

2019年度(秋金4) ①

宇宙地球と生命



第12(13?)回目

「膨張する宇宙」

「ビッグ・バンとインフレーション」

「宇宙における生命とその探査」

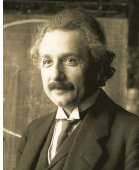
東京学芸大学 自然科学系
広域自然科学講座 宇宙地球科学分野
(教育学部・理科・地学教室)

講師・西浦 慎悟

1

11. 膨張する宇宙 ④

- 膨張宇宙の登場
 - ・ 1915年: アルベルト・アインシュタイン、一般相対性理論を構築・発表。




↑アインシュタイン
(Wikipediaより)

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

↑アインシュタインの重力場方程式

当初、宇宙項 Λ はゼロだったが、これでは宇宙が自分自身の重力(万有引力)で収縮し潰れてしまうため、これを妨げる反発力(万有斥力)として導入した。



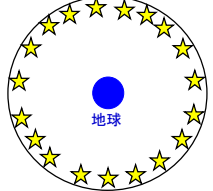
↑ルメートル
(Wikipediaより)

- ・ 1922年: アレクサンドル・フリードマン、アインシュタイン方程式の解として膨張宇宙モデルを導く。
- ・ 1927年: ジョルジュ・ルメートル、独立に膨張宇宙モデルを導き「宇宙は、原初の高密度の小さな『宇宙の卵』が膨張した」という説を提唱。

4

11. 膨張する宇宙 ②

- ・ 古代ギリシャ時代以降の宇宙観
 - 恒星は、最も外側の天球の裏に貼り付いている。
 - 有限の広さの宇宙



ただし、恒星の年周視差が検出されなかったため、恒星までの距離は途方も無く遠いと考えられていた。

- ・ 1576年: トーマス・ディゲス
 - 『夜空は何故暗いのか?』という疑問
 - 「オルバースのパラドックス」のオリジナル・アイデア
- ・ 1611年: ヨハネス・ケプラー
 - 『暗い夜空が有限の宇宙の証拠』
 - 恒星の本当の明るさがずっと暗い可能性についても言及。
- ・ 1687年: アイザック・ニュートン
 - 万有引力の発見
 - 有限の宇宙では、天体が互いに引き合って、潰れてしまう。
 - 無限の広さの宇宙を要請


「未来永劫に不変で、無限に広がる宇宙」という概念が確立する。

2

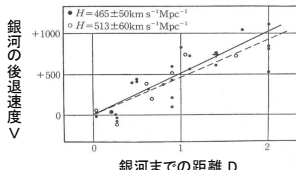
11. 膨張する宇宙

- 膨張宇宙の発見

- 1912年: ヴェスト・メルビン・スライファーが渦巻銀河のスペクトルが赤方偏移していることを見出す。
- 1929年: エドウィン・ハッブルとミルトン・ラセル・ヒューメインは18個の銀河の距離を導出し、これと後退速度との相関関係(ハッブル=ルメートルの法則)を発見した。



↑ハッブル ↑ヒューメイソン
(Cosmic Journey HPより)



銀河の後退速度 V

銀河までの距離 D

$$V = H_0 \times D$$

V: 後退速度 (km/s)
D: 距離 (Mpc)
H₀: ハッブル定数 (km/s/Mpc)

「銀河の後退速度は、その銀河までの距離に比例する」

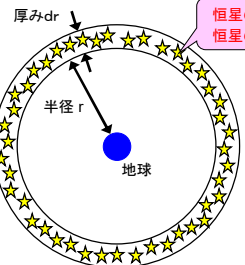
「全ての銀河が元々は同じ場所にあり、ある瞬間に同時に四方八方に動き始めた」と考えるとうまく説明できる

5

11. 膨張する宇宙 ③

- 1826年: オルバースのパラドックス
 - 『夜空は何故暗いのか?』を再提起

恒星の平均の光度をL、個数密度をnで一定として、地球からrだけ離れた厚みdrの球殻を考える。



厚み dr
半径 r
地球

1つの恒星の光度Lは、距離rだけ離れると半径rの球面状に広がるので、「見かけの明るさ」fは、

$$f = \frac{L}{4\pi r^2}$$

球殻中に存在する恒星からの見かけの明るさの合計は、

$$4\pi r^2 dr n \times f = n L dr$$

宇宙の広さを無限と考えると、宇宙に存在する全ての恒星からの光の合計は、

$$\int_0^{\infty} n L dr = [n L r]_0^{\infty} = \infty$$

となり、夜空は無限大に明るくなる。
しかし、実際の夜空は暗い。何故か?

