


宇宙の不思議 ～大人のための自然科学入門～  
2012年6月15日 宇治市生涯学習センター

# 第一回：私たちはどこから来たのか ～宇宙の歴史と生命の誕生～

磯部洋明  
京都大学宇宙総合学研究ユニット

Star-Forming Region in the Carina Nebula  HUBBLESITE.org

我々はどこから来たのか？  
我々は何者か？  
我々はどこに行くのか？



Paul Gauguin, ボストン美術館所蔵

# 講座の概要

- 1回目「私たちはどこから来たのか～宇宙の歴史と生命の誕生～」
  - 宇宙の歴史、太陽系と地球の誕生、生命の発生と進化の話をしてします
- 2回目「私たちはどこにいるのか～太陽と地球の関係～」
  - 地球・人類と宇宙の関わり、特に太陽活動と地球環境や宇宙天気予報の話をしてします
- 3回目「私たちはどこへ行くのか～人類と宇宙の未来～」
  - 人類が宇宙へ進出してゆく時代の文化・社会的問題、科学と社会の関係、そして最後に宇宙と地球の長期的な未来についてお話します

# 講座を通して得て頂きたいこと

- 宇宙、科学の面白さ、未知の世界があることのわくわく感を感じる
- 私たちが「変化する世界」に生きていることを実感する
- 宇宙という視点を通して、環境、生命、社会、倫理などについて「違った見方」を試してみる

# 質問

- 日本という国はいつまで続くと思いますか？
- 地球はいつか終わりを迎えることは知っていますか？
- この宇宙に終わりはあると思いますか？

# 今日の内容

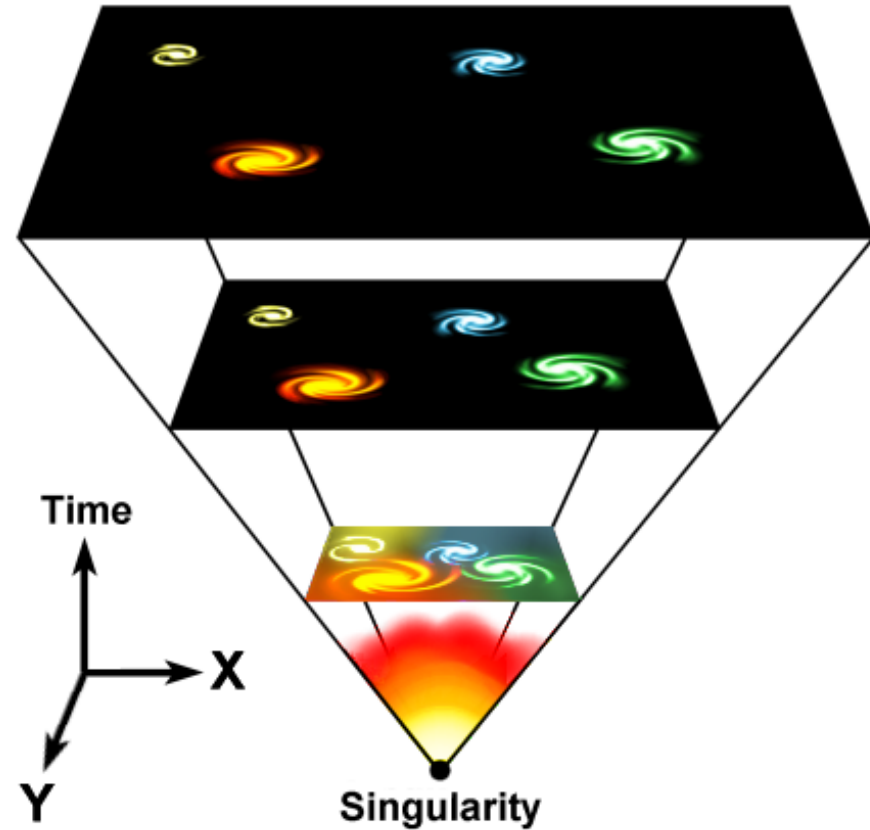
- わたしたちの宇宙はどんなところ？
- 宇宙はどのようにして始まったか？
- 終わりはあるのか？

# まずは宇宙旅行へ

国立天文台が作成したソフトウェア”mitaka”を使って、  
宇宙がどんなところか見てみましょう。  
mitakaは以下のホームページからダウンロードできます。  
<http://4d2u.nao.ac.jp/html/program/mitaka/>

# 宇宙は膨張している！？

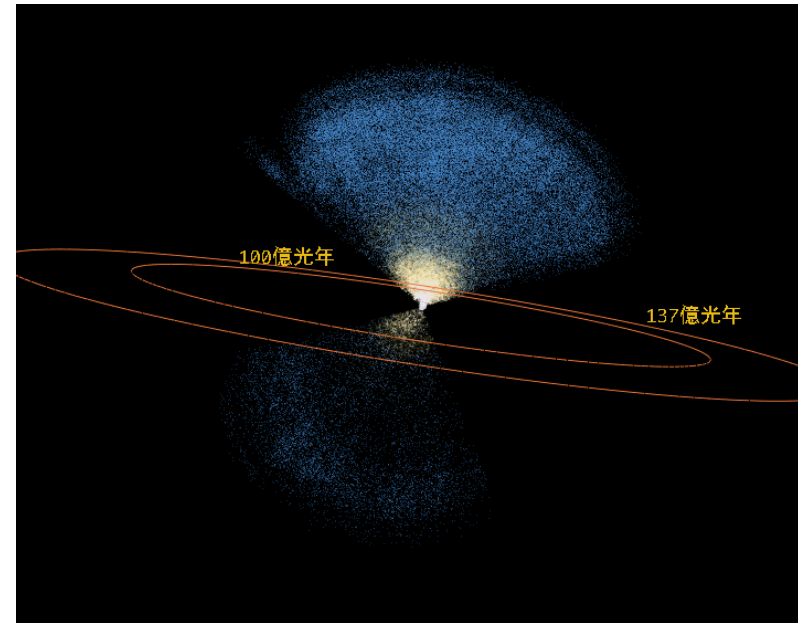
- 観測的発見：遠くの銀河ほど（太陽系から）速く遠ざかっている（E. Hubble, 1920年代）
- ということは昔は今より小さかった
- => 宇宙には始まりがあった！



From Wikipedia Commons



# 宇宙に端はある？



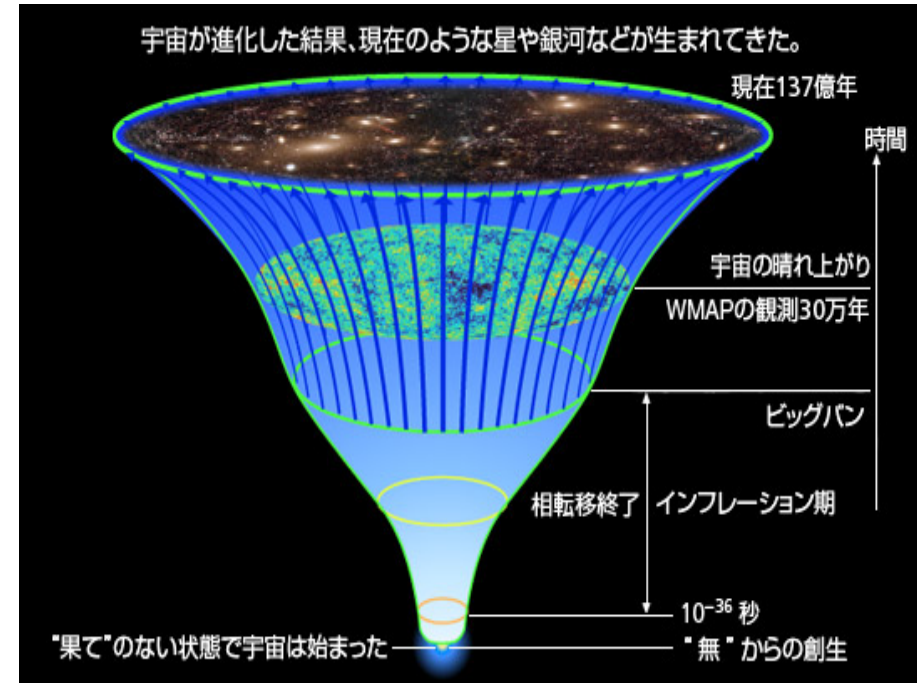
- 全てのモノ、情報は、光の速度を超えられない。
- 一つだけ光の速度を超えられるのは、「空間が広がる速さ」。
- 地球から遠い場所ほど、地球から速く遠ざかっている。
- ある地点から先は、地球から光の速さより速く遠ざかっているため、我々は決してそこへ行けないし、そこで起きている情報を得ることはできない。
- その距離を地球からみた「観測可能な宇宙」の果てということ  
はできる
- その先には....

# ビッグバン宇宙論

- 現在宇宙は膨張している
- つまり昔の宇宙は今より小さかった。
- ずっとさかのぼるとほとんど一点になる。宇宙は超高温高圧の状態から生まれた... **ビッグバン** (ジョージ・ガモフ 1948)
- 膨張速度が分かれば、逆算すれば宇宙の年齢がわかる。
- 最新の観測結果では、宇宙の年齢は約137億年

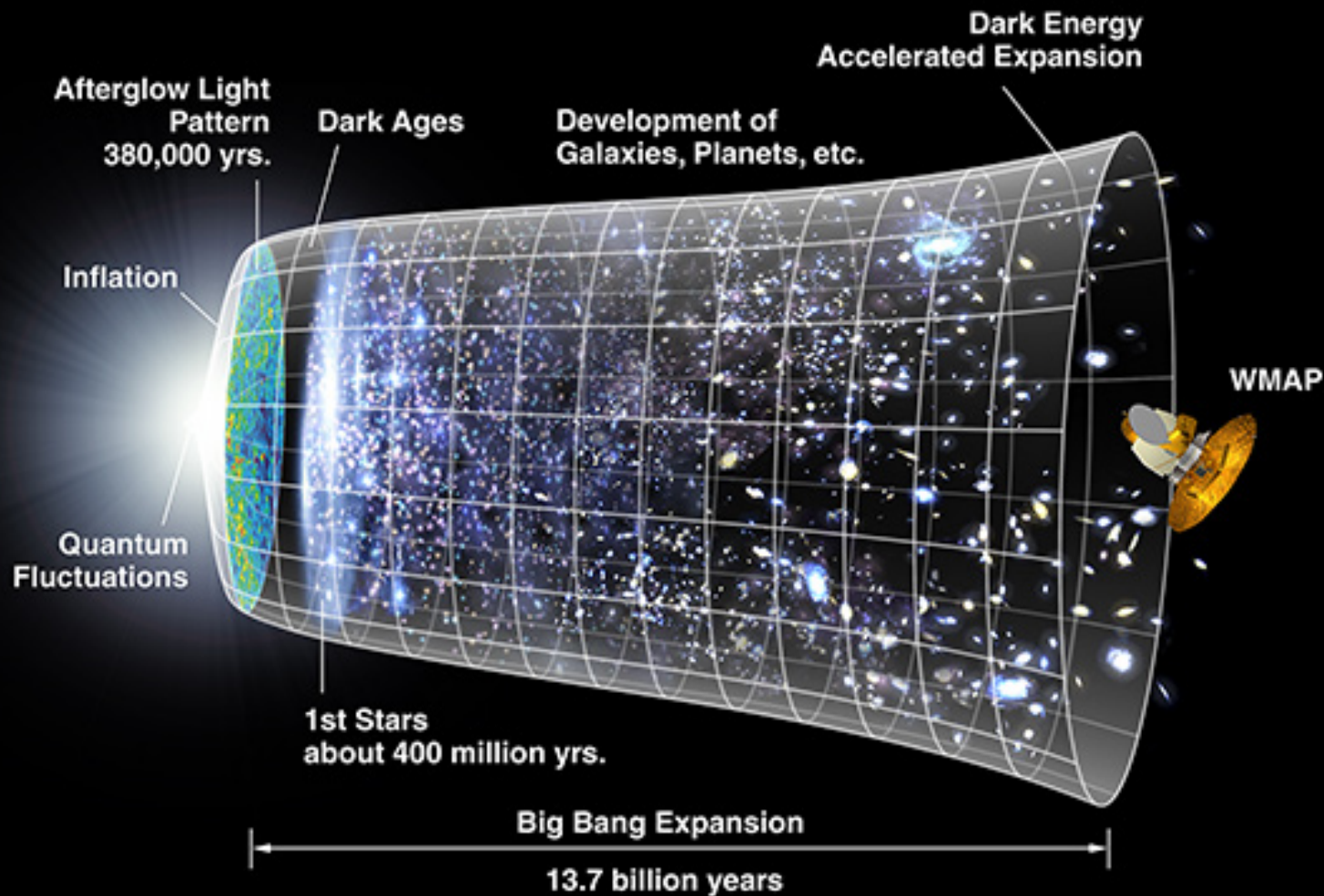
# 宇宙はどのように生まれたのか？～現在の理解

- 宇宙は「無」から生まれた
- 「無」のゆらぎが、ある時「真空の相転移」を起こし、急激に広がった（インフレーション）
- 「真空の相転移」が起きて潜熱が解放されて云々...（難解）



