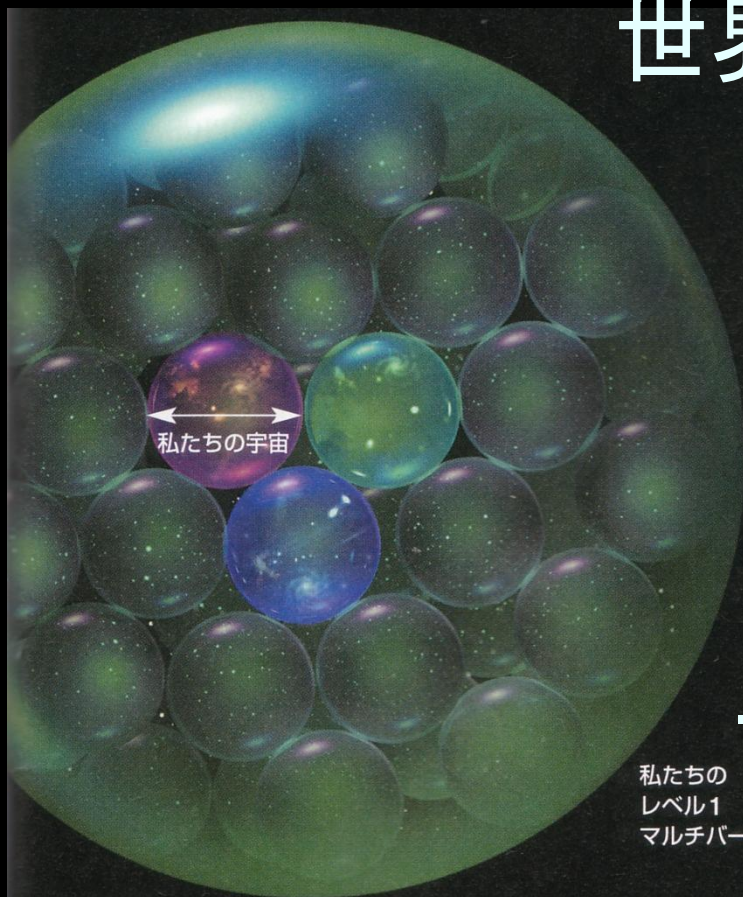


# 目次

- 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



私たちの宇宙

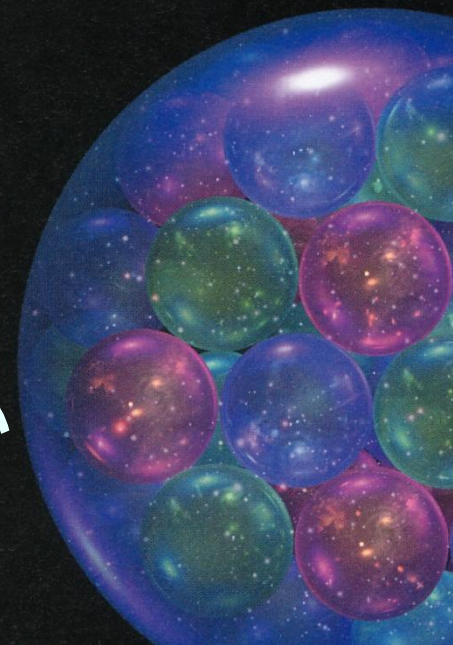


並行して存在する  
レベル1  
マルチバース

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

私たちの  
レベル1  
マルチバース



# 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**  $\doteq$  太陽系の年齢  $\doteq$  星の年齢  
 $\doteq$  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  $\doteq$  宇宙の密度は低すぎる
- 宇宙のダークマター密度  $\doteq$  バリオン密度  
 $\doteq$  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

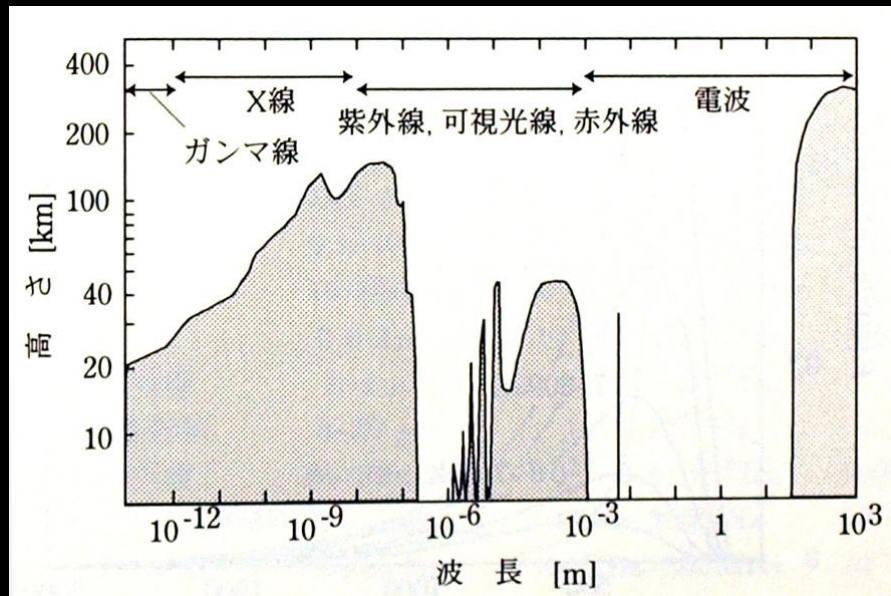
- 悩むことが飯の種という職業に就き、思う存分悩みまくる
- ただし身の程をわきまえること。理解していないのかかわらず声高に科学を論ずる哲学者になることは避けてほしい

## ■ 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

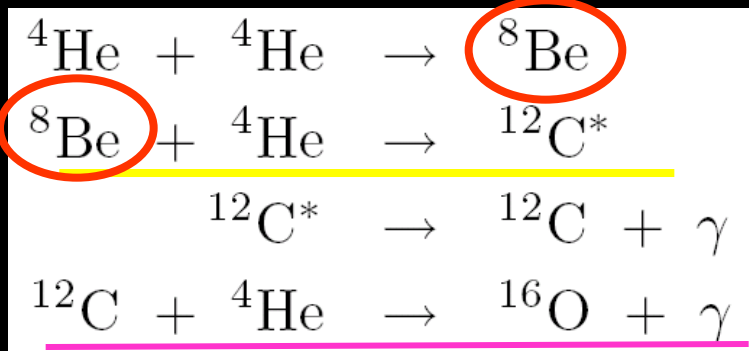
✦ 天文学への招待(朝倉書店) 図1.2  
岡村定矩 編 (2001年)

- 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(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： $\alpha_S$

- $\alpha_S \uparrow \Rightarrow$   ${}^2\text{He}$ 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？

# 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 $P(\text{不思議なこと}|\text{人間の存在})$ が $\approx 1$ 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

