

多重宇宙と人間原理

～「偶然」を持ち出さずとも世の中
すべてが説明し尽くせるのか？～

東京大学 大学院理学系研究科

物理学専攻

須藤 靖

2005年2月16日 16:30-18:00 新聞記者勉強会

@KEK3号館2階

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2005j.html

参考文献

- J.D.Barrow & F.J. Tipler : “The anthropic cosmological principle” (1986, Oxford Univ. Press)
- S.Weinberg : “The cosmological constant problem”, Rev.Mod.Phys. 61(1989)1–23
- M. Tegmark : “Parallel universes” Scientific American 2003 May issue (日経サイエンス2003年8月号)
- M.Tegmark : astro-ph/0302131, 0410281
- 松田卓也: 「人間原理の宇宙論」 (1990、培風館)
- 池内了: 「宇宙と自然界の成り立ちを探る」 (1995、サイエンス社) 12章、13章
- 今回のプレゼンのpdf file :

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2005j.html

物理屋的世界観

- 世の中の「本質的なこと」はすべて物理法則によって自然に説明できるはずである
- むろん、わかっていない現象はたくさんあるが
 - 自由度が多く、初期条件を精度よく推定できないために細かいことまではわからないだけ（複雑系）
 - まだ正しい物理法則の理解に至っていないだけ（すべての相互作用の統一）
- つまり、単に我々がまだ未熟者であるだけで、もっと修行を積みればわかるようになるはず
 - 学者という職業の存在意義
- 「神様」を持ち出す必要はない

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
 - ただし、それらをダーウィンの「あとづけ」の理屈で、ある程度理解することは可能

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
 - 量子宇宙論
- 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、宇宙の創生を物理学で記述でき、その後の進化も予言できるという「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
 - 宇宙の進化は偶然に左右されることはほとんどないからこそ、現在の観測データから宇宙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

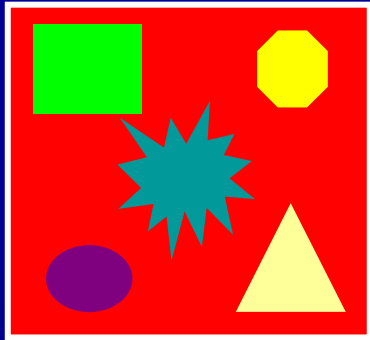
必然性と偶然性

- 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）の役割はある程度分離して議論できる
 - 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
- しかし、宇宙の誕生の場合には両者の関係は自明ではない
 - そもそもインフレーションシナリオの世界観は、初期条件の不定性（偶然性）を利用してダーウィンの「自然淘汰・適者生存」の概念を宇宙論に持ち込んだということもできる

