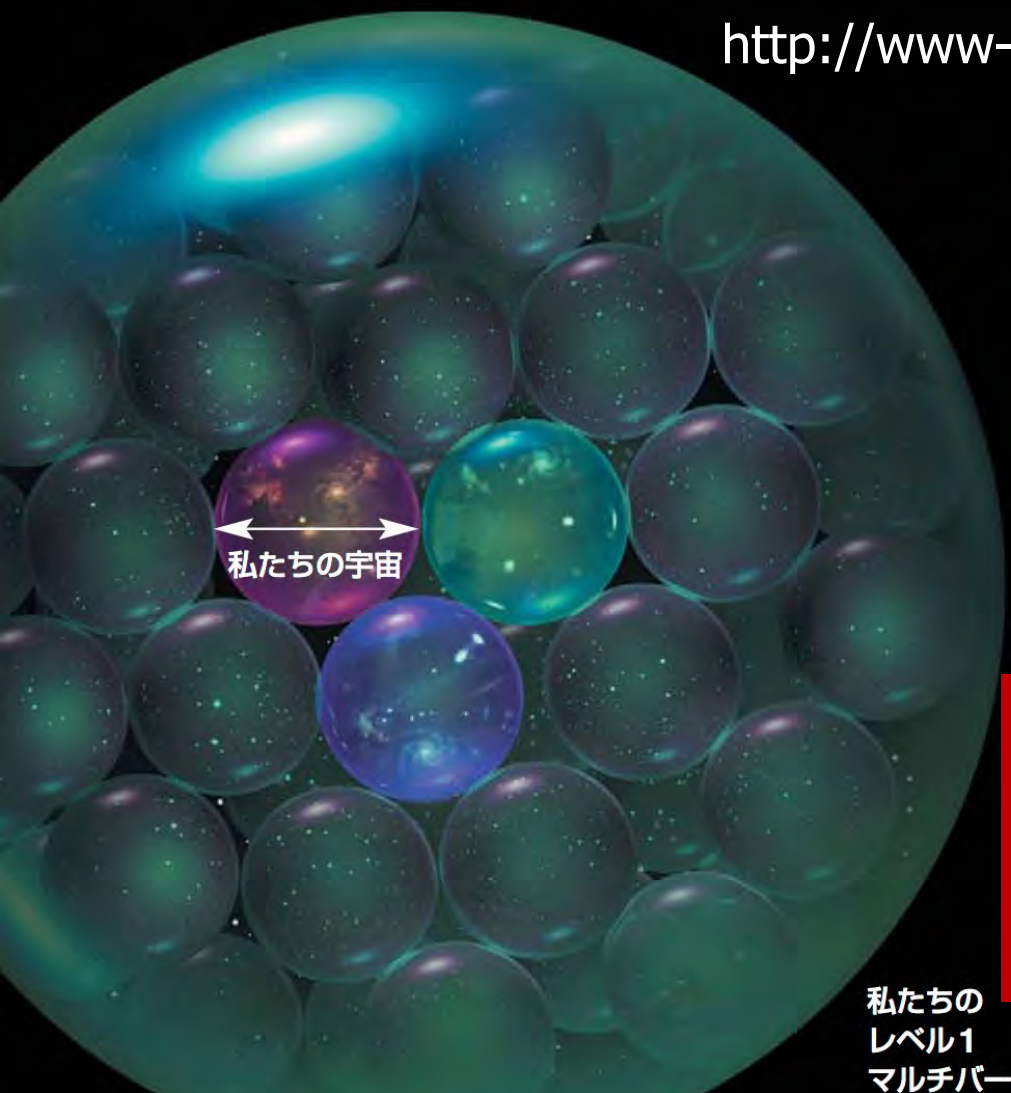


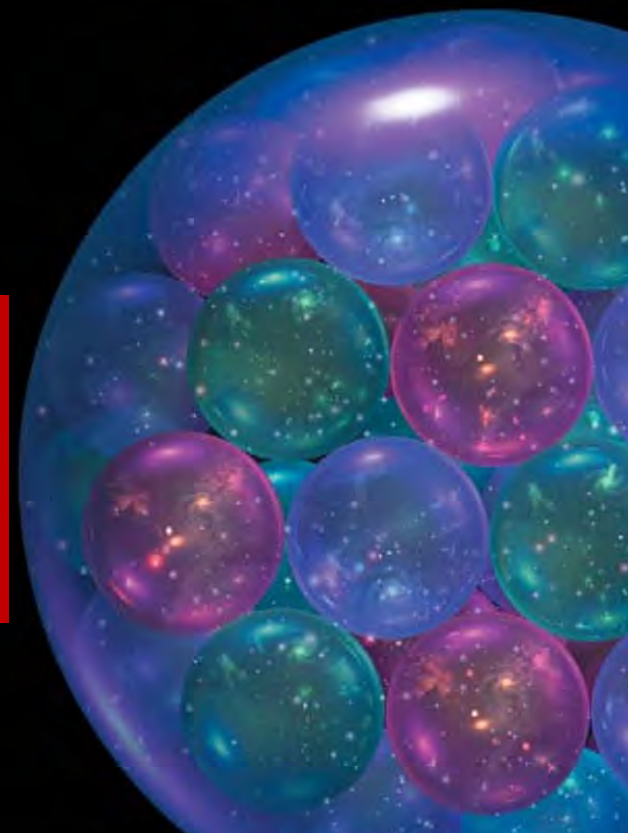


私たちの宇宙



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)



私たちの
レベル1
マルチバース

マルチバース的 世界観

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

理工学のフロンティア 2021年度第10回 (オンライン)

2021年12月7日16:50-18:00@高知工科大学

日経サイエンス2003年8月号

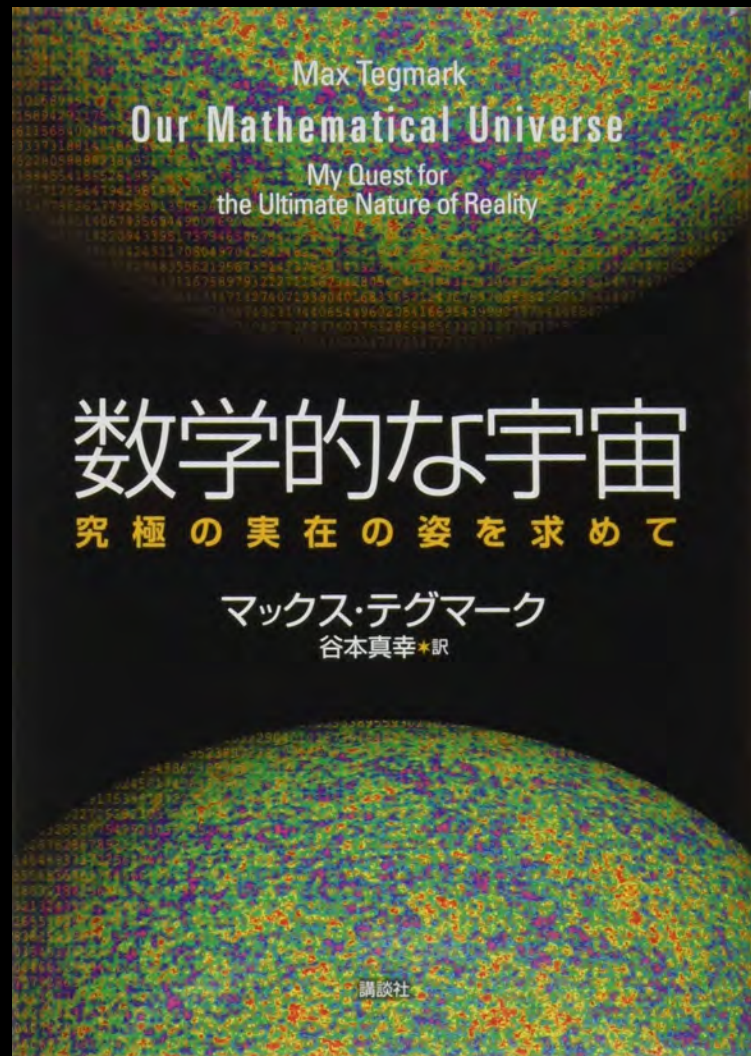
目次

- 1 地平線の先に広がる世界
- 2 マルチバースの分類
- 3 多世界解釈と量子自殺
- 4 論理構造と実在：ロンリーユニバース
- 5 離散性と連続性：クローン宇宙
- 6 まとめ：マルチバース的世界観
(宣伝と予告)

参考文献



講談社ブルーバックス 2019年



講談社 2016年



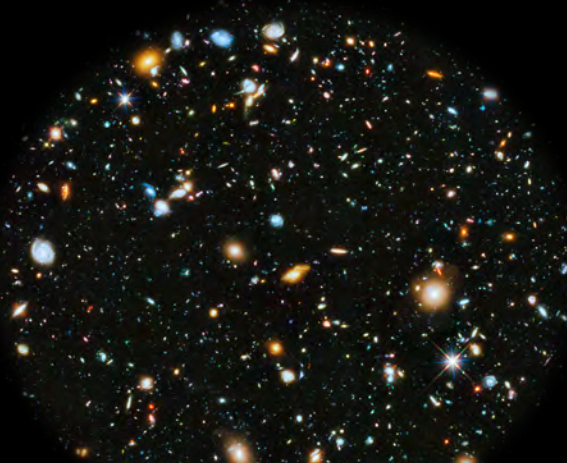
東京大学出版会
初版 2006年 第2版 2021年

1 地平線の先に広がる世界

宇宙と世界

- 宇宙=space-time (淮南子)
 - 宇=天地四方上下(三次元空間全体)
 - 宙=往古来今(過去・現在・未来の時間全体)
- 世界=時空 (サンスクリット⇒漢語)
 - 世=過去・現在・未来の三世(時間)
 - 界=東西南北上下(空間)

