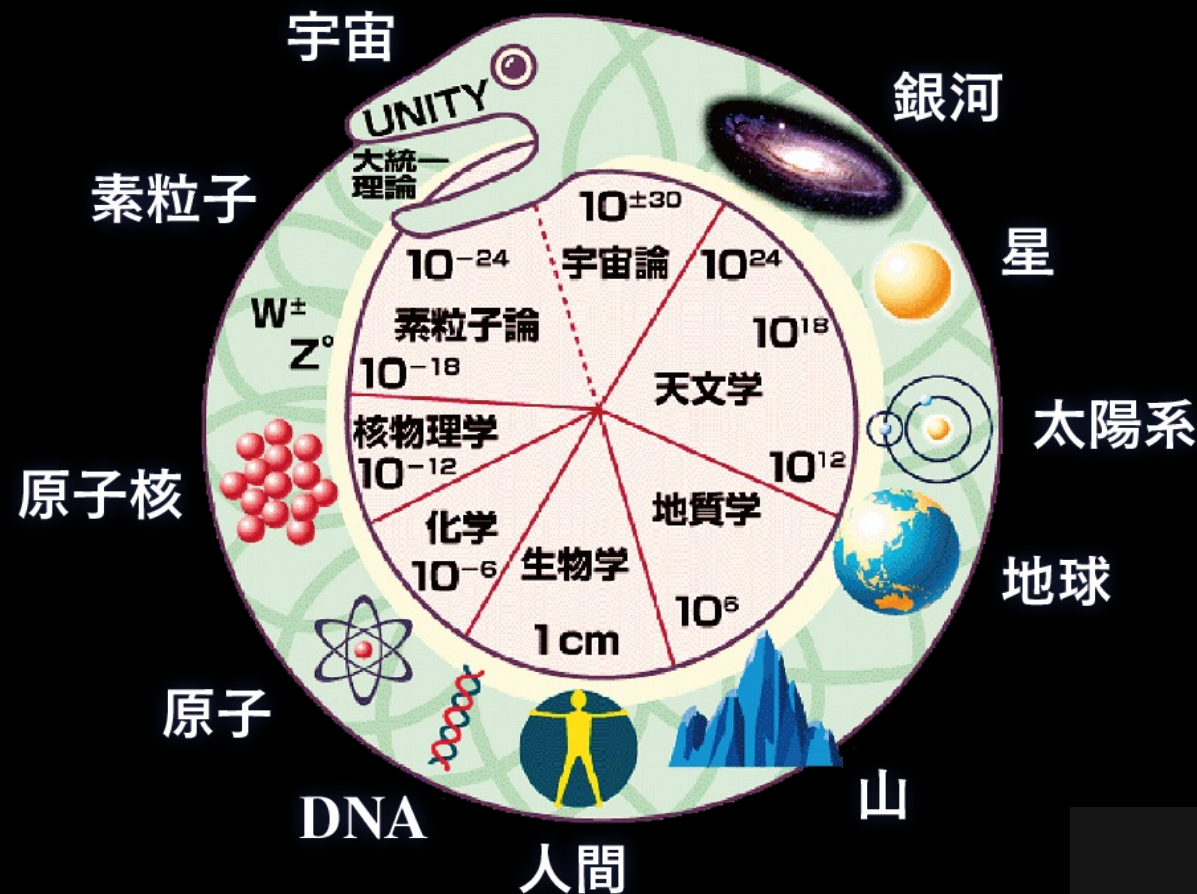
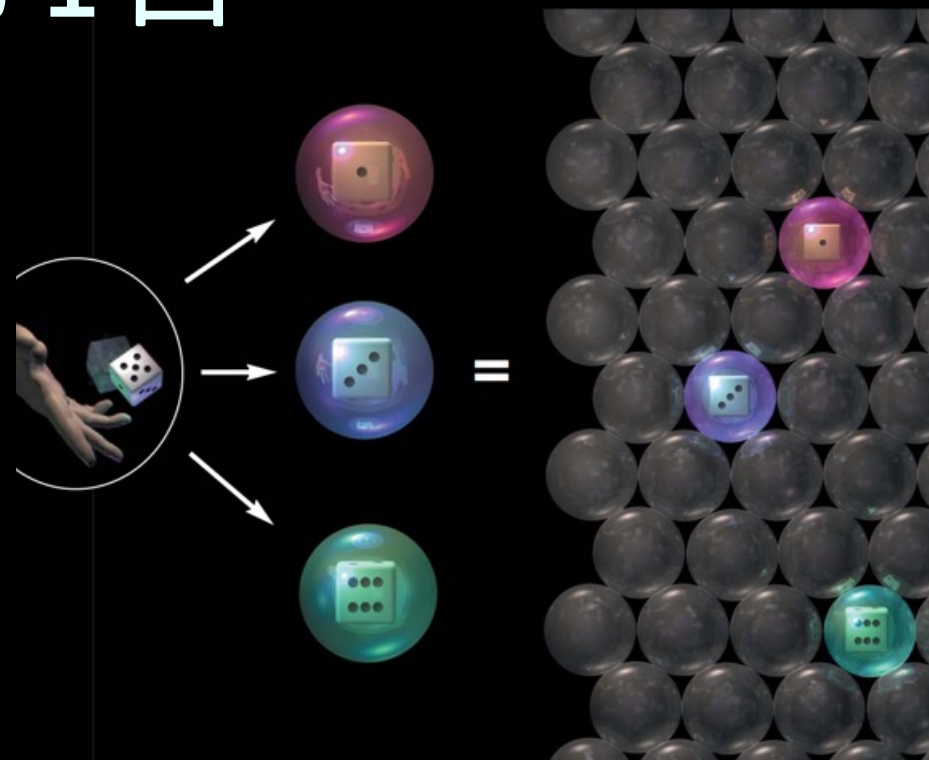


# 宇宙における偶然と必然

## 第1回



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

早稲田大学オープンカレッジ 八丁堀校 @ 2024年1月27日 13:10-16:35

# 第1回（2024年1月27日）

## 物理学的進化の必然と歴史における偶然の役割

1. 138億年の宇宙史における必然と偶然
2. 天体の進化と元素の起源
3. 宇宙の元素循環と生命の原材料
4. 惑星系の普遍性と多様性
5. 地球外生命探査
6. まとめ

# 1 138億年の宇宙史における 必然と偶然

# 現代科学に残された3つの究極の謎

## ■ 宇宙の起源

- 宇宙はなぜ誕生したのか
- 宇宙は我々の宇宙だけなのか
- あるいはそれ以外にも多様な宇宙が存在するのか

## ■ 生命の起源

- 生命はなぜ誕生したのか
- 地球外にも生命は普遍的に存在するのか
- もしそうなら生命はいかなる多様性を持つのか

## ■ 意識（知性）の起源

- 意識はなぜ誕生したのか
- 生命は必然的に意識をもつ方向に進化するのか
- 地球外に知的文明は存在するのか

# 現代科学に残された3つの究極の謎

## ■ 宇宙の起源

個人的見解(≠正解)

- 宇宙はなぜ誕生したのか → わからない
- 宇宙は我々の宇宙だけなのか → おそらくノー
- あるいはそれ以外にも多様な宇宙が存在するのか → おそらくイエス

## ■ 生命の起源

- 生命はなぜ誕生したのか → わからない
- 地球外にも生命は普遍的に存在するのか → イエス
- もしそうなら生命はいかなる多様性を持つのか → わからない

## ■ 意識（知性）の起源

- 意識はなぜ誕生したのか → わからない
- 生命は必然的に意識をもつ方向に進化するのか → イエス
- 地球外に知的文明は存在するのか → イエス

# 必然と偶然の狭間

- 私が必然だと信じていること（必然的帰結）
  - 誕生した宇宙は物理法則に支配されて進化する
  - 宇宙は多様な元素と分子を合成し、やがて生命をうみだす
  - 誕生した生物は進化しやがて知性（意識）をもつ
- 私には必然だと思えないこと（一回しか起こらない事象であるため、偶然に大きく左右されるはず）
  - この宇宙の誕生
  - この宇宙を支配する物理法則の存在とその特徴
  - この地球における生命の誕生
  - この地球における知的生命体の存在

## ■ 普通名詞と固有名詞は違う

- 「宇宙」と「この宇宙」
- 「惑星」と「この地球」

# 宇宙・物質史（物理法則による必然的帰結）

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
0	138億年前	宇宙の誕生
$\sim 10^{-36}$ 秒	138億年前	宇宙の指数関数的膨張（インフレーション）と、それにとまなう宇宙の熱化（ビッグバン宇宙）
$10^{-6}$ 秒	138億年前	陽子と反陽子の対消滅
1秒	138億年前	電子と陽電子の対消滅
3分	138億年前	ヘリウムの合成（ビッグバン軽元素合成）
38万年	138億年前	宇宙の中性化（陽子と電子が結合して荷電中性の水素原子になる）、宇宙の晴れ上がり
$\sim 4$ 億年?	$\sim 134$ 億年前?	最初の星の誕生、それ以降で星の中心で重元素が合成され、最期に空間にばら撒かれる（元素循環）
10億年	128億年前	知られている最古の銀河、中性化した宇宙が再び電離
70億年	168億年前	ダークエネルギーが宇宙を支配し、それ以降、宇宙膨張が減速から加速に転ずる

# 地球・生命史（偶然に強く左右されている）

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
82億年	46億年前	地球および月の誕生
96億年	42億年前	海の形成
98億年	40億年前	原始生命（プロゲノート）の誕生
100億年	38億年前	最古の光合成の痕跡？
115億年？	23億年前？	全球凍結
117億年	21億年前	大気中酸素の急激な増加
122億年	6億年前	カンブリア紀大爆発（生物種の爆発的多様化）
134億年	2.5億年前	生物大量絶滅（P/T境界事件：ペルム紀－三畳紀）
136億年	2.3億年前	恐竜の出現
137億年	6500万年前	恐竜絶滅（K/T境界事件：白亜紀－第三紀）
138億年	20万年前	新人型ホモサピエンスの出現



# 生命と宇宙の誕生・進化における必然と偶然

- 生命の誕生と進化を議論する場合、必然と偶性（物理法則と初期条件あるいは外的環境と言い換えても良い）はある程度区別して考えることができる

↑  
必然

偶然  
↓

- 星内部での元素合成と超新星爆発による元素循環
- それを材料とし化学進化から生命の材料物質が生成
- これらから（具体的な過程は不明だが）生命が誕生
  - 深海熱水噴出孔？地球外宇宙塵上？
- 自然淘汰・適者生存
  - 地球の存在、小天体大衝突、気候変動
- 宇宙の進化は完全に必然的だが、その誕生においては、何が偶然で何が必然か、分離することは困難
  - 初期条件と物理法則の区別が困難：宇宙が先か、法則が先か？

# 必然：宇宙は法則にしたがっている

- 宇宙には物理法則がある
  - 物理法則に矛盾する現象は（知られてい）ない
- 物理法則は数学（微分方程式）を用いて書き下せる
  - その微分方程式は、宇宙の現象を近似するのか、あるいは厳密に記述し尽くせるのかはわかっていない
  - しかし、その方程式を解いて得られる数学的な解が、以前知られていなかった新たな現象を正確に予言してきたことは事実
- なぜ宇宙の法則は数学で書かれている（ように見える）のか
  - ⇒ 「物理法則とは宇宙の幾何学的性質を数式で表現したものである」
- 法則に従うのが必然だが、なぜその形の法則なのかは偶然？

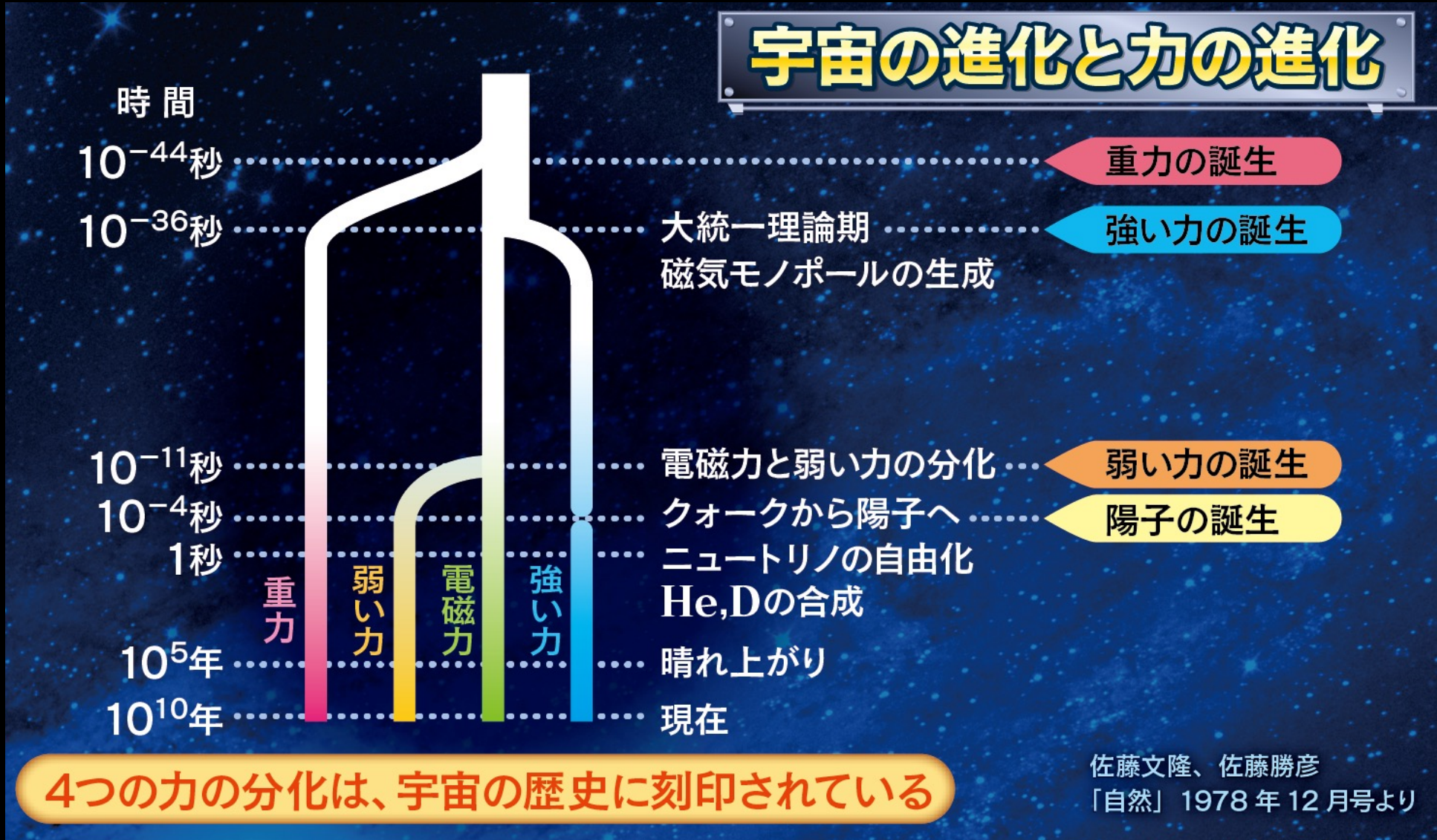


## 2 天体の進化と元素の起源

# 138億年の宇宙の進化史

- **t~3分: ビッグバン元素合成**
  - 陽子と中性子からヘリウムの原子核が合成される
- **t=38万年: 宇宙の中性化**
  - 陽子と電子が結合して荷電中性の水素原子になる
  - その当時の光が現在観測されている宇宙マイクロ波背景放射
- **t=数億年: 第一世代天体（ファーストスター）の誕生**
  - 誕生した星の中心で重元素が合成され、それらが星の進化とともに宇宙空間に撒き散らされる。この過程を何度も繰り返すことで、宇宙に元素が蓄積される（宇宙の元素循環）
- **t=138億年: 惑星・恒星・銀河からなる宇宙の階層構造**

# 宇宙史における4つの相互作用の分化



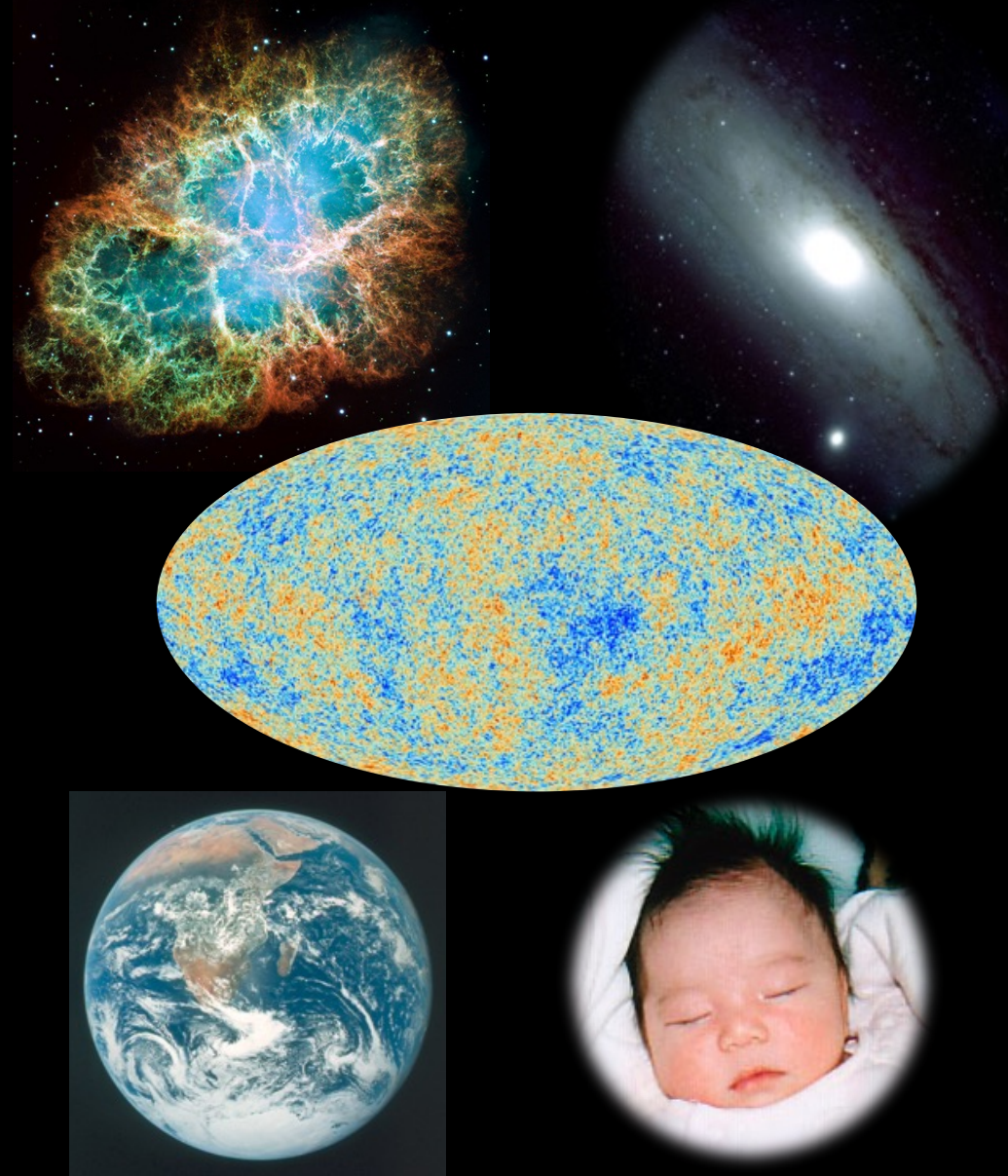
# 宇宙は物理法則にしたがって進化する

物理法則



高温高密度(ビッグバン)

ミクロの世界とマクロの世界をつなぐ



# 自然界の4つの力と宇宙の元素合成

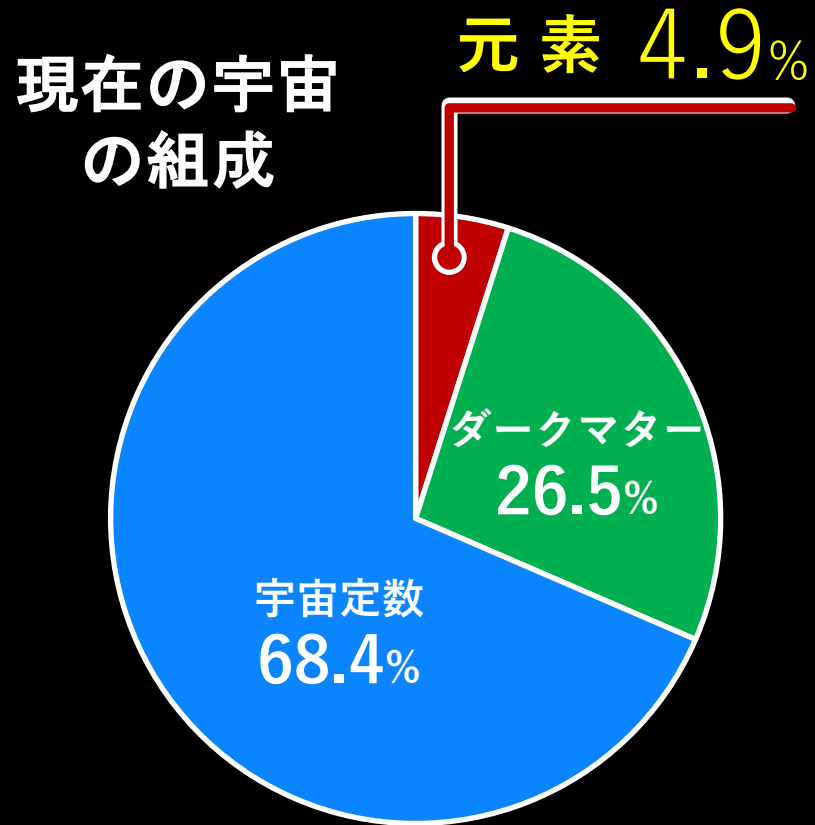
## ■ 宇宙初期は極めて高温かつ高密度（ビッグバン）

- 1000億度以上の高エネルギー状態では、陽子と中性子はばらばらのままで元素（原子核）を合成できない
- 宇宙の温度が一億度以下になると、陽子2個と中性子2個からなるヘリウムの原子核が合成される（宇宙誕生最初の3分間）
- それから数億年後以降、星の中心部での原子核反応の結果、徐々に重い元素が形成され、星の最期に宇宙空間に撒き散らされる（元素循環）