↑必然

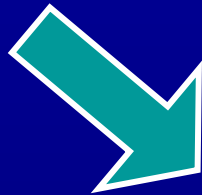
偶然↓

インフレーションシナリオ的世界観： 自然淘汰と適者生存



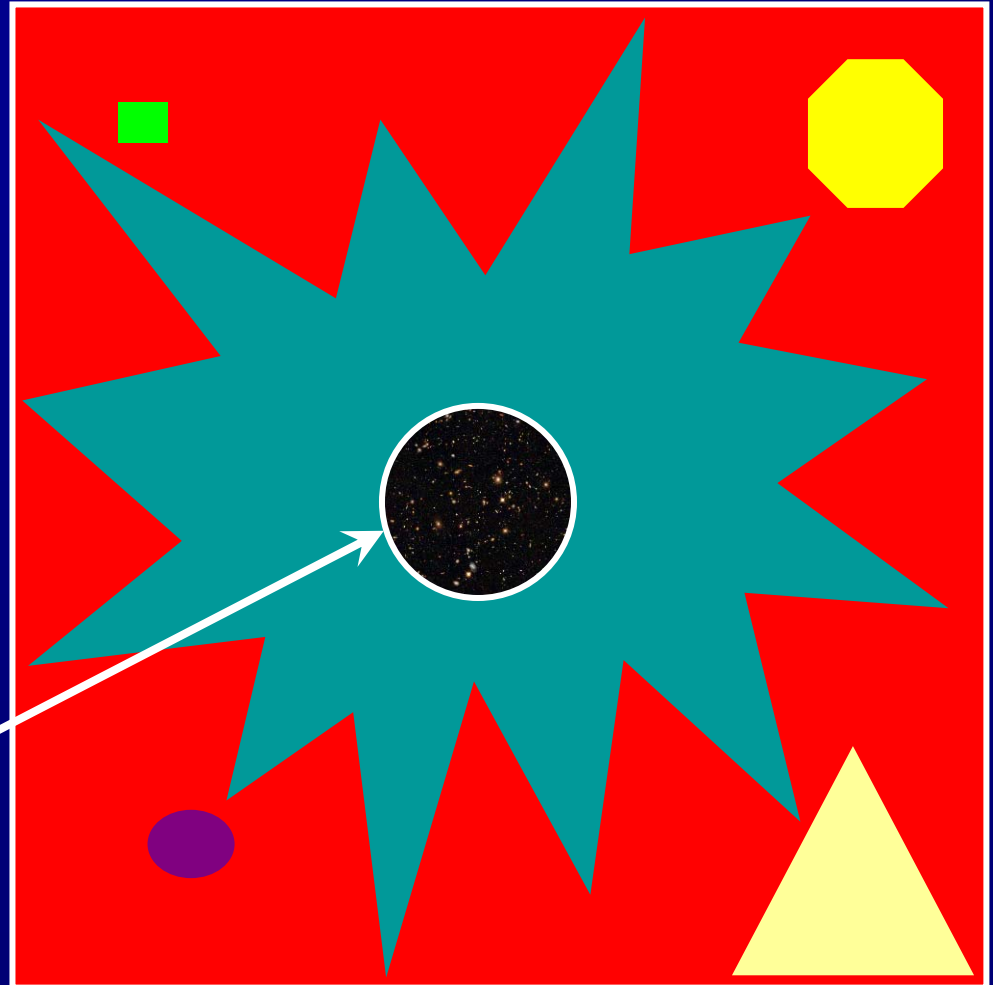
インフレーション前：

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：

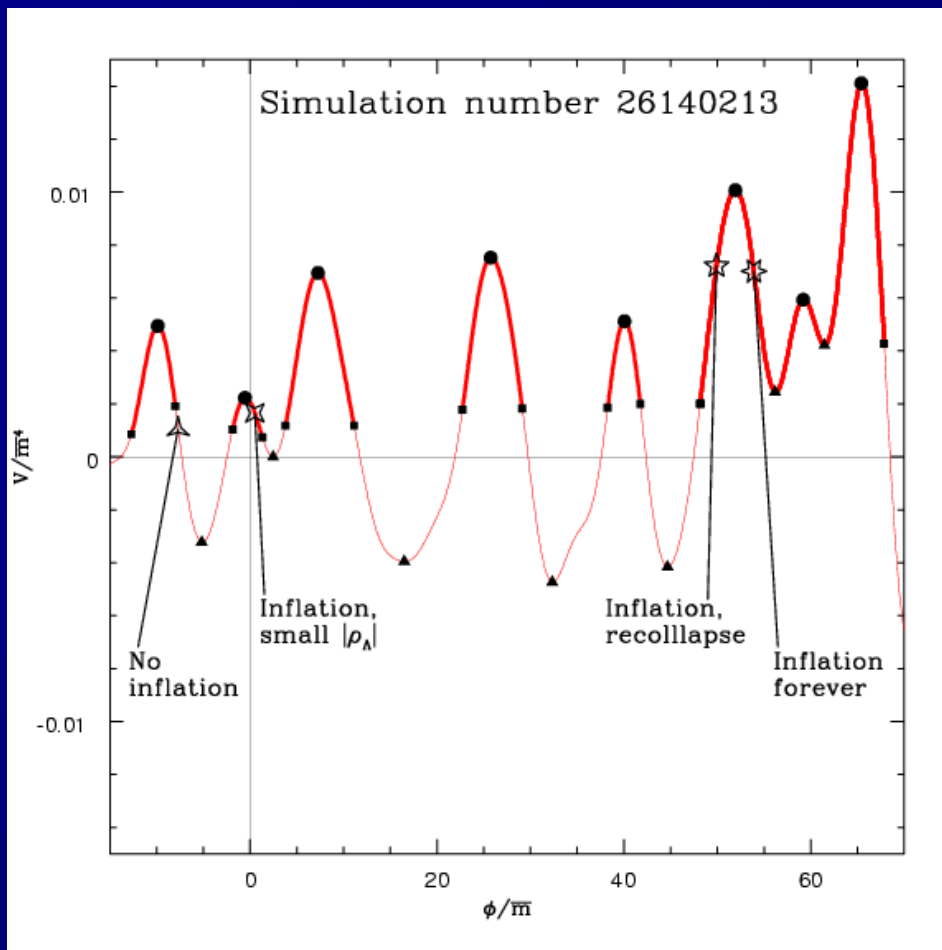
適切な初期条件を持った領域だけが指数関数的膨張をし、現在の（我々の）宇宙をつくることができる