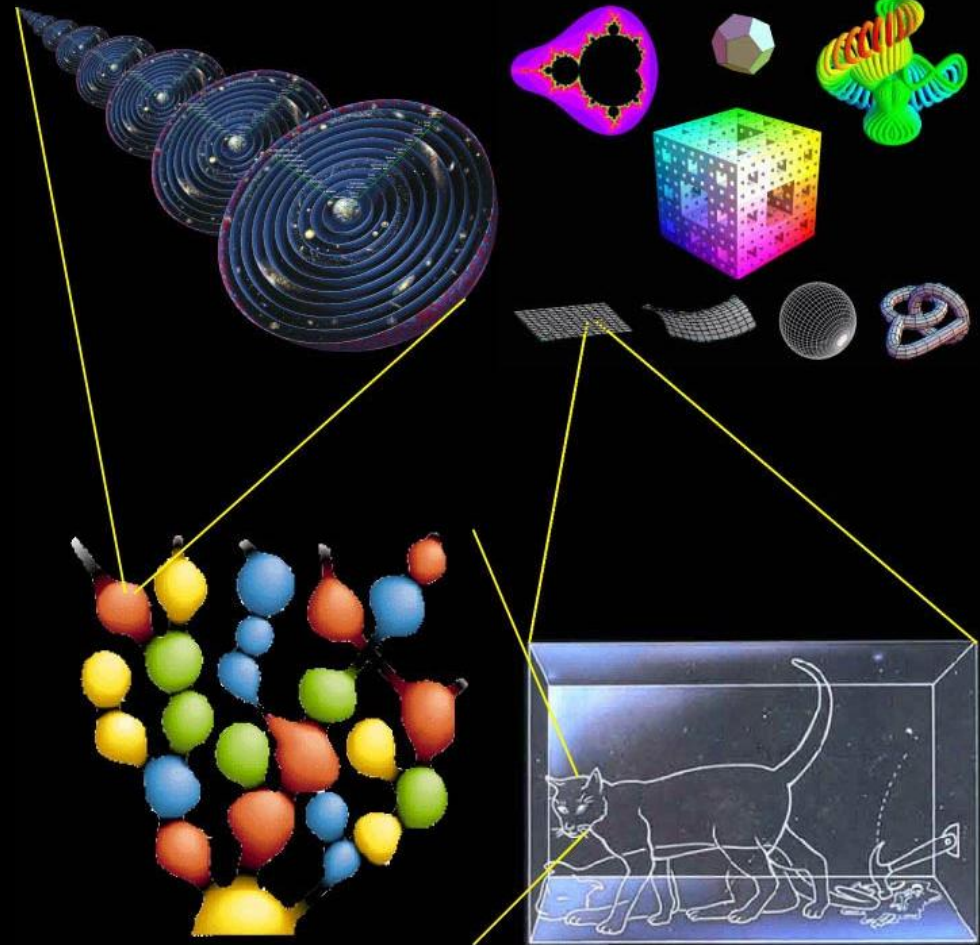
# マルチバース

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"

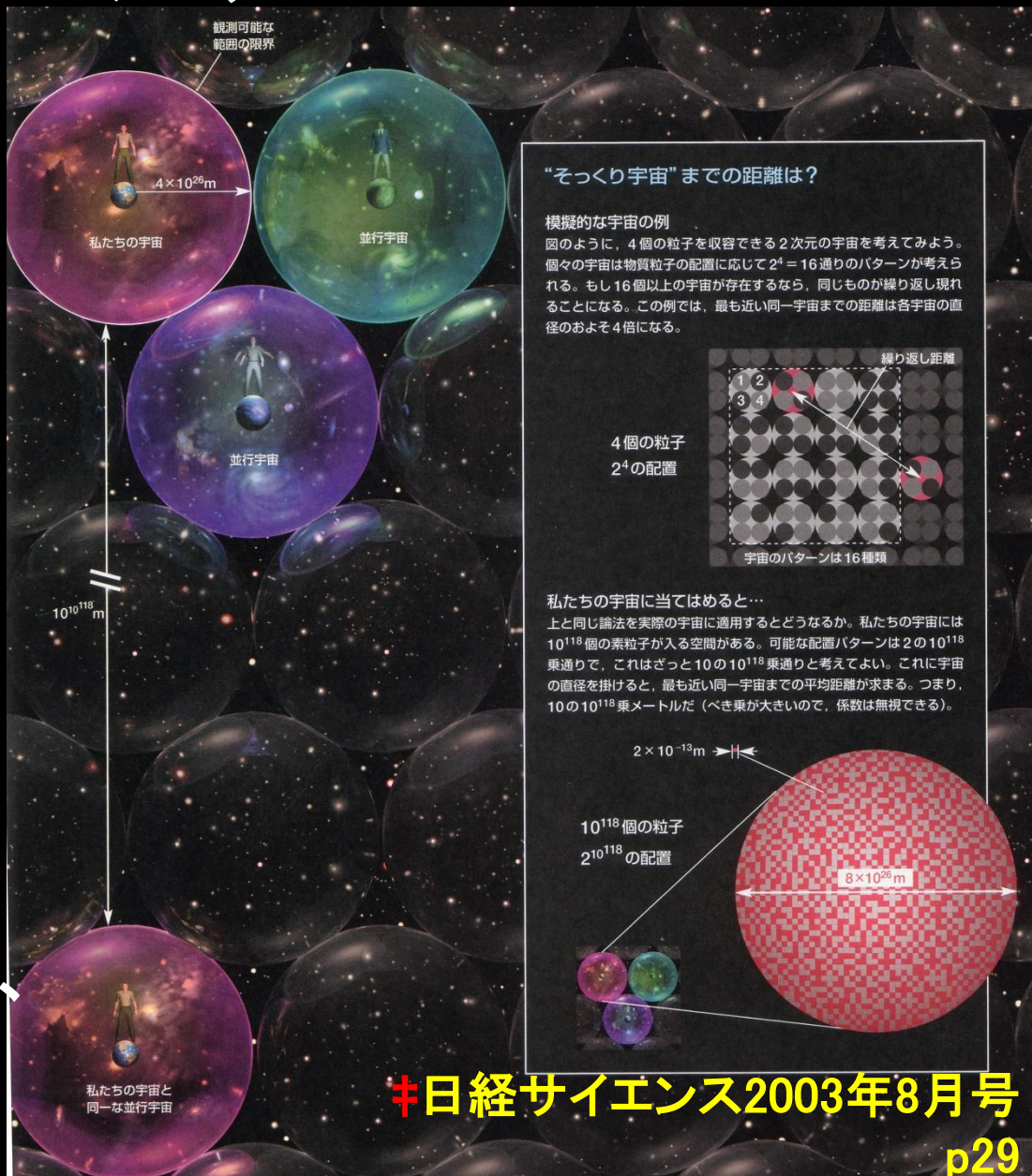


**Level 2: Other post-inflation bubbles**  
Features: Same fundamental equations of physics, but perhaps different constants, particles and dimensionality  
Assumption: Chaotic inflation occurred  
Evidence: - Inflation theory explains flat space, scale-invariant fluctuations, solves horizon problem 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

