## 第 15 回　講義内容　2026/1/19

- レポート課題（第 3 回）を出しています．課題は，第 12 回講義時にプリントを配布しました．
  締め切りは， 1 月 30 日 (金) 23:59 です．

## 配布物

- 15_Cosmology_contents.pdf　このファイル　Google classroom, web
- 15_Cosmology2025_Viewgraph.pdf　スライド　Google classroom, web
  月曜朝に配布します．

## 講義内容（予定）

- §5.6 第 2 の地球はあるのか　生命の起源は
- Finale これからの宇宙観測計画

## 本日の復習課題例

こんなことを観たり，調べたり，考えてもらったら面白いかな，という程度のおまけ．

- 太陽系外惑星探査の現状
- 生命の起源

## 本講義を終えるにあたり

コロナ禍の丸 3 年のオンライン授業期間を経て，今年度は，対面での講義再開 3 年目でした．いまでもコロナ感染やインフルエンザ感染とは隣合わせですが，皆さんの顔を見ながらの講義ができるのは，いいことだと感じています．

毎回のミニッツペーパーへのコメントをありがとう．想定外の質問に出会うことができるのも非常勤として来ている理由の 1 つです．年末さいごの回のミニッツペーパーで,「宇宙に関する一番のロマンは何か」「宇宙でいちばん気になっていることは何か」という質問がありました．何を話そうか，直前まで悩む難題です．

＊＊＊

私自身が学生の時に受けた講義を思い出してみても，何を学んだかというようなことはほとんど記憶になく，XX 教授がこんな余談をしていた，とか，こんな駄洒落を言った，こんな言い方で説明した，というような思い出の方が鮮明です．私の講義がどうだったかの評価はお任せいたしますが，何か残るものがあれば嬉しく思います．

私の担当している物理の内容は，10 年も経つと古くなってしまう話もあります．でもそれはどの科目も同じでしょう．大学で学ぶのは,「学び方」だと思います．これからも（卒業後も），頭を使うことを惜しまずに，学ぶことに喜びを感じる時間を大切に過ごしていってください．

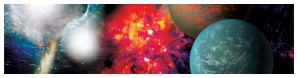
大学事務室より，来年度も本講義のオファーをいただきました．後期月曜にやってきます．

〈大学で習ったことは忘れても　身についたはず　学ぶ方法〉

これからの宇宙研究

## Astro2020（アメリカの10年計画, 2021年11月発表）

https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020



（ｉ）**Pathways to Habitable Worlds　地球外生命体はいるのか**
太陽系外惑星をその環境を決める中心星の性質と合わせて統一的に理解することを目指す。

（ii）**New Windows on the Dynamic Universe　新しい「眼」で宇宙を観測する**
従来の電磁波（可視光、赤外線、電波、X 線、ガンマ線）に加えて、超高エネルギー宇宙線、ニュートリノ、重力波という新たな観測手法を用いて、未知の物理学の開拓を目指す。

（iii）**Drivers of Galaxy Growth　銀河進化を生態系として理解する**
天体は、その化学的・力学的進化の最期に再び宇宙空間に戻って次世代の天体を形成する。その基礎過程を解明する。

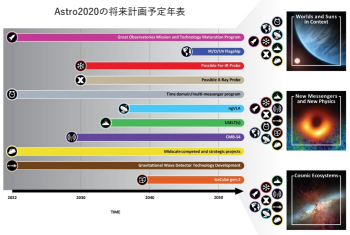
17

これからの宇宙研究

## Astro2020（アメリカの10年計画, 2021年11月発表）

https://www.nationalacademies.org/our-work/decadal-survey-on-astronomy-and-astrophysics-2020-astro2020