(広義の)世界



(我々が観測できる)宇宙

(狭義の)世界



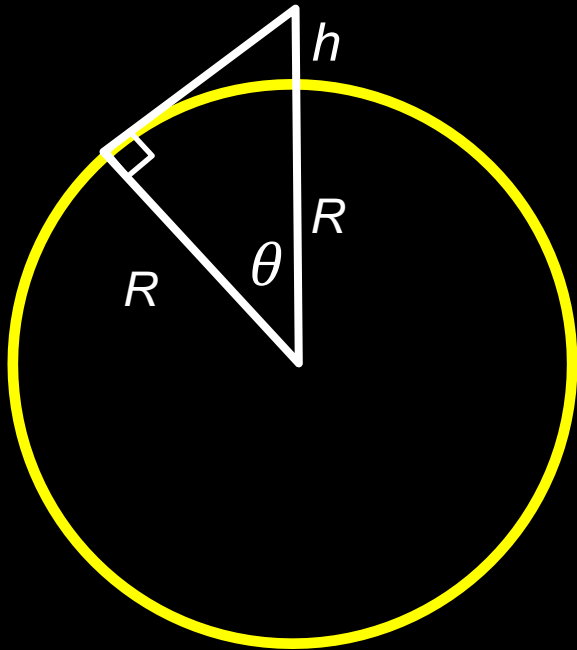
50年前の私にとっての「世界」 @高知県安芸市

「子供の頃、海を見て育っちゃらん人間は
信用できん」（西原理恵子）

- この水平線は世界の果てなのか？
- その先に別の世界があるのか？
- もしあるならばそこに広がる風景は？

世界を知る＝より遠くを見る

■ 地平線(ホライズン)のサイズ



$$\cos \theta = \frac{R}{R + h}$$

$$1 - \frac{\theta^2}{2} \approx 1 - \frac{h}{R}$$

$$\ell = R\theta \approx \sqrt{2hR} \approx 4\sqrt{\frac{h}{1\text{m}} \frac{R}{R_{\oplus}}} \text{ km}$$