# レベル1 マルチバース

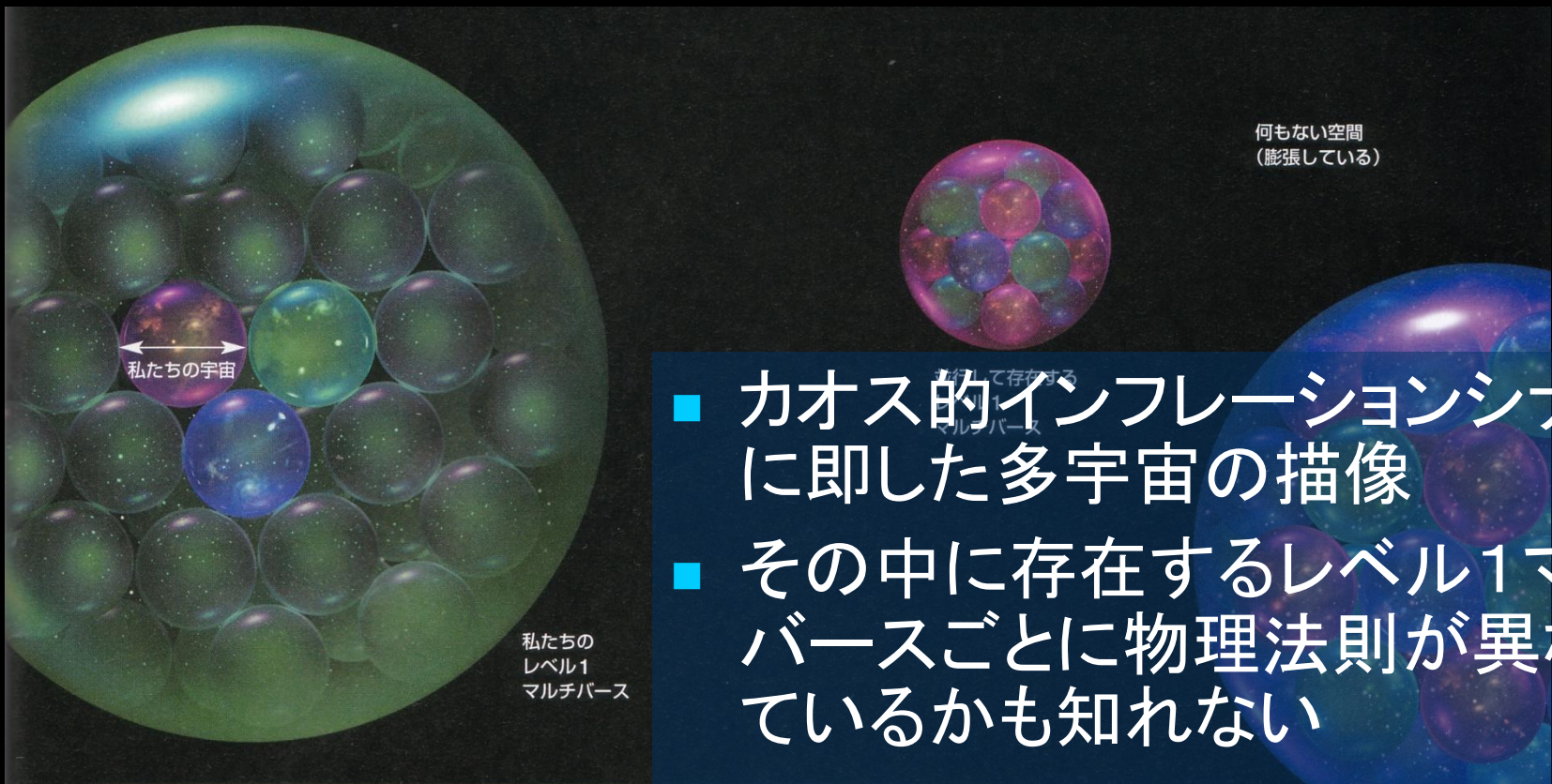
- 我々が観測できる領域の十分外側に別の領域の宇宙がある
- これらの多宇宙の集合体が全体としてレベル1 マルチバースに対応
- 個々の宇宙の物理法則は同じだが初期条件は異なる



