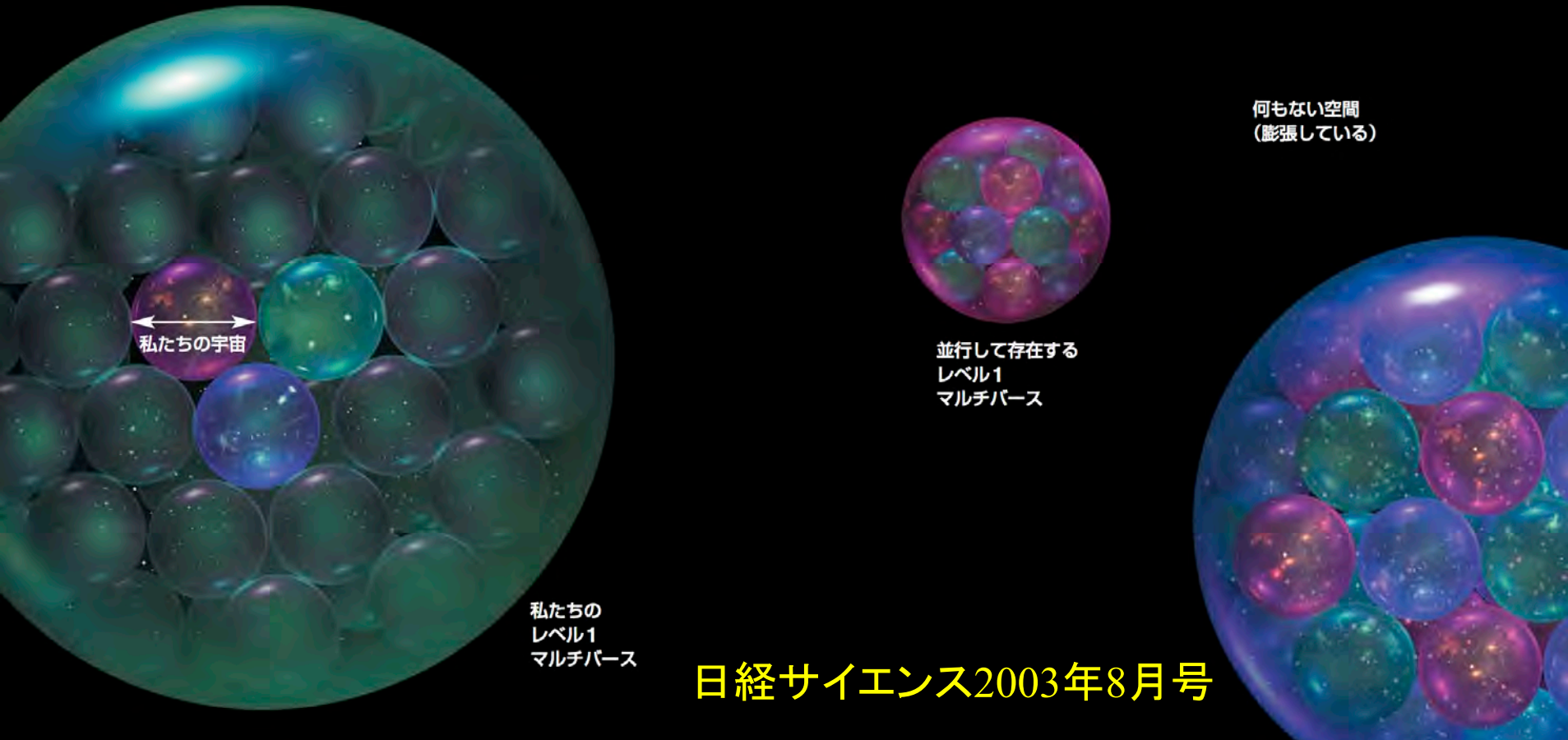


3. 我々の宇宙の外の世界



日経サイエンス2003年8月号

理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

学術俯瞰講義 2017年10月12日16:50-18:35

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2017j

第3回 我々の宇宙の外の世界

3.1 「宇宙」という概念の再検討

3.2 4つのマルチバース

3.3 「我々の宇宙」と微調整

3.4 人間原理とマルチバース

3.5 まとめ

補足資料 3.A 偶然と必然の間

3.1 「宇宙」という概念の再検討

「我々の宇宙」に関するまとめ

- 現在の我々は、半径138億光年の球(地平線球)の内部だけが観測できる
- この観測可能な範囲の宇宙でわかっていること
 - 振る舞いは物理法則に支配されている
 - 物理法則は数学で記述できる
 - 物理法則を特徴付ける物理定数の値は不自然
 - しかしその不自然さのゆえ世界が安定である
 - さらにそのほとんどは未知のダーク成分に占められている(未知の物理法則の存在を示唆)

宇宙に関する素朴な疑問の数々

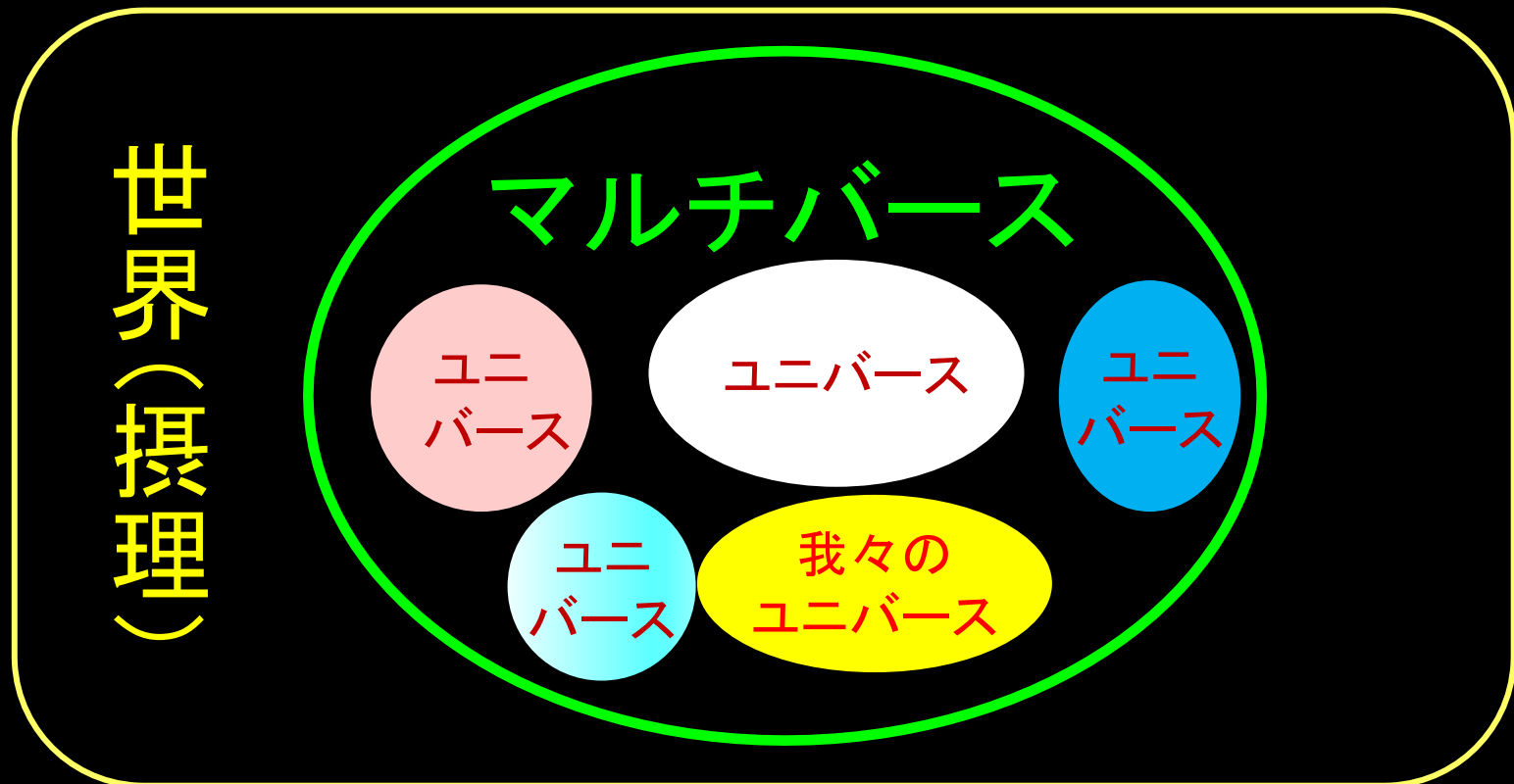
- 宇宙に果てはあるか（体積は有限か）
- 宇宙が始まる前の宇宙はあるか（時間は有限か）
- あの時あれが起こっていなかったら、現在の我々や宇宙の未来はどうなっていたのか
- 物理法則は宇宙のどこにあるのか
- 物理法則はなぜ数学で記述できるのか
- 物理定数はなぜある特別な値をとるのか
- 宇宙（法則）は唯一無二なのか、逆に複数存在し得るさらには実在しているのか

ユニバースの集合＝マルチバース

- 前述の疑問では、「宇宙」が異なる意味で使われている。例えば
 - 「宇宙」が始まる前の「宇宙」はあるのか
 - もしこの答えがイエスなら、一つ目と二つ目の「宇宙」は、異なる階層の概念のはず
 - そうでなければ、質問自体がナンセンス
- そこで実在するかどうかはさておき、個別の宇宙（ユニバース=universe）と、その集合の総称としての宇宙（マルチバース=multiverse）を区別して使い分ける

世界 > マルチバース > ユニバース

- ただしこれはあくまでも私の個人的な感覚にもとづく便宜的な包含関係に過ぎず一般的ではない



宇宙に果てはあるか

- 標準「宇宙」論によれば、我々が住む「このユニバース」には、空間的果てはなく(おそらく)無限大の体積
 - 太平洋の水平線の先には何もない可能性もあるが、そう考えるとそこを行き来する船が観測できることは奇妙である。
 - 同様に、宇宙の地平線(誕生後138億年の現在、我々が観測可能な空間領域で実は半径460億光年の球に対応)よりもずっと先までこのユニバースが広がっていることは観測的にも確か
 - しかし、標準宇宙モデルが予想する無限大の体積を持つかどうかまでは不明
 - 仮に無限大でなくとも、有限で果てがない繰り返しなら、その繰り返しの周期は現在の地平線よりはるかに大きい