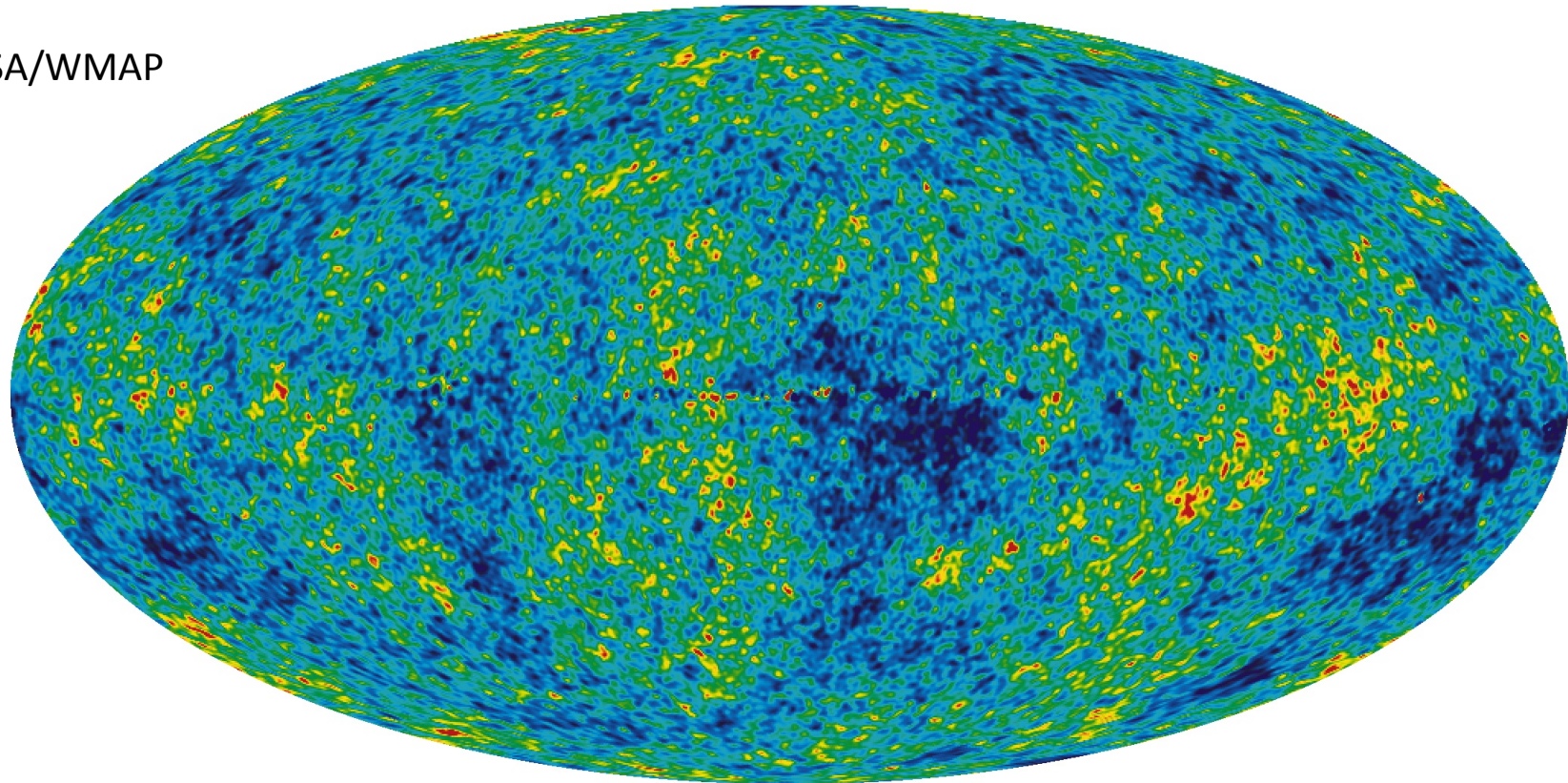
佐藤勝彦先生のHPより  
<http://utaprc4.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~sato/>

# 宇宙の歴史



# ビッグバンの名残：宇宙背景放射

NASA/WMAP



-200  $T(\mu\text{K})$  +200 WMAP 5-year

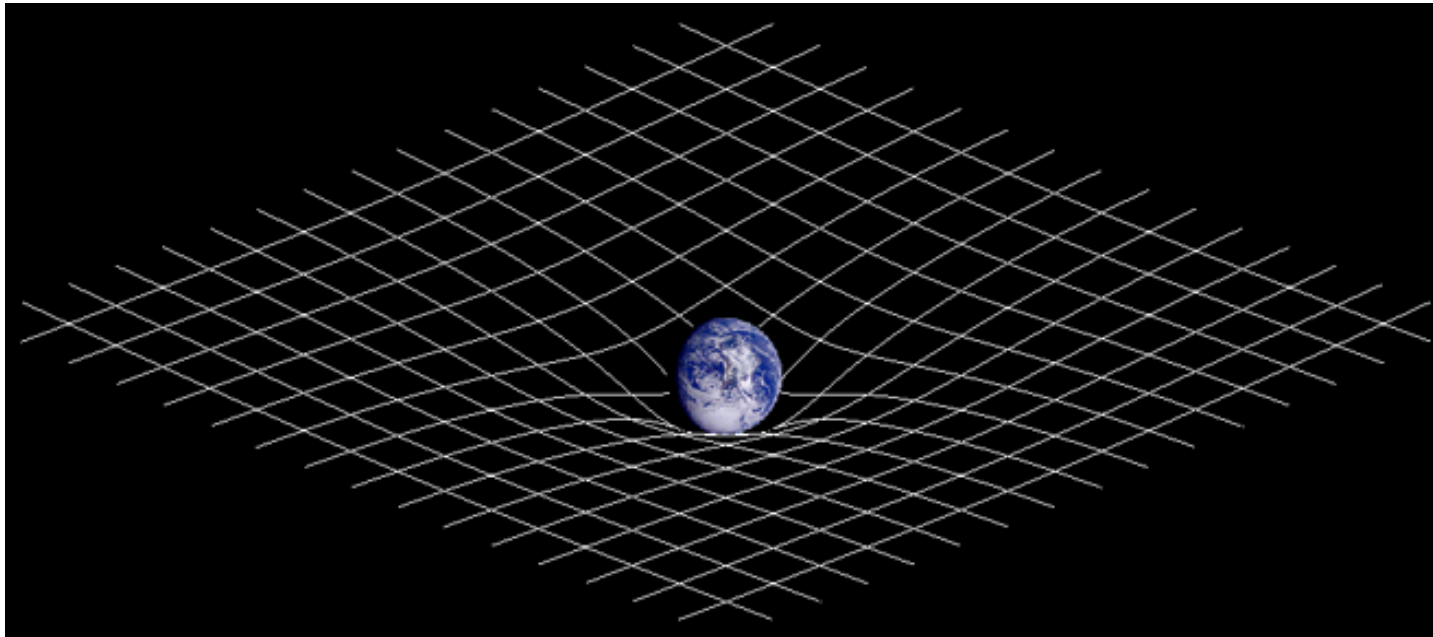
- 絶対温度で約2.7度(約マイナス270度)に相当する電波が宇宙空間に満ちている
- 超高温のビッグバンから膨張によって冷えたなごり

# アインシュタインの一般相対性理論 (A. Einstein, 1916)

アインシュタイン方程式＝時空のゆがみ具合を表す方程式

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

空間のゆがみ具合 = 宇宙の物質(エネルギー)の分布



From Wikipedia Commons

一般相対性理論は時空と重力の理論。時空がゆがんでいる⇒重力を感じる

# アインシュタインの宇宙項

- アインシュタイン方程式を解くと、宇宙は自分自身の重力でつぶれてしまう、という解が出てくる
- 宇宙は時間的に変化しない、というのが当時の宇宙観。アインシュタインでさえも、「変動する宇宙」という描像を当初受け入れられなかった。

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

宇宙項

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

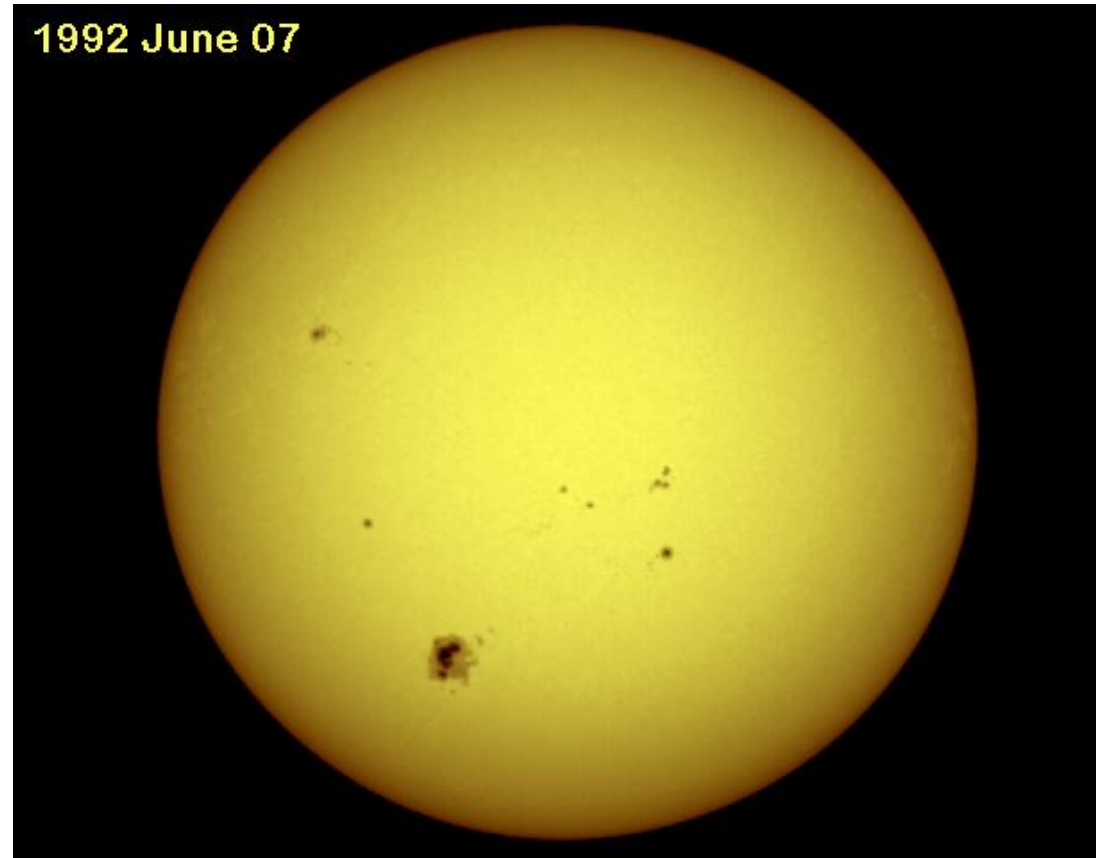
- アインシュタインは宇宙をなんとか「静止」させるため、収縮させる引力につりあうような反発力の項(宇宙項)を方程式に付け足した。
- 宇宙が実際には静止しておらず、アインシュタインは後に「人生最大の誤りだった」と述べた

