

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

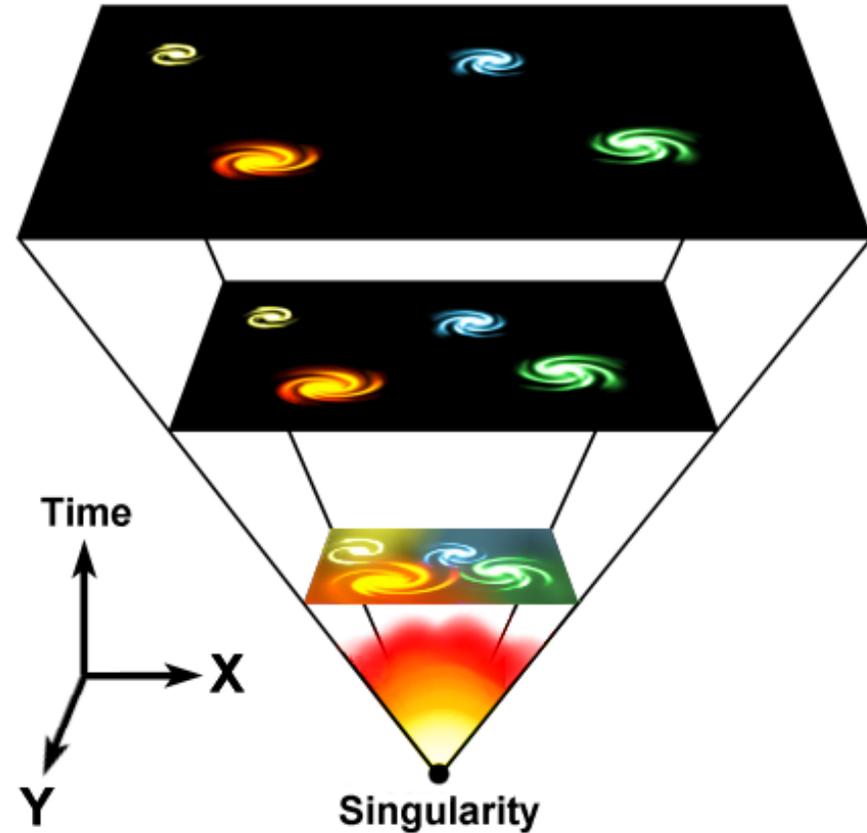
- わたしたちの宇宙はどんなところ？
- 宇宙はどのようにして始まったか？
- 終わりはあるのか？

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/>

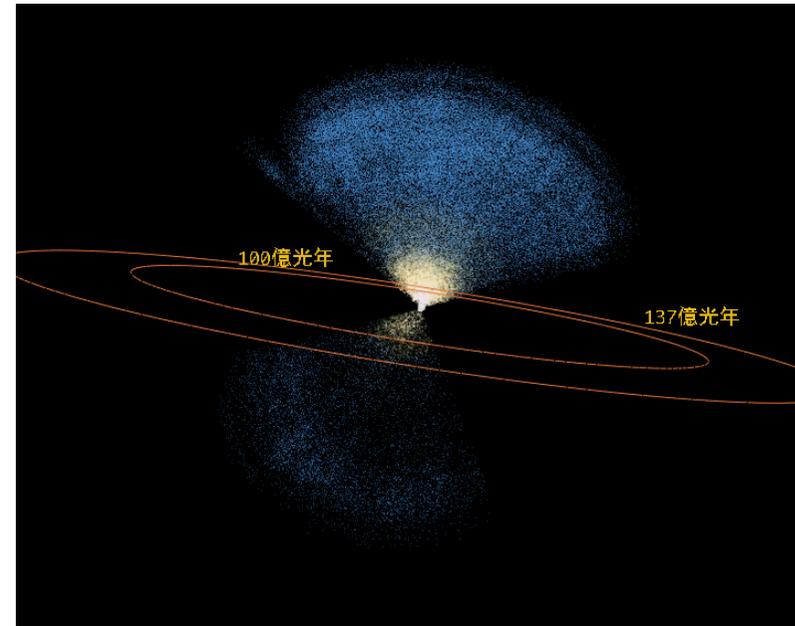
宇宙は膨張している！？

- 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？



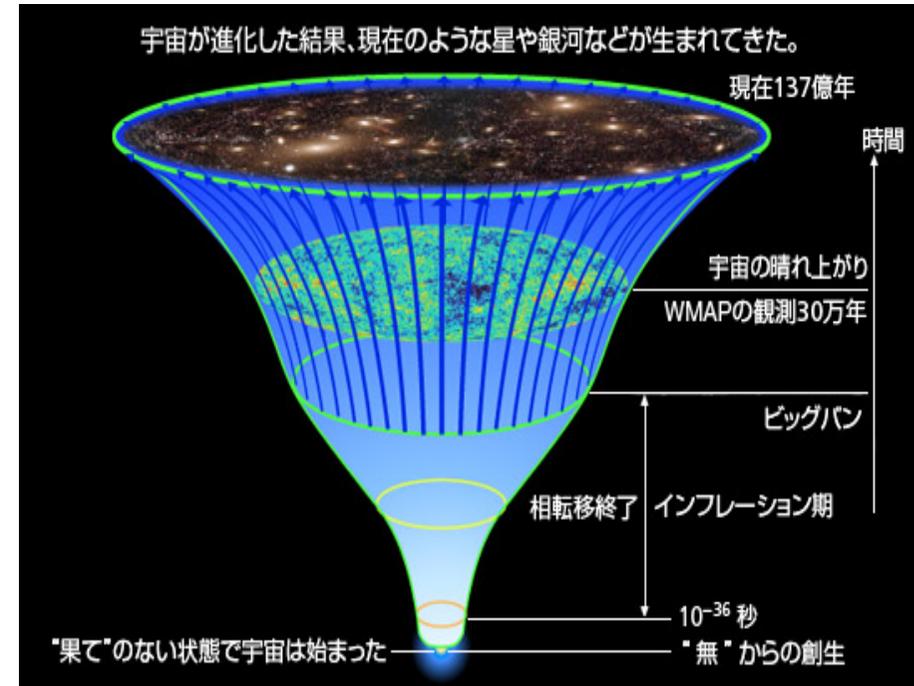
- 全てのモノ、情報は、光の速度を超えられない。
- 一つだけ光の速度を超えられるのは、「空間が広がる速さ」。
- 地球から遠い場所ほど、地球から速く遠ざかっている。
- ある地点から先は、地球から光の速さより速く遠ざかっているため、我々は決してそこへ行けないし、そこで起きている情報を得ることはできない。
- その距離を地球からみた「観測可能な宇宙」の果てということ
はできる
- その先には....