■ 自分のホライズンを広げるには、、、

- より高い場所に登り、世界を俯瞰する＝天文学
- スカイツリー、マウナケア、アタカマ、大気圏外

遠くを見ることで、高知県の先にも世界が
広がっていたことを知った



@ホノルル、ハワイ

@モナコ

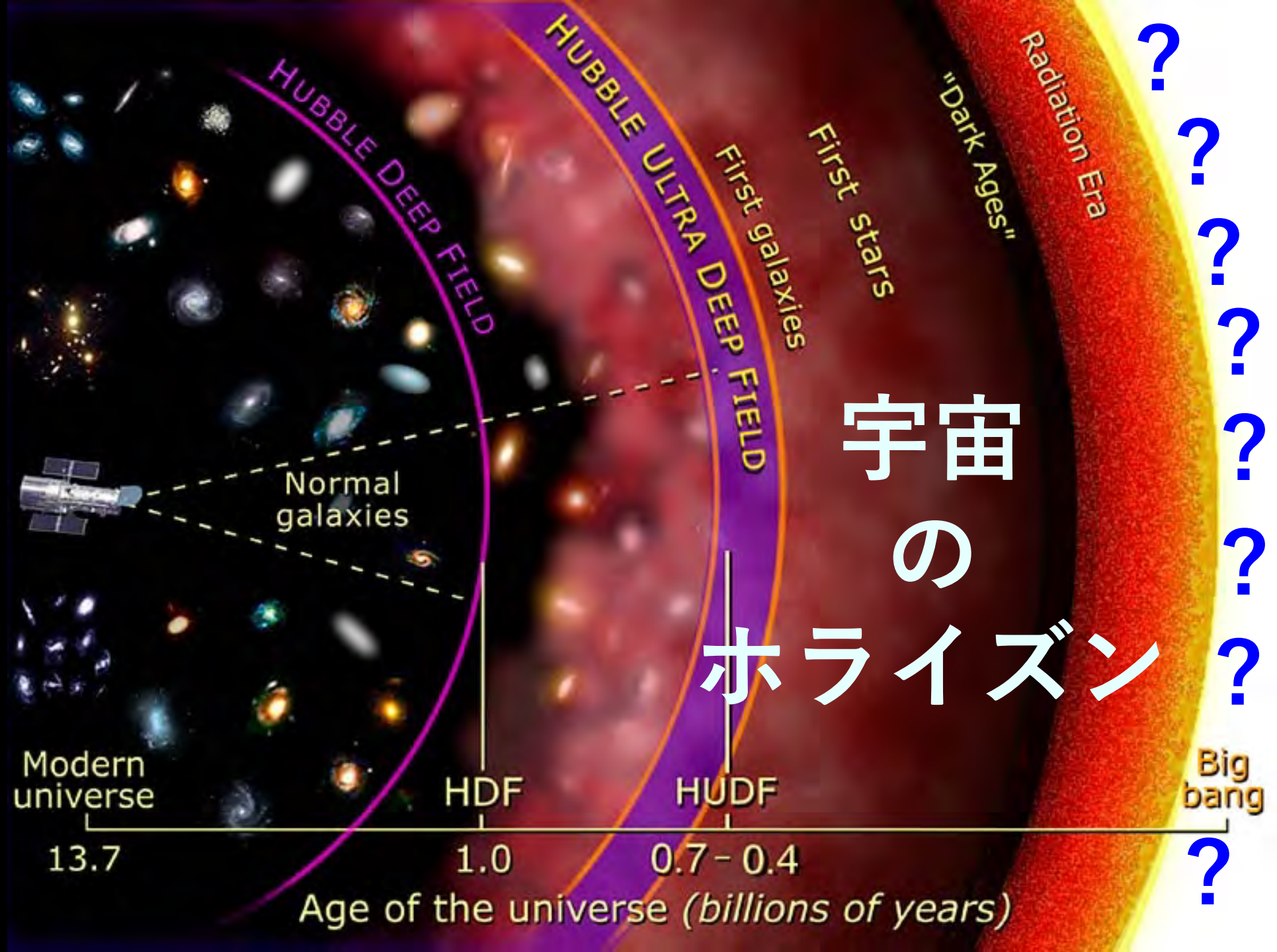


世界の相対化：地球からみる宇宙

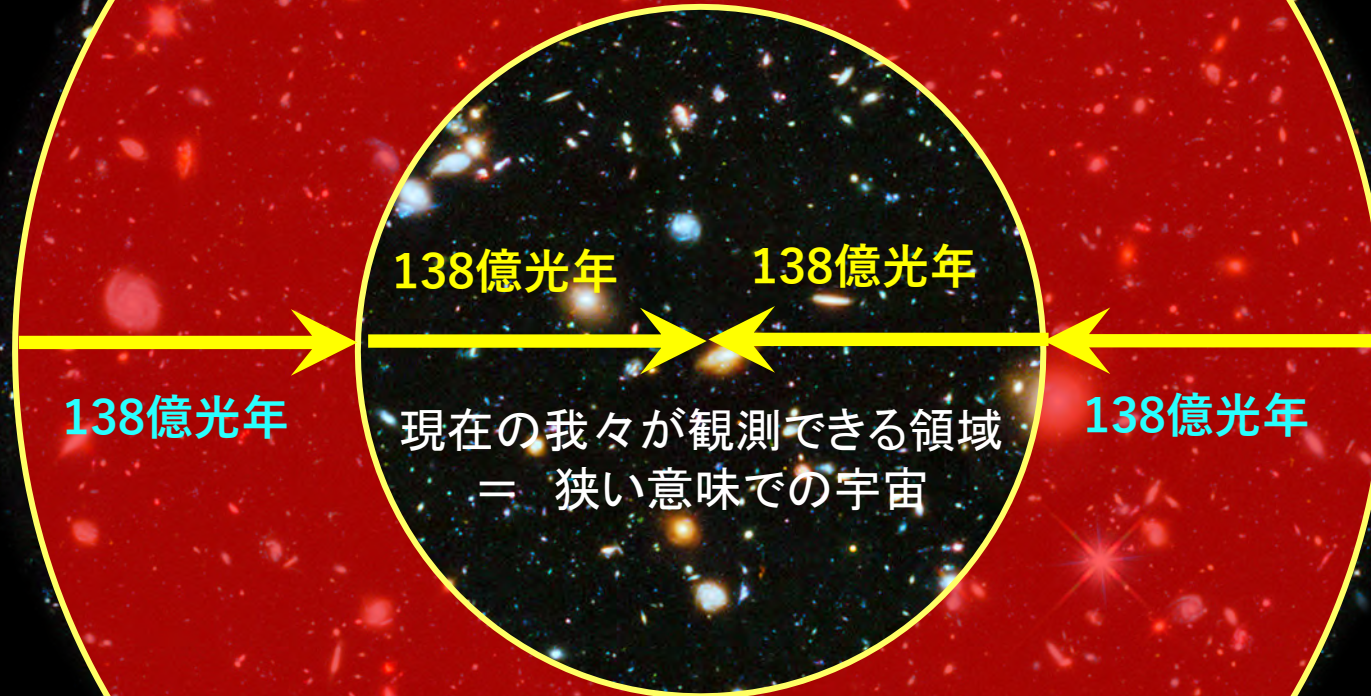


国際宇宙ステーション

<https://www.flickr.com/people/nasa2explore/>



我々が観測できる宇宙：地平線球



138億光年

138億光年

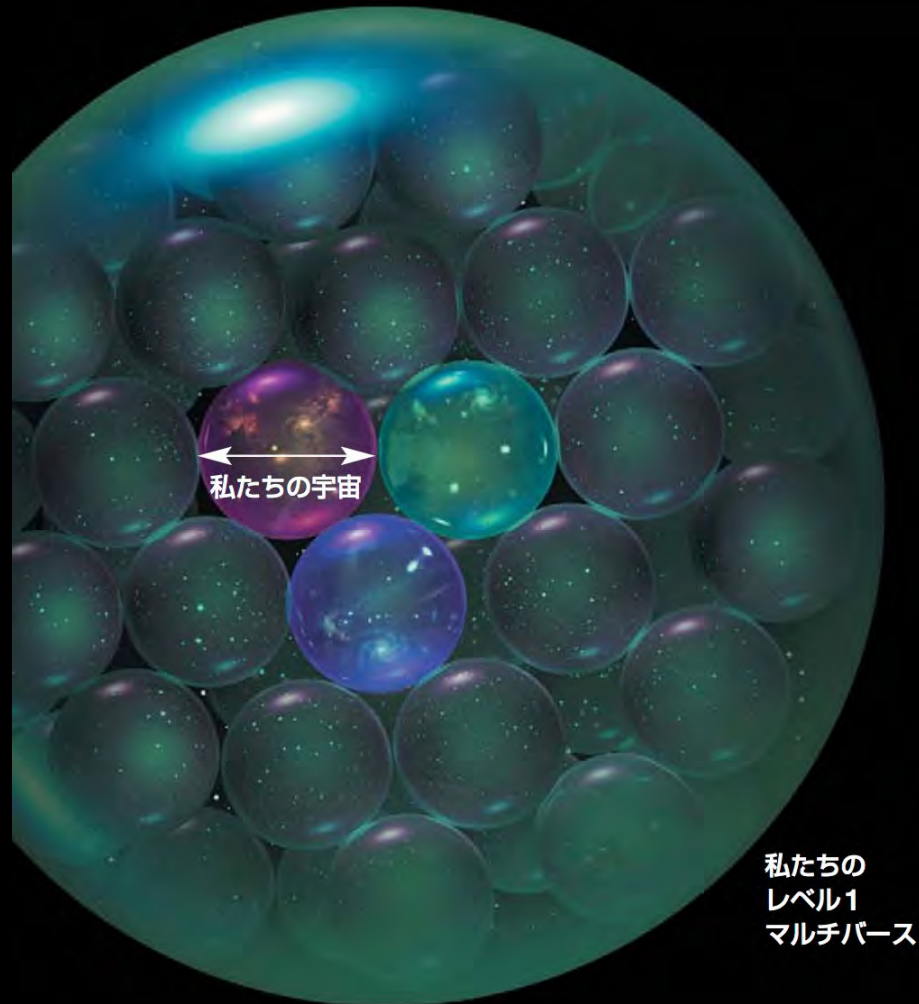
138億光年

現在の我々が観測できる領域
= 狭い意味での宇宙

138億光年

現在の我々にはまだ観測できない領域
= 今から138億年後に観測可能となる宇宙

本当にこれですべて？ 我々のホライズンの先の「宇宙」



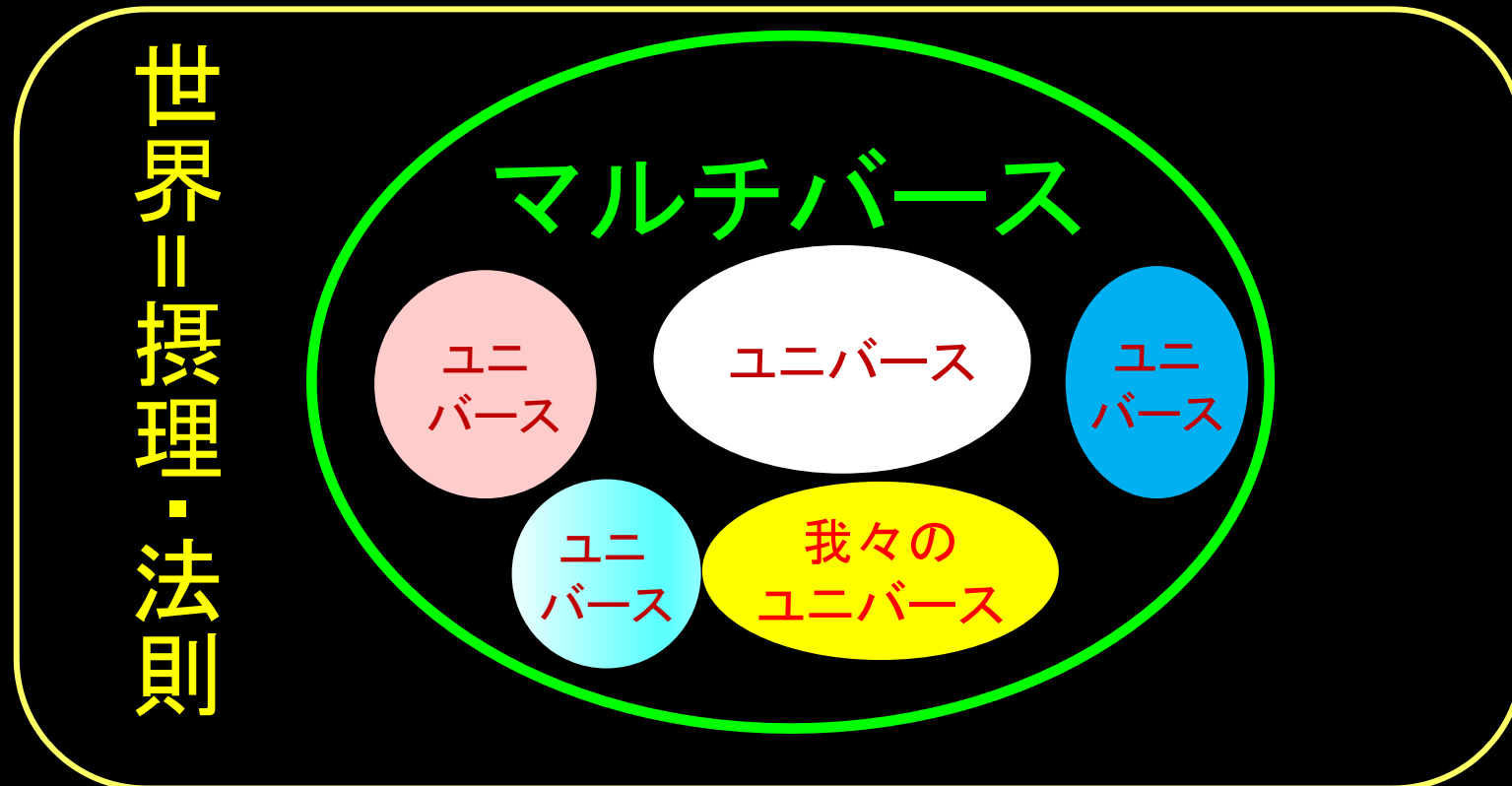
並行して存在する
レベル1
マルチバース

何もない空間
(膨張している)



世界＞マルチバース＞ユニバース

- 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)を区別する
- ただし以下はあくまでも私の個人的な感覚にもとづくもので一般的ではない



レベル1 マルチバース

並行宇宙のうち最も単純なのが、私たちから遠すぎるためにまだ見ることのできない空間領域があるという考え方だ。現在、私たちが見ることが可能な最も遠い場所は約 $4 \times 10^{26} \text{m}$ 、420 億光年離れた場所だ。この距離はビッグバン以降に光が移動した距

観測可能な
範囲の限界

$4 \times 10^{26} \text{m}$

私たちの宇宙

並行宇宙

並行宇宙

$10^{10^{118}} \text{m}$

私たちの宇宙と
同一な並行宇宙

2 マルチバースの分類

私たちの宇宙

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)

並行して存在する
レベル1
マルチバース

マックス・テグマークが提唱する 4つの異なるマルチバース

レベル	説 明
1	現在観測可能ではない地平線の外側にも、同様のユニバースが無限に存在。それらは徐々に観測可能な領域に入る。これら同じ物理法則をもつユニバースの集合がレベル1マルチバース（これをマルチバースと呼ぶかどうかは定義の問題で、存在は確実）
2	無限個のレベル1マルチバースは、原理的にも因果関係を持たないまま、階層的に存在するかもしれない。それらは物理法則が異なるかもしれない。それらの集合をレベル2マルチバースとする
3	量子力学の多世界解釈に対応する無数の時空の集合。レベル3マルチバース内の異なる元を遍歴する軌跡の一つが我々のユニバースであると解釈することができる
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する。言い換えれば、抽象的な法則は必ず対応する物理的実体を伴うと考え、それらの集合をレベル4マルチバースとする。世界が数学にしたがっているという驚くべき事実を自然に説明できる