→「宇宙の広さは有限、星の数も有限」

3

11. 膨張する宇宙 ⑥

「我々の銀河(銀河系)は宇宙の中心なのか?」

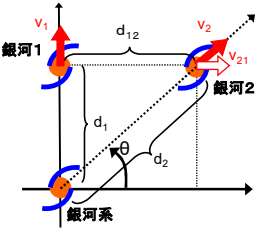
- ・ 銀河系から銀河1と銀河2を観測する
 - $v_1 = H_0 d_1$
 - $v_2 = H_0 d_2$
- ・ 銀河1から銀河2を観測する
 - 後退速度 = $v_{21} = v_2 \cos \theta$
 - 距離 = $d_{12} = d_2 \cos \theta = (v_2 / H_0) \cos \theta$
 - = $v_2 \cos \theta / H_0 = v_{21} / H_0$

従って、

$$v_{21} = H_0 d_{21}$$

となり、銀河1についても、全く同じ比例関係が成り立つ。

→ 宇宙に存在する「どの銀河」から観測しても、「ハッブル=ルメートルの法則は成り立つ」。



6

11. 膨張する宇宙 (7)

● **ハッブル定数と膨張宇宙の年齢**

$V = H_0 \times D$ (ハッブル=ルメートルの法則)

V : 銀河の後退速度 (km/s)
 D : 銀河までの距離 (Mpc)
 H_0 : ハッブル定数 (km/s/Mpc)

ハッブル定数の逆数は、近似的な膨張宇宙の年齢(ハッブル時間)を示している。

$$\frac{1}{H_0} = \frac{D}{V} = \frac{\text{道のり}}{\text{速度}} = \text{要した時間}$$

(例) $H_0 = 75 \text{ km/s/Mpc}$ の場合

$1 \text{ Mpc} = 3.09 \times 10^{19} \text{ km}$
 $1 \text{ 年} = 3.16 \times 10^7 \text{ s}$

ハッブル時間 = $1/H_0 = 1/75 \text{ (s Mpc/km)}$
 $= 1/75 / (3.16 \times 10^7) [\text{s} \rightarrow \text{年}] \times (3.09 \times 10^{19}) [\text{Mpc} \rightarrow \text{km}]$
 $= 1.30 \times 10^{10} \text{ 年} = 130 \text{ 億年}$

7

11. 膨張する宇宙 (10)

【第2段階(太陽近傍の恒星までの距離)】

1838-39年 ベツセル、シュトルーベ、ヘンダーソンが太陽近傍の恒星の年周視差の測定に成功。

→ 三角測量を利用することで、年周視差 p (秒角、arcsec) の恒星までの距離 D (pc) は、

$$D = \frac{1}{p}$$

と表すことができる。
 ただし、この方法では数 10 pc が限界。

他にも、一つの散開星団の星々の運動を統計的に処理して、その星団までの距離を求める収束点法などがあるが、ここでは省略する。

→ 様々な主系列星までの距離を明らかにする
 → HR図を作成する

10

11. 膨張する宇宙

● **ハッブル定数決定の歴史**

銀河の後退速度 V

銀河までの距離 D

初期のハッブル定数 (Hubble, 1929, Proc. Nat. Acad. Sci., 15, 189. 大蔵他, 1989, 天文資料集, 東京大学出版会)

ハッブル定数は400-500 km/s/Mpc
 ↓ 宇宙年齢は18億年
 この年齢はあまりに小さ過ぎる。
 地質学・生物学の観点から地球の年齢は数10億年と考えられていた。

④ 2017年 LIGOによる重力波観測
 ハッブル定数 = $70.0 \pm 12.0 - 8.0 \text{ km/s/Mpc}$

↑ 様々な研究で求められたハッブル定数の変遷

・ 21世紀以降の研究例

① 2001年 ハッブル宇宙望遠鏡による近傍銀河のセフィイド型変光星観測
 ハッブル定数 = $72 \pm 8 \text{ km/s/Mpc}$

② 2003年 WMAP衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測
 ハッブル定数 = $72 \pm 5 \text{ km/s/Mpc}$
 宇宙年齢 = $134 \pm 3 \text{ 億年}$

③ 2013年 PLANCK衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測
 ハッブル定数 = $67.15 \pm 1.2 \text{ km/s/Mpc}$

8

11. 膨張する宇宙 (11)

【第3段階(より遠くの恒星までの距離)】

・ 主系列フィット: 見かけ等級と絶対等級の差から距離を求める

① 距離が不明の主系列星の見かけの等級とスペクトルを調べる。
 ② HR図上で同じスペクトル(温度)を示す主系列星との等級の差を調べる。
 ③ その等級差を明るさの比に直す。
 5等級暗い → 明るさ1/100倍
 ④ 明るさの比に相当する距離の比を求める(明るさは距離の2乗に反比例)。
 $1 / \sqrt{(1/100)} = 10$
 ⑤ 距離を求める(絶対等級は10pcの位置での明るさ)。
 $10 \text{ pc} \times 10 \text{ 倍} = 100 \text{ pc}$