地球と生命は、どうして生まれたか？

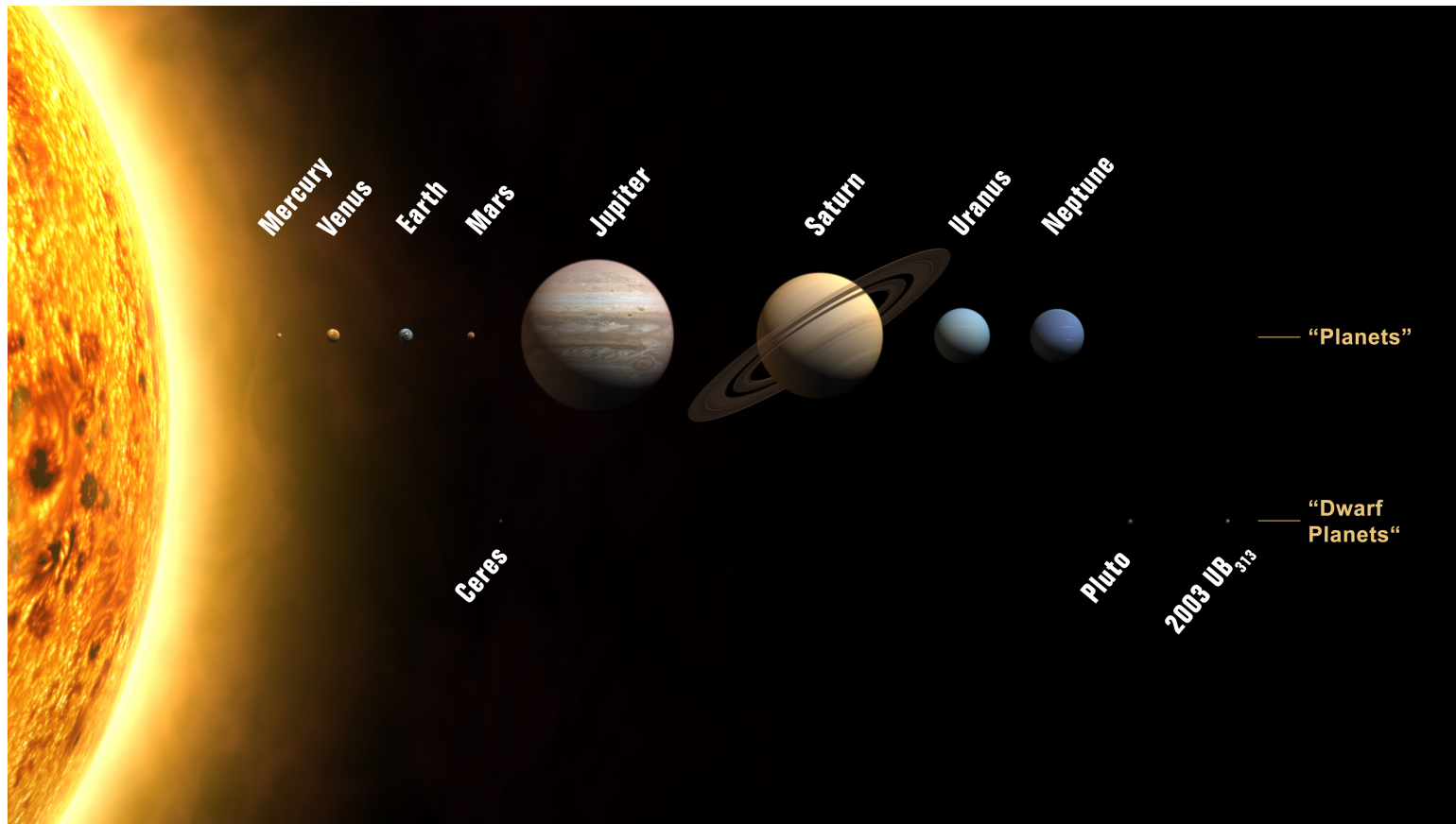


# 恒星

- 太陽のように自ら光る星
- ほとんど水素できている。
- エネルギー源は核融合(水爆と同じ)
- 夜空に見える星はほとんどが恒星



# 惑星



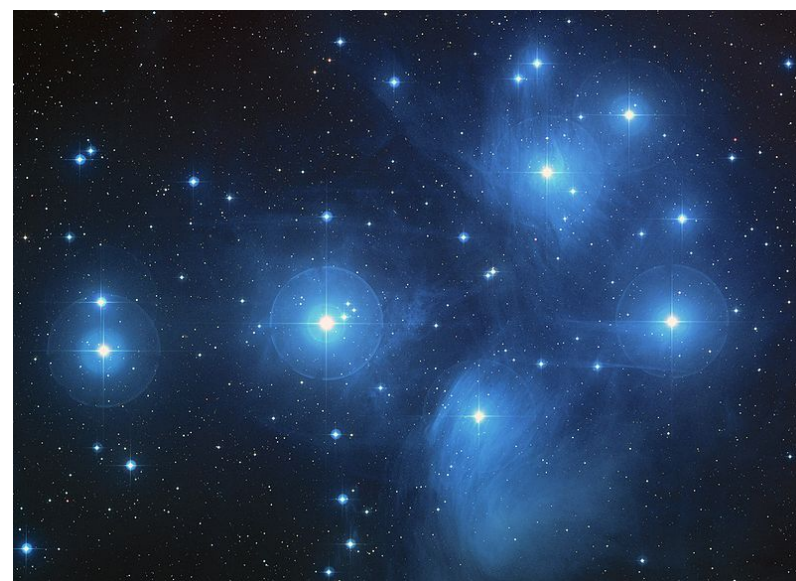
- 自分では光らず、恒星の周りを回る星
- 岩石（水、金、地、火）、ガス（木、土）、氷（天、海）などでできている
- 太陽系以外でも見つかっている（詳細は後日）

# 星の集団

銀河 約1000億個の星の集団



球状星団(数10万個の星の集団)



散開星団(数100程度の星の集団)

# さまざまな元素

水素

ヘリウム

リチウム

Atomic number

Symbol

Atomic weight

Metal

Semimetal

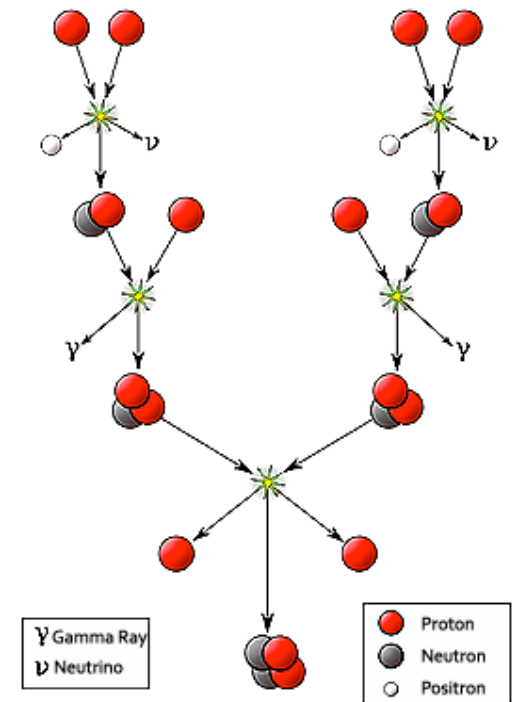
Nonmetal

1	2											13	14	15	16	17	18
1 H 1.008												5 B 10.81	6 C 12.01	7 N 14.01	8 O 16.00	9 F 19.00	10 Ne 20.18
3 Li 6.941	4 Be 9.012											13 Al 26.98	14 Si 28.09	15 P 30.97	16 S 32.07	17 Cl 35.45	18 Ar 39.95
11 Na 22.99	12 Mg 24.31	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	31	32	33	34	35	36
19 K 39.10	20 Ca 40.08	21 Sc 44.96	22 Ti 47.88	23 V 50.94	24 Cr 52.00	25 Mn 54.94	26 Fe 55.85	27 Co 58.93	28 Ni 58.69	29 Cu 63.55	30 Zn 65.39	31 Ga 69.72	32 Ge 72.61	33 As 74.92	34 Se 78.96	35 Br 79.90	36 Kr 83.80
37 Rb 85.47	38 Sr 87.62	39 Y 88.91	40 Zr 91.22	41 Nb 92.91	42 Mo 95.94	43 Tc 98.91	44 Ru 101.1	45 Rh 102.9	46 Pd 106.4	47 Ag 107.9	48 Cd 112.4	49 In 114.8	50 Sn 118.7	51 Sb 121.8	52 Te 127.6	53 I 126.9	54 Xe 131.3
55 Cs 132.9	56 Ba 137.3	71 Lu 175.0	72 Hf 178.5	73 Ta 180.9	74 W 183.8	75 Re 186.2	76 Os 190.2	77 Ir 192.2	78 Pt 195.1	79 Au 197.0	80 Hg 200.6	81 Tl 204.4	82 Pb 207.2	83 Bi 209.0	84 Po 209.0	85 At 210.0	86 Rn 222.0
87 Fr 223.0	88 Ra 226.0	103 Lr 262.1	104 Rf 261.1	105 Db 262.1	106 Sg 263.1	107 Bh 264.1	108 Hs 265.1	109 Mt 268	110 Uun 269	111 Uuu 272	112 Uub 277	113 Uut 289	114 Uuq 289	115 Uup 289	116 Uuh 289	117 Uus 293	118 Uuo 293
		57 La 138.9	58 Ce 140.1	59 Pr 140.9	60 Nd 144.2	61 Pm 146.9	62 Sm 150.4	63 Eu 152.0	64 Gd 157.3	65 Tb 158.9	66 Dy 162.5	67 Ho 164.9	68 Er 167.3	69 Tm 168.9	70 Yb 173.0		
		89 Ac 227.0	90 Th 232.0	91 Pa 231.0	92 U 238.0	93 Np 237.0	94 Pu 244.1	95 Am 243.1	96 Cm 247.1	97 Bk 247.1	98 Cf 251.1	99 Es 252.0	100 Fm 257.1	101 Md 258.1	102 No 259.1		

- 宇宙ができた時は、水素(H)とヘリウム(He)とほんのちよつとのリチウム(Li)しかなかった！
- 地球のような岩石惑星はケイ素Siや鉄Feなどがないとできない
- 生命を作るには炭素C、酸素O、窒素Nなどがないとできない
- これらの「重たい」元素はどこでできたか？

# 核融合と元素合成

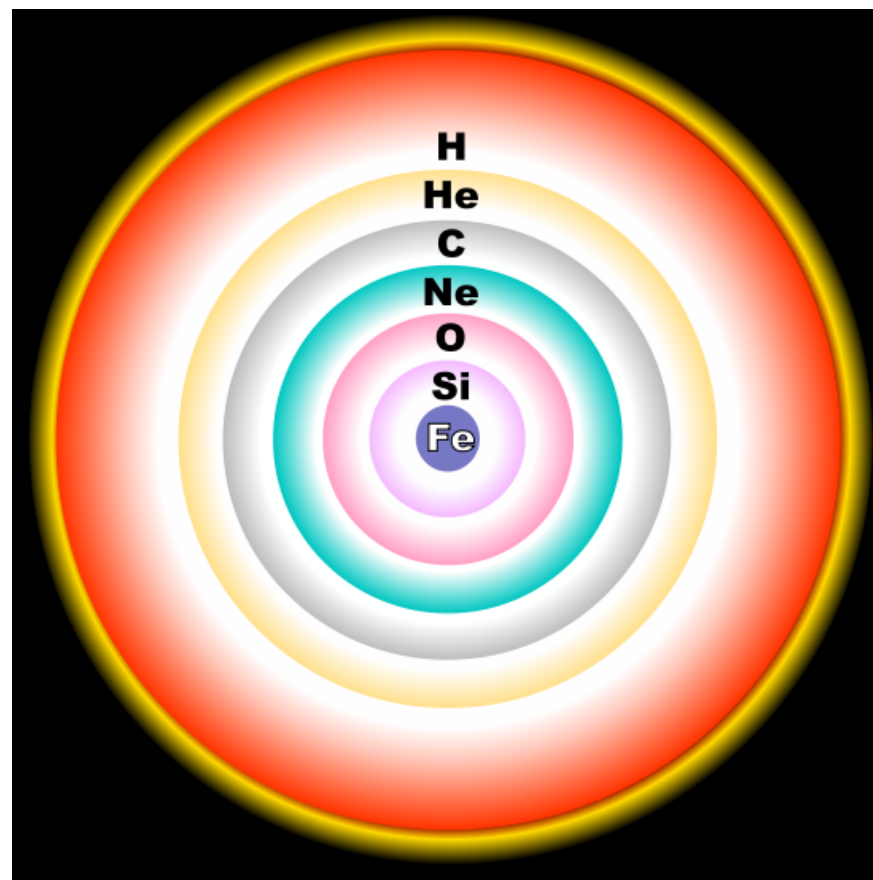
- 恒星のエネルギー源は**核融合**
- 核融合 = 軽い原子をくっつけて重い原子を作ること(後日詳述)
  - 水素爆弾や核融合発電の原理も同じ
  - 原子爆弾、原子力発電所は「核分裂」なので注意