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

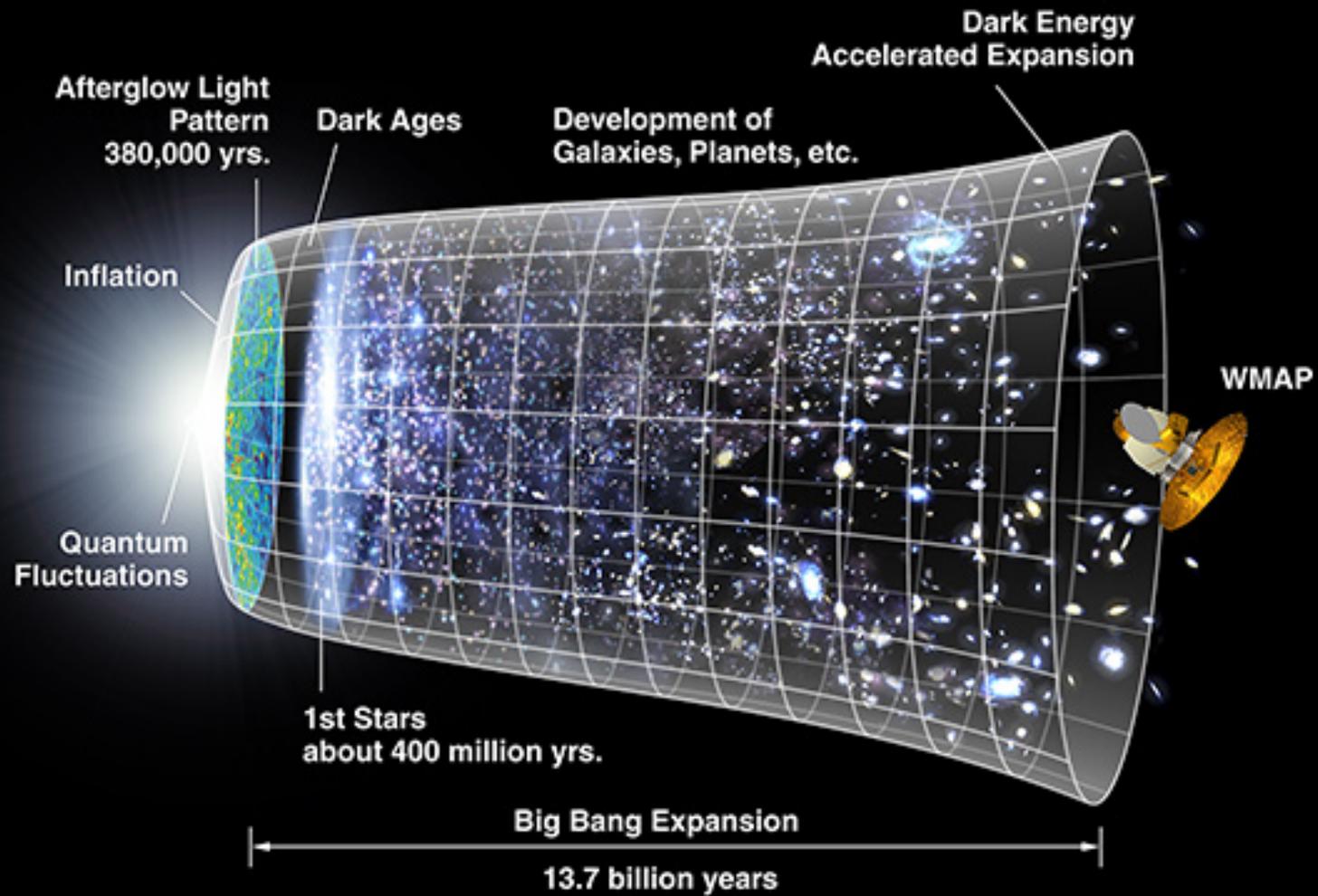
宇宙はどのように生まれたのか？～現在の理解

- 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）



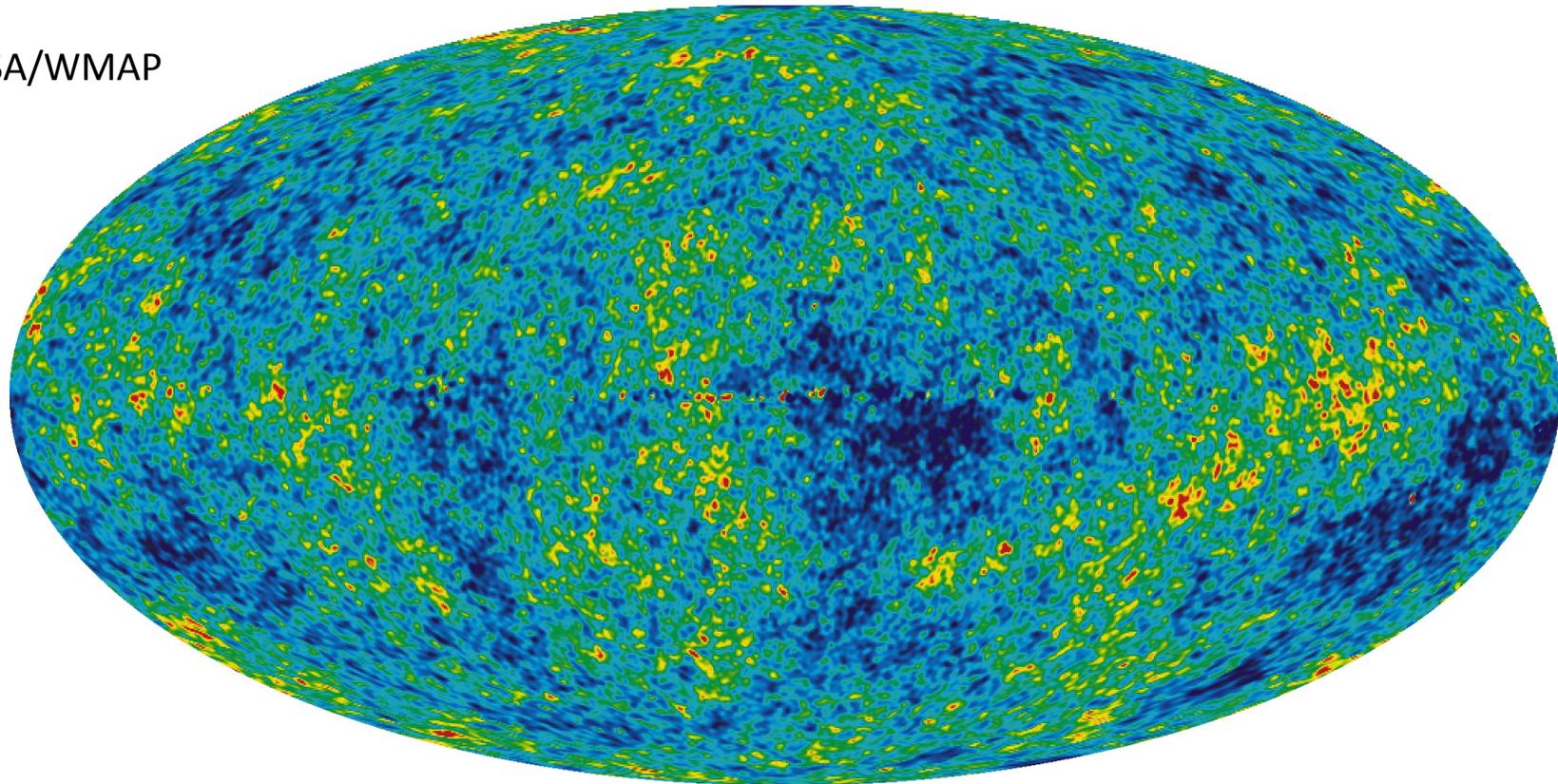
佐藤勝彦先生のHPより
<http://utaprc4.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~sato/>

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

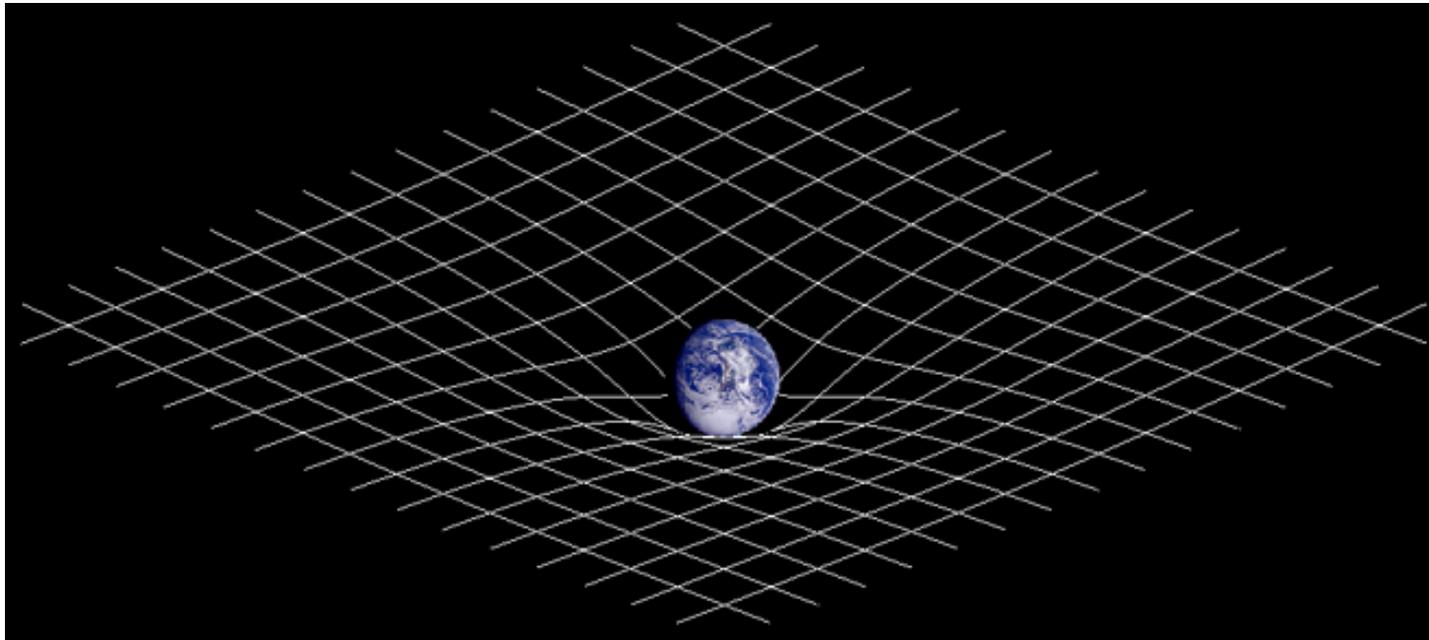
- 絶対温度で約2.7度(約マイナス270度)に相当する電波が宇宙空間に満ちている
- 超高温のビッグバンから膨張によって冷えたなごり

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。

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

宇宙項

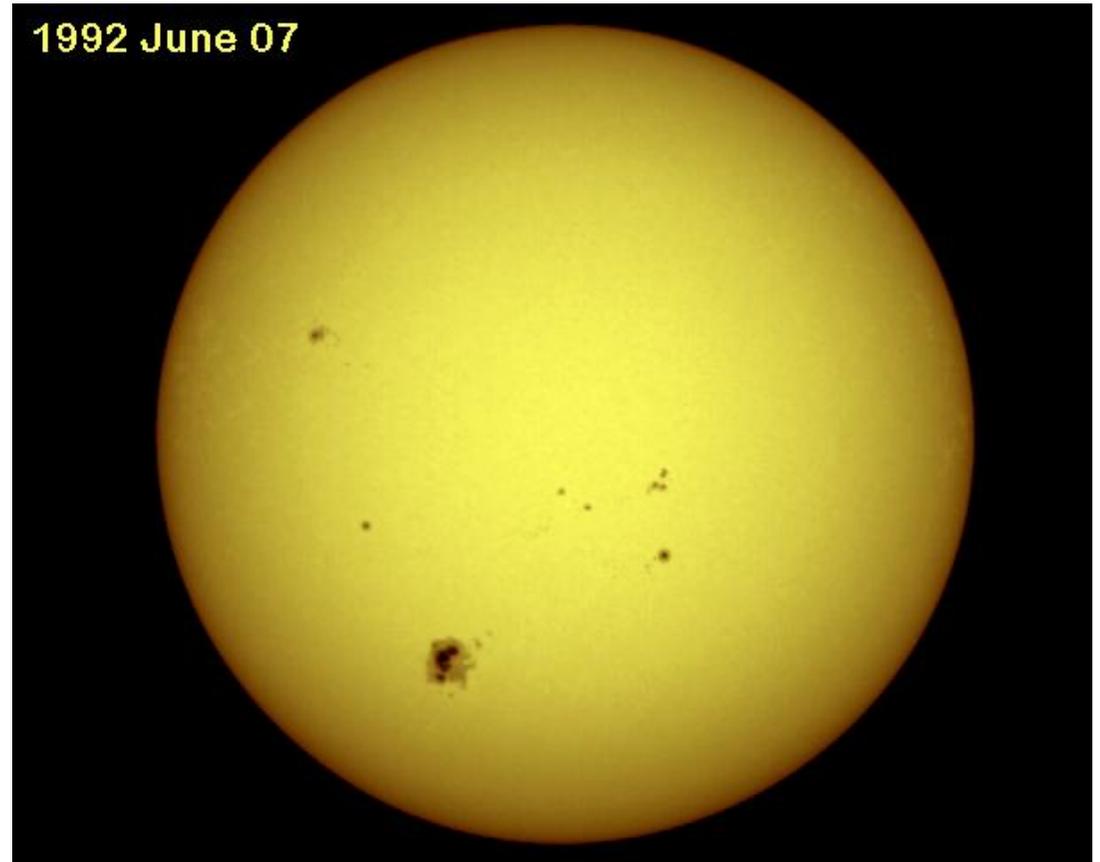
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

