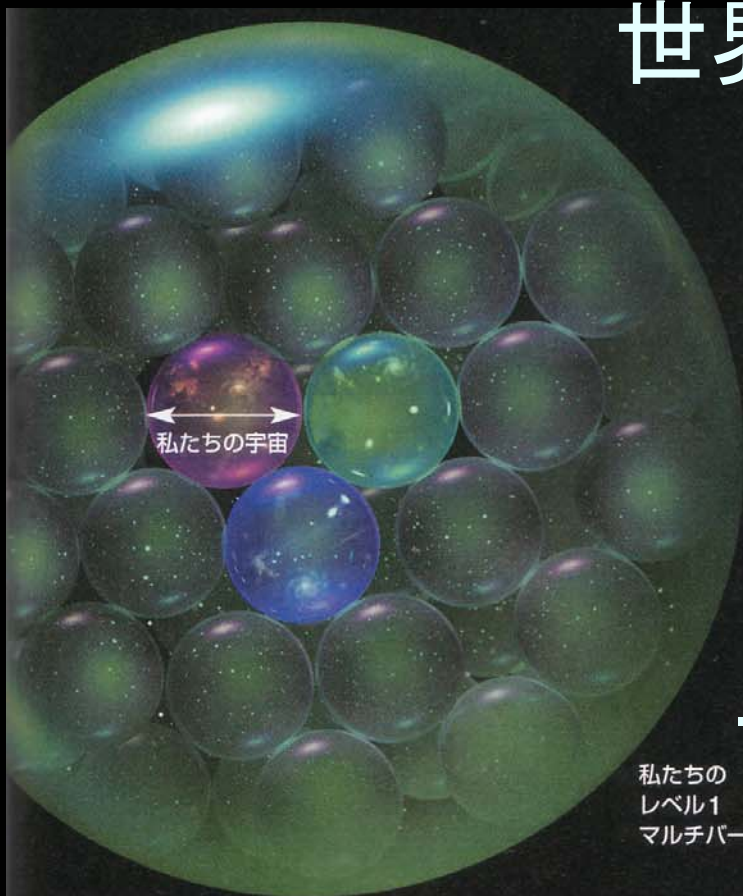


目次

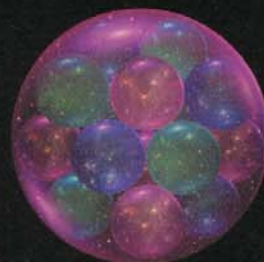
- 10/14 ① 物理屋の世界観
- ② 我々は何も知らなかった
- 10/21 ③ 宇宙の組成と物質の起源
- ④ 太陽系外惑星の世界
- 10/28 ⑤ 宇宙における偶然と必然
- ⑥ 科学は世界をどこまで記述できるか

⑤ 宇宙における偶然と必然

偶然を持ちださずとも
世界のすべてが説明できるか

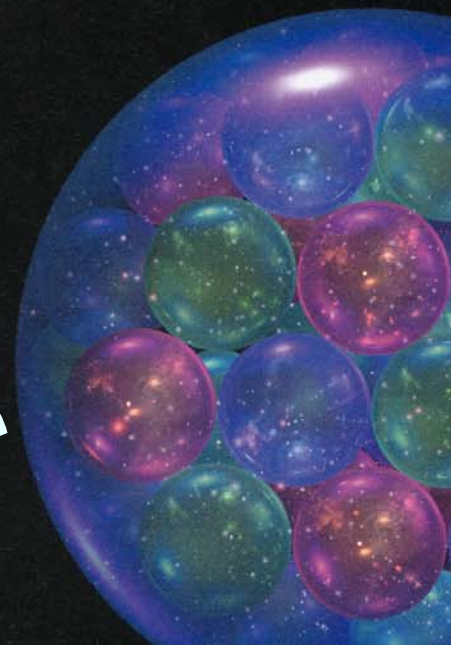


私たちの
レベル1
マルチバース



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)



宇宙/世界は
一つしかないのか

説明すべきこと・できないこと

- 地球は水が液体として存在できるハビタブルゾーンに位置している。そのためには、太陽からの距離が現在の値の±30パーセント以内に微調整されている必要がある。これは説明すべきことなのかどうか？それとも単なる偶然か？

立場 1) 無意味な質問である

地球と太陽の距離は単に初期条件で決まった偶然の結果。それ以上考えても無意味。

立場 2) 実は深い意味を持つ

確かに偶然ではあるが、そのような偶然が自然に(確率的に)実現するためには、さまざまな距離に位置している多数の惑星が存在し、それらのほとんどがハビタブルゾーンにないことが前提。つまり、地球が唯一のものではないことを認めることで初めて納得できる。

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
 - それらを(ダーウィンのな)「あとづけ」の理屈で、ある程度理解した気になることは可能かもしれないが

宇宙の誕生と進化

- 宇宙の誕生もまた「物理法則」によってすべて説明できるはずと考えている人は多い
- これは(現在我々が正しく理解しているかどうかは別として)物理法則が与えられれば、宇宙の創生と進化を物理学で記述・予言できるという信念
- **宇宙の「誕生」は別としても、「進化」に関する限りこの信念は正しいらしい**
 - 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
 - 宇宙の「進化」(必然的)と生物の「進化」(偶発的)は意味が異なる