## ■ 元素合成過程の本質は基礎物理学

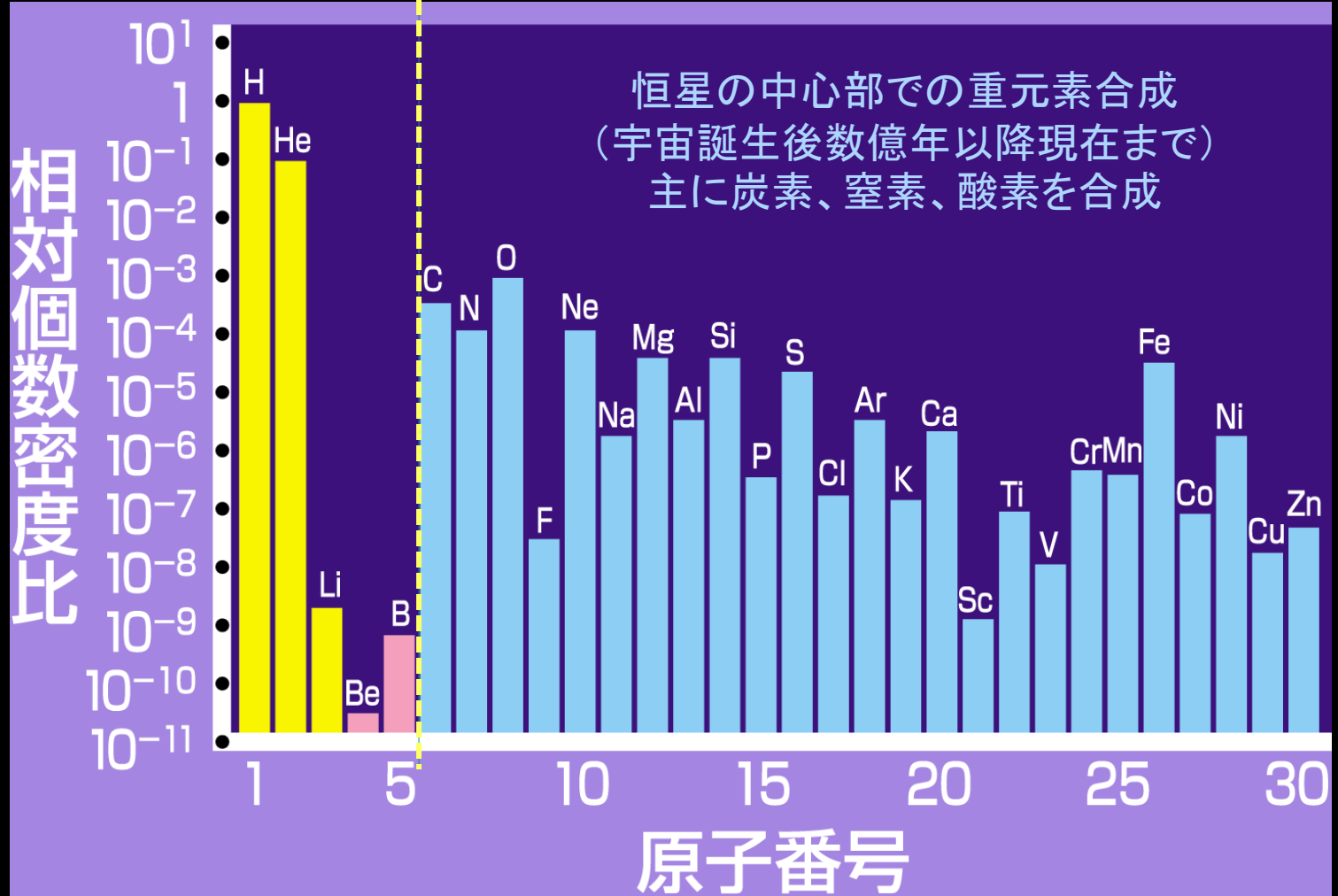
- 陽子と中性子間の引力：強い力
  - 陽子同士の反発力：電磁気力
  - 中性子と陽子の相互変換：弱い力
  - 重元素が合成される場所は大質量星の中心部：重力
- 自然界の4つの力がすべて関与  
⇒ 宇宙の元素合成と元素循環は  
物理法則による必然的帰結

# 宇宙の組成と元素の組成



宇宙の力学進化は、主成分である宇宙定数(ダークエネルギー)とダークマターで決まる。一方、その中の天体(そして生命)の性質と多様性は残りわずか5%の元素が決める

ビッグバン元素合成  
(宇宙誕生後約3分間)  
主にヘリウムを合成

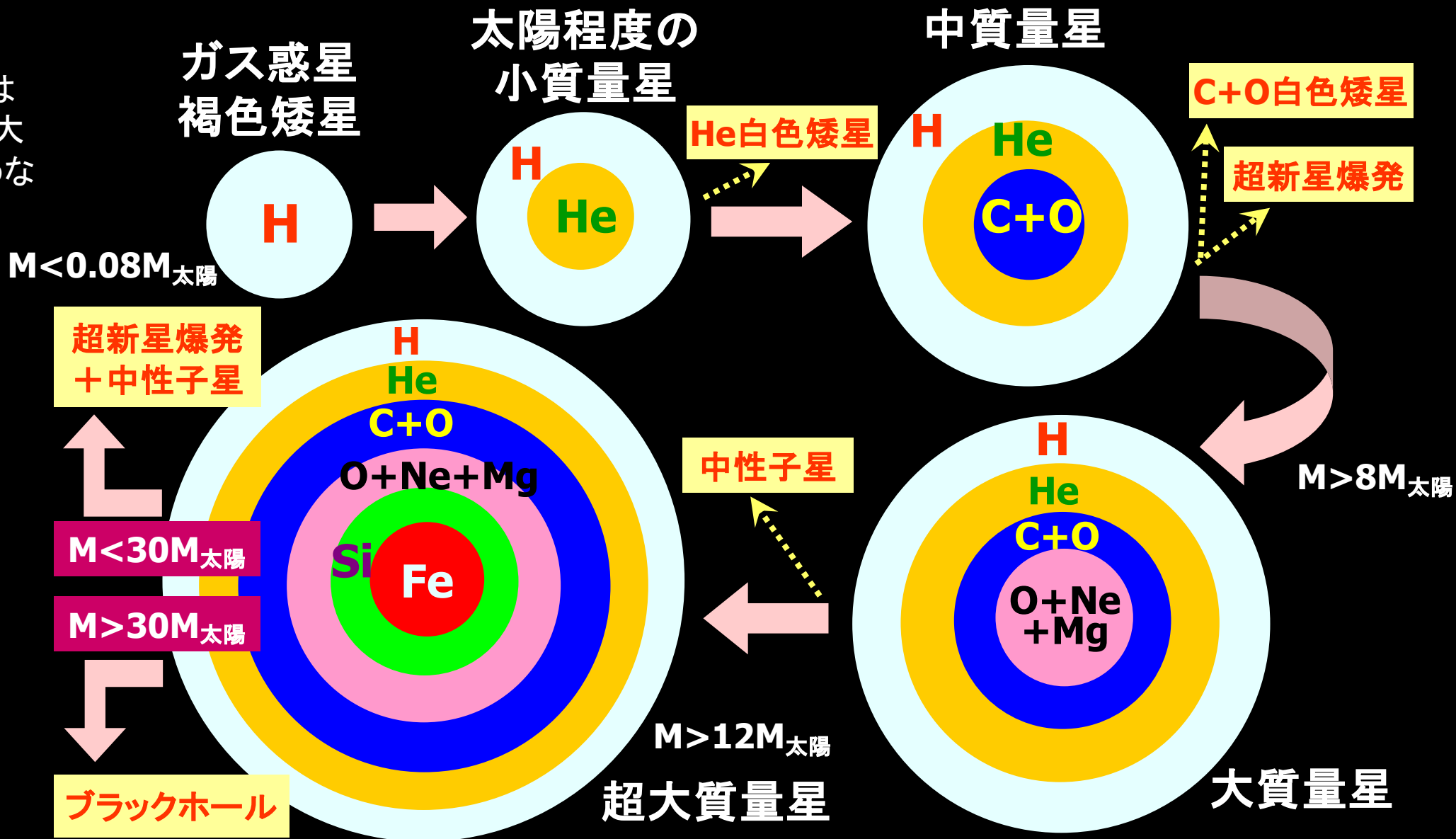




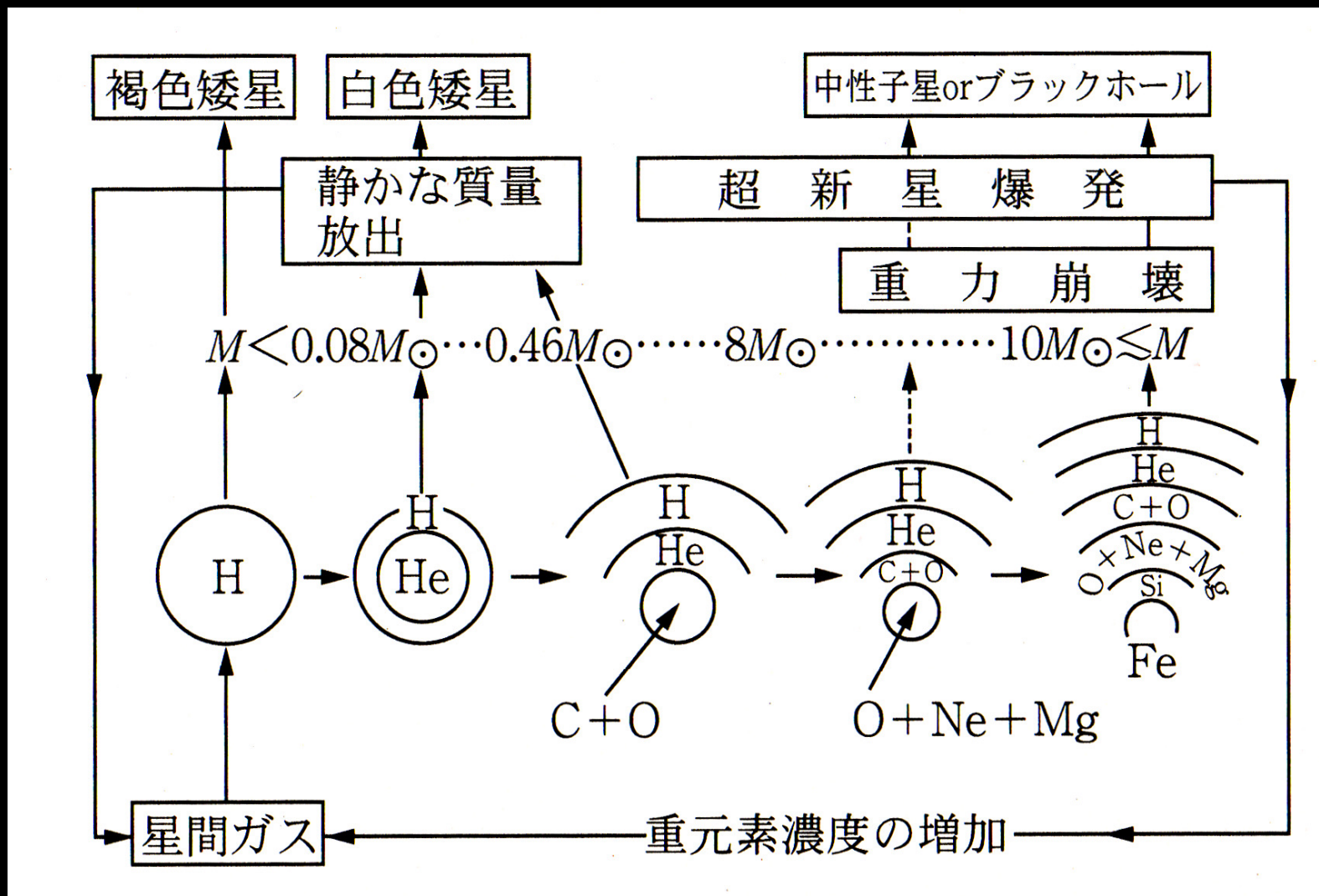
# 3 宇宙の元素循環と生命の原材料

# 質量が異なる星の一生と元素合成

時間進化ではなく、質量が大きくなるとどうなるかを示す



# 星の進化 = 元素合成 + 元素放出 + 元素のリサイクル



# 惑星状星雲：静かな質量放出

- 赤色巨星の最期に放出されたガスが中心の白色矮星からの紫外線をうけて輝く



**Helix Nebula**

ハッブル宇宙望遠鏡の画像

<http://hubblesite.org/newscenter/archive/releases/nebula/planetary/2004/32/>

# 超新星爆発：瞬間的質量放出

- 太陽の8倍以上の質量の星の終末
- 重元素を合成し宇宙空間に撒き散らすとともに、その中心部に中性子星を形成する



## かに星雲

**1054年に起こった  
超新星爆発の残骸**  
X線、可視光、赤外線  
データを合成した画像

# ヒトを構成する元素は、太陽ではないどこかの星でかつて生まれ宇宙を旅してきたもの

太陽	%	海水	%	ヒト	%
水素	70.7	酸素	85.8	酸素	65
ヘリウム	27.4	水素	10.8	炭素	18
酸素	0.96	塩素	1.9	水素	10
炭素	0.31	ナトリウム	1.1	窒素	3
ネオン	0.17	マグネシウム	0.13	カルシウム	1.5
鉄	0.14	硫黄	0.09	リン	1.0
窒素	0.11	カルシウム	0.04	イオウ	0.25
ケイ素	0.07	カリウム	0.04	カリウム	0.20
マグネシウム	0.07	臭素	0.007	塩素	0.15
イオウ	0.04	炭素	0.003	ナトリウム	0.15

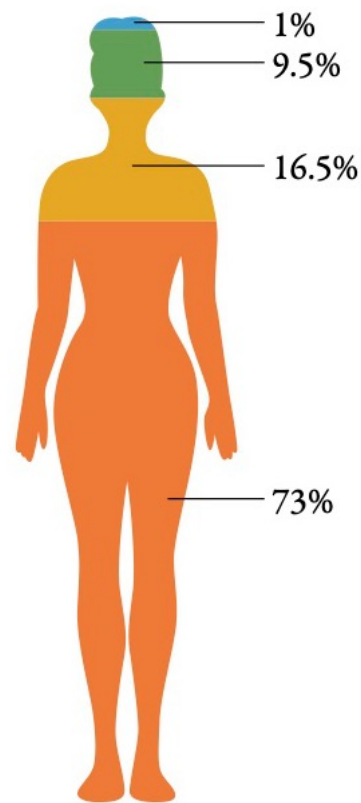
- ヒトの質量の約6割は水
  - 生命における水の重要性
  - 水を構成する水素と酸素は宇宙に大量に存在する元素
- 生命は有機化合物からなる
  - 炭素原子は4つの結合手を持ち、多様かつ安定な分子を形成できる
  - 炭素もまた、宇宙に大量に存在する元素の一つ
- 星の中心部で形成された酸素や炭素、窒素が、我々の体の主な原材料

太陽、海水、およびヒトを構成する元素の質量組成

# 宇宙 ⇒ 星 ⇒ 元素 ⇒ 人間 (=星の子供)

H 水素																	He ヘリウム		
Li リチウム	Be ベリリウム															Ne ネオン			
Na ナトリウム	Mg マグネシウム															Ar アルゴン			
K カリウム	Ca カルシウム	Sc スカンジウム	Ti チタン	V バナジウム	Cr クロム	Mn マンガン	Fe 鉄	Co コバルト								Kr クリプトン			
Rb ルビジウム	Sr ストロンチウム	Y イットリウム	Zr ジルコニウム	Nb ニッケル	Mo モリブデン	Tc テクネチウム	Ru ルルチウム	Rh ロジウム								Xe キセノン			
Cs セシウム	Ba バリウム	ランタノイド	Hf ハフニウム	Ta タンタル	W タングステン	Re レニウム	Os オスミウム	Ir イリジウム								Rn ラドン			
Fr フランシウム	Ra ラジウム	アクチノイド																	
ランタノイド		La ランタン	Ce セリウム	Pr プラセオジム	Nd ネオジム	Pm プロメチウム	Sm サマリウム	Eu ユウロピウム											
アクチノイド		Ac アクチニウム	Th トリウム	Pa プロトアクチニウム	U ウラン														

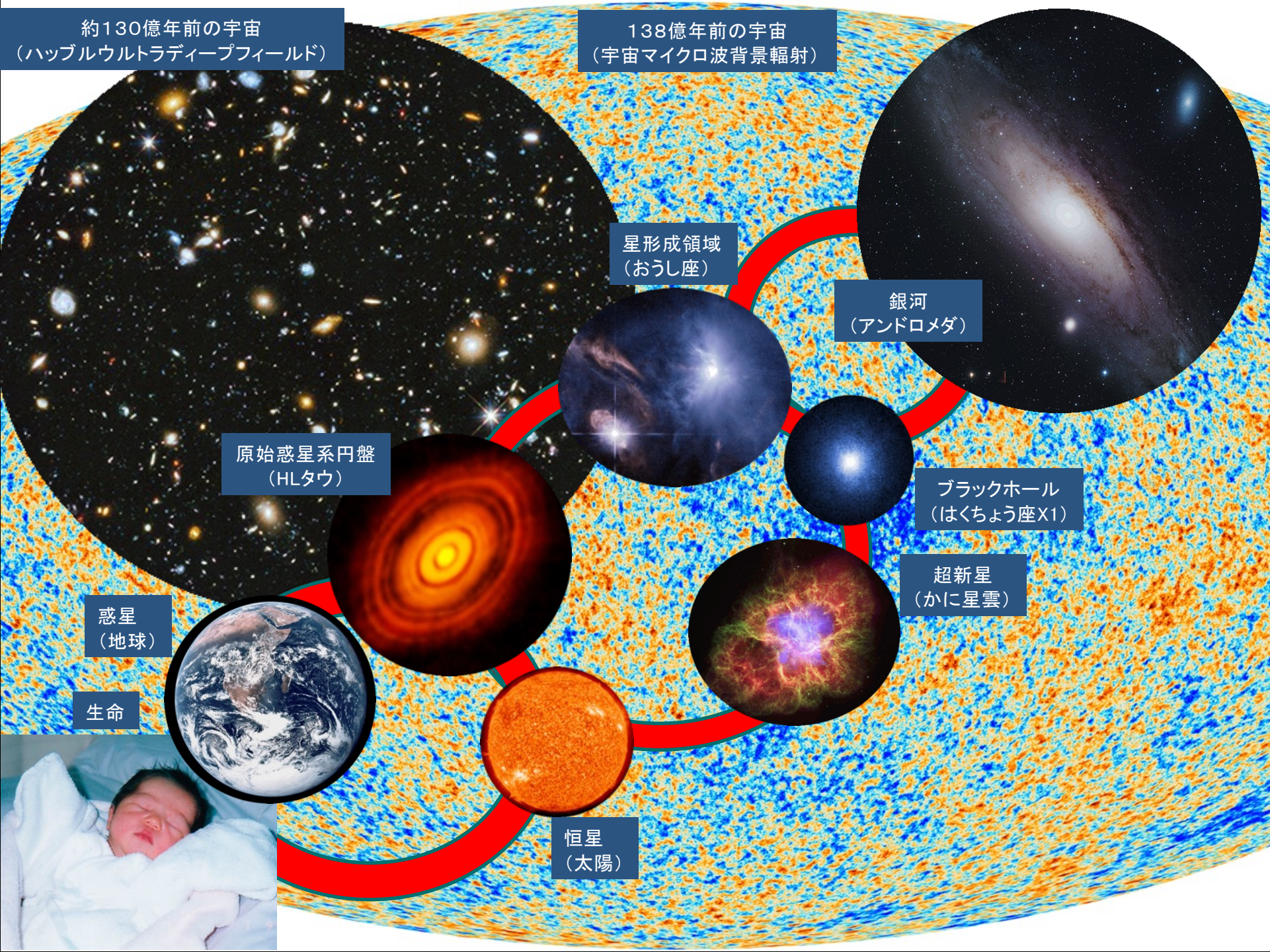
- ビッグバン  
元素合成
- 低質量星の  
質量放出
- 大質量星の  
超新星爆発
- 宇宙線  
破碎反応
- 中性子連星  
合体
- 白色矮星の  
超新星爆発