- 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

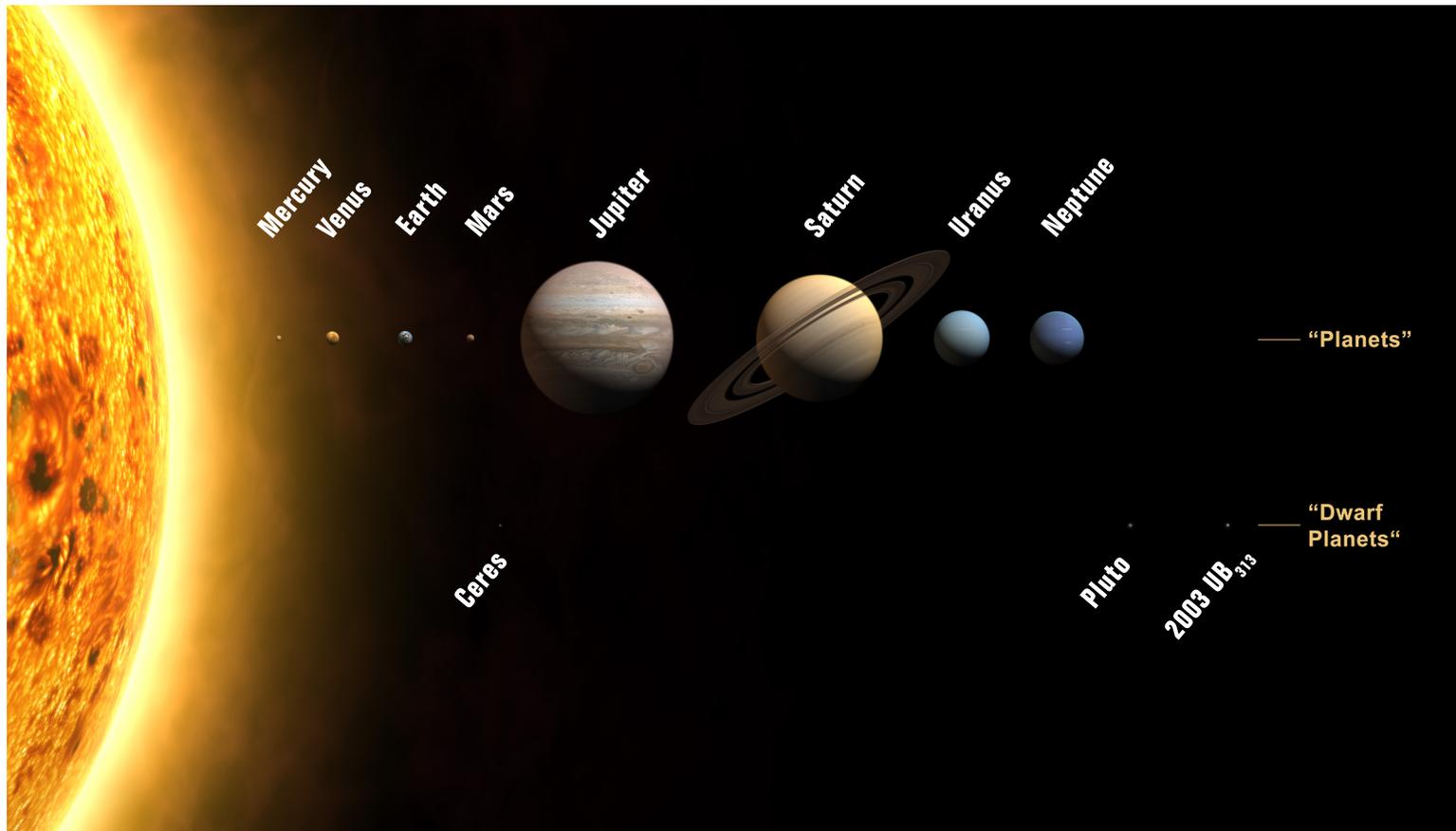
地球と生命は、どうして生まれたか？

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



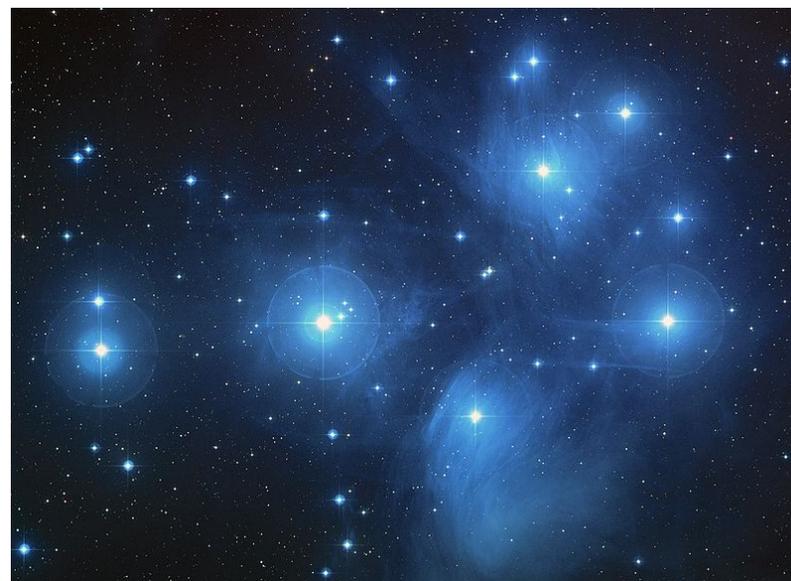
- 自分では光らず、恒星の周りを回る星
- 岩石（水、金、地、火）、ガス（木、土）、氷（天、海）などでできている
- 太陽系以外でも見つかっている（詳細は後日）

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)

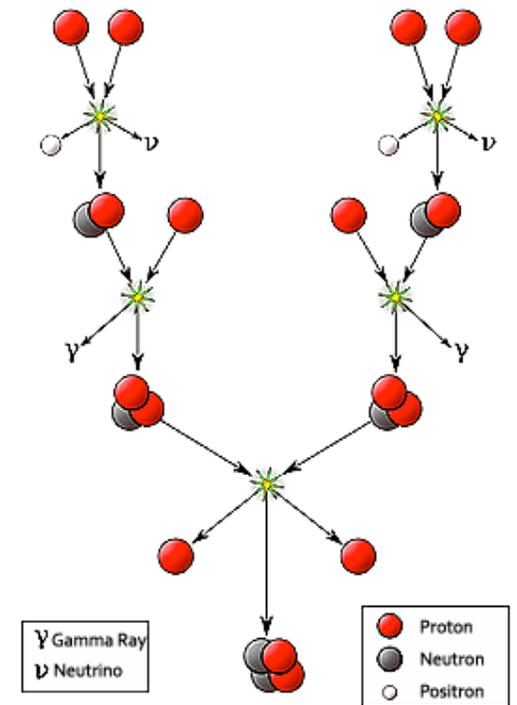


散開星団(数100程度の星の集団)

- 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

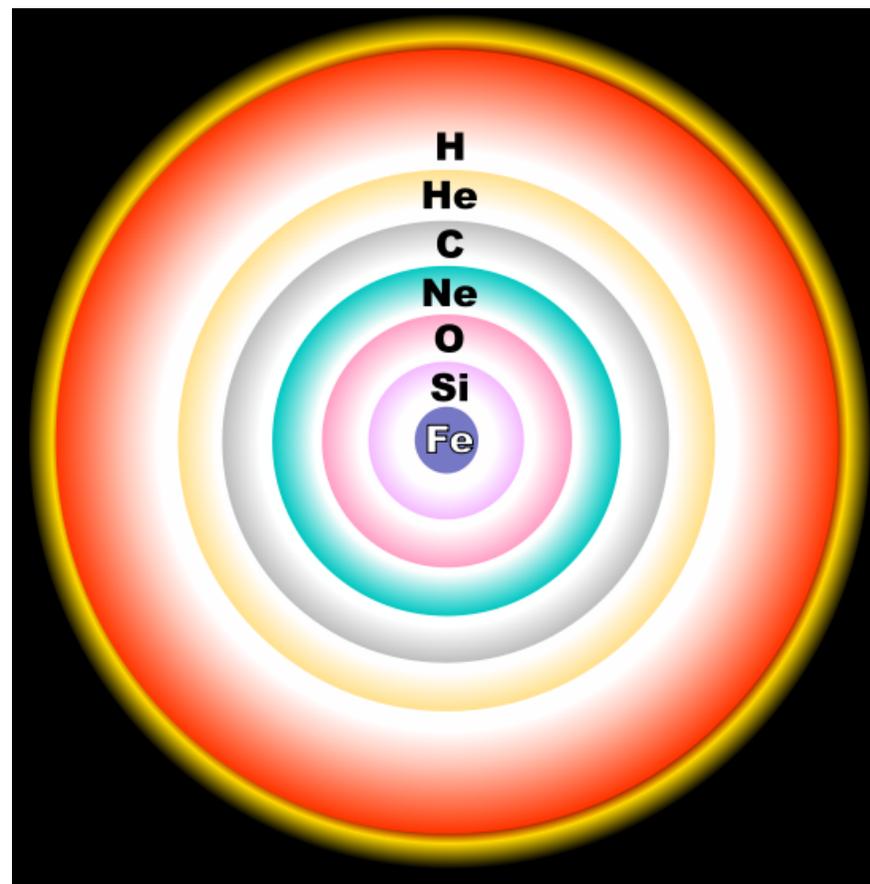
- 恒星のエネルギー源は**核融合**
- 核融合 = 軽い原子をくっつけて重い原子を作ること(後日詳述)
 - 水素爆弾や核融合発電の原理も同じ
 - 原子爆弾、原子力発電所は「核分裂」なので注意