Astro2020の将来計画予定年表




18

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか　教科書 p195

## ドレークの式

1960年にアメリカの天文学者ドレークが発表した
「地球外文明の数を推定する式」

$$N = R_* \times f_p \times n_e \times f_\ell \times f_i \times f_c \times L$$

Frank D Drake
1930-2022

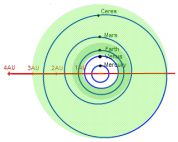
| | | 楽観論 | 中間論 | 悲観論 |
|---|---|---|---|---|
| $R_*$ | 銀河系で毎年生成される星の数（個/年） | 50 | 20 | 1 |
| $f_p$ | 生成される星のうち惑星系を持つ星の割合 | 1.0 | 0.5 | 極めて小 |
| $n_e$ | 星の周りで生命にとって適当な環境を持つ惑星の数 | 1.0 | 0.1 | 極めて小 |
| $f_\ell$ | そうして惑星上で生命が発生する確率 | 1.0 | 0.5 | 極めて小 |
| $f_i$ | 生命が知的文明段階にまで進化する確率 | 1.0 | 0.5 | 極めて小 |
| $f_c$ | 知的生命が星間通信可能な文明まで進化する割合 | 1.0 | 0.5 | 極めて小 |
| $L$ | そのような技術文明の平均寿命 | $10^6$ | $10^4$ | 100 |

25

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか　教科書 p191

## 地球外に生命体が存在するかどうか

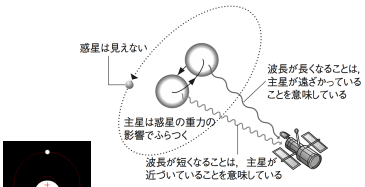
ハビタブルゾーン(habitable zone, 生命居住可能ゾーン)
宇宙の中で生命が誕生するのに適した環境となる領域
条件1:水が液体として存在できる位置に惑星があること
　　=ゴルディロックスゾーン(Goldilocks zone)
　　180 K < Equilibrium (T) < 310 K
条件2:岩石惑星であること
　　(ガス惑星ではないこと)




26

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか　教科書p189

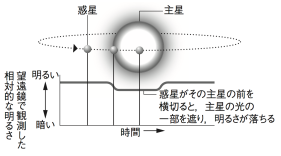
## ドップラー法による系外惑星探査



28

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか　教科書p189

## トランジット法による系外惑星探査




| | 公転周期 (Pyr) | 公転軌道半径 (AU) | トランジット時間 (hr) | トランジット深度 (%) | 幾何学的確率(%) | 視在恒星の半径 (deg) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | orbital period | semi-major axis | transit duration | transit depth | geometric probab. | stellar radius |
| Mercury | 0.241 | 0.39 | 8.1 | 0.002.2 | 1.16 | 0.50 |
| Venus | 0.615 | 0.72 | 13.0 | 0.006.5 | 0.67 | 0.70 |
| Earth | 1.00 | 1.00 | 13.0 | 0.0084 | 0.47 | 0.93 |
| Mars | 1.88 | 1.52 | 14.0 | 0.0042.1 | 0.37 | 1.11 |
| Jupiter | 11.86 | 5.20 | 29.0 | 1.01 | 0.080 | 0.38 |
| Saturn | 29.5 | 9.5 | 35.1 | 0.75 | 0.045 | 0.27 |
| Uranus | 84.0 | 19.2 | 49.0 | 0.0 | 0.0225 | 0.12 |
| Neptune | 164.8 | 30.1 | 71.0 | 0.127 | 0.0115 | 0.10 |

http://caerbannog.ucsc.edu/classes/astr_ooa/NASA_Kepler/character.html

30

## 太陽系外惑星の発見数(2025年)

教科書p190

2023年のデータで修正表作成
2025年1月16日現在

### 5.6　第２の地球はあるのか

この頃は，毎年観測の進展が著しく，太陽系外惑星の発見数は年々増加しています．p190 の表 5.4 を 2023 年 1 月現在のものとして更新すると，次のようになります．

