

# 10月15日の講義に対する質問への回答(≠解答)①

- 現在、4%しか分かっていないことで、宇宙の起源を決めてしまっ  
てよいのだろうか？
  - もっともだが、宇宙の進化は「物理法則」に支配される。4%は  
あくまでその中の構成要素
- 「超ひも理論」なども、4%の中のものなのか？
  - その「外」のはずだが、まだ具体的なモデルにはなっていない
- 宇宙の進化は、ある初期状態から物理法則によって必然的に起  
こったが、生命は偶然的な進化を遂げた、とおっしゃっていたが、  
宇宙の進化に偶然性はなかったのか？
  - 今日の講義のテーマそのもの！
- ダークマターとダークエネルギーは良く分からないものなのに、  
比率がなぜそこまで細かく分かるのか？
  - これも、物理法則がわかっているならば、対象は何であれそ  
れに支配されているため
- ダークマターやダークエネルギーを観測するには、今までと根本  
的に違う原理が必要なのか？
  - それらが既知の物理法則に従うと考える限り、別に必要ない

# 10月15日の講義に対する質問への回答(≠解答)②

- 光が曲げられるのは、ダークマターや銀河系の重力以外の原因はないのか？
  - 今のところ知られていないし、それを考える必要性もない
- 宇宙の加速膨張自体が否定される可能性はないのか？
  - 観測事実そのものは確実だが、その起源の解釈は今後変わるかもしれない。
- 宇宙が膨張を続けると、今後(もしくは最後)はどうなるのか？
  - 今日の講義でふれる
- 宇宙の膨張速度が加速していることは分かったが、その速度が光速を超えたらどうなるのか？
  - これは宇宙論のFAQ。信号を伝えない限り速度が光速を超えても何の問題もない(というか、単に速度の定義の問題)
- 星の中心で重元素がつくられ宇宙に放出されていくと、何億年か後には、宇宙の元素組成は変わっているのか？
  - 厳密に言えばその通り
- どうやって何億年も前のことを“観測”するのか？
  - 単に空を見て暗い天体を観測するだけですが、、、

# 10月15日の講義に対する質問への回答(≠解答)③

- なぜ、物理法則は、現在のような形で存在するのか？
  - なぜでしょうねえ、、、これは物理の究極の難問
- 誕生してから $10^{-43}$ 秒までは我々の知っている法則が適用できないのはなぜか？
  - なぜか既知の物理理論にはこの特徴的スケールが埋め込まれているから
- 宇宙の中心はどこにあるのか？
  - どこにもない=すべてが中心、お好きなほうをどうぞ
- 物質、反物質の非対称と同じように、実は自然界は非対称に満ちているのか？
  - その通り。完全に対称なら実はつまらない。ほんの少しだけ破れているからこそ面白い
- 反物質、反陽子、陽電子
  - すべての素粒子は反粒子を伴っている。これも対称性の例。
- 宇宙の曲率がゼロ？
  - 宇宙空間は大スケールでユークリッド幾何学にしたがっている

# 物理的世界観：目次

- I. 物理屋の偏見 (10/8)
- II. 夜空のムコウ (10/8)
- III. 物質の起源と宇宙の歴史 (10/15)
- IV. 宇宙の組成 (10/15)
- V. 自然法則と人間原理 (10/22)
- VI. 世界を科学で俯瞰する (10/22)

<http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/fukan>

# V 自然法則と人間原理

- 物事には必ず理由があるのか
- 世の中は「偶然」を持ち出さずとも説明し尽くせるのか？



# 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だけで、そこにはなんら必然性はない

## 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である。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。

# 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悩みまくる
- “the philosophy of science is about as useful to scientists as ornithology is to birds” (in J.D.Barrow: *The universe that discovered itself*)

## ■ 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

今日お話しする人間原理はいわばこれらの折衷案

# 我々の宇宙における不思議な事実

- 無生物から化学的に**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 ≡ 宇宙の密度が低すぎる
- 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



# 宇宙定数とダークエネルギーの歴史

- 1916年：一般相対論
- 1917年：アインシュタインの静的宇宙モデル
- 1980年代以降：真空のエネルギー密度

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

宇宙定数 (時空の幾何学量)      移項      物質場 (真空のエネルギー密度?)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi G \left( T_{\mu\nu} - \frac{\Lambda}{8\pi G} g_{\mu\nu} \right)$$

- 宇宙定数の自然な大きさはプランク密度

$$\Lambda = \frac{c^5}{\hbar G} \approx 5.2 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3 \quad \Leftrightarrow \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \approx 10^{121}$$

- 観測的制限:  $\Omega_{\Lambda} \approx 0.7$       物理学史上最大の理論と観測の不一致!