- **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



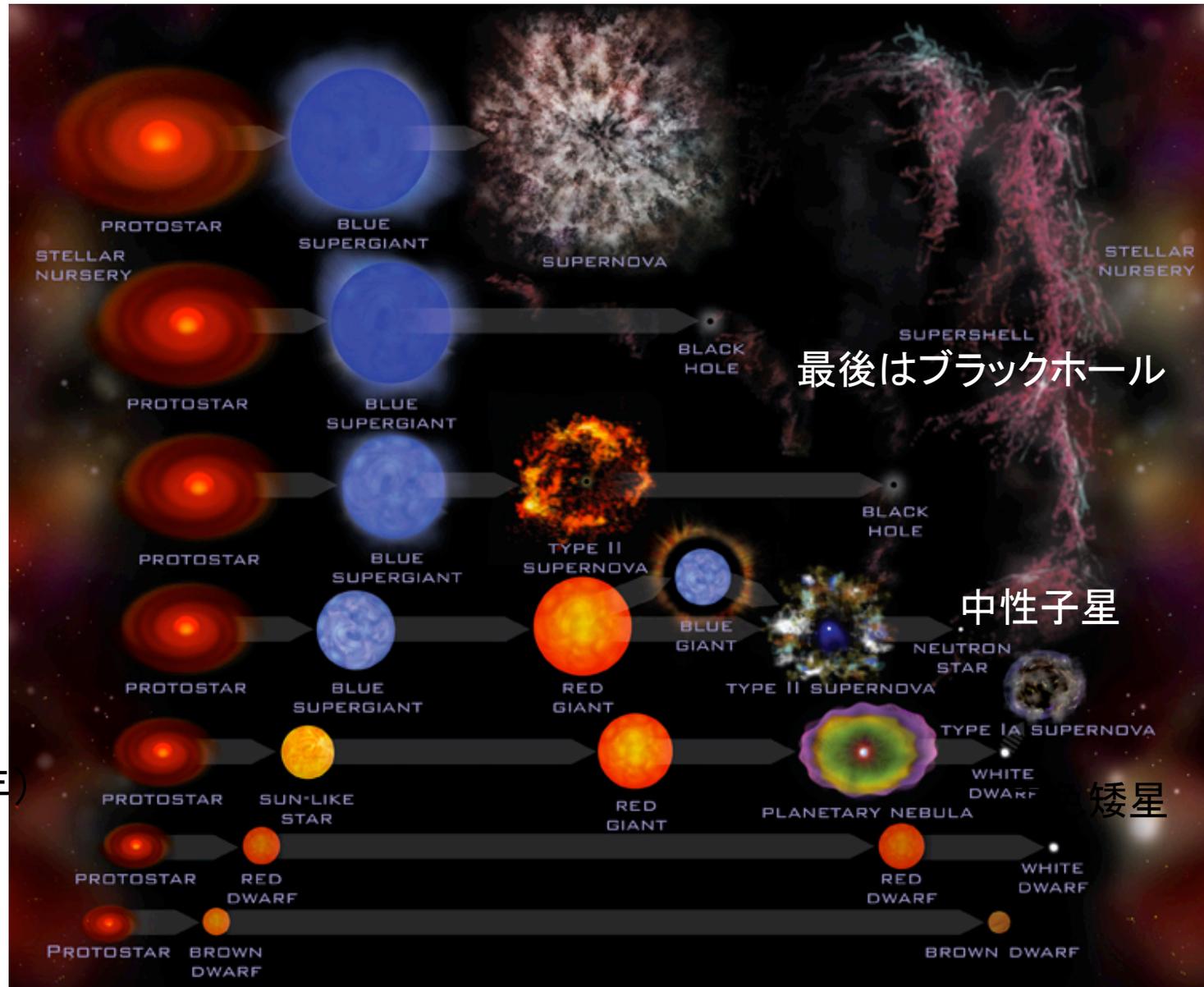
•収縮して明るく輝き出す(核融合はまだ)。周囲にガスの塵の円盤ができ、その中から惑星が生まれる



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)