										He ヘリウム
					B ホウ素	C 炭素	N 窒素	O 酸素	F フッ素	Ne ネオン
					Al アルミニウム	Si ケイ素	P リン	S 硫黄	Cl 塩素	Ar アルゴン
Ni ニッケル	Cu 銅	Zn 亜鉛	Ga ガリウム	Ge ゲルマニウム	As ヒ素	Se セレン	Br 臭素	Kr クリプトン		
Pd パラジウム	Ag 銀	Cd カドミウム	In インジウム	Sn スズ	Sb アンチモン	Te テルル	I ヨウ素	Xe キセノン		
Pt 白金	Au 金	Hg 水銀	Tl タラウム	Pb 鉛	Bi ビスマス	Po ポロニウム	At アスタチン	Rn ラドン		
Gd ガドリウム	Tb テルビウム	Dy ジスプロシウム	Ho ホルミウム	Er エルビウム	Tm ツリウム	Yb イタリビウム	Lu ルテチウム			

我々のDNA中の窒素、歯をつくるカルシウム、血液中の鉄、アップルパイに含まれる炭素。これはすべて星の内部で合成された。つまり我々は星の成分からできているのだ。  
カール・セーガン『コスモス』

138億年の宇宙史における天体の進化

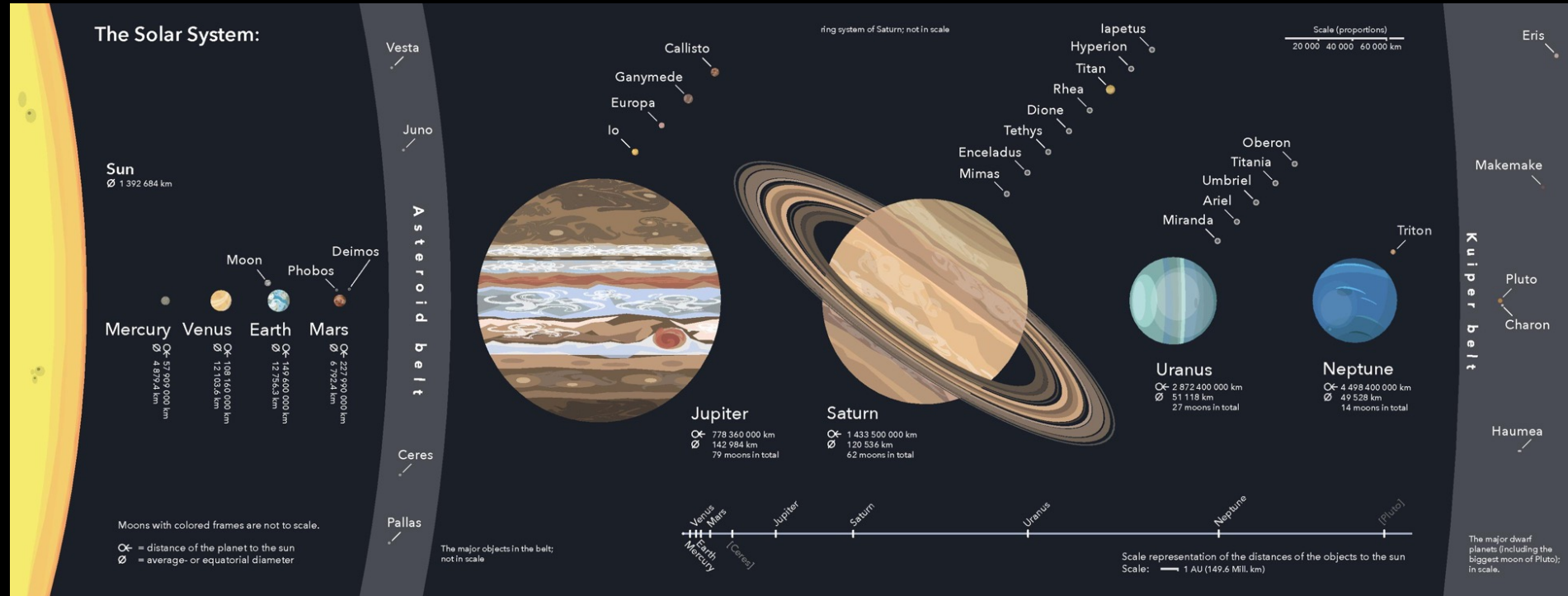


宇宙の元素循環と生命の誕生・進化



# 4 惑星系の普遍性と多様性

# 太陽系は必然か偶然か



[https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_System](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_System)

## ■ 太陽系は平凡なのか、それとも例外なのか？

- ほぼ同一平面上で円軌道をする8つの惑星
- 内側に岩石惑星、外側に巨大ガス惑星
- 力学的に極めて安定（少なくとも100億年程度は安定）
- 生命、しかも知的生命体、を宿す惑星（地球）をもつ

そもそも太陽系以外に惑星系が存在するかどうかすら、1995年以前にはわかっていなかった

# 太陽系以外に惑星は存在しない(1991)？

## Multiplicity among solar type stars in the solar neighbourhood. I. CORAVEL radial velocity observations of 291 stars\*

A. Duquennoy<sup>1</sup>, M. Mayor<sup>1</sup> and J.-L. Halbwachs<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Observatoire de Genève, 51 chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

<sup>2</sup> Observatoire de Strasbourg, URA 1280, 11 rue de l'Université, F67000 Strasbourg, France

Received October 3; accepted November 15, 1990

Duquennoy, Mayor & Halbwachs  
Astronomy & Astrophysics  
Supplement  
88 (1991) 281-324

1977年から13年間モニターし続けて発見なし

## Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood\*

### II. Distribution of the orbital elements in an unbiased sample

A. Duquennoy and M. Mayor

Geneva Observatory, 51 chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

Received December 4, 1990; accepted January 30, 1991

Duquennoy & Mayor  
Astronomy & Astrophysics  
248 (1991) 485-524

Finally, we ask the question if orbits of companions in the mass range  $0.001-0.010 M_{\odot}$  can be found around G-dwarf primaries, and if yes, whether their eccentricities are different from zero. The latter could be information about their formation process and could become a test to distinguish if we deal with stars (or brown dwarfs) or real extra solar system planets.

# 「我々は何も知らなかった」ホットジュピターの発見 (1995)

## A Jupiter-mass companion to a solar-type star

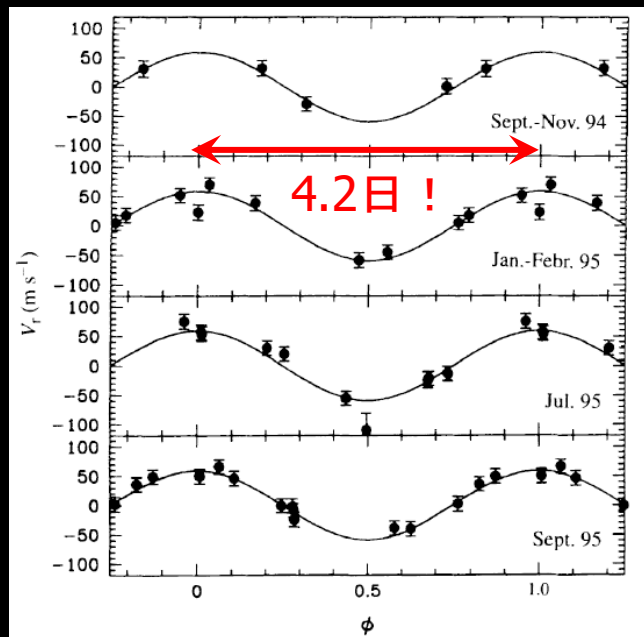
Michel Mayor & Didier Queloz

Nature 378(1995)355

Geneva Observatory, 51. Chemin des Maillettes, CH-1290 Sauverny, Switzerland

The presence of a Jupiter-mass companion to the star 51 Pegasi is inferred from observations of periodic variations in the star's radial velocity. The companion lies only about eight million kilometres from the star, which would be well inside the orbit of Mercury in our Solar System. This object might be a gas-giant planet that has migrated to this location through orbital evolution, or from the radiative stripping of a brown dwarf.

(太陽に似た恒星の周りの) 系外惑星の初発見：51Peg b  
4.2日というとんでもない短周期で公転していた！ (ホットジュピター)



2019年ノーベル物理学賞受賞  
ディディエ・ケローとミシェル・マイヨール

# 太陽系から太陽系外惑星系へ

## ■ 太陽系外惑星系の発見(1995年)

- すでに5000個を超える惑星（4000個近い惑星系）が発見済み
- 太陽と似た恒星の7割以上が惑星（2割以上は複数の惑星）を持つと推定される
- 惑星系の存在自体は普遍的で、物理法則の自然な帰結

## ■ 系外惑星系の性質は多様性に富んでいる

- 恒星の回りをわずか数日で公転する巨大ガス惑星（ホットジュピター）
- 大きく歪んだ楕円軌道を運動する惑星（エキセントリックプラネット）
- 水が液体として存在できる温度の岩石惑星（ハビタブル惑星）

## ■ 普遍性と多様性の起源と進化⇒物理学

## ■ この地球以外に生命が存在するか？⇒宇宙生物学

# 宇宙は見えない「地球」で満ちているはず

- 原理的に観測可能な宇宙の範囲には $10^{22}$ 個の恒星がある
  - その1%程度は、もし海があれば液体として存在できる温度の惑星（ハビタブル惑星）を持つと予想されている
- 宇宙内のハビタブル惑星の総数は $10^{20}$ 個
  - とはいえ、これらに生命が存在する保証は全くない
  - そもそも生命が誕生するための必要条件も十分条件も知られていない（適度な割合の海と陸＋数多くの偶然？）
  - これほど膨大な数の惑星がある以上、この地球だけに生命がある考えるのはかなり不自然(傲慢)では？
- しかし、存在する ≠ 観測可能
  - どうやれば、地球以外の生命の存在（普遍性）を検証できるか

# 5 地球外生命探查

# 宇宙において生命は普遍的に存在するか

- 自然法則に支配された宇宙の必然的進化
  - 標準ビッグバン宇宙論の成功
  - 宇宙膨張、元素合成、宇宙マイクロ波背景輻射、宇宙の階層構造、など、あらゆる観測事実と無矛盾
- 天体の形成・進化 = 宇宙の元素合成・循環史
  - 天体の中心部で合成された元素が宇宙全体に放出され、次世代の天体の原材料として輪廻転生を繰り返す
- 宇宙進化史 = 生命進化史？
  - このような宇宙では生命もやはり必然的に生まれる？
  - 哲学的な議論にとどまらず、直接検証可能な時代に！



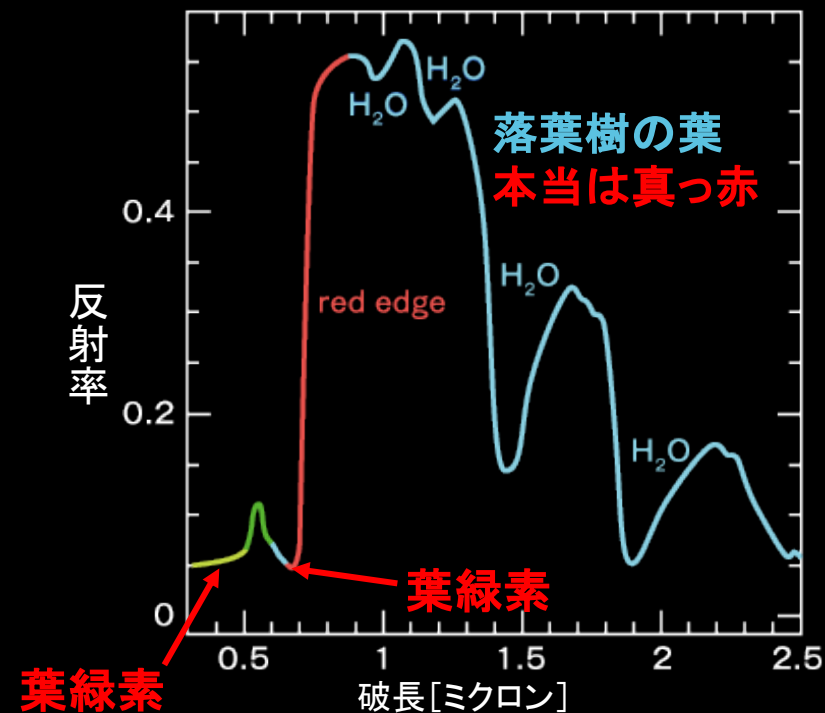
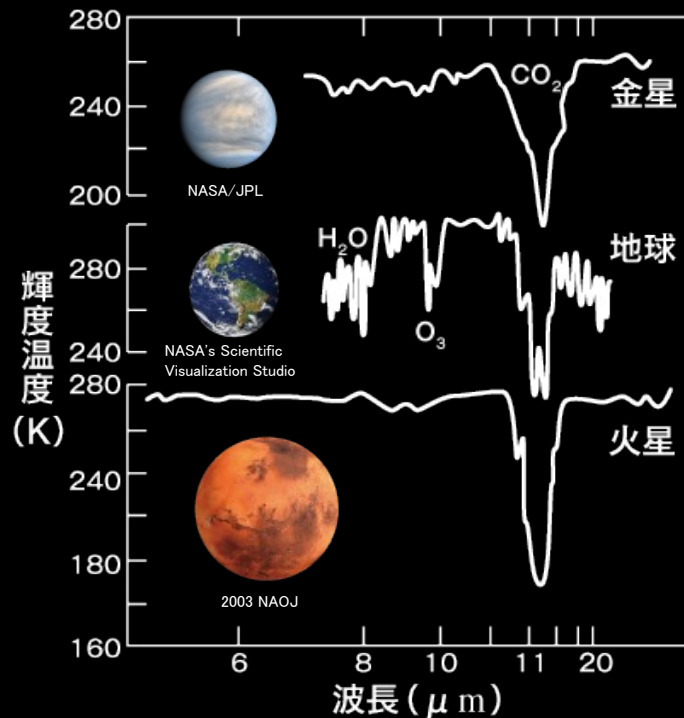
# 宇宙における生命探査

- 30年前まではSFでしかなかった
  - 一般人が強い興味をもつ一方、研究者は冷たかった
- 今や、天文学の最先端課題だとみなされている
  - サンプルリターン（太陽系内天体に直接探査機を送る）
  - リモートセンシング（遠方の太陽系外惑星を望遠鏡で観測）
  - SETI（地球外知的文明からの電波信号の探索）
- 人類の究極の科学目標であることは言うまでもない
  - ただし少なくとも今後10年から100年は必要
  - 発見できるかはわからないが、もし成功したら科学の大革命

# バイオシグニチャー：生物が存在する兆候

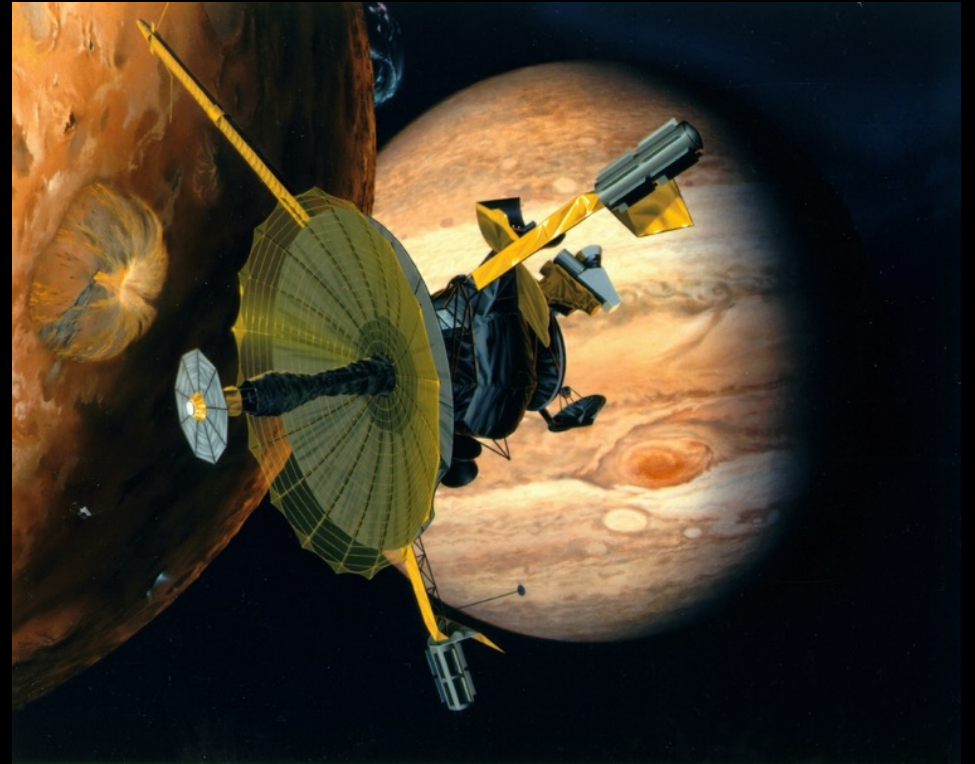
## ■ 地球上生命の指標を地球外に探す

- 生物由来と考えられる大気成分（酸素、オゾン、メタン）
- 植物のレッドエッジ地上の植物のほとんどは700nmより長波長で反射率が急激に増加する



# ガリレオ探査機による地球上の生命探査

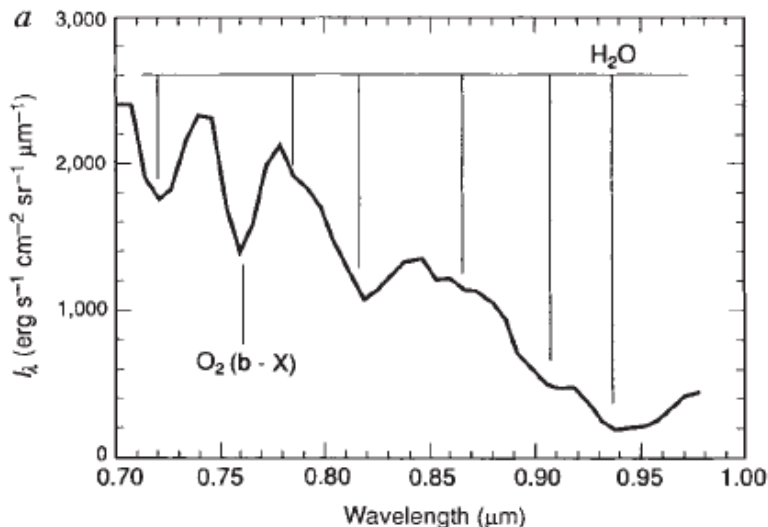
- 1986年5月打ち上げ
- 1990年12月8日一回目の地球スイングバイ時に地球上の“生命探査”
- 地球には生命がいるらしい!
  - 大量の気体酸素
  - 植物のレッドエッジ
  - 熱平衡から極端にずれた大気中のメタンの存在量
  - 狭帯域で振幅が変化する”不自然な”パルス状電波(通信信号)



Sagan, Thompson,  
Carlson, Gurnett & Hord:  
Nature 365(1993)715

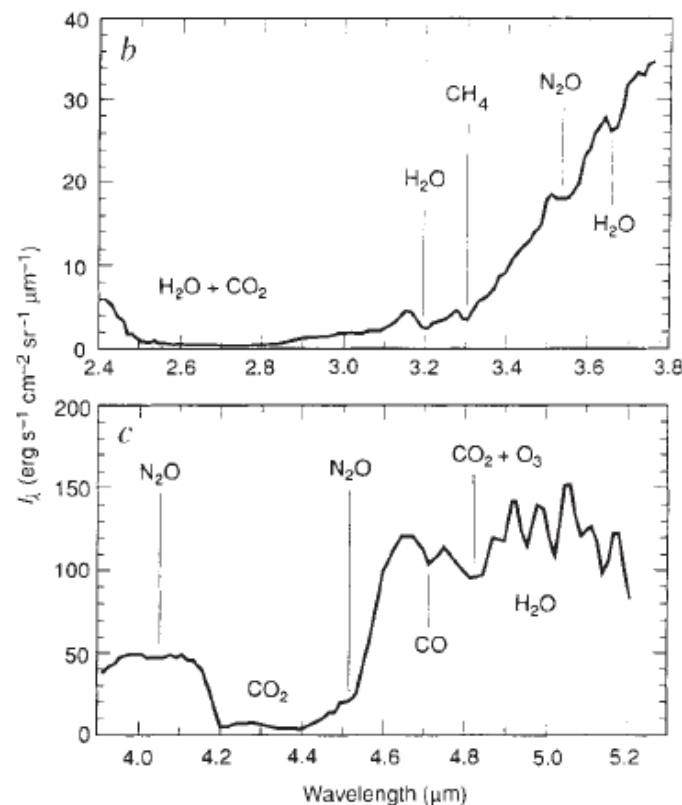
# Sagan et al. (1993): 大気分光

## ガリレオ探査機の観測した地球の可視光-近赤外スペクトル



### 酸素分子の吸収@Aバンド(0.76μm)

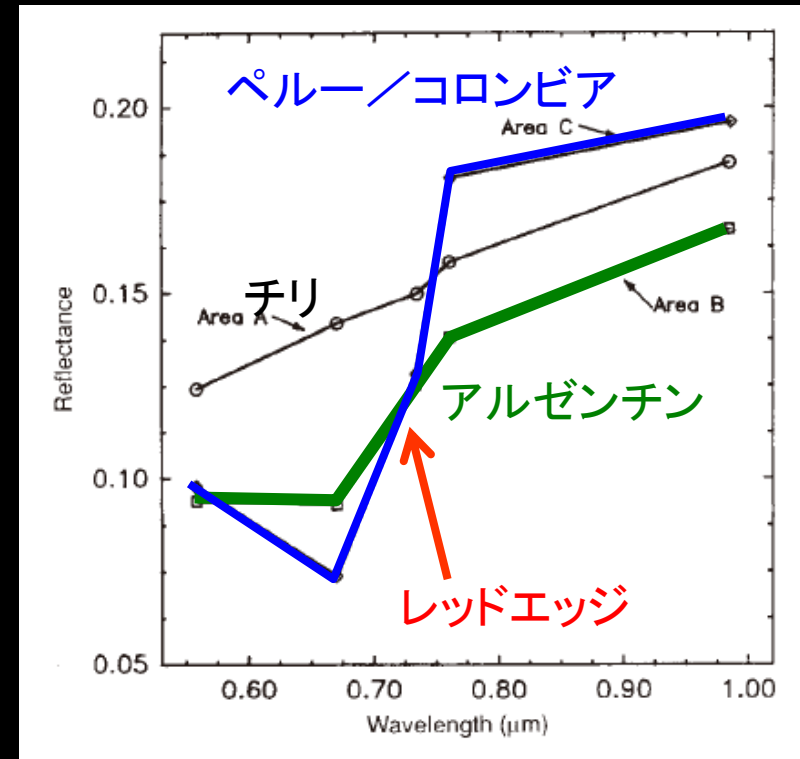
FIG. 1 a, Galileo long-wavelength-visible and near-infrared spectra of the Earth over a relatively cloud-free region of the Pacific Ocean, north of Borneo. The incidence and emission angles are  $77^\circ$  and  $57^\circ$  respectively. The  $(b' \Sigma_g^+ \rightarrow X^3 \Sigma_g^-)$  0-0 band of  $O_2$  at  $0.76 \mu\text{m}$  is evident, along with a number of  $H_2O$  features. Using several cloud-free regions of varying airmass, we estimate an  $O_2$  vertical column density of  $1.5 \text{ km-atmag} \pm 25\%$ . b and c, Infrared spectra of the Earth in the  $2.4\text{--}5.2 \mu\text{m}$  region. The strong  $\nu_3$   $CO_2$  band is seen at the  $4.3 \mu\text{m}$ , and water vapour bands are found, but not indicated, in the  $3.0 \mu\text{m}$  region. The  $\nu_3$  band of nitrous oxide,  $N_2O$ , is apparent at the edge of the  $CO_2$  band near  $4.5 \mu\text{m}$ , and  $N_2O$  combination bands are also seen near  $4.0 \mu\text{m}$ . The



methane (0010) vibrational transition is evident at  $3.31 \mu\text{m}$ . A crude estimate<sup>10</sup> of the  $CH_4$  and  $N_2O$  column abundances is, for both species, of the order of  $1 \text{ cm-atmag}$  ( $\equiv 1 \text{ cm path at STP}$ ).