# 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
- 一方、宇宙の誕生の場合には両者の関係は自明ではない 何が初期条件で何が物理法則?

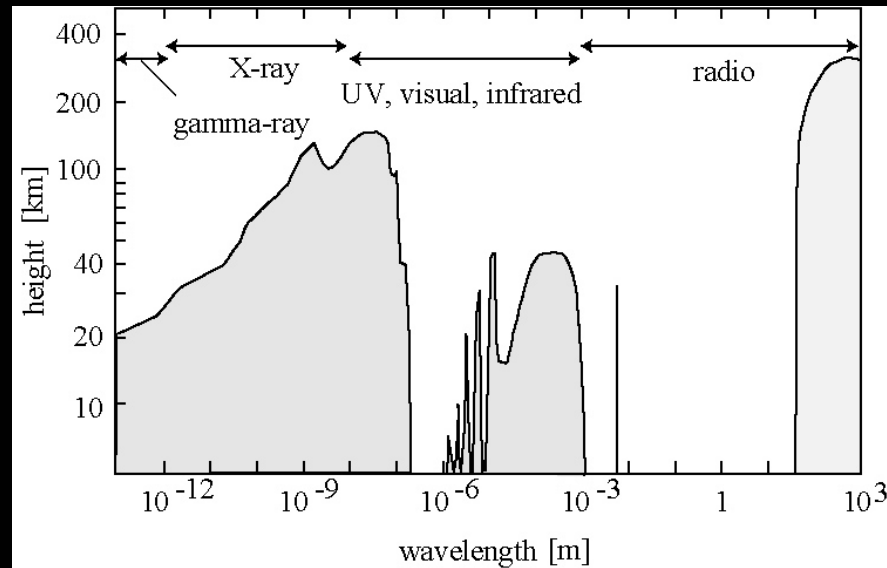
↑必然

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！

# 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

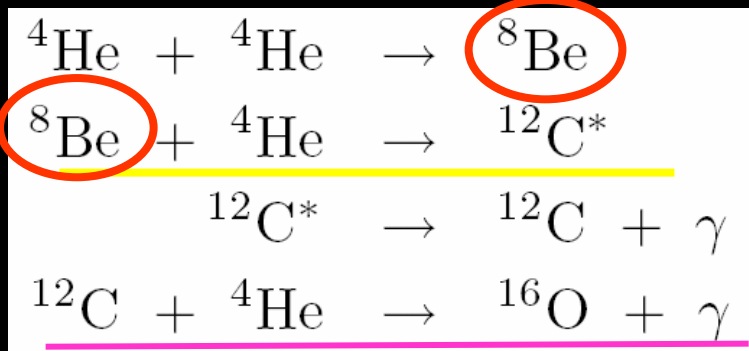
天文学への招待(朝倉書店) 図1.2

- 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 $2 \times 10^{-16}$ 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:  $3\alpha$  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
- 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:  $\alpha_s$** 
  - $\alpha_s \uparrow \Rightarrow {}^2\text{He}$ 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:  $\alpha_E (= e^2 / \hbar c \approx 1/137)$** 
  - $\alpha_E \uparrow \Rightarrow$  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:  $\alpha_W$** 
  - $\alpha_W \uparrow \Rightarrow$  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?**



# 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
- とすれば、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？
  - universeという概念からmultiverse (M.J.Rees)へ
- 生物学のみならず、宇宙そのものに対しても自然淘汰・適者生存という考え方が浸透しつつある
  - では、「適」とは何に対して適なのか？ ⇒ 人間原理

# 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？

# 人間原理の算数

- 極度にありえない事象を同等にありえない事象が成り立つ場合の条件付確率として理解してはどうか？
- $P(\text{不思議なこと}) \ll 1$  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  $P(\text{不思議なこと} | \text{人間の存在}) \approx 1$  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宗教としては本質的）

# 人間原理

- 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素粒子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、光速度、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
  - ほとんどの「当たり前」の宇宙では人間は誕生しない。そこでは、「これが当たり前」と気づいてくれる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する。そこに「なぜこの宇宙はこのように不思議なのだろうか」と思い悩む人間が存在するのは当然。全宇宙から見れば確かに「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