温度高い ← 恒星の表面温度(K) → 温度低い
 恒星のスペクトルを調べることでわかる。

11

11. 膨張する宇宙 (9)

● **天体までの距離決定**

「ハッブル定数決定の困難さ」= 「天体までの距離決定の困難さ」

【第1段階(太陽までの距離 = 1天文単位)】

1716年 エドモンド・ハレーが金星(水星)の太陽面通過の観測から太陽までの距離を測定する方法を提案。

$$D = \frac{a}{2k \tan \frac{\theta}{2}}$$

↑ 2004年6月8日の金星の太陽面通過

太陽-惑星間の相対的な距離(上図中の k に相当)は、万有引力の法則から分かっていた。

ハレーの時代、この観測に必要な「精密な地図」と「高精度な時計」のどちらも存在しなかった。現在では、レーザー測距によって、1km 以下の精度で測定できる。

9

・ 脈動変光星の周期・光度関係: **11. 膨張する宇宙** (12)

セフィイド型変光星やRRライリ型変光星などには、絶対等級が明るいものほど変光周期が長いという周期・光度関係がある。これを利用して、見かけ等級と絶対等級の差から距離を求める。特にセフィイド型変光星は、絶対等級が明るいいため、近傍の銀河であれば、観測することができる。

① 距離が不明のセフィイド型変光星の見かけの等級と変光周期を調べる。
 ② 同じ変光周期を持つセフィイド型変光星の絶対等級との差を調べる。
 ③ その等級差を明るさの比に直す。
 2等暗い → 明るさ1/2.5²倍
 ④ 明るさの比に相当する距離の比を求める(明るさは距離の2乗に反比例)。
 $1 / \sqrt{(1/2.5^2)} = 2.5$
 ⑤ 距離を求める(絶対等級は10pcの位置での明るさ)。
 $10 \text{ pc} \times 2.5 \text{ 倍} = 25 \text{ pc}$

↑ セフィイド型変光星の周期・光度関係

12

11. 膨張する宇宙

13

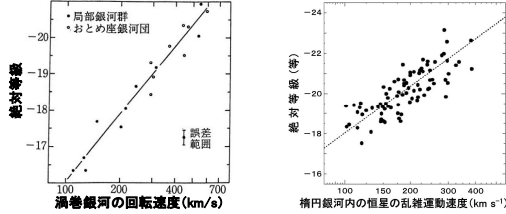
【第4段階(近傍の銀河までの距離)】

セファイド型変光星の周期・光度関係を用いて距離を測定する。
地上観測では4 Mpc が限界であったが、ハッブル宇宙望遠鏡を用いることで、20 Mpc までの距離測定が可能となった(おとめ座銀河団[最近傍の銀河団]程度)。

【第5段階(比較的遠くの銀河までの距離)】

銀河自身を使って、距離を測定する。

・「渦巻銀河の回転速度・光度関係」や「楕円銀河の速度分散・光度関係」:



13

12. ビッグ・バンとインフレーション

16

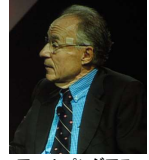
● 宇宙背景放射の発見

ビッグ・バン宇宙論の予言: 初期宇宙が超高温であれば、現在でも5K程度の余熱があるはず。

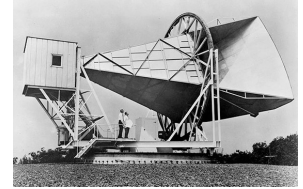
1964年: ベル研のアーノ・ペンジアスとロバート・ウッドロウ・ウィルソンが波長7cmの電波放射を発見。

- ・元々は中性の水素原子が放射する波長21cmの電波のための実験だった。
- ・電波は、空のありとあらゆる方向から同じ強度で届いている。
- ・1年の間に方向や強さが変わらない。
- ・アンテナに営業したハトも除去。

→ 電波放射は温度にして約3.5 K。
「宇宙マイクロ波背景放射」
→ ビッグ・バン宇宙の証拠



↑アーノ・ペンジアス



↑宇宙背景放射を最初に検出したアンテナ

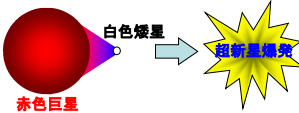
16

11. 膨張する宇宙

14

【第6段階(遠方の銀河までの距離)】

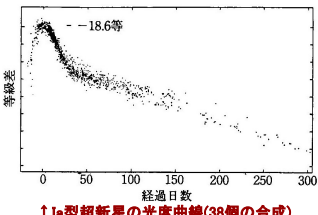
・ Ia型超新星の最大光度:



白色矮星に、連星の相方である赤色巨星から物質が降り積もり、チャンドラ・セカル限界(1.4太陽質量)に近づくことで、中心部の炭素が燃え、熱核反応が暴走して、超新星となる。