# Sagan et al. (1993): 撮像

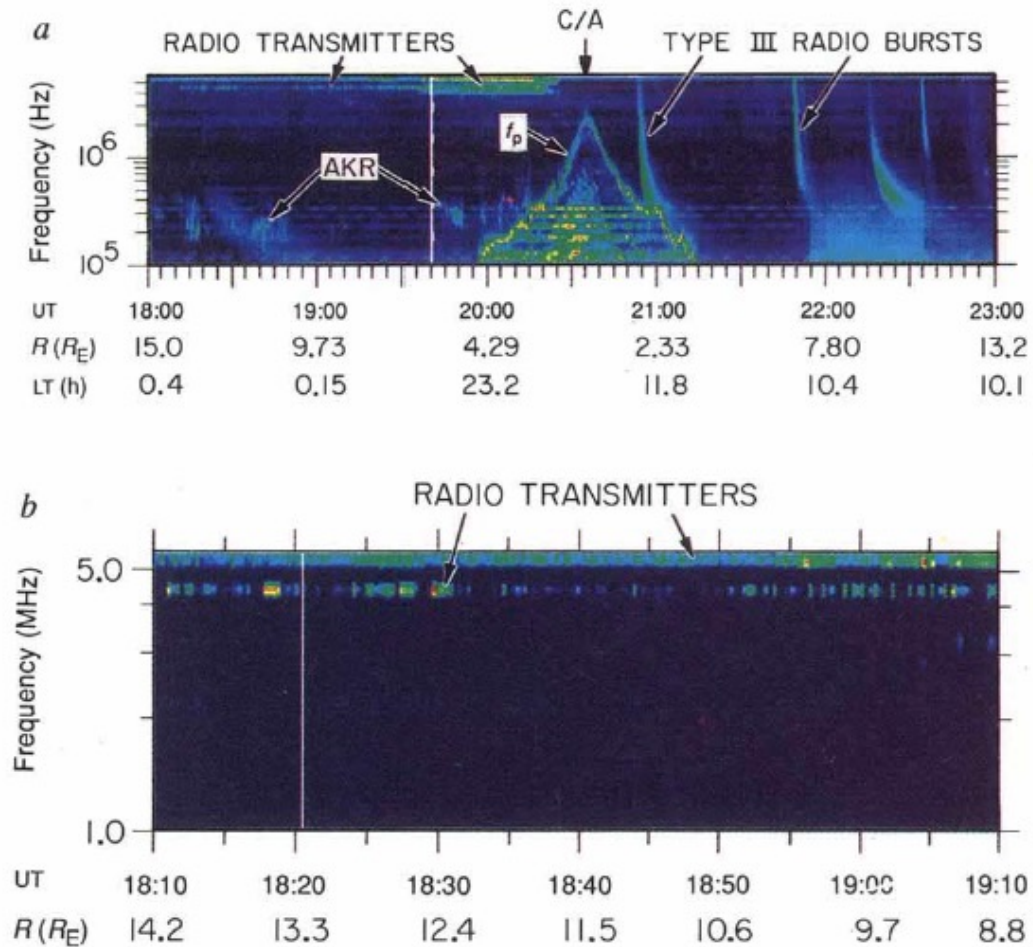
ガリレオ探査機の観測した地球のレッドエッジ



# Sagan et al. (1993): 電波観測

## ガリレオ探査機の観測した地球の電波信号の時系列

FIG. 4 A frequency–time spectrogram of the radio signals detected by the Galileo plasma wave instrument. The intensities are coded in the sequence blue–green–yellow–red, with blue lowest and red highest. Several natural sources of radio emission are shown in *a*, including auroral kilometric radiation (AKR). Modulated emission at  $f > 4$  MHz is shown with an expanded time scale in *b*. Modulated patterns of this type are characteristic of the transmission of information, and would be highly unusual for a naturally occurring radio source. (UT, universal time;  $R$  is distance of Galileo from Earth in units of Earth's radius,  $R_E$ ; LT, local time.)



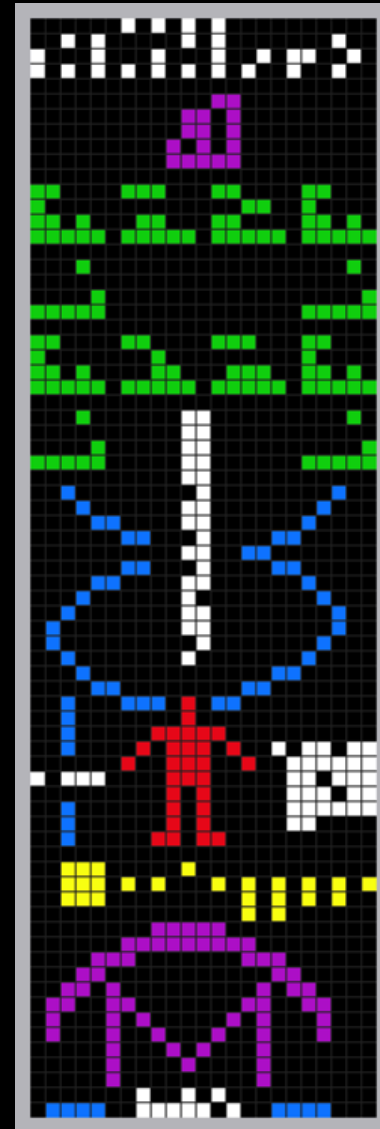
# SETI: Search for Extra-Terrestrial Intelligence

- バイオシグニチャーとして最も決定的なのは知的文明からの電磁波信号
  - 1GHzから20GHzの電波が適している（低周波数側は銀河系のシンクロトロン放射、高周波数側では地球大気が雑音となる）
- オズマ計画 (1960)
  - フランク・ドレイクは、4ヶ月間にわたり毎日6時間、口径26mの電波望遠鏡を、くじら座タウ星とエリダヌス座イプシロン星の方向に向け、中性水素の放射する波長21cm(周波数1.42GHz)帯に、文明の証拠となりうる規則的な電波信号の探査を試みた



# アレシボ・メッセージ

- ドレイクは、1974年11月16日にプエルト・リコにあるアレシボ電波望遠鏡から、約2万5千光年離れた球状星団M13に向けて電波信号を送った
- それを解読して並べたとすれば0と1の信号列が右図のようになる



1から10までの数(2進法)

DNAを構成する水素、炭素、窒素、酸素、リンの原子番号(2進法)

DNAのヌクレオチドに含まれる糖と塩基、計12種の化学式

DNAの二重螺旋

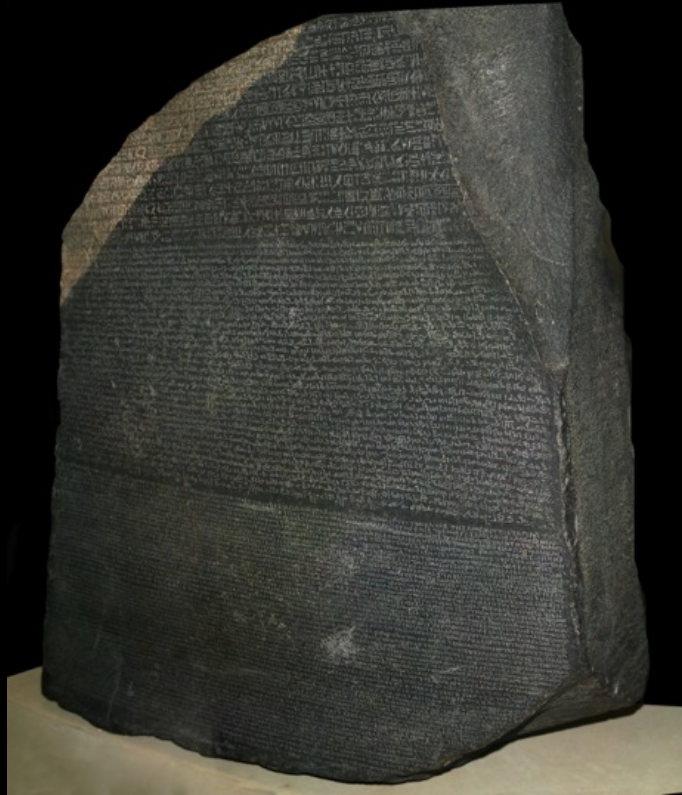
人間

太陽系(左端が太陽で、一行上になっているのが地球)

アレシボ電波望遠鏡



# 天文学的ロゼッタ・ストーンとチューリングテスト



- **明らかな人工信号を受信したとして解読できるか**
  - 地球上の異なる言語が理解できるのは対面して意思疎通できたおかげ
  - ロゼッタストーンなしに古代エジプト文字を解読できたのか？
  - 日本語以外のみで訓練されたAIに、膨大な量の日本語文書を与えたとして、解読できるようになるのか？
  - 原理的にであれ、遠隔で相互理解を可能とする方法論は存在するのか？
- **地球外文明との交信は不可能**
  - もっとも近い地球外文明までの距離であれ（天の川銀河のサイズは数万光年程度）、返信したときには生命や文明が滅亡している可能性が高い
  - 生命同士ではなくAI同士の交信が主流かも（天文学的チューリングテスト）

# 6 まとめ

# 生命の誕生と進化から学ぶ

- 究極的には物理法則から説明できるはず
- しかし、どこかに地球とまったく同じ惑星が存在するとしても、そこでもやはり生命が必然的に誕生するかどうかは自明ではない
  - 何らかの偶然（外的要因）の存在が本質的（?）
  - 地球における生物の進化・多様性を「予言」することは不可能
  - ただしそれらは「ダーウィン進化」によって「あとづけ」的に説明されている
- この進化論的説明を宇宙に応用できないか？

# 宇宙の誕生と進化

- (未完の) 究極理論によって、宇宙の創生と進化は物理学で完全に記述できる？
  - 宇宙の誕生以前に法則は存在したのか？
  - 初期条件もまた法則で決まるのか？
- 宇宙の「誕生」は別としても、「進化」に関する限り物理学的記述は完全に有効
  - ビッグバンモデルに基づく観測的宇宙論の成功
  - 宇宙の進化は偶然的要素がほとんどないからこそ、現在の観測データからその初期条件を再構築できた
  - ただし、宇宙の「進化」(必然的)と生物の「進化」(偶発的)はそもそも意味が全く違うことに注意

# 宇宙物理学発、系外惑星経由、宇宙生物学着の旅

## ■ 太陽系外惑星研究の革命的進歩

- 水が液体として存在し得る地球型惑星
- プロキシマケンタウリ（4光年先）
- 稼働中・計画中の系外惑星探査機がさらなる候補を
- いずれハビタブル惑星の直接撮像・分光が可能となる

## ■ その先には宇宙の生命探査という究極の目標が！

- リモートセンシングによる検出可能性から考えるバイオシグニチャーの同定（酸素、水、オゾン、メタン、植物、核爆発）
- ただし最も確実なのは高度文明からの（電磁波）信号かもしれない

## ■ 本当に受信したときどうするか考慮しておくべき

- ビッグデータから言語を抽出する非学習的アルゴリズムは可能か？

# 宇宙において生命は普遍的に存在するか

- 自然法則に支配された宇宙の必然的進化
  - 標準ビッグバン宇宙論の成功
  - 宇宙膨張、元素合成、宇宙マイクロ波背景輻射、宇宙の階層構造、など、あらゆる観測事実と無矛盾
- 天体の形成・進化 = 宇宙の元素合成・循環史
  - 天体の中心部で合成された元素が宇宙全体に放出され、次世代の天体の原材料として輪廻転生を繰り返す
- 宇宙進化史 = 生命進化史
  - このような宇宙では生命もやはり必然的に生まれる？
  - 哲学的な議論にとどまらず、直接検証可能な時代に！

# 今回の内容に関する一般向け解説本



講談社ブルーバックス 2019年



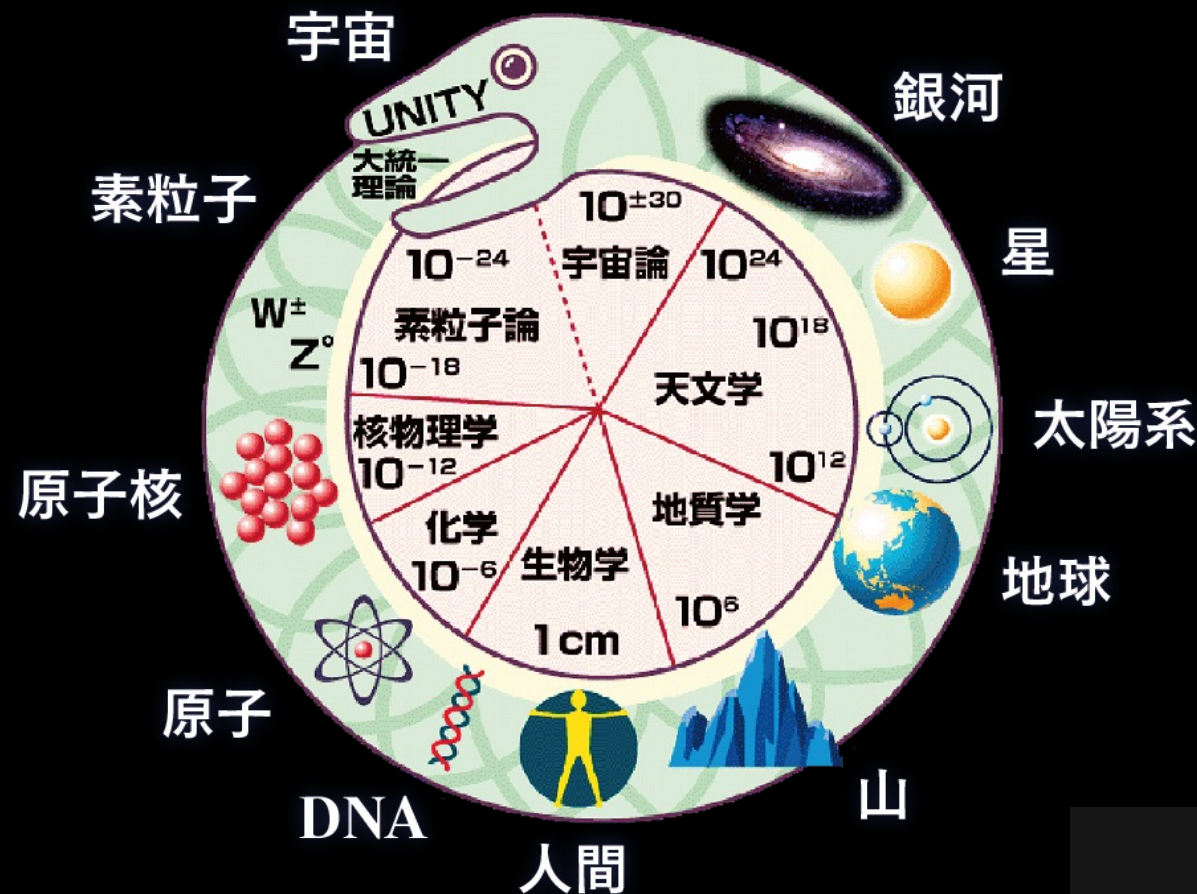
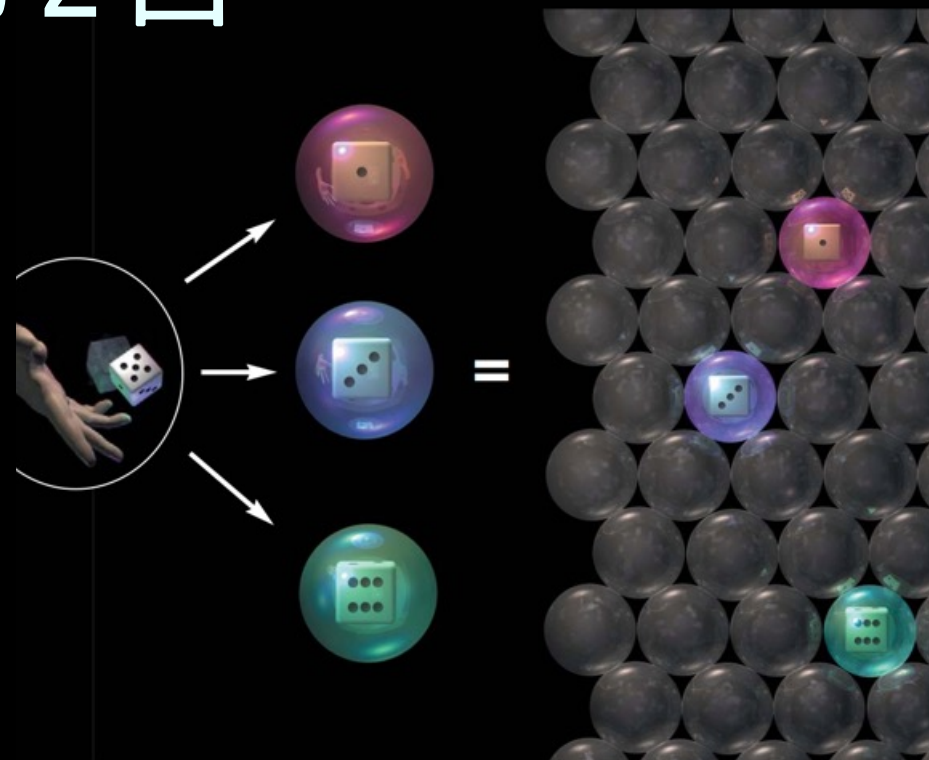
東京大学出版会 (初版 2006年 第2版 2021年)



朝日新書 2022年1月刊

# 宇宙における偶然と必然

## 第2回



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

早稲田大学オープンカレッジ 八丁堀校 @ 2024年2月3日 13:10-16:35



# 第1回（2024年1月27日）

## 物理学的進化の必然と歴史における偶然の役割

1. 138億年の宇宙史における必然と偶然
2. 天体の進化と元素の起源
3. 宇宙の元素循環と生命の原材料
4. 惑星系の普遍性と多様性
5. 地球外生命探査
6. まとめ