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↓

物理法則と初期条件

- 宇宙の誕生を議論する際、物理法則と初期条件をどこまで区別し得るか？
 - 物理法則は宇宙と無関係に存在できるか？
 - 因果関係を持たない2つの領域を考えたとき、そこでの物理法則はまったく同じなのか？
 - 物理法則は「誕生・進化」するものか？ 物理法則を記述するさらに上の階層の「メタ物理法則」は存在するのか？ 物理法則の「運動方程式・伝播方程式」は存在するのか？
- ここまで来るとかなり危ないので要注意！

我々の宇宙における不思議な事実

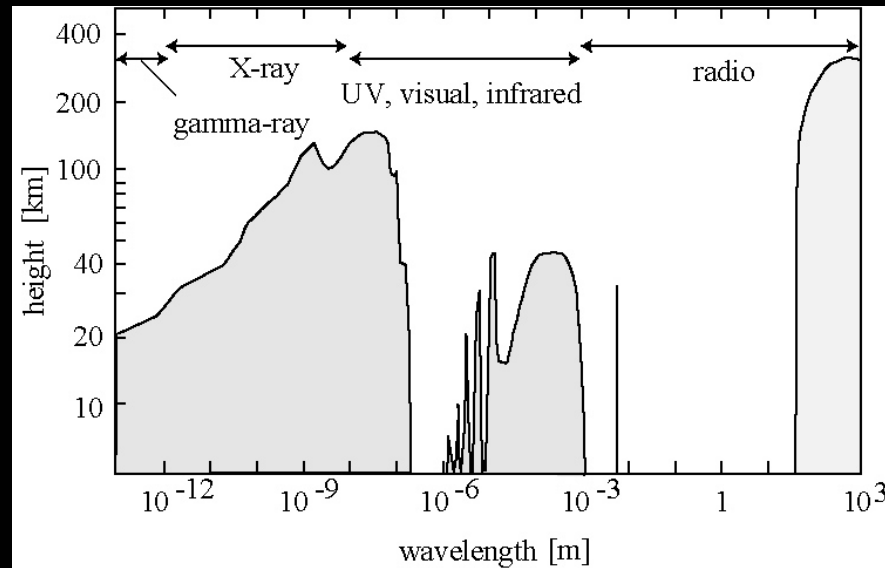
- 無生物から化学的過程で**生物が誕生**
- 原始生物から意識・文明を持つ**人類が誕生**
- **宇宙の現在の年齢** ≡ 太陽系の年齢 ≡ 星の年齢
≡ 生命誕生から知的文明誕生までの所要時間
- **宇宙の大きさ**は、基本物理定数から決まる値に比べて異常に大きすぎる ≡ 宇宙の密度は低すぎる
- 宇宙のダークマター密度 ≡ バリオン密度
≡ ダークエネルギー(宇宙定数)密度

不思議なことを受け入れるには

- **見て見ぬふりをする**
 - 精神的にはとても大切なこと。悩んでもあまり良いことはない
- **神様を信じる**
 - 信じるものは救われる
- **哲学者になる**
 - 悩むことが飯の種という職業に就き、思う存分悩みまくる
 - ただし身の程をわきまえること。理解していないのかかわらず声高に科学を論ずる哲学者になることは避けてほしい
- **究極の物理学者をめざす**
 - すべてのことには理由があるはずで、偶然など認めない。それを認めることは科学の敗北である

今回紹介する人間原理はいわばこれらの折衷案

自然界の絶妙なバランス(1)



- 太陽の輻射のピーク付近に対して地球大気が透明
 - でないと太陽エネルギーを活用できない
- DNAを破壊する紫外線には不透明
 - でないといったん誕生した生物が生存できない

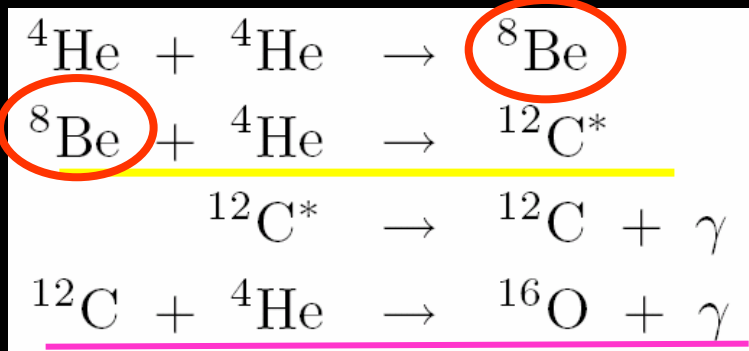
天文学への招待(朝倉書店) 図1.2

- 水は固体の氷のほうが密度が低い例外的な物質。逆であれば、(氷河期に)いったん凍った氷は海や湖の底にどんどん沈んでしまい再び融けることは困難。したがって、海や湖はすべて凍り尽くし、生命を誕生させさらに循環させることは不可能。

自然界の絶妙なバランス(2)

不安定

(半減期 2×10^{-16} 秒)



■ 炭素の多様な結合性が生物の基盤だがその合成は困難

- ビッグバン元素合成では、 ${}^4\text{He}$ より重い元素は作れない
- 質量数5と8に安定元素がない

■ 炭素の起源: 3α 反応(トリプルアルファ)