宇宙に始まりはあるか

- 古典論である一般相対論を厳密に正しいと考えれば、我々が住む「このユニバース」には明確な時間の始まりがある
 - 今から138億年過去に遡れば、因果関係が破綻する初期特異点に行き着く(一般相対論の帰結)
 - ただし、量子論的効果を考慮すれば特異点は存在しないかもしれない(古典論の枠内でも、一般相対論が厳密には正しくないなら、特異点は存在しないかも)
 - 初期特異点の「前」にも「宇宙」があったのかも知れないが、その場合は「このユニバース」とは因果関係を持たない「別のユニバース」ということになる

ビッグバンは点の爆発ではない

- (定義だけの問題とも言えるが)宇宙論学者は**宇宙の始まりとビッグバンを区別**している
 - 宇宙が、なぜどのように始まったかはわからない
 - ただし、その後急激な膨張(インフレーション)をして、一旦、温度がほぼゼロに近づいてから、温度が再び上昇したと考えられている
 - この時期(≠場所)をビッグバンと呼んでいる
- **我々はビッグバンが起こった広大な空間領域の中に存在している**
 - だからこそ、四方八方から次々とビッグバンの名残の光が到達し続けている

バタフライ効果：古典論の予測不可能性

- 古典力学は決定論（＝初期条件を決めればその後の振る舞いは完全に決まる）。しかし、それを予測することは現実的には不可能
 - *Predictability: Does the Flap of a Butterfly's Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas* (1972年のアメリカ科学振興協会での気象学者エドワード・ローレンツの有名な講演タイトル)
- 宇宙の歴史は、そのなかの個々の現象に敏感に依存
 - とすれば、およそ考えられる無数の可能性を持つ歴史の中から、我々がある特定の歴史に生きているのは何故なのか、という問いもありうる
 - 「クレオパトラの鼻があともう少し低かったら」との地球の歴史の異なる無数の可能性は、単に想像だけにとどまらず、本当に「どこかで」実現しているのではないか？

観測問題：量子論の予測不可能性

- ミクロの世界を記述する量子論はそもそも決定論ではなく、原理的な不確定性(予測不可能性)を内在する
 - 物理量の値は観測して初めて決定される。観測という操作の前には物理量は確定していない。
 - 事象が起こる確率だけが計算できる(コペンハーゲン解釈と呼ばれる標準的な量子論の解釈法)
 - この確率解釈が実験と矛盾する事実は何一つ知られていないものの、何か気持ち悪いのも確か
 - 観測をする前の状態はどうなっているのか？
- シュレーディンガーの猫
 - 観測する前の猫は生きているのか死んでいるのか

量子力学の多世界解釈

- コペンハーゲン解釈によれば、(私の定義では「我々が住む」)宇宙において、異なる状態が可能性として共存しており、なんらかの観測を行って初めてそのうちの一つだけが選ばれて確定する
 - 観測前には、生きた猫と死んだ猫の状態が共存しているし、右の窓から侵入した波乃光子も左の窓から侵入した波乃光子も同等に状態として共存している
- いっそのこと、これらの異なる状態はすべて実現しており、それら一つ一つが異なる宇宙として実在していると考えてはどうか(エベレットの多世界解釈)
 - 異なる状態にある無数の宇宙が並行に存在し、観測者は観測するたびにそのどれかの宇宙に存在していると確認
 - その分岐の経路の履歴が我々が住むこのユニバース(「もしあの時ああなっていたら」も別のユニバースとしてすべて実現)
 - 大胆ではあるが支持する物理学者も多い

法則は宇宙のどこに刻まれているのか

- 法律(law)は、いつどこで誰が決めたかわかっているし、文書として記録も残っている
 - にもかかわらず、法律違反は当たり前のように起こるし、違反かどうか判定する人間すら必要
- 法則(law)は、いつ誰がどころか、具体的な実態としてどこに存在するのかすら不明
 - にもかかわらず、法則違反はありえないし、どのような法則があるのかを探し続ける人間(科学者)すら存在する
- とすれば、宇宙そのものが法則と同一なのでは

なぜ法則は数学で正確に記述可能か

■ ガリレオ・ガリレイ

- 宇宙の原理は数学という言葉で記述されている

■ ユージン・ウィグナー

- 数学の不合理的なまでの有効性

■ アルバート・アインシュタイン

- 経験とは独立した思考の産物であるはずの数学が、物理的実在とこれほどうまく合致するのはなぜか

■ リチャード・ファインマン

- 数学を知らずして自然界のもっとも深遠な「美」を理解することはできない

■ 世界(法則)と数学は実は同じものなのでは？

3.2 4つのマルチバース

マックス・テグマークが提唱する 4つの異なる階層のマルチバース

レベル	説明	備考
1	現在観測可能ではない地平線の外側にも、同様の宇宙が無限に存在。その後少しずつ観測可能な領域に入ってくる	同じ時空上に存在し、同じ法則を持つ無数の有限宇宙の集合。空間が無限であれば、全く同じ性質の有限の宇宙が実在する
2	無限個のレベル1が、原理的にも因果関係を持たないまま、階層的に存在	同じ時空だが、そこでの法則は異なる。インフレーション説と相性が良い
3	量子力学の多世界解釈に対応する無数の時空の集合	時空の意味が異なり、我々はそのレベル3上を次々と渡り歩く存在
4	異なる数学的構造に対応する具体的な時空は必ず実在	抽象的な法則は、必ず物理的実体を伴うはずとの信念にもとづく

**Max Tegmark: Parallel Universes in Scientific American, May 2003
and in astro-ph/0302131**

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



- 我々の地平線球の外側にも、同じく地平線球(レベル1ユニバース)が無数にある
- レベル1ユニバースは現在は「まだ」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
- 同じレベル1マルチバース内のレベル1ユニバースは、物理法則は同じだが初期条件が異なる

日経サイエンス2003年8月号



現在見えない領域にも宇宙は広がっている

■ レベル1マルチバースの存在はほぼ自明

- (ほぼ)無限に広がる空間内で、我々の地平線球が特殊な位置にあるとは考えられない

上と同じ論法を実際の宇宙に適用するとどうなるか。私たちの宇宙には 10^{118} 個の素粒子が入る空間がある。可能な配置パターンは2の 10^{118} 乗通りで、これはざっと10の 10^{118} 乗通りと考えてよい。これに宇宙の直径を掛けると、最も近い同一宇宙までの平均距離が求まる。つまり、10の 10^{118} 乗メートルだ (べき乗が大きいため、係数は無視できる)。

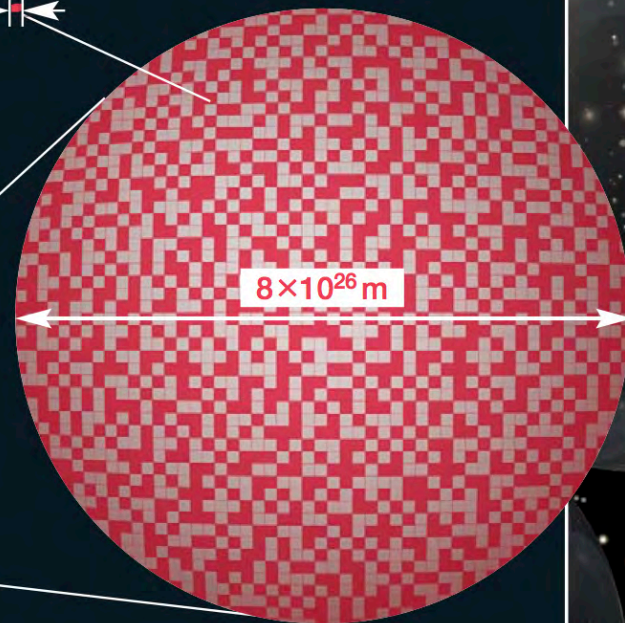
■ さらに我々のレベル1ユニバースと同一のレベル1ユニバースのクローンがどこかに存在する(?)

- 地平線球内の素粒子の数は有限。したがって、宇宙が無限の体積を持つとするならば、どこかで同じレベル1ユニバースが繰り返し登場するはず

$2 \times 10^{-13} \text{m}$

10^{118} 個の粒子
 $2^{10^{118}}$ の配置

$8 \times 10^{26} \text{m}$

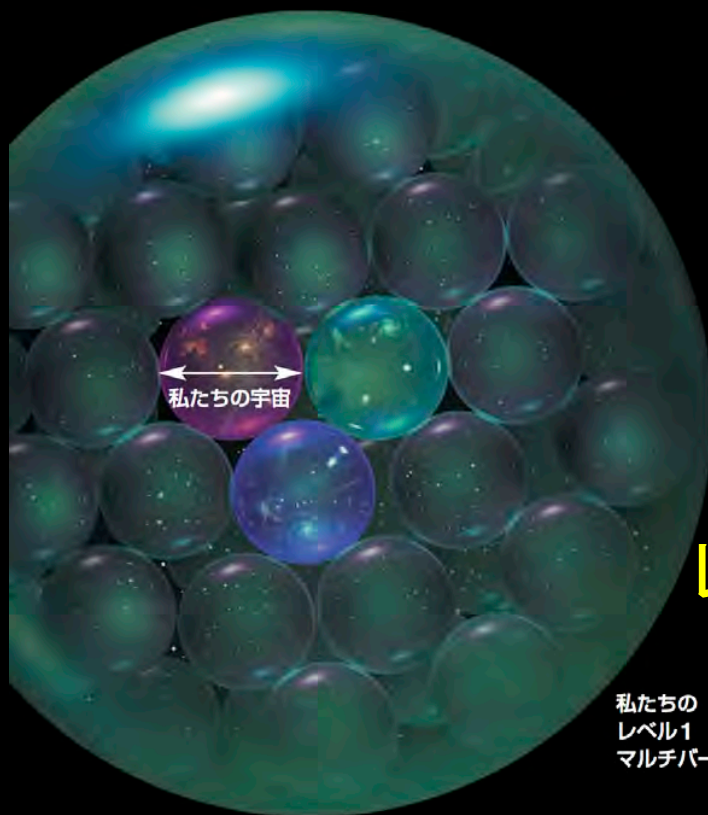


レベル2 マルチバース

- レベル1マルチバースはレベル1ユニバースを元とする集合
- レベル1マルチバースを元とする集合が、レベル2マルチバース

インフレーション理論からは、レベル1よりもやや精巧な別種の並行宇宙の存在が浮かび上がってくる。私たちのレベル1マルチバース（私たちの宇宙とそれに隣接する空間領域）は泡のようなもので、これがより大きなほとんど空っぽの空間に埋め込まれ