# 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

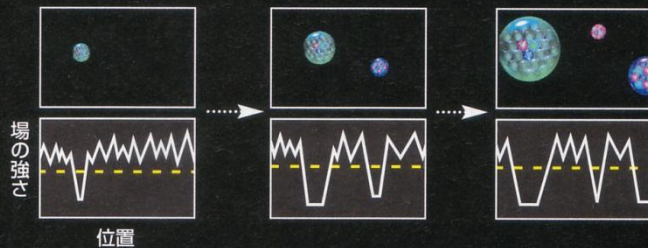
# レベル2 マルチバース



- 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

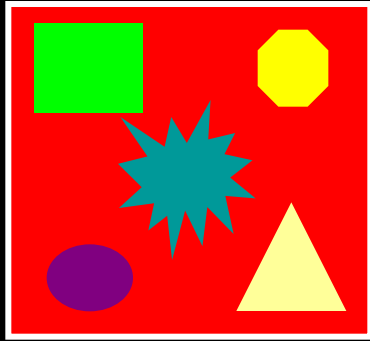
## 泡の生成

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。



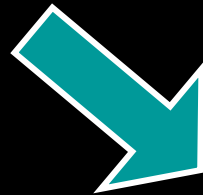
並行して存在する  
レベル1  
マルチバース

# 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



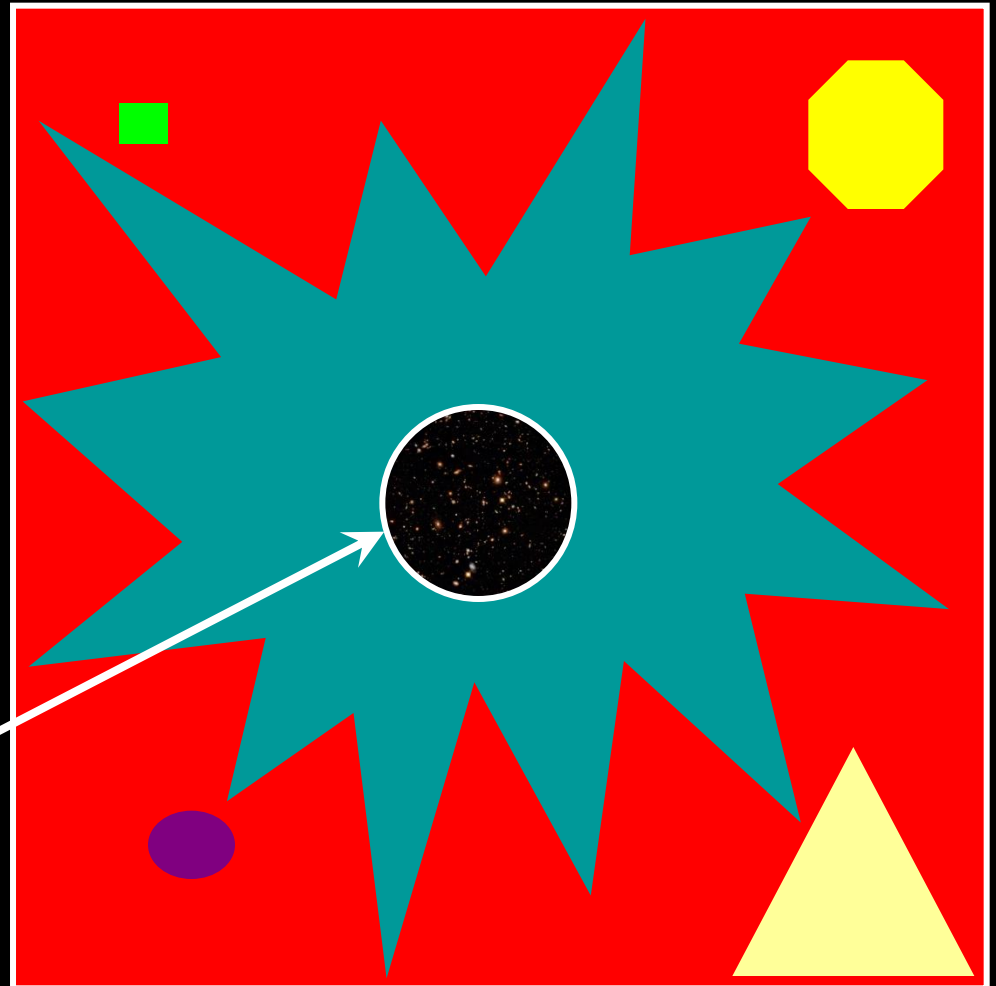
インフレーション前：

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）宇宙をつくることのできる

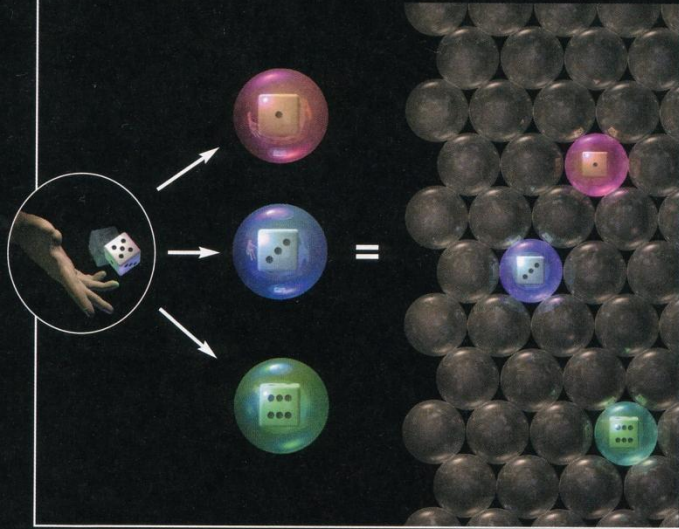


現在の宇宙の地平線  
（因果関係を持ちうる  
観測可能領域）

# レベル3 マルチバース

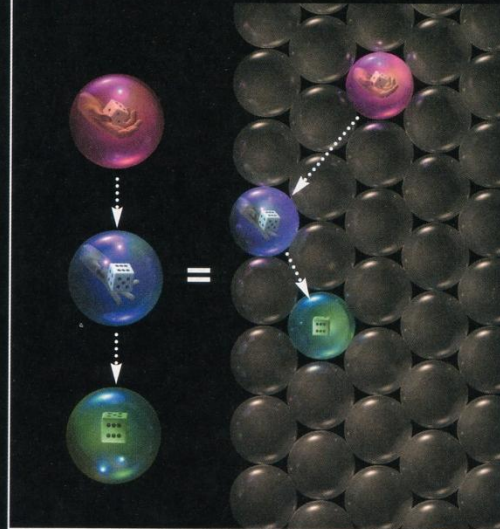
## エルゴード性

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。

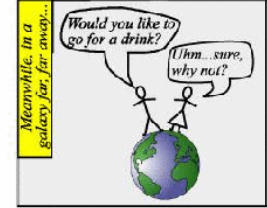


## 時間の本質

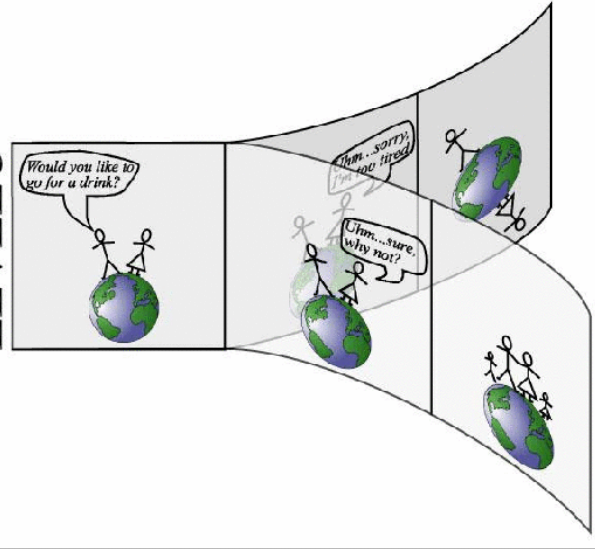
普通、時間は変化を記述するための手段と考えられることが多い。物質はある瞬間にある配置を取り、次の瞬間には別の配置になるという具合だ(左)、しかし、並行宇宙の概念では別の見方ができる。考えうる物質配列が一連の並行宇宙の中にすべて含まれているなら(右)、時間とはこれらの宇宙に順番をつけるやり方にすぎない。個々の宇宙は静的なもので、変化は幻想ということになる。もっとも、この幻想は興味深いものではあるが。



LEVEL 1



LEVEL 3



✦日経サイエンス2003年8月号 p35

✦<http://space.mit.edu/home/tegmark/crazy.html>

- 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

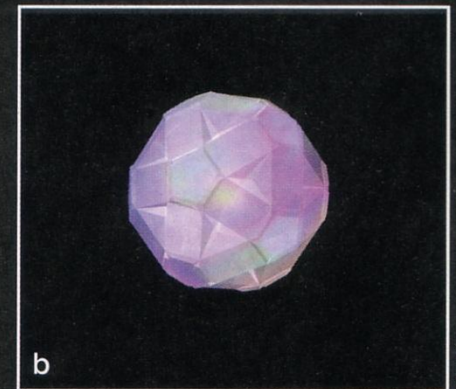
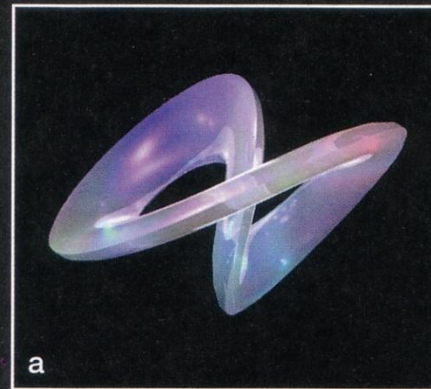
- ミクロの世界を記述する量子論には本質的な予測不可能性が存在する
  - 様々な事象が起こる確率を計算することができるのみ(量子力学の確率解釈、コペンハーゲン解釈とも呼ばれる)
  - この確率解釈が実験と矛盾する事実は知られていない
  - 実際に何らかの観測を行った結果、我々の世界ではこの確率分布に従ってある特定の事象が実現する
- いっそのこと、これらの可能性がすべて実現していると考えてはどうか(エベレットの多世界解釈)
  - それらの可能性に対応した無数の並行宇宙が存在し、それらに次々と分岐する過程を繰り返す(想像すると気が遠くなってしまいが、、、)
  - 突飛ではあるが支持する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

