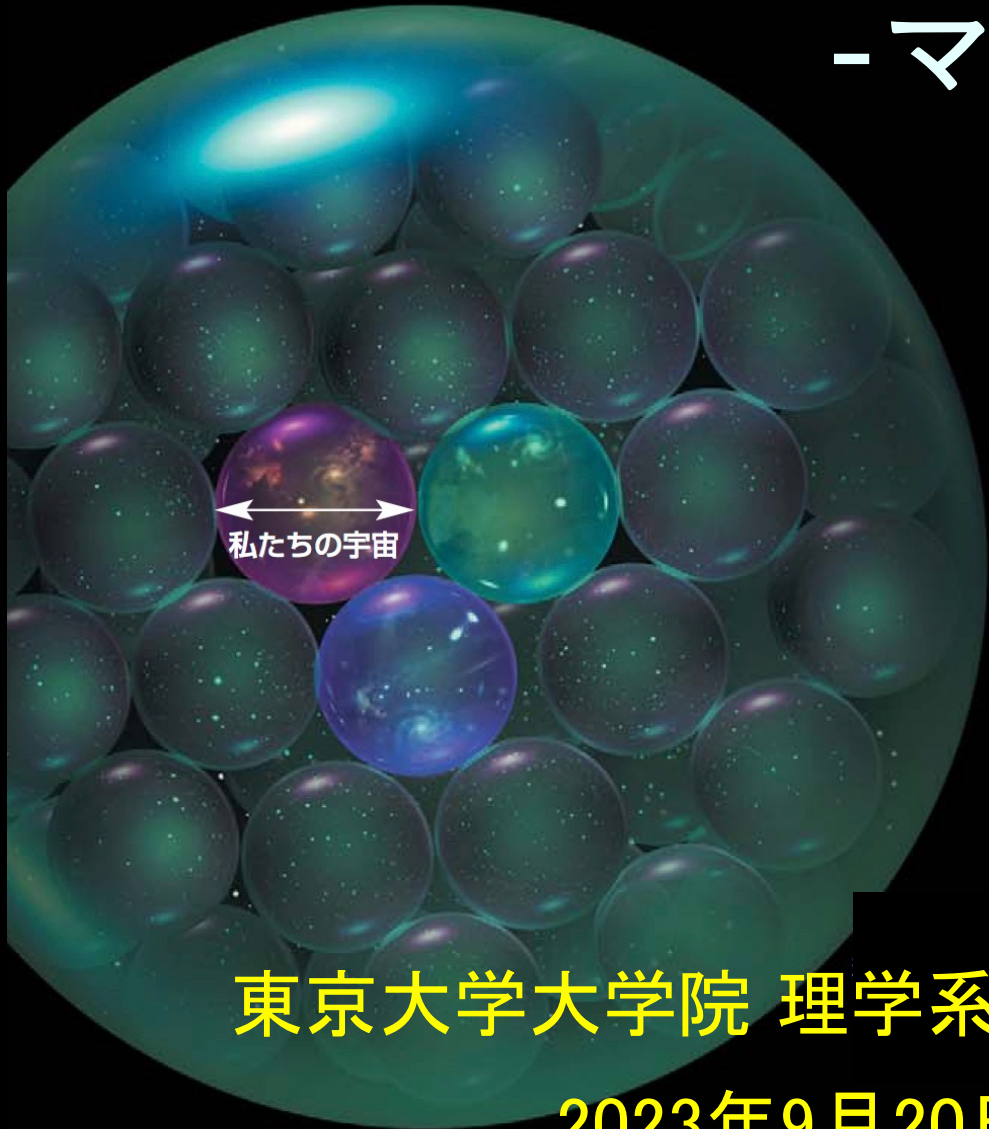


# 地平線の先に世界はあるのか -マルチバースと人間原理-



私たちの宇宙

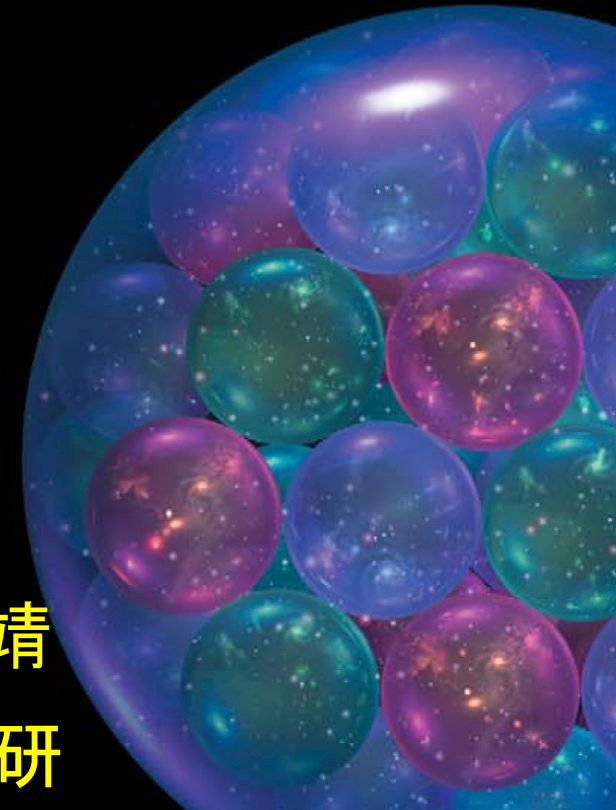
私たちの  
レベル1  
マルチバース



並行して存在する  
レベル1  
マルチバース

何もない空間  
(膨張している)

日経サイエンス2003年8月号



東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

2023年9月20日 16:30- @名古屋大学 Uxg研

# 目次

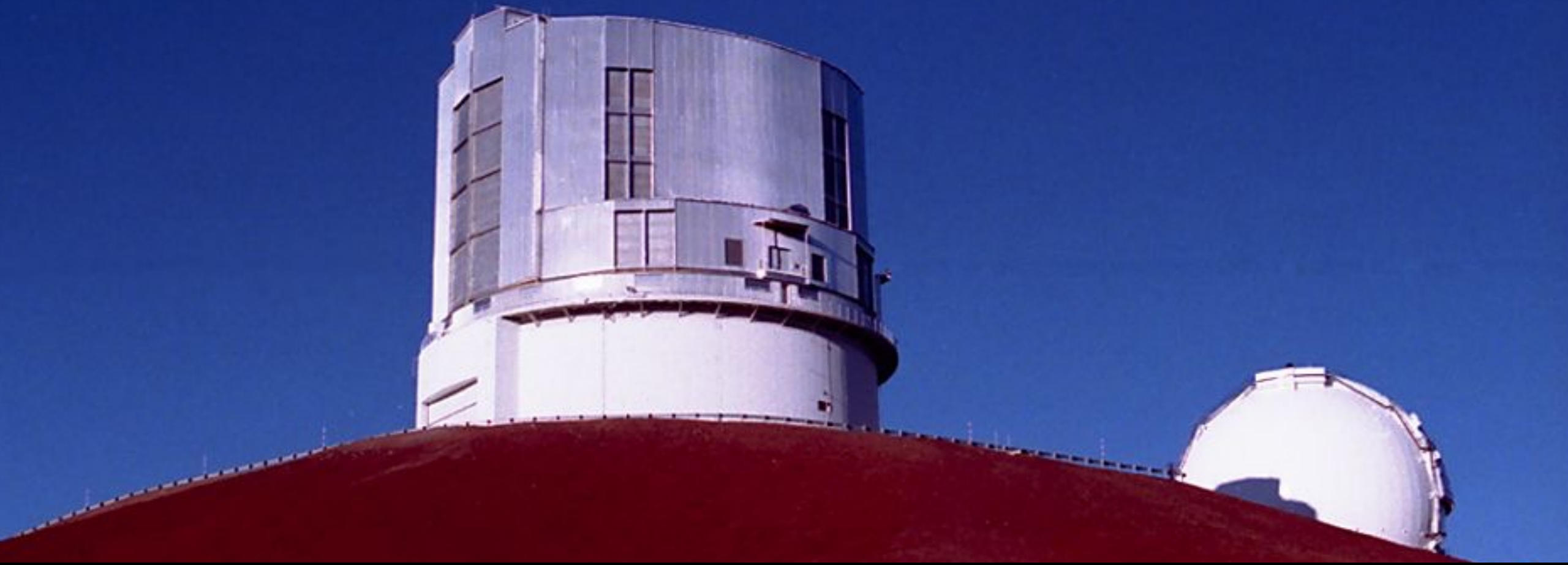
- 1 地平線の外に世界はあるのか？
- 2 テグマークによるマルチバースの4分類と  
レベル1・レベル2マルチバース
- 3 量子力学の多世界解釈とレベル3マルチバース
- 4 抽象的論理構造に対応する実在としての  
レベル4マルチバース
- 5 人間原理：マルチバースの選択律
- 6 離散性と連続性：レベル1マルチバースとパラレル宇宙
- 7 まとめ：(マルチバース+人間原理)的世界観