マックス・テグマーク著 『数学的な宇宙 究極の実在の姿を求めて』（講談社、2016年）

レベル1 マルチバース

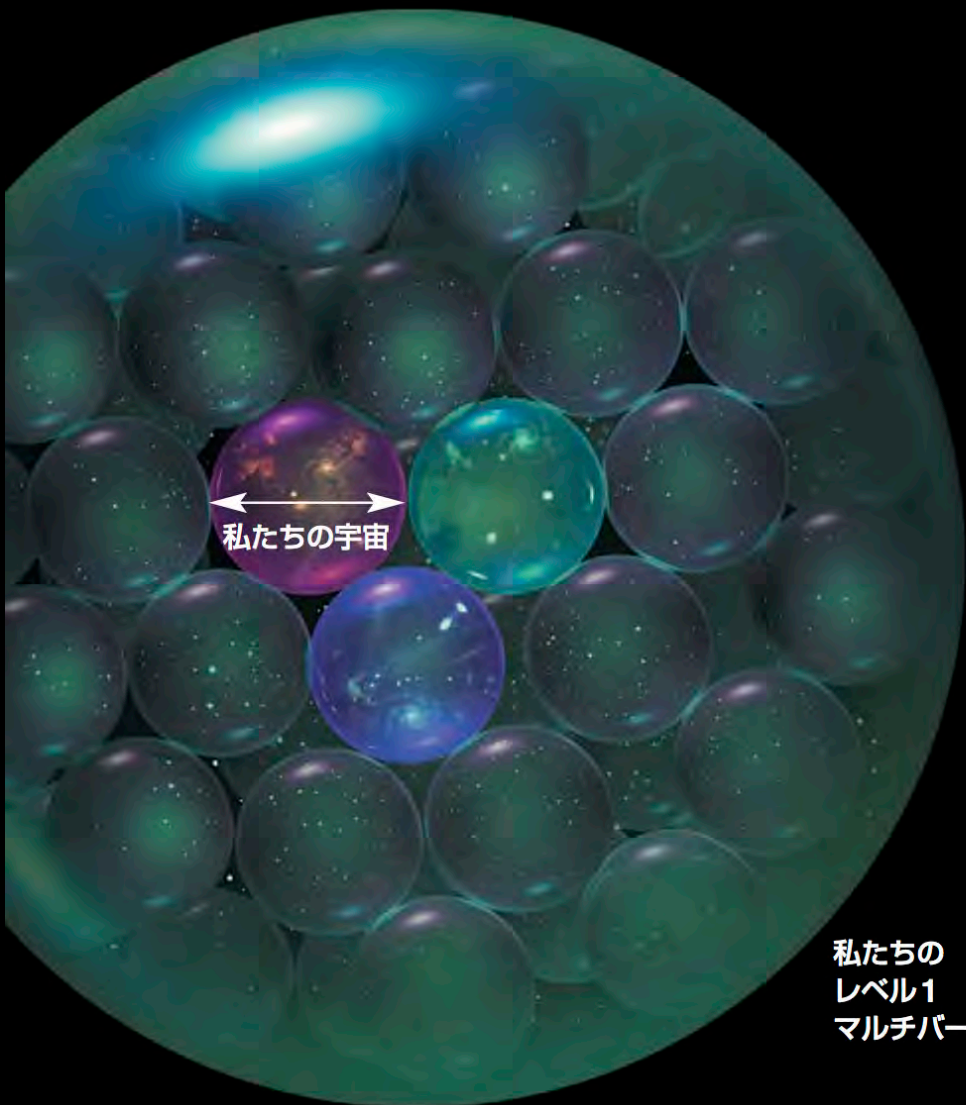
- 現在の地平線内にある我々の（レベル1）ユニバースは、レベル1マルチバースに属する元の一つ
- 我々の地平線球の外側にも、同じく地平線球（レベル1ユニバース）が無数にあるが、現在は「まだ」互いに因果関係を持たない
- それらの集合が（我々の属する）レベル1マルチバース
- 同じレベル1マルチバース内のレベル1ユニバースは、初期条件が異なろうと、物理法則は同じ

日経サイエンス2003年8月号



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
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)

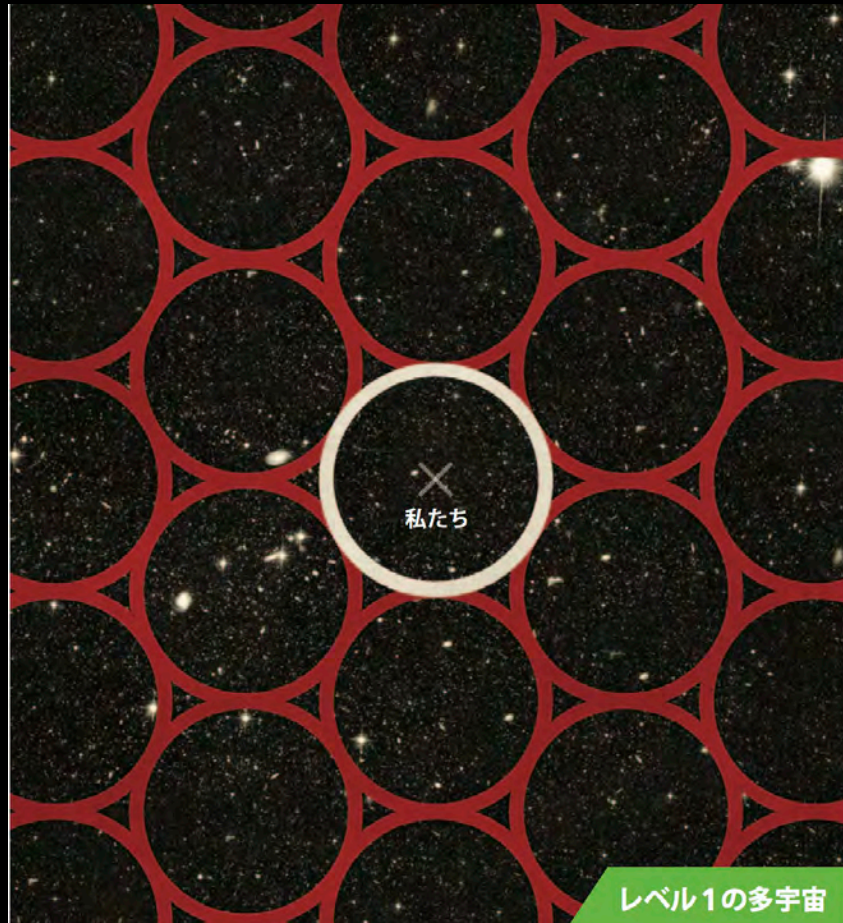


レベル2 マルチバース



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

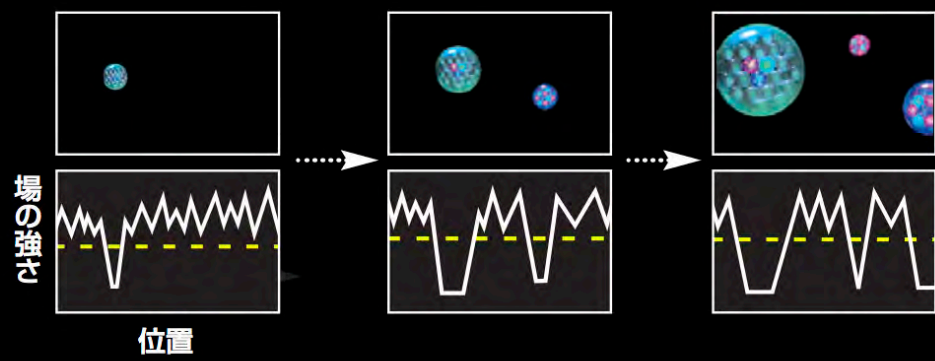


日経サイエンス2011年12月号

宇宙のインフレーションとレベル2 マルチバース

泡の生成

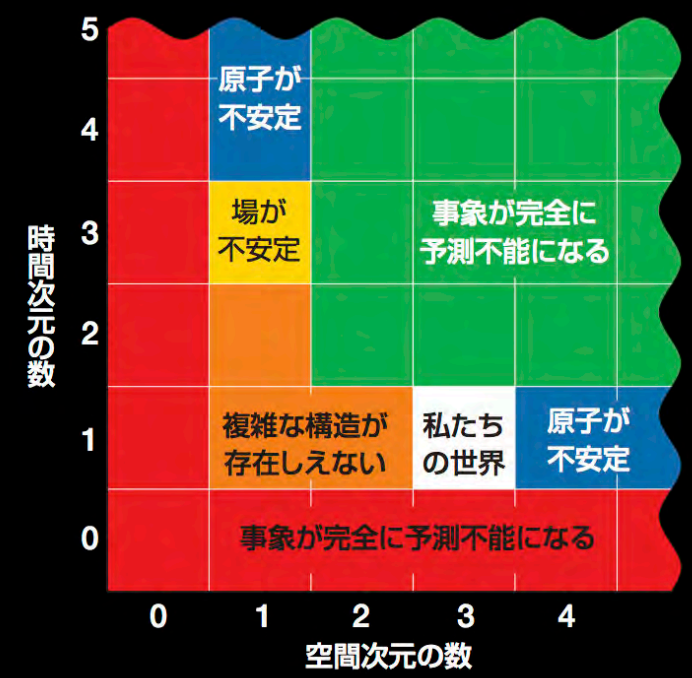
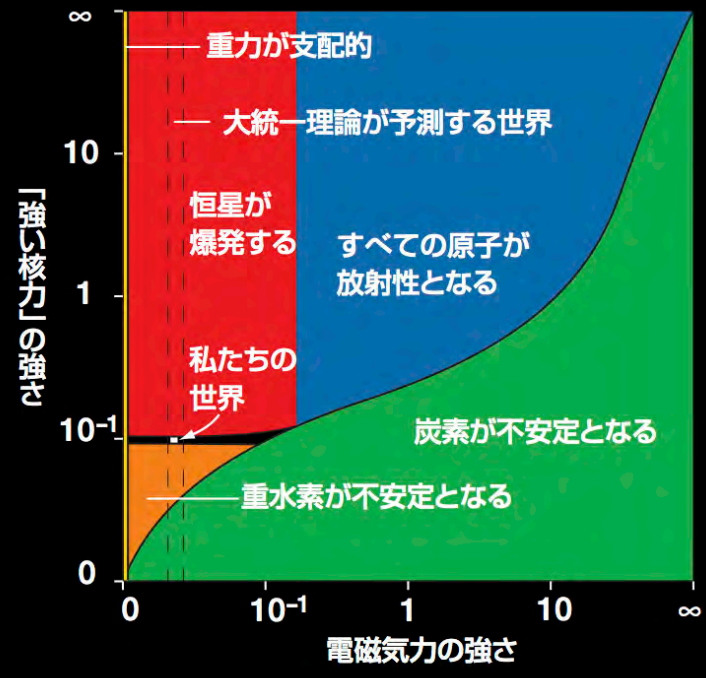
ある種の量子（インフラトン）の場が空間の急激な膨張を引き起こす。空間の中では、ランダムなゆらぎが存在し、この量子場はなかなか消えずに残る。しかし、ある領域では量子場が弱まり、膨張が緩やかになる。こうした領域が泡になる。



並行して存在する
レベル1
マルチバース

証拠

宇宙論研究者たちは私たちの宇宙の特性を精査した結果、レベル2マルチバースが存在すると推論している。根拠となる特性とは、自然界に働く力の強さ（すぐ右の図）や観測される時空の次元（右端の図）などだ。これらは私たちの宇宙が誕生したときにランダムな過程によって確立したが、結果的には私たち生命が存在しうる値になっている。これはとりもなおさず、私たちの宇宙とは異なる値をもつ別の宇宙の存在を示唆している。