現在の宇宙の地平線
（因果関係を持ちうる
観測可能領域）

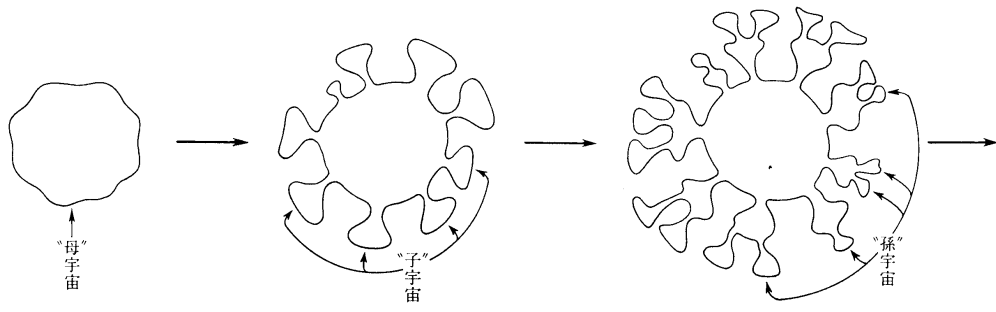
インフレーションシナリオ的多重宇宙

- インフレーションを起こす場はもともと空間各点で任意の値をとっていると考えるのが自然
- またそのポテンシャルエネルギーの形もさまざまなものがあるはず
- しかし、うまく我々の宇宙につながるためにはこれらの微調整が必要
- どれほど小さな領域であろうといったんインフレーションを起こしてしまえば、そこが主要な体積を占めるようになる
- 逆に言えば、この考えは多重宇宙と実に相性が良い
- この考えを最初に提案したのは Sato, Kodama, Sasaki & Maeda, PLB 108(1982)103
- その後A.Lindeが精力的に主張

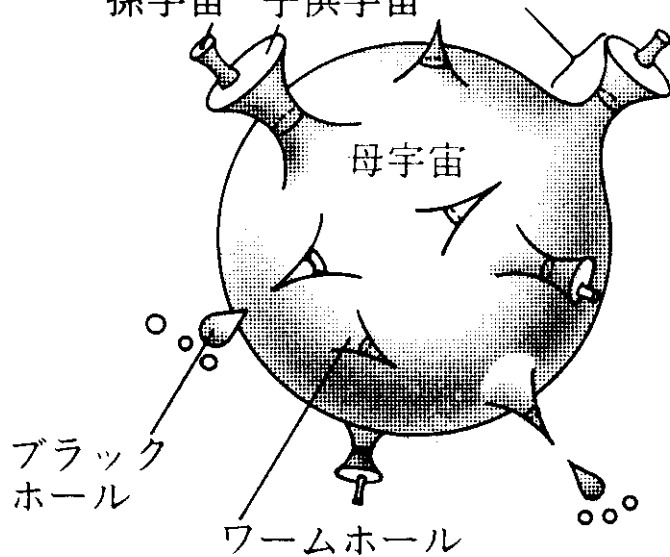


Tegmark astro-ph/0410281

インフレーションシナリオ的多重宇宙像



アインシュタイン・ローゼンの橋
孫宇宙 子供宇宙



(佐藤勝彦氏提供)



「The Genesis out of the Vacuum」1989年 ガラス 38.5×24×24cm/宇宙の生成のようすをガラスで表したこの作品。イメージの背後には長年の探究がある。作者は、太陽や月に毎日カメラを向けて、もう20年。宇宙に魅せられ、シャッターを押しつづけるために会社も辞めてしまった。ガラス職人とのコラボレーションで生まれたこの彫刻にも、宇宙の雄大な動きそのものがたくいまれな造形だという確信がうかがえる。

アーティスト
野村 仁

Hitoshi Nomura

1945年兵庫県生まれ。活動当初より物体の変容を写真に記録。のちに1枚のネガに1年間の太陽の軌跡を刻した「アナレンマ」シリーズや、一夜の月の運行を楽譜にした「moon' score」など、宇宙の時の流れを視覚化した作品が代表作となる。