# 1 地平線の外に世界はあるのか？

# 50年前の私にとっての「世界」の果て ＝高知県安芸市から眺める太平洋の水平線

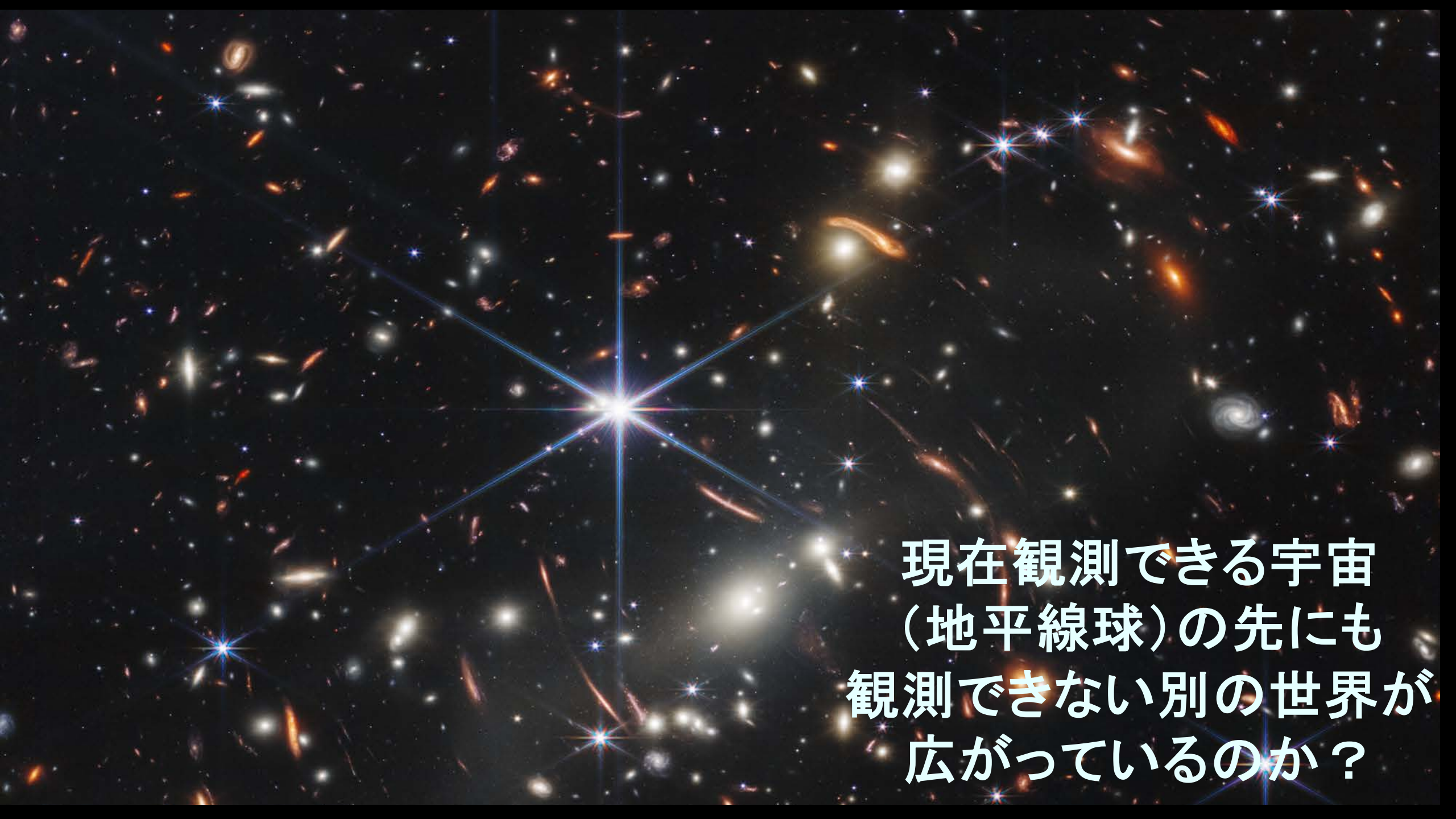
- この水平線は本当に世界の果てなのか？
- その先に別の世界があるのか？
- もしあるならそこに広がる風景はこの世界と同じなのか？

この青空はこの世界の果てなのか？  
その先にも、別の世界が広がっているのか？



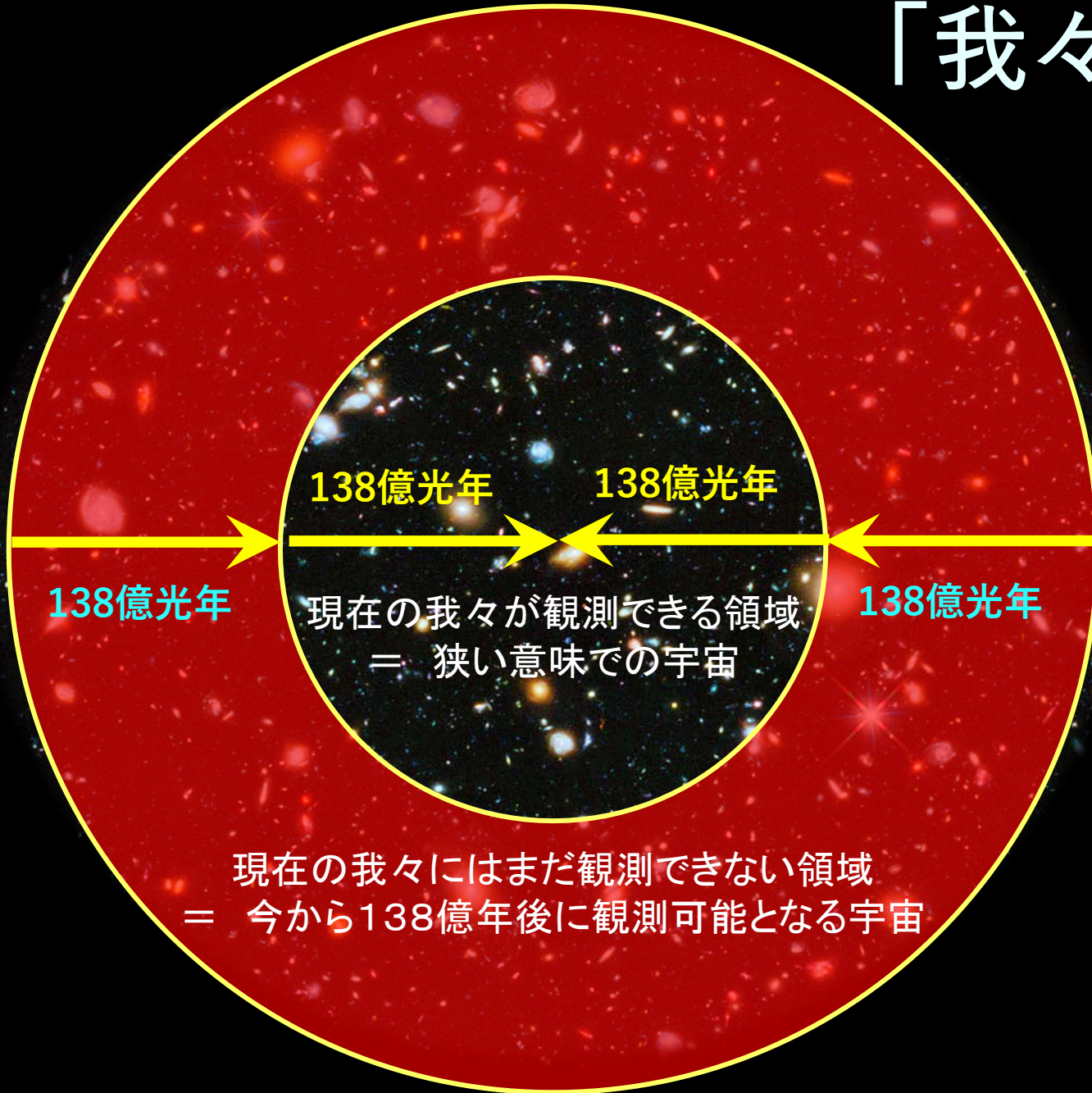
この星空の先に  
さらに別の世界が広がっているのか？



A deep field image of galaxies, showing a vast field of distant galaxies in various colors (white, yellow, orange, red, blue) and shapes (spiral, elliptical, irregular). A bright star is visible in the center, with a blue grid pattern overlaid on the image, suggesting a coordinate system or a specific region of interest.