# 第2回（2024年2月3日） 人間原理とマルチバースに基づく 宇宙の生命の普遍性の考察

1. 不自然な宇宙
2. 偶然に意味を見出す人間原理
3. マルチバースの4分類
4. 有限体積の宇宙がもつ自由度とロンリーワールド
5. まとめ

# 1 不自然な宇宙

# 森羅万象はどこまで必然のみで理解できるのか

- 科学のゴールは、この世界（あるいは我々のユニバース）の振る舞いを少数の基本原則から説明し尽くすこと
  - それが本当に可能なのかどうか、保証はない
  - だからこそ、ゴールとして掲げる意味がある
- 科学の終着点の2つの可能性
  - 究極理論 (Theory of Everything) を発見し、全てを必然的に説明し尽くす
  - ある程度少数の基本法則にまでは還元できるものの、結局なぜそれらでなくてはならないのかまでは説明できず、どこかで偶然を認めざるを得ない
- 究極理論といえどこの宇宙を一意的に説明するには、初期条件まで決める原理が必要だが、これは不可能では？
  - むしろ、この初期条件の選択の偶然こそが、世界を認識する人間の存在を保証しているのでは？

# 物理法則と初期条件：必然と偶然の違い？

## ■ 物理学的世界観

- 自然界は単純な**物理法則**に支配されている
- 個々の現象は**初期条件**が与えられればその後の進化を正確に予言できる
  - 少なくとも無生物界の記述においては、この世界観はすでに確立
  - ただし量子論的不確定性が重要となるような現象を除く
  - **決定論的な巨視的世界 vs. 確率論的な微視的世界**
- 宇宙、さらには世界そのものもまた、物理法則によって完全に理解できるのか？
  - しかし、その場合、宇宙あるいは世界の初期条件はどうやって決まる？

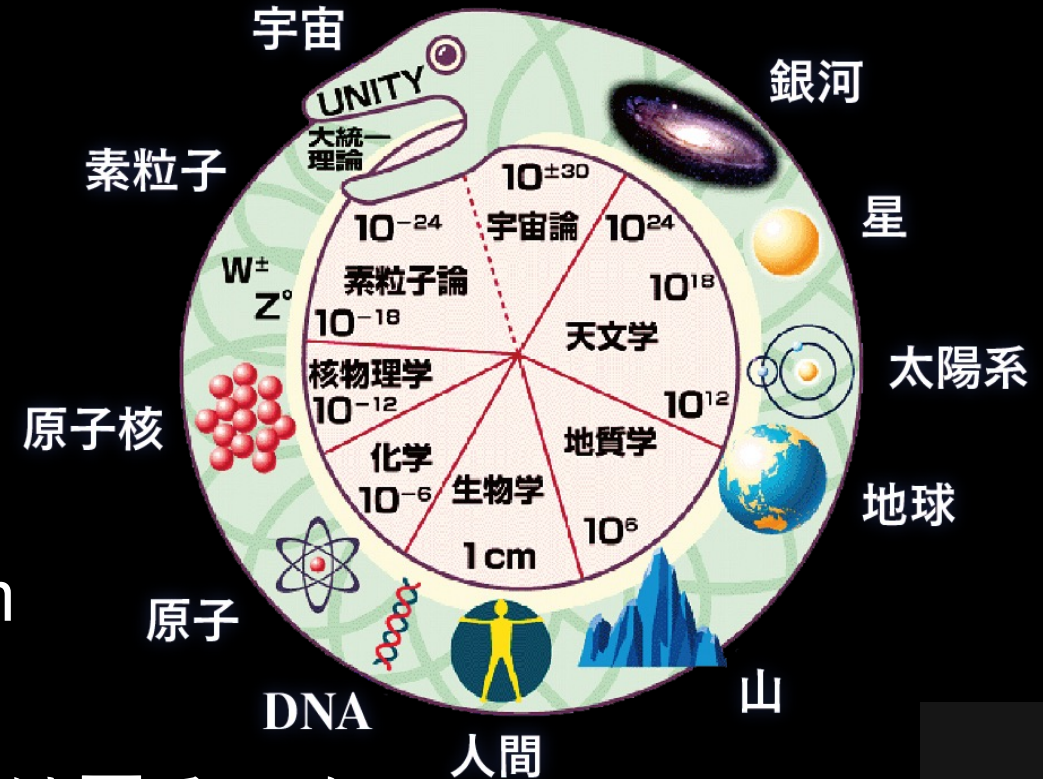
# 自然界に内在する特徴的スケールの数値

## ■ 自然界に存在する物質階層の特徴的スケール

- 原子核:  $10^{-15}\text{m}$
- 原子:  $10^{-10}\text{m}$
- 細胞:  $10^{-6}\text{m}$
- 人間:  $1\text{m}$
- 星:  $10^9\text{m}$
- 銀河:  $10^{20}\text{m}$
- 観測できる宇宙 (地平線球):  $10^{25}\text{m}$

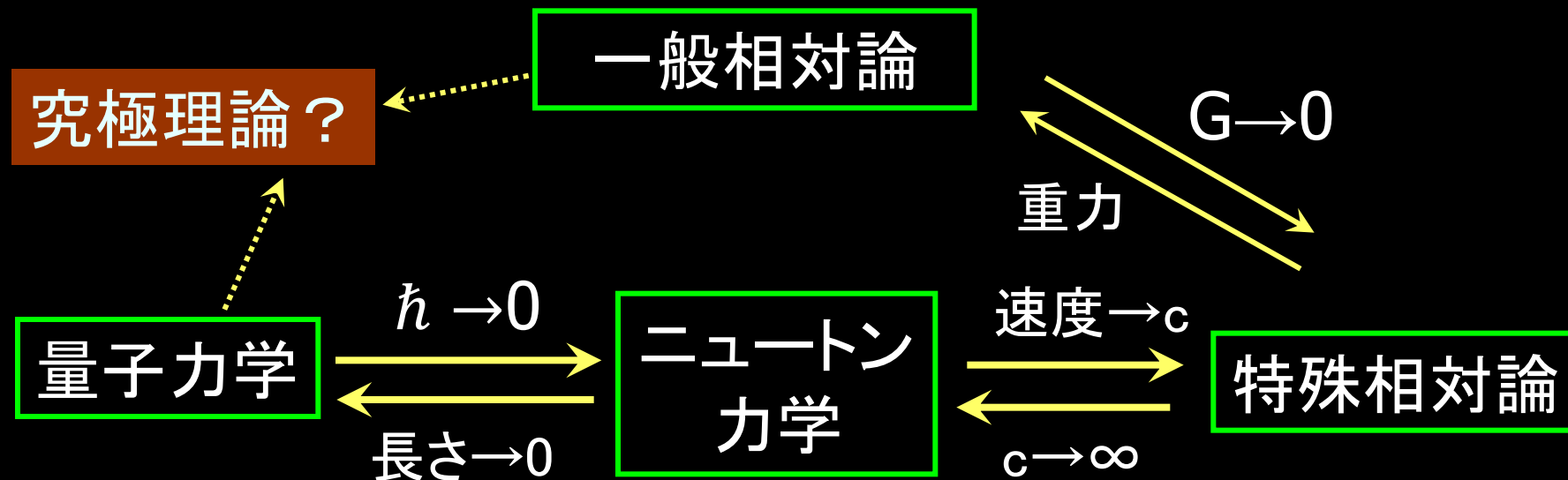
## ■ なぜか？

- 人間が1ミクロン、あるいは100kmでは困るのか
- 自然界の相互作用の強さに対応する基本物理定数の値が決めている



# この世界を支配する基本原理と物理定数

- 自然界のスケールは基本物理定数の値で決まる
  - ニュートンの重力定数  $G$  : 重力の強さ
  - 光速  $c$  : 情報が伝わる速度の上限
  - プランク定数  $\hbar$  : 作用（あるいは角運動量）の最小単位
- これらの値が異なる世界は、我々の世界とは全く異なる振る舞いをする（より根源的な法則の存在？）



自然界を支配する物理定数は次元（長さ、質量、時間の単位の組み合わせ）を持つ）

■ 光速度（相対論）

■  $c (\doteq 3 \times 10^{10} \text{cm/s})$

- すべてのものはこの速さを超えて情報を伝えることはできない。光速度はいかなる座標系でも同じ。

■ ニュートンの万有引力定数（古典力学）

■  $G (\doteq 6.67 \times 10^{-8} \text{cm}^3/\text{g}/\text{s}^2)$

■ 重力の逆二乗則： $F = GmM/r^2$

■ プランク定数（量子力学）

■  $\hbar (=h/2\pi \doteq 1.05 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s})$

■ 角周波数 $\omega$ の光のもつエネルギー： $E = \hbar\omega$



# それら物理定数の値から決まるプランクスケール

- 物理定数である  $c, G, \hbar$  を組み合わせてできる長さ、質量、時間の次元を持つ量は一意的に決まる

- **プランク長さ**

$$\ell_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 2 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

- **プランク質量**

$$m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2 \times 10^{-5} \text{ g}$$

- **プランク時間**

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5 \times 10^{-44} \text{ sec}$$

- これらの値が自然界のどこかに埋め込まれている
- 逆にこれらが日常的現象のスケールからかけ離れている不自然さこそが、この宇宙の安定性を保証する

# 自然界の相互作用の強さはとても不自然な比

- 電磁気力の強さ：微細構造定数（無次元数）

$$\alpha_E = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

$e$ は陽子の電荷

陽子同士に働くクーロン力 $e^2$ を無次元化した数値

- 重力の強さ：重力微細構造定数（無次元数）

$$\alpha_G = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 6 \times 10^{-39}$$

$m_p$ は陽子の質量

陽子同士に働く重力 $Gm_p^2$ を無次元化した数値

- 電磁気力と重力の強さの比

$$\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \approx 10^{36}$$

- この比はとてつもなく大きく不自然な数値
- これこそが地面に落としても原子が壊れない理由
- 逆にこれらの比の値の不自然さこそが世界の階層性と安定性を保証している

# 相互作用の強さの比の不自然な値が物質世界の階層の安定性を決めているらしい

## ■ 天体の質量の大雑把な理論的推定

$$\frac{\text{惑星の質量}}{\text{陽子の質量}} = \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G}\right)^{3/2} \approx 10^{54}$$

$$\frac{\text{恒星の質量}}{\text{陽子の質量}} = \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}}\right)^{3/4} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G}\right)^{3/2} \approx 10^{57}$$

$$\frac{\text{銀河の質量}}{\text{陽子の質量}} = \alpha_E^3 \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}}\right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G}\right)^2 \approx 10^{67}$$

$$\frac{\text{銀河の質量}}{\text{恒星の質量}} = \alpha_E^3 \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}}\right)^{-1/4} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G}\right)^{1/2} \approx 10^{10}$$

$$\frac{\text{恒星の質量}}{\text{惑星の質量}} = \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}}\right)^{3/4} \approx 10^3$$

(『ものの大きさ』第4章)

## ■ 非自明かつ重要な結論

- 巨視的世界(天体)もまた物理法則に支配されている
- $\alpha_E/\alpha_G \approx 10^{36}$ が巨視的世界と微視的世界をつなぐと同時に、かつそのスケールの隔たりの原因

## ■ これらは観測データとそれなりに良く一致している

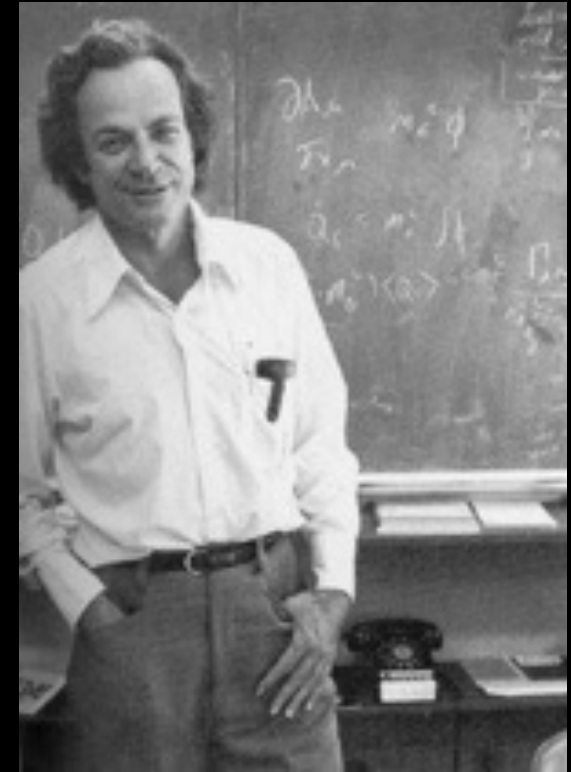
# (我々の) 宇宙を特徴付ける値

- 現在の宇宙を特徴付ける値 (定数ではなく時間変化する)
  - 宇宙の年齢: 138億年
  - 宇宙の温度: 3ケルビン (摂氏マイナス270度)
  - 宇宙の密度:  $10^{-29}$  g/cm<sup>3</sup>
  - 宇宙の組成比:  
光: 物質: ダークエネルギー =  $10^{-5}$ : 0.3: 0.7
- 宇宙を特徴付ける「定数」 (無次元数)
  - 光子数/陽子数 =  $10^9$  (宇宙は光で満ちている)
  - 重力の強さ/電磁気力の強さ =  $10^{-40}$
  - 宇宙定数/プランク単位 =  $10^{-120}$
- これらは偶然与えられたものなのか (説明不可能)、それとも必然的なものなのか (説明可能) ?

## 2 偶然に意味を見出す人間原理

# 無次元物理定数 $\alpha_E$ の値はなぜ決まっている？

It has been a mystery ever since it was discovered more than fifty years ago, and all good theoretical physicists put this number up on their wall and worry about it. Immediately you would like to know where this number for a coupling comes from: is it related to  $\pi$  or perhaps to the base of natural logarithms? Nobody knows. It's one of the greatest damn mysteries of physics: a magic number that comes to us with no understanding by man. You might say the "hand of God" wrote that number, and "we don't know how He pushed his pencil."



Richard Feynman "QED :  
The Strange Theory of Light  
and Matter" (1985) 微細構  
造定数 $\alpha_E \doteq 1/137$ について

# 我々の宇宙を支配する物理法則の絶妙なバランス

## ■ 強い相互作用の結合定数： $\alpha_S$

- $\alpha_S \uparrow \Rightarrow$   ${}^2\text{He}$ が存在できるとすべての水素がヘリウムになる  $\Rightarrow$  水ができない
- $\alpha_S \downarrow \Rightarrow$  水素のみになり高分子ができない

## ■ 電磁相互作用の結合定数： $\alpha_E$

- $\alpha_E \uparrow \Rightarrow$  原子核がクーロン斥力で壊れる
- $\alpha_E \downarrow \Rightarrow$  高分子ができない

## ■ 弱い相互作用の結合定数： $\alpha_W$

- $\alpha_W \uparrow \Rightarrow$  中性子のベータ崩壊の寿命  $\downarrow \Rightarrow$  ビッグバン元素合成以前に中性子が消滅し、水素しか残らない
- $\alpha_W \downarrow \Rightarrow$  中性子と陽子の質量差1.29MeVよりずっと以前に弱い相互作用が切れる（普通は宇宙の温度が0.7MeVの頃）  $\Rightarrow$  中性子と陽子の個数比は1 : 1  $\Rightarrow$  ビッグバン元素合成の際すべてがヘリウムになってしまう

## ■ 相互作用定数が微調整されていない限り、生物は誕生しない？

# 微調整 (fine tuning) を認めてよいか？

- 自然界を特徴付ける無次元量は 1 であるべし
  - 無次元パラメータの値が単純な予想に比べて不自然に大きい（小さい）場合、物理屋は「微調整」されていると呼び、忌み嫌う
  - 例えば、つまみを回して選局したラジオを思い出せば、重力/電磁気力なら $10^{-40}$ 度、宇宙定数なら $10^{-120}$ 度の精度でピッタリ合わせない限り、うまく音が聞こえないことに対応する
  - この不自然さを偶然で片付けたくないなら、自動的にその値が選ばれるような何らかの法則が潜んでいると考える（究極理論）
- 微調整あるいは究極理論の対案
  - 宇宙はこの宇宙以外にも無数にあり、そこではあらゆる可能性が偶然実現していると考え（マルチバース）



# 人間原理と物理法則

- マルチバース（異なるユニバースの集合）の存在を認める
- その要素である個々のユニバースでは物理法則が異なる
  - 少なくとも物理定数や宇宙定数の値は違っている
- それらのなかで、偶然が積み重なりたまたま人間を生む条件を満たしたユニバースの一例が我々のこの宇宙
  - 大多数の「普通」のユニバースでは人間は誕生しないから、「そのユニバースの性質が普通」だと納得する「人間」は存在しない
  - 「例外的に珍しい」ユニバースでのみ人間が誕生できるからこそ、そこに住む人間は必ず「なぜこの宇宙はこれほど不自然なのか」と悩むことになる
  - とすれば、人間が生まれるほどの奇跡・偶然が「なぜ、よりにもよってこの宇宙で起ったのか」は不思議ではなくなる（人間原理）

# 人間原理の算数

- 極度にありえない事象を、同じくほとんどありえない事象（人間の存在）と関係づける
- 確率 $P$ (不思議な事)は $\ll 1$ であるが、確率 $P$ (人間の存在)もまた $\ll 1$ であるから「不思議な事」と「人間の存在」が相関しているならば、条件付確率 $P$ (不思議な事|人間の存在)が $\approx 1$ となることは十分あり得る。式で書くならば

$$P(\text{不思議な事} | \text{人間の存在}) = \frac{P(\text{不思議な事、人間の存在})}{P(\text{人間の存在})} \gg P(\text{不思議な事})$$

- 不思議さが減り、何か心が安らぐ納得感が得られる
  - 人間原理は狭い意味の自然科学ではないが、ある種の説明を与える

人間が誕生する法則の確率がどんなに少なくとも  
宇宙が無数にあればどこかで実現してしまうはず

- いかにか少ない確率であっても、試行回数が多ければその事象は必ず実現する
  - 宝くじで一億円当たる確率は100万分の1以下だが、当選する人は必ず存在
  - 100万本以上の数の宝くじが売れているならば、統計的には当選者がいないほうがおかしい
- 逆に、人間が存在できる確率が極めて低いにもかかわらず、まさに我々の宇宙がその例なのであれば、人間が存在しないような宇宙が実は無数にある（マルチバース）と結論すべき
  - そうであって初めて、人間を誕生させる宇宙が存在しているという奇跡的な事実が説明できる

# 太陽系以外に惑星系はあるか

地球がハビタブル・ゾーンに入っているのは幸運



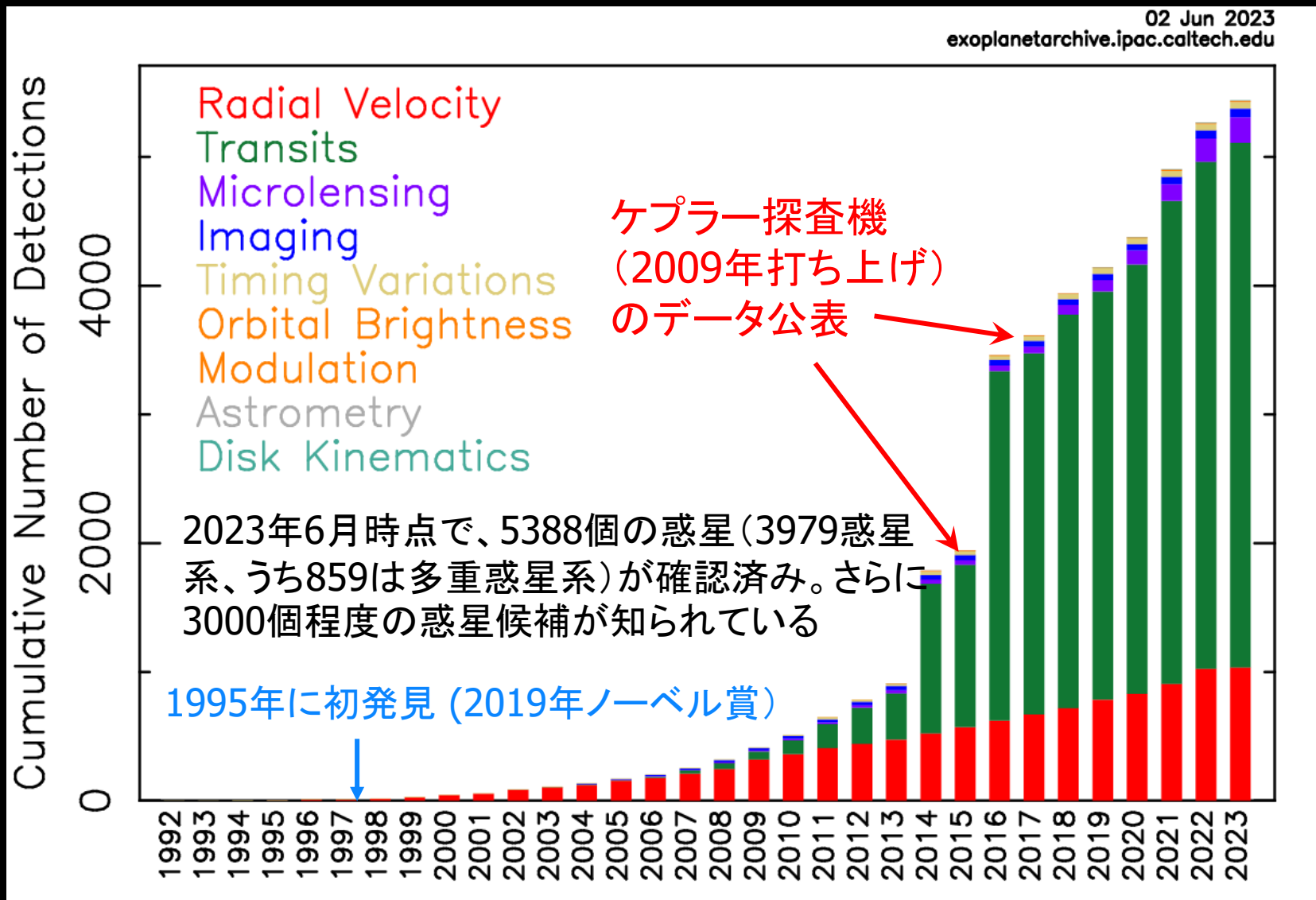
- **例題**: 地球上に液体の水が存在するには、太陽との距離が現在の値と±10%以内の狭い範囲になくなくてはならない。これから何かわかることはあるのか？

# 偶然に意味を見出す

- 回答例 1: 無意味な質問である
  - 地球と太陽の距離は単に偶然決まっただけ。偶然には意味はない。
- 回答例 2: 実は深い意味を持つ
  - 偶然そのような微調整された系が実在するためには、地球が唯一ではなく、中心星と異なる距離にある無数の惑星が存在すると考える方が自然。つまり、この地球が微調整された(不自然な)性質を持っているのならば、それ以外の無数の惑星が存在していることを示唆する

# この問いの正解は別として太陽系外惑星は普遍的に実在

## 発見総数



西暦

# この宇宙以外に別の宇宙はあるか

人間原理とは何か?