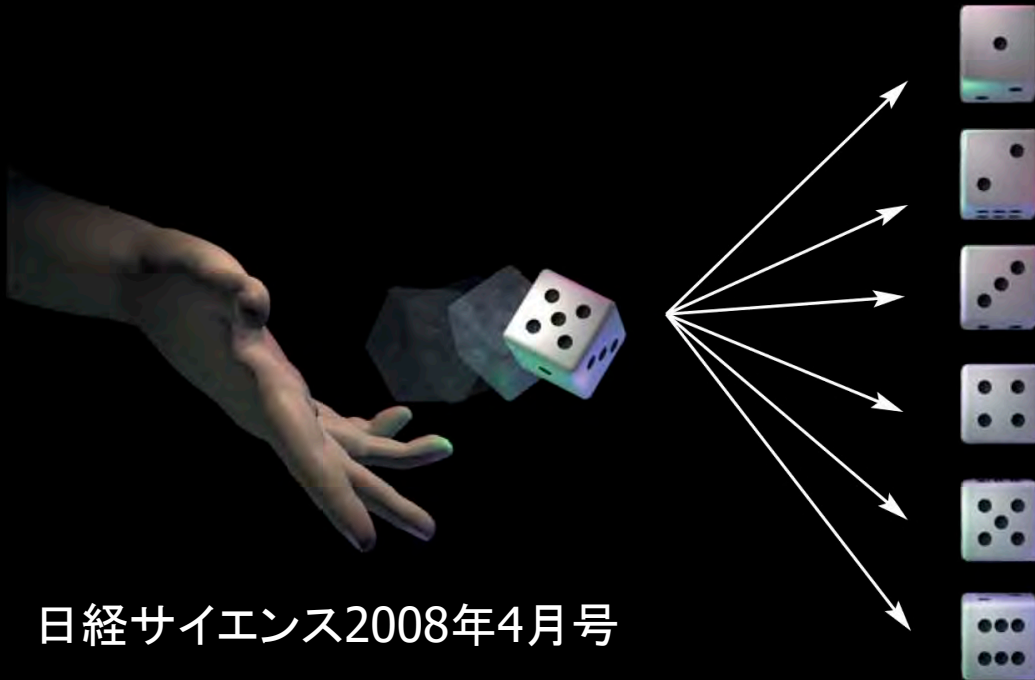
因果関係を持たないレベル2マルチバース

- 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)現在で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マルチバース同士は、仮に同じ時空上に存在していようと、互いに因果関係を持たない(さらには異なる空間次元に存在しているかも)
 - 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

3 多世界解釈と量子自殺

レベル3 マルチバース

- 量子力学におけるエヴェレットの多世界解釈
 - 一つのユニバース内に「異なる可能性」が同時に存在するのではなく、それらの可能性ごとに「異なるユニバース」が実在
 - 観測すると、シュレーディンガーの猫が死んでいる宇宙と死んでいない宇宙のどちらか観測者が分岐する
 - これらの異なるユニバースの集合がレベル3マルチバース



量子のサイコロ

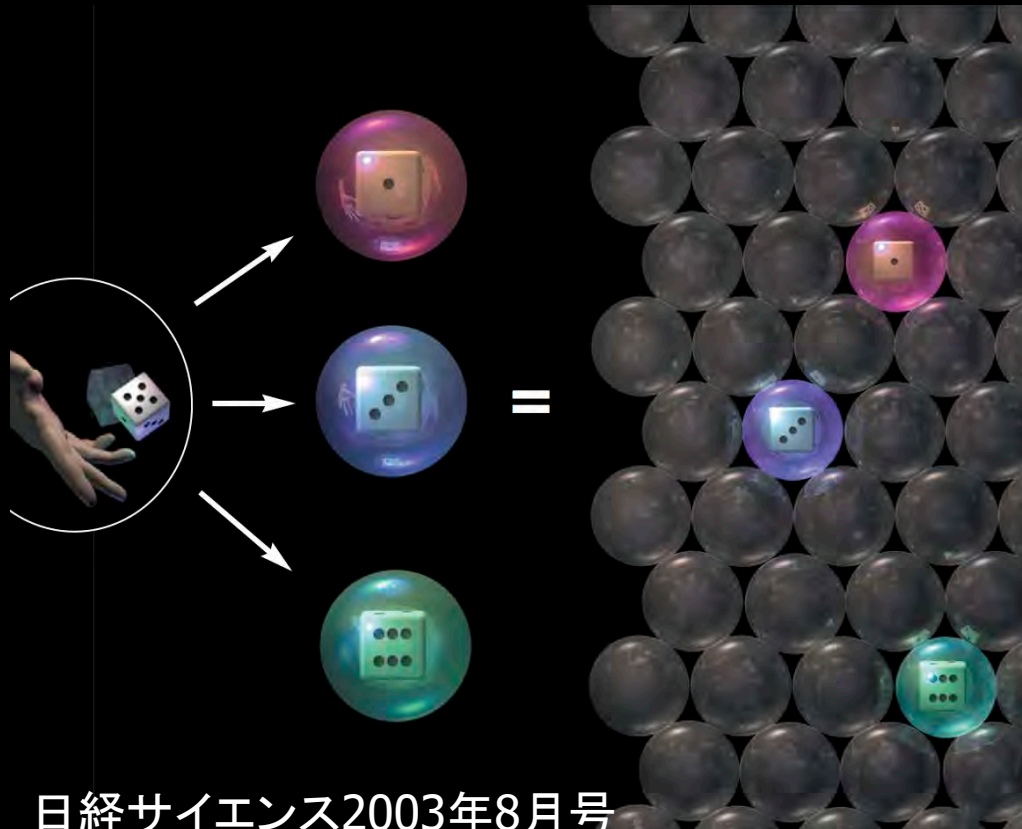
目の出方が完全に無秩序な「量子のサイコロ」を考える。これを振ると1から6までの目のいずれかに落ち着くが、その出方は無秩序だ。しかし量子力学の考え方では、振られたサイコロは1から6までの目を同時に示す。この矛盾した見方に折り合いをつけるには、サイコロが別の宇宙で別の目を出すと考えればよい。6つある宇宙の1つでは「1」、もう1つの宇宙では「2」を出すという具合だ。私たちはいずれかの宇宙の中にとらえられているので、量子世界の全体像のうちごく一部しか実感できない。

レベル3 マルチバース

エルゴード性

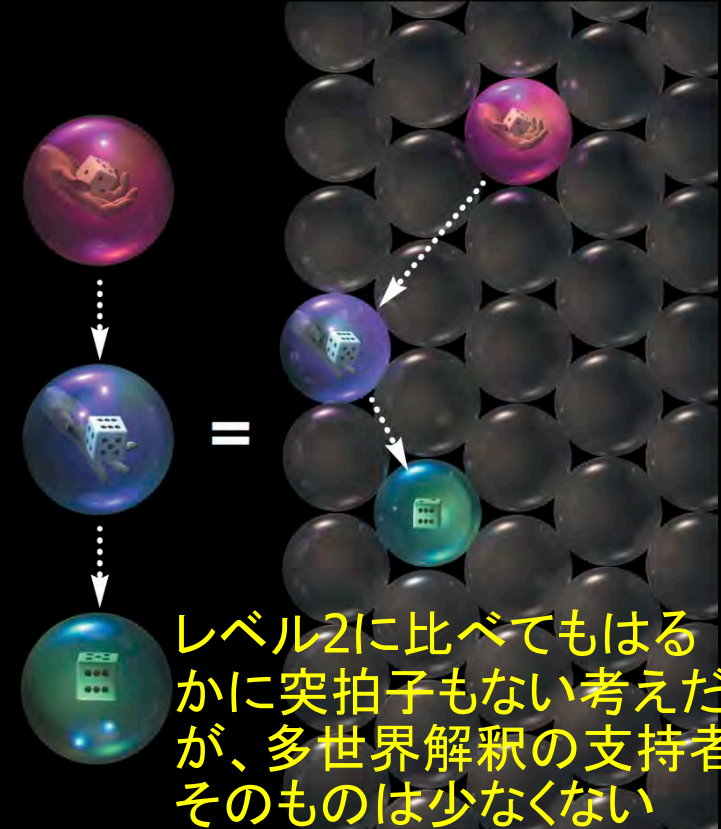
エルゴード性の原理によると、量子並行宇宙はもっと平凡なタイプの並行宇宙と等価だ。1つの量子宇宙はやがて状態が確定した複数の宇宙に分岐する（左）。しかし、こうして新たに生まれた宇宙は、どこか別の空間（右、図ではレベル1 マルチバース）にもとから存在していた並行宇宙と変わらない。さまざまな事象がどんな順序で起きるのかを体現したものが並行宇宙だと考えるのがポイントだ。この考え方はどんなタイプの並行宇宙にも当てはまる。