- **星の中で、軽い元素(水素、ヘリウム)から重い元素が作られる**

# 重い元素は全て星の中でできた

- 宇宙で最初の星は水素とヘリウム(と少しだけリチウム)のみ
- 星の中で核融合が進み、炭素(C)、酸素(O)などの元素が合成される
- 鉄より重い元素(金、銀、プラチナ、鉛など)は、超新星爆発の時にできる



# ということは、

- みなさんの身体を作っている水素とヘリウム以外の原子(炭素、酸素、窒素、鉄、カルシウム...)は全て、遠い昔、太陽系ができる前にどこかの星の中で作られ、その星が死ぬ時に宇宙にばらまかれたもの。



# 星の誕生

分子雲(銀河の中の、冷たくて濃いガス)が自分自身の重力で収縮を始める



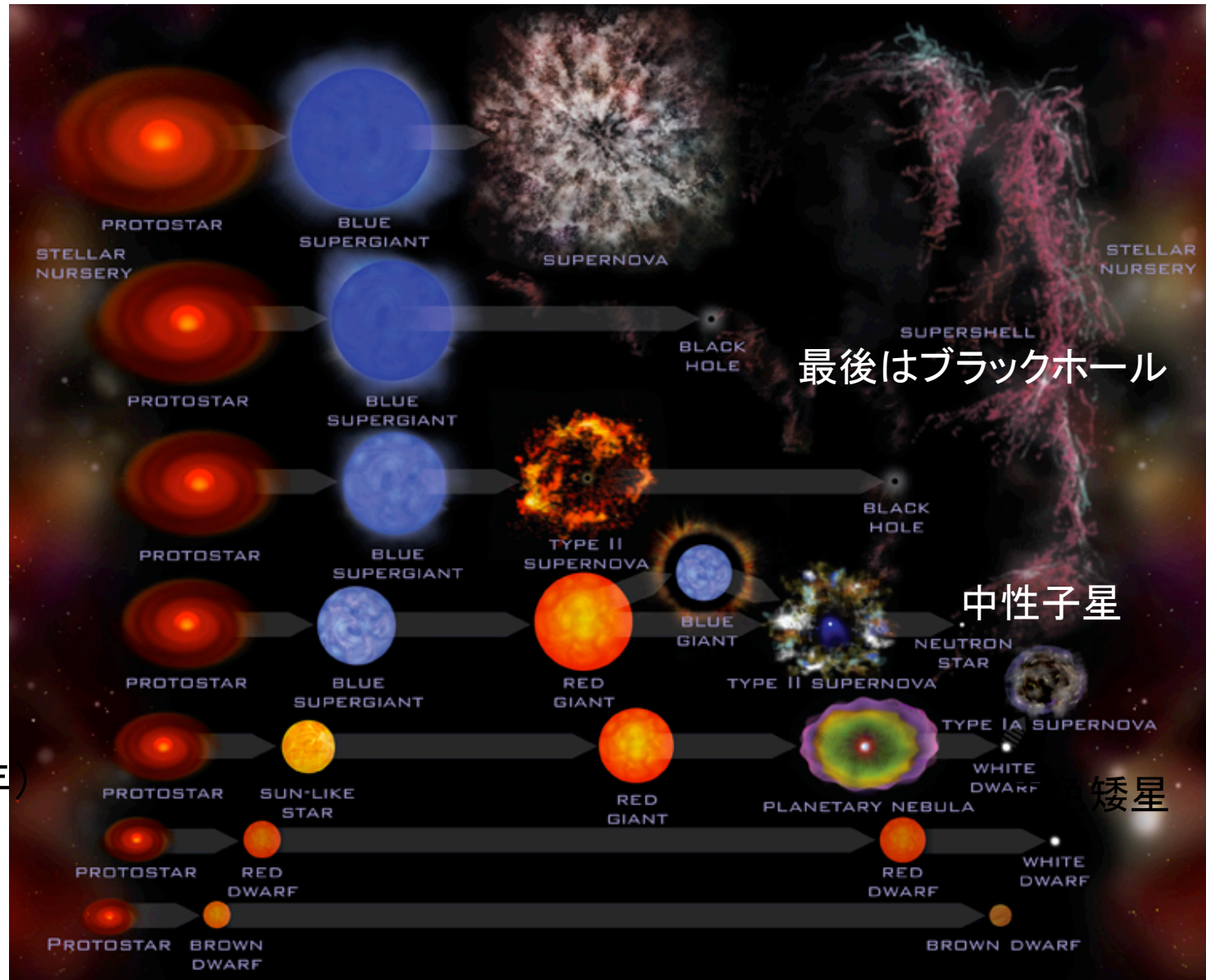
•収縮して明るく輝きだす(核融合はまだ)。周囲にガスの塵の円盤ができ、その中から惑星が生まれる



この後中心で水素の核融合が始まると、主系列星になる。

# 星の一生は体重で決まる

重い星  
(寿命～数百万年)



太陽くらい  
(寿命～百億年)

