕石・彗星中の有機物

彗星中：脂肪族有機物, kerogen様物質

著作権等の都合により、
ここに挿入されていた画像を削除しました

彗星中から見つかった有機物の写真とスペクトル

出典: Bradley T. De Gregorio, Rhonda M. Stroud, Larry R. Nittler, George Cody and A. L. David Kilcoyne (2014)
Coordinated Electron and X-ray Microscopy of Cometary Organic Matter Collected by the NASA Stardust Mission, Microscopy and Microanalysis 20(Supplement S3): 1694–1695, p.1695 Fig.1A, 1B, 1C

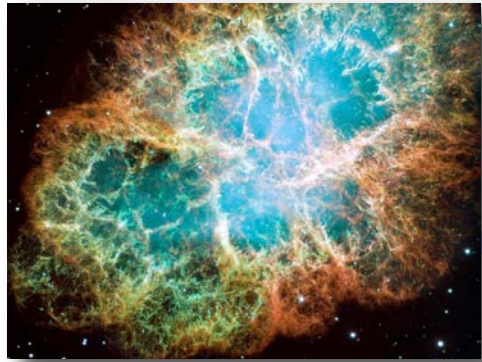
<http://dx.doi.org/10.1017/S1431927614010228>

➤ 原始惑星系円盤内で、有機物進化がおきた？

新たな星・惑星へ

超新星爆発

©NASA, ESA, J. Hester, A. Loll (ASU)



鉱物微粒子

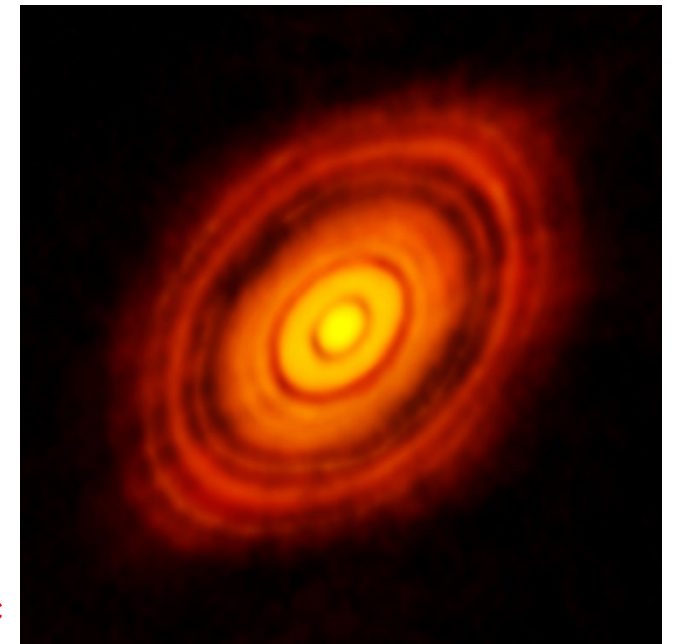
元素合成

分子雲



太陽系の場合
～100 万年

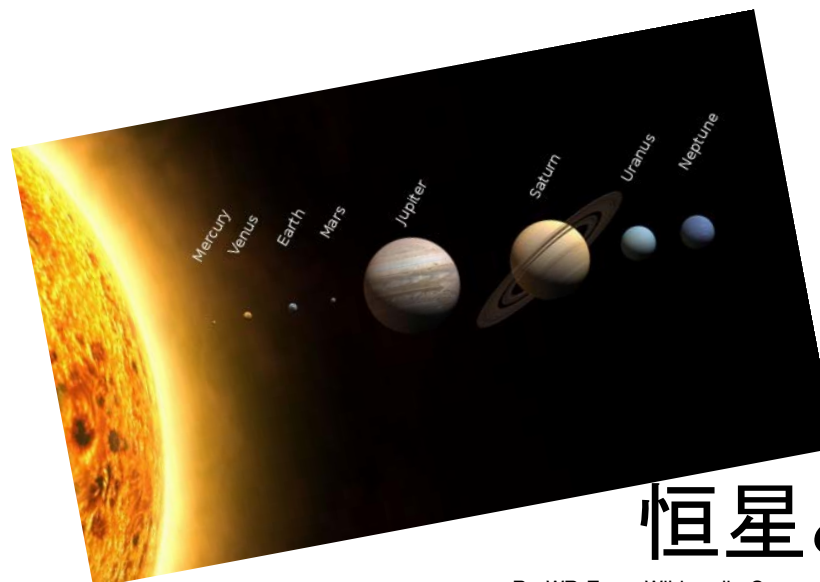
原始星と円盤



©ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)

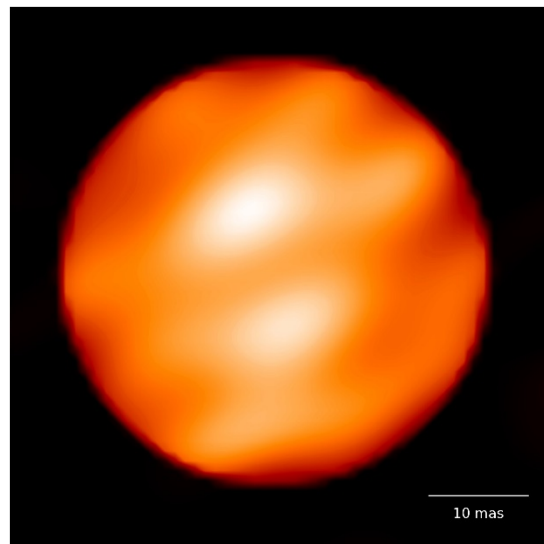
1000万～1億年

恒星と惑星系



100 億年
(太陽系もあと～50億年
経過すると)

赤色巨星



©Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.

まとめ

- **宇宙と生命をつなぐもの、惑星**
星形成の必然的副産物
われわれの知らない多様な惑星系がありえる
- **太陽系の惑星**
初期進化過程はダイナミック
物質安定性, 条件に応じ大きく変化
大規模物質・天体移動, 混合の結果, 惑星の多様性に
- **惑星の素材物質**
太陽系以前の星で作られた元素, 物質
太陽系のガスから凝縮した物質
- **生命の素材物質**
分子雲由来の有機物が変化
原始惑星系円盤において進化の可能性もあり