ているという考え方だ。空間の中には別の泡があり、私たちの泡とは切り離されている。雲の中の水滴のようなイメージだ。こうした核ができる際、それぞれの泡では量子場が異なるため、他の泡とは異なった特性が生まれる。



私たちの宇宙

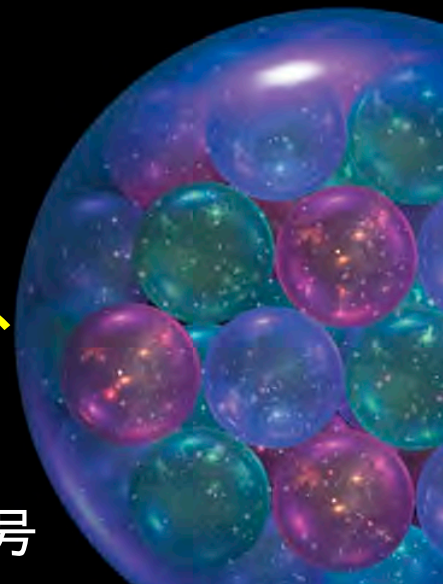
私たちの
レベル1
マルチバース



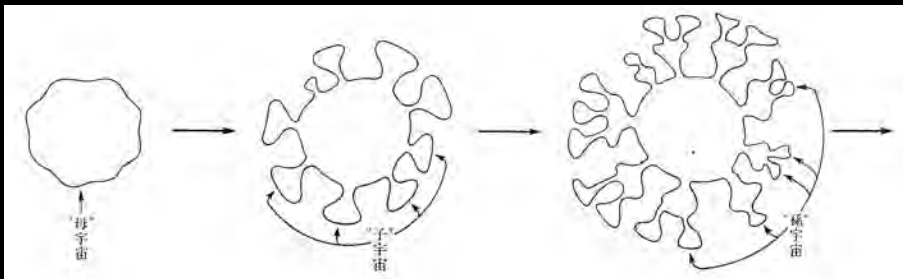
並行して存在する
レベル1
マルチバース

何もない空間
(膨張している)

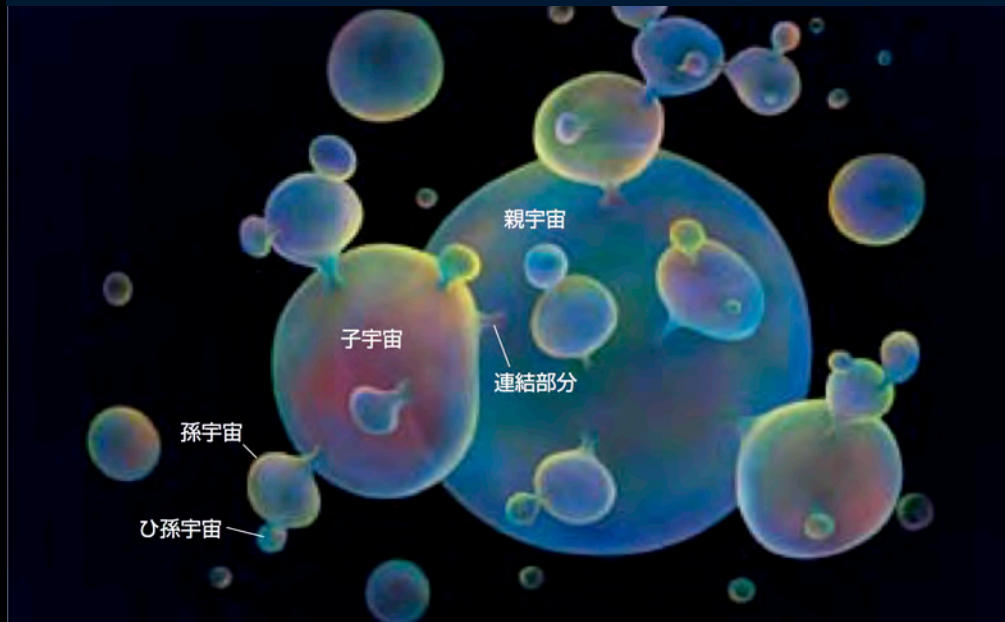
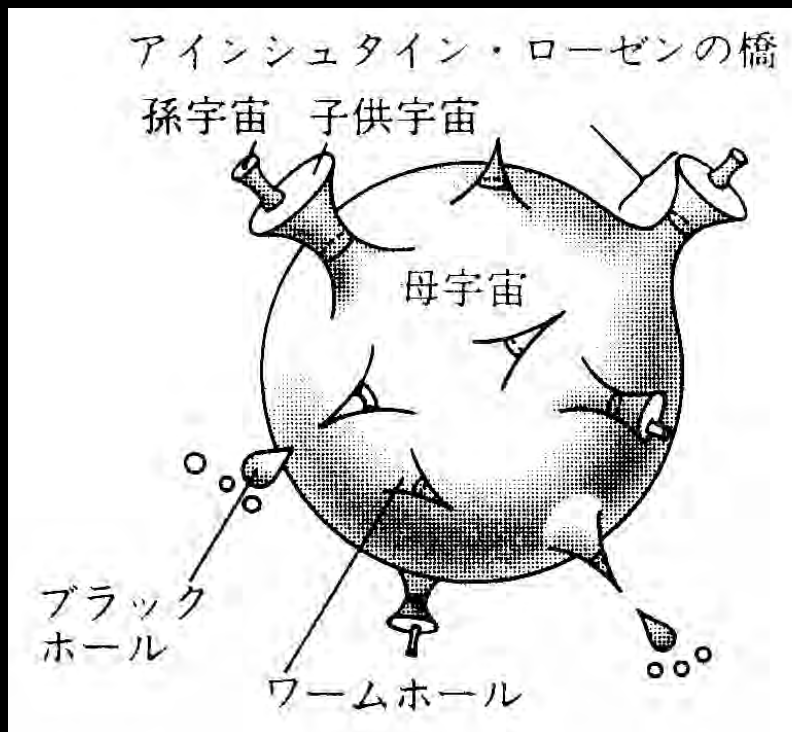
レベル2マルチバース



インフレーション説による階層的宇宙



Newton 2016年4月号



K.Sato et al. (1981)

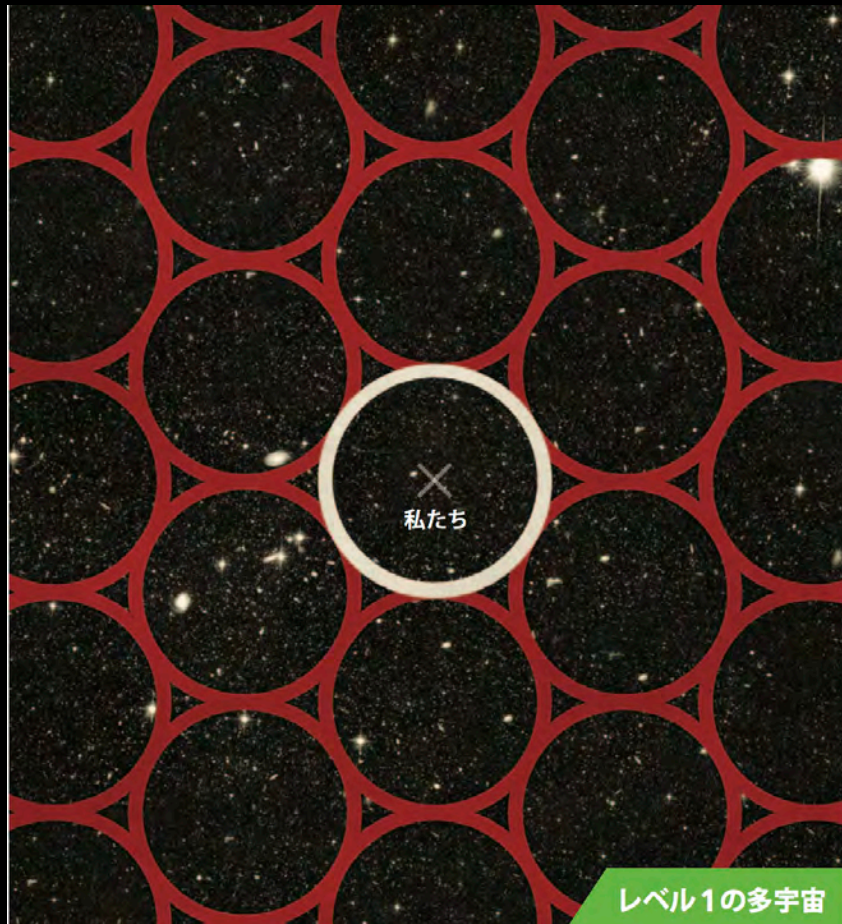
レベル1とレベル2の関係

- 我々の地平線球はレベル1ユニバースの一例
- レベル1マルチバースはレベル1ユニバースを元とする集合
- レベル2マルチバースはレベル1マルチバースを元とする集合

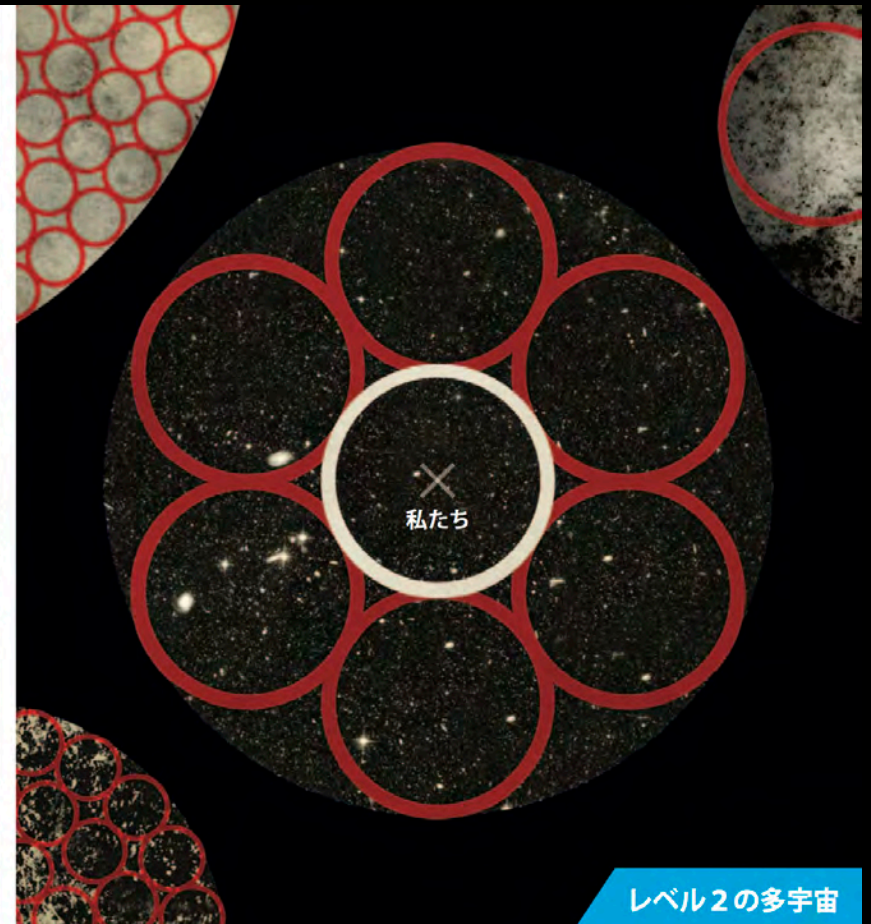


420億光年

観測可能な宇宙 (私たちの宇宙)