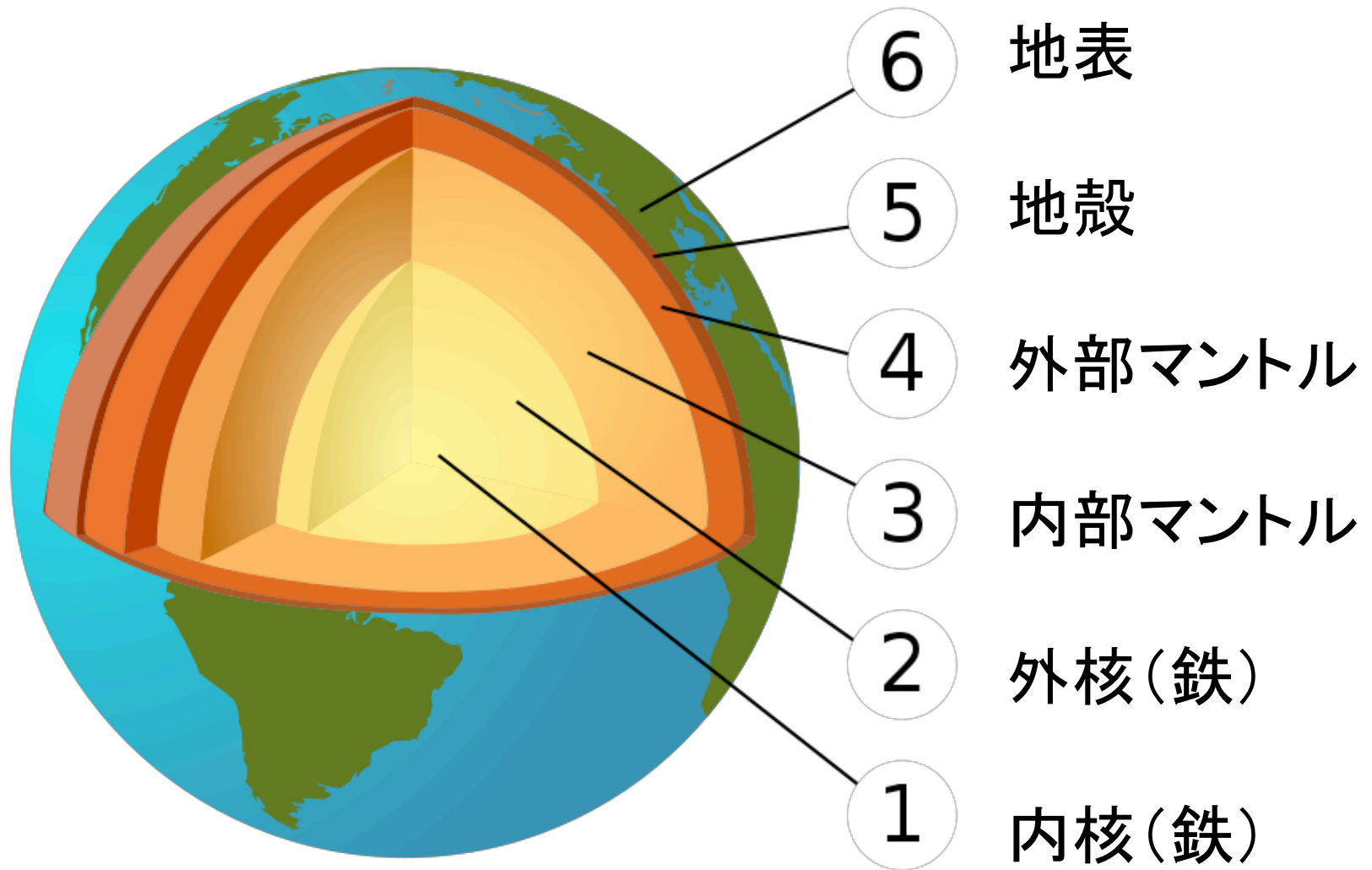
# 地球

太陽系第三惑星  
直径 ~ 13000km  
質量 ~  $6 \times 10^{24}$  kg  
年齢 ~ 45億年

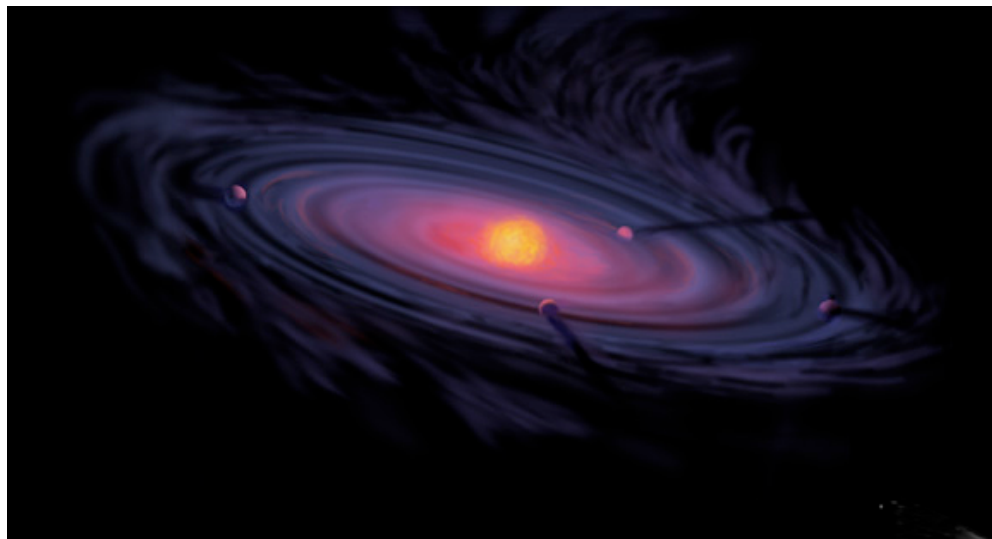


1972年、アポロ17号から撮影

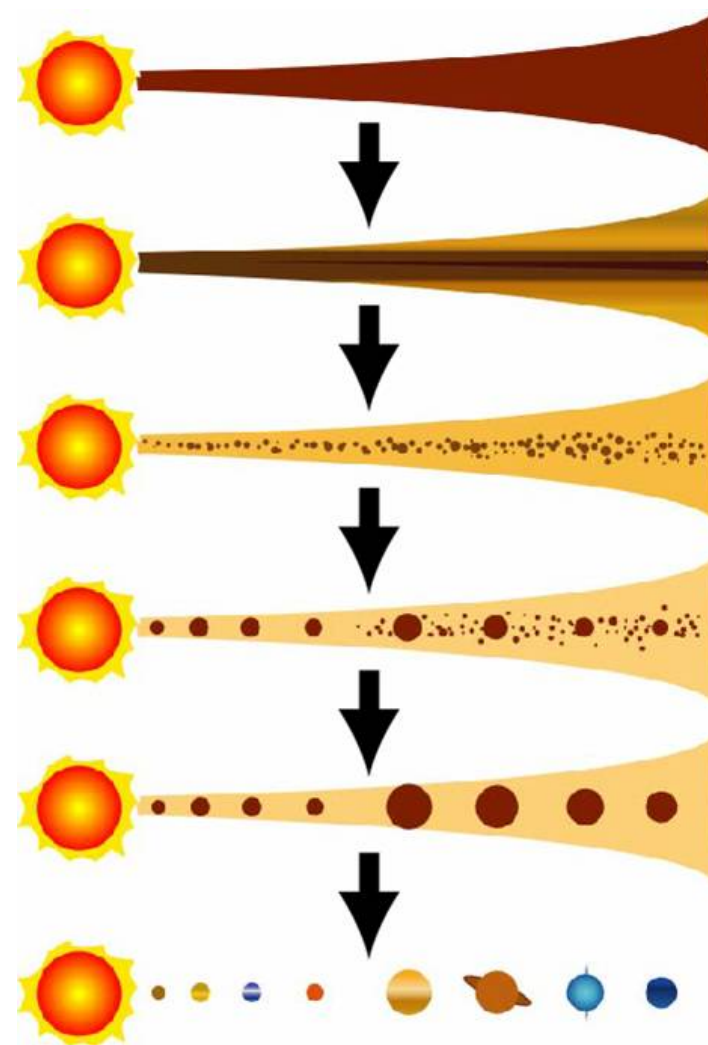
# 中はどうなってる？



# 太陽系と地球の誕生（京都モデル）



1. 原始太陽の周りにガスとチリの円盤ができる
2. チリが集まって塊（微惑星）になる
3. 微惑星が衝突を繰り返して地球サイズに成長

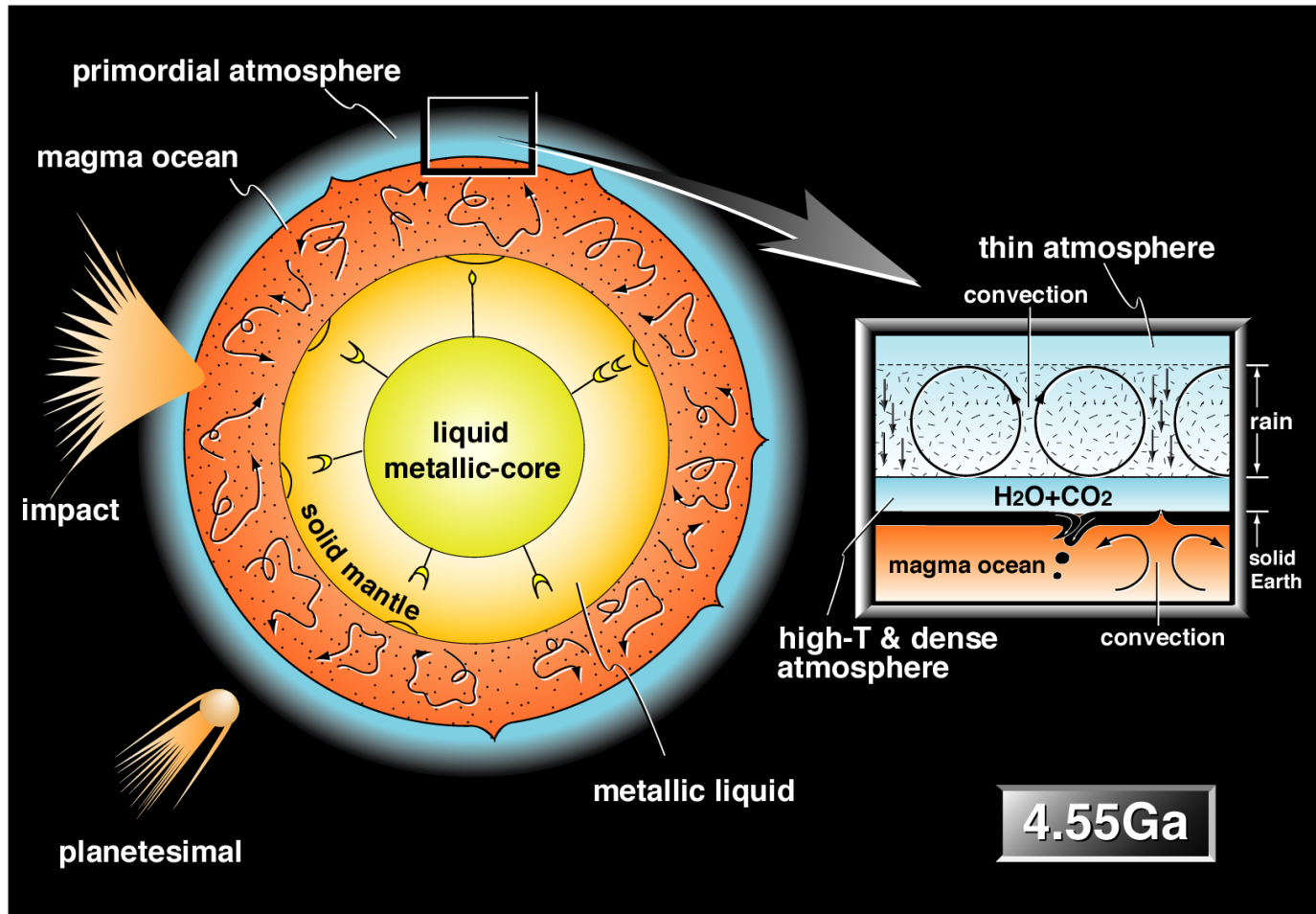


生まれてしばらくの地球はこんな感じ？

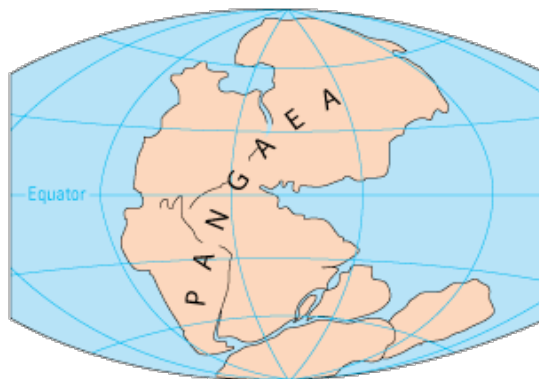
David A. Aguilar (CfA)



# 生まれたばかりの地球の構造



# プレートテクトニクス と大陸移動説

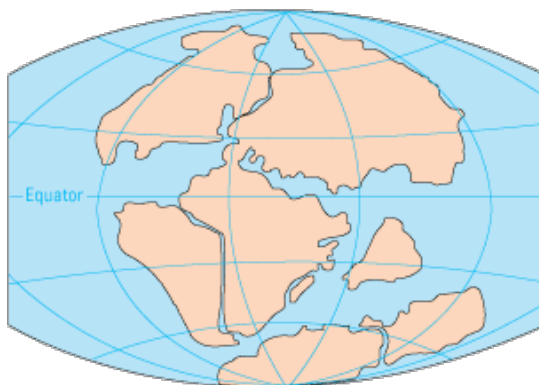


2億2千万前

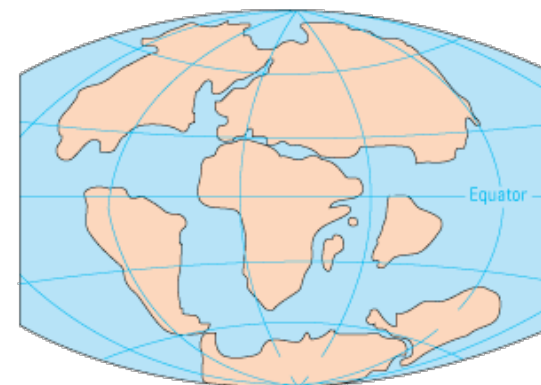


2億前

大陸は約2億年ごとに  
くっついたり離れたり  
している。

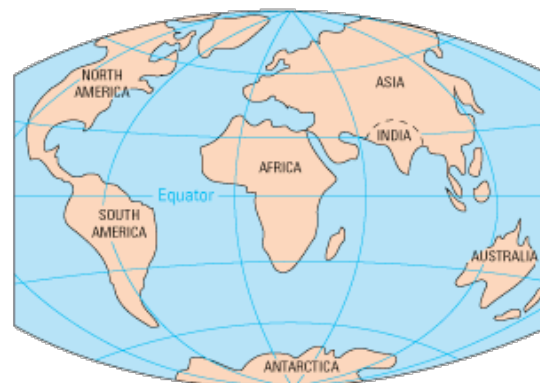


1.5億前(ジュラ紀)



6500万年前(恐竜絶滅の頃)

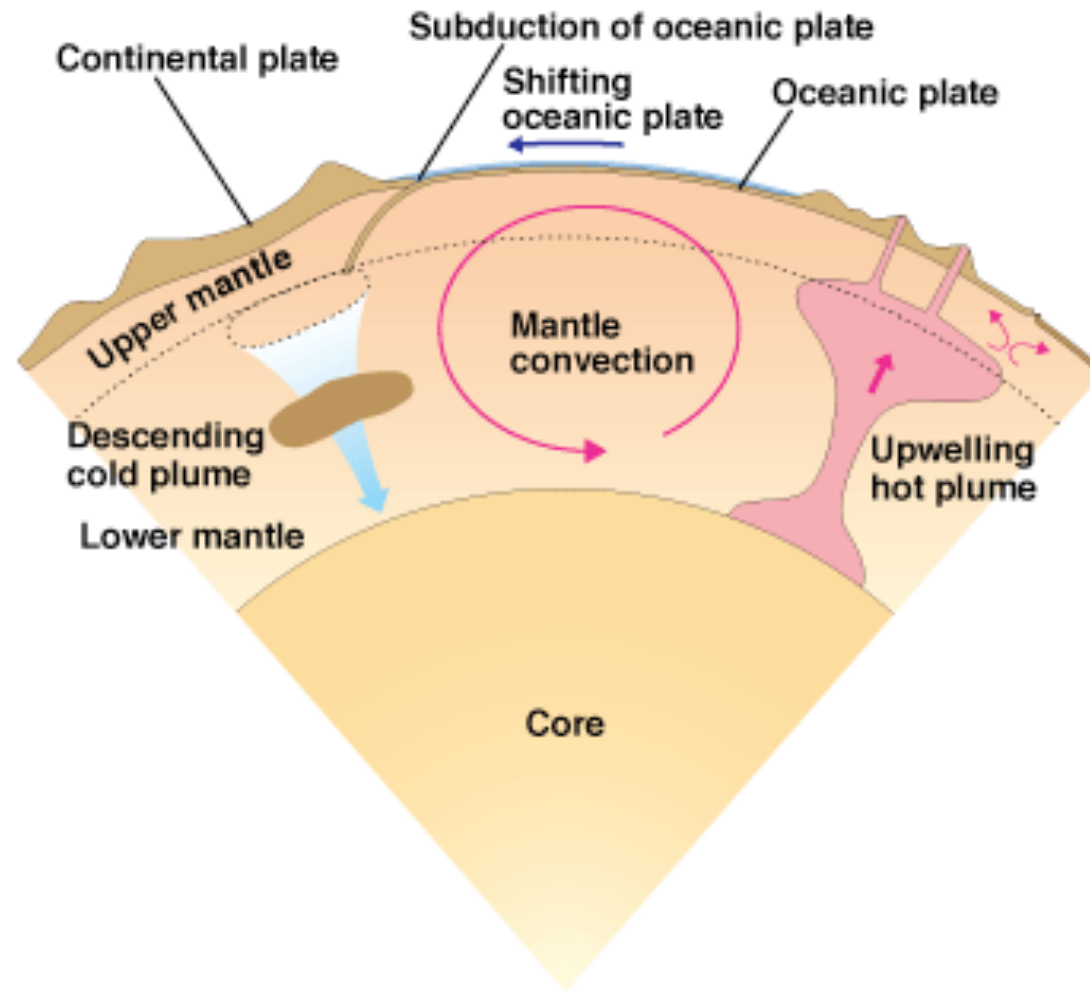
今から2~3億年後には  
再び巨大大陸ができ  
ると考えられる。



現在



# プレートテクトニクスとプルームテクトニクス



マントルの大規模な対流(プルーム)がプレートの運動を引き起こしている

# 生命とは？

- 外界と自分を区別する境(細胞膜)を持つ
- 代謝を行う(外界からエネルギーや物質を取り込み、利用して、排出する)
- 自己複製を行う

# 生命じゃないもの



**建物**: 外界と内部を区別するが、代謝もしないし自己複製もしない

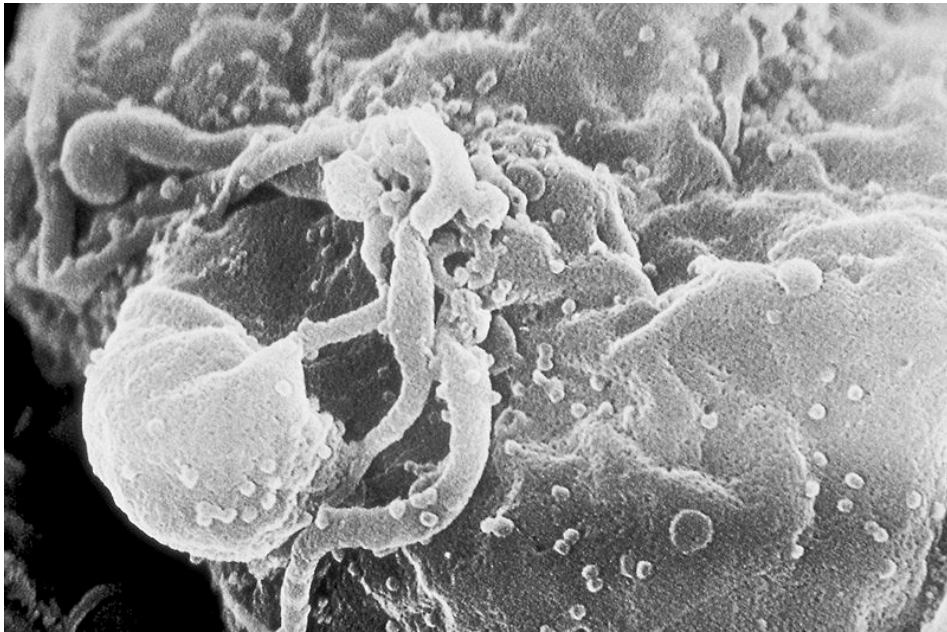
**地球**: 外界と内部を区別はややあいまい。代謝みたいなこと(太陽エネルギーを取り入れて海洋や大気が循環)もするが、自己複製はしない