物理法則と初期条件

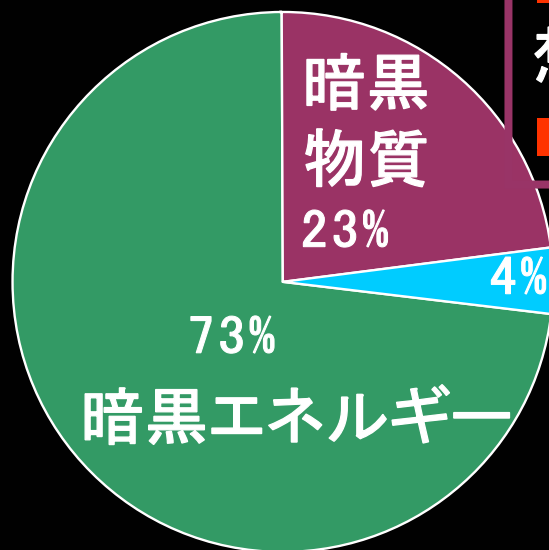
- 宇宙の誕生を議論する際、物理法則と初期条件をどこまで区別し得るか？
 - 物理法則は宇宙に関係なく存在するなのものか？
 - 因果関係を持たないような2つの領域を考えたとき、そこでの物理法則はまったく同じなのか？
 - そうだとすれば、因果律を「超えて」宇宙のどこでも等しい物理法則を仮定した上で、インフレーションによって我々の観測可能領域内での因果律は破れていないとする立場は、何を説明したことになるのか？
 - 物理法則は「誕生・進化」するものか？ 物理法則を記述する「メタ物理法則」は存在するのか？ 物理法則の「運動方程式・伝播方程式」は存在するのか？
 - ここまで来ると、かなり危ない、、、

ここまでのまとめ：メタ宇宙原理

- 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
 - アインシュタインの静的宇宙から進化する動的宇宙へ
 - 宇宙原理：宇宙のなかで現在の我々はいかなる意味においても特別なものではない
 - 1995年以来すでに140を超える太陽系外惑星の発見
- 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？
 - メタ宇宙原理(今回私が仮に名づけただけ)：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
 - universeという概念から multiverse (M.J.Rees)へ
- 生物学のみならず、宇宙論においても「適者生存」という考え方は市民権を得ている
 - では、「適」とは何に対して適なのか？⇒ 人間原理

宇宙は何からできている？

宇宙の組成



- 銀河・銀河団は星の総和から予想される値の10倍以上の質量をもつ
- 未知の素粒子が正体？

通常物質 (バリオン)

- 宇宙空間を一様に満たしているエネルギーが宇宙の主成分！
- 万有斥力(負の圧力)
- アインシュタインの宇宙定数？

- 元素をつくっているもの(主に、陽子と中性子)
- 現時点で知られている物質(の質量)は実質的にはすべてバリオン

宇宙定数の歴史

- 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

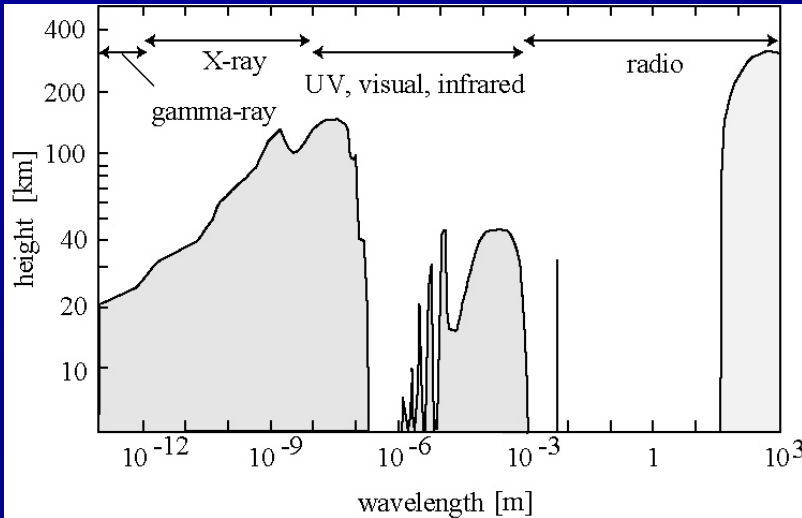
$$\Lambda = \frac{c^5}{\hbar G} \approx 5.2 \times 10^{93} \text{ g/cm}^3 \quad \Leftrightarrow \quad \Omega_{\Lambda} \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2} \approx 10^{121}$$