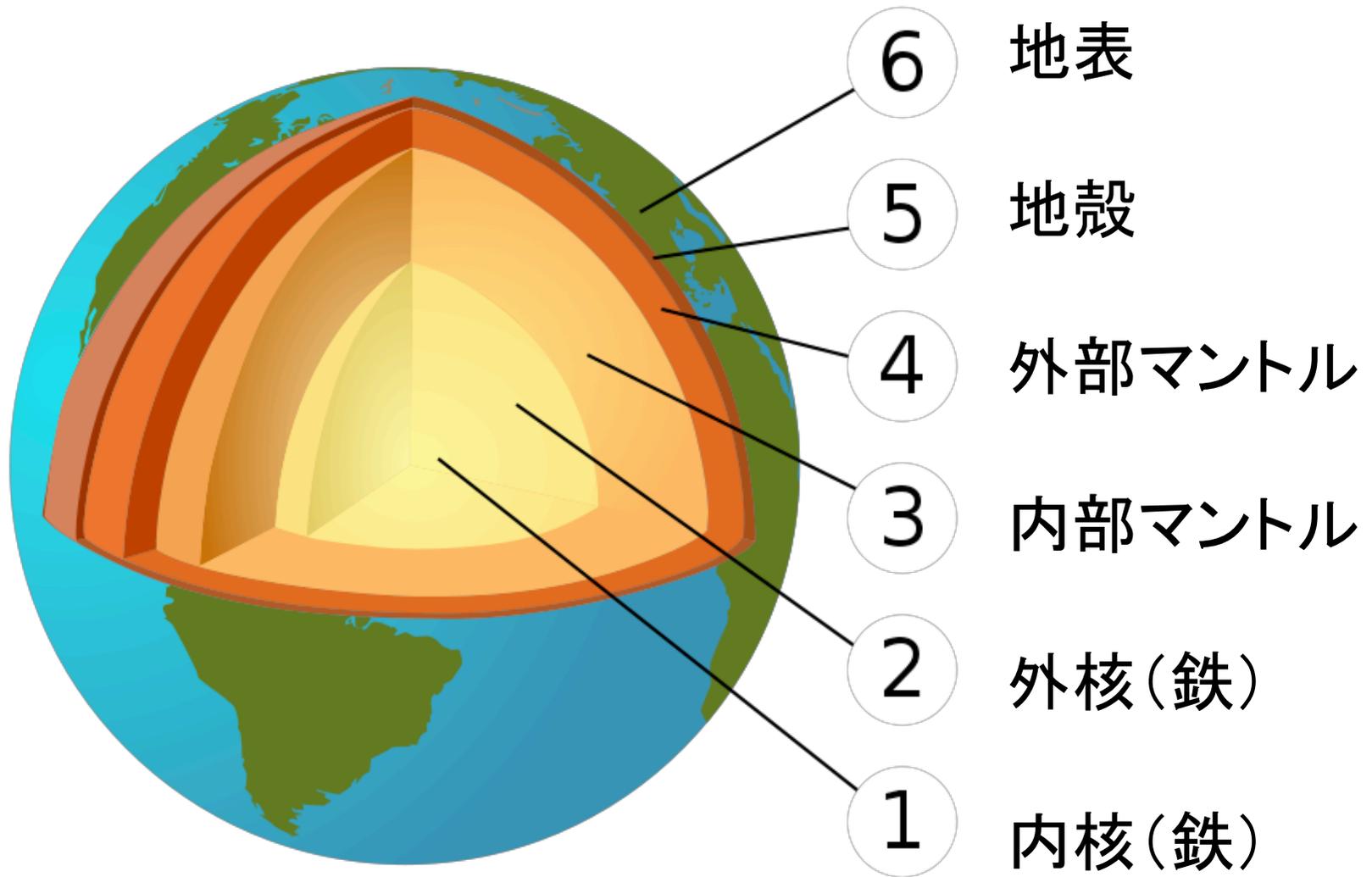
地球

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

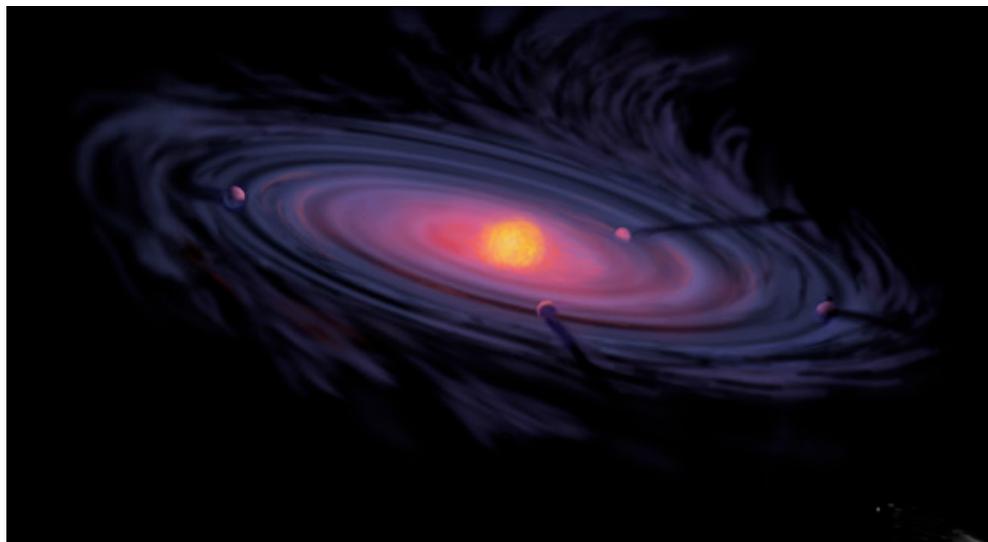


1972年、アポロ17号から撮影

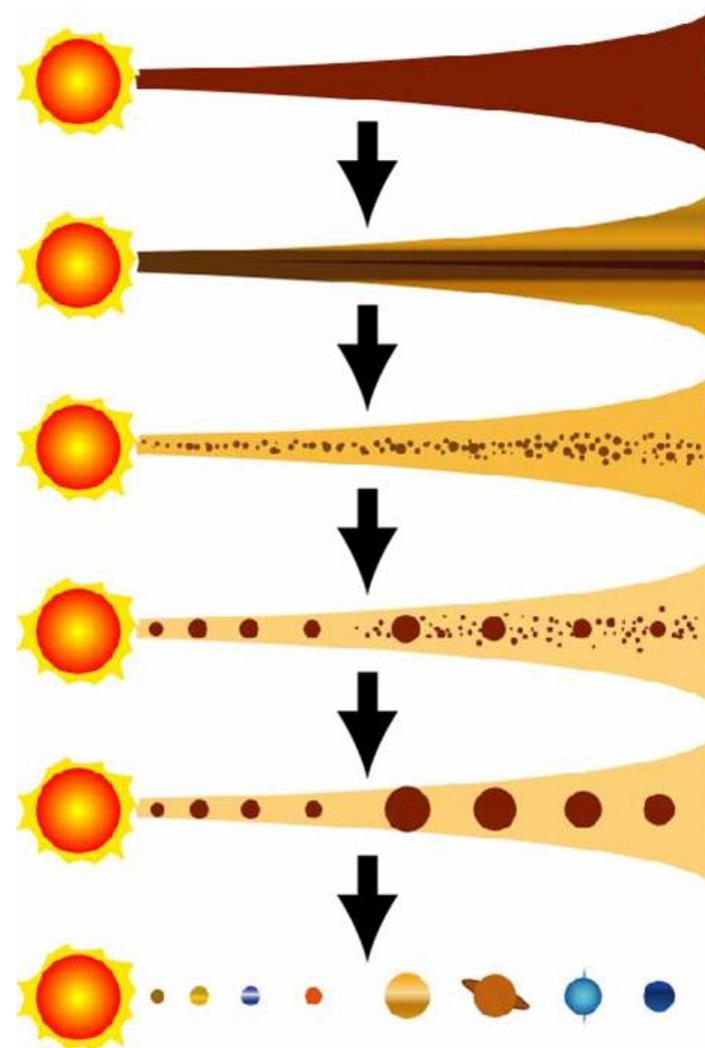
中はどうなってる？



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

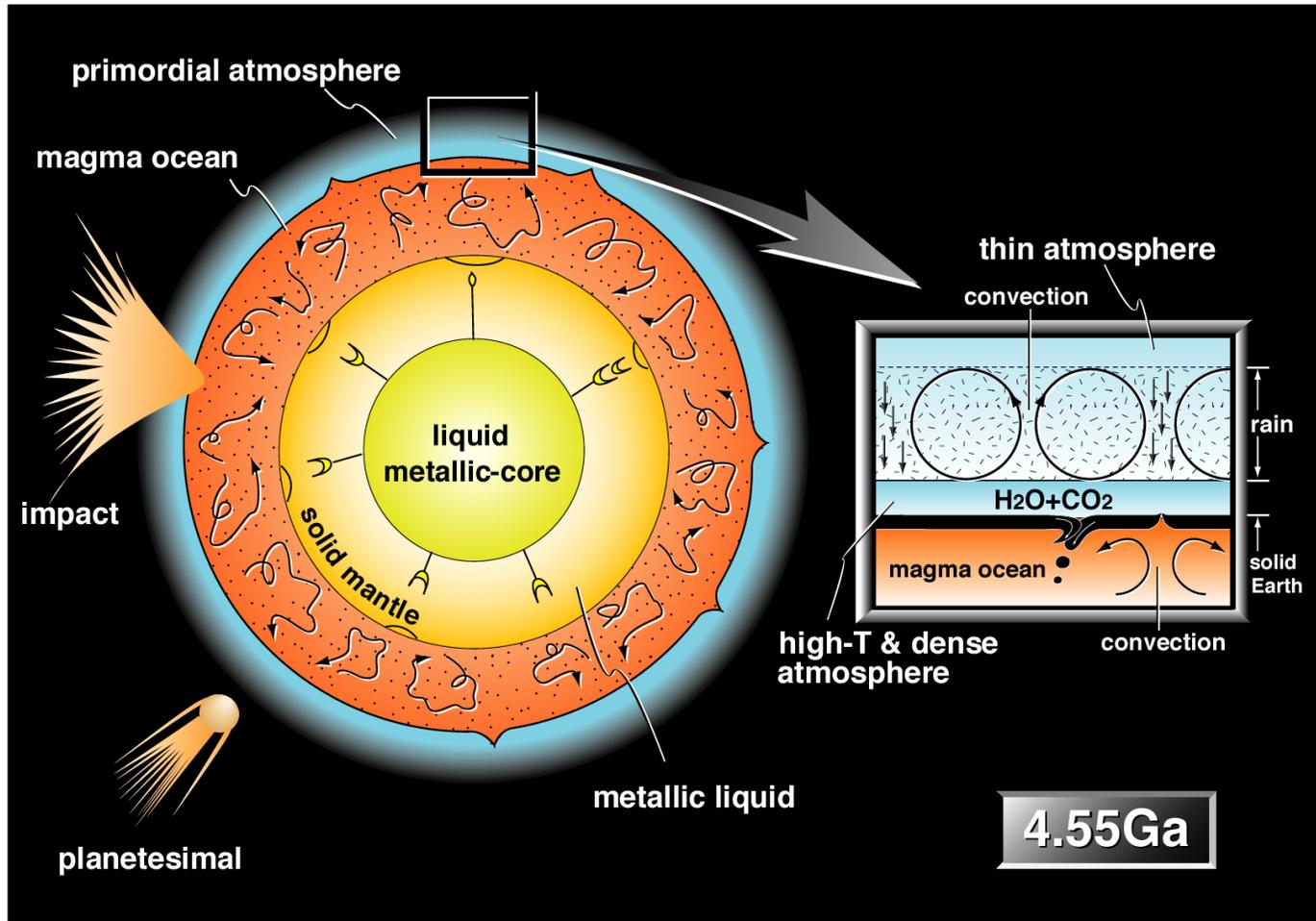


生まれてしばらくの地球はこんな感じ？

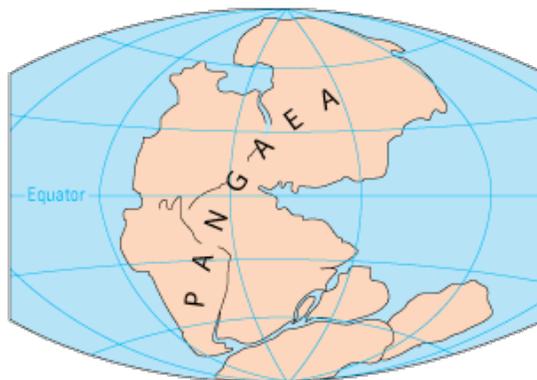
David A. Aguilar (CfA)



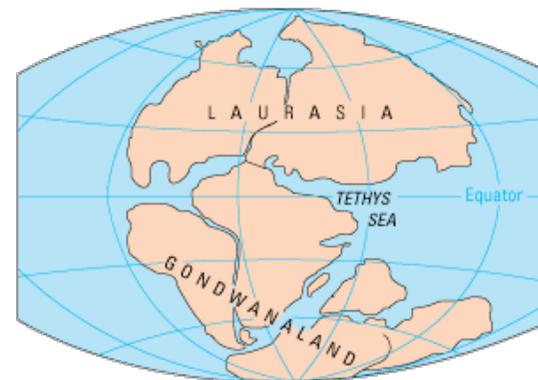
生まれたばかりの地球の構造



プレートテクトニクス と大陸移動説

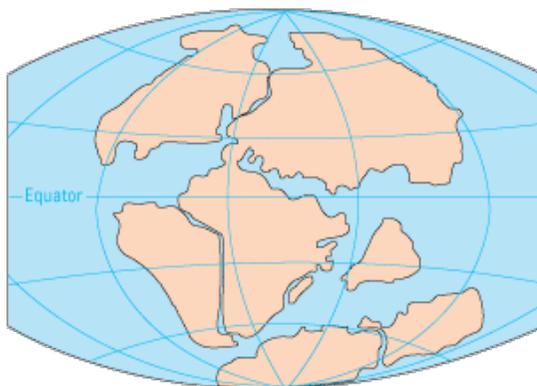


2億2千万前

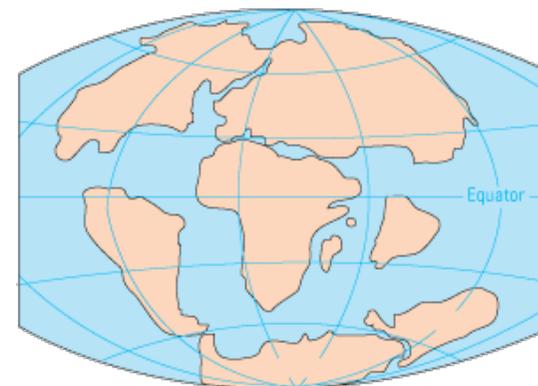


200 2億前

大陸は約2億年ごとに
くっついたり離れたり
している。

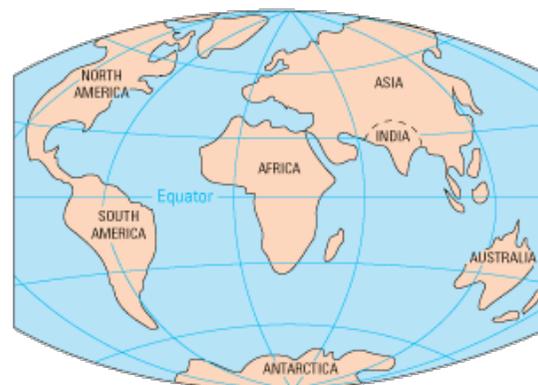


1.5億前(ジュラ紀)



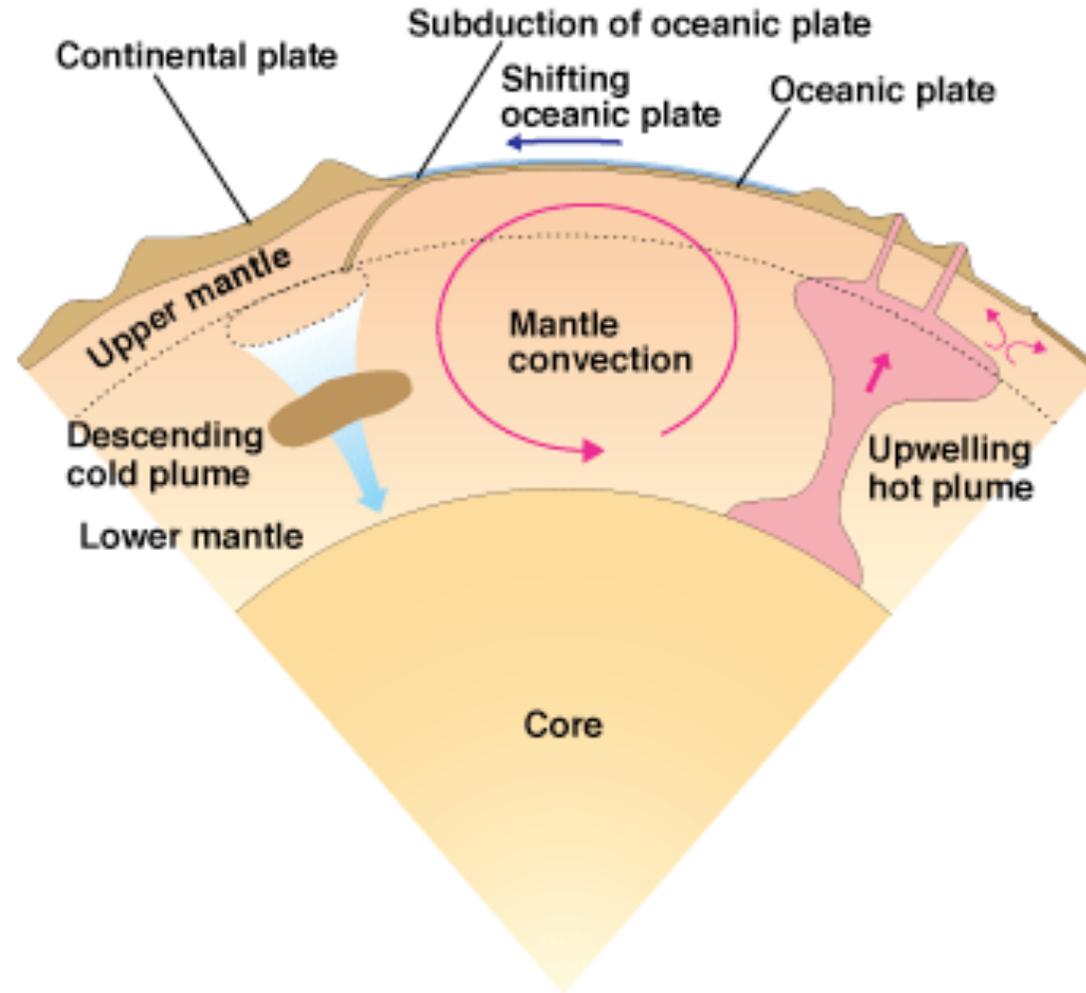
6500万年前(恐竜絶滅の頃)