# Multiverse

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

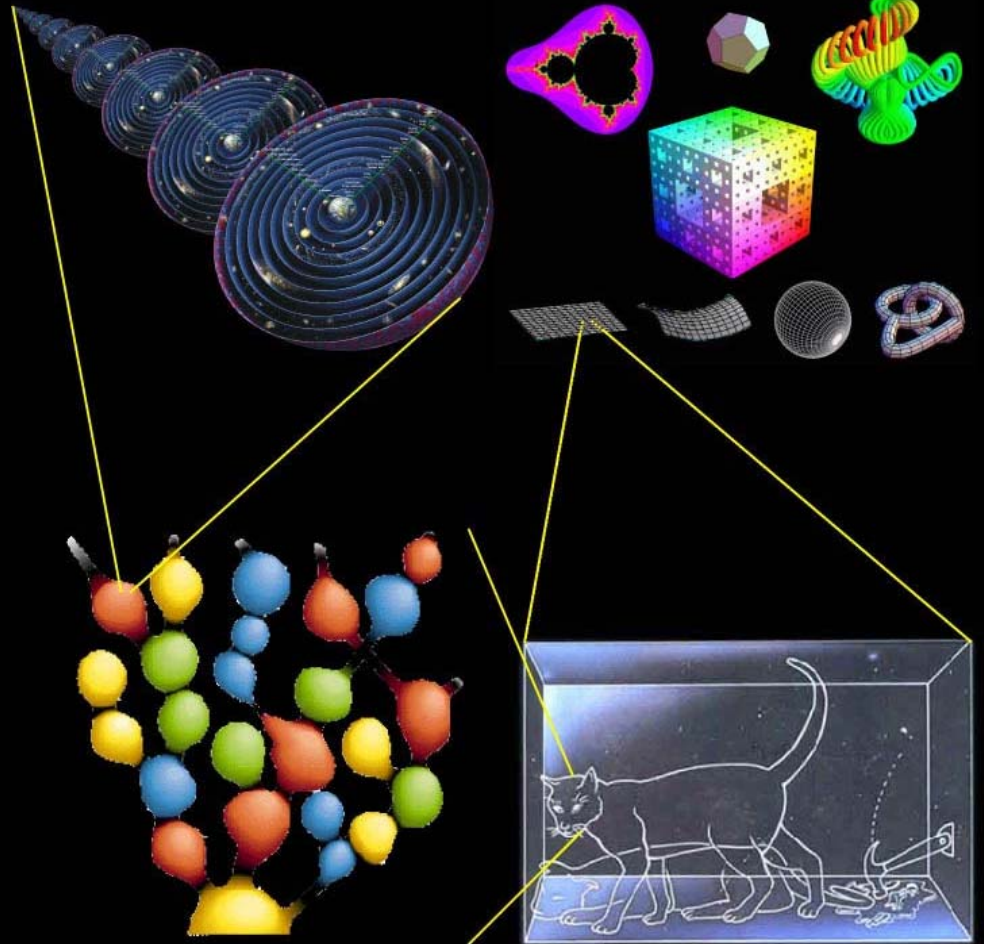
**Features:** Same laws of physics, different initial conditions  
**Assumptions:** Infinite space, ergodic matter distribution  
**Evidence:**