- 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！

我々の宇宙における不思議な事実

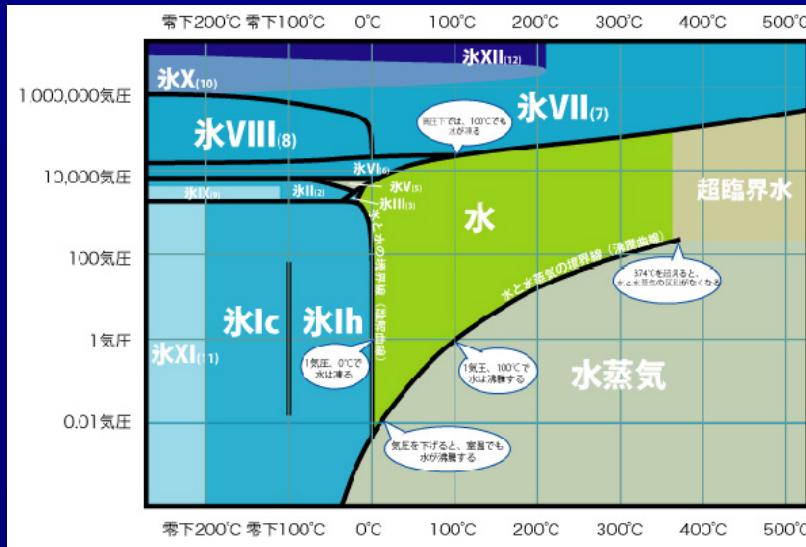
- 無生物から生物が誕生した
- 原始生物から意識・文明を持つような人類が誕生した
- 宇宙の現在の年齢 \doteq 太陽系の年齢 \doteq 星の年齢 \doteq 生命誕生から知的文明誕生までの所要時間
- 宇宙のダークマター密度 \doteq バリオン密度 \doteq ダークエネルギー(宇宙定数)密度

自然界の絶妙なバランス(1)



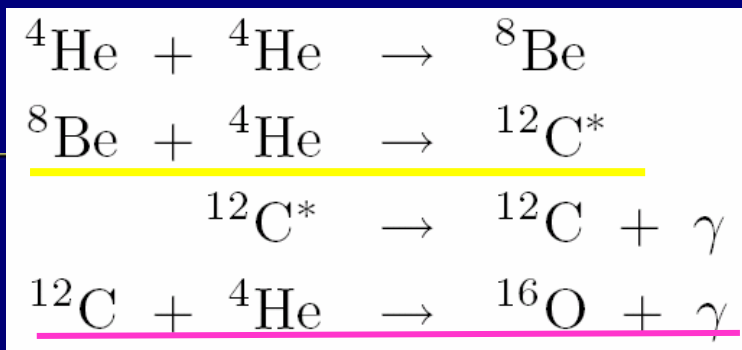
天文学への招待(朝倉書店) 図1.2

- 太陽の輻射のピーク付近に対して地球大気が透明であり、かつDNAを破壊する紫外線には不透明。
- 水は例外的に固体の氷のほうが密度が低い。仮に、逆であれば、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その後融けることはなかろう。したがって、結局海や湖がすべて凍ってしまい、生命を産みまた循環させることは不可能。
- 男子の出生率は女子に比べて若干高い。これは、男子の方がやや病気に対して弱いからそれを補っているのだというもっともらしい後付けの理屈がある(男は戦争時により危険な立場にあるからというさらにすごい説まである)。
- なぜ成人の男と女の比が1対1である必要があるかは疑問ではあるが、これは生物学的な第一原理から物事を説明することを避けたいかにもダーウィンの説明の典型例で、人間原理もこの延長線上にあるのかも。



自然界の絶妙なバランス(2)

- 炭素の多様な結合性が有機物からなる生物の存在の基盤
- 炭素の起源: 3α 反応
 - ^4He までは宇宙初期(宇宙生成最初の3分間)に合成される
 - 質量数5と8をもつ安定な元素がないので2体反応による核合成は ^4He より先に進めない(ビッグバン元素合成)
 - Hoyle (1952)は、星のなかで炭素が合成されることを要請して、7.7MeV付近の ^{12}C の共鳴状態の存在を予言。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！
 - $^8\text{Be}-^4\text{He}$ 系の準位: $7.3667\text{MeV} \leq ^{12}\text{C}^*$ の準位: 7.6549MeV
 - $^{12}\text{C}-^4\text{He}$ 系の準位: $7.1616\text{MeV} \geq ^{16}\text{O}$ の準位: 7.1187MeV



1	← (原子番号)
H	← (原子記号)
1.008	← (原子量)
水素	← (原子名)
3	
Li	
6.941	
リチウム	
4	
Be	
9.012	
ベリリウム	

5	6	7	8	9	10
B	C	N	O	F	Ne
10.81	12.01	14.01	16.00	19.00	20.18
ホウ素	炭素	窒素	酸素	フッ素	ネオン

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、すごい偶然?**

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)

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

(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」は時間変化すると考えるほうが自然
- 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