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

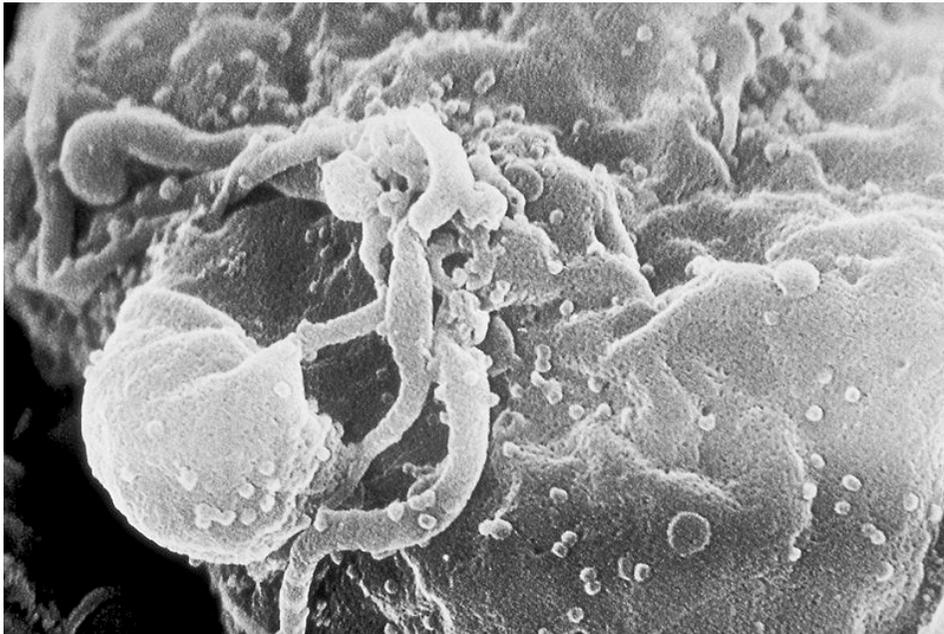
地球: 外界と内部を区別はややあいまい。代謝みたいなこと(太陽エネルギーを取り入れて海洋や大気が循環)もするが、自己複製はしない



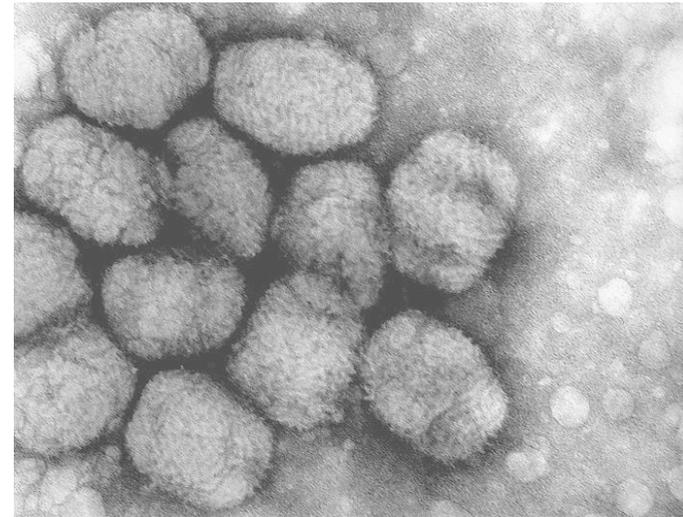
コンピュータウイルス:
自己複製はするが、「外界と内部」という概念はない。代謝もしない。