## なぜ宇宙は人間に都合がよいのか?

宇宙のことが明らかになればなるほど、ある一つの疑問がわいてきます。「この宇宙は、人間（あるいは知的生命）が存在するために都合がよい状況が見事に整いすぎている。まるで宇宙が『知的生命よ、誕生しなさい』とでも言っているかのようだ。なぜ宇宙は、人間にとってこれほど都合よくできているのだろうか」。たとえばプラスとマイナスで引きつけ合う電気の力がほんの少し強かっただけでも、人間は誕生できなかったはずだといえます。

この疑問に対して、誰もが納得できる答はまだみつかっていません。ただし近年、「人間原理」という考え方が、物理理論から導かれた「マルチバース（多宇宙）」という宇宙の描像と組み合わせることで、支持を広げてきています。人間原理とマルチバースによる新しい宇宙観をのぞきみてみましょう。

協力

須藤 靖

東京大学大学院理学系研究科教授

### 悩める人類

右ページイラストの人間のシルエットは、人類が「宇宙はなぜこれほど人間の存在に都合がよい条件がそろっているのか」と頭を悩ませている状況の象徴である。大きな球体は人類が所属する宇宙全体をあらわしており、シルエットが入っている小さな球体は、人間にとって観測可能な宇宙の領域をあらわしている。大きな球体の外側にある色とりどりの球体は、私たちが所属する宇宙とは別の宇宙をあらわしたものである。これら別の宇宙では、物理法則などが、私たちの宇宙とはことなっている可能性がある。

## ■ 応用問題

この宇宙には我々人間という知的生命が存在するが、そのためには宇宙の初期条件と物理法則に微調整が必要だとされている。これから何かわかることはあるか？

Newton 2016年4月号

# ユニバースからマルチバースへ

## ■ 回答例 1: 無意味な質問である

- 知的生命の起源を未だ解明できて、あるいはそれは偶然に支配されているだけのいずれかである。それ以上の意味はない

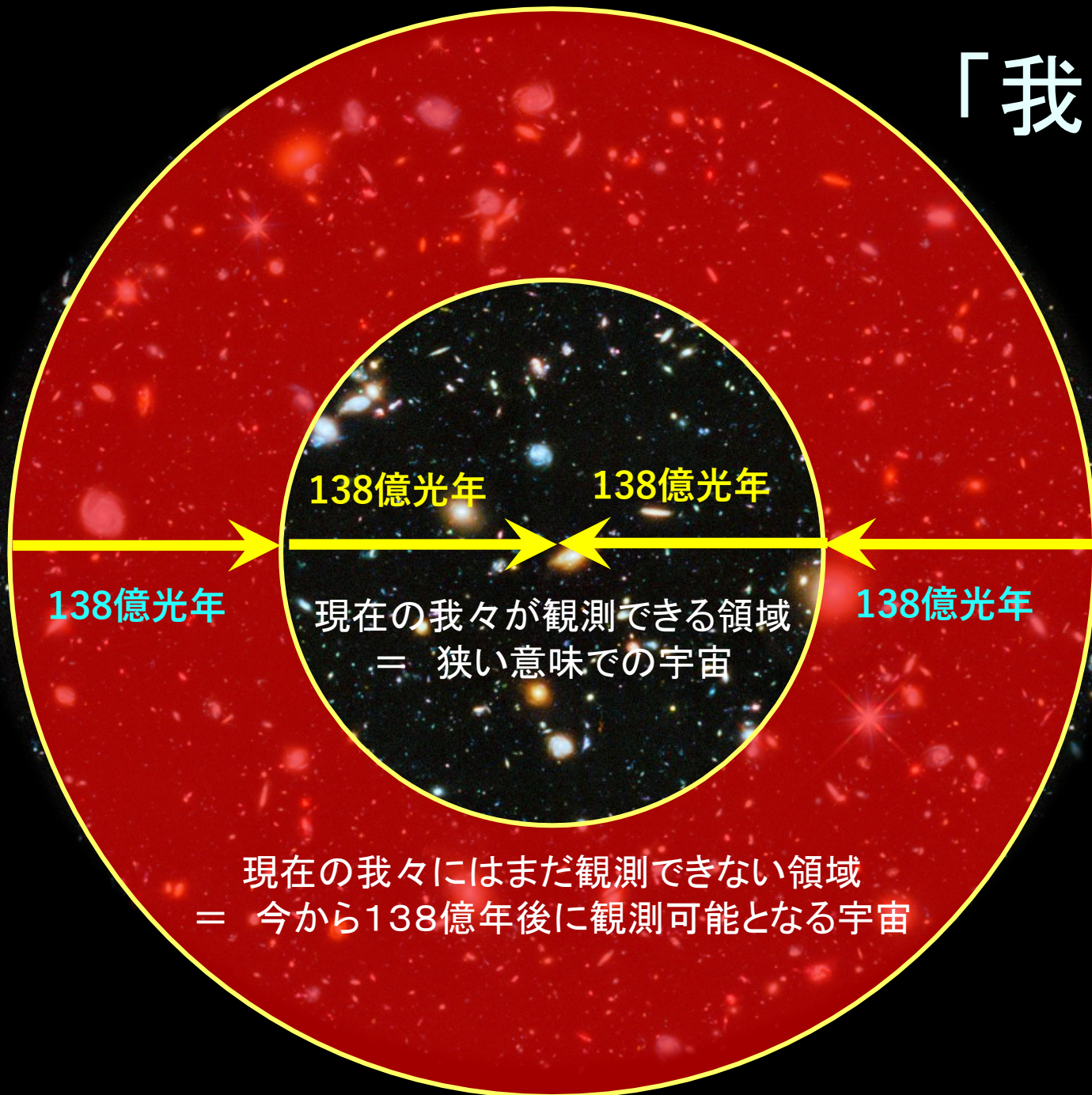
## ■ 回答例 2: 実は深い意味を持つ

- 知的生命を誕生させる確率が極めて小さいならば、それを相殺するだけの数の宇宙が存在しなければ、知的生命をもつ宇宙は実存し得ない。つまり、宇宙は我々のユニバース以外のマルチバースにある無数のユニバースのなかでたまたま知的生命を宿すような条件を備えた例である。つまり、マルチバースの実在が示唆される



### 3 マルチバースの4分類

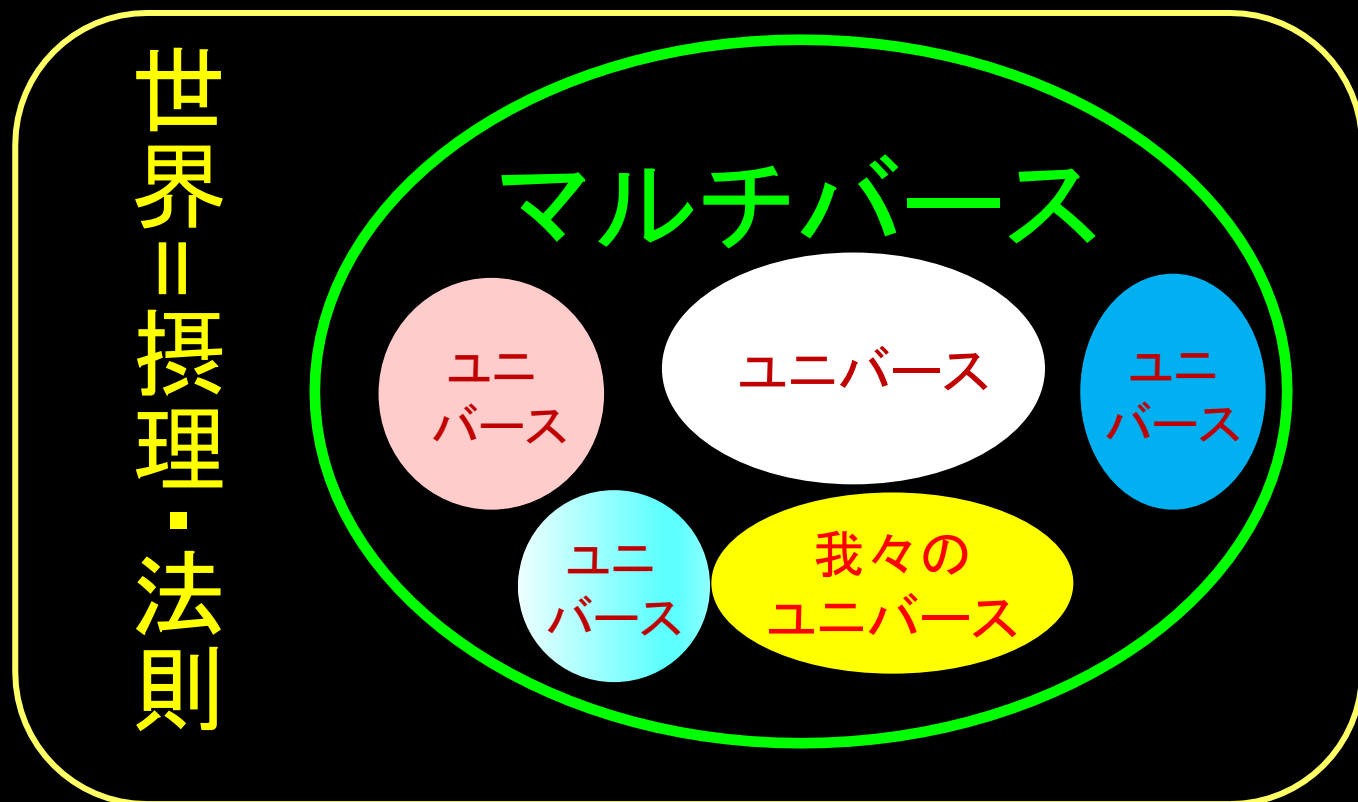
# 「我々が観測できる」宇宙 =地平線球



- 現在われわれが観測可能な領域は宇宙年齢で決まっている（因果律）
- 厳密に言えば、その外がどうなっているかはわからない
- ただしある程度は通常の物理学的考察から推定できる
- しかし、どこまでも遠くに行けば、科学的というよりも哲学的考察にならざるを得ない

# 世界 > マルチバース > ユニバース

- 「宇宙の外に何があるか」というよく聞く質問は、「宇宙」の定義によって答えが違う
- 実在するかどうかはさておき、以下では**ユニバース=universe**と、**その集合の総称としてのマルチバース=multiverse**を区別する



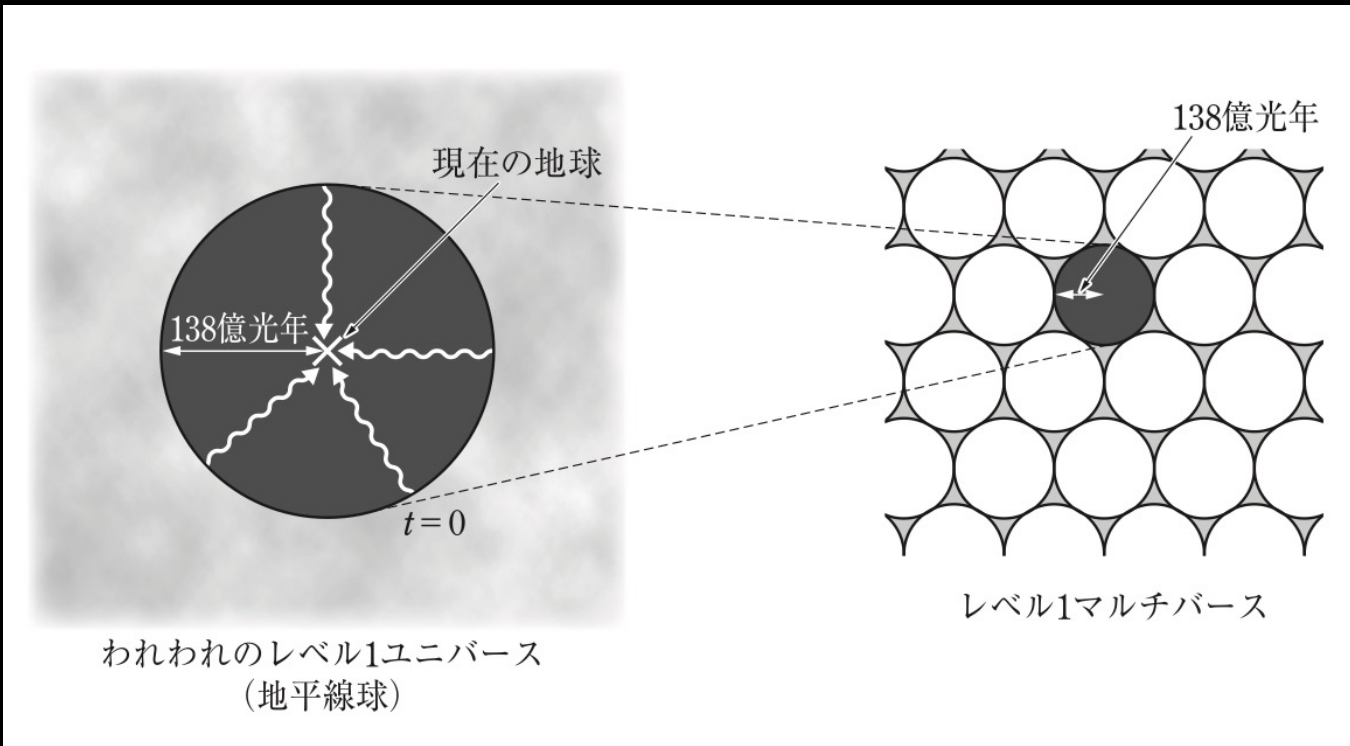
- **コンプライアンス的注意**
  - 左図はあくまでも私の個人的語感にもとづくもので一般的用法ではない
  - この意味不明な図の意味を伝道するのが今回の目的だが、信教の自由はもちろん遵守するのでご安心を

# 3-1 レベル1マルチバース

- 我々の地平線球の外側にも、同じ地平線球(レベル1ユニバース)が無数にあるが、現在は「まだ」互いに因果関係を持たない
- それらの集合が(我々の属する)レベル1マルチバース
  - 現在の地平線内にある我々の(レベル1)ユニバースは、レベル1マルチバースに属する元の一つ
  - 同じレベル1マルチバース内のレベル1ユニバースは、初期条件が異なるものの物理法則は同じ



# レベル1マルチバースは間違いなく実在する



- 単に我々が観測できない地平線球の外にも宇宙は広がっているという極めて当たり前の主張
- あえてマルチバースと呼ぶ必要もないが、一応分類しておいた程度の意味

- 現在は異なるレベル1ユニバースであろうと、時間とともに同じ地平線球に入る(因果関係を持つようになる)ので、やがて同じレベル1ユニバースに合体し続けていくことに注意

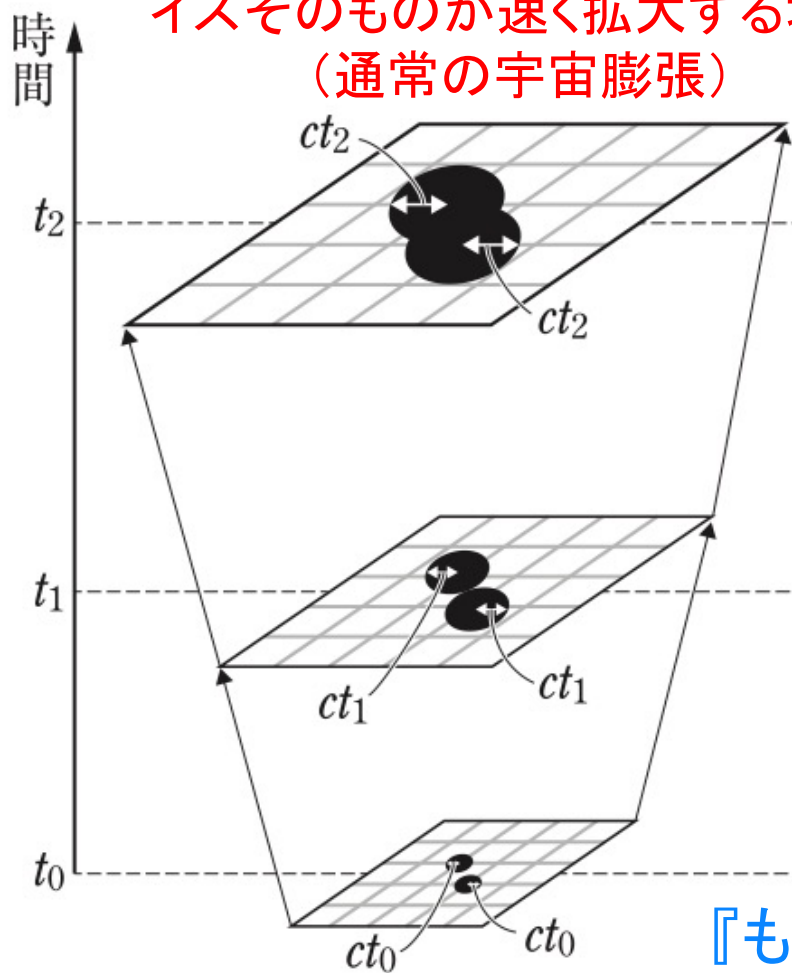
## 3.2 レベル2マルチバース

### 因果関係を持たない異なるレベル1マルチバースの集合

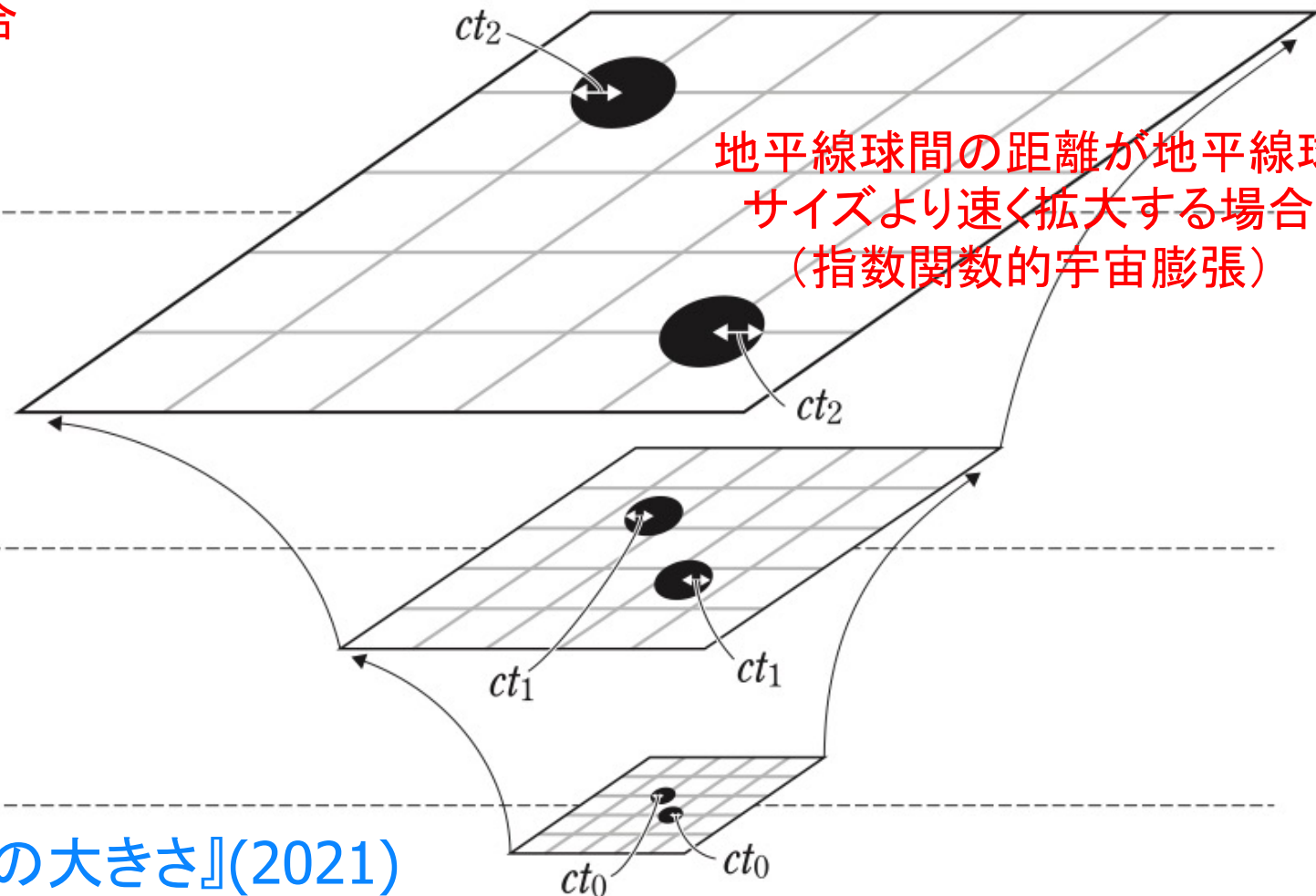
- 同じレベル1マルチバースに属する異なるレベル1ユニバース同士は同じ時空と物理法則を共有している
  - 現在は因果関係を持たないのだが、時間が経てばやがて互いの存在を確認できるようになる
- これに対して、レベル2マルチバースを構成する異なるレベル1マルチバース同士は、仮に同じ時空上に存在していようと、互いに因果関係を持たない（さらには異なる空間次元に存在しているかも）ので、互いの存在は決して確認できない
  - 現在の宇宙は膨張が加速しているため、時間が無限大経過しても地平線の大きさが増加せず、外側と因果的に孤立した領域を形成する可能性が高い