# 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

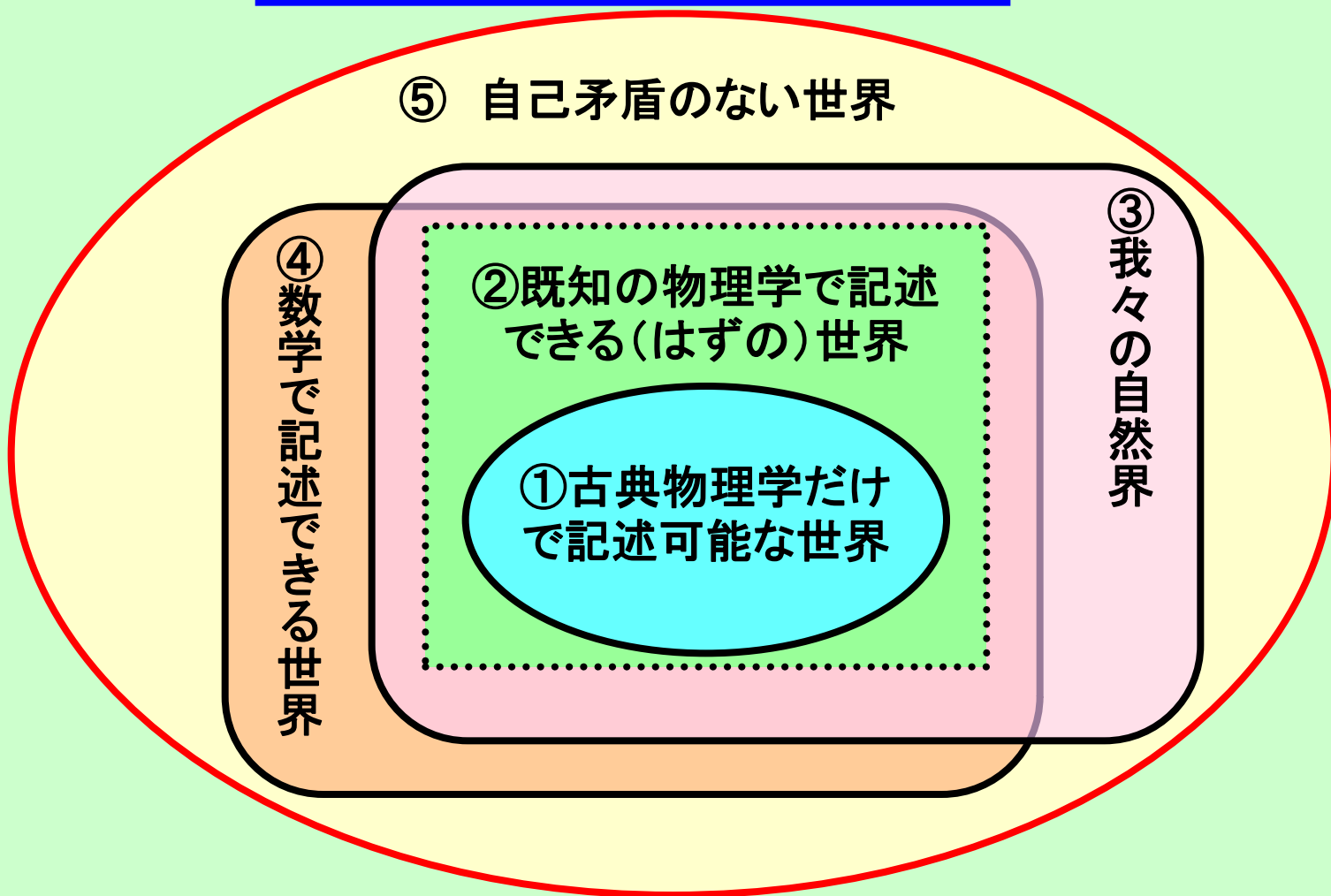
- すべてのことには理由があるはずで、偶然など認めない。それを認めることは科学の敗北である

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！

# ⑥ 科学は世界をどこまで記述できるか

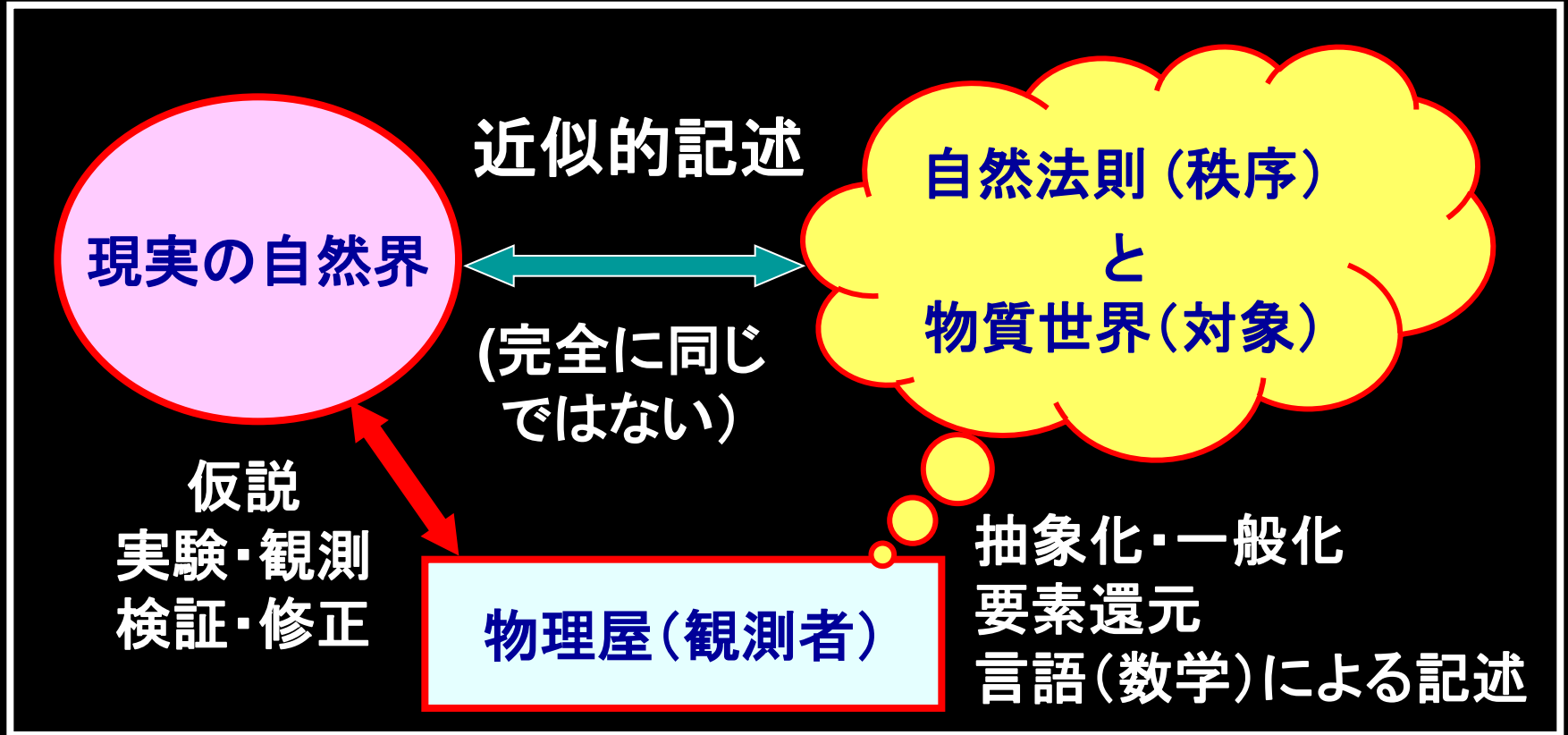
ありとあらゆる可能性

自己矛盾を含む世界



# 物理学の方法論：自然界理解の図式

このループを繰り返しながら近似の精度を高めていくのが科学という営み



↑ ↓ この方法論の妥当性の外部からのチェック ???