- ① 銀河全体に匹敵する光度のため、遠方の銀河に発生したものでも観測できる。
- ② 星間物質が少ない楕円銀河やレンズ状銀河でも発生する。
- ③ 爆発の最大光度が、ほぼ一定。

距離で変わる物理量(明るさなど)と距離で変わらない物理量(スペクトル型、変光周期、回転速度など)の関係を利用して、天体までの距離を測定する。



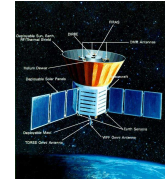
↑Ia型超新星の光度曲線(38個の合成)

14

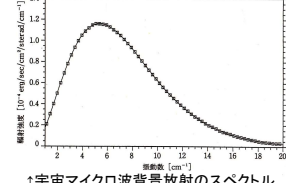
12. ビッグ・バンとインフレーション

17

● COBE(NASA, 1989年) = COsmic Background Explorer

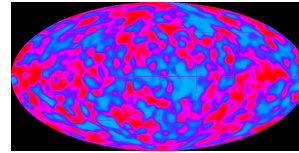


(NASA HPより)



↑宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル

←「マーク」は観測データ、曲線は黒体放射の理論値。



↑宇宙マイクロ波背景放射の全天図 (NASA HPより)

背景放射は黒体放射で、その温度は2.73K

背景放射温度の「ゆらぎ」は、わずか1/10万

→ この1/10万の「ゆらぎ」が銀河・銀河団や大規模構造などの天体や構造の元であると考えられる。

17

12. ビッグ・バンとインフレーション

15

● 超高温・超高密度の火の玉

膨張する宇宙 → 過去の宇宙は物質が一点に集まった、超高密度で超高温な状態にあった。

1947年: ジョージ・ガモフが、『宇宙初期の火の玉が冷える過程で、重い元素が合成された』と提唱。

初期宇宙: ガモフ → 中性子のみ、林忠四郎 → 陽子 + 中性子

→ Heが合成された段階で、初期宇宙は既に希薄になってしまい、これ以上元素を合成できなくなってしまう。



↑ジョージ・ガモフ

フレッド・ホイルほか多くの研究者:

定常宇宙論 = 宇宙は膨張しているが、真空から物質が生まれることで、密度は一定に保たれている。そのために、宇宙に始まりや終わりはない。

『元素は、恒星内部で次々に核融合反応が進行して合成された』



↑フレッド・ホイル

「ビッグ・バン」理論
↓
名付け親はホイル

15

12. ビッグ・バンとインフレーション

18

● インフレーション宇宙

『ビッグ・バンのエネルギーは何処から来たのか?』

1981年:

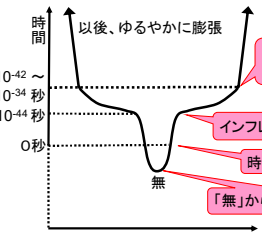
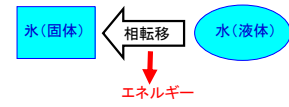
佐藤勝彦