- 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>

# 実は昔からある素朴な疑問

*There are infinite worlds both like and unlike this world of ours.*

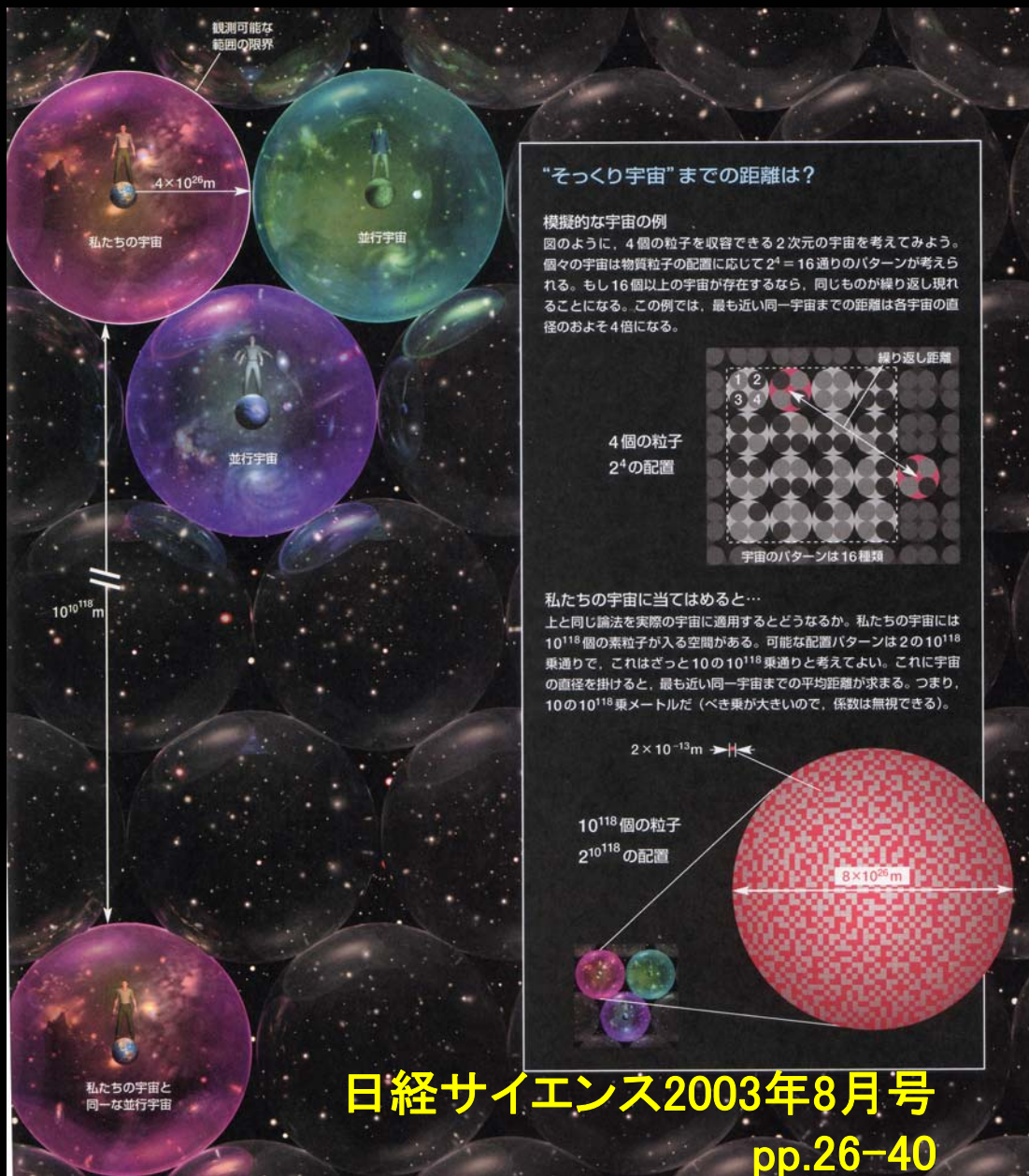
**-Epicurus (341-270 BC)**

*There cannot be more worlds than one.*

**-Aristotle (384-322 BC)**

# レベル1 multiverse

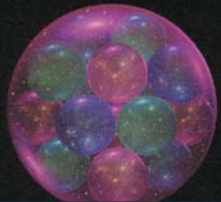
- 我々が観測できる領域の十分外側に別の領域の宇宙がある
- これらの多重宇宙の集合体が全体としてレベル1 multiverseに対応
- 個々の宇宙の物理法則は同じだが、初期条件は異なる



# レベル2 multiverse



私たちの  
レベル1  
マルチバース

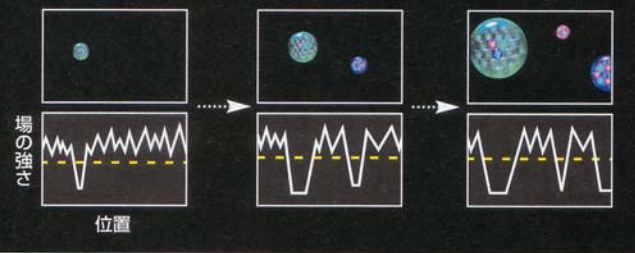


何も無い空間  
(膨張している)

- カオス的インフレーションシナリオに即した多重宇宙の描像
- その中に存在するレベル1 multiverse毎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

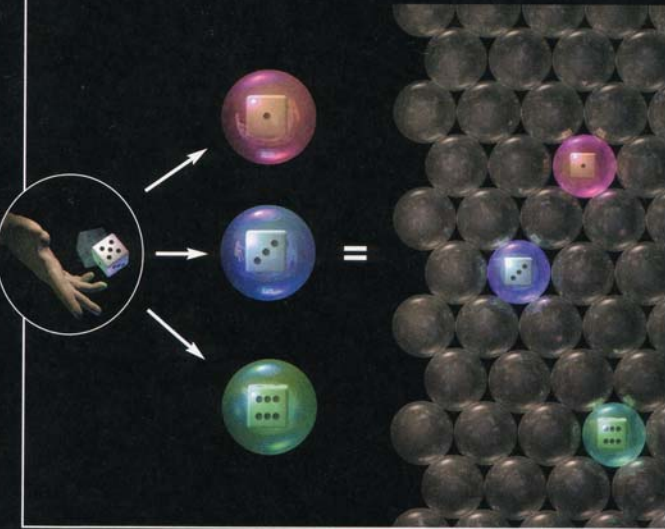
inset)