第三者機関（同業者、~~哲学者~~、納税者、文部科学省？）による検閲

# 物理法則と初期条件・境界条件

## 世界

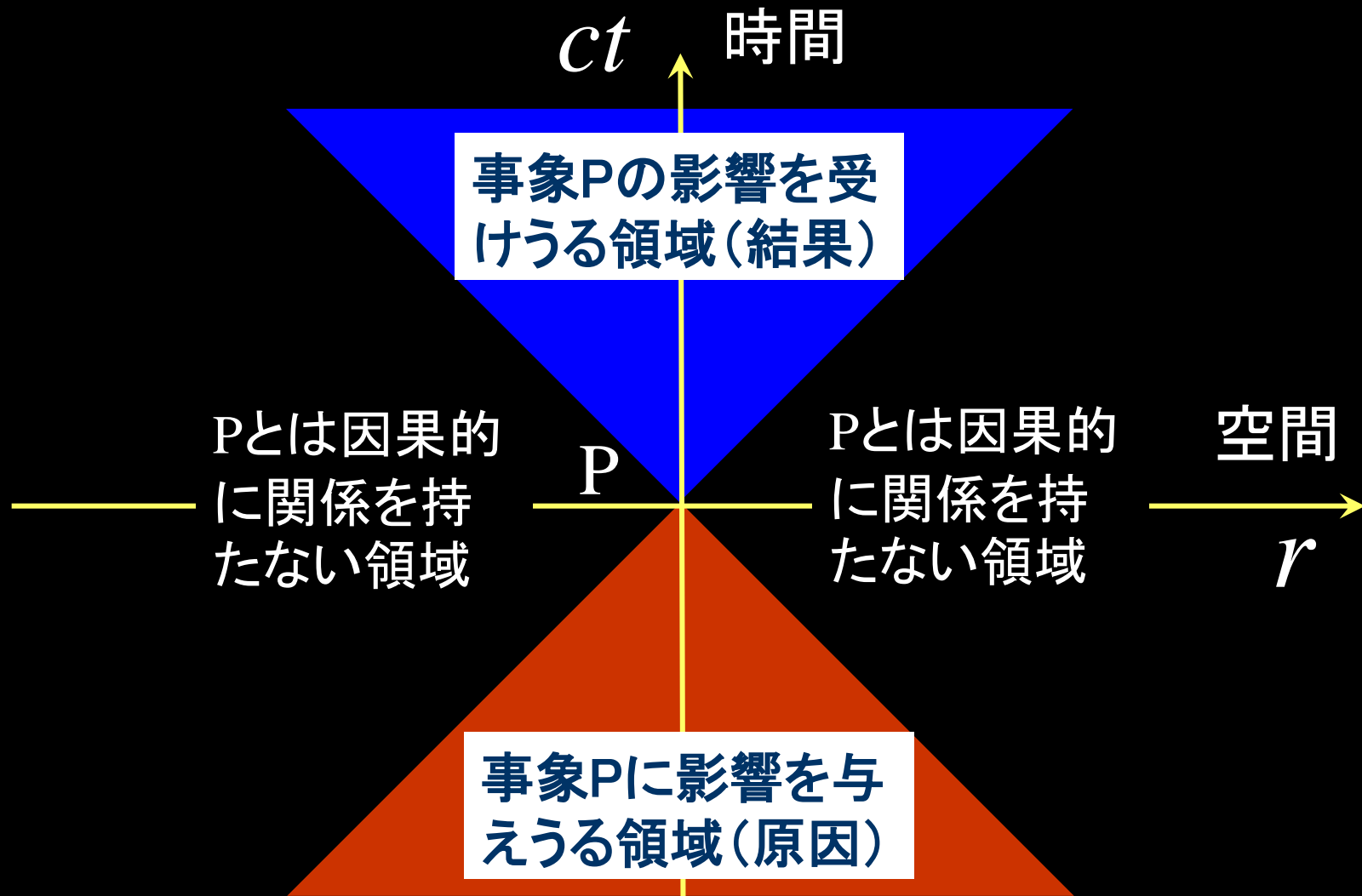
注目する  
世界の一部

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q}, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p}$$

- 物理学による世界の記述
  - 部分系を抽出
  - 系を近似して、ハミルトニアン  $H(p,q,t)$  を設定 (ここに物理法則と粗視化が介在)
  - ハミルトン方程式
$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial q}, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\partial H}{\partial p}$$
  - 初期条件・境界条件を与えてハミルトン方程式を解く (古典論を念頭においているが量子論の場合も同様)

c.f., 須藤靖:『解析力学・量子論』  
(東京大学出版会、2008)

# (物理学における)因果律



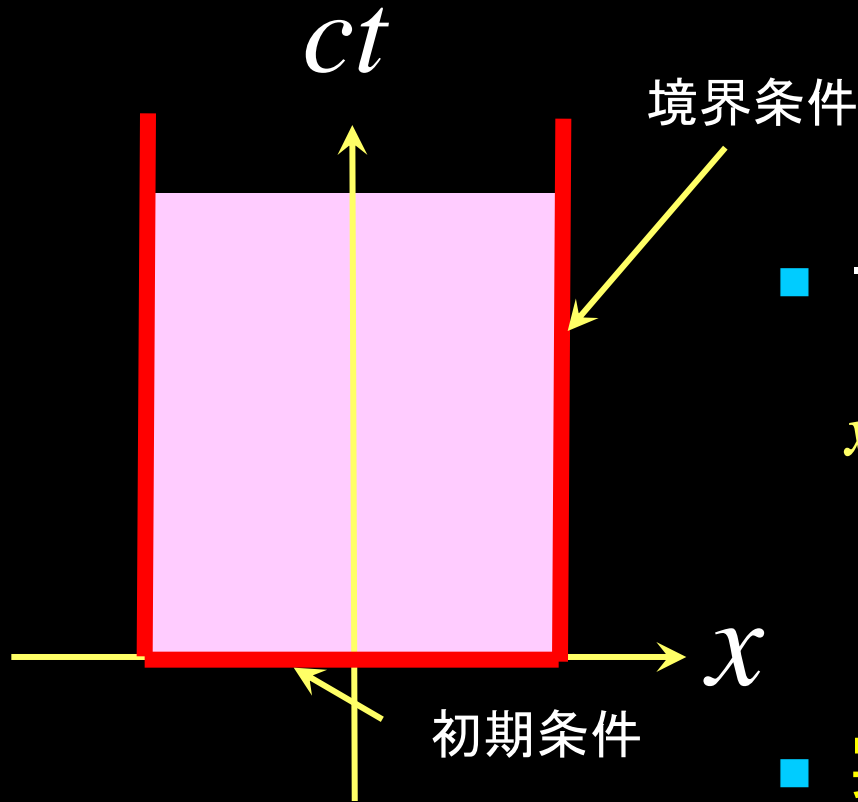
- 情報は光速 $c$ を超えて伝わることはない

# 世界の時間発展を解く処方箋

- 世界を厳密・完全に記述し尽くすことは不可能
- 物理屋のアプローチ
  - 対象とする(興味ある)一部だけを抽出
  - その部分系が従う方程式を導く
  - その部分の外側の情報を、境界条件として与えられれば、原理的にはその方程式を解くことで世界の(一部の)時間発展を記述できる

# 簡単な例

- 一次元等加速度運動



$$\frac{d^2 x}{dt^2} = a$$

- 一般解

$$x(t) = x_0 + v_0(t - t_0) + \frac{1}{2}a(t - t_0)^2$$

- $t=t_0$ における初期条件が $x_0$ (初期位置)と $v_0$ (初期速度)

- 実は $t > t_0$ である必要はない。数学的には2階微分方程式の一般解は2つの定数をもつだけで、初期=未来でも良い。

この境界での情報を与えることができればそれより外側の世界の情報は不要(というか尽くされている)

# 時間発展とは世界の一つの見かた

- $t > t_0$ であれば、過去(原因)が未来(結果)を生む、という時間発展的な解釈ができるが、 $t < t_0$ ならば、未来(結果)が過去(原因)を決める、という解釈も可能
  - つまり、過去から未来へという時間発展的な解釈は、必ずしも一意的なものではない
- 2次元時空内に $f(x, t) = 0$ という世界線が存在すると考えれば、これを $x$ について解いて $x(t)$ という時間の関数を考えるような因果論的な解釈に必然性はない

# 因果論的な解釈が好まれる理由？

## ■ 人間の時間・空間の認識方法に起因？

- ある時刻で $-L < x < +L$ の領域を見ることはできるが、ある位置での過去と未来を見ることはできない
- 過去は覚えていても、未来は覚えていない(年をとると過去もまた忘れてしまうが、、、)
- この部分は、心理学・哲学の領域かも

## ■ 時間とは何か

- 時間軸の過去と未来に関する非対称性に関係していることも確か
- その解明には、物理学的考察は不可欠

# 物理屋が考える決定論・因果律

- 物理学における「因果律」という言葉の意味
  - 情報は光速を超えて伝わることはない
  - これに矛盾する事実は何も知られていないという意味でこれを疑う必然性はない
- 何が原因で何が結果といった単純な意味づけはしないし、そもそも世界の「すべて」を説明できるとは考えていないはず(物理教最右翼を除く)。その理由は
  - 多自由度や初期条件に対する強い依存性のため、決定論的系であっても現実的精度での予言は困難(複雑系)
  - 微視的世界には原理的不確定性が存在(量子論)
  - すべての法則を探り当ててているわけではない(究極理論へ)
- 自由意志と物理学的世界観は相容れないものではない