ウイルス

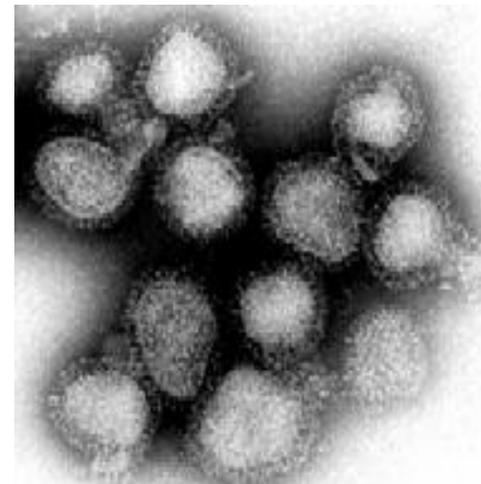
天然痘ウイルス



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



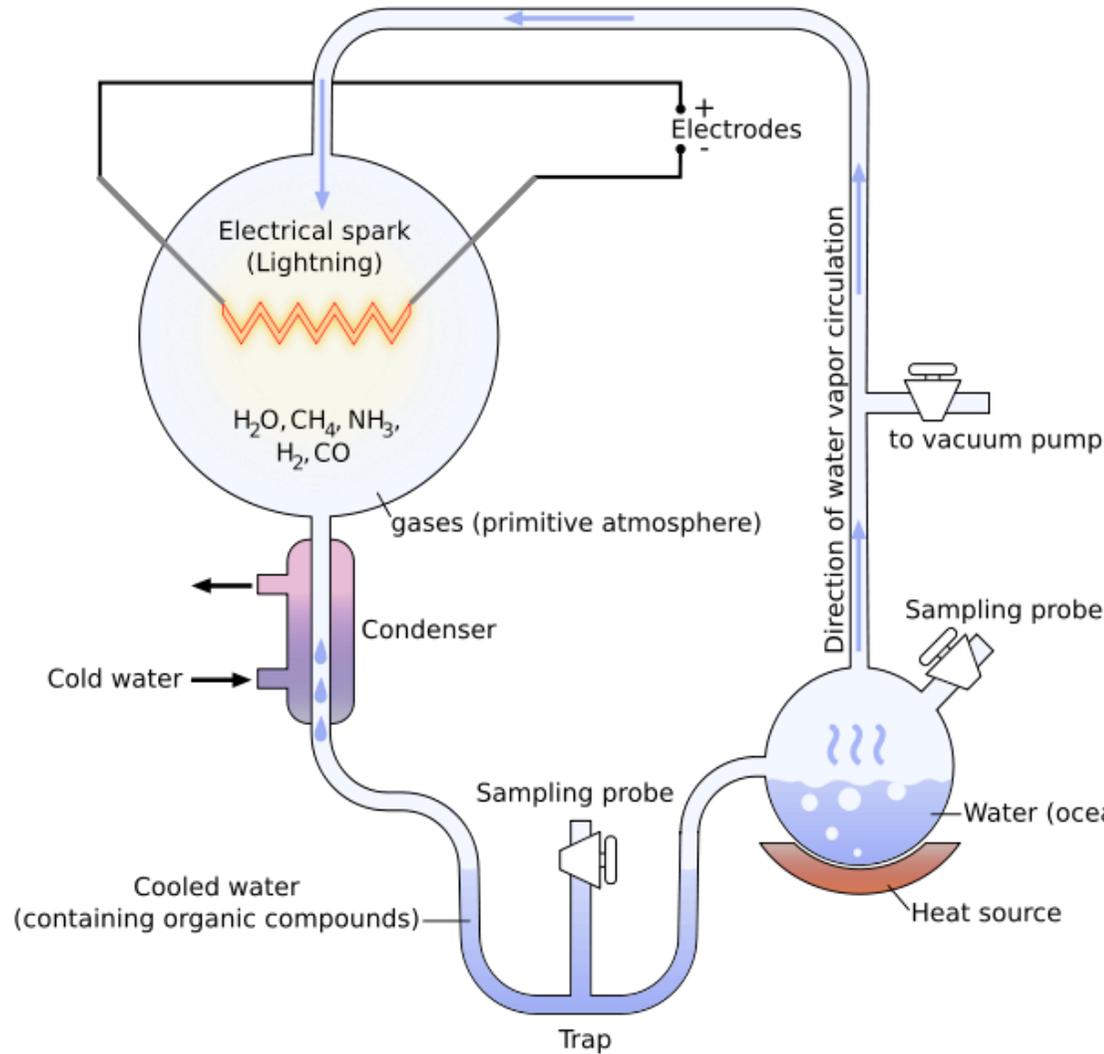
ウイルスは生物と無生物の中間

- 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？

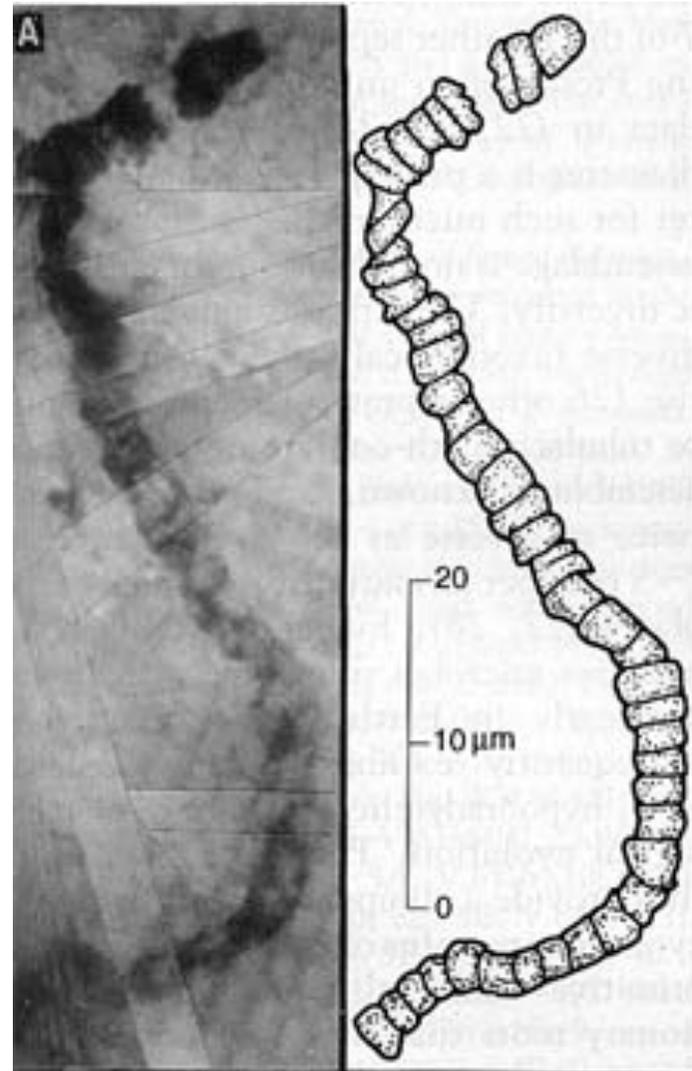
地球最古の化石

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

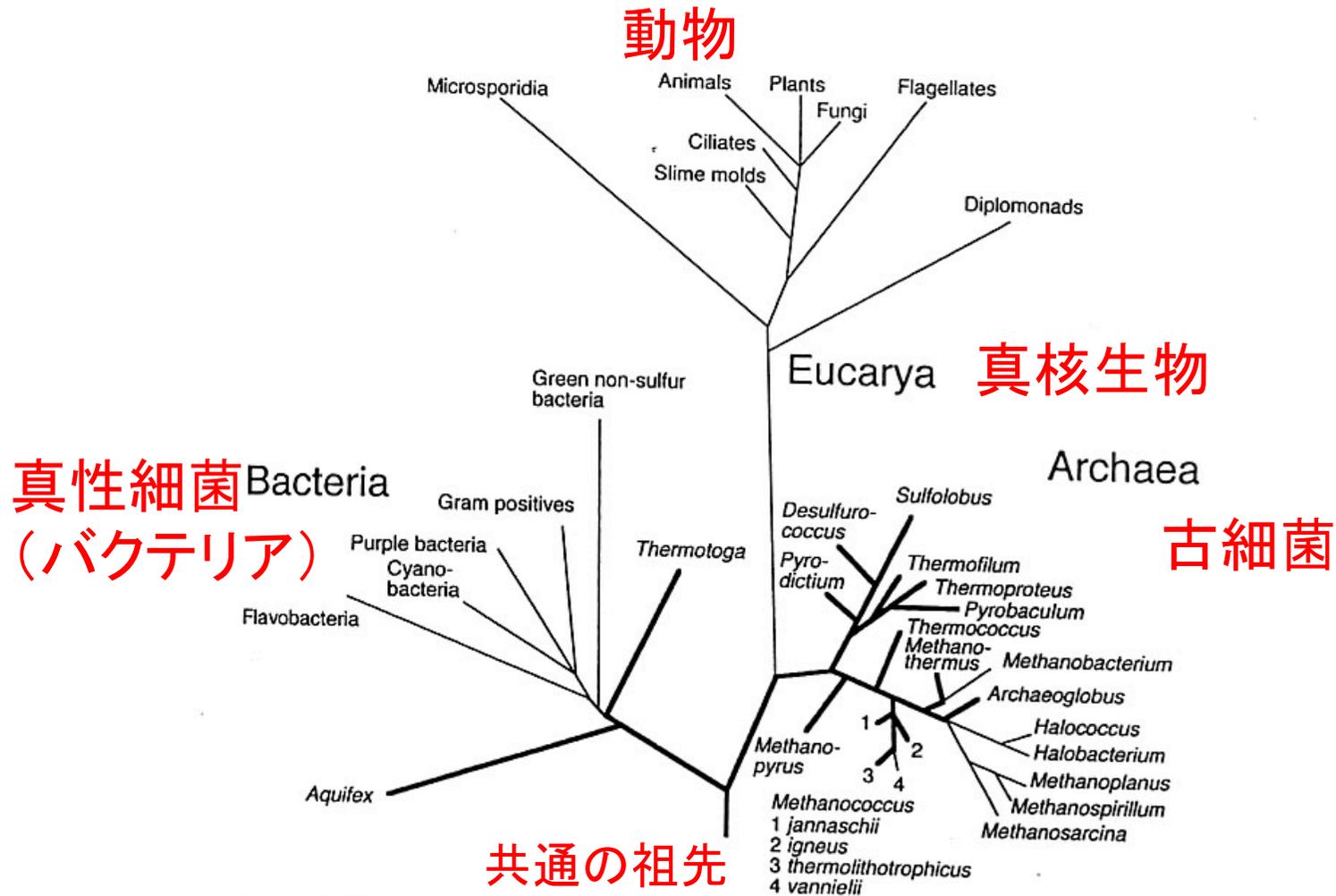


FIGURE 1 Universal phylogenetic tree. Bold lines: Hyperthermophiles. Schematically redrawn and modified from Woese *et al.* 1990; root according to Iwabe *et al.* 1989.

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

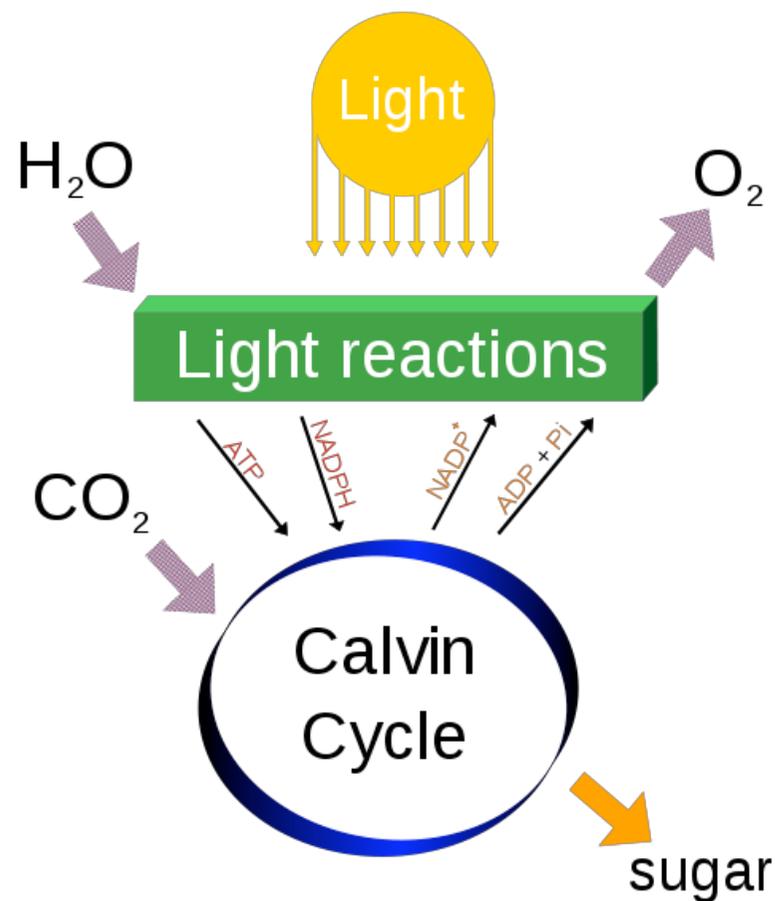
太線部分は~100度の高温の水を好む好熱菌

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。



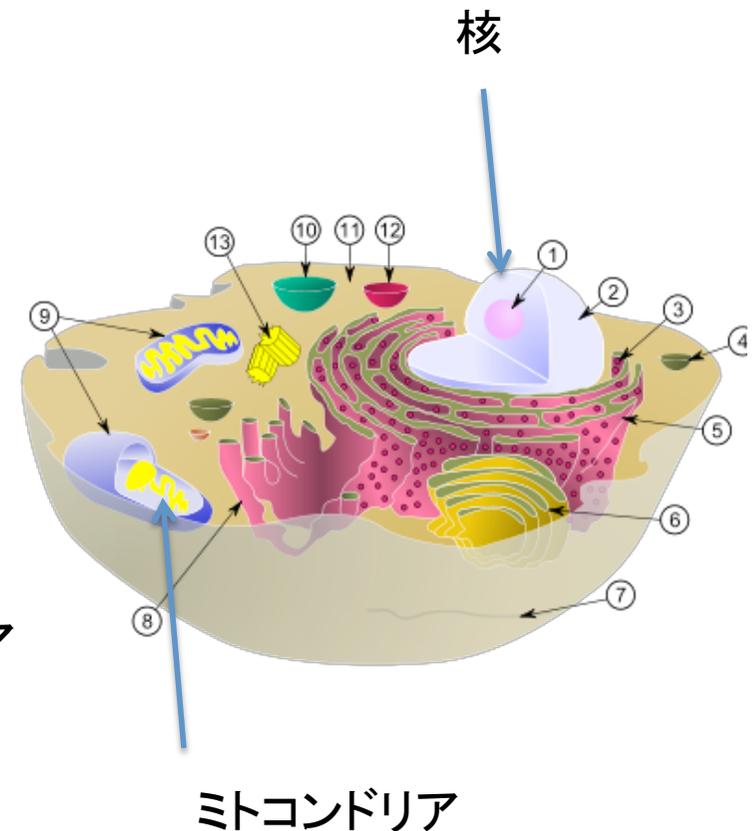
酸素は毒？

- 酸素(O₂)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)