# レベル2マルチバースの可能性 (1)

地平線球間の距離よりも地平線球サイズそのものが速く拡大する場合  
(通常の宇宙膨張)



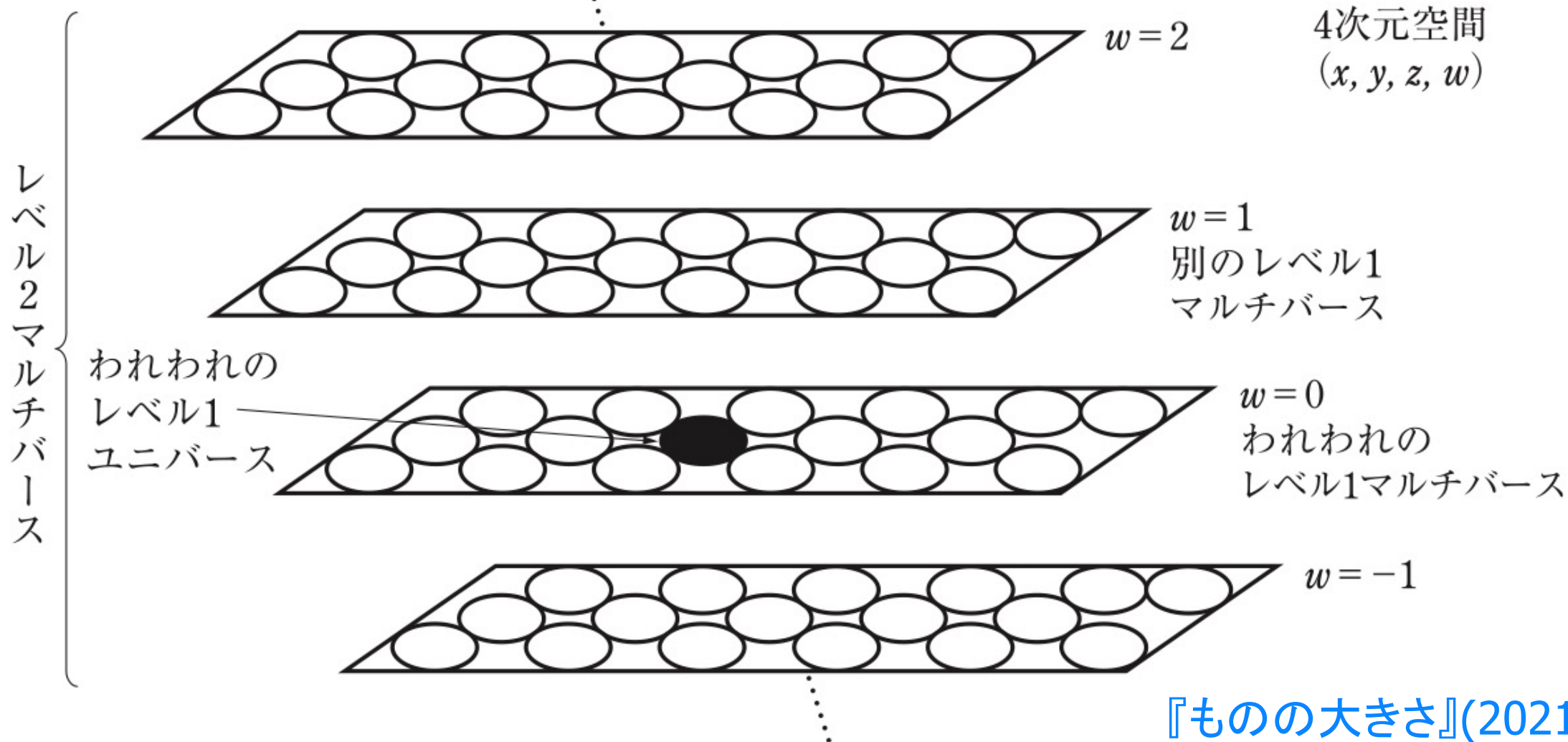
地平線球間の距離が地平線球サイズより速く拡大する場合  
(指数関数的宇宙膨張)



『もの大きさ』(2021)

# レベル2マルチバースの可能性 (2)

もし空間次元が4次元以上なら、異なる次元に存在する別のレベル1マルチバースは認識できない





# 3.3 レベル3 マルチバース

## 量子力学にもとづく微視的世界の振る舞い

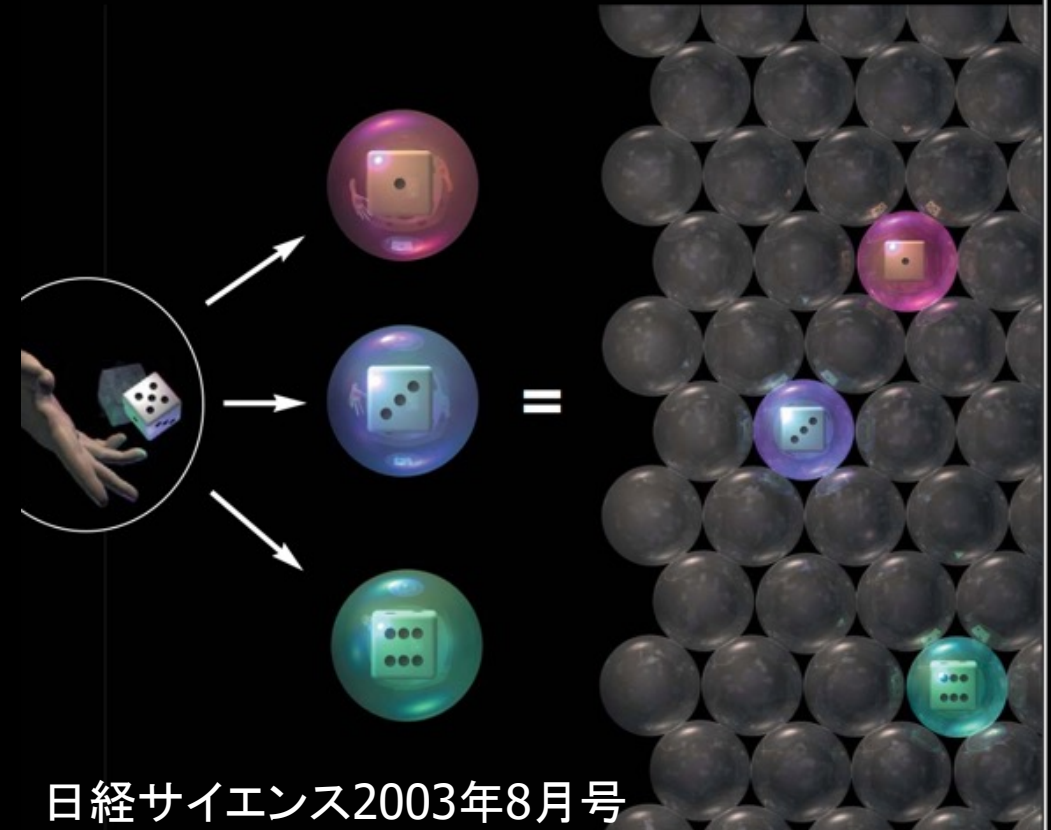
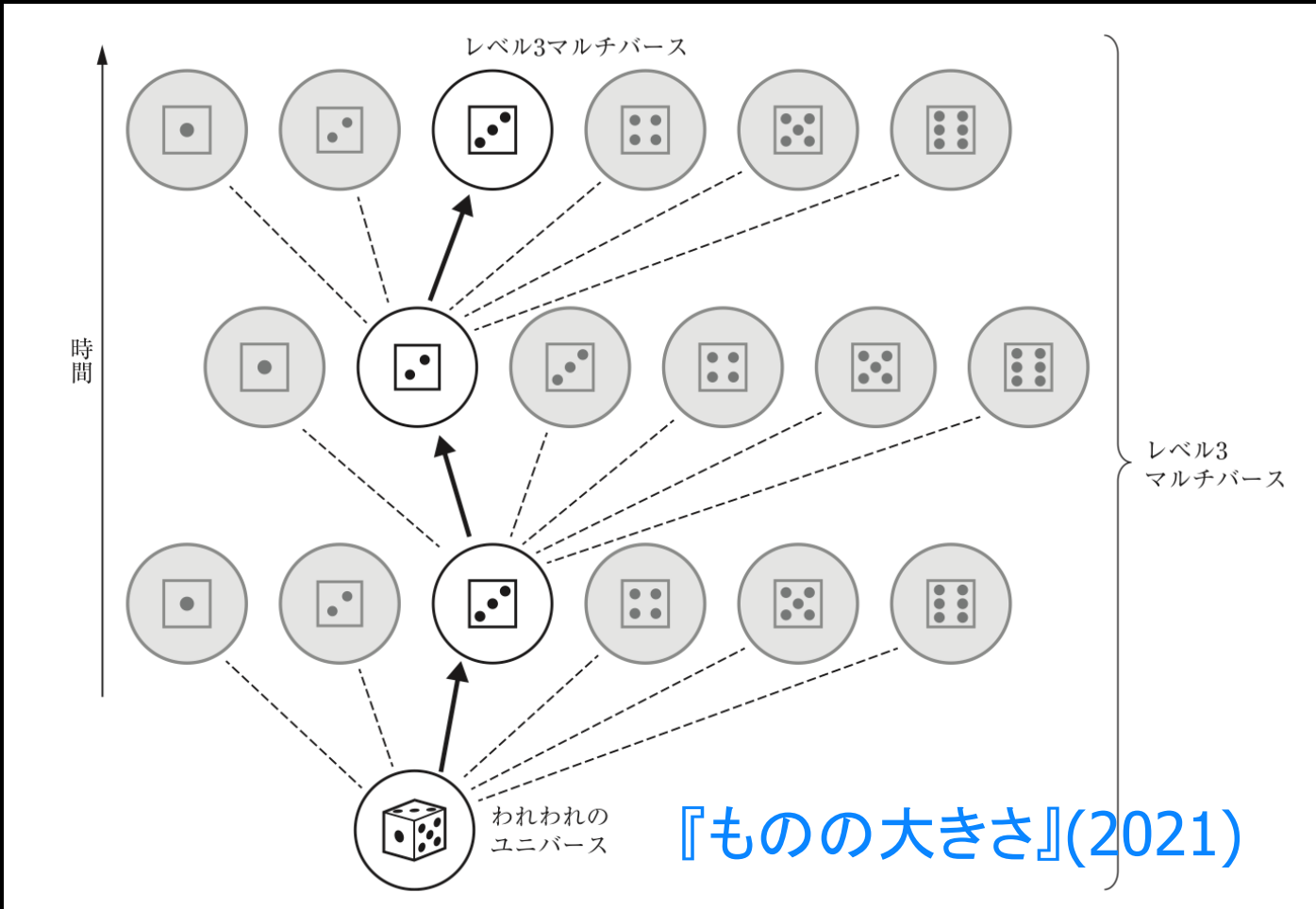
### ■ 標準解釈（コペンハーゲン解釈）

- 我々が住む宇宙は唯一つ
- その中に異なる状態が共存しており、なんらかの観測を行うまで状態は決まらない（知らないのではない決まっていらない）
- 観測することで初めてその中のどれか一つが選ばれ確定する

### ■ 非標準解釈（エベレットの多世界解釈）

- 異なる状態のそれぞれに対応して異なる宇宙が実在している
- 異なる無数の宇宙が並行に存在し、観測者は観測するたびに自分がそのなかのどの宇宙に存在しているかを確認することになる

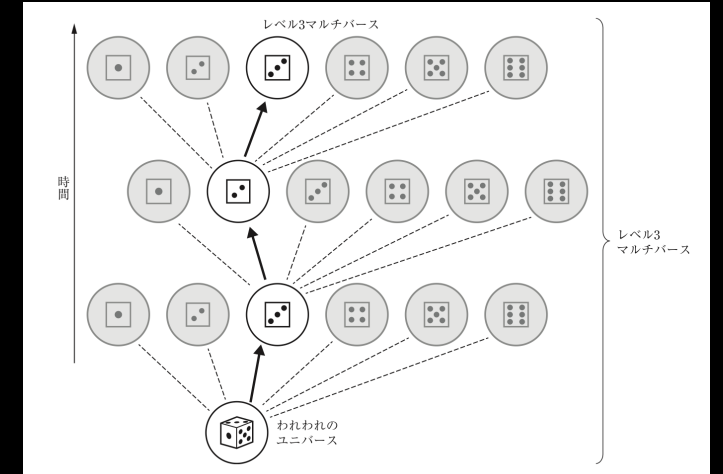
# レベル3マルチバースの例



- 量子サイコロ(決定論的な古典サイコロではないことに注意!)を振るたびに世界が分岐すると考えても良いし(左)、無数に存在する量子的並行宇宙のどれなのかが確認できると考えても良い(右:その集合がレベル3マルチバース)

# コペンハーゲン解釈と多世界解釈の予言の違い

- この量子的装置を100回用いて一度も弾が出なかったとする
  - 確率  $P=1/2^{100}=10^{-30}$
  - この試行一回に1秒かかるとすると、 $100秒 \times 10^{30} \div$  (現在の宇宙年齢) の  $10^{15}$  倍だけの時間をかけて初めて平均的に一度起こる程度
- 実際にそのような「奇跡」を体験したら
  - 自分は選ばれしものなのだと納得する
  - 装置が壊れている (あるいは詐欺である) ことを疑う
  - 量子力学の多世界解釈が証明されたと納得する
- 多世界解釈ではこの試行は異なる宇宙で並行してなされる
  - 100秒後に  $10^{30}$  個のレベル3 マルチバースのどこかで実現
  - 量子コンピュータが高速計算できる原理!
  - 自分が生きている宇宙以外は、存在しないと同じ (人間原理的選択原理)



# レベル3マルチバース実在の検証実験： シュレーディンガーの人間(量子自殺)

- コンプライアンス的注意：仮に多世界解釈に完全に納得したとしても、決して真似してはいけません
- 瞬時に死に至らしめる量子論的な（決定論的ではない）弾丸発射装置
  - 弾丸が発射するかしないかは半々の確率で量子的に（因果的ではなく）決まる
  - その装置の試し撃ちを外から見ていると、平均2回に一回、実弾が発射される
- 実際にその装置の前に自分の頭をおく
  - もしマルチバースがなければ、平均としては2、3回後にはほぼ確実に死んでしまう
  - もしレベル3マルチバース（あるいは並行宇宙）が実在するなら、自分が死んだ宇宙は認識できないからそこで終わり。一方、空撃ちが起こった宇宙では自分を認識できる。つまり認識できる「自分」にとっては、無限に空撃ちが起こるはず。
  - むろん、傍観している他人にとってはその選択効果はないので、ほとんどの場合は当事者が死ぬことを確認するだけ

## 3.4 レベル4 マルチバース

### ■ 世界とは抽象的な数学的構造そのものだと考える

- 異なる数学的論理体系が複数あるならば、それに対応して異なる物理法則を持つ世界(レベル4マルチバース)が実在しているのではないか
- とすればこの宇宙の法則が数学で記述できるのは当たり前

### ■ 世界 = 数学的構造 = 物理的実体 = 宇宙

- 我々のユニバースでの実験とは一致しないが、論理的に無矛盾な物理法則(数学的体系)があったとする
- (標準的考え) 実験で否定される以上、その体系はこの世界と矛盾しており、それ以上考えても無意味
- (危ない考え) たまたま我々の宇宙で採用されていないだけで、それを採用する別の宇宙がどこかに実在していることを意味しているのでは？

# 無矛盾な数学的構造は必ず「実在」する？

- 我々のユニバースでの実験とは一致しないが、論理的に無矛盾な物理法則（数学的体系）があったとする
  - 実験で否定される以上、その体系はこの世界と矛盾しており、それ以上考えても無意味（標準的考え）
  - 単にたまたま我々の宇宙で採用されていないだけで、それを採用する宇宙がどこかに実在しているだけ？
- 本当は異なる物理法則を持つ世界がどこかに無数に存在しているのではないか（世界 = 数学的構造 = 物理的実体 = 宇宙）
  - 物理法則とまで言わずとも、異なる物理定数の組みを持つ宇宙が無数に存在するとするのがレベル2マルチバース
  - レベル4はそれをさらに過激に推し進めたもの
- 観測者が存在しない宇宙の実在を認めるなら、それは結局論理的な構造が実在するという主張と区別できないのでは？

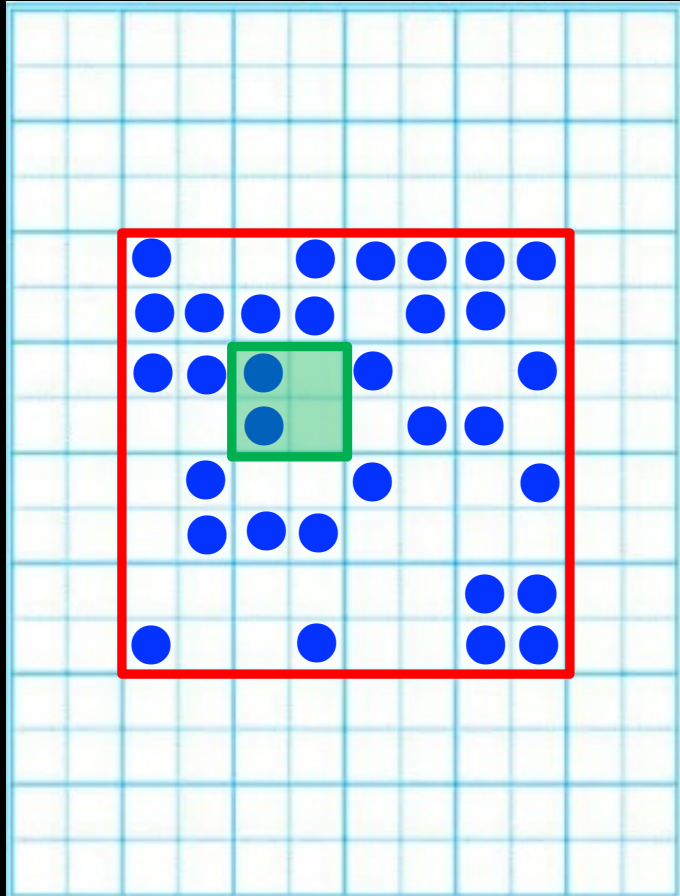
# 4 有限体積の宇宙がもつ自由度と ロンリーワールド

# めったに起こらない ≠ 起こらない

- *Everything not forbidden by the laws of nature is mandatory*  
— *Carl Sagan, Contact*
  - 確率Pの事象をN回試行すると、その事象が起こる期待値はNP
  - つまり、どれほどPが小さくとも0でない限り、 $N(\gg P^{-1})$ 回試行すれば、その事象は1回以上実現するはず
- 例) サイコロを100回振って、1の目が100回連続して出る
  - 確率  $P=1/6^{100}=10^{-78}$
  - しかしこれは「サイコロを100回振る」を $10^{78}$ 回繰り返せば、平均的には1回起こらないとおかしいことでもある
  - サイコロを一回振るのに1秒かかるとすると、 $100秒 \times 10^{78} \doteq$  (現在の宇宙年齢) の $10^{62}$ 倍だけの時間をかければ起こって当然



# 有限自由度の系は、数多く集めれば必ず繰り返し現れる



- $2 \times 2 = 4$ のマス目内に、粒子があるかないかの2通りの可能性を持つ系は、 $2^4 = 16$ 種類しかない（左図の赤枠内）
- 左図には $2 \times 2$ のマス目は合計 $6 \times 8 = 48$ 個あるので、任意の特定の配置は平均的に3回現れる
- 外に広がるずっと大きな領域を考えれば、ある特定の配置（例えば緑枠の配置）は繰り返し何度も現れるはず
- 仮にそうでなければ、何らかの理由（物理法則あるいは詐欺師）によって、その特定の配置が禁止されていると考えるべき