# 多自由度系が自ら発現する新たな秩序

- 初期条件に対する強い依存性(複雑系)
  - 決定論的であっても、実質的には予言不可能
  - 量子論でなくとも、古典論のレベルでも実質的に予言不可能なことは数多い
- 要素に還元すれば無個性なパーツの集合となってしまうが、それらが集まり互いに相互作用することで、全く新しい多様性が出現(創発)
  - 素粒子論だけでは、この世の中を説明できない理由
  - 超伝導、超流動、生命現象(さらには脳や意識も)は典型例(⇒家先生を始めこれからの本講義の主テーマ)
  - 個人を要素と考えれば、この社会もまた60億人の人間の単なる寄せ集めだけでは決して説明できない多様性と秩序を発現している

# 量子論的限界

- 我々の日常的スケールではすべての現象は決定論的のように見える
  - 同じ初期条件ならば必ず同じ結果が得られる
  - 要素還元可能な事象はすべて高い精度で予言可能
- 一方、ミクロなスケール(原子のサイズ程度以下)を支配する量子論は決定論ではなくあくまで確率的にしか予言できない(と考えられている)
  - 予言の精度には原理的な限界がある

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \quad (\text{ハイゼンベルクの不確定性原理})$$

# 時間の本質？

## ■ 時間の矢：時間軸の持つ非対称性

- 熱力学第二法則「エントロピー増大の法則」
- 「宇宙が膨張している」と認識する時間の向き
- 過去は記憶していても未来は記憶していない
- これらがいずれも「同じ時間」である必然性があるか？
- 仮に宇宙が収縮し始めたなら未来を記憶して過去を忘れるのか？つまり、時間軸の向きが逆転するのか？とか、、、

## ■ 時間は存在するか

- 時空間の一次元として存在するものなのか、あるいは、そもそも事象が変化するという事実に対してつけられているラベルに過ぎないのか

- これらはいずれも本質的な問題であるが、単に哲学的な議論を展開しても、飲み屋での会話と大差なかろう。物理学に基づいた議論が必須。

# 「科学哲学」は科学を語ろうとしているか

- 科学哲学者は「科学は世界を語り尽くせるか」という問いかけをすることが多いらしい
  - 科学哲学者は「科学者は科学で世界を語り尽くせると信じている」と勝手に思いこんでいるようなふしがある
  - 世界をより適切に語るための永続的な営みが科学であるといっても良いくらいで、科学者は決して「尽くせる」と信じているわけではない
  - にもかかわらず、(科学)哲学者の一部は、科学が世界を語り尽くせない理由を切々と述べる
  - しかも、そこで展開されている論理は科学者の目からは科学的とは思えない
- 的外れな科学批判ではなく建設的な視点を提供すべき
  - 哲学者のためだけの哲学的議論に終始すべきではない

# 「科学哲学」は何を目指しているのか？

- 科学は、この世界を支えている法則と構造を明らかにするという明確な目標を持つ
  - 確かに分野が細分化されてしまった現状ではそれを見失ってしまっている科学者も多いかもしれない
  - それを補完するべく高い視野から現在の科学の方向性を議論してくれるものが「科学哲学」と私は考える
- 科学者にとってはすでに解決済みとしか思えないことを、論理的とは思えない議論によってほじくり返すことに意味があるだろうか
  - 同じ科学者の一員として、きちんとした論理に基づいて議論すべきである
  - 確かに科学者＝悪、専門馬鹿といった予定調和的な結論は大衆受けするかもしれない
  - 電子はあるか、因果律はあるか、などという話は酒を飲んだときの議論のネタ程度で十分ではないか？
  - 私の勉強不足かもしれないが(そうであってほしいと切に願う)科学哲学のゴールが明示されていないと思う

# ジョンバロウ氏の見解

- ケンブリッジ大学宇宙論教授 ジョンバロウ氏
  - J.D.Barrow: *The universe that discovered itself*  
“*the philosophy of science is about as useful to scientists as ornithology is to birds*”
  - ジョン・バロウ:『宇宙に法則はあるのか』  
(松浦俊輔訳:青土社、2004)  
「科学哲学は鳥類学が鳥の役に立つ程度にしか  
科学者の役に立たない」
- 恐らくほとんどの科学者がこの意見に共感するであろう
  - ただし、科学者の単なる偏見・傲慢か、それとも科学哲学者に内在する問題かは立場によるかも、、、

# (科学) 哲学者にこそ読んでほしい 物理学者の著作の例

- 伏見康治・柳瀬睦男編：『時間とは何か』（中公新書、1974）
- 佐藤文隆：『科学と幸福』（岩波現代文庫、2000）
- 佐藤文隆：『科学者の将来』（岩波書店、2001）
- ジョン・バロウ：『科学にわからないことがある理由—不可能の起源』（松浦俊輔訳：青土社、2000）
- ジョン・バロウ：『単純な法則に支配される宇宙が複雑な姿を見せるわけ』（松浦俊輔訳：青土社、2002）
- ジョン・バロウ：『宇宙に法則はあるのか』（松浦俊輔訳：青土社、2004）

# 世界は美しくあるべきか

- 世界を貫く基本物理法則は対称性によって支配されているというのが、物理屋の信念(宗教)
  - エネルギー保存則  $\Leftrightarrow$  時間的並進対称性
  - 運動量保存則  $\Leftrightarrow$  空間的並進対称性
  - 角運動量保存則  $\Leftrightarrow$  空間的回転対称性
- 自然界の法則(相互作用)はこのような「対称性」によって規定されていると考えるのがゲージ理論
  - 確かに現在知られている法則はすべてそのように定式化できる
  - これは決して自明ではなくまさに驚くべきことであり、物理屋の価値観に大きな影響を与えている
- しかしそうでなければならない理由がないのも事実

# 完全な対称性からのわずかなずれが大切？

- 実は自然も対称性を少しだけ破っていることが多い
  - 粒子の質量の起源（自発的対称性の破れ）
  - 対称性の破れ方こそ世界の多様性の源泉
- 完全すぎるものは美しくない？
  - 完全でないところが個性であり愛すべき点
  - 左右完全に対称な顔は良く見ると不気味？
  - なぜか、基本的な漢字の多くは左右対称性を微妙に破っているようだ
    - 月、火、水、木、金、土、日、大、中、小、人、生、山、川、光、門

# 要素還元的方法論の限界

- 複雑な現象を、細かい素過程に分解しそれぞれの要素を理解するのが伝統的な物理学の方法論
  - 素粒子物理学をはじめとして、この方法論の成功のおかげで20世紀の物理学は飛躍的に進歩した
- 一方、要素に分解してしまうと何も面白くないにもかかわらず、それらが複雑に絡まることで初めて見えてくる多様な現象が存在する(物理学の魅力⇒家先生)
  - これは統計物理学や物性物理学において顕著
  - 生物などはその端的な例である。要素に分解してしまっっては、生物と無生物の境界は定義できない
- しかしながら、それらの複雑な現象の理解はどうしてもケースバイケースで取り組むしかなく、普遍的な枠組みの構築は困難
  - 政治、社会、経済はまさにそのような例とも言える