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

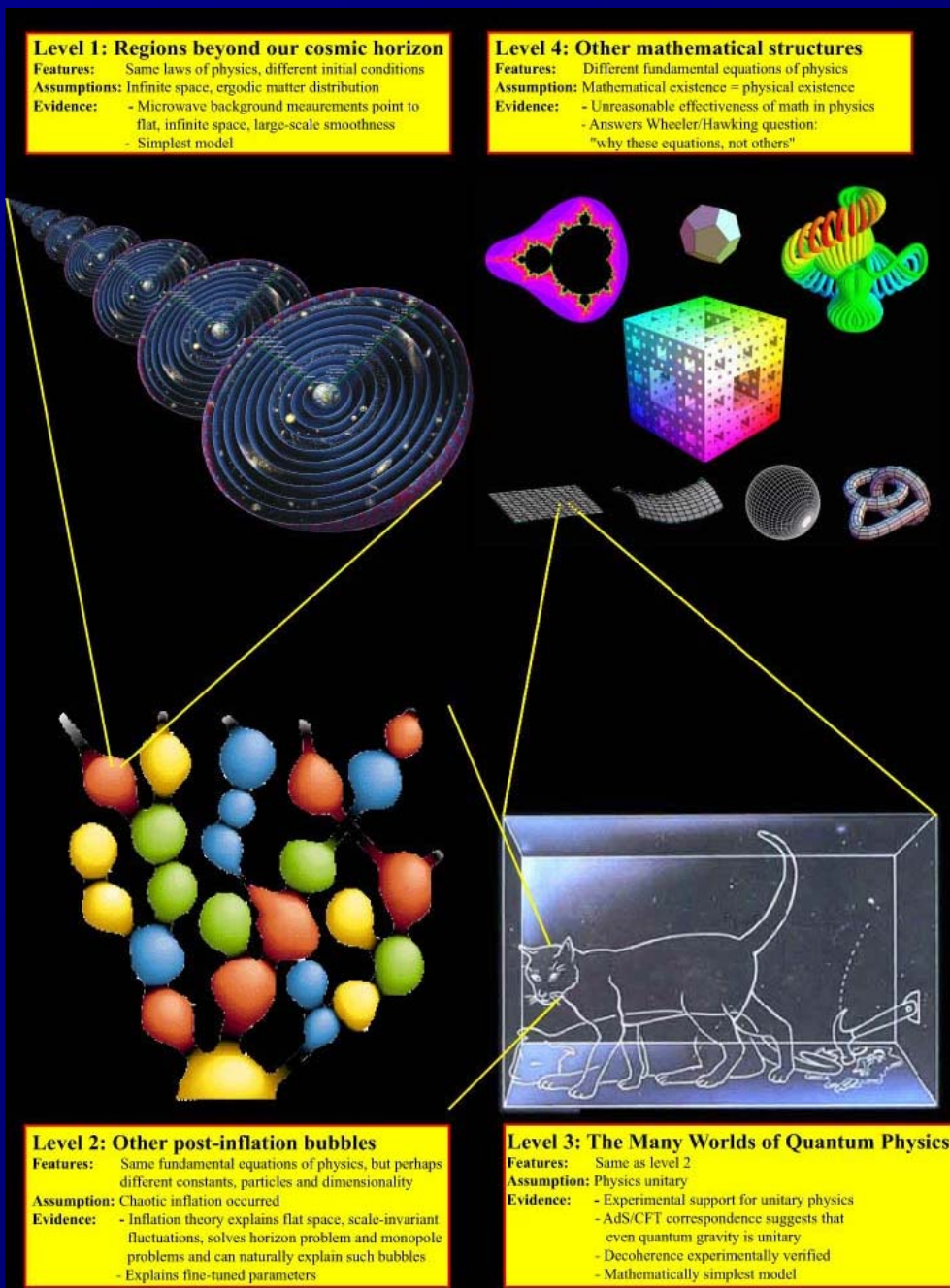
- ベイズ統計にしたがって、極度にありえない事象を同等にありえない事象が成り立つ場合の条件付確率として理解してはどうか？
- $P(\text{不思議な事}) \ll 1$ であるが、 $P(\text{人間の存在})$ もまた $\ll 1$ であるから、「不思議なこと」と「人間の存在」が相関していたならば、その条件付確率 $P(\text{不思議な事} | \text{人間の存在})$ が ≈ 1 となることはあり得る
- 不思議さが減り、何か心が安らぐような気がする(宗教としては大切)

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

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)