表 1: これまでに発見された太陽系外惑星の数．Kepler 衛星 (2009–2013) のミッションは，一旦終了したものの，同衛星を用いて K2 ミッション (2014–2018) が引き続き行われた．その後 TESS( Transiting Exoplanet Survey Satellite, 2018 -) に観測が引き継がれている．(2023 年 1 月 12 日現在)．[http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/]

| | 公転周期 | Kepler | K2 | TESS |
|---|---|---|---|---|
| 確認された太陽系外惑星 (confirmed planets) | 5241 | 2710 | 543 | 285 |
| 候補天体 (candidates) | 5819 | 2778 | 547 | 595 |
| | | 2654 | 978 | 6137 |
| | | 1982 | 975 | 7358 |

| | 公転周期合計 | |
|---|---|---|
| 複数の惑星からなる系 (multi-planet systems) | 2205 | 2447 |
| ハビタブルゾーンにある星 (確定) —表面温度が 180–310K のもの | 488 | 532 |

| 発見された方法 | 発見数 | |
|---|---|---|
| Astrometry | 2 | 3 |
| Imaging | 62 | 82 |
| Radial Velocity | 1023 | 1096 |
| Transit | 3941 | 4333 |
| Transit timing variations | 24 | 33 |
| Eclipse timing variations | 18 | 17 |
| Microlensing | 152 | 235 |
| Pulsar timing variations | 7 | 8 |
| Pulsation timing variations | 2 | 2 |
| Orbital brightness modulations | 9 | 9 |
| Disk Kinematics | 1 | 1 |

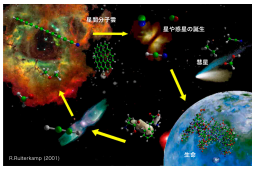
http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu

44

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか　教科書 p193

## 生命をつくる材料は宇宙から？

補足あり



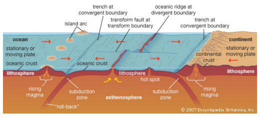

生命発生に関する仮説として、分子雲中に含まれていた生命材料物質の一部は彗星や隕石によって運搬されて惑星に降り積もり、さらに複雑な化学進化を経て最初の生命に至ったという考えがある．パンスペルミア説(panspermia=種をまく)は，よくSF映画のネタにされている．

http://www.nro.nao.ac.jp/news/2014/pr0910/0910-preglycine.html

54

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか　教科書 p194

## 諸説あり　生命の起源はどこか？（1)熱水噴出孔説



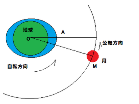

原始地球ではメタン, 硫化水素, アンモニア, 水素などの還元的物質が豊富に存在し, それらが**高温・高圧下**で反応して生体分子がつくられ, 鉱物表面で重合して高分子化し, 紫外線が遮断された環境で細胞化した. **地球生命は熱水噴出孔で生まれた.**

55

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか　教科書 p194

## 諸説あり　生命の起源はどこか？（2)月の潮汐力説

http://www.ipmu.jp/en/node/1974




月の重力が引き起こす絶え間ない潮の流れによって, 生命体が出現した, という説.
原始の月は今より地球に近く月の潮汐力はとても大きく, **初期の地球は今の1000倍の高さの潮の干満が発生**していた.
かつての地球の自転ははやく1日は6時間. **3時間ごとに巨大な津波**が押し寄せたり引いたりしていた. こうして陸地の水たまりで水が濃縮され, **強い太陽光が化学反応を促進し**, 脂肪酸(炭素・酸素・水素原子の鎖)やタンパク質のようなこれまでになかった複雑な有機化合物を作り出した.

59

【話題】

## もし月がなかったら？

- 地球の自転軸の傾きはかなり不安定になる
  現在, 地球の自転軸の傾きは平均23.34度に保たれている(変動は5度以下). もし、月がなければ自転軸の傾きはかなり不安定になり、**地球の気候は極端に変動する.**
- 潮汐力によって, 生命の創造に必要な化学物質の混合がおきたと考えられるので, 月がなければ**大気の構成は変わるだろう.**
- 地球の自転は速く, 1日が8時間になる
  月の潮汐力は, 地球の自転速度を抑えるようにはたらく. 月がなければ地球の自転速度が速まり, 大気の流れが速く, **生命環境には過酷になる.**