# 自然法則は再現可能でなくてはならないか

- 同じ条件のものでは、常に同じ結果が再現できることが自然法則の大前提
  - しかし、そうでなければならぬ理由はあるのか
  - 自然法則が再現可能でないとしたときにどのような世界が具現するのか
  - 仮にそうだとすても、厳密に「同じ条件」が実現されることはあるのか
- 宇宙は膨張しているもので、温度や密度が時々刻々変化している。もし、自然法則がこの宇宙の状態にも敏感に依存しているようなものであれば、厳密に同じ結果が再現される必要はない
  - 自然法則も時間変化して良いのではないか
  - 少なくとも基本物理定数が時間変化していけない積極的な理由は考えつかない

# ディラックの大数仮説

- 我々の世界にはなぜか、 $10^{40}$ あるいはその2乗といった、言語道断の桁を持つ(意味ありげな?)無次元量が存在する
- さらにそれらは、本来ミクロな物理法則だけで決まるものと、宇宙に関して初めて登場するものの2種類が存在

- 宇宙年齢と古典電子半径の通過時間

$$N_1 \equiv \frac{t_0}{e^2 / m_e c^3} \approx 6 \times 10^{39}$$

- 陽子電子間の電気力と重力の比

$$N_2 \equiv \frac{e^2}{G m_p m_e} \approx 2 \times 10^{39}$$

- これらが独立であるはずがない。つまり、たまたま現在成り立っているのではなく常に成立していると考えるのが自然 (P.Dirac 1937; Nature 137, 323)

$$G(t) \approx \frac{\alpha_E^2 \hbar^2}{m_p t} \propto \frac{1}{t}$$

(もし他の基本定数が時間変化しなければ)

# 基本物理「定数」は時間変化する？

- 「現在」が宇宙の歴史においてなんら特別な時期ではないとすれば(コペルニクスの)、物理「定数」は時間変化すると思うほうが自然
- 連星パルサーの観測から重力定数については厳しい上限が導かれている

$$\dot{G} / G = (1.0 \pm 2.3) \times 10^{-11} \text{ yr}^{-1} < 0.1 / t_0$$

- 一方、微細構造定数については遠方クエーサーの吸収線の微細構造線の観測より有意な時間変化を主張するグループもある
  - Webb et al. PRL82(1999)884, PRL 87(2001)091301

$$\Delta \alpha_E / \alpha_E = (-0.72 \pm 0.18) \times 10^{-5} (0.5 < z < 3.5)$$

- 少なくとも、物理定数に対してすら「神聖にして侵すべからざるもの」というタブー視の風潮は弱まってきた

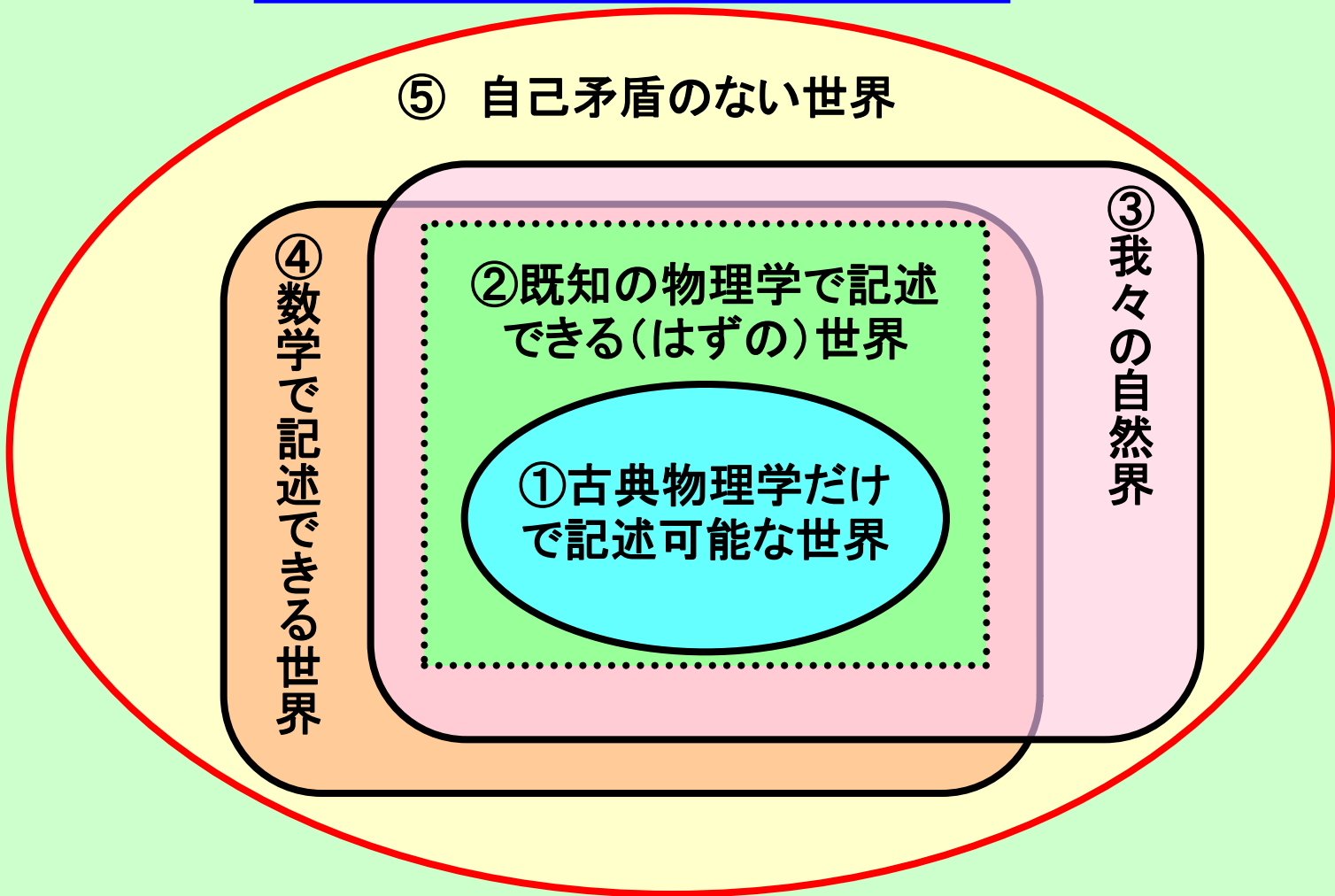
# 世界はどこまで理解できるのか

- この宇宙を支配している摂理や法則という抽象的な意味での「世界」が存在していること自体が不思議
  - 哲学者なら「世界は本当にあるのか」と問いかけることだろう
- その「世界」を我々のような人間が部分的であろうと理解できていることはさらに不思議
  - 我々はまだ不完全であるとはいえ、自然科学という体系の構築に成功している
  - ネアンデルタール人がそのようなことを成し遂げられるとは思えない
  - 世界を理解するための最低限の知性は何か
  - 我々人間はどこまで世界を理解可能な知性のレベルなのか

# 「世界」の可能性

ありとあらゆる可能性

自己矛盾を含む世界



# 科学を知り 世界を知る

- 現代科学は哲学を必要としているか？
  - 最近の天文学観測の進歩にともない、宇宙に関する理解は飛躍的に広がった
  - その結果、我々の宇宙さらには世界を理解するうえでは、それら以外にも宇宙や世界があるほうが自然なのではないかという考えすら生まれてきた
  - 我々人類はどこまで世界を理解できるかは明らかではない
  - 世界を知るという試みは、科学の原動力であり、決して終わることのない営みとして人類が存在する限りいつまでも続く文化である
- 「我々は何も知らなかった」と痛感する時期を迎えたい

**All truths are easy to understand  
once they are discovered;  
the point is to discover them.**

Hale Telescope at the Palomar Observatory

Photograph of 200-inch Hale telescope and dome.

Image Credits: Peter Sorel and Charles H. Cahill

**- Galileo Galilei**