■ 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。



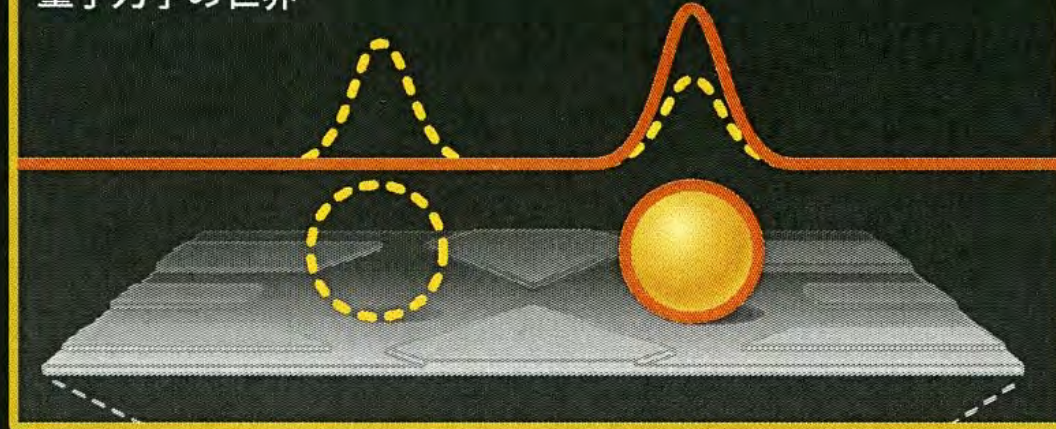
量子力学のコペンハーゲン解釈

日経サイエンス2008年4月号

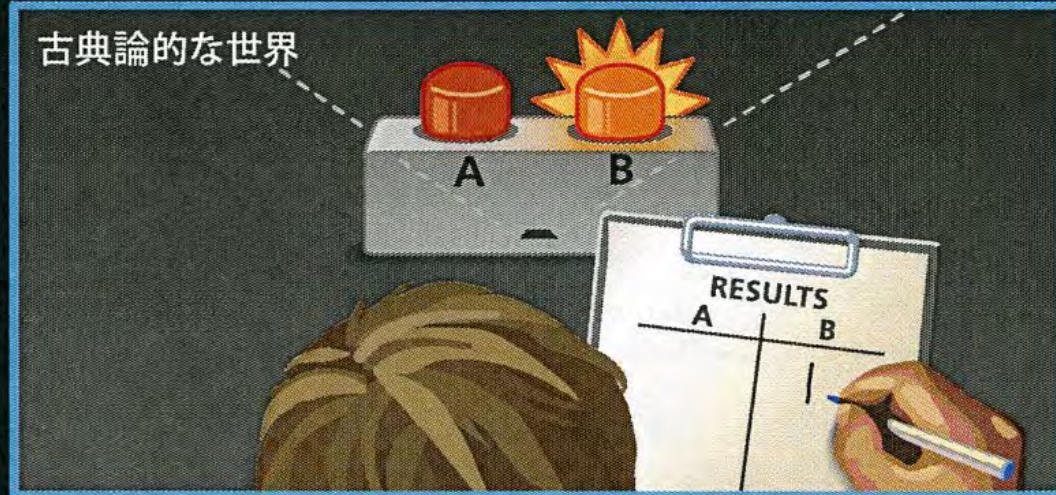
コペンハーゲン解釈

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。

量子力学の世界



古典論的な世界



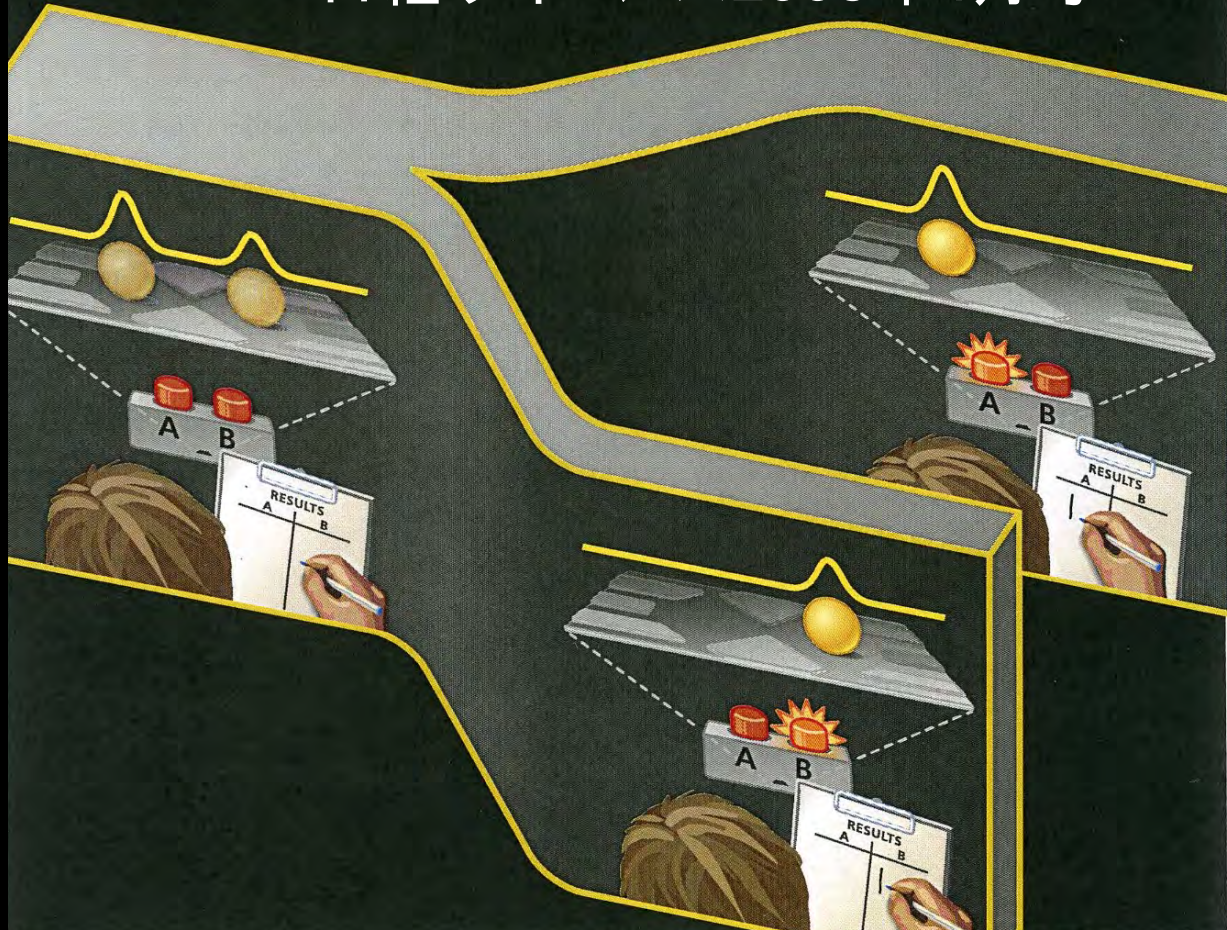
量子力学の建設に大きな寄与をしたニールス・ボーアが、コペンハーゲンの研究所で展開。現在に至るまで量子力学の標準的解釈

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、ボー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



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

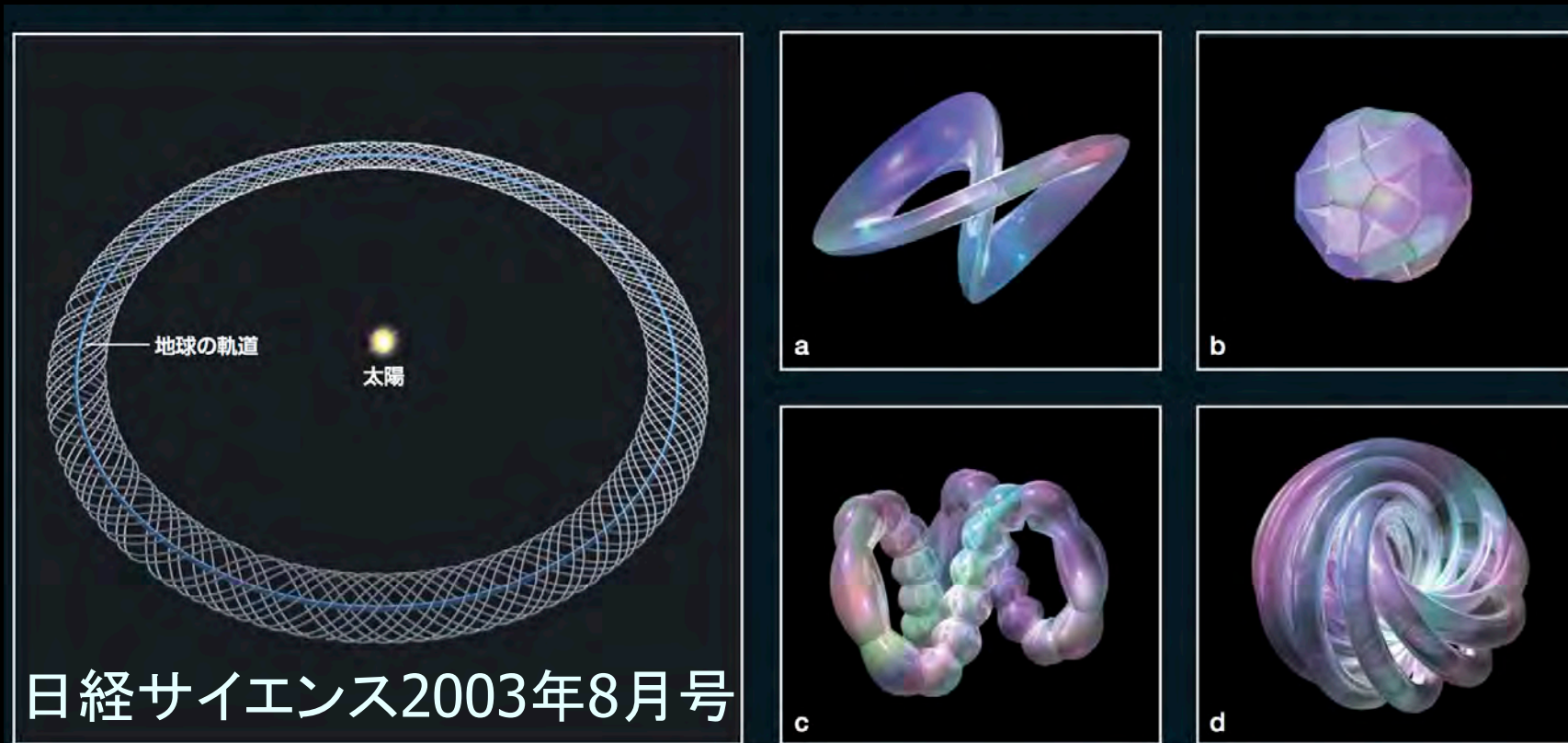
レベル3マルチバース実在の検証実験： シュレーディンガーの人間(量子自殺)