# レベル3 multiverse

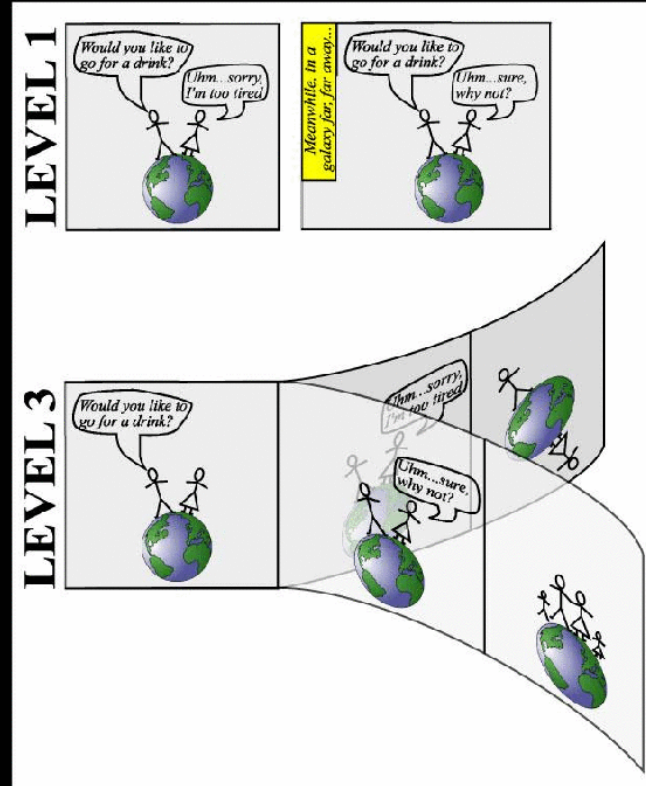
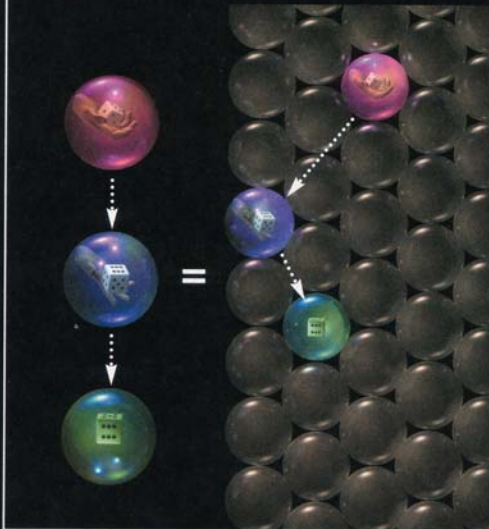
## エルゴード性

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。



日経サイエンス2003年8月号 pp.26-40

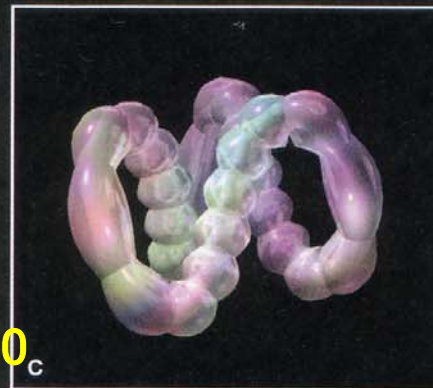
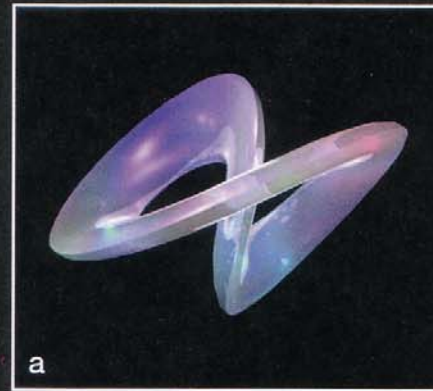
- エベレットによる量子力学の多世界解釈に基づく
- レベル1、レベル2に比べるとずっと概念的で突拍子もない考えのようであるが、この量子力学的解釈を支持する人は多い

# レベル4 multiverse

## 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。



# 人間原理は自然科学の枠内か？

## ■ 究極理論 vs. 人間原理

- 我々の宇宙と物理法則は必然性があり唯一のもの
- 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

## ■ 人間原理は多重宇宙/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、物理学的にみてもそれ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、検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だけで、そこにはなんら必然性はない

## 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である。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。