アラン・ハーヴェイ・グース

→ 宇宙は、誕生直後の1/10³⁶秒に、10の数10乗倍にまで急膨張した。

→ 宇宙は、急激に冷える。

→ 真空の相転移が起こる。



インフレーション終了
ビッグ・バン

インフレーション開始

時間が流れ始める

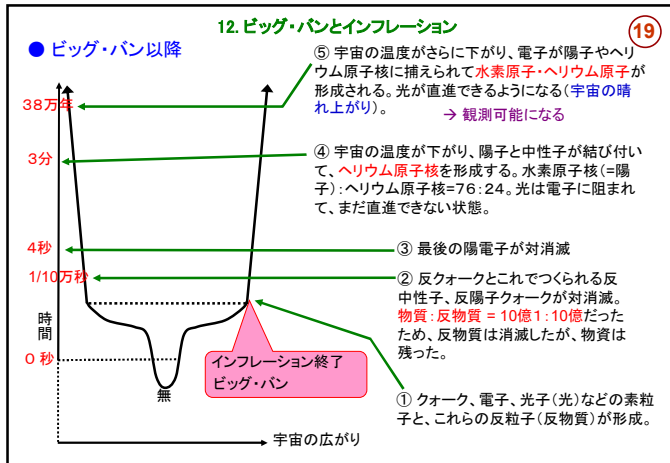
「無」からの宇宙の誕生

宇宙の広がり

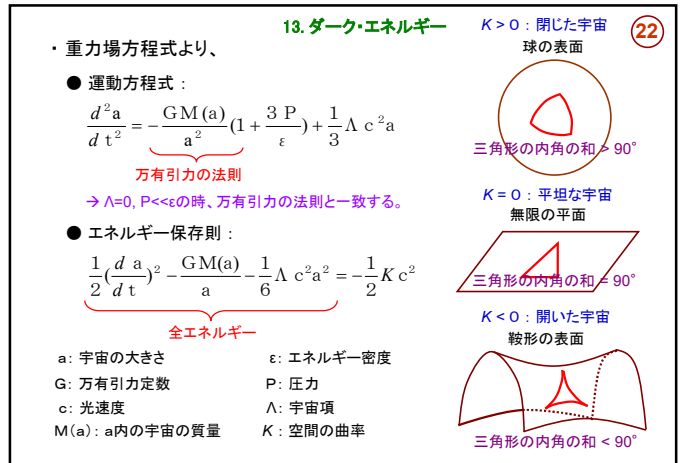
過冷却による
潜熱の開放

インフレーションを引き起こしたものは?
↓
宇宙項(万有斥力)に相当するもの

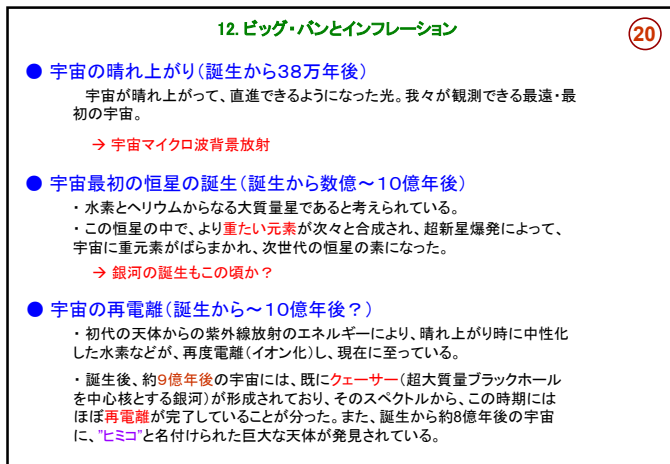
18



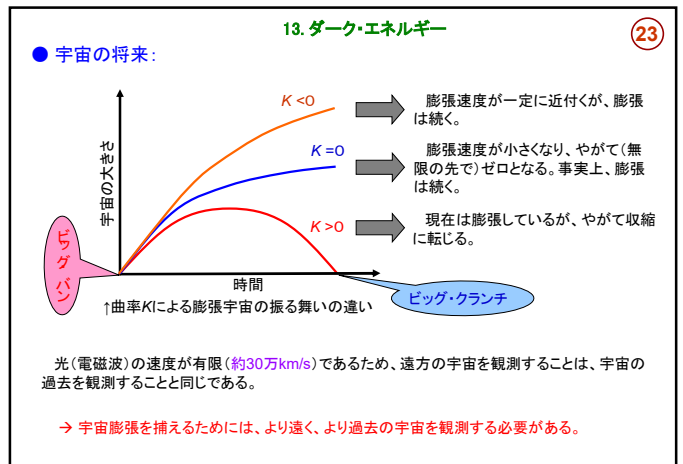
19



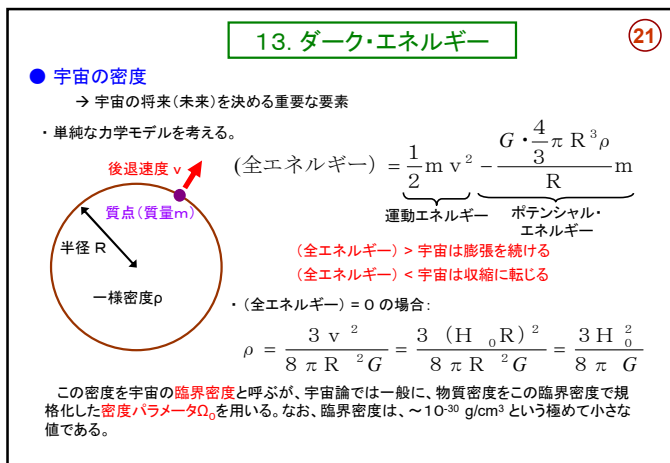
22



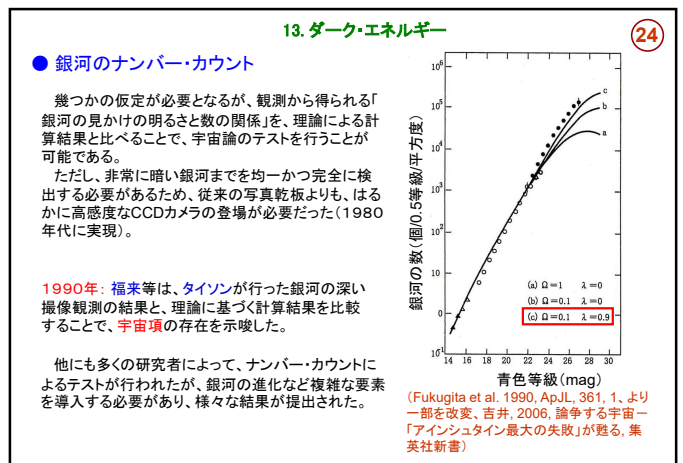
20



23




21



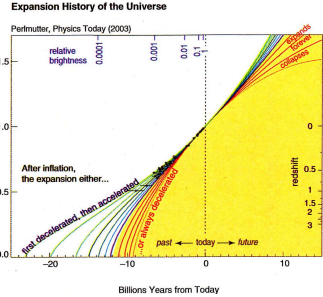
24

● 宇宙膨張の加速の発見:

13. ダーク・エネルギー (25)



↑ NGC4526に出現した超新星 SN1994D(HST:NASA)



遠方銀河に現れたIa型超新星の観測から、宇宙項の存在が示唆された。

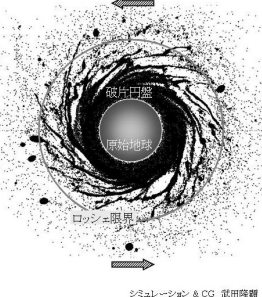
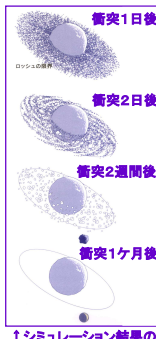
→ 宇宙膨張は加速している
・加速の要因は宇宙項(ダーク・エネルギー)

25

● 46億年前: 月の誕生

14. 宇宙における生命とその探査 (28)

- 1) 親子説(分裂説)**
地球・月は、分裂が生じるほど高速回転をしていない。
- 2) 他人説(捕獲説)**
地球と月の石の元素組成は、異なる場所で誕生したと言えるほど異なっていない。
- 3) 兄弟説(共成長説)**