- 瞬時に死に至らしめる量子論的な(決定論的ではない)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
 - もしレベル3マルチバース(あるいは並行宇宙)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ので、本人が死ぬことを確認するだけに過ぎない

4 論理構造と実在： ロンリーユニバース

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

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(厳密に)記述可能なのか

■ 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

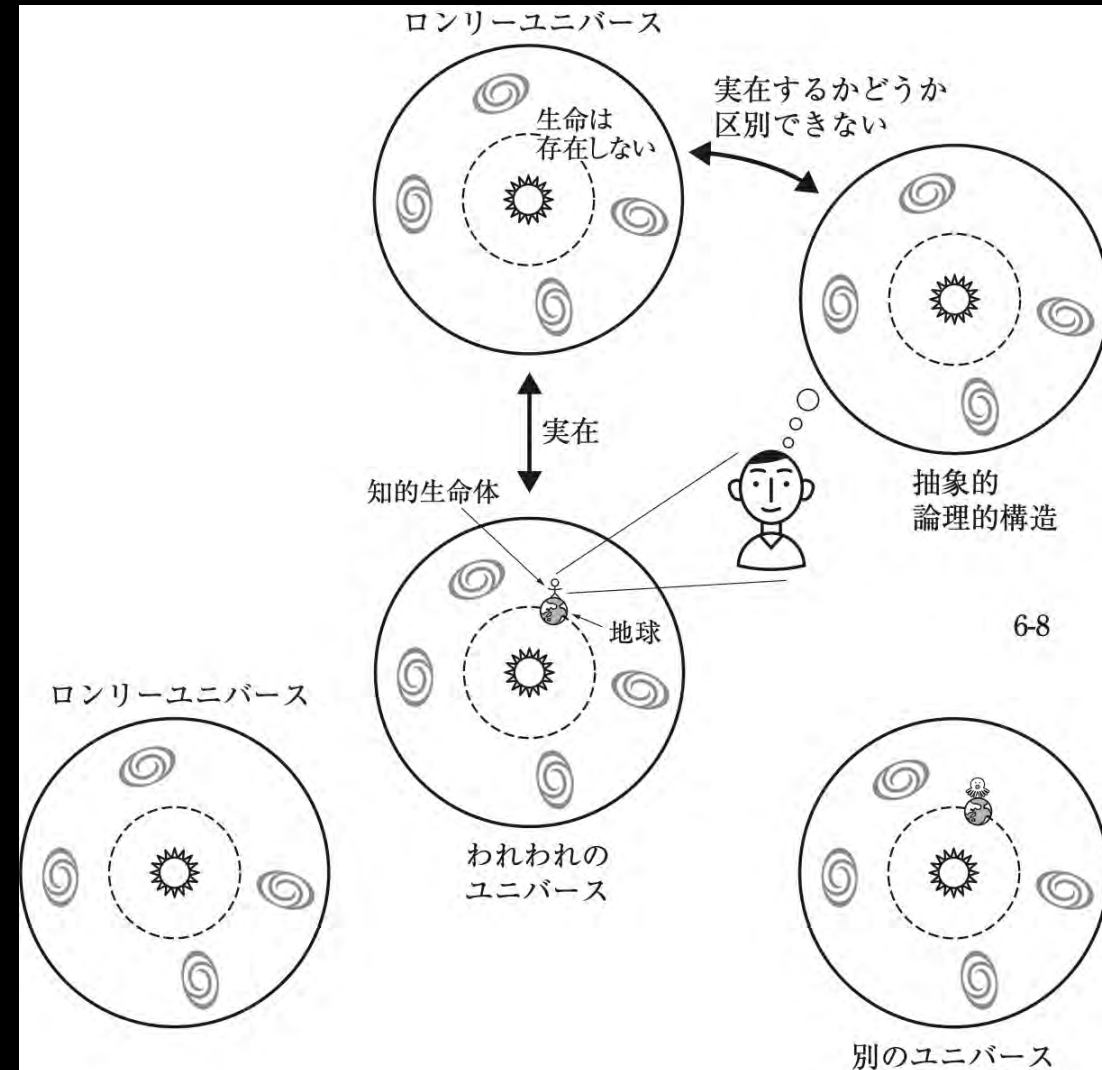
■ リチャード・ファインマン

- 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？

Lonely World/Universe

- 実在する「ユニバース」に生物(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)が存在する必然性はない
- そのユニバースは、自身の物理法則にしたがって進化するだろうが、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をも「実在」と認めて良いとすれば、純粹に数学的な無矛盾な体系はあまねく実在と認めざるを得ないのでは？



無矛盾な数学的構造は必ず実在する？

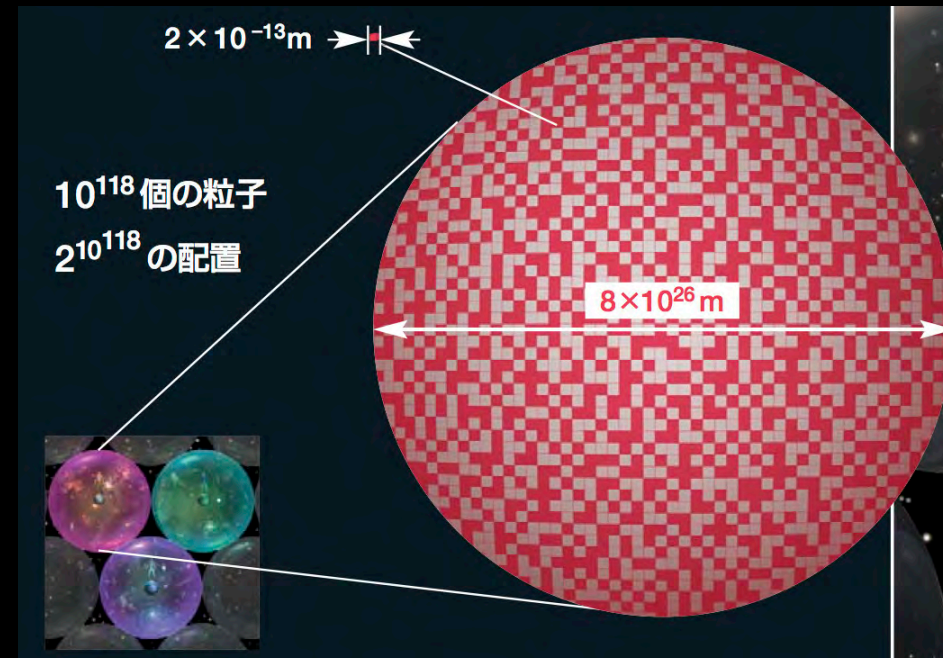
- 我々のユニバースでの実験とは一致しないが、論理的に無矛盾な物理法則(数学的体系)があったとする
 - 実験で否定される以上、その体系はこの世界と矛盾しており、それ以上考えても無意味(標準的思考)
 - 単にたまたま我々の宇宙で採用されていないだけで、それを採用する宇宙がどこかに実在しているだけ？
- 宇宙の振る舞いは法則(数学)でたまたまうまく記述できるのではなく、そもそも宇宙は厳密に法則に支配されているのでは？
- 本当は異なる物理法則を持つ世界が無数に存在しているのではないか(世界＝数学的構造＝物理的実体＝宇宙)

5 離散性と連続性: クローン宇宙

パラレルユニバース(クローン宇宙) が実在するための仮定

- 我々が観測できる宇宙(半径138億光年の地平線球: レベル1ユニバース)は有限個の自由度で記述し尽くされる(量子論的効果は無視できると仮定)
- その外に広がる宇宙(レベル1マルチバース)の体積は(ほぼ)無限