現在観測できる宇宙  
(地平線球)の先にも  
観測できない別の世界が  
広がっているのか？

# 「我々が観測できる」宇宙 = 地平線球



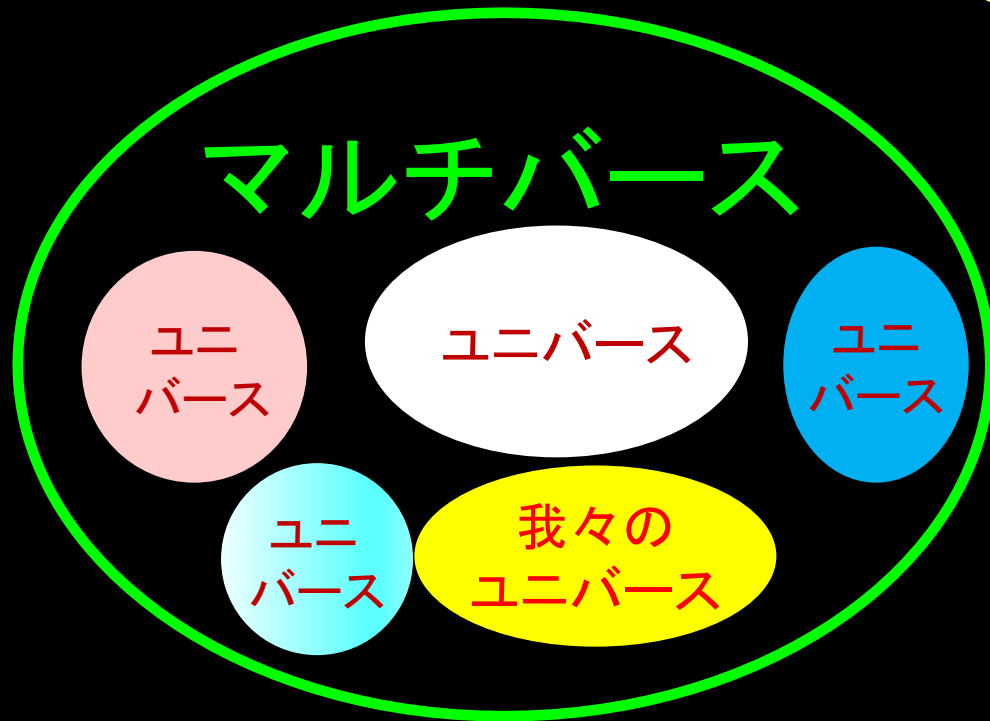
- 観測可能な領域は宇宙年齢で決まっている（因果律）
- 厳密に言えば、その外がどうなっているかはわからない
- ただしある程度は通常物理学の考察から推定できる
- しかし、決して観測できない遠くの宇宙については、科学的というよりも哲学的考察にならざるを得ない



# 世界 > マルチバース > ユニバース

- 「宇宙の外に何があるか」というFAQは、「宇宙」の定義によって答えが違う
- 実在するかどうかはさておき、以下では**ユニバース=universe**と、**その集合の総称としてのマルチバース=multiverse**を区別する

世界II摂理・法則



## ■ 注意

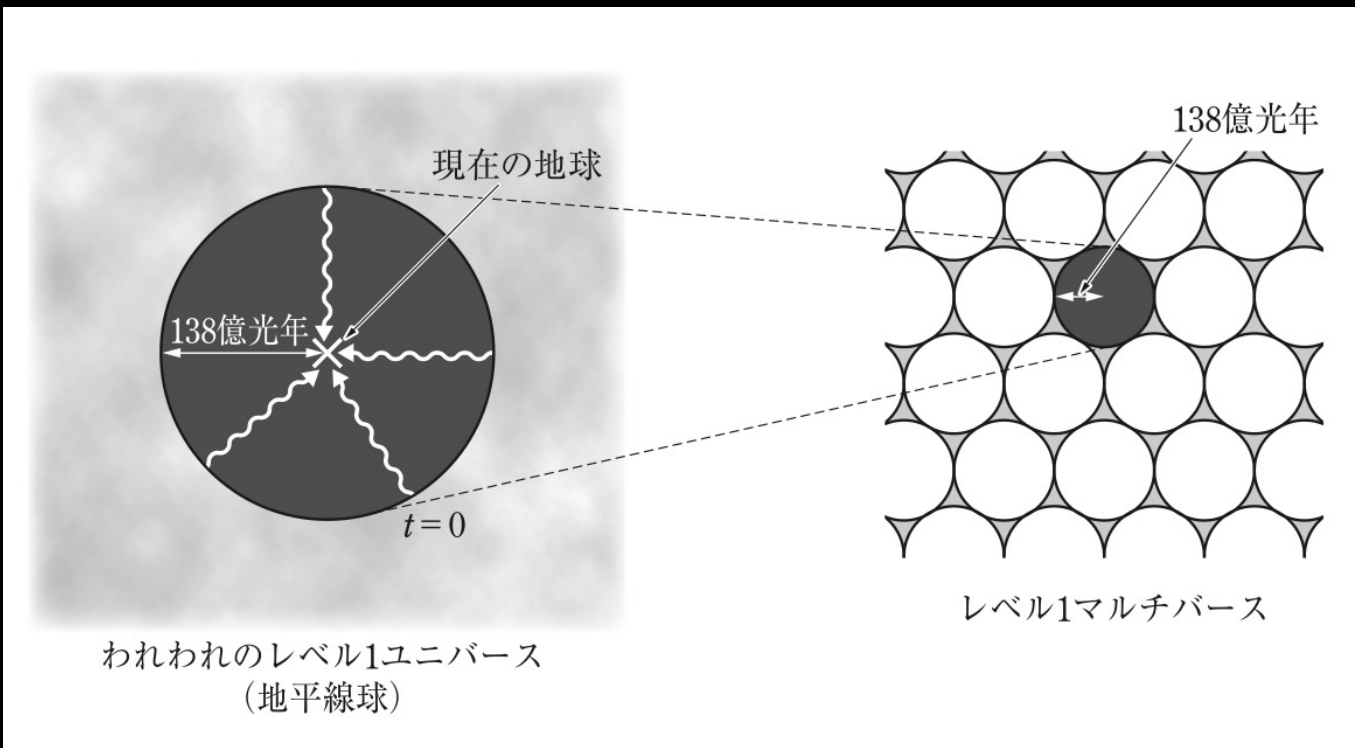
- 左図はあくまでも私の個人的語感にもとづくもので一般的用法ではない
- この意味不明な図の意味を伝道するのが今回の目的だが、信教の自由は遵守する

# 2            テグマークによる              マルチバーズの4分類と              レベル1・レベル2マルチバーズ

# マックス・テグマークが提唱する 4つの異なるレベルのマルチバース

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

# 間違いなく実在するレベル1マルチバース



- 我々が観測できない地平線球の外にも宇宙は広がっているという極めて当たり前の主張
- あえてマルチバースと呼ぶ必要もないが、一応分類しておく程度の意味

- 現在は異なるレベル1ユニバースであろうと、時間とともに同じ地平線球に入る（因果関係を持つようになる）ので、やがて同じレベル1ユニバースに合体することに注意

# レベル2マルチバース = 決して因果関係を持ちえない異なるレベル1マルチバースの集合

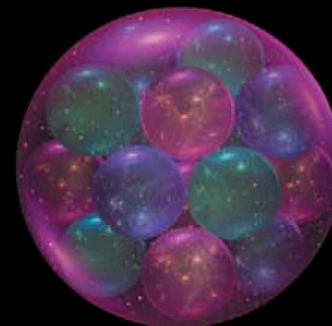
- 同じレベル1マルチバースに属する異なるレベル1ユニバースは同じ時空と物理法則を共有。現在は因果関係を持たないが、時間が経てばやがて互いの存在を確認できる。
- レベル2マルチバースを構成する異なるレベル1マルチバース同士は、仮に同じ時空上に存在していようと互いに因果関係を持たない（例えば空間次元に存在しているかも）
  - インフレーションモデルによれば、互いに指数関数的（超光速）に遠ざかり未来永劫因果関係を持ち得ない「宇宙」が誕生し得る
  - 佐藤勝彦他(1982)による宇宙の多重発生モデル（これはレベル2マルチバースを生み出す物理仮説の例）

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

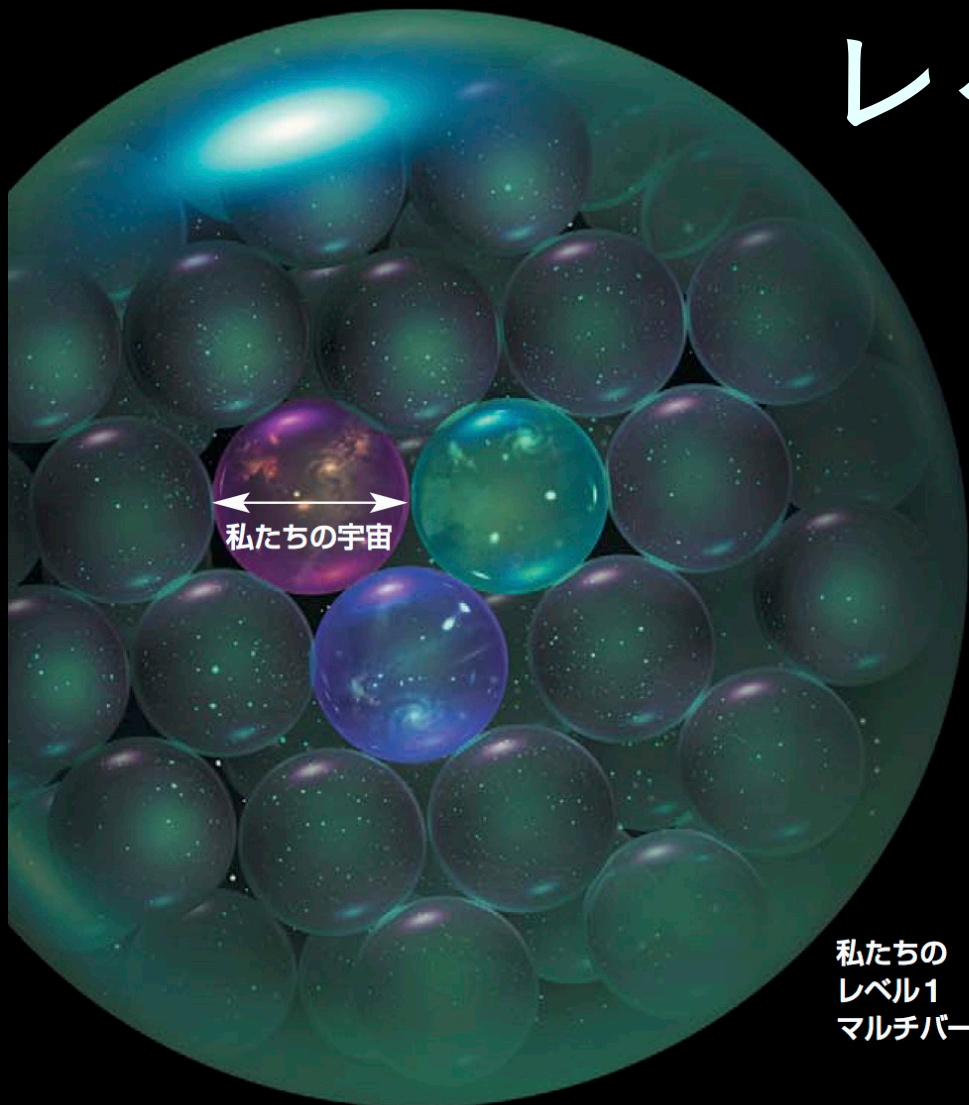
ているという考え方だ。空間の中には別の泡があり、私たちの泡とは切り離されている。雲の中の水滴のようなイメージだ。こうした核ができる際、それぞれの泡では量子場が異なるため、他の泡とは異なった特性が生まれる。