月の石の揮発性元素の少なさは、月の石が非常に高温にさらされた↑シミュレーションによる形成中の月ことを示している。
- 4) ジャイアント・インパクト説(巨大衝突説)**
火星程度の惑星が地球に衝突、加熱された一部が飛び出して集積、月になる。

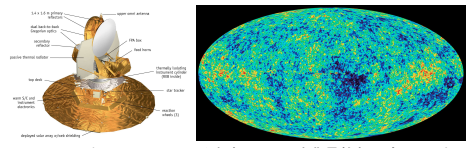



↑シミュレーション結果のイメージイラスト

28

13. ダーク・エネルギー (26)

● WMAP(NASA, 2001年) = Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
COBEよりも高い精度で、宇宙マイクロ波背景放射の全天観測を行った。
→ 宇宙初期の密度揺らぎを反映



↑WMAP(左)とWMAPによる宇宙マイクロ波背景放射の全天図(右)(NASA HPより)

宇宙年齢 = $(13.7 \pm 0.2) \times 10^9$ 年
ハッブル定数 = (71 ± 4) km/s/Mpc
宇宙の再電離 = 誕生から約2~4億年後

● PLANCK(ESA, 2009年)
WMAPよりも高い精度で、宇宙マイクロ波背景放射の全天観測を行った。
宇宙年齢 = 138億年

通常物質4%
ダーク・マター23%
ダーク・エネルギー(宇宙項)73%

↑WMAPが得た宇宙の組成

ダーク・マターとは何か?
ダーク・エネルギーとは何か?

26

14. 宇宙における生命とその探査 (29)

● 45億6000万年前~40億年前:

- 「放射性同位体の崩壊にともなう熱」+「微惑星の衝突」→ 地球の加熱
→ マグマ・オーシャン
- 中心部への鉄の沈殿、軽い物質によるマンツルの形成
- 蒸発したマンツルによる大気が、熱を宇宙空間中に放射し、冷却されて雨となる。
→ 地表面を冷却 → 海洋の発達
- 地表と中心部の温度差による対流が発生
むらの大きな乱流による対流(ブルーム)
ブルームによる急激かつ局所的な上昇流(ホット・スポット)と下降流
→ 陸地の形成と消滅の繰り返し

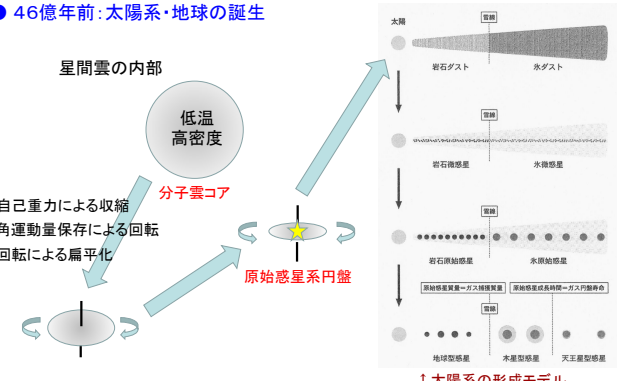
● 42億年前~39億年前(?):