レベル1の多宇宙



レベル2の多宇宙

因果関係を持たないマルチバース

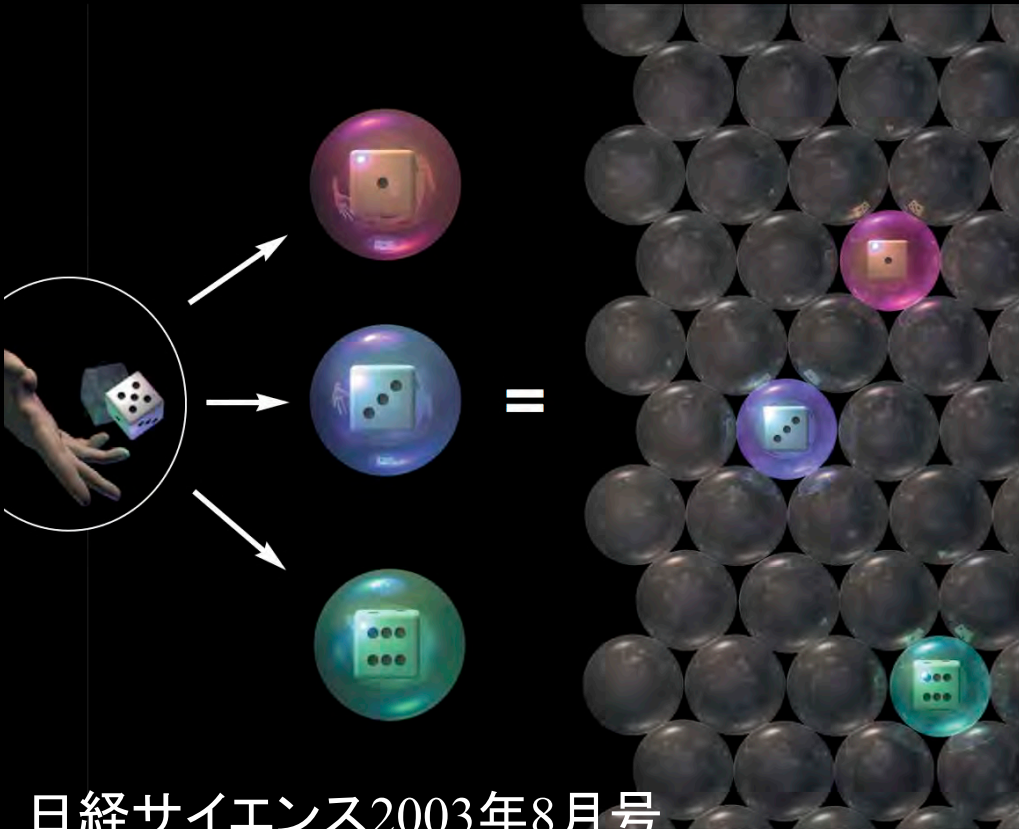
- 同じレベル1マルチバースに属する異なるレベル1ユニバースは同じ時空を共有。(光速度が有限であるため)現在は因果関係を持たないが、時間が経てばやがて互いの存在を確認できる。
- 一方、レベル2マルチバースを構成する異なるレベル1マルチバースは、同じ時空上に存在しているものの、互いに因果関係を持たない
 - 異なるレベル1は互いが指数関数的(超光速)に遠ざかっており、いくら時間が経っても光は到達しない
 - 実は、我々が属するレベル1マルチバース内ですらも、ダークエネルギーが宇宙定数であれば、異なるレベル1ユニバースはやがて指数関数的に遠ざかり因果関係が切れ、原理的にも互いの存在を認識できなくなる

レベル3 マルチバース

エルゴード性

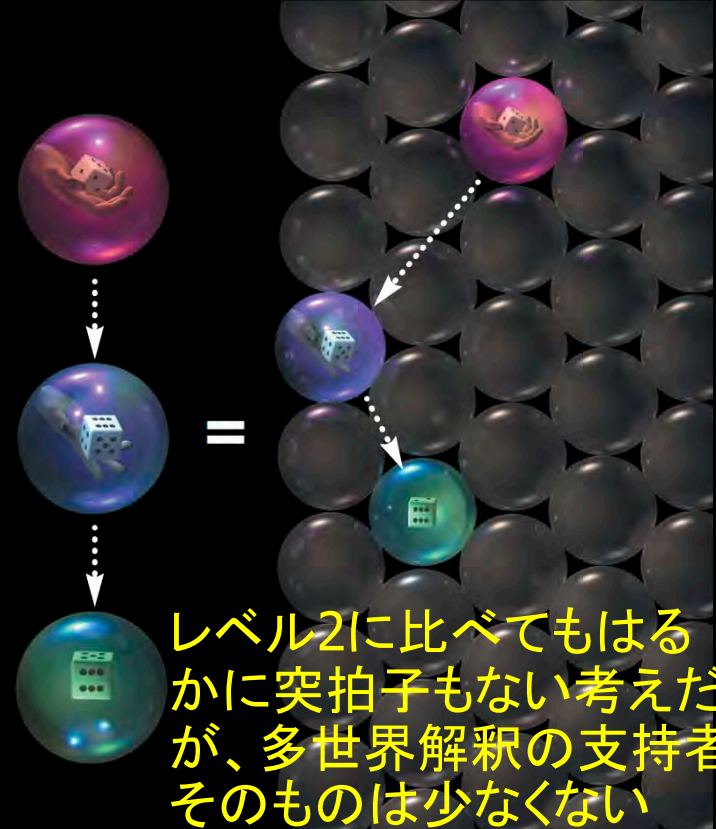
エルゴード性の原理によると、量子並行宇宙はもっと平凡なタイプの並行宇宙と等価だ。1つの量子宇宙はやがて状態が確定した複数の宇宙に分岐する（左）。しかし、こうして新たに生まれた宇宙は、どこか別の空間（右、図ではレベル1マルチバース）にもとから存在していた並行宇宙と変わらない。さまざまな事象がどんな順序で起きるのかを体現したものが並行宇宙だと考えるのがポイントだ。この考え方はどんなタイプの並行宇宙にも当てはまる。

■ 量子力学の多世界解釈に基づく



時間の本質

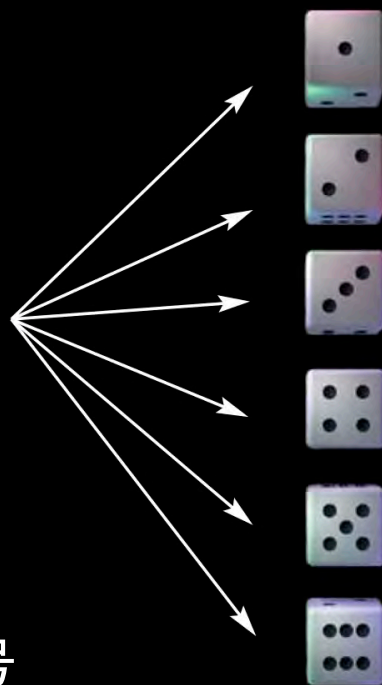
普通、時間は変化を記述するための手段と考えられることが多い。物質はある瞬間にある配置を取り、次の瞬間には別の配置になるという具合だ（左）、しかし、並行宇宙の概念では別の見方ができる。考える物質配列が一連の並行宇宙の中にすべて含まれているなら（右）、時間とはこれらの宇宙に順番をつけるやり方にすぎない。個々の宇宙は静的なもので、変化は幻想ということになる。もっとも、この幻想は興味深いものではあるが。



一つのユニバース内に異なる可能性が同時に存在しているのではなく、異なる可能性ごとに違うユニバースが実在しているのでは？

量子力学の考え方によると、膨大な数の並行宇宙が存在する。ただし、「それがどこに存在するか」という点については、解釈を拡張する必要がある。私たちが実感できる通常の空間ではなく、考えうるすべての状態を含む抽象的な領域の中に存在すると考え

るのだ。世界が取りうるすべての状態（量子力学的な意味での状態）の1つひとつが、異なる宇宙に対応すると考えられるだろう。こうした並行宇宙の存在は、波動の干渉や量子計算といった実験を通じて垣間見ることができる。