実は昔からある素朴な疑問

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

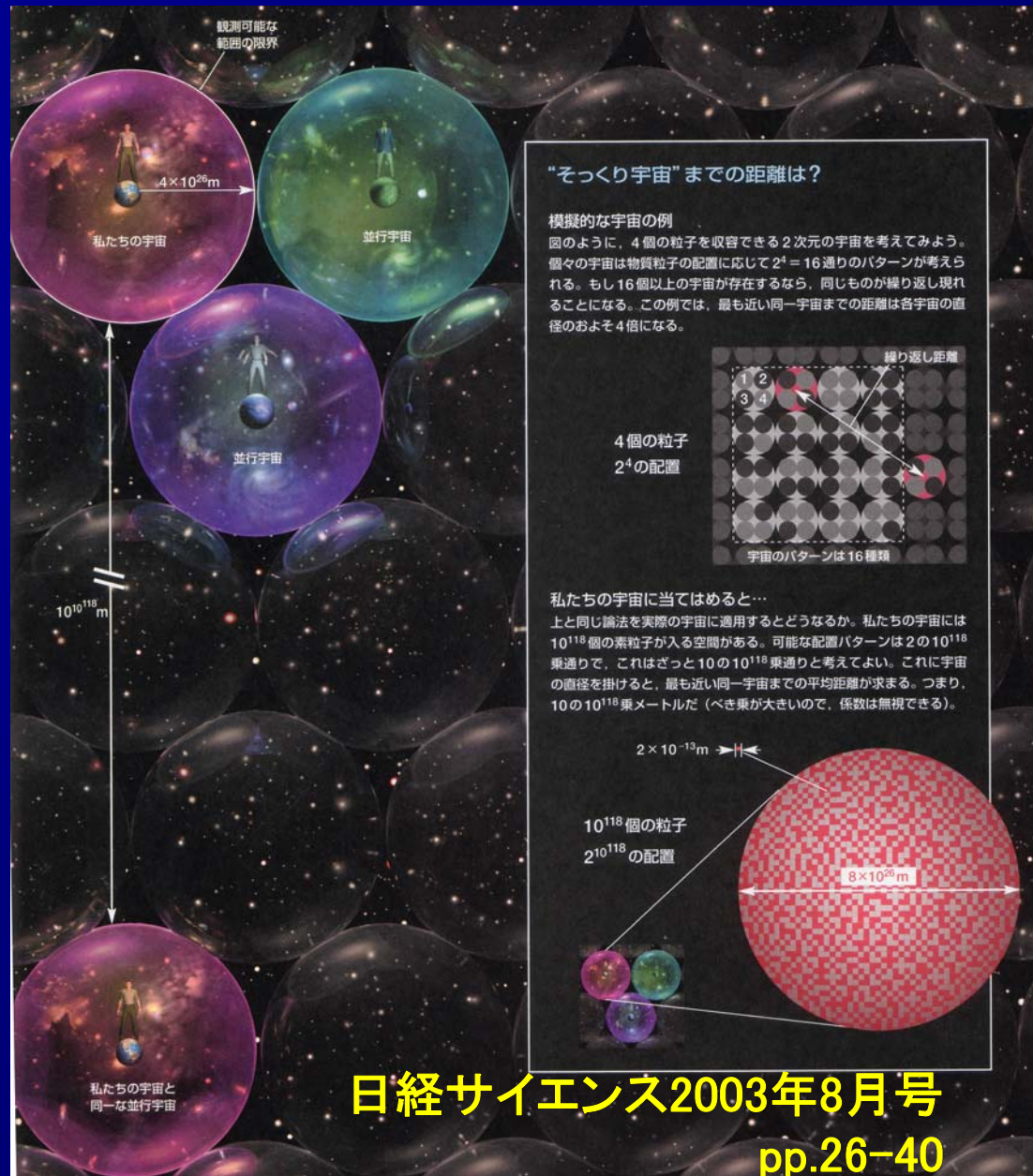
-Epicurus (341-270 BC)

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

何もない空間
(膨張している)