- Hoyle (1952)は、星の内部で炭素が合成されることを要請することで、7.7MeV付近の ${}^{12}\text{C}$ の共鳴状態(反応断面積が大きい)の存在を予言。その後実験的に確認された(人間の存在から物理法則を発見！)
- この反応の準位はまさに絶妙で炭素ができ、かつすべてが酸素にならないように微調整されている！

自然界の絶妙なバランス(3)

- **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: $\alpha_E (= e^2 / \hbar c \approx 1/137)$**
 - $\alpha_E \uparrow \Rightarrow$ 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?**

人間原理の立場

- これらの「偶然」を、(未知の、本当にあるかさえもわからない)究極理論によって自然に説明することなどできるのだろうか？
- すべてのことに「自然」な説明が存在するはずである、というのは物理屋が陥りやすい一種の信仰に過ぎないのでは？
- とすれば、この偶然は「人類(知的文明)が誕生する」宇宙でのみ実現されているだけではないのだろうか？という信仰(人間原理)の自由もまた保障されるべきではないか？

人間原理と物理法則

- 我々の宇宙が唯一無二である必然的理由はない
 - (少なくとも) 10^{500} 個以上の因果的に切り離された宇宙が存在する可能性が超ひも理論から指摘されている
- これらの宇宙では物理法則が異なっているかもしれない
 - 物理定数(重力定数、光速、素電荷、プランク定数)さらには宇宙定数の値が違っているかもしれない
- それらのなかで、たまたま人間を生むような偶然が可能となる宇宙が我々の宇宙
 - 大多数の「普通」の宇宙では人間は誕生しないから、「これが普通」と指摘して人間が存在し得ない。
 - 「例外的に珍しい」宇宙でのみ人間が誕生でき、そこにこそ「なぜこの宇宙はこのように不思議なのか」と思い悩む人間が存在する。割合からは確かに「珍しい」宇宙。
 - 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本来ない

人間原理の算数

- 極度にありえない事象を同等にありえない事象(人間の存在)が成り立つ場合の条件付確率として理解する？
- $P(\text{不思議な事}) \ll 1$ であるが、 $P(\text{人間の存在})$ もまた $\ll 1$ であるから、「不思議なこと」と「人間の存在」が相関していたならば、その条件付確率 $P(\text{不思議な事} | \text{人間の存在}) \approx 1$ となることはあり得る

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

- 不思議さが減り、何か心が安らぐような気がする(自然科学かどうかは別として精神面では大切なこと)

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実現し得る

- 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事実に説明がつく

マルチバースと人間原理

- 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、CMBと宇宙原理、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？**
 - 我々が存在する宇宙は決して唯一絶対的なものではなく無限に存在するもののなかの一例にしか過ぎないかも？
 - そうであって初めて人間原理による説明が完結
- universeからmultiverse (M.J.Rees)へ

マルチバース

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

- **レベル1**: 我々が観測可能な地平線の外の領域に存在
- **レベル2**: 無限の宇宙の中に島宇宙的にポツリポツリと存在 (インフレーション的)
- **レベル3**: 量子力学の多世界解釈による宇宙 (エベレット)
- **レベル4**: 数学的論理構造そのものが宇宙の形態として存在 (プラトンの)

Level 1: Regions beyond our cosmic horizon

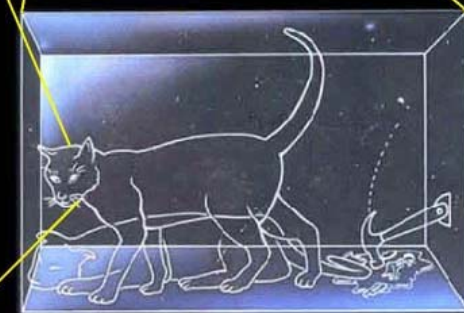
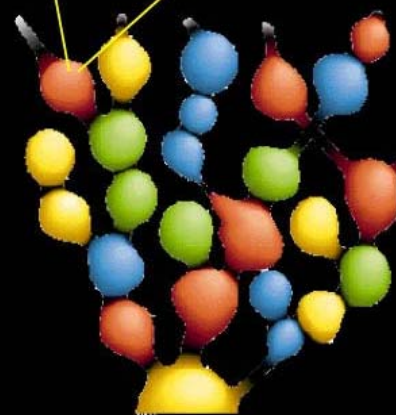
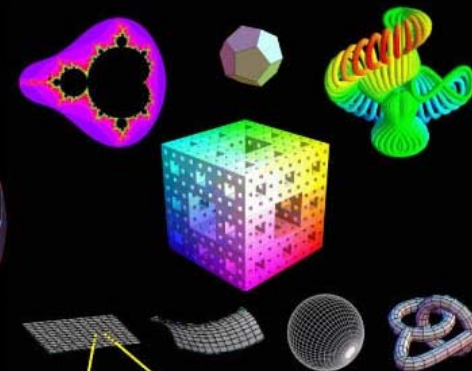
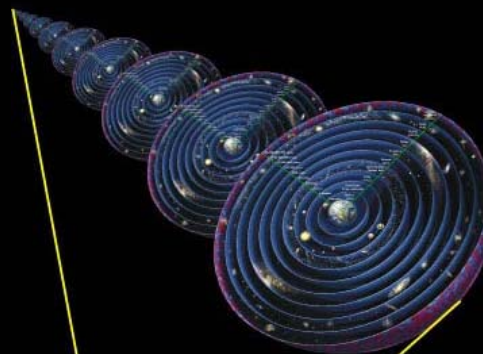
Features: Same laws of physics, different initial conditions
Assumptions: Infinite space, ergodic matter distribution
Evidence:

- Microwave background measurements point to flat, infinite space, large-scale smoothness
- Simplest model

Level 4: Other mathematical structures

Features: Different fundamental equations of physics
Assumption: Mathematical existence = physical existence
Evidence:

- Unreasonable effectiveness of math in physics
- Answers Wheeler/Hawking question: "why these equations, not others"



Level 2: Other post-inflation bubbles

Features: Same fundamental equations of physics, but perhaps different constants, particles and dimensionality
Assumption: Chaotic inflation occurred
Evidence:

- Inflation theory explains flat space, scale-invariant fluctuations, solves horizon problem and monopole problems and can naturally explain such bubbles
- Explains fine-tuned parameters

Level 3: The Many Worlds of Quantum Physics

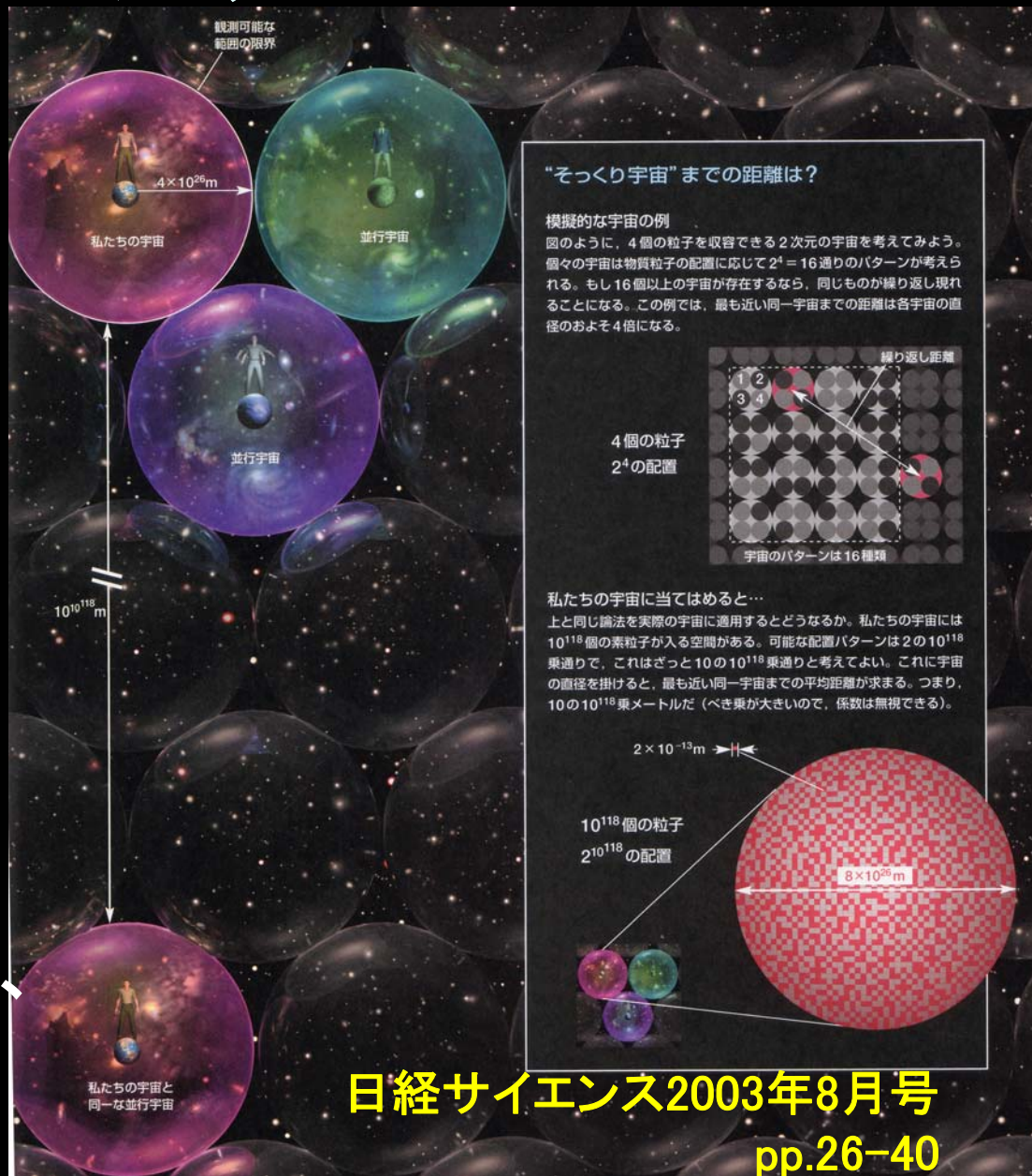
Features: Same as level 2
Assumption: Physics unitary
Evidence:

- Experimental support for unitary physics
- AdS/CFT correspondence suggests that even quantum gravity is unitary
- Decoherence experimentally verified
- Mathematically simplest model

<http://www.hep.upenn.edu/~max/multiverse.html>

レベル1 マルチバース

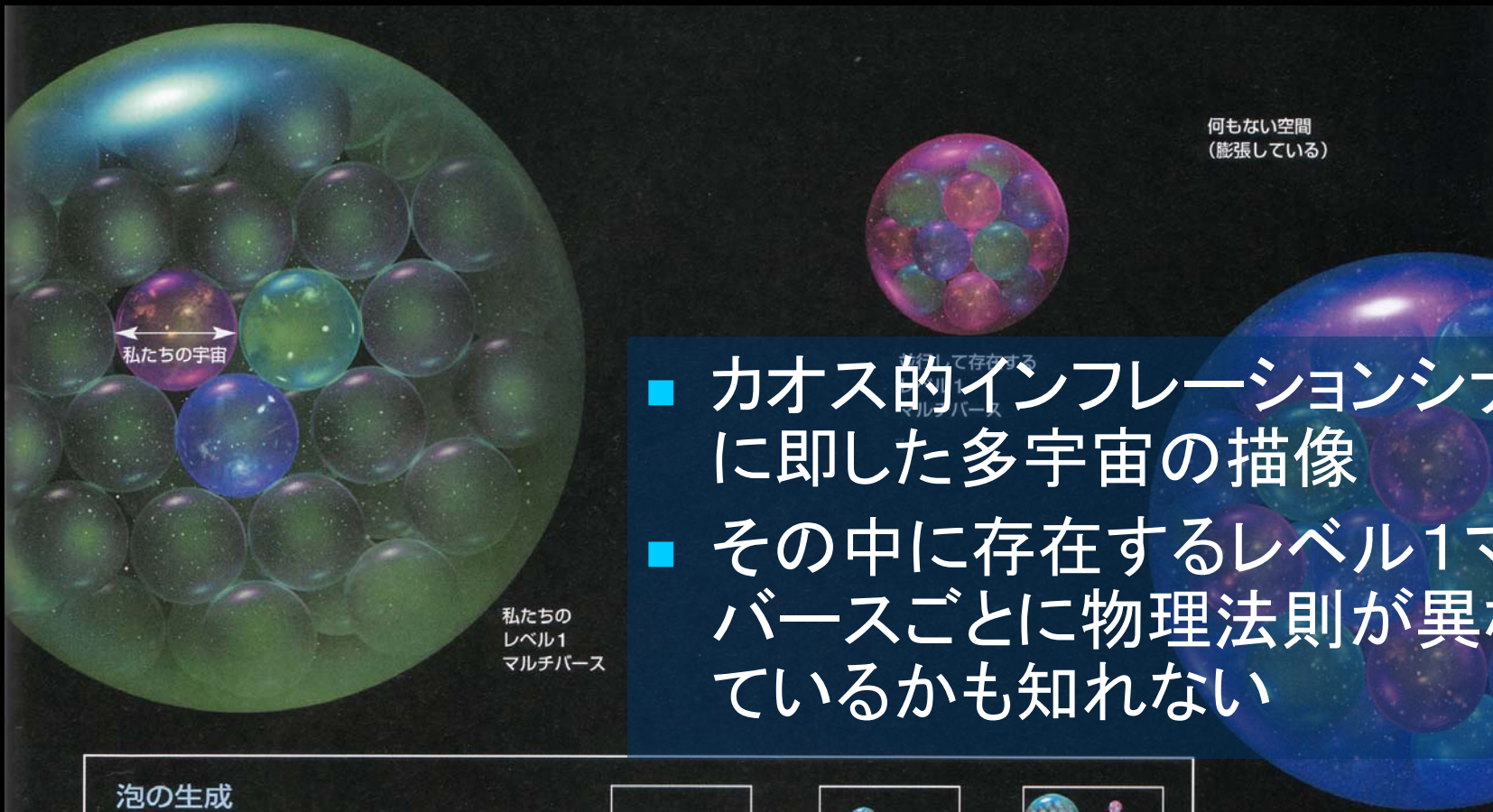
- 我々が観測できる領域の十分外側に別の領域の宇宙がある
- これらの多宇宙の集合体が全体としてレベル1 マルチバースに対応
- 個々の宇宙の物理法則は同じだが、初期条件は異なる



現在見えない領域にも宇宙は広がっている

- このレベル1は自然な考え方というかほとんど当たり前
 - 観測できる領域の外に宇宙が存在しないのはと不自然
 - 我々が宇宙の中で特殊な位置にあるとは考えられない
- **天文学の歴史は常に我々の位置が特殊なものではないことを証明してきた**
 - 天動説から地動説へ
 - 太陽系以外の惑星系が1995年以降すでに500個以上発見されている
- 宇宙が膨張し時間が経つにつれて、現在はまだ見えない領域にも恐らく我々の観測する宇宙と同じ性質をもつ宇宙が広がっていることが確認されるはず