量子のサイコロ

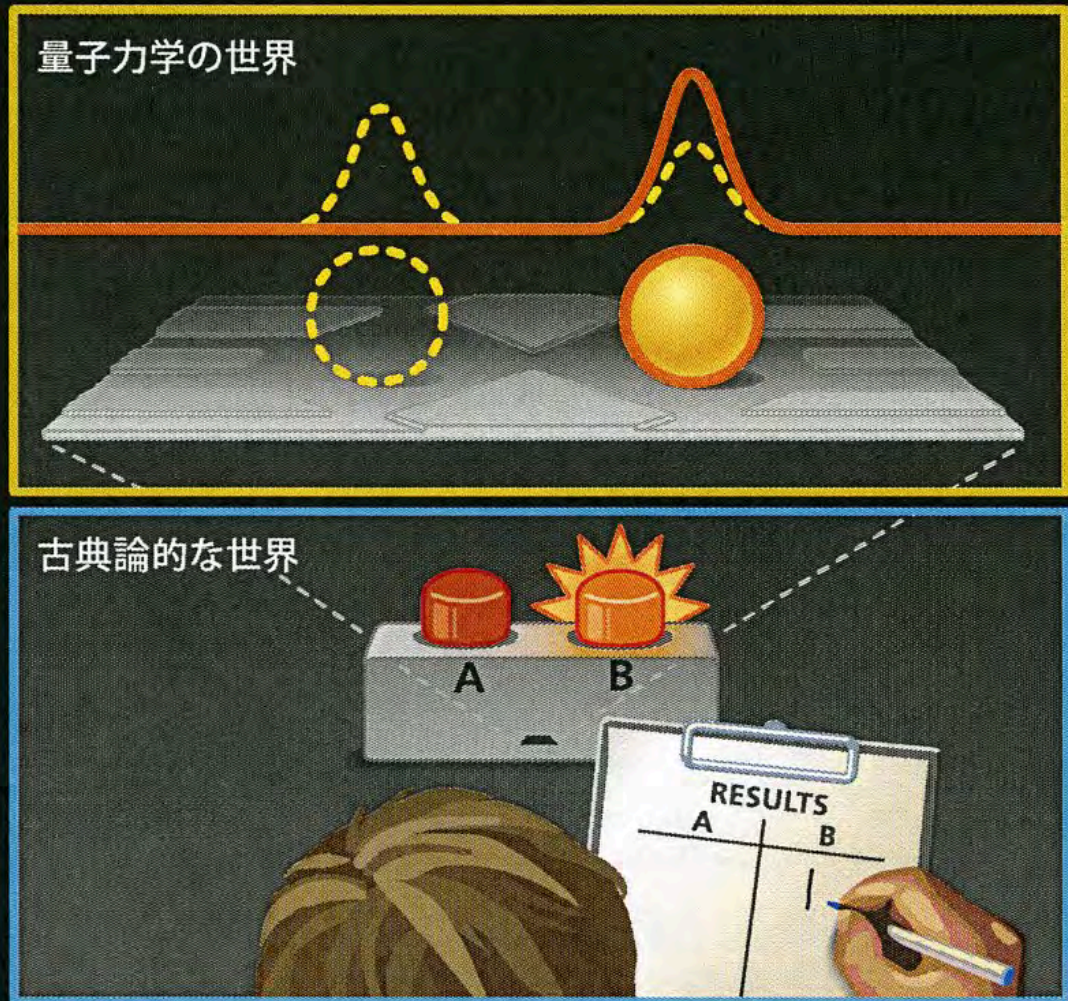
目の出方が完全に無秩序な「量子のサイコロ」を考える。これを振ると1から6までの目のいずれかに落ち着くが、その出方は無秩序だ。しかし量子力学の考え方では、振られたサイコロは1から6までの目を同時に示す。この矛盾した見方に折り合いをつけるには、サイコロが別の宇宙で別の目を出すと考えればよい。6つある宇宙の1つでは「1」、もう1つの宇宙では「2」を出すという具合だ。私たちはいずれかの宇宙の中にとらえられているので、量子世界の全体像のうちごく一部しか実感できない。

量子力学のコペンハーゲン解釈

日経サイエンス2008年4月号

コペンハーゲン解釈

ボーアらによると、観測する側である測定器（と測定する人）は古典論的な世界にいて、量子力学の世界とは隔絶している。こうした古典論的な測定器で量子力学的な重ね合わせ状態を観測すると、波動関数は、重ね合わせになっていた状態のうちどれか1つにランダムに収縮し、ほかの状態はすべて消え去る。なぜそうした収縮が起きるのかは、量子力学の方程式からは出てこない。波動関数の収縮は、量子力学とは別に、新たな仮説として付け加えられたものだ。



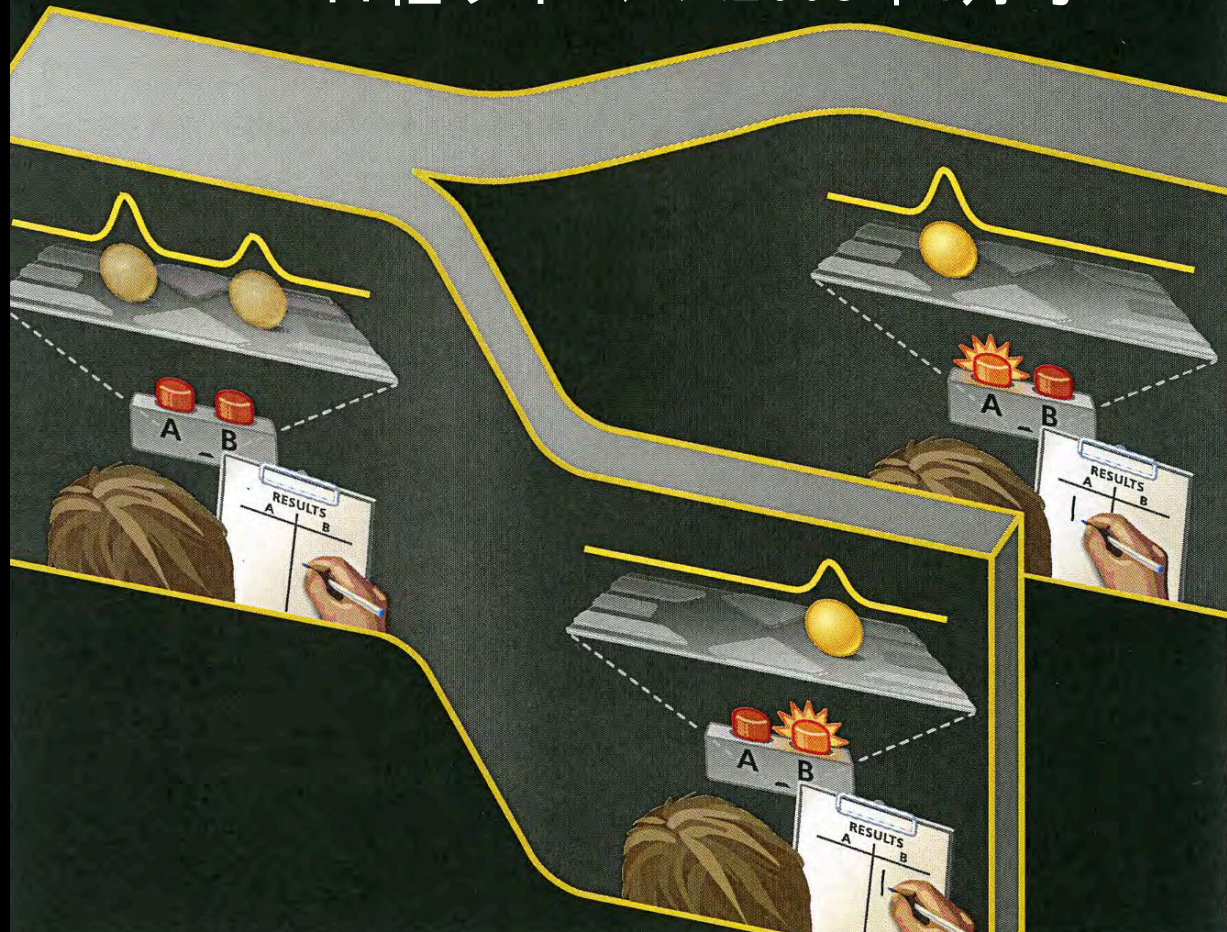
量子力学の建設に大きな寄与をしたニールス・ボーアが、コペンハーゲンの研究所で展開。現在に至るまで量子力学の標準的解釈

エヴェレットの 多世界解釈

■ プリンストン大学の学生であったヒュー・エヴェレットが提案。指導教員であったジョン・ホイーラーが高く評価したが、ボアには受け入れられなかった。極めて独創的な解釈であり、支持する物理学者も多いが、標準的とは言えない。

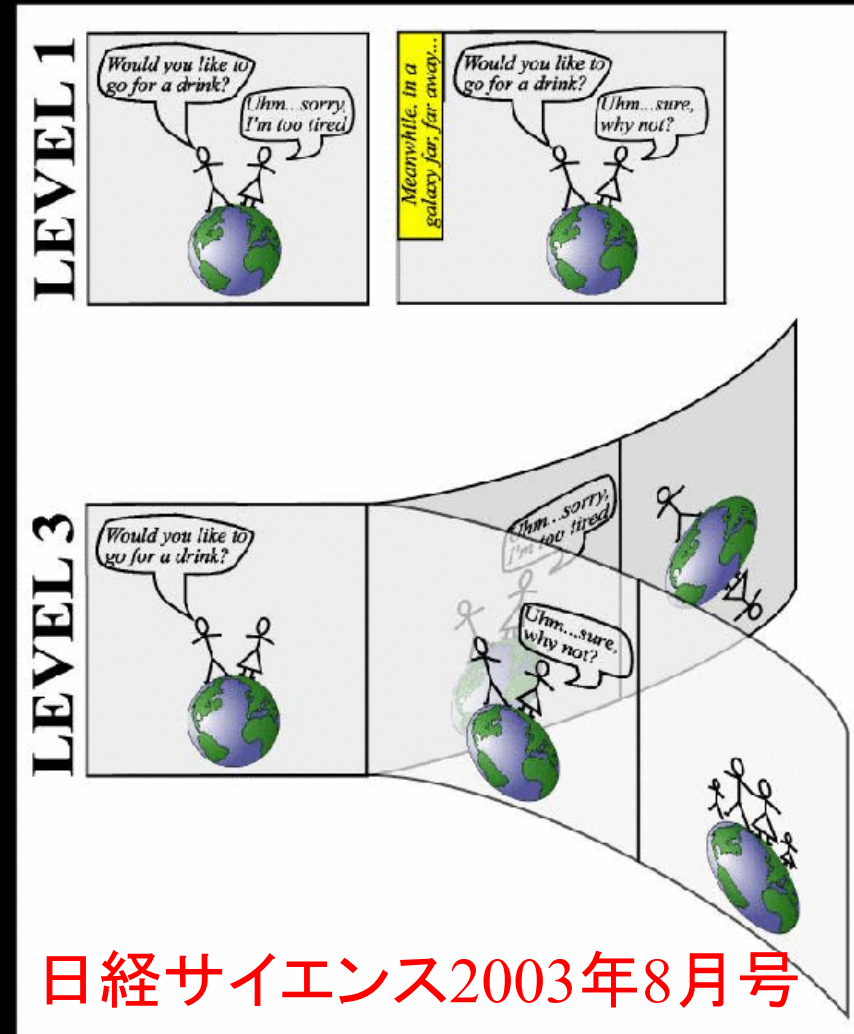
エヴェレット解釈は、観測する側である測定器（と測定する人）を、量子力学の通常の原理と方程式に従うもう1つの量子系であるとみなして、観測の過程を解析したという点で革新的だ。解析の結果、エヴェレットは次のように結論づけた。観測後に得られるのは異なる観測結果の重ね合わせであり、その重ね合わせの各要素は、分岐した宇宙に対応するそれぞれの分枝のようなものだ。私たちがマクロな世界で重ね合わせを見ることができないのは、それぞれの分枝にいる多くの「私」は、自分がいるその分枝の中のことしか知覚できないからだ。