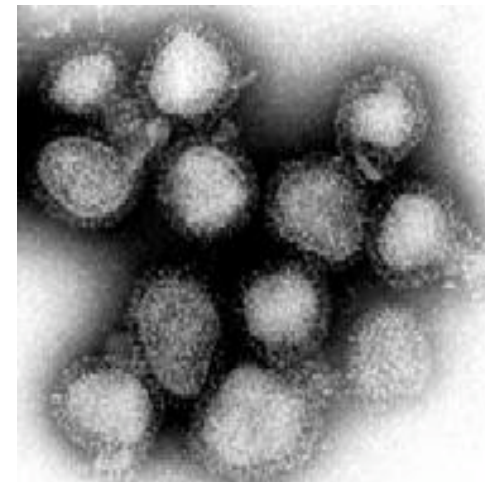
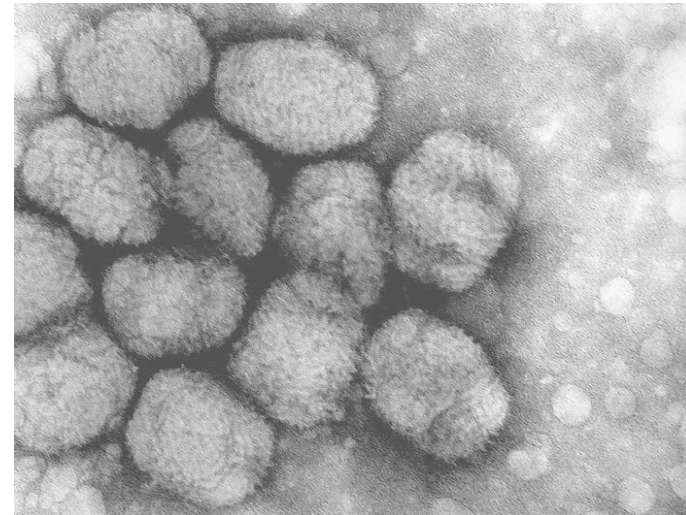
**コンピュータウイルス**:  
自己複製はするが、「外界と内部」という概念はない。代謝もしない。

# ウイルス

天然痘ウイルス



ヒト免疫不全ウイルス  
Human Immunodeficiency Virus, *HIV*



インフルエンザウイルス

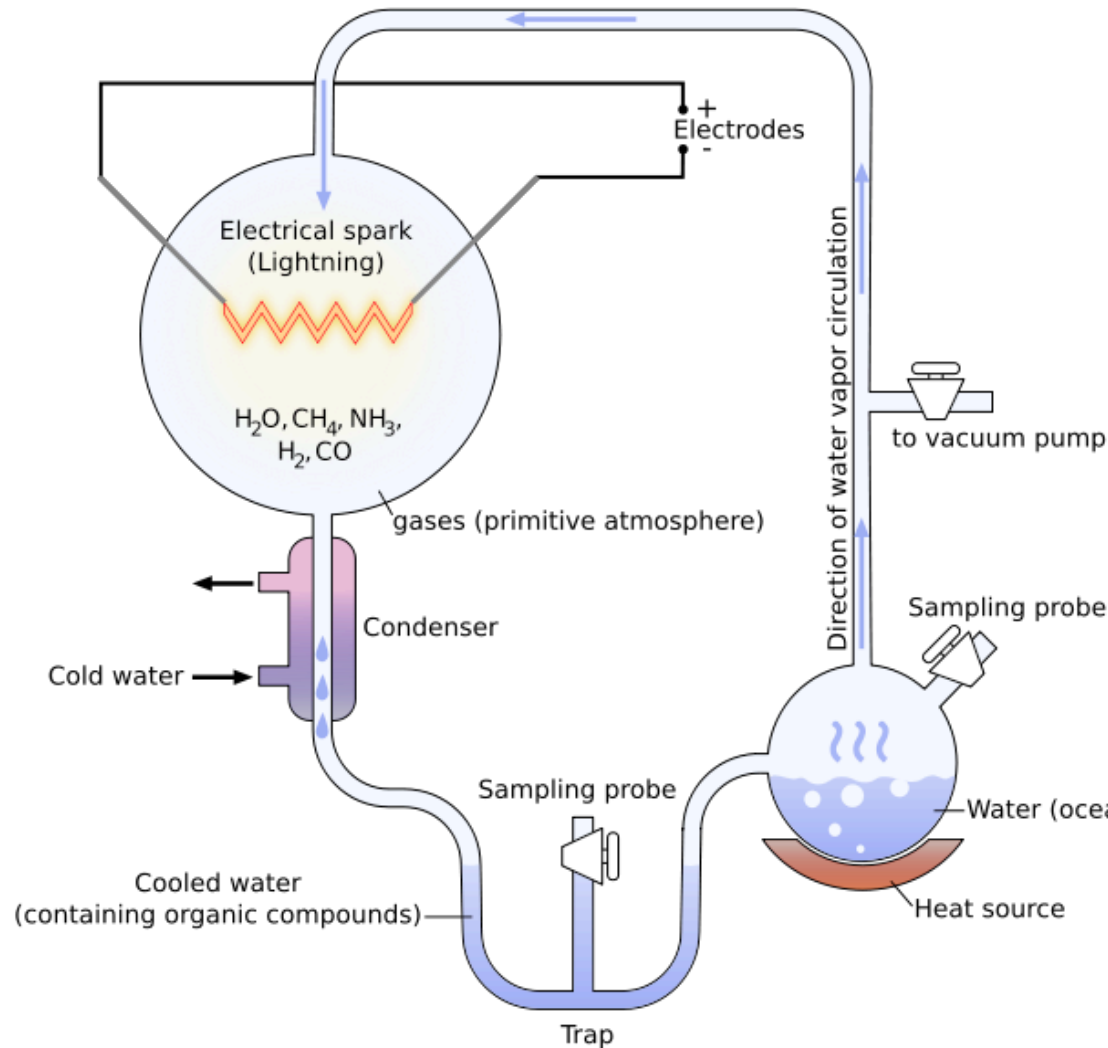
# ウイルスは生物と無生物の中間

- ウイルスは遺伝情報(DNA/RNA)を持つ
- 細胞を持たない。自分自身で代謝は行わない。
- 自分だけでは自己複製できない。他の生物の細胞に寄生して増殖する。
- 化学物質のように結晶化して保存できる(Stanley 1935)

# 地球生命史重大事件

- 地球の誕生(約45億年前)
- 原始生命の発生(約40億年前)
- バクテリア(原核細胞)の出現(38-35億年前)
- 光合成の開始(27億年前)
- 真核細胞の出現(21億年前)
- 多細胞生物の出現(10億年前)
- 硬骨格生物の出現(5.5億年前)
- 人間の出現(500万年前)

# ユーリー・ミラーの実験



原始地球の大気に存在していたと考えられる、水、メタン、アンモニア、水素を混ぜて放電すると、生命の材料であるアミノ酸ができた

(生命ができたわけではない。材料になりうる物質の一部ができただけ)

# パンスペルミア説

- 最初の生命(の種)が地球で生まれたのではなく、宇宙からやってきたとする説
- 生命そのものというより、材料となる化学物質(アミノ酸など)が宇宙からやってくる、というのも含む(準パンスペルミア)。宇宙空間では多くの有機物、変わった形の分子が見つかっている。あり得ない話ではない。

多数の星間分子を発見した  
野辺山45m電波望遠鏡





# 一番最初の生命の証拠

- 炭素原子には陽子6つ、中性子6つを持つC12と、陽子6つ、中性子7つを持つC13がある。
- 生命はC12を選択的に取り込む=>C13の割合が自然界より少ないと、生命活動の間接的証拠
- グリーンランドの約38億年前の変成岩中で、C13が特異に低い値を持つものが見つかったのが。地球上で最初の生命の証拠。
- 40億年前くらいまで、原始地球は恐らく岩石も溶けた高温のマグマオーシャンのような状態だった。生命は地球が「生命が住めるような環境」になってからすぐに誕生？