- この議論の本質：有限自由度の系と（ほぼ無限の）広大な外界の存在

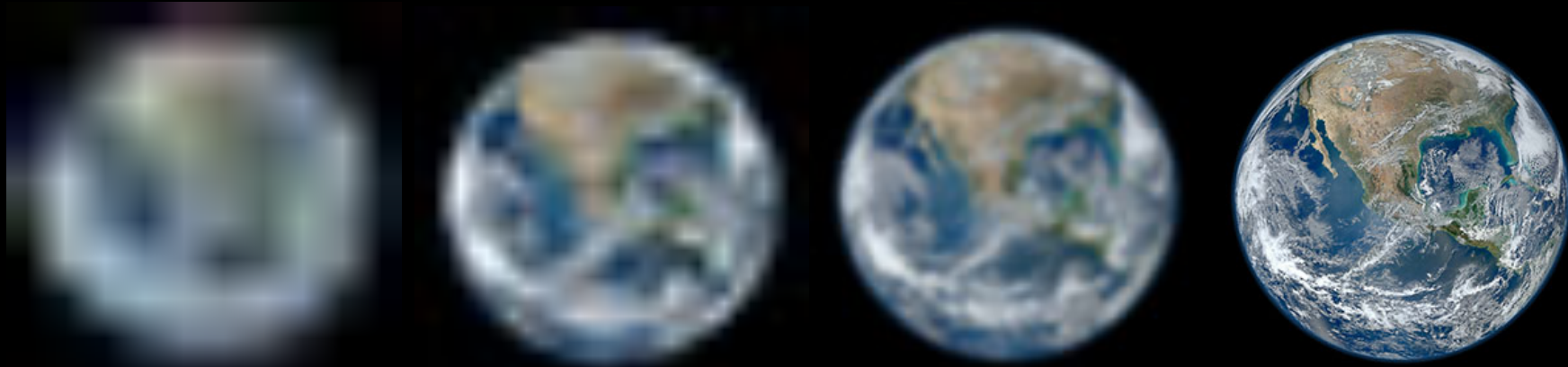
# キツテルの『熱物理学』にある常識的教え

- 運動方程式の可逆性は「十分に長い時間待てば、その系はたとえどんなに確からしくない配列であるにせよ必ず現れるはずである」ことを示唆する。しかしこれは誤りである。“十分に長い”とは長すぎて“決して現れない”と同じ意味だからである。
  - 問題4・4：タイプライターには44個のキーがあり、サルは1秒間に10のキーを打てるとする。『ハムレット』には $10^5$ の文字があるとしたとき、 $10^{10}$ 匹のサルが宇宙年齢（ $10^{18}$ 秒）の間タイプライターを打ち続けると『ハムレット』は創作されるか。
    - その期待値は  $\frac{1}{44^{100000}} \times 10^{10+18+1} \cong 10^{-164316}$
- これは優れた教科書。この解説も問題も素晴らしいし、常識的な時間スケール（宇宙年齢以下）を考える限り正しい
- しかし、非常識な時間スケールをものともしない宇宙論屋にとって上述の解説は完全な間違い（論理的に破綻している）

# 人間が誕生する確率がどんなに少なくとも、 宇宙が無数にあればどこかで必ず実現する

- いかにか少ない確率であっても、試行回数が多ければその事象は必ず実現する
  - 宝くじで一億円当たる確率は100万分の1以下だが、当選する人は必ず存在
  - 100万本以上の数の宝くじが売れているならば、統計的には当選者がいないほうがおかしい
- 逆に、人間が存在する宇宙が極めて可能性が低いにもかかわらずまさに我々の宇宙がその例だとすれば、人間が存在しないような宇宙は無数にあると結論すべきではないか？
  - そうであって初めて、人間を誕生させる宇宙が存在しているという奇跡的な事実には納得できる

# 有限体積の宇宙が持つ情報量は有限か —世界はデジタルか、アナログか？—

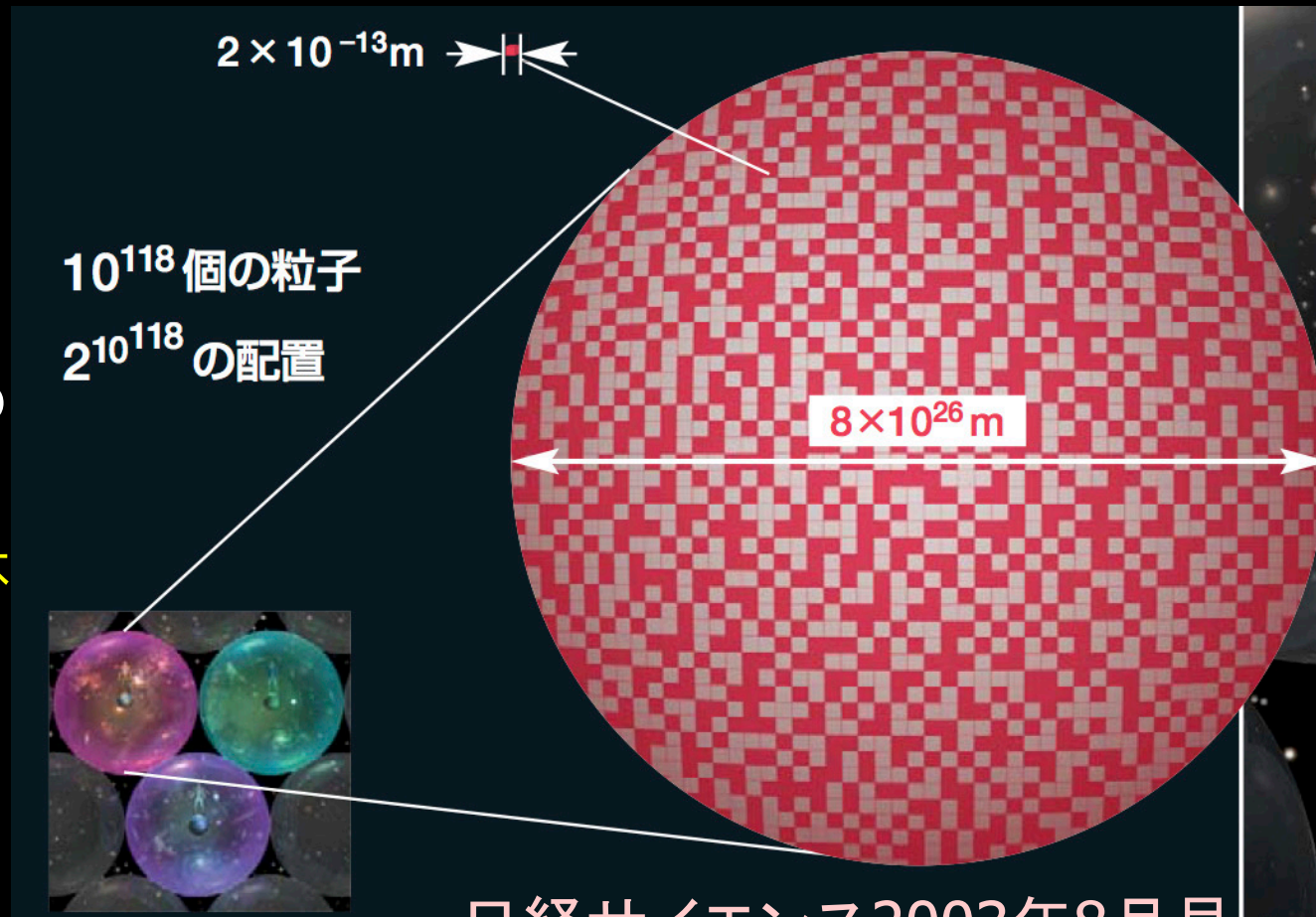


- この作業を繰り返していくと、いずれは近似ではなく本物（と区別できないクローン宇宙）に到達する？
  - すべての物質は有限個の素粒子からなる（量子論を無視する）
  - 時間と空間も連続ではなく離散的かも？
  - とすれば宇宙はデジタル情報に帰着するので、3Dプリンターで宇宙を創り続けると、いずれクローン宇宙が出現するはず？

# 我々の地平線球が持つ「古典的」情報量

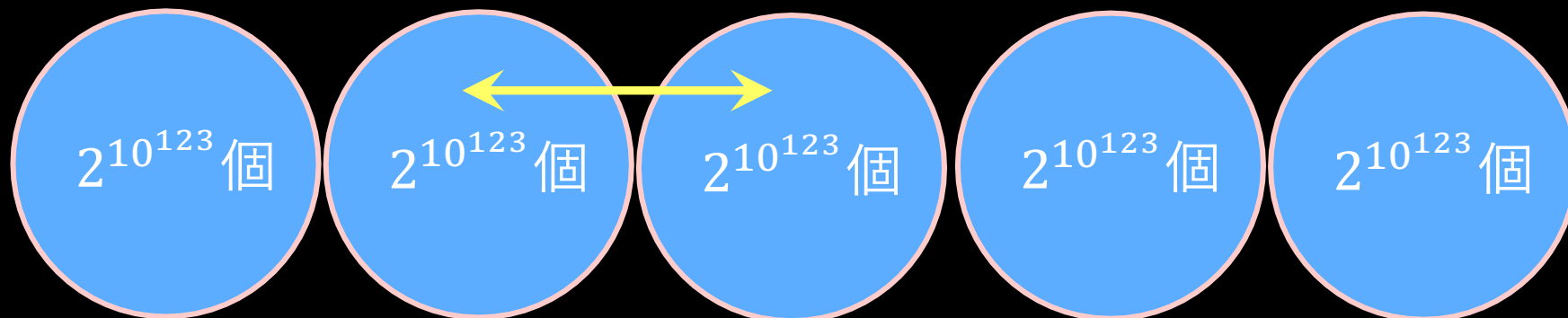
- 水素の原子核の大きさは $\sim 10^{-13}\text{cm}$
- 地平線球の半径138億光年は $\sim 10^{28}\text{cm}$

- この地平線球につめこめる水素の個数は最大 $(10^{28}/10^{-13})^3=10^{123}$ 個
- そこに実際に水素を置くかどうかの2通りに対応して、可能な配置数は2の $10^{123}$ 乗通り\*しか\*ない (われわれの宇宙はその中の一例)
- 2の $10^{123}$ 乗個以上の地平線球を含む体積の宇宙の中には、全く同じものが繰り返し出現しているはず
- でも量子論を無視したこのような古典的考察がどこまで正しいかは不明



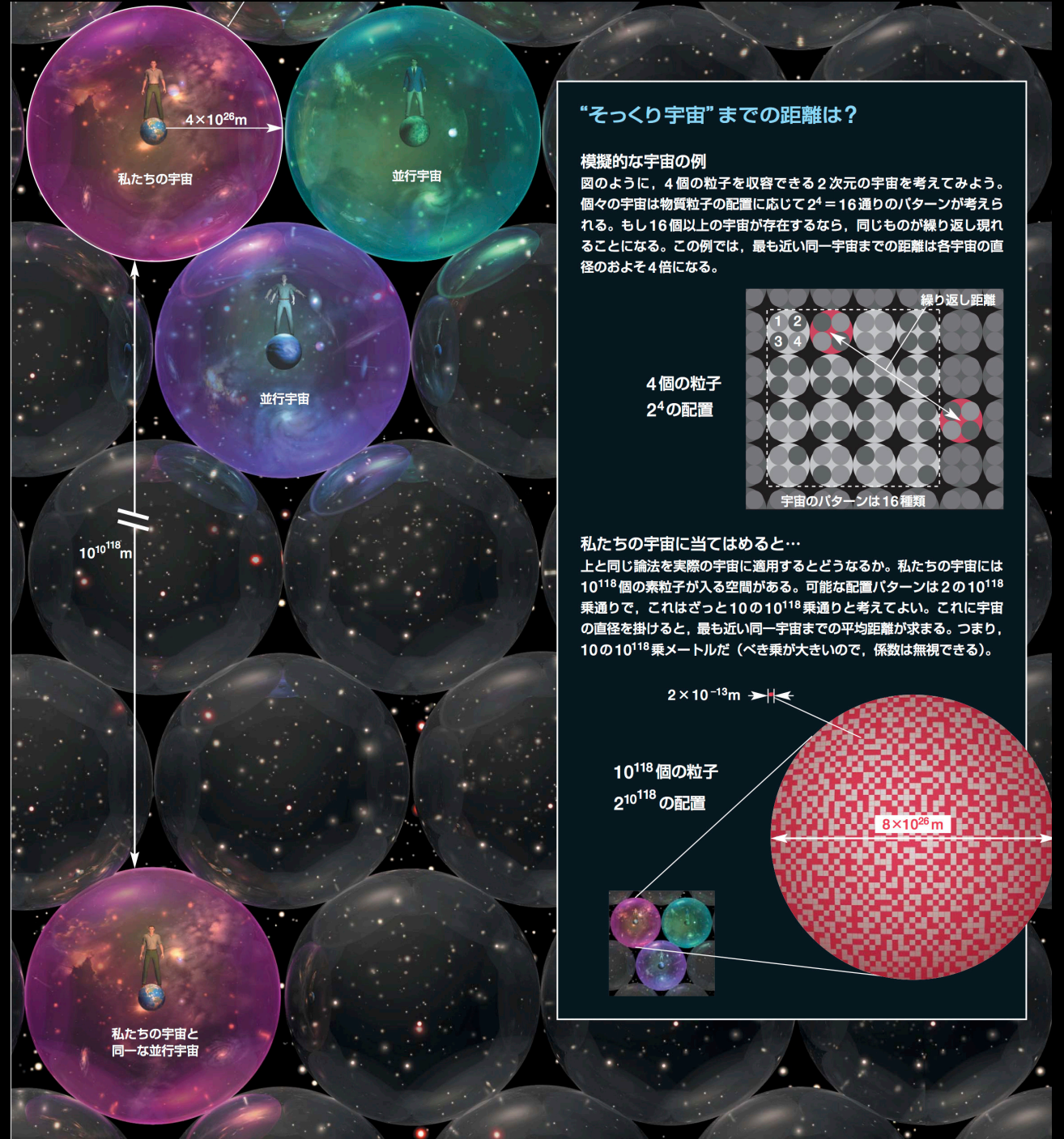
# 隣のクローン宇宙までの距離

- 2の $10^{123}$ 乗個の地平線球を含む膨大な体積を考える
  - それぞれの地平線球内の水素配列は全くランダムだとする
  - 完全に同一の水素配列をもつ地平線球は、全く同じ性質を持つクローン宇宙だとする
- とすれば平均的には、この体積の球と同じ体積をもつ隣の球内には、我々の地平線球のクローン宇宙が存在しているはず
  - 隣のクローン宇宙までの距離（あくまで古典論に基づく）  
138億光年  $\times$  (2の $10^{123}$ 乗) $^{1/3}$   $\sim$  (10の $10^{122}$ 乗)億光年



# 並行宇宙、さらには並行人間は実在するか

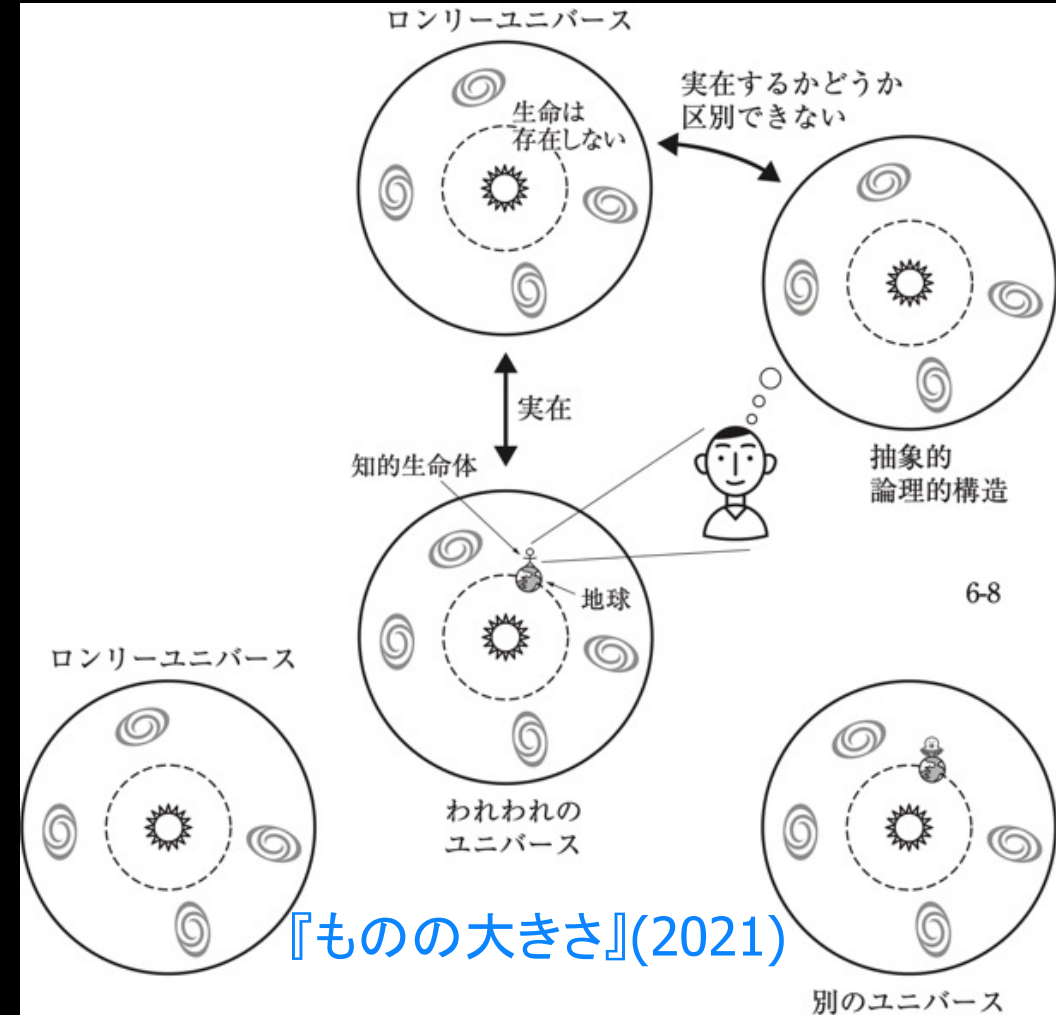
- 宇宙が(10の $10^{122}$ 乗)億光年より大きければ (=ほぼ無限体積)、有限自由度の同一の構造は無限個存在するはず
- 同一原子配置をもつ人間は**意識**まで含めて同じ人間 (≠クローン人間) となるのか？
- 自由意志と古典的決定論



# ロンリーワールド

## 偶然によってすべての可能性が実現する

- すべての「ユニバース」に生物（少なくとも宇宙の存在を認識できるだけの意識をもつ知的生命体）が存在する必然性はない
  - むしろ固有の物理法則にしたがって必然的に進化するユニバースの大半には、それを観測したり熟考したりする生物が誕生しない
  - そのようなユニバースの存在を確認するためには人間が必要（=人間原理）
- しかし逆に言えば、必然的な進化をする宇宙が無数に存在すれば、そこには生物が存在する条件を偶然もつ宇宙が





# 5 まとめ

# 宇宙において生命は普遍的に存在するか

- 自然法則に支配された宇宙の必然的進化
  - 標準ビッグバン宇宙論の成功
  - 宇宙膨張、元素合成、宇宙マイクロ波背景輻射、宇宙の階層構造、など、あらゆる観測事実と無矛盾
- 天体の形成・進化 = 宇宙の元素合成・循環史
  - 天体の中心部で合成された元素が宇宙全体に放出され、次世代の天体の原材料として輪廻転生を繰り返す
- 宇宙進化史 = 生命進化史
  - このような宇宙では生命もやはり必然的に生まれる？
  - 哲学的な議論にとどまらず、直接検証可能な時代に！

# 科学で覚えておくべきたった一つの結論

- 物理学者リチャード・ファインマンは、「この科学文明が滅亡するとした場合、次の世代に伝えたいたった一つの知識は何か」という問いに対して、「**すべての物質は原子からできていること**」だと答えたと言われている
  - これは「世界は粒でできている」、「この世界の多様性は少数の基本構成要素の組み合わせで説明尽くされる」と言い換えられる
- 私なら「**この世界が（数学で記述された）物理法則に支配されていること**」と答えたい
  - どの問題に対してどの公式（物理法則）を用いるべきかなどは些細なこと。**科学（法則）を用いれば原理的には世界を理解できる**という経験事実以上に驚くべき発見はないのでは？

# 宇宙を学び世界を問う

- 果てのないホライズンの拡大
  - 高いところに登る = 「学」
  - 遠くを眺めてその先を考える = 「問」
- 天文学・宇宙物理学の進歩 ⇔ 宇宙と生命の共進化
- 偶然と必然の間
  - 世界は普遍性と多様性をあわせもつ
  - 多様性は偶然に支配された結果だとしても、そもそもなぜ偶然が起こり得るのだろうか？（⇒次回のテーマ）

*Everything not forbidden by the laws of nature is mandatory*  
— Carl Sagan, *Contact*

# 今回の内容に関する一般向け解説本



講談社ブルーバックス 2019年



東京大学出版会 (初版 2006年 第2版 2021年)



朝日新書 2022年1月刊