## レベル2 マルチバース

何もない空間  
(膨張している)



並行して存在する  
レベル1  
マルチバース



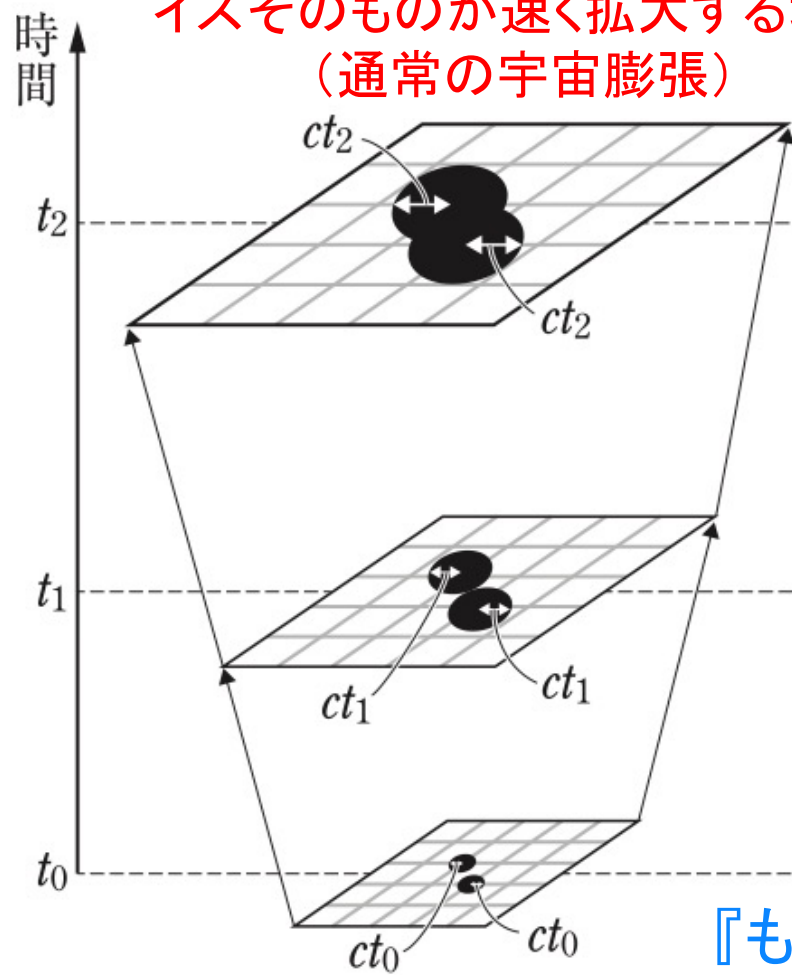
私たちの  
レベル1  
マルチバース



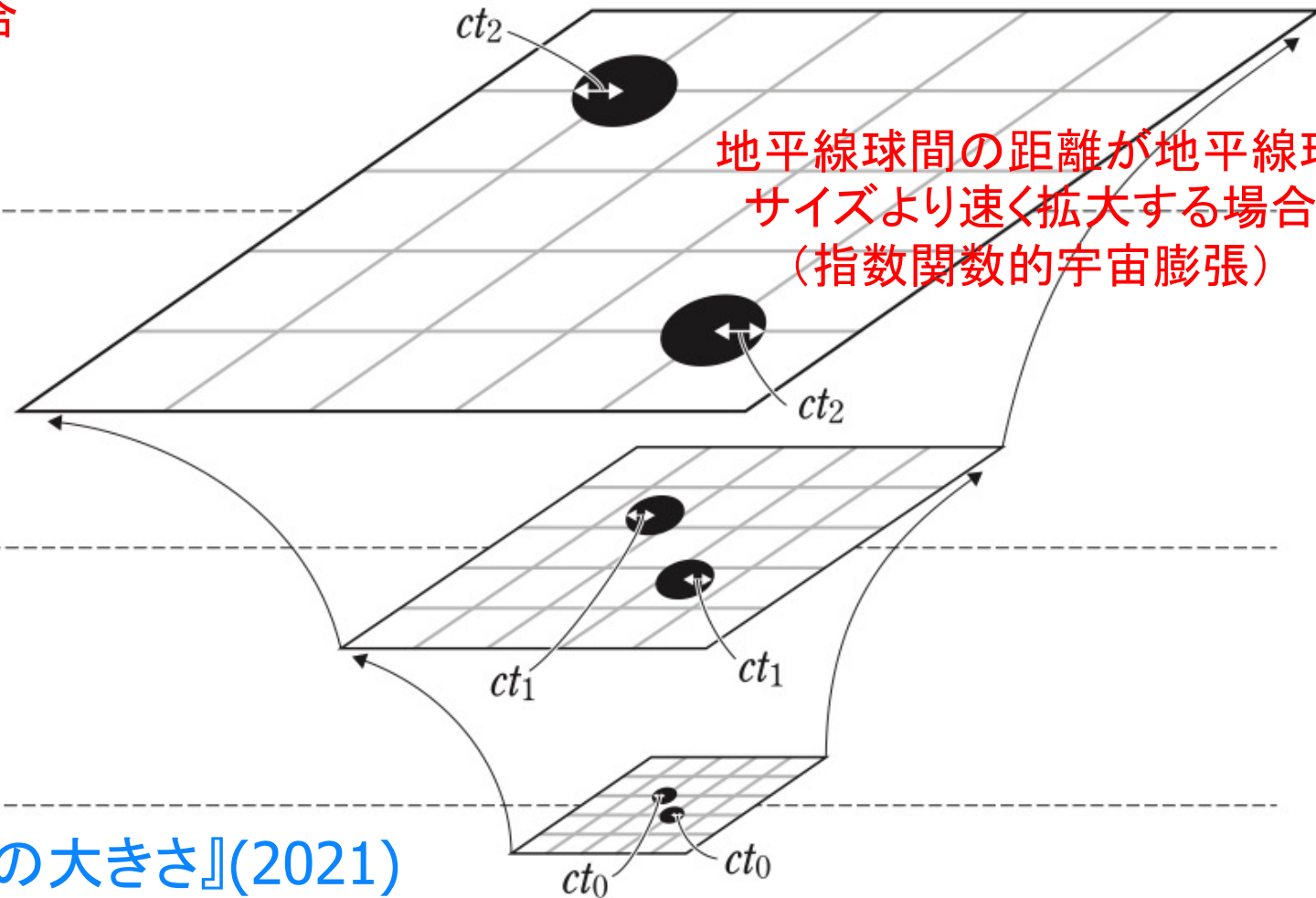
日経サイエンス2003年8月号

# レベル2マルチバースの可能性 (1)

地平線球間の距離よりも地平線球サイズそのものが速く拡大する場合  
(通常の宇宙膨張)



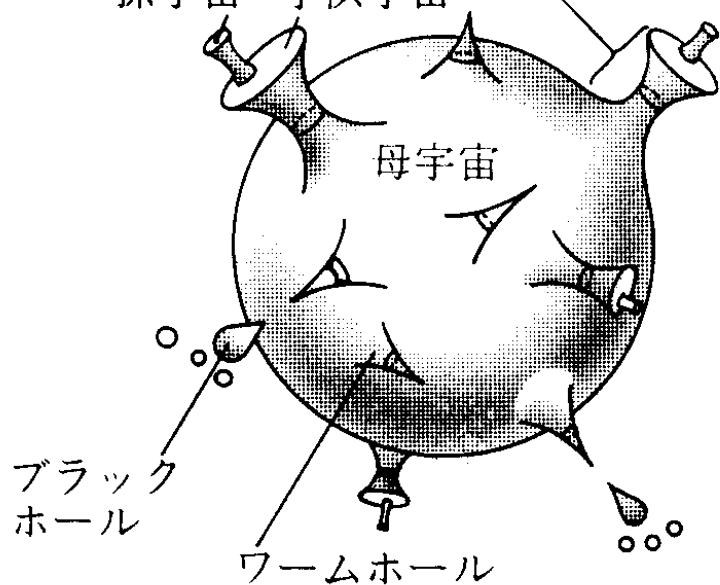
地平線球間の距離が地平線球サイズより速く拡大する場合  
(指数関数的宇宙膨張)