日経サイエンス2008年4月号



エヴェレットの多世界それぞれに 対応した(並行)宇宙が実在する？

- エヴェレットの多世界解釈を素直にうけとめる
 - 外から見れば(言わば神の視点)あたかも我々の宇宙が次々と異なる宇宙に分岐するように解釈できる
 - それぞれの事象が起こる確率に対応した無数の並行宇宙が実在
 - 我々は、そのマルチバースの中のユニバースを、旅人のように訪問し続ける
 - 我々にとっての時間とはその訪問の順序に対応する概念



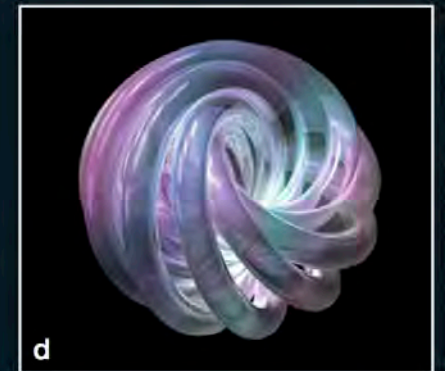
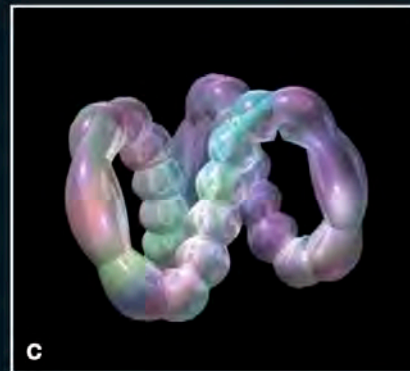
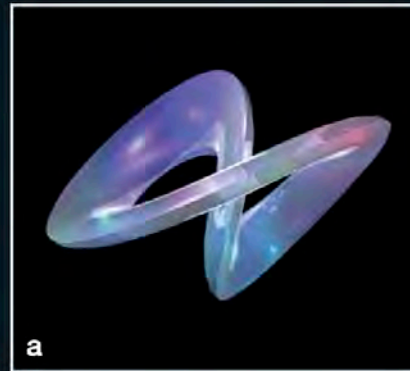
日経サイエンス2003年8月号

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)

- 瞬時に死に至らしめる弾丸発射装置
 - ただし実際に発射するか空撃ちかは半々の確率でランダムに決まる
 - 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ってしまう。
 - 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

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
 - とすれば法則が数学で記述できるのは当たり前
 - (無矛盾な) 数学的構造に対応した無数の宇宙が実在する



左図は、空間内での地球の軌道の構造だが、右図は抽象的空間を描いたイメージ

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の実在と同義ではないか？

Lonely World/Universe

- 無限に広がった時空に「ユニバース」があると
する。しかしそこには生物(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
体という意味での)は存在しない
- そのユニバースは、その物理法則にした
がって膨張し成長するだろうが、それを観測し
たり熟考したりする生物はいない
- そのようなユニバースは「実在」と呼んでいい
のか？もしそうなら、純粹に数学的な構造を
も実在と認めざるを得ないのでは？

3.3 「我々の宇宙」と微調整

森羅万象はどこまで理解できるのか

- 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
- では、科学の終着点は？
 - 究極理論 (Theory of Everything) を発見する
 - ある程度少数の基本法則にまで還元できるものの、なぜそれらが成り立つかは説明できず、偶然に帰せざるを得ない
- 究極理論の存在は証明できないが、その存在を信じる物理屋は多い
 - しかし究極理論のもとで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。これは不可能に思える

微調整 (fine tuning)

- 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**が潜んでいると疑うべき(つまりそのパラメータを場の変数とみなし、その運動方程式を考える)

素粒子の世界を特徴付ける値

- ニュートリノの質量 m_ν
 - まだ正確にはわかっていないが、0.1eV程度だと予想されている
 - 質量を持つことが確認されている粒子の中でもっとも軽い
- 電子の質量 $m_e \doteq 0.5\text{MeV}$
- 陽子の質量 $m_p \doteq 1\text{ GeV}$
- 電子とニュートリノの質量比: $m_e/m_\nu \doteq 5000$
- 陽子と電子の質量比: $m_p/m_e \doteq 2000$

これらの値は、より深い原理によって説明できるものなのか、それとも我々の自然界が偶然持っている性質に過ぎないのか？

宇宙あるいは自然界が我々のものしかないならばこのような問いかけは無意味なのであろう。では宇宙は一つしかないのだろうか？

(我々の)宇宙を特徴付ける値

■ 現在の宇宙を特徴付ける値 (定数ではない、時間変化)

- 宇宙の年齢: 137億年
- 宇宙の温度: 3度 (摂氏マイナス270度)
- 宇宙の密度: 10^{-29} g/cm³
- 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)?

我々の宇宙の法則の絶妙なバランス

- **強い相互作用の結合定数: α_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: α_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: α_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
- **相互作用定数が極めて限られた範囲にない限り、生物を誕生させることは不可能。そのような偶然がなぜ実現している？**

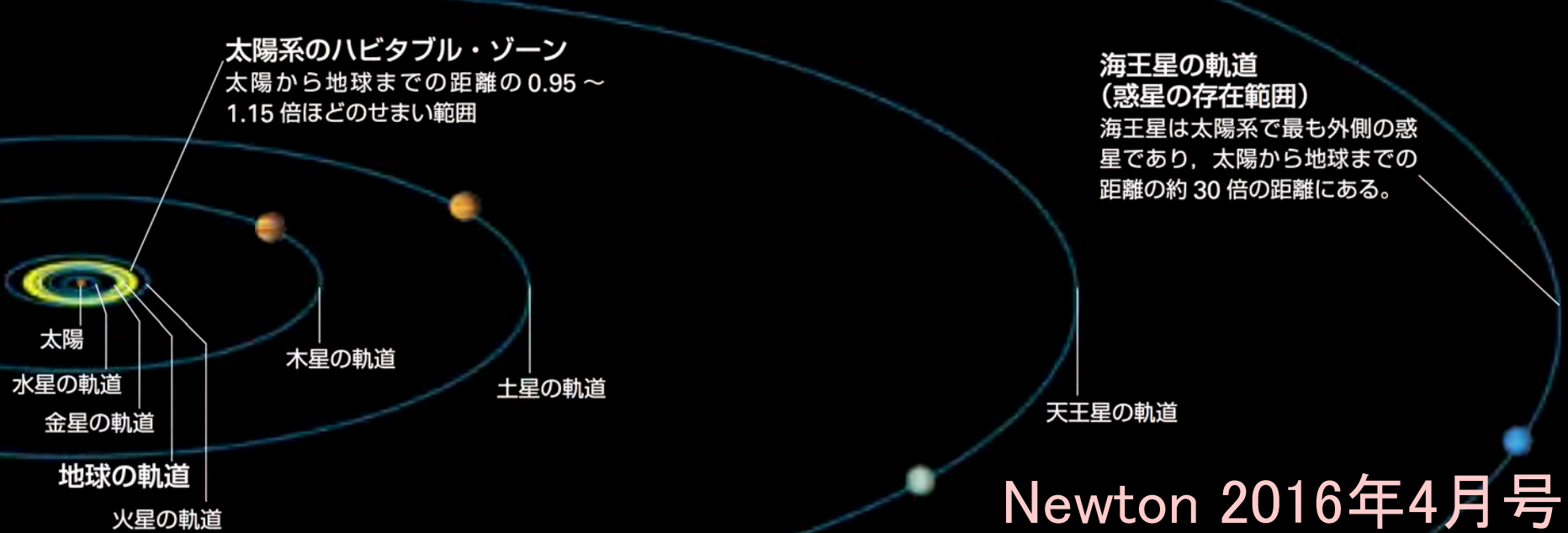
3.4 人間原理とマルチバース

物事には必ず理由があるのか

地球がハビタブル・ゾーンに入っているのは幸運

太陽系のハビタブル・ゾーン
太陽から地球までの距離の0.95 ~
1.15 倍ほどのせまい範囲

海王星の軌道
(惑星の存在範囲)
海王星は太陽系で最も外側の惑星であり、太陽から地球までの距離の約30倍の距離にある。



Newton 2016年4月号

水星・金星・地球、火星のイラストは省略した。

太陽系の各惑星の軌道と、ハビタブル/ゾーンをえがいた。惑星の存在範囲にくらべて、ハビタブル・ゾーンが非常にせまい範囲であることがわかる。地球が幸運にもハビタブル・ゾーンにあるため、私たち人類が誕生できた。なお、ハビタブル・ゾーンの範囲については諸説ある。ただしいずれにせよ、その範囲は広くない。

■ **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(ハビタブルゾーン)。これから何かわかることはあるか？