日経サイエンス2003年8月号



有限体積の宇宙が持つ情報量は有限か —世界はデジタルか、アナログか？—

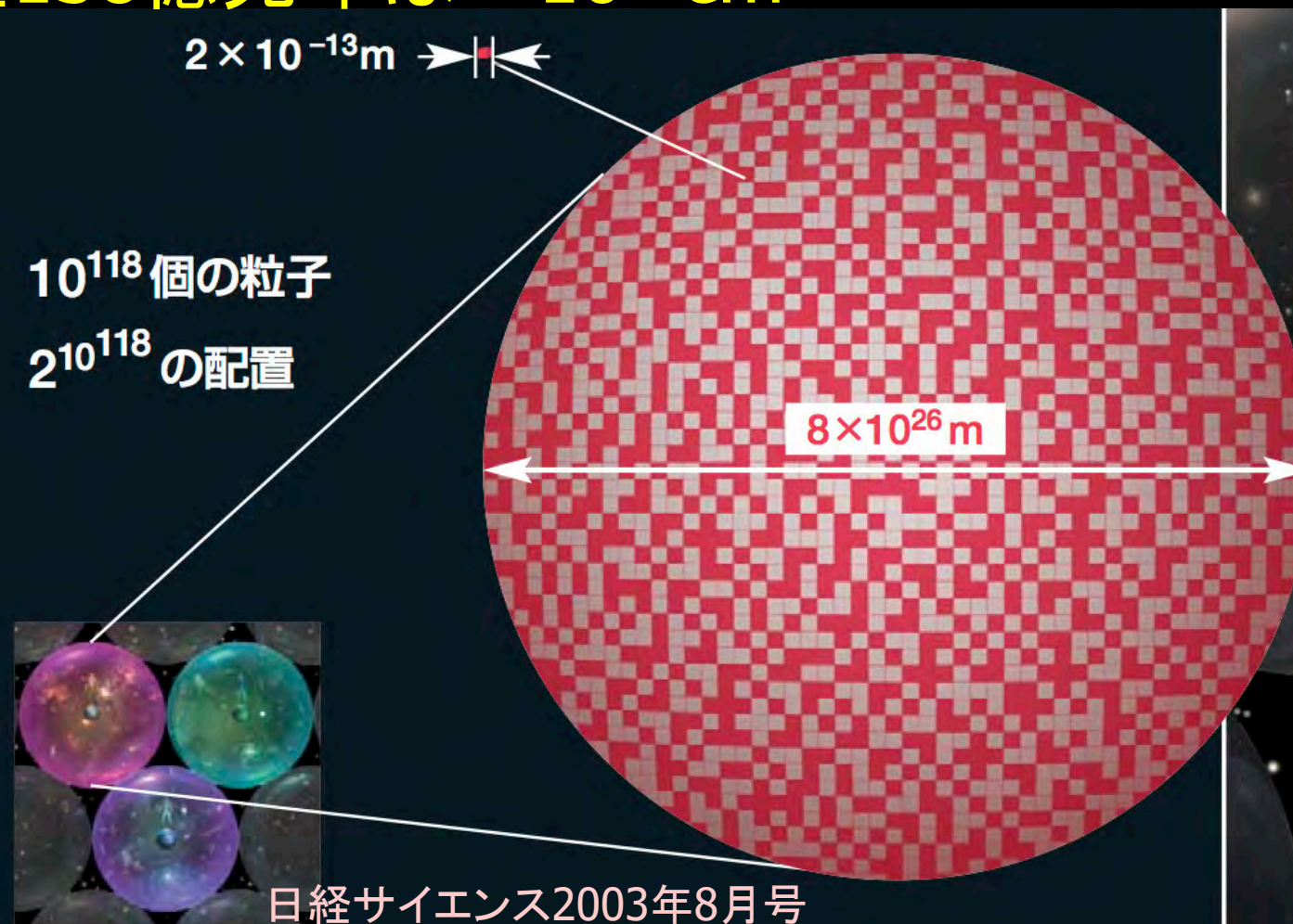


- この作業を繰り返していくと、いずれは近似ではなく本物(と区別できないクローン宇宙)に到達する？
 - すべての物質は有限個の素粒子からなる(量子論を無視する)
 - 時間と空間も連続ではなく離散的かも？
 - とすれば宇宙はデジタル情報に帰着するので、3Dプリンターで宇宙を創り続けると、いずれクローン宇宙が出現するはず？

我々の地平線球が持つ「古典的」情報量

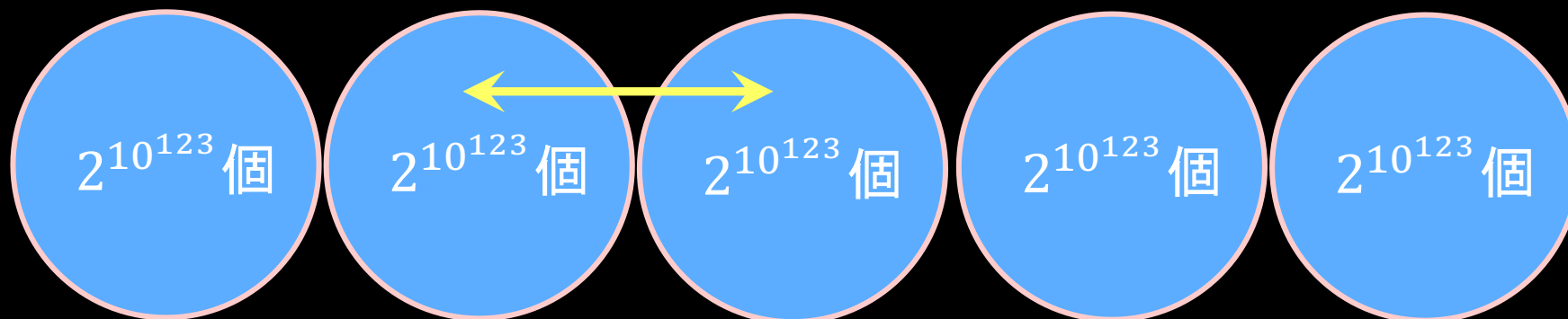
- 水素の原子核の大きさは $\sim 10^{-13}\text{cm}$
- 地平線球の半径138億光年は $\sim 10^{28}\text{cm}$

- この地平線球につめこめる水素の個数は最大 $(10^{28}/10^{-13})^3 = 10^{123}$ 個
- そこに実際に水素を置くかどうかの2通りの可能性があるので、可能な配置数は2の 10^{123} 乗通り
- この半径をもつ地平線球の種類は2の 10^{123} 乗通り*しか*ない



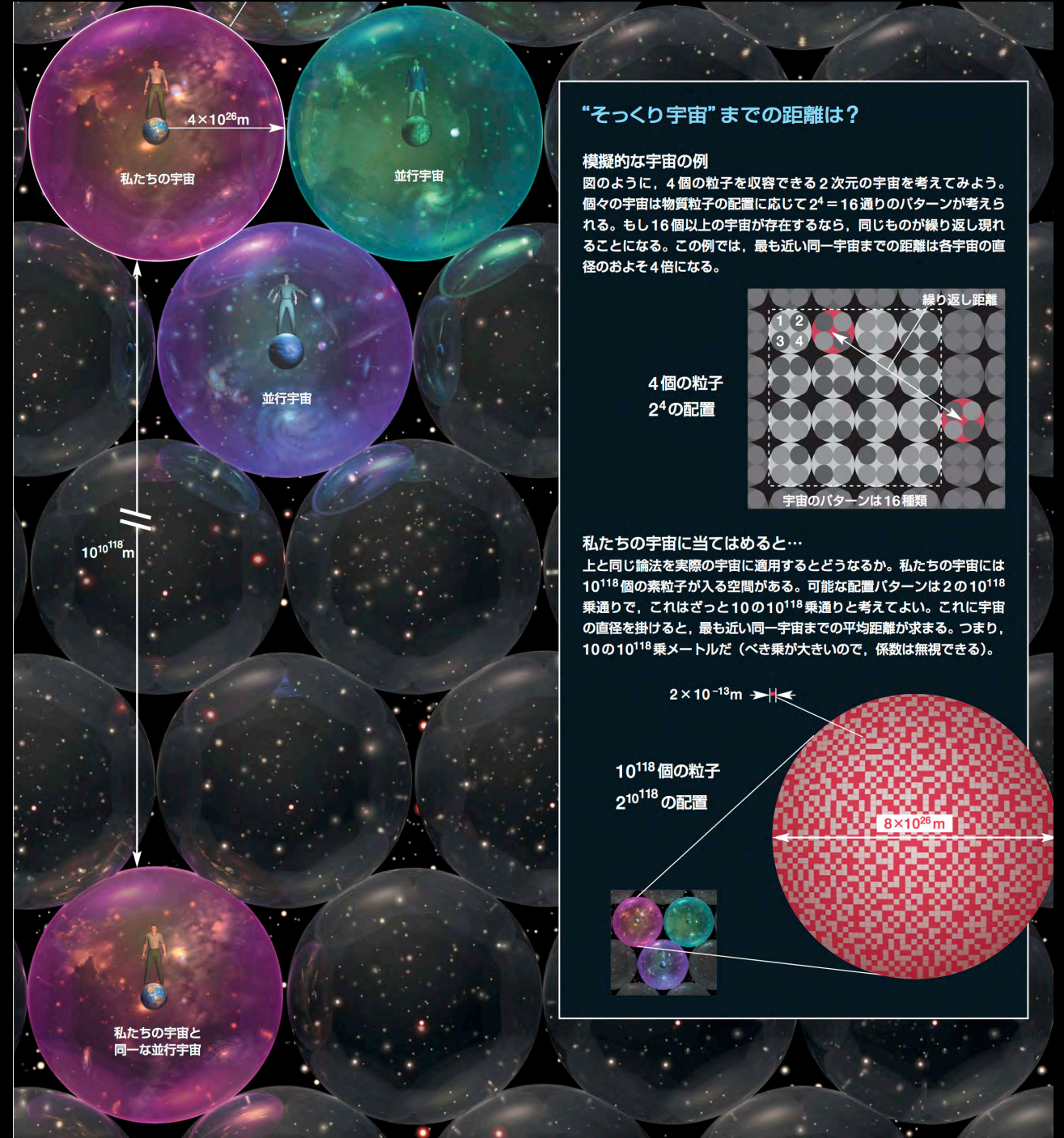
隣のクローン宇宙までの距離

- 2の 10^{123} 乗個の地平線球(レベル1ユニバース)を含む体積の球
 - それぞれの地平線球内の水素配列は全くランダムだとする
 - 完全に同一の水素配列をもつ地平線球(レベル1ユニバース)は全く同じ性質を持つクローン宇宙だとする
- とすれば平均的には、この体積の球と同じ体積をもつ隣の球内には、我々の地平線球のクローン宇宙が存在しているはず
 - 隣のクローン宇宙までの距離(あくまで古典論に基づく)
 $138\text{億光年} \times (2\text{の}10^{123}\text{乗})^{1/3} \sim (10\text{の}10^{122}\text{乗})\text{億光年}$



パラレルユニバース (クローン宇宙) は実在するか

- 宇宙が(10の 10^{122} 乗)億光年より大きければ(=ほぼ無限体積)、有限自由度の同一の構造は無限個存在するはず
- 同一原子配置をもつ人間は意識まで含めて同じクローン人間となるのか？
- 自由意志と古典的決定論



6 まとめ： マルチバース的世界観

今回提起した正解のない疑問の数々

- 我々が直接観測できる地平線(138億光年)の先には、どのような宇宙が広がっているのか
- 世界は、離散的か連続的か
 - もし世界が離散的自由で表現されるなら、その中の有限体積の領域は無限体積の中に繰り返し登場する。すなわち並行宇宙は実在するかも
- 知的生命体が存在しない宇宙(ロンリーユニバース)もまた、実在と認めてよいか
 - もし良いとすれば、数学的な論理構造と実在する宇宙との違いはないのでは
 - これこそ、宇宙が数学的な物理法則に(厳密に)したがっている理由？

今回の話題に関する一般向け解説本



講談社ブルーバックス 2019年



朝日新書 2022年1月刊