『もの大きさ』(2021)

# インフレーション中の宇宙の階層的多重発生

アインシュタイン・ローゼンの橋  
孫宇宙 子供宇宙



K.Sato et al.  
Phys.Lett.B108  
(1982) 103

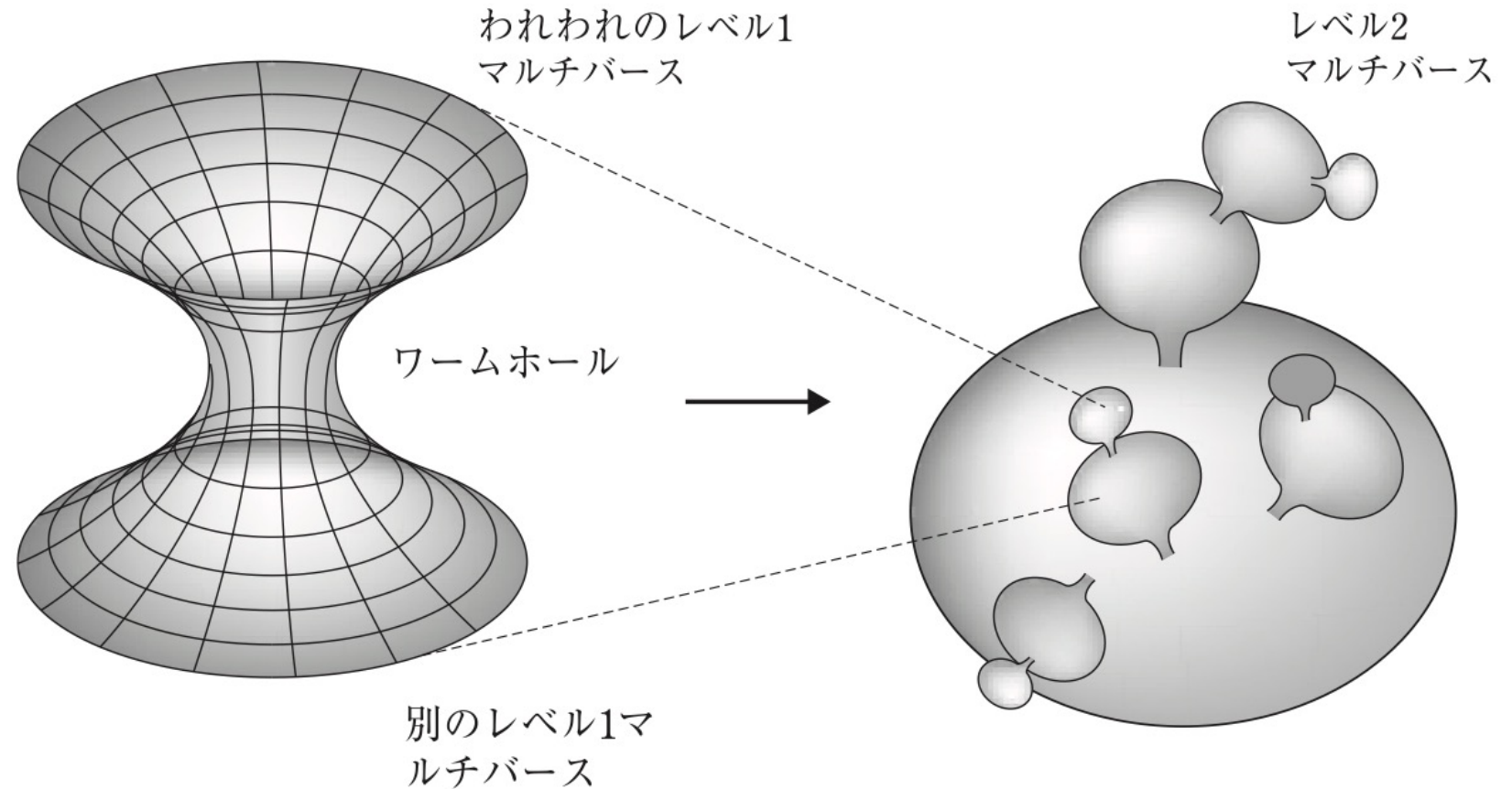


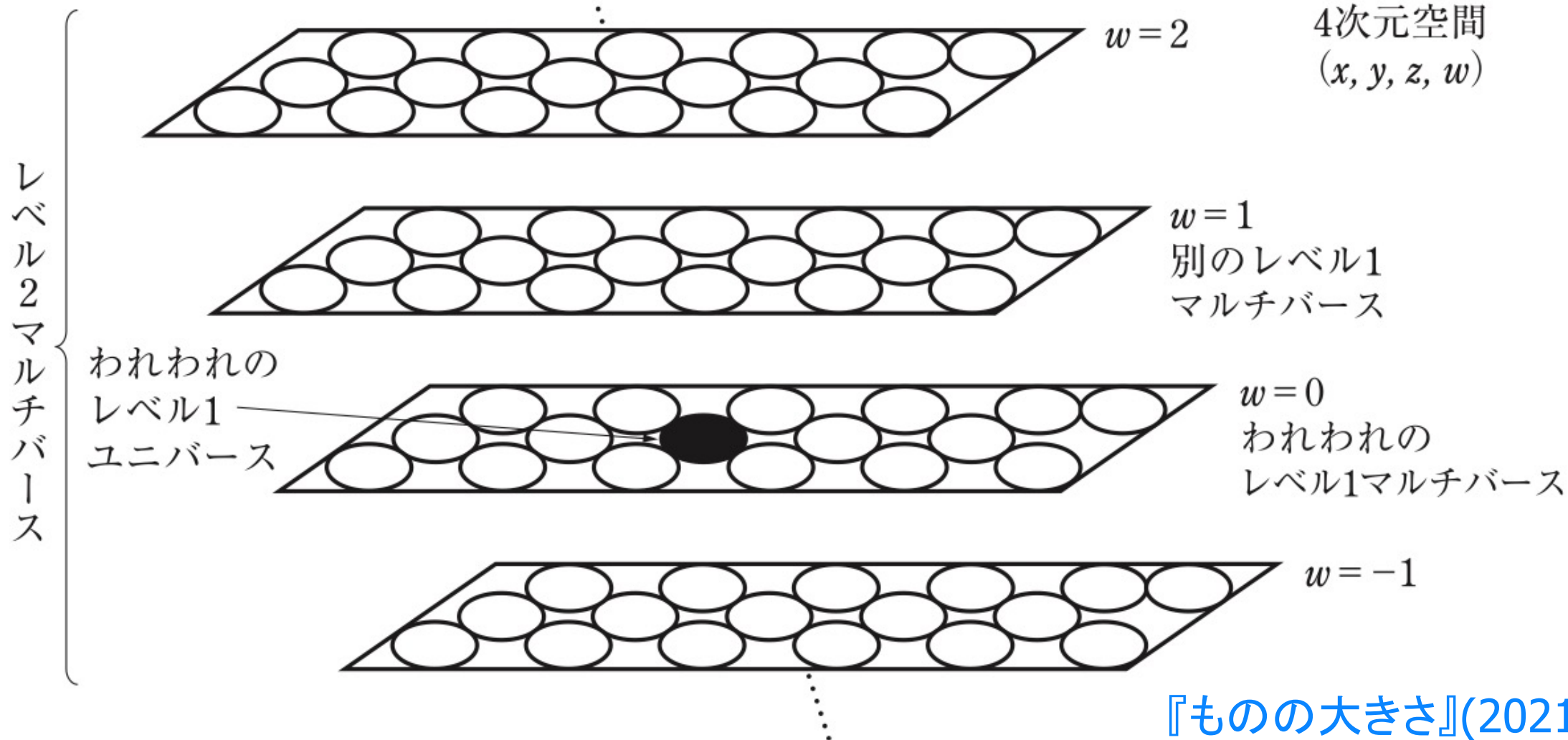
図 6.5 ワームホールで隔てられた異なる宇宙の集合としてのレベル 2 マルチバース. 左のようにワームホールで隔てられた宇宙 (レベル 1 マルチバース) が階層的にどこまでも続き, 右のような集合としてのレベル 2 マルチバースを構成する可能性がある. そのなかの 1 つがわれわれが属するレベル 1 マルチバースに対応する.