- 微惑星の頻繁な衝突がほぼ終了

29

14. 宇宙における生命とその探査 (27)

● 46億年前: 太陽系・地球の誕生



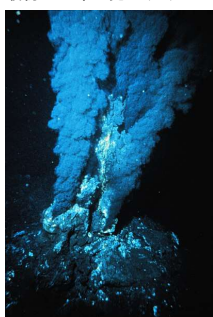
↑ 太陽系の形成モデル

27

14. 宇宙における生命とその探査 (30)

● 40億年前(?): 最古の生物化石は約35億年前

- 最初の生命の発生(?)
深海の高圧下で300°C以上の熱水が吹き出す場所「熱水噴出孔」。
Fe, Mn, Cuの硫化物を大量に含み、その黒い色から「ブラック・スモーカー」と呼ばれる。
古細菌やバクテリアなどが生息し、周辺には巻貝、エビ、カニ、なども含む生態系が構築されている。
- 正に帯電したFeS₂(黄鉄鉱)の表面に、負に帯電した有機化合物が引きつけられ、そこで有機化合物どうしが化学反応を起こす。
→ やがて細胞状物質が形成される。



↑ ブラック・スモーカーと呼ばれる熱水噴出孔

1953年 ユーリー・ミラーの実験
メタン、アンモニア、水素、水の混合物(太古の地球大気の主成分と思われる)を加熱しながら、6万ボルトの放電に晒す。
→ アミノ酸を含む、大量の有機物が合成された。

30

14. 宇宙における生命とその探査 (31)

● **パンスペルミア (panspermia) 説**

(前提条件)「宇宙は生命で満たあふれている」

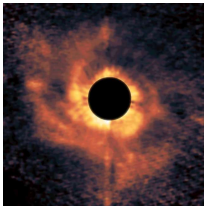
- **光パンスペルミア説 (アレニウス, 1903年)**
有機物や生命の素が、太陽風によって地球に運ばれる。
- **岩石パンスペルミア説 (トムソン ヘルムホルツ)**
有機物や生命の素が、岩石に付着することで、流星や隕石として、地球に運ばれる。岩石に守られることで、宇宙線や大気圏突入時の高温からも守られる。
- **彗星パンスペルミア説 (ホイール, 1978年)**
有機物や生命の素が、彗星で発生し、それが地球に衝突することで、地球に運ばれる。

パンスペルミア説は、「地球上の生命」の起源に言及しているだけで、「生命」そのものの起源については、何も答えていない。

31

14. 宇宙における生命とその探査 (34)

● **見えて来た惑星形成**




形成中の**惑星系円盤**に存在する**ダスト**からの反射光や赤外線放射を捕えた画像。
特に、ALMAが捕えた同心円状の筋は、形成中の惑星によって、ダストが失われた領域であると考えられている。

↑ぎよしゃ座AB星(すばる望遠鏡) ↑おうし座タウ星(ALMA)

● **惑星探査**

- **ドップラー法**: 惑星の公転によって、恒星がふらつくため、その運動速度を精密な分光観測から検出する。
- **トランジット法**: 惑星が恒星を隠す際の、ほんのわずかな変光を検出する。光度曲線の形から、他の連星などは区別できる。

他にも、反射分光法、マイクロレンズ法、偏光観測法など...

34

14. 宇宙における生命とその探査 (32)

● **SETI (セチ, = Search for Extra Terrestrial Intelligence)**

● **アレシボ=メッセージ**

Active-SETI の一つ。1974年に、アレシボ天文台の305m電波望遠鏡を用いて、24000光年の距離にある**球状星団M13**にメッセージが送信された。23×73 という素数どうしの掛け算で図形が表示される仕組みになっている。




↑アレシボ天文台の305m 電波望遠鏡 ↑アレシボ=メッセージ (実際は白黒)

32

14. 宇宙における生命とその探査 (35)

● **異形の惑星たち**

太陽系: 内側を小さい岩石型惑星、外側を巨大なガス惑星が円に近い軌道を公転している。

ホット・ジュピター: 地球よりずっと内側を巨大なガス惑星が公転している。

エキセントリック・プラネット: 非常に楕円率の大きい軌道を惑星が公転している。

● **地球系外惑星**

2009年から2018年まで、**ケプラー衛星**によって50万個以上の恒星のトランジット観測が行われ、2600個以上の系外惑星が発見され、その内の数10個が地球型と考えられている。

● **ドレイク方程式**

1961年: 電波天文学者 **フランク・ドレイク** が示した銀河系内の知的文明社会の数を推定する計算式。

$$N = R \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
 恒星の数 恒星が持つ割合 生命が生まれる割合 知的生命に進化する割合 電波で交信を行う割合 地球型になる割合 知的文明の寿命

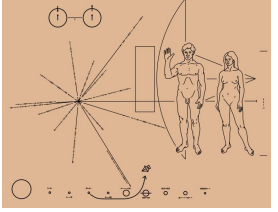
35

14. 宇宙における生命とその探査 (33)

● **バイオニア10号/11号の金属板**

1972/1973年に打ち上げられた探査機**バイオニア10号/11号**に、人類からのメッセージを記した金属板が載せられた。最初のActive-SETI。いろいろとクレームは、あったらしい...