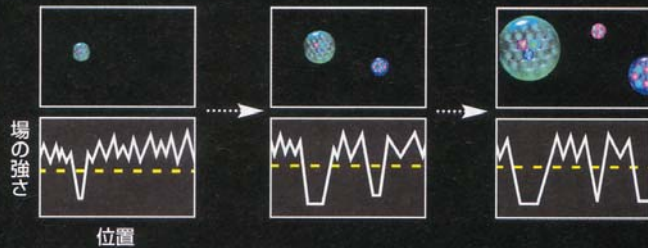
レベル2 マルチバース



- カオス的インフレーションシナリオに即した多宇宙の描像
- その中に存在するレベル1マルチバースごとに物理法則が異なっているかも知れない

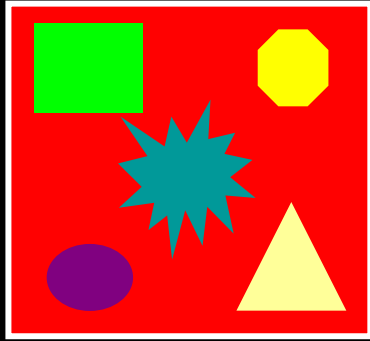
泡の生成

ある種の量子（インフラトン）の場が空間の急激な膨張を引き起こす。空間の中では、ランダムなゆらぎが存在し、この量子場はなかなか消えずに残る。しかし、ある領域では量子場が弱まり、膨張が緩やかになる。こうした領域が泡になる。