http://www.ganshodo.co.jp/mag/moon/files/m_c302.html

60

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか

## 生命誕生場の環境9条件

表6-1　生命誕生場に必要な9条件 (Maruyama et al., 2019b)

| | 環境条件 | 自然原子炉 間欠泉 | 熱水循環系 | 火星[3] | 宇宙空間[4] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | エネルギー源（電離放射線＋熱的エネルギー源） | ○ | × | ○ | ○ |
| 2 | 栄養塩の供給（リン，カリウムなど） | ○ | ?[1] | ○ | × |
| 3 | 生命主要構成元素の供給（C, H, O, N） | ○ | ?[1] | ○ | ○ |
| 4 | 還元ガスの濃集 | ○ | × | ?[2] | × |
| 5 | 乾湿サイクル | ○ | × | ○ | × |
| 6 | ナトリウムの少ない水 | ○ | × | ○ | × |
| 7 | 毒性のない淡水環境 | ○ | × | ?[2] | × |
| 8 | 多様な環境（海洋組成の多様性（pH, 塩分濃度，金属成分），大気組成，温度・圧力条件，巨大大陸，多様な地質環境など） | ○ | × | ?[2] | × |
| 9 | 周期性のある環境 | ○ | × | × | × |

[1] いくつかの要素については○だが，×のものもある
[2] 物的証拠はないが，おそらく条件を満たしていたと考えられる
[3] 火星は誕生後の約4億年間は海洋が存在していた
[4] 宇宙空間には液体の水は存在しない

冥王代(めいおうだい、英: Hadean eon):地質時代の分類のひとつで, 地球誕生から40億年前までの約5億年間

表6-2　生命誕生場の環境条件
Kitadai and Maruyama (2018) で抽出した化学的条件とMaruyama et al. (2019) で示した生命誕生場における9条件を考慮し，生命誕生場で担われるべき物理・化学的役割を洗い出し，それを可能にする環境条件と具体的な地質環境をまとめた．

| 条件No | 条件項目 | 役割 | 必須の担い手 | 補足説明 |
|---|---|---|---|---|
| 1 | 太陽 | ハビタブルトリニティをつくるための必須要素．太陽エネルギーのもとで，大気と海洋が地球表層の物質大循環を気象現象によって担い，風化・侵食・運搬によって陸地から栄養塩を供給する | 岩石惑星上の物質環境 | 生命惑星誕生のために　必要不可欠な惑星表層環境．これに加えて，プレートテクトニクスが機能することによって，固体地球と表層環境との間の物質大循環も可能になる．(6.1.1項) |
| 2 | 大気 | | | |
| 3 | 海洋 | | | |
| 4 | 陸地 | | | |
| 5 | 前駆的化学進化のエネルギー源 | 前駆的化学進化を促進する | 自然原子炉による電離放射線 | 雷放電，宇宙線，火山性マグマ，太陽紫外線もエネルギー源となりうるが，これらだけでは不十分である．(6.1.2項) |
| 6 | 生命誕生場における物質循環のエネルギー源 | 物質循環によって，様々な物質を供給するとともに，多種多様な物質の混合を促進する | ウラン鉱床 | 火山性マグマや太陽紫外線もエネルギー源となりうるが，これらだけでは不十分である．(6.1.3項) |
| 7 | 半閉鎖的環境 | 還元ガスの濃集を可能にする | 地下の洞窟 | ただし，還元ガスを生成するためには，地下空間にかんらん岩やコマチアイトが露出し，そこで岩石ー水相互作用が進むという付帯条件が満たされなければならない．(6.1.4項) |
| 8 | 大陸上の淡水環境 | 生命に必要な中性の水を提供し，乾湿サイクルの場を提供する．また，凍結環境も提供しうる | 大陸上の湖沼 | 冥王代の海洋は猛毒（超酸性，超高塩分濃度，富重金属）のため，降雨によって淡水が大陸上に溜まることが極めて重要．また，月の公転によって潮の満ち引きや，湖沼における乾湿サイクルの場が出現する．(6.1.5項) |
| 9 | 間欠泉 | 周期的に液滴，あるいは，始原的細胞を大量に生産する | ウラン鉱床 | 周期的な間欠泉の噴出によって，温度が上下し，DNAの自己複製機能確立を補助する．火山性マグマの熱でも間欠泉を駆動することは可能（たとえばイエローストーン）だが，生命誕生に向けたBBLs合成という点を考慮すると，不十分である．(6.1.6項，6.1.7項) |