1977年に打ち上げられた**ボイジャー**には音を入れたレコード盤が載せられた。



↑バイオニア10号/11号の金属板

● **オズマ計画**

1960年に、**フランク・ドレイク**が、アメリカ・グリーンバンクの26 cm 電波望遠鏡を、**くじら座タウ星**と**エリダヌス座イpsilon星**に向け、波長21 cm 線による人工的な信号の探査を行った。Passive-SETIの代表。

1973年~1976年には、**ザックマン**と**バルマー**によるオズマが行われ、650個以上の恒星が観測された。

● **フェニックス計画**

アレシボ 305m 電波望遠鏡を、年間3週間用いて、近傍の1000個以上の恒星からの電波検出を目指す。

● **SETI@HOME**

電波望遠鏡による観測データの解析をネットワークを世界中のPCで分散解析するシステム。520万人以上が参加している。

33

【参考文献】

- 1) Timothy Ferris (1988), "Coming of Age in the Milky Way", 野本陽代訳(1992)「銀河の時代-宇宙論博物館-上/下」, 工作舎。
- 2) 小暮智一(2015), "現代天文学史 天体物理学の潮流と開拓者たち", 京都大学学術出版会。
- 3) Barbara Ryden (2003), "Introduction to Cosmology", Pearson Education, 牧野伸顕訳(2003)「宇宙入門」, ビラン・デュケーション。
- 4) 大脇ほか(1998), "天文資料集", 東京大学出版会。(画像: 初期のハッブル型, 渦巻銀河の回転速度・光度関係, Ia型超新星の変光曲線)
- 5) Cosmic Journey HP (http://www.aip.org/history/cosmology/index.htm, 画像: ハッブル, ヒューメイン)
- 6) 岡村定矩(1999), "銀河系と銀河宇宙", 東京大学出版会。(画像: ハッブル定数の変遷)
- 7) 赤尾英行(1992), "星の進化", New Cosmos Series 5, 培風館。(画像: セファイド型変光星の周期・光度関係)
- 8) 佐藤晴彦 監修(1999), "最新宇宙論と天文学を求む本", PHP文庫。
- 9) 須藤博(1993), "ダークマターと銀河宇宙", バリシティ物理学コースクローズアップ, 丸善株式会社。(画像: 宇宙マイクロ波背景放射のスベクトル)
- 10) 佐藤晴彦 監修(2001), "宇宙はわれわれの宇宙だけではなかった", PHP文庫。
- 11) 吉井謙(2006), "論争する宇宙", 集英社新書。(画像: 銀河のナンバークラウド)
- 12) Ullmoehner, P. (2003, 2006), "Intelligent Life in the Universe", Springer-Verlag Berlin Heidelberg。(須藤晴博 中塚一郎・荒深進・杉村真佳・東悠平 訳, "宇宙生物学入門-惑星・生命・文明の起源-", シュプリンガー・ジャパン)
- 13) 佐々木真哉(2017), "「惑星」の話~「惑星形成論」への招待~, 工芸社。(画像: 太陽系の形成モデル)
- 14) 東京工業大学井田研究室HP (http://www.geo.titech.ac.jp/lab/ida/ida.html)。(画像: 月形成シミュレーション)
- 15) 白尾元正(2006), "月のきぼん", 誠文堂新光社。(画像: 月形成過程のシミュレーション)
- 16) 佐藤晴彦 監修(2005), "大宇宙・七つの不思議", PHP文庫。
- 17) NASA HP (画像: COBE衛星, COBEによる宇宙マイクロ波背景放射の全天図, SN1994D, WMAP, WMAPによる宇宙マイクロ波背景放射)
- 18) 国立天文台HP (http://www.nao.ac.jp)。(画像: すばるによるぎよしゃ座AB星, ALMAによるHL Tau星)
- 19) Wikipedia (画像: アインシュタイン, ルーメットル, 金星の太陽面通過, フレッド・ホイール, ジョージ・ガモフ, アーノ・ペンジヤス, 熱水噴出孔, アレシボ天文台, アレシボ=メッセージ, バイオニアの金属板)

36