偶然に意味を見い出す

■ 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。

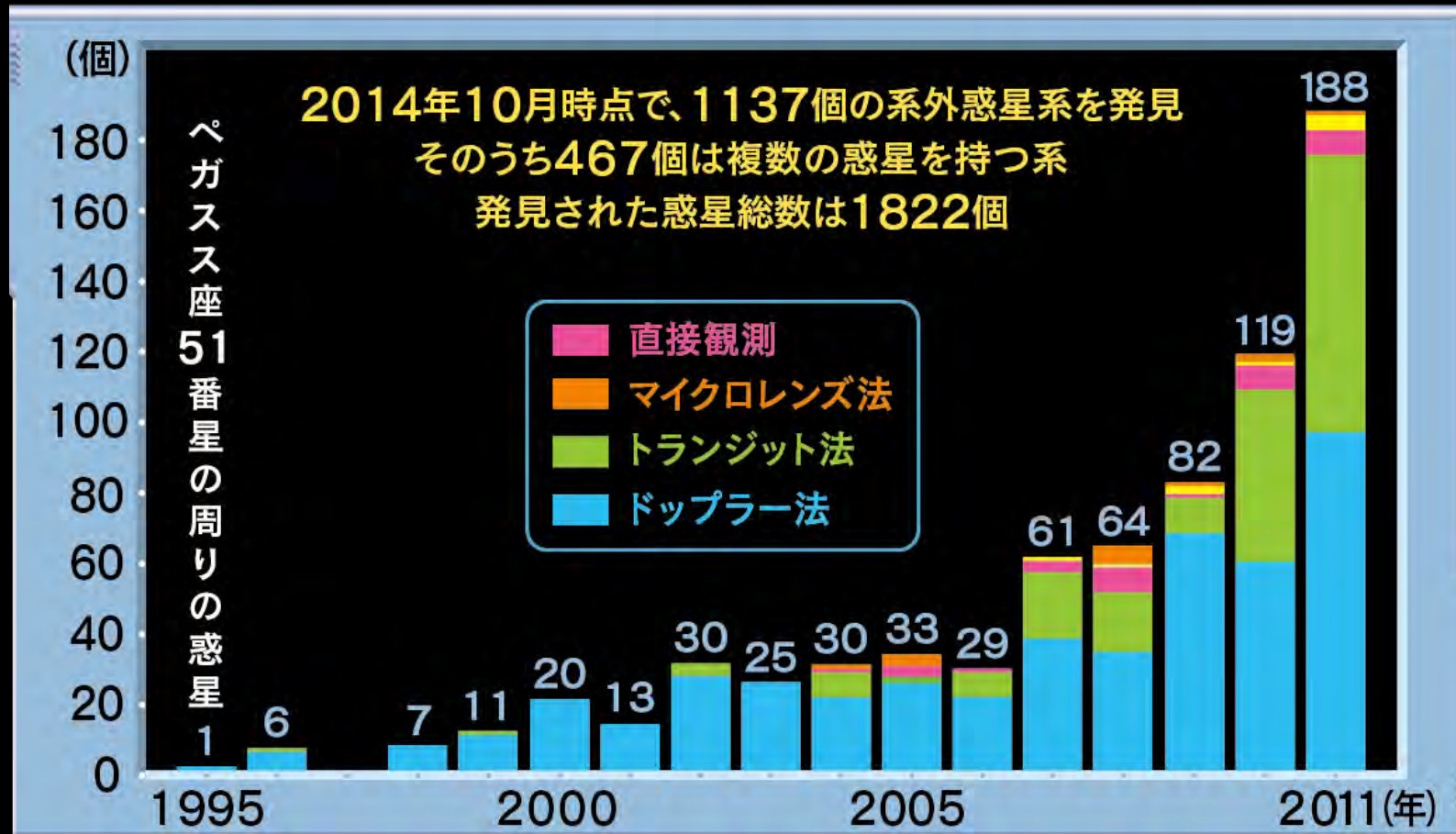
■ 回答例 2: 実は深い意味を持つ

- 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

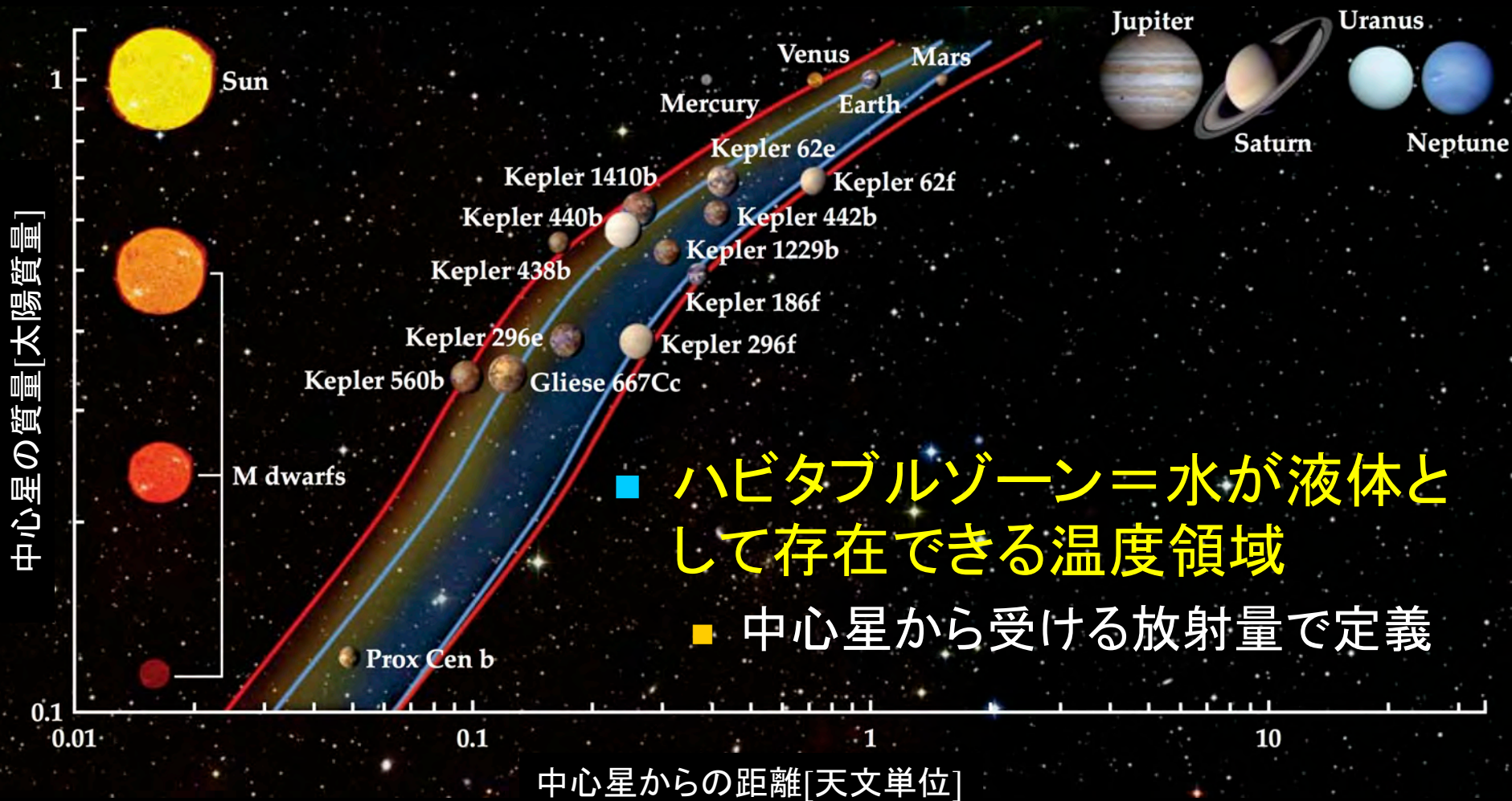
この問いの正解は不明だが、太陽系以外に
無数の惑星系が存在していることは事実



系外惑星発見数の年次推移



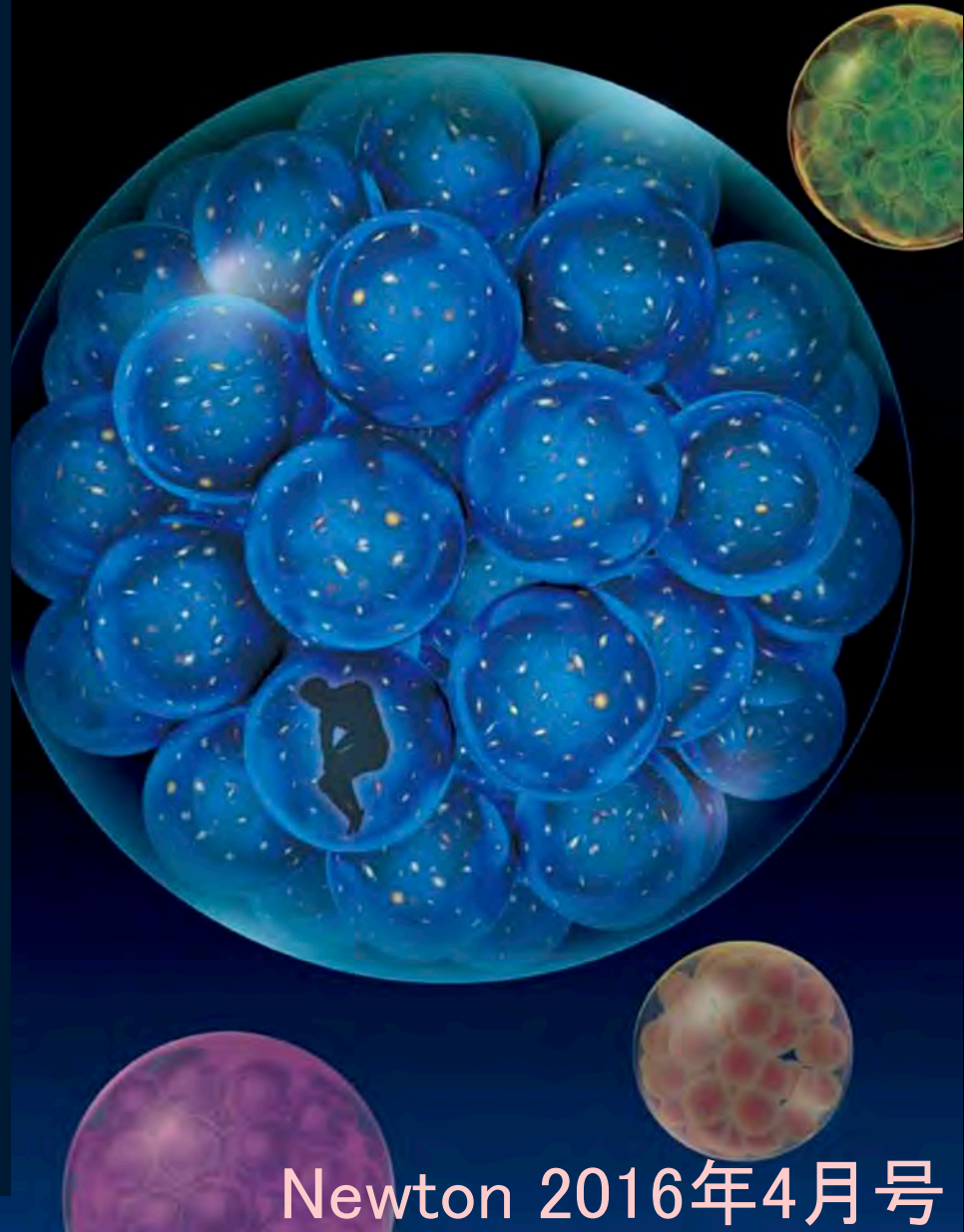
ハビタブル惑星候補



物事には必ず理由があるのか

■ 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？



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からなる。

人間原理と物理法則

- マルチバースの存在を認めよう
- そのなかのユニバースでは物理法則が異なっている
 - 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、たまたま人間を生む偶然が積み重なったユニバースの一つが我々の住む宇宙
 - 大多数の「普通」のユニバースでは人間は誕生しないから、「これが普通」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、だからこそこそこには「なぜこのユニバースはこのように不自然なのか」と思い悩む人間が存在する
 - とすれば、人間が生まれるような奇跡・偶然がなぜ起こりえたのか不思議に思う必要はない