61

第5章 宇宙論 》5.6 第2の地球はあるのか

## 諸説あり　生命の起源はどこか？（3)自然原子炉 間欠泉説

Ebisuzaki, Maruyama (2017) GeoSci. Frontiers 8, 275-298

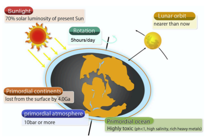
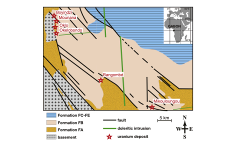



Figure 2. The environment of the Hadean Earth.




冥王代は月が近く, 地球の自転は5時間で激しい潮汐があった.
大気も薄く, 宇宙からの放射線も強かった.

自然原子炉の例
23億年前～21億年前, ガボン共和国オクロには,
自然原子炉が存在していた

64

## 宇宙論研究のまとめ

- 1917年, アインシュタインは一般相対性理論を宇宙に適用し, 膨張する解を見出し, 混乱して宇宙項を導入. 静的なつりあい宇宙を考える. 膨張宇宙を考える科学者を批判するが, 後に宇宙が膨張していることが観測されると, 宇宙項の導入を取り下げた.
- 1946年, ガモフは宇宙が火の玉からはじまった, とする説を唱え, のちにビッグバン宇宙説と改称. 定常宇宙モデル派と長く論争が続いたが, 宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の発見で決着がついた.
  - 1963年, CMBの発見.
    ▸▸▸ この業績でペンジアスとウィルソン, 1978年度ノーベル物理学賞受賞
  - 1992年, COBE衛星によるCMBの詳細観測で初期ゆらぎの存在を発見.
    ▸▸▸ この業績でマザーとスムート, 2006年度ノーベル物理学賞受賞
  - ビッグバン宇宙モデルの一連の理論的研究　▸▸▸ ピーブルズ, 2019年度ノーベル物理学賞受賞

未解決問題　ダークマターの正体は何か. ダークエネルギーは必要か. 初代星の形成はいつ頃か(ダークエイジ問題).

- 1995年, 太陽系外惑星の発見▸▸▸ この業績でマイヨールとケロー, 2019年度ノーベル物理学賞受賞
- 今日までに5500を超える太陽系外惑星が発見されている. ハビタブルゾーンにある惑星も500以上.

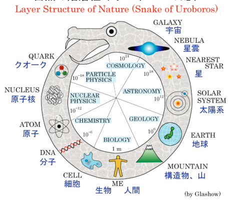
未解決問題　生命の痕跡は見られるか.　生命の起源は何か.

67

## Finale

ウロボロス＝尾を飲み込む

自然の階層性 ( ウロボロスの蛇 )
Layer Structure of Nature (Snake of Uroboros)




96

### アインシュタインの理論はどこまで正しいのか？

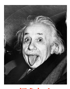
アインシュタインが相対性理論をつくって, 100年.
相対性理論は, アインシュタインの想像をも越えた現象を予言してきた

相対性理論は, これまで数々の検証実験・検証観測に耐えてきた.
他の重力理論は, どんどん棄却されている.

相対性理論は, 他の重力理論よりもシンプルだ.
シンプルな理論が生き残るのは, 物理学の深遠さを感じる.

だけど, どこかで相対性理論の破れが見つからないと,
宇宙の始まりを議論できる次の理論へたどり着けない. . .

アインシュタインが正しくて, 嬉しいような, 残念なような. . .



ほらね！

99