並行して存在する
レベル1
マルチバース

インフレーションシナリオ的マルチバース： 自然淘汰と適者生存



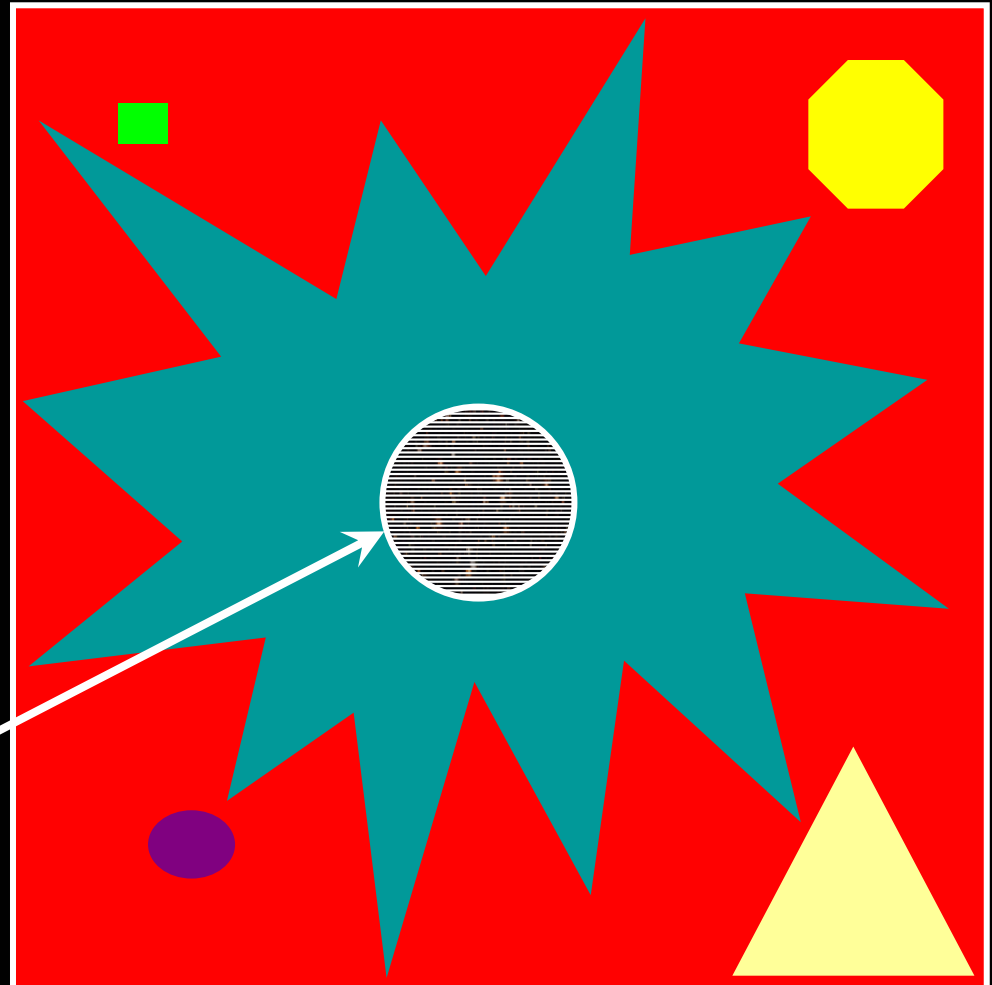
インフレーション前：

空間の異なる領域はそれぞれ異なる初期条件（例えばインフレーションを起こす場の初期値）を持つ



インフレーション後：

適切な初期条件を持った領域だけが指数関数的膨張をし、現在の（我々の）宇宙をつくることができる

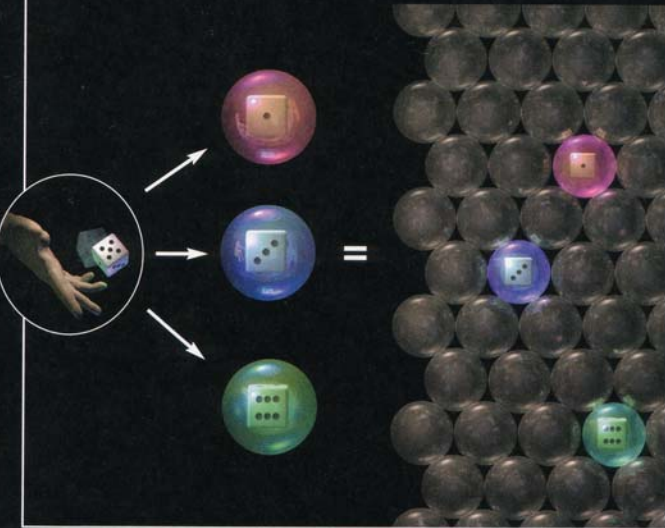


現在の宇宙の地平線
（因果関係を持ちうる
観測可能領域）

レベル3 マルチバース

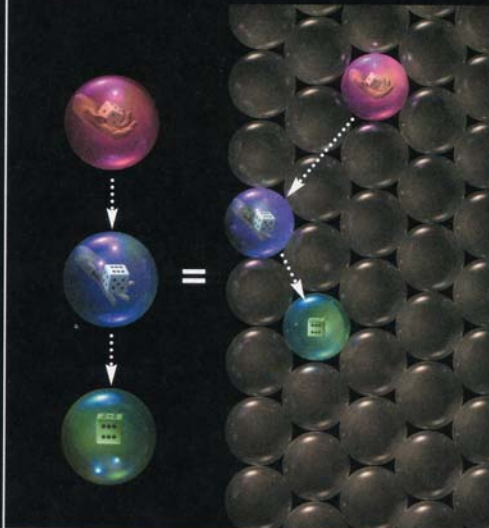
エルゴード性

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。

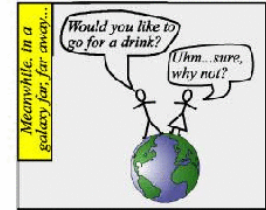


時間の本質

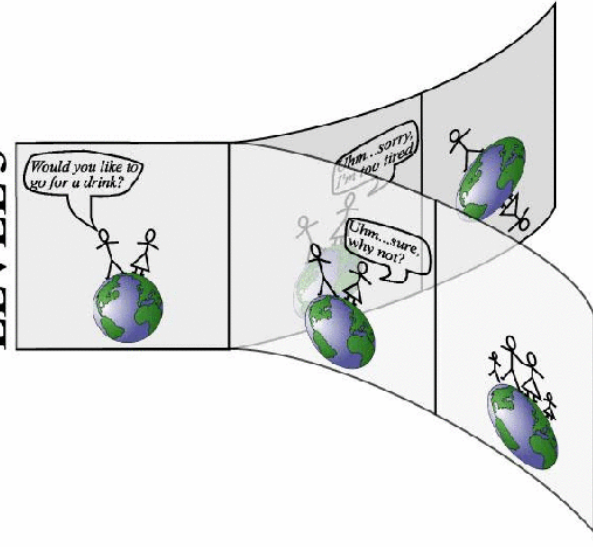
普通、時間は変化を記述するための手段と考えられることが多い。物質はある瞬間にある配置を取り、次の瞬間には別の配置になるという具合だ(左)。しかし、並行宇宙の概念では別の見方ができる。考える物質配列が一連の並行宇宙の中にすべて含まれているなら(右)、時間とはこれらの宇宙に順番をつけるやり方にすぎない。個々の宇宙は静的なもので、変化は幻想ということになる。もっとも、この幻想は興味深いものではあるが。



LEVEL 1



LEVEL 3



日経サイエンス2003年8月号 pp.26-40

- エベレットによる量子力学の多世界解釈に基づく
- レベル1、レベル2に比べるとずっと概念的で突拍子もない考えのようであるが、この量子力学的解釈を支持する人は多い

量子力学の多世界解釈

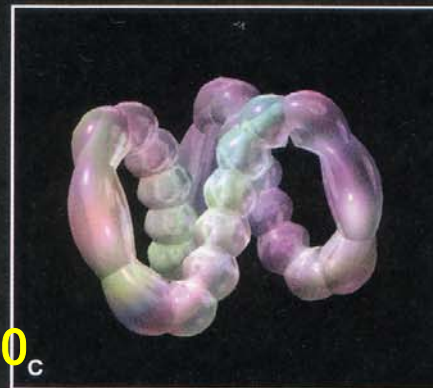
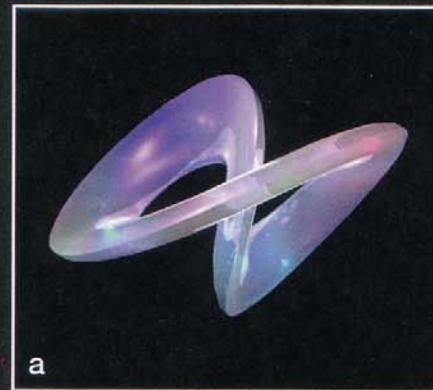
- ミクロの世界を記述する量子論には本質的な予測不可能性が存在する
 - 様々な事象が起こる確率を計算することができるのみ(量子力学の確率解釈、コペンハーゲン解釈とも呼ばれる)
 - この確率解釈が実験と矛盾する事実は知られていない
 - 実際に何らかの観測を行った結果、我々の世界ではこの確率分布に従ってある特定の事象が実現する
- いっそのこと、これらの可能性がすべて実現していると考えてはどうか(エベレットの多世界解釈)
 - それらの可能性に対応した無数の並行宇宙が存在し、それらに次々と分岐する過程を繰り返す(想像すると気が遠くなってしまいが、、、)
 - 突飛ではあるが支持する物理学者も多い