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(整数回)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当たり前
- 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ようなものならば、人間が存在しないような宇宙は実は無数にある(マルチバース)と結論すべきでは？
 - 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納得できる

3.5 まとめ

universeからmultiverseへ

- 天文学・宇宙論の歴史は、我々の存在が唯一絶対なものではなく普遍的・自然な存在であることを証明する方向に進んできた
 - 天動説から地動説へ、天の川から銀河宇宙へ、宇宙マイクロ波背景放射の等方性、太陽系外惑星
- **我々の宇宙が唯一無二のものであるという考え方は、時代に逆行しているのではないか？**
 - 我々が存在するユニバースは決して唯一絶対的なものではなく無限に存在するマルチバースのなかの一例にしか過ぎないかも？
 - そうならば人間原理による説明が有効

マルチバースはあくまで一つの考え方

- 宇宙が無数に存在すると仮定することによって、多くの異なる不思議さ・不自然さを回避できることは事実
 - なぜ自分は、よりもよってこの宇宙のこの場所この時刻だけに存在しているのか？
- ただし、マルチバースの存在を科学的に証明することは不可能
 - もしそれができたとすればその宇宙は我々の宇宙・世界の一部に過ぎないことになってしまうはず
- マルチバースという考え方そのものは決してSFやとんでも系ではない一方で、検証可能性という立場から考えれば正統的な科学の枠にはない

マルチバースを考える意味

- すべての物事には理由・答えがある(究極理論的世界観)という信念を問う
- すべての物事が必然とは限らず偶然は不可避なはず(それでも納得したい⇒人間原理的世界観)
- 人間原理:「人間が存在する」という条件付確率を考えることで、不思議さを減らすベイズ統計的世界観
 - 人間原理の実現には、マルチバースの存在が前提となる
 - 科学による説明の限界をある程度緩和できる
 - 人間原理+マルチバースは観測的に実証することは不可能であろう。したがって、通常自然科学という範疇とは言えないかもしれないが、第一級の哲学としての価値は高い

なぜ宇宙は人間に都合がよいのか？

「人間原理」と「無数の宇宙」による新しい宇宙観

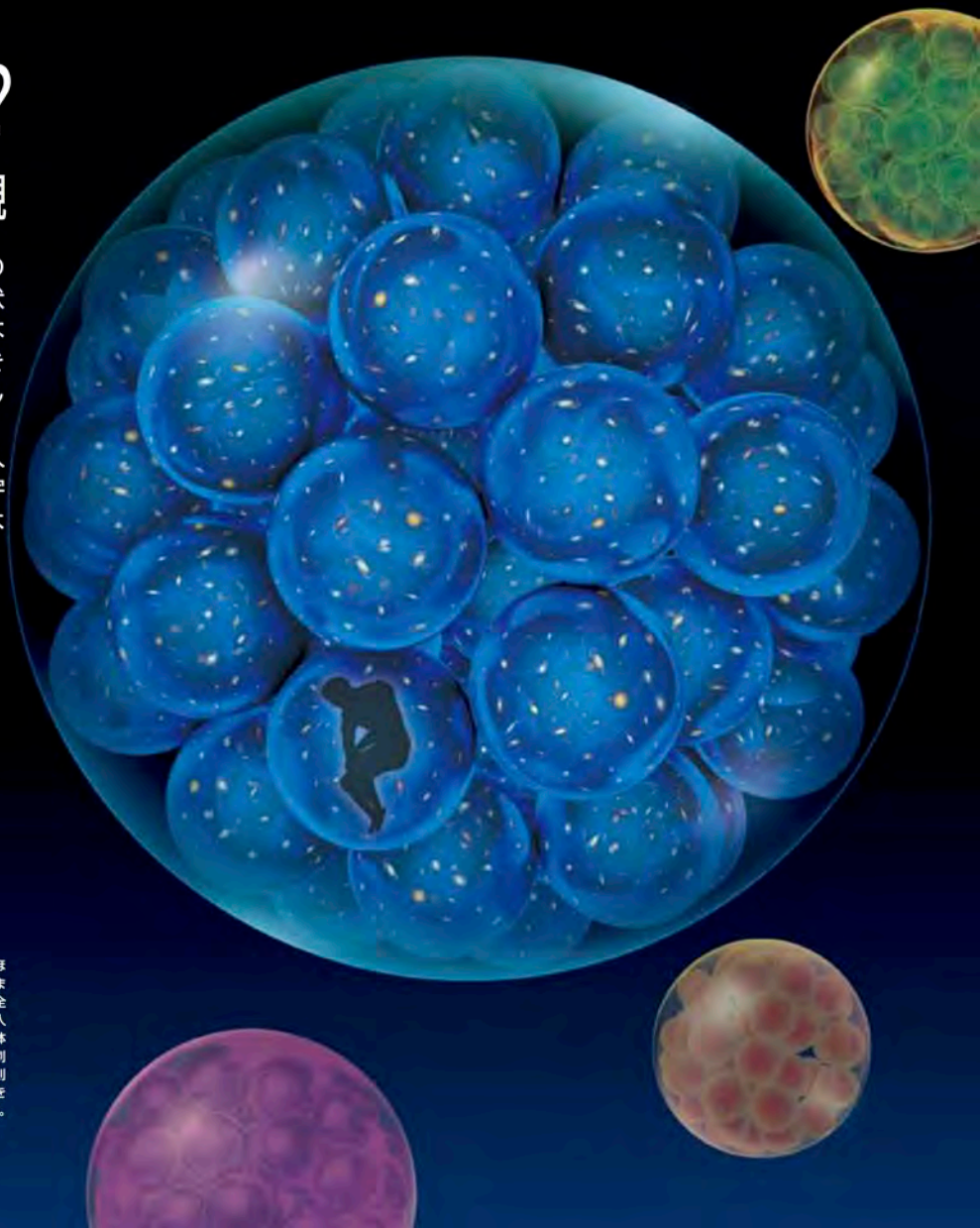
宇宙のことが明らかになればなるほど、ある一つの疑問がどんどん深刻になっていくのだという。「この宇宙は、人間（あるいは知的生命）が存在できるために都合が良い状況が見事に整っている。いや、整いすぎている。まるで宇宙が『知的生命よ、誕生しなさい』とでも言っているかのようだ。なぜ宇宙は、人間にとってこれほど都合よくできているのだろうか」。たとえばプラスとマイナスで引きつけ合う電気力がほんの少し強かっただけでも、人間は誕生できなかつたはずなのだという。

この疑問に対して、誰もが納得できる答はまだ見つかっていない。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る。人間原理とマルチバースによる新しい宇宙観をのぞき見てみよう。

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

イラスト右側の人間のシルエットは、人類が、「宇宙はなぜこれほど人類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。記事を最後まで読んだら、もう一度このイラストを眺めていただきたい。



私が今回の講義で伝えなかったこと

(The Feynman lectures on physics, volume III, Feynman's Epilogue: "purpose of my teaching")

- I wanted most to give you some appreciation of the wonderful world and the physicist's way of looking at it, which, I believe, is a major part of the true culture of modern times. *(There are probably professors of other subjects who would object, but I believe that they are completely wrong.)*
- Perhaps you will not only have some appreciation of this culture; it is even possible that you may want to join in the greatest adventure that the human mind has ever begun.

補足資料

3.A 必然と偶然の狭間

必然と偶然

■ 科学が解明すべき究極の謎

- なぜ生命は誕生したのか
- なぜ意識が芽生えたのか
- なぜ宇宙は存在するのか

■ 必然と偶然の接点

- この宇宙のどこかで生命が誕生することは必然
- 進化した生物がやがては意識をもつのもまた必然
- しかし、宇宙の存在・誕生は偶然？
 - そもそも、宇宙誕生の前に物理法則はあったのか

宇宙の進化という必然

- 誕生後38万年での初期条件(CMB温度地図)
 - + 物理法則 = 現在の宇宙に関する観測事実
 - ビッグバン元素合成、宇宙の中性化、天体の誕生、元素循環と天体の形成・進化、宇宙の加速膨張
- 生命の誕生、知的生命への進化ですら、(未だ具体的な説明には成功していないものの)物理法則にしたがった必然的帰結

宇宙・物質史 (主に物理法則から予想・推定)

宇宙年齢	現在からの時間	出来事
0	138億年前	宇宙の誕生
10^{-43}秒 ~10^{-30}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 にともなう宇宙の熱化(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)
~4億年?	~134億年前?	最初の星の誕生、それ以降現在まで星の中心で 炭素、酸素、、、鉄などの重元素が合成され、星の 最期に星間空間にばら撒かれる(元素循環)
~8億年	~130億年前	現在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	~70億年前	ダークエネルギーが宇宙を支配し、以降、宇宙膨 張が減速から加速に転ずる

生命の誕生と進化

- 究極的には物理法則から説明し得ることを疑っている人はいない(だろう)
- 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、そこでも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(?)

地球・生命史 (主に地質学的証拠から推定)

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(プロゲノト)の誕生
100億年	38億年前	最古の光合成の痕跡(イスア表成岩帯)?
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

宇宙生物学入門-惑星・生命・文明の起源-(2008)より

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？

自然界における必然と偶然

- 生命の誕生・進化を議論する場合、必然性と偶然性（物理法則と初期条件あるいは外的要因と言い換えても良い）はある程度分離できる
 - 星内部での元素合成と超新星爆発による元素循環
 - その原材料から化学進化によって生命原材料物質が生成
 - これらの物質から（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
- 宇宙の誕生に関しては、偶然と必然の関係が分離しがたい 何が初期条件で何が物理法則？

↑必然

偶然↓

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