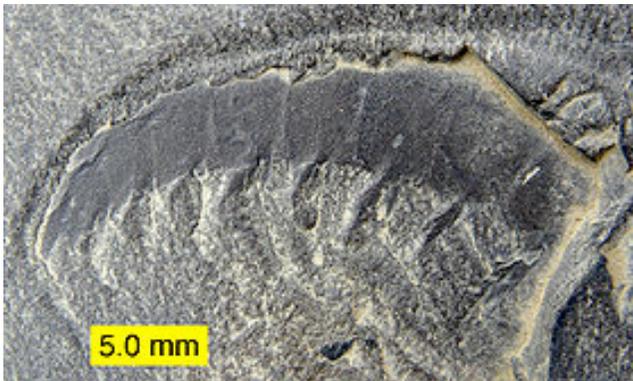
- 真核生物＝DNAが「核」という入れ物に保護され、ミトコンドリア、葉緑体などの細胞内の様々な小器官を持つ生物。
(人間も真核生物)
- **共生説**：恐らく、真核生物の細胞中小器官は、それぞれ独自の能力を持った別の原核生物だった
 - － 光合成をするシアノバクテリア＝>葉緑体
 - － 呼吸能力を持つ原核生物＝>ミトコンドリア
- 真核生物の登場により、細胞が大型化し、DNAが核という容器に守られ、細胞内の分業が進んだ=>より複雑な生命への道



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(O₃)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

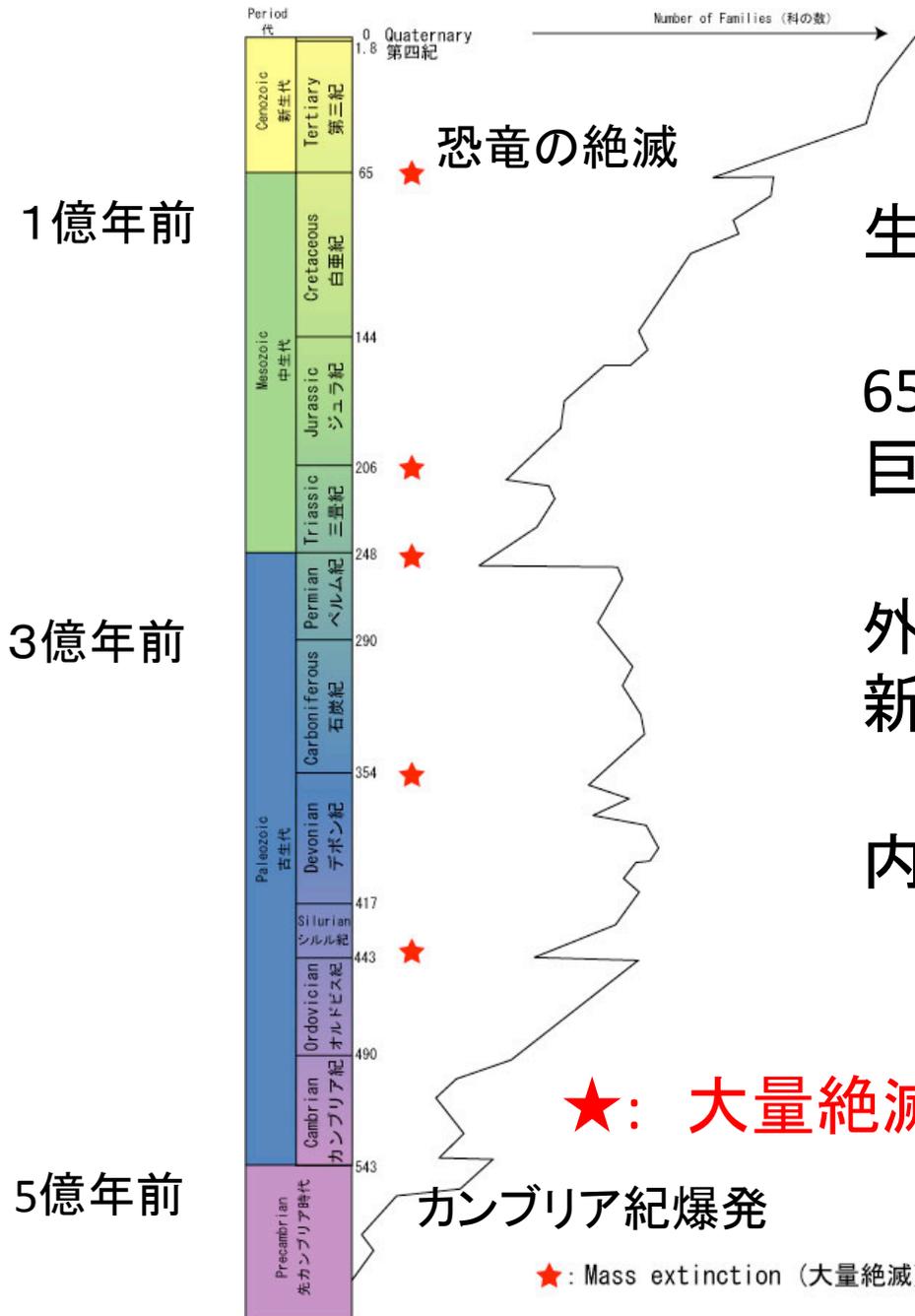
全球凍結 (snow ball earth)



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

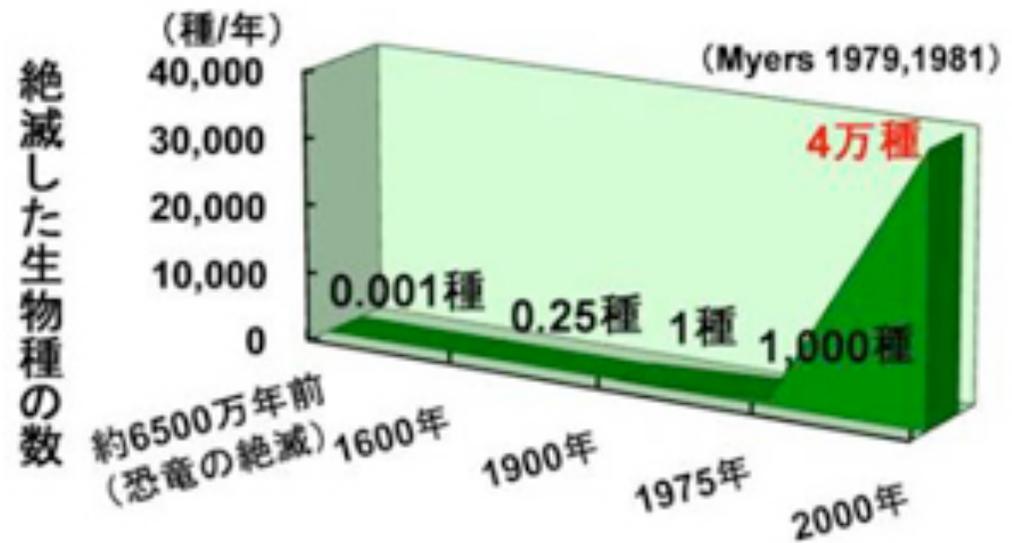
★：Mass extinction (大量絶滅)

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)

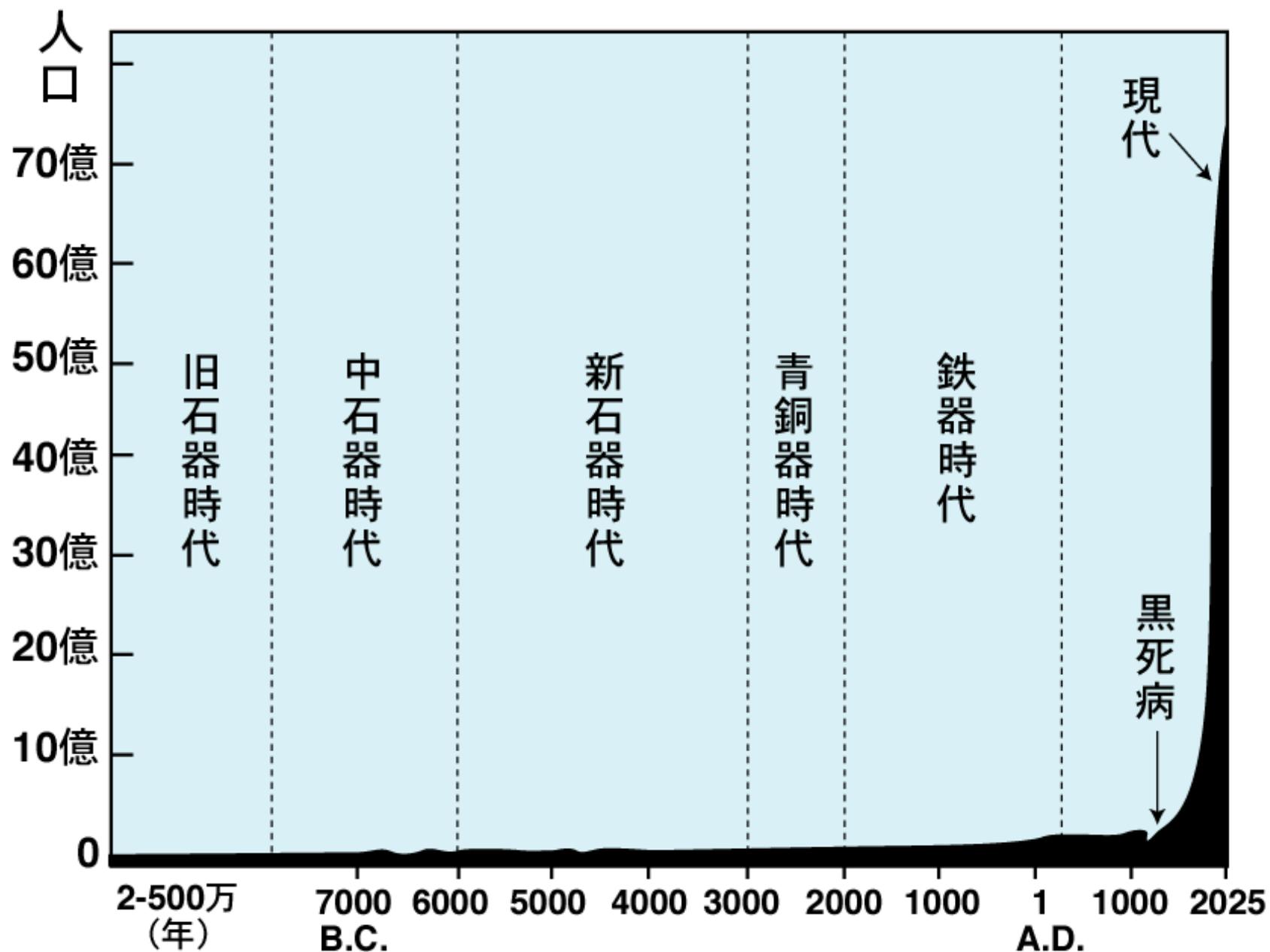
現代は6番目の大絶滅時代か

- 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。