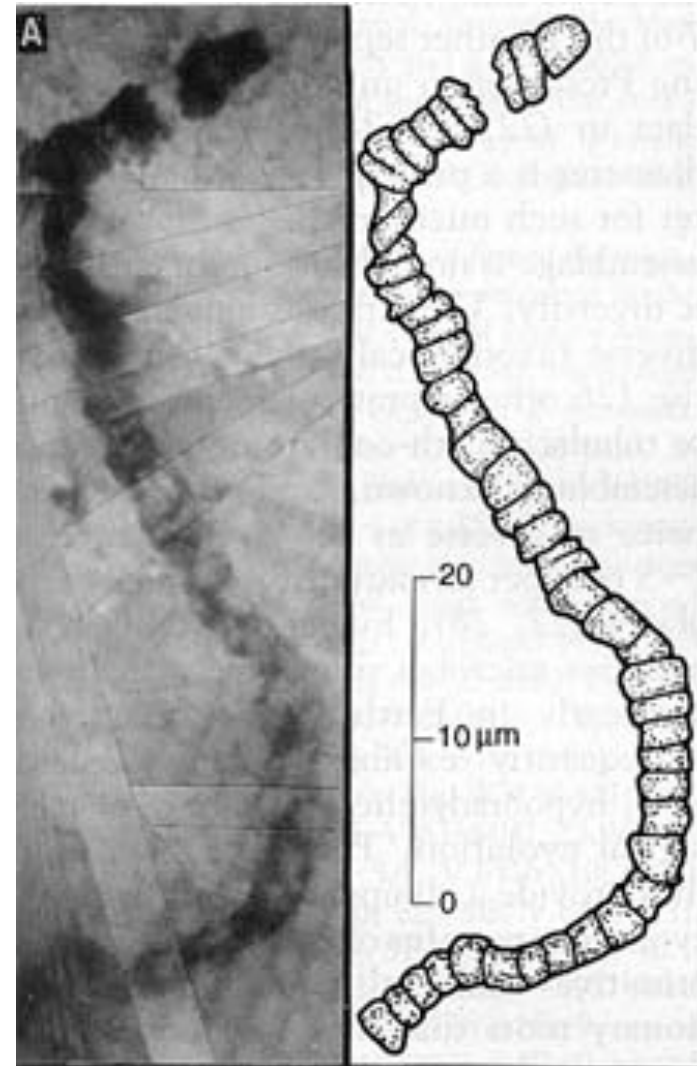
# 地球最古の化石

約35億年前のバクテリア

チャートと呼ばれる、海の底に  
堆積する  
岩石から発見。

最古の生物は海の底？

浅い海で生まれたという説もあるが、  
どうやら最近では深海という説が優力。



# 地球生命の系統

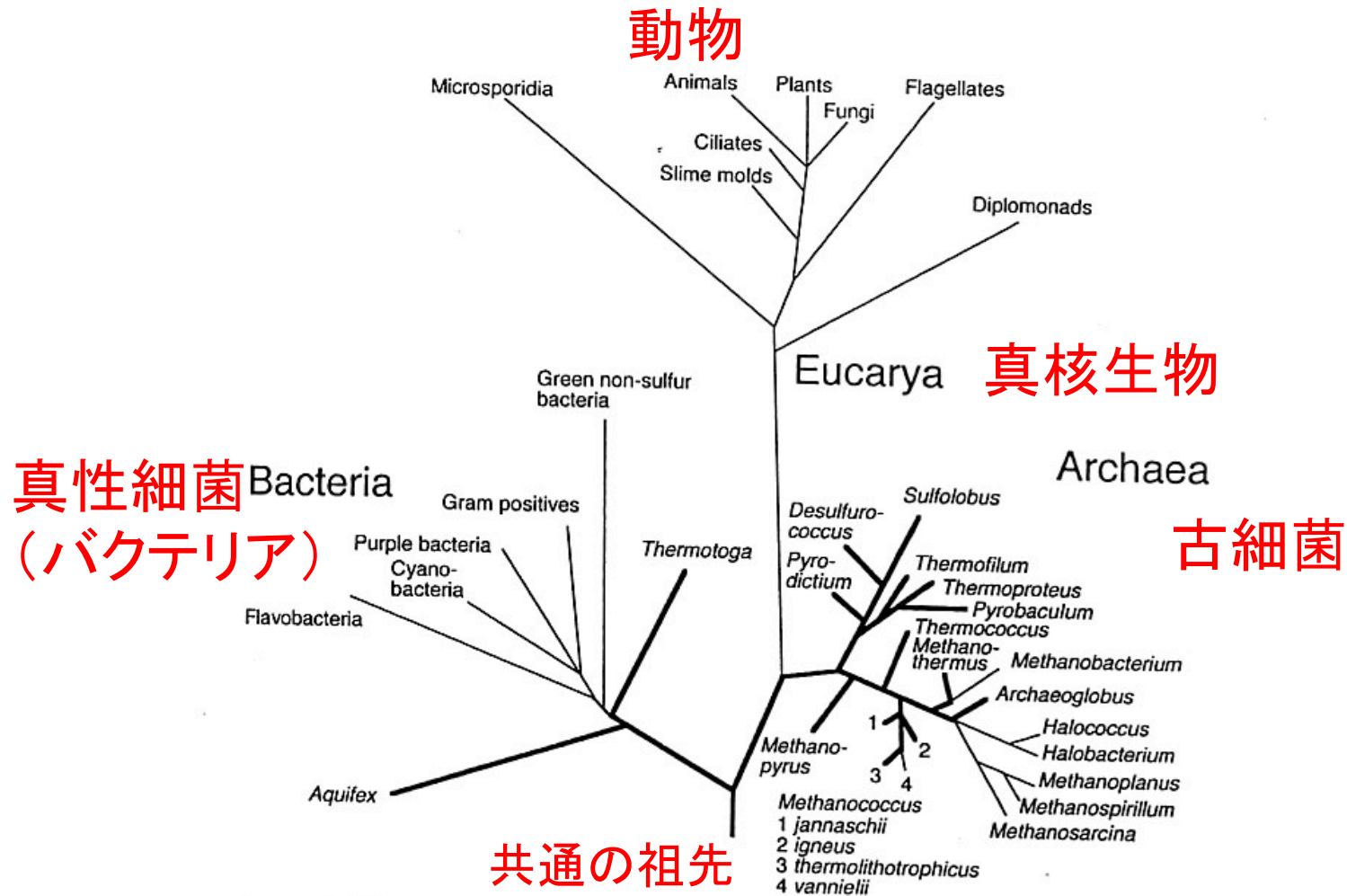


FIGURE 1 Universal phylogenetic tree. Bold lines: Hyperthermophiles. Schematically redrawn and modified from Woese *et al.* 1990; root according to Iwabe *et al.* 1989.

真性細菌と古細菌を合わせて  
原核生物(細胞核を持たない  
生物)という

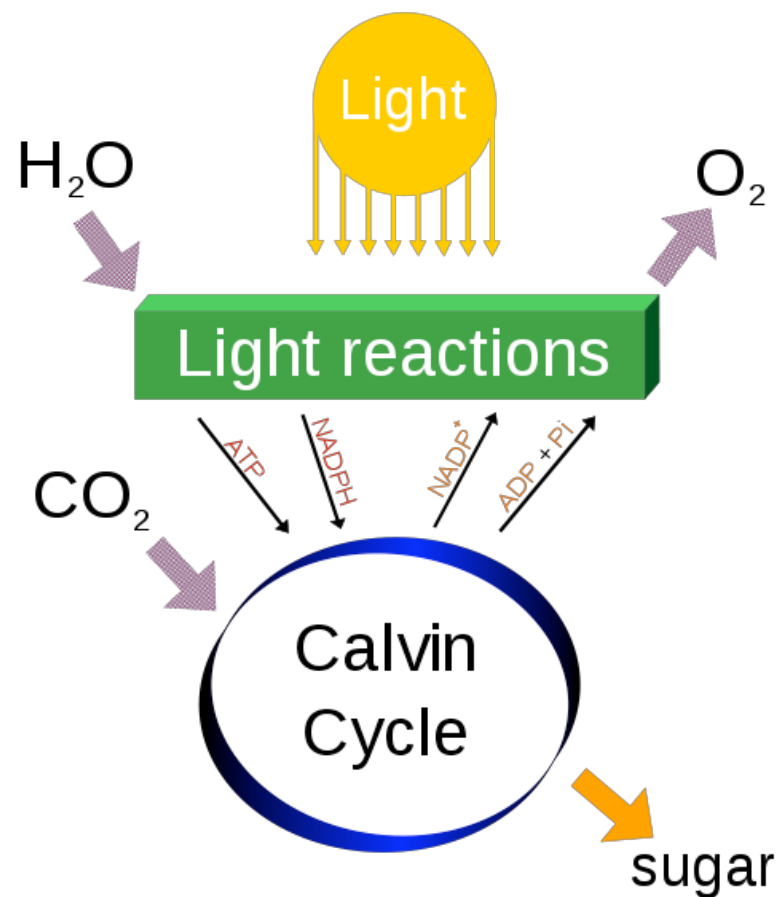
太線部分は~100度の高温の水を好む好熱菌

# 初期の生物の姿

- 深海で生まれたらしい。高温を好む熱水菌の仲間。
- => 恐らく、深海で火山活動がある熱水活動域で、メタン発酵や硫黄酸化をエネルギーにして活動していた。
- この頃地球に酸素はほとんどない。当時の生物は嫌気性、つまり酸素はむしろ猛毒。
- 酸素がない=>オゾン層もない=>大量の紫外線が降り注ぐ=>地上は生命が生まれる環境ではなかった。
- ここまでが、少なくとも35億年前(地球ができて10億年)くらいまでにでき、27億年前まで続いた。

# 27億年前の大事件：光合成の開始

- 光合成とは？
  - 材料(水と二酸化炭素)から**光のエネルギー**を使って、酸素と有機物(糖分)を作ること
- 約27億年前、浅海で酸素発生型光合成を行うシアノバクテリアが出現
- 当時の生物は嫌気性。酸素は迷惑な産業廃棄物。

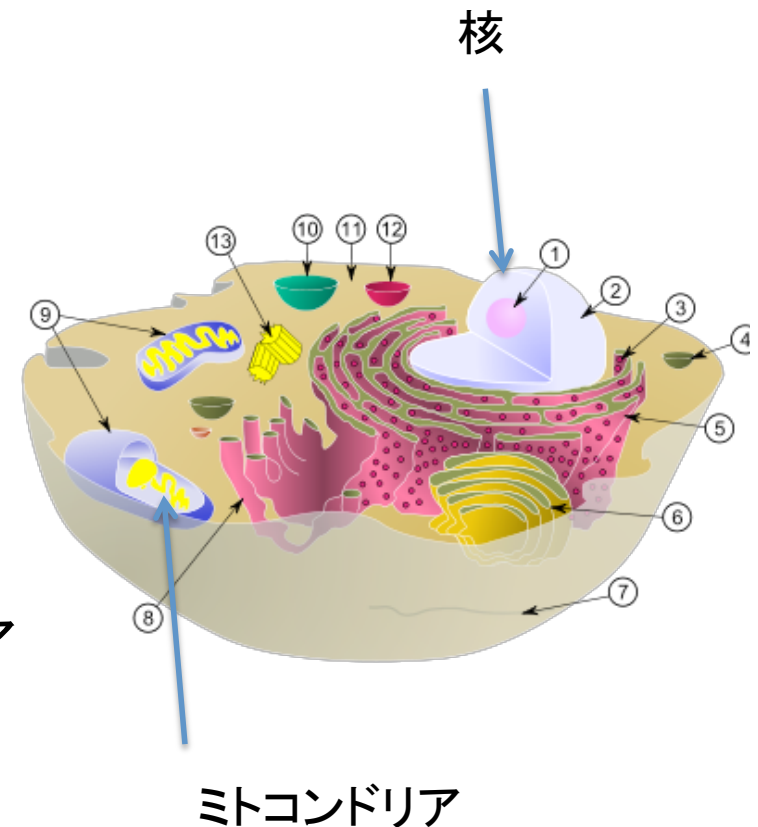


# 酸素は毒？

- 酸素(O<sub>2</sub>)は他の物質と反応しやすい(酸化、燃焼)
- エネルギーを得るのに便利
- 同時に、何でも「錆びさせて(酸化させて)」しまう危険な物質(活性酸素)
  
- 体内に酸化防御装置(酵素)を準備して、地球中にまき散らされた酸素を呼吸する生物が出現(約20億年前)

# 真核生物の出現(21億年前)

- 真核生物＝DNAが「核」という入れ物に保護され、ミトコンドリア、葉緑体などの細胞内の様々な小器官を持つ生物。  
(人間も真核生物)
- **共生説**： 恐らく、真核生物の細胞中小器官は、それぞれ独自の能力を持った別の原核生物だった
  - － 光合成をするシアノバクテリア＝>葉緑体
  - － 呼吸能力を持つ原核生物＝>ミトコンドリア
- 真核生物の登場により、細胞が大型化し、DNAが核という容器に守られ、細胞内の分業が進んだ=>より複雑な生命への道



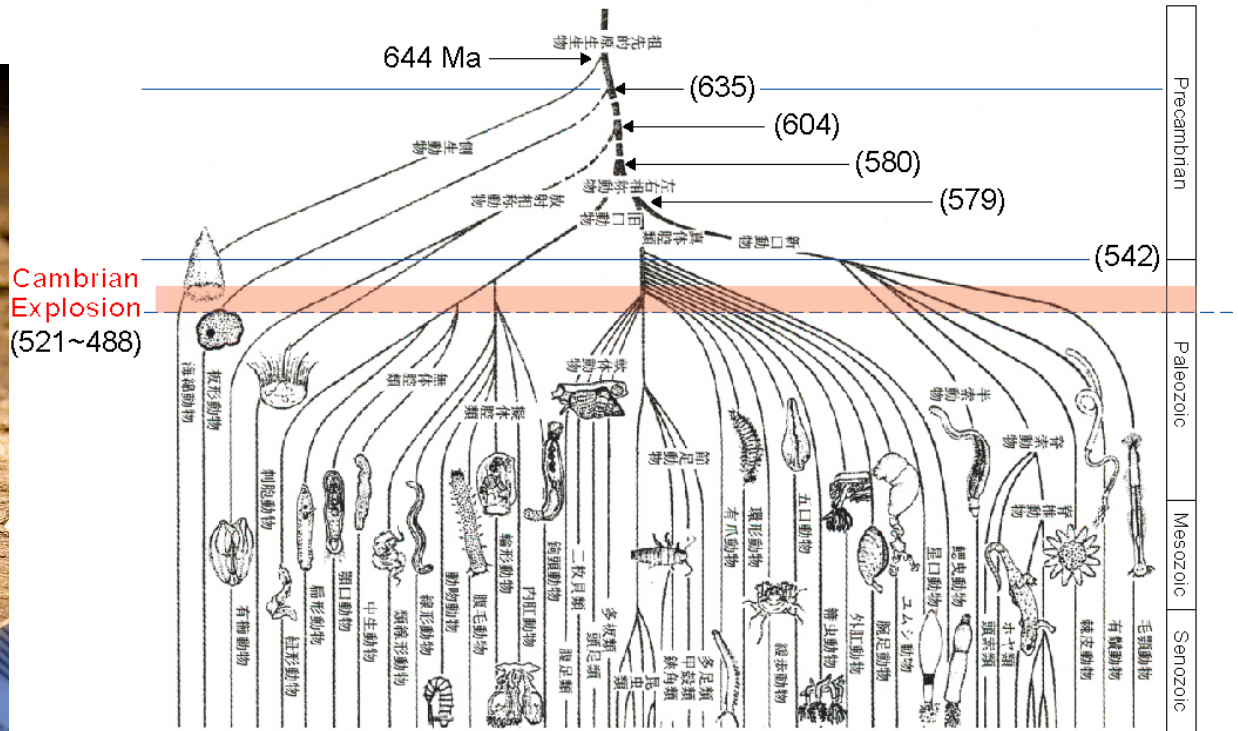
# 多細胞生物の出現(10億年前)