『ものの大きさ』(2021)



# レベル2マルチバースの可能性 (2)

もし空間次元が4次元以上なら、異なる次元に存在する別のレベル1マルチバースは認識できない

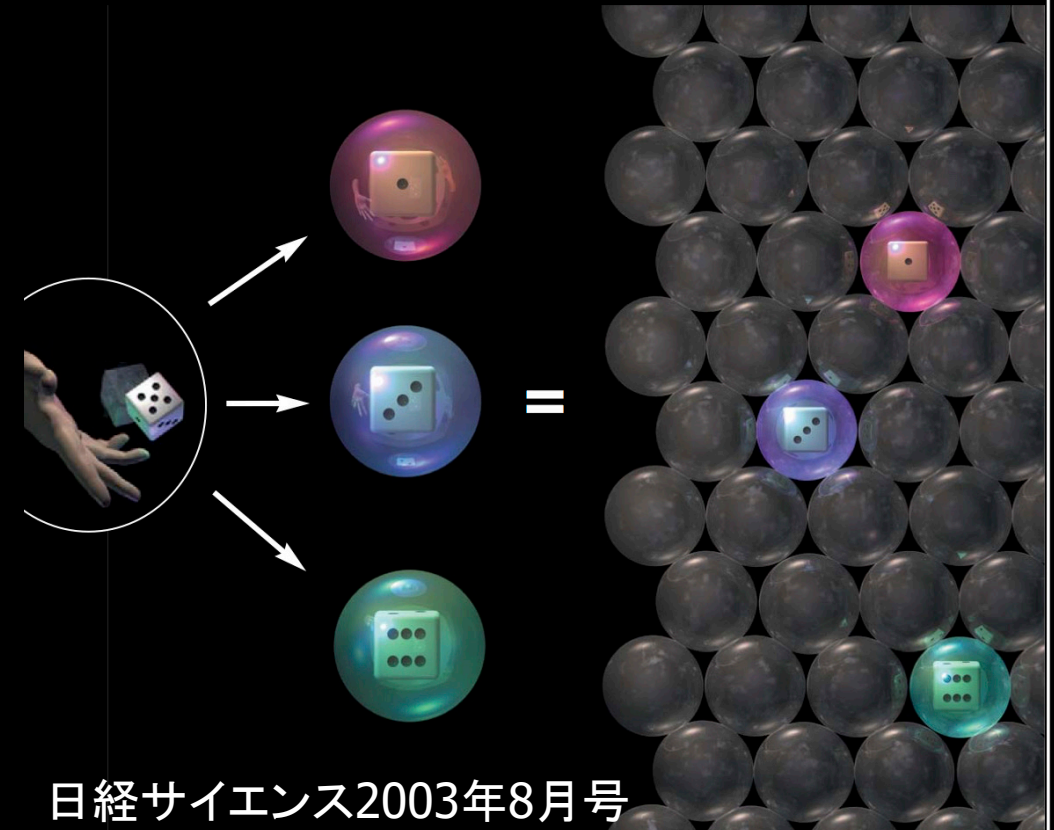
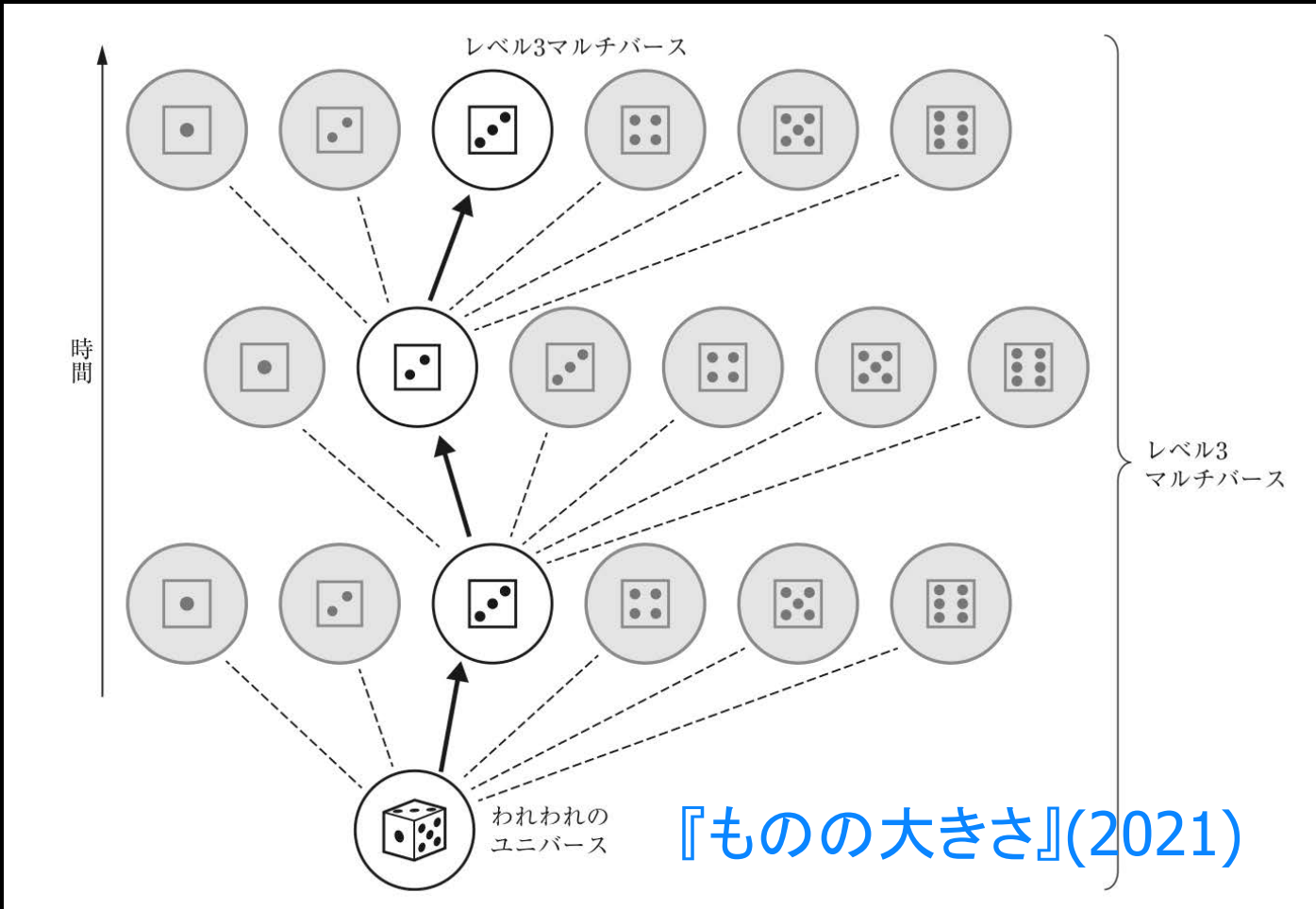


# 3 量子力学の多世界解釈と レベル3 マルチバース

# 量子力学の多世界解釈

- コペンハーゲン解釈によれば、「我々が住む」唯一の宇宙には、異なる量子状態が共存しており、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
- そうではなく、これらの異なる状態はすべて実現するのであり、それら一つ一つの実現した結果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自分がそのなかのどの宇宙に存在しているか「確認」するに過ぎない

# レベル3 マルチバース



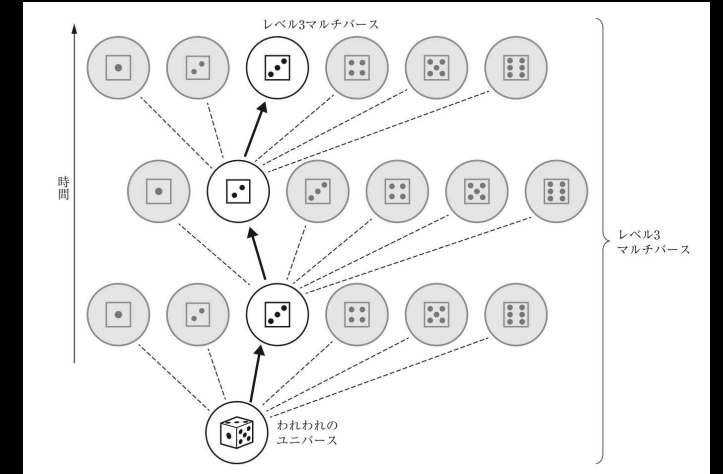
- 量子サイコロ（決定論的古典サイコロではないことに注意！）を振るたびに世界が分岐すると考えても良いし(左)、すでに無数に存在する量子的並行宇宙のどれかに落ち着くと考えても良い（右：その集合がレベル3マルチバース）

# 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）

- コンプライアンス的注意：仮に多世界解釈に完全に納得したとしても決して真似してはいけません
- 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
  - 弾丸が発射するかしないかは半々の確率で量子的に（因果的ではなく）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回後には死んでしまう
  - もしレベル3マルチバースが実在するなら、自分が死んだ宇宙は認識できないから存在しないと同じ。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るはず。
  - 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、ほとんどの場合は当事者が死ぬことを確認するだけ

# コペンハーゲン解釈と多世界解釈の予言の違い

- この量子的装置を100回用いて一度も弾が出なかったとする
  - 確率  $P=1/2^{100}=10^{-30}$
  - この試行一回に1秒かかるとすると、 $100秒 \times 10^{30} \doteq$  (現在の宇宙年齢) の  $10^{15}$  倍だけの時間をかけて初めて平均的に一度起こる程度
- 実際にそのような「奇跡」を体験したら
  - 自分は選ばれしものなのだと納得する
  - 装置が壊れている (あるいは詐欺である) ことを疑う
  - 量子力学の多世界解釈が証明されたと納得する
- 多世界解釈ではこの試行は異なる宇宙で並行してなされる
  - 100秒後に  $10^{30}$  個のレベル3 マルチバースのどこかで実現
  - 量子コンピュータが高速計算できる原理!
  - 自分が生きている宇宙以外は、存在しないと同じ (人間原理的選択原理)