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。

場の強さ

位置

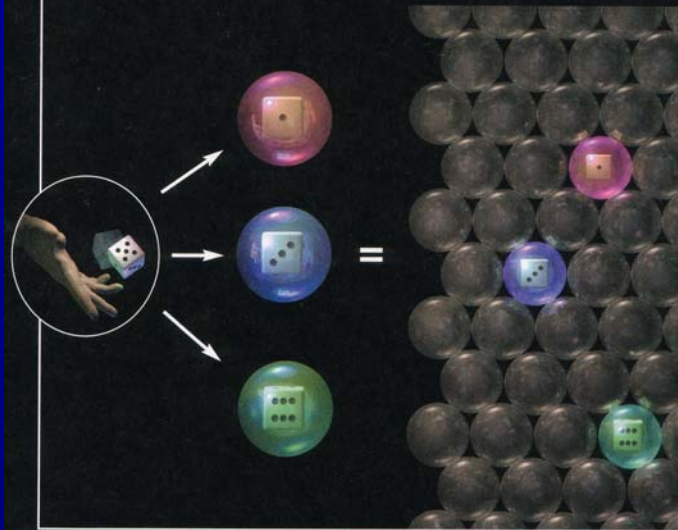
並行して存在するレベル1 マルチバース

insc01

レベル3 multiverse

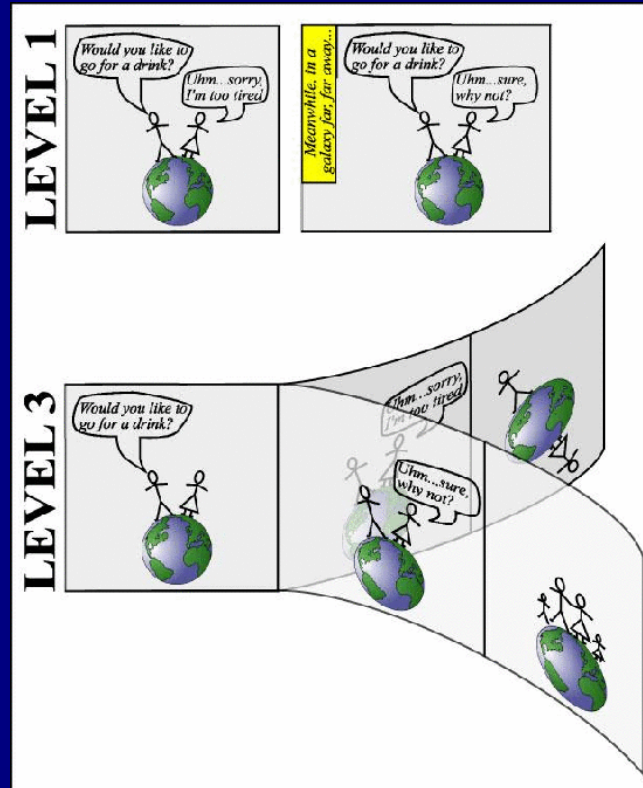
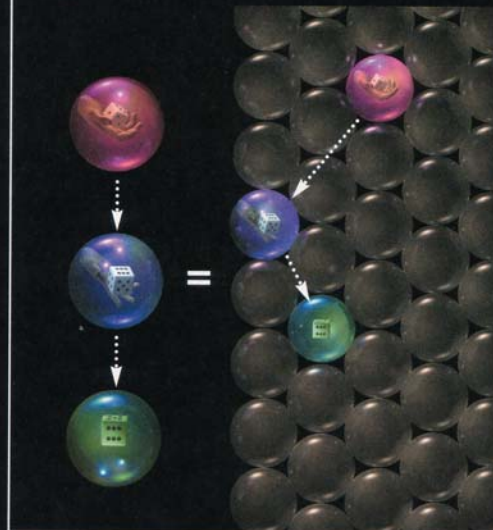
エルゴード性

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

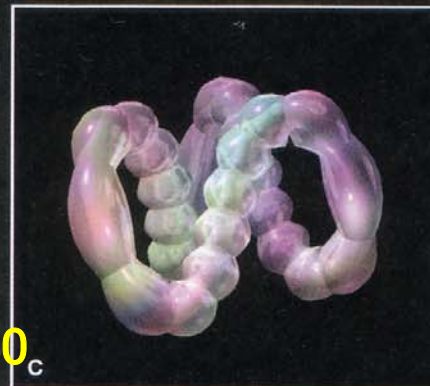
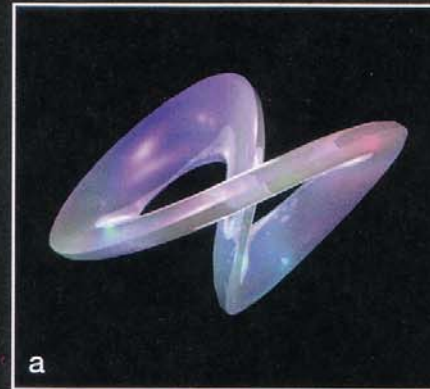
- エベレットによる量子力学の多世界解釈に基づく
- レベル1、レベル2に比べるとずっと概念的で突拍子もない考えのようであるが、この量子力学的解釈を支持する人は多い

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

法則の数学的構造を表現した「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。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。



結論（もしあるとすれば）

■ 究極理論 vs. 人間原理

- 我々の宇宙とそこでの物理法則にはもちろん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（予言能力がないあとづけの理屈？）
- 事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

- （ある種の）インフレーションシナリオのもとでは、多重宇宙が存在するほうがむしろ自然（検証は不可能？）
- ただし、現在インフレーションシナリオを実現する具体的・現実的素粒子モデルは知られていない（だからインフロン場という名の下に理想化された議論のみがなされている）

■ 個人的には、人間原理は傲慢ではなくむしろ謙虚な態度のように思えて好感をもっている。