=> 巨大化、複雑化

## 硬骨格生物の出現(5.5億年前)

=> 硬殻=身を守るもの...他の生物の補食が始まった  
この辺りより前を先カンブリア時代とよぶ

### 三葉虫





# カンブリア紀爆発



カンブリア紀(5.45～5億年前)におきた  
生物の急激な多様化。  
多くはすぐに絶滅した。



# 陸地への進出

- 生物の多様化＝>複雑な生態系、ピラミッド型の食物連鎖
- 住処を探して新しいフロンティア...陸地へ
- ちょうど4～5億年前に太陽からの紫外線をふせぐオゾン(O<sub>3</sub>)層が形成され、生命が陸地に住めるようになった
- 大型化、恐竜の誕生

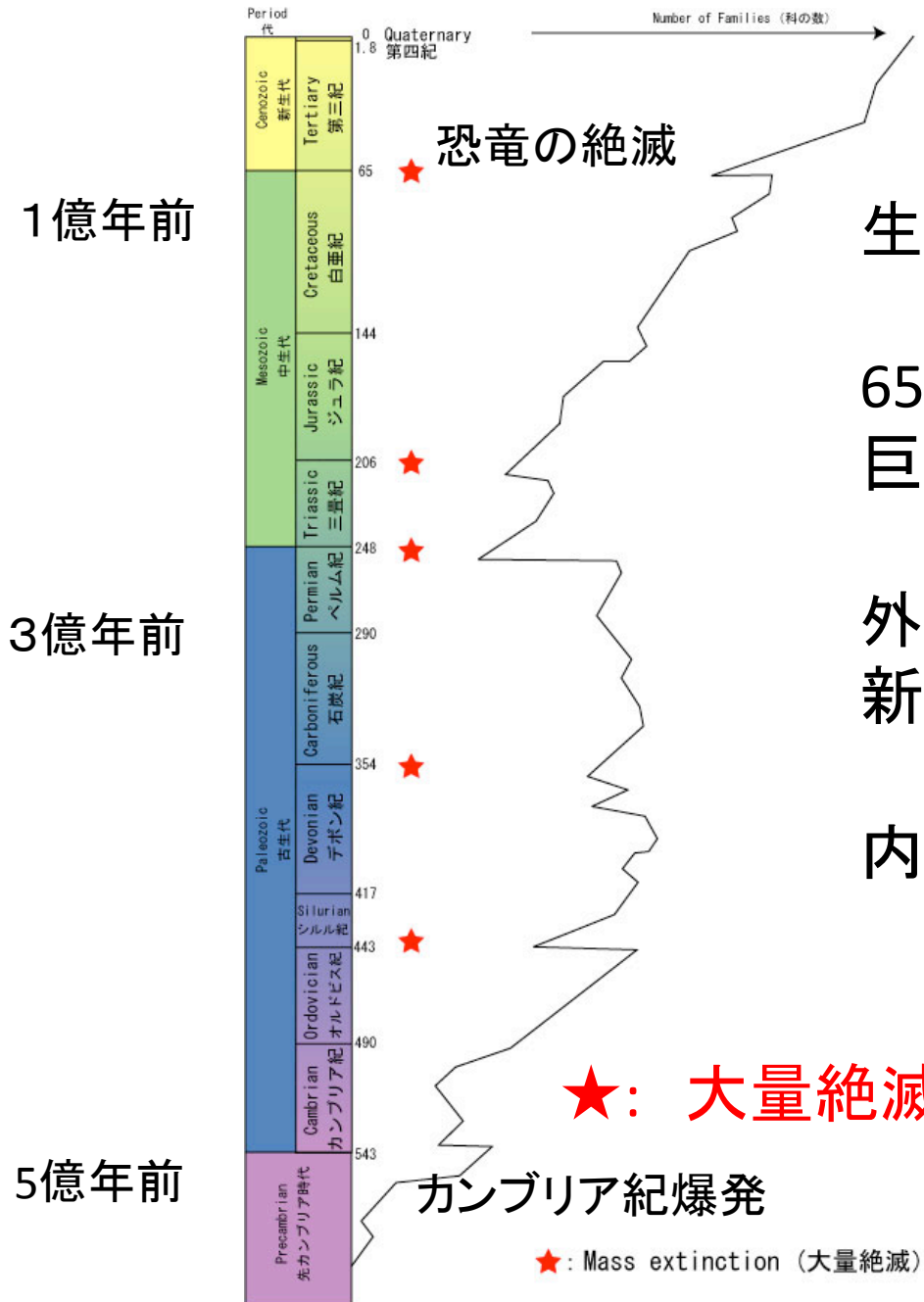
# 全球凍結 (snow ball earth)



24～22億年前と7～6億年前に、地球のほぼ全体が氷に覆われた時期があったと考えられている。

→生物の種類

# 大量絶滅



生命の大量絶滅は何度も起きている。

6500万年前の恐竜の絶滅は、恐らく巨大隕石の衝突によるもの。

外的要因：巨大隕石、近傍の星の超新星爆発など

内的要因：気候変動、火山活動など

★：大量絶滅

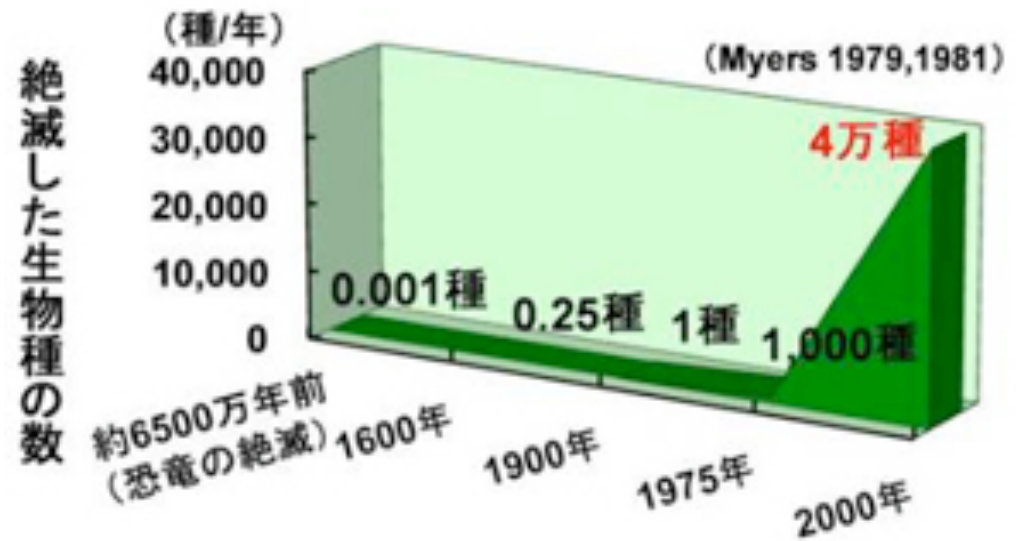
★：Mass extinction (大量絶滅)

# 人類(ホモ・サピエンス)の誕生

- 約500万年前:サルから分化(猿人)
  - アウストラロピテクスのルーシー(アフリカ)
- 約200万年前:ホモ・ハビリス(最初のヒト属)...石器を使用
- 約180万年前:原人の誕生(北京原人、ジャワ原人)...火を使用
- 約50万年前:旧人:ネアンデルタール人など...脳が大きくなり精神的に進化。ネアンデルタール人の葬式後から花の花粉が見つかっている
- 約20万年前:新人(現生人類)

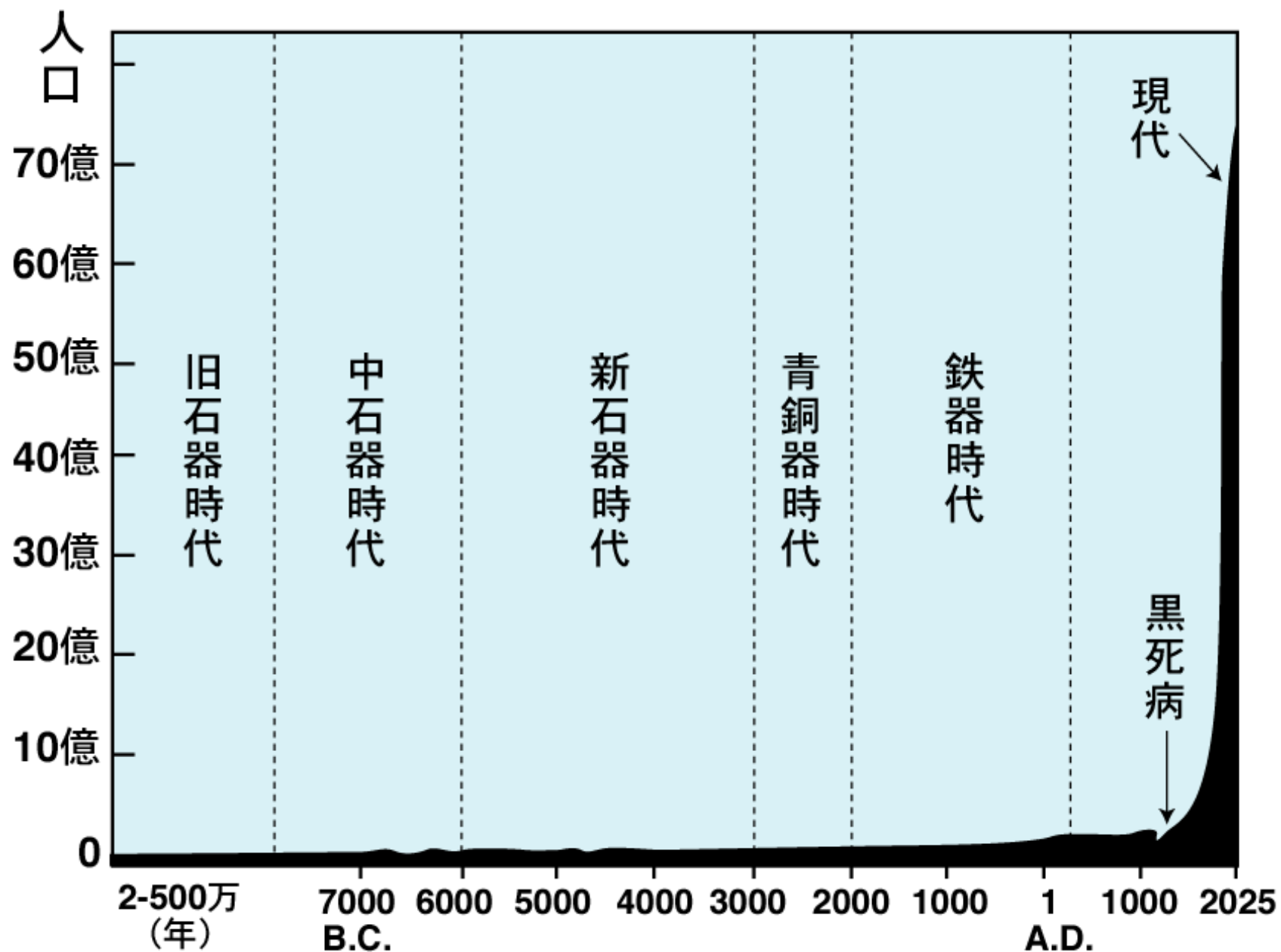
# 現代は6番目の大絶滅時代か

- 年間40000種の絶滅...  
恐竜の絶滅時代より  
速い
- 多くは開発や乱獲、外  
来種の持ち込みなど  
人間の活動に由来す  
ると言われている。



COP10のHPより

# ◆ 世界人口の歴史的推移



## 今日のまとめ

- 水素とヘリウムしかない宇宙の中で、星の中で重たい元素が生まれ、それが地球や生命の材料となった。
- 生命がどのように誕生したのは、分かっていないが、生命は地球が「居住可能」になってから比較的すぐ生まれた。それは宇宙からやってきたのかもしれないし、地球で自然に生まれたのかもしれない。
- 地球の環境はこれまでも変化を続けてきた。生命はそこに積極的な役割を果たしてきた。
- 酸素が猛毒となる生物もいる。なにが「よい環境」かはその生物によって違う。