# 4 抽象的論理構造に対応する 実在としてのレベル4 マルチバース

# 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
- 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
- むしろ宇宙そのものが法則 (摂理、論理構造)なのでは？
  - 例えば一般相対論における粒子の運動方程式は、時空の幾何学的な測地線方程式そのもの(ラグランジアン=線素)。つまり、法則は宇宙に刻みこまれている
  - 一般相対論に限らず耳にすることが多い「物理学の幾何学化」という言葉は、とりもなおさず宇宙=法則というレベル4 マルチバース的主張そのものだとも解釈できるのでは？



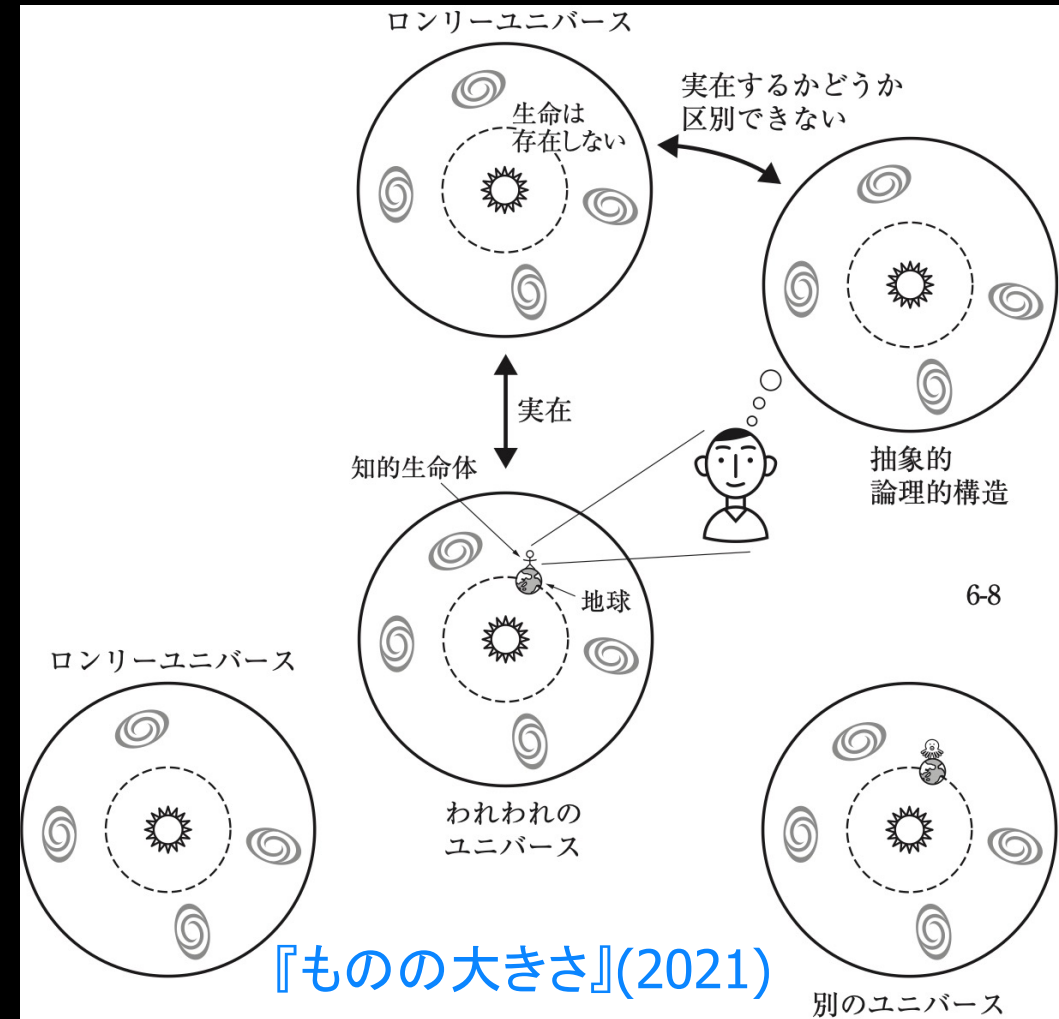
# レベル4 マルチバース：

## 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矛盾するものの、論理的に無矛盾な物理法則（数学的体系）があったとする
  - 実験で否定される体系はこの世界と矛盾しており考えても無意味（常識的）
  - 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では？
- 本当は異なる物理法則を持つ世界がどこかに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）
  - 異なるレベル2 マルチバースの物理法則が同じである必然性はない
  - それを過激に進めて、異なる物理法則があるならば必然的にそれに対応する実在があるとするのがレベル4 マルチバースの思想
- 観測者が存在しない宇宙の実在を認めるなら、それは結局論理的な構造は常に実在するという主張と区別できないのでは？

# 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）が存在する必然性はない
- 固有の物理法則にしたがって進化するユニバースはの大半には、それを観測したり熟考したりする生物がない
- そのようなユニバースをも「実在」と認めて良いとすれば、純粹に数学的に無矛盾な抽象的論理構造はあまねく実在と言うべきでは？
- 実在を確認するためには人間が必要  
= 人間原理



# 5 人間原理：マルチバースの選択律

# 物事には必ず理由があるのか

## 地球がハビタブル・ゾーンに入っているのは幸運



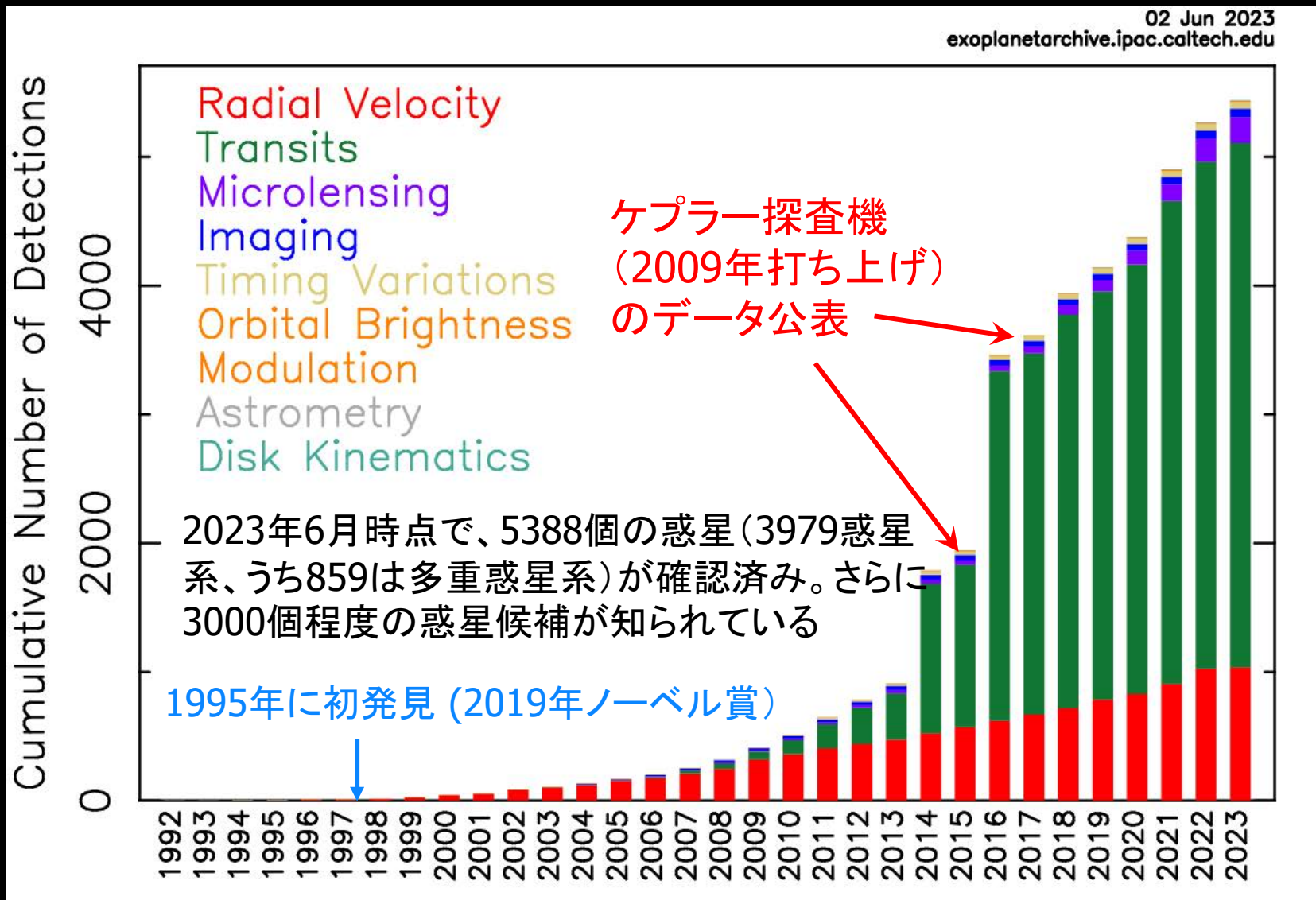
- **例題**：地球上に液体の水が存在するには、太陽との距離が現在の値と±10%以内の狭い範囲になくってはならない。これから何かわかることはあるのか？

# 偶然に意味を見い出す

- 回答例 1： 無意味な質問である
  - 地球と太陽の距離は単に偶然決まっただけ。偶然には意味はない。
- 回答例 2： 実は深い意味を持つ
  - 偶然そのような微調整された系が実在するためには、地球が唯一ではなく、中心星と異なる距離にある無数の惑星が存在すると考える方が自然。つまり、この地球が微調整された（不自然な）性質を持っているのならば、それ以外の無数の惑星が存在していることを示唆する

# この問いの正解は別として太陽系外惑星は普遍的に実在

## 発見総数

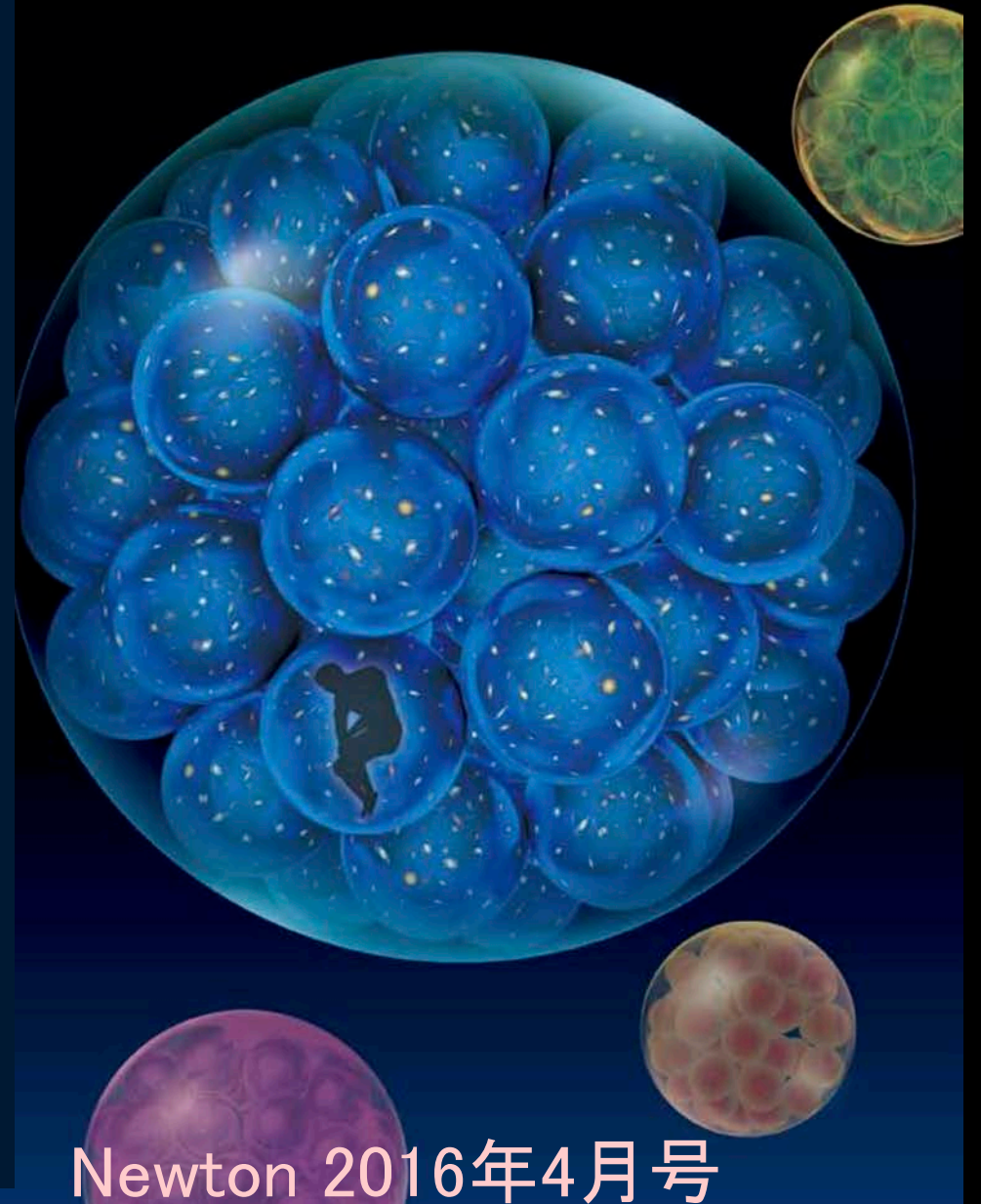


西暦

# 物事には必ず理由があるのか

## ■ 応用問題

- この宇宙には我々人間という知的生命が存在するが、そのためには宇宙の初期条件と物理法則に微調整が必要だとされている。これから何かわかることはあるか？



# ユニバースからマルチバースへ

- 回答例 1: 無意味な質問である
  - 知的生命の起源を未だ解明できて、あるいはそれは偶然に支配されているだけのいずれかである。それ以上の意味はない
- 回答例 2: 実は深い意味を持つ
  - 知的生命を誕生させる確率が極めて小さいならば、それを相殺するだけの数の宇宙が存在しなければ、知的生命をもつ宇宙は実存し得ない。つまり、宇宙は我々のユニバース以外のマルチバースにある無数のユニバースのなかでたまたま知的生命を宿すような条件を備えた例である。つまり、マルチバースの実在が示唆される



# マルチバースを考える意味

- すべての物事には理由・答えがある（究極理論的世界観）のか？
  - すべての物事が必然とは限らず偶然は不可避（それでも納得したい⇒人間原理的世界観）
- 人間原理：「人間が存在する」という条件付確率を考えることで、不思議さを減らすベイズ統計的世界観
  - 人間原理の実現には、マルチバースの存在が前提
- ただし、マルチバースの存在を科学的に証明することは不可能
  - 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
- マルチバースという考え方そのものは決して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の枠にはない

# 人間原理と物理法則

- マルチバースの存在を認めよう
- そのなかのユニバースでは物理法則が異なっている
  - 少なくとも物理定数や宇宙定数の値は違っている
- それらのなかで、たまたま人間を生む偶然が積み重なったユニバースの一例が我々の住む宇宙
  - 大多数の「普通」のユニバースでは人間は誕生しないから、「これが普通」と納得する「人間」は存在しない
  - 「例外的に珍しい」ユニバースでのみ人間が誕生でき、だからこそそこには「なぜこのユニバースはこのように不自然なのか」と思い悩む人間が存在する
  - 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ない

# 人間原理の算数

- 極度にありえない事象を、同じくほとんどありえない事象（人間の存在）と関係づける
- $P(\text{不思議なこと}) \ll 1$ 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」が相関しているならば、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（自然科学と呼ぶべきかかかどうかは別として精神面では大切）

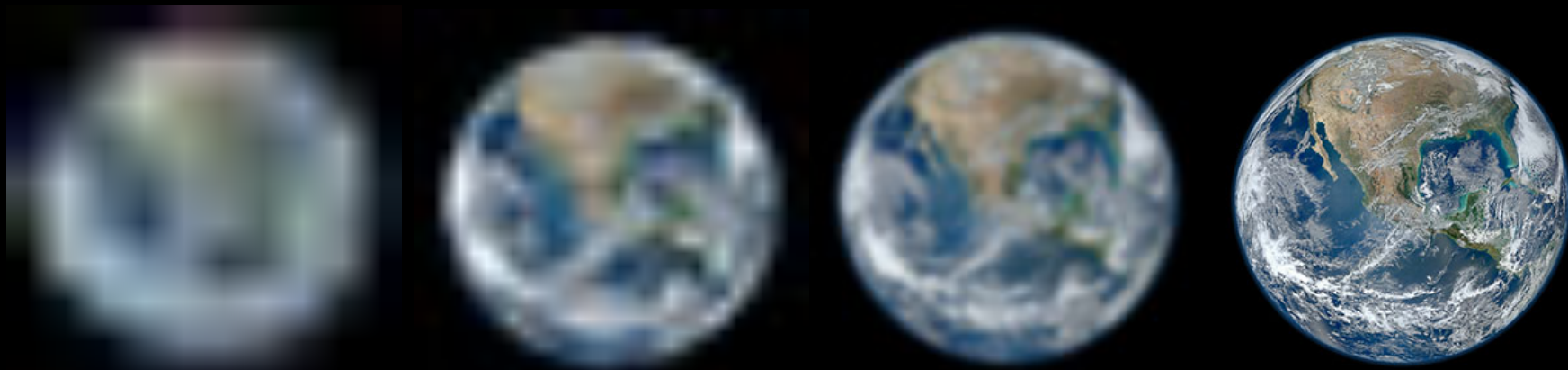
# 人間が誕生する確率がどんなに少なくとも 宇宙が無数にあればどこかで実現するはず

- 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必ず実現する
  - 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、統計的には当選者がいないほうがおかしい
- 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（マルチバース）と結論すべきでは？
  - 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奇跡的な事実が納得できる（？）

## 6 離散性と連続性：

レベル 1 マルチバースとパラレル宇宙

# 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？—