レベル4 マルチバース

レベル4 マルチバース

究極の並行宇宙はあらゆる可能性を含む。その位置や宇宙論的な特性、量子状態が異なるだけでなく、物理法則まで異なる宇宙の存在が考えられる。これらの宇宙は空間と時間を超えたところにあるので、目に見えるように描くのはまず不可能だ。最良の方法は、抽象的に思い描くこと。宇宙とは、それを支配する物理

法則の数理的構造を表現した「彫刻」のようなものといえる。例えば1つの単純な宇宙を考えよう。地球と月、太陽があり、ニュートン力学に従っているとす。客観的立場の観測者からは、この宇宙は組み紐で覆われた丸い輪のように見える（丸い輪は地球の軌跡、それを覆う組み紐は地球を周回する月の軌跡）。物理法則が異なれば、宇宙の形も異なってくる（a～d）。この考え方に立つと、物理学の根本にかかわるさまざまな問題が解決する。



論理的に無矛盾な世界が存在し得ない理由はあるのか

- 現実の実験とは矛盾しているが論理的には自己矛盾のない物理法則(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(我々の世界では)採用されていないのであるから、考えることは無意味である(標準的思考)
 - 単に我々の世界で採用されていないだけで、どこか異なる世界で採用されているのではないか
- 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、プラトンの)
- 物理法則とは言わないまでも、異なる物理定数を持つ宇宙が無数に存在すると考えて何か問題はあるのか、むしろ自然ではないだろうか

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
- にも関わらず、マルチバースの存在を科学的に証明することは不可能であろう
 - 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
- したがって強調しておくが、マルチバースという考え方は決して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的考察対象とは言えない
 - あくまで一つの(哲学的な)解釈の一つと理解すべき

究極理論の限界？

- **究極理論**：すべての物理現象を第一原理から統一的に説明し尽くす理論
 - Theory of Everything と呼ばれることがある
 - 存在する必然性はないが、その存在を信じている物理屋は多い（一部に根強い信仰）
- **究極理論はパラメータ(定数)を含まないのか**
 - 宇宙は究極理論だけで一意的に決まるのではなく、初期条件(パラメータ)にも依存する？
 - もしパラメータを含むのならその値を決める原理が必要なので、究極ではなくなる？

人間原理は自然科学の枠内か？

■ 究極理論 vs. 人間原理

- **究極理論**: 我々の宇宙と物理法則は必然性があり唯一のもの
- **人間原理**: 宇宙とそこでの物理法則の「母集団」はかなりブロードな分布をしているが「人間が存在する」という条件によって選択された結果として選ばれた特殊なものが我々の宇宙である
- 真実はおそらくこの中間で、むしろ人間原理的選択効果は究極理論と対峙するものではなくむしろその一部分として包含されるものかもしれない

■ 人間原理はマルチバース/並行宇宙の存在を仮定しているが、レベル1か2程度までであれば、物理学的にみてもさほど奇妙な考えではない

■ 人間原理は興味深い考え方ではあるが、反証可能性という見地からは、(まだ)自然科学というより哲学レベル

ここで最初の質問をもう一度考えてみる： 説明すべきこと・しなくてもよいこと

- 地球は水が液体として存在できるハビタブルゾーンに位置している。そのためには、太陽からの距離が現在の値の±30パーセント以内に微調整されている必要がある。これは説明すべきことなのかどうか？それとも単なる偶然か？

立場 1) 無意味な質問である

地球と太陽の距離は単に初期条件で決まった偶然の結果。それ以上考えても無意味。

立場 2) 実は深い意味を持つ

確かに偶然ではあるが、そのような偶然が自然に(確率的に)実現するためには、さまざまな距離に位置している多数の惑星が存在し、それらのほとんどがハビタブルゾーンにないことが前提。つまり、地球が唯一のものではないことを認めることで初めて納得できる。

ここで最初の提案をもう一度考えてみる： 不思議なことを受け入れるには

- **見て見ぬふりをする**
 - 精神的にはとても大切なこと。悩んでもあまり良いことはない
- **神様を信じる**
 - 信じるものは救われる
- **哲学者になる**
 - 悩むことが飯の種という職業に就き、思う存分悩みまくる
 - ただし身の程をわきまえること。理解していないのかかわらず声高に科学を論ずる哲学者になることは避けてほしい
- **究極の物理学者をめざす**
 - すべてのことには理由があるはずで、偶然など認めない。それを認めることは科学の敗北である

どれに共感しどれを選ぶかは自由だがそれが人生を左右する！