

第 15 回 講義内容

2025/1/20

- 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 27 日 (月) 23:59 です。

配布物

- | | | |
|----------------------------------|--------|-----------------------|
| ● 15_Cosmology_contents.pdf | このファイル | Google classroom, web |
| ● 15_Cosmology2024_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 2 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、「今後の宇宙論はどうなっていくと思うか」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いう話もあります。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>



- Paths 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理解することを目指す。
- 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。
- 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。

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



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」

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

Frank D Drake
1930-2022

変数	説明	中間値	使用範囲
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_l	そうした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	知的生命が人間程度可能な文明まで進化する割合	1.0	0.5 極めて小
L	そのような高度文明の平均寿命	10 ⁷	10 ⁸ ~ 100

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

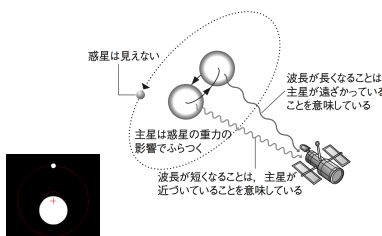
条件1: 水が液体として存在できる位置に惑星があること
= **ゴールドロックゾーン (Goldilocks zone)**
180 K < Equilibrium (T) < 310 K

条件2: 岩石惑星であること
(ガス惑星ではないこと)



第5章 宇宙論 5.6 第2の地球はあるのか 教科書 p190

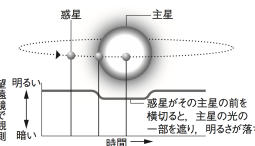
ドップラー法による系外惑星探索



惑星は見えない
主星は惑星の重力の影響でふらつく
波長が長くなることは、主星が遠ざかっていることを意味している
波長が短くなることは、主星が近づいていることを意味している

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索



相対的に観測する時間

惑星がその主星の前を横切ると、主星の光の一部を遮り、明るさが落ちる

惑星	発見年	距離 (光年)	質量 (地球質量)	半径 (地球半径)	軌道傾斜角 (度)	発見方法
Kepler-11b	2011	0.67	11.8	1.34	90.0	トランジット
Kepler-11c	2011	0.67	12.7	1.47	90.0	トランジット
Kepler-11d	2011	0.67	21.5	1.91	90.0	トランジット
Kepler-11e	2011	0.67	33.3	2.87	90.0	トランジット
Kepler-11f	2011	0.67	48.5	4.12	90.0	トランジット
Kepler-11g	2011	0.67	71.2	5.85	90.0	トランジット

第5章 宇宙論 5.6 第2の地球はあるのか 教科書 p190

太陽系外惑星の発見数 (2025年)

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
この図は、毎年観測の進捗が速く、太陽系外惑星の発見数は年々増加しています。p.190の表5.4を2023年1月現在のものと更新すると、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、同衛星を用いた TESS (2018-2025) が引き続き稼働中。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)。<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

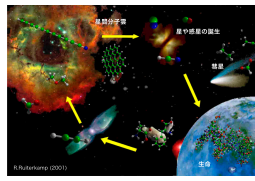
観測された太陽系外惑星 (confirmed planets)	Kepler	K2	TESS	発見された方法	発見数
惑星系 (systems)	5212	543	395	Transits	3
惑星系 (systems)	5819	2778	547	Imaging	62
惑星系 (systems)	5819	2778	547	Radial Velocity	1056
惑星系 (systems)	1982	875	7358	Transit	3941
惑星系 (systems)	2265	2447		Transit Timing variations	24
惑星系 (systems)	2265	2447		Eclipse timing variations	15
惑星系 (systems)	2265	2447		Microlensing	152
惑星系 (systems)	2265	2447		Pulsar timing variations	2
惑星系 (systems)	2265	2447		Orbital brightness modulations	9
惑星系 (systems)	2265	2447		Disk Kinematics	1

<https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu>

第5章 宇宙論 5.6 第2の地球はあるのか 教科書 p193

説あり

生命をつくる材料は宇宙から?

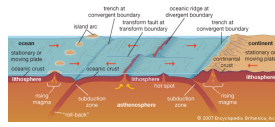


生命発生に関する仮説として、分子雲中に含まれていた生命材料物質の一部は彗星や隕石によって運搬されて惑星に降り積もり、さらに複雑な化学進化を経て最初の生命に至ったという考えがある。パンスペルミア説 (panspermia=種をまく) は、よくSF映画のネタにされている。

<http://www.nasa.gov/press/2014/pr0910/0910-origoqc.html>

第5章 宇宙論 5.6 第2の地球はあるのか 教科書 p194

【読説あり】 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けられ、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。

第5章 宇宙論 5.6 第2の地球はあるのか 教科書 p194

【読説あり】 生命の起源はどこか？ (2)月の潮汐力説



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。

【読説】 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.jp.co.jp/mag/moon/files/m_c302.html

第5章 宇宙論 5.6 第2の地球はあるのか

生命誕生時の環境9条件

条件	必要	存在	不足	存在	不足
1. 適度な温度	O	X	O	X	O
2. 適度な湿度	O	X	O	X	O
3. 適度な圧力	O	X	O	X	O
4. 適度な酸素	O	X	O	X	O
5. 適度な窒素	O	X	O	X	O
6. 適度なエネルギー	O	X	O	X	O
7. 適度な時間	O	X	O	X	O
8. 適度な空間	O	X	O	X	O
9. 適度な物質	O	X	O	X	O

生命の誕生に必要な9条件 (Miyazaki et al., 2019)

1. 適度な温度: 生命の誕生には、水が液体状態で存在する必要がある。地球の表面温度は約15°Cであり、これは生命の誕生に適した温度である。

2. 適度な湿度: 生命の誕生には、水が豊富に存在する必要がある。地球の表面には、水が豊富に存在している。

3. 適度な圧力: 生命の誕生には、適度な圧力が存在する必要がある。地球の表面の圧力は、生命の誕生に適した圧力である。

4. 適度な酸素: 生命の誕生には、適度な酸素が存在する必要がある。地球の表面には、適度な酸素が存在している。

5. 適度な窒素: 生命の誕生には、適度な窒素が存在する必要がある。地球の表面には、適度な窒素が存在している。

6. 適度なエネルギー: 生命の誕生には、適度なエネルギーが存在する必要がある。地球の表面には、適度なエネルギーが存在している。

7. 適度な時間: 生命の誕生には、適度な時間が必要である。地球の歴史は、生命の誕生に適した時間である。

8. 適度な空間: 生命の誕生には、適度な空間が必要である。地球の表面には、適度な空間が存在している。

9. 適度な物質: 生命の誕生には、適度な物質が存在する必要がある。地球の表面には、適度な物質が存在している。

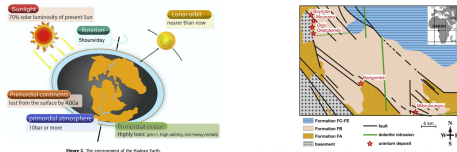


冥王代(冥いおうだい、冥: Hadean eon) 地球時代(地球)の分岐のひとつで、地球誕生から40億年前までの約40億年間

第5章 宇宙論 5.6 第2の地球はあるのか

【読説あり】 生命の起源はどこか？ (3)自然原子炉 閼欠泉説

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



冥王代は月が近く、地球の自転は5時間で激しい潮力があった。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。

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。静的な宇宙モデルを考案する。膨張宇宙を考案す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始まった、とする説を唱え、のちにビッグバン宇宙説と改称。大爆発宇宙モデル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。
 - この業績でベンジャミン・ペーリス、1978年度ノーベル物理学賞受賞
 - 1992年、COBE衛星によるCMBの詳細観測で初期からの存在を発見。
 - この業績でマーティン・パール、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
 - この業績でアンソニー・ウィー、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)。

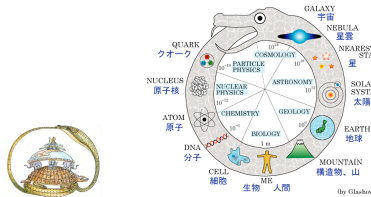
- 1995年、太陽系外惑星の発見
 - この業績でマイケル・ワグネル、2019年度ノーベル物理学賞受賞
- 今日までに5500を超える太陽系外惑星が発見されている。ハビタブルゾーンにある惑星も500以上。

【未解決問題】 生命の痕跡は見られるか、生命の起源は何か。

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)



アインシュタインの理論はどこまで正しいのか？

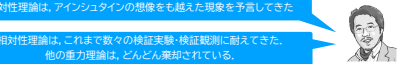
アインシュタインが相対性理論をつくって、100年。相対性理論は、アインシュタインの想像をも越えた現象を予言してきた。

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、ほとんど棄却されている。

相対性理論は、他の重力理論よりシンプルだ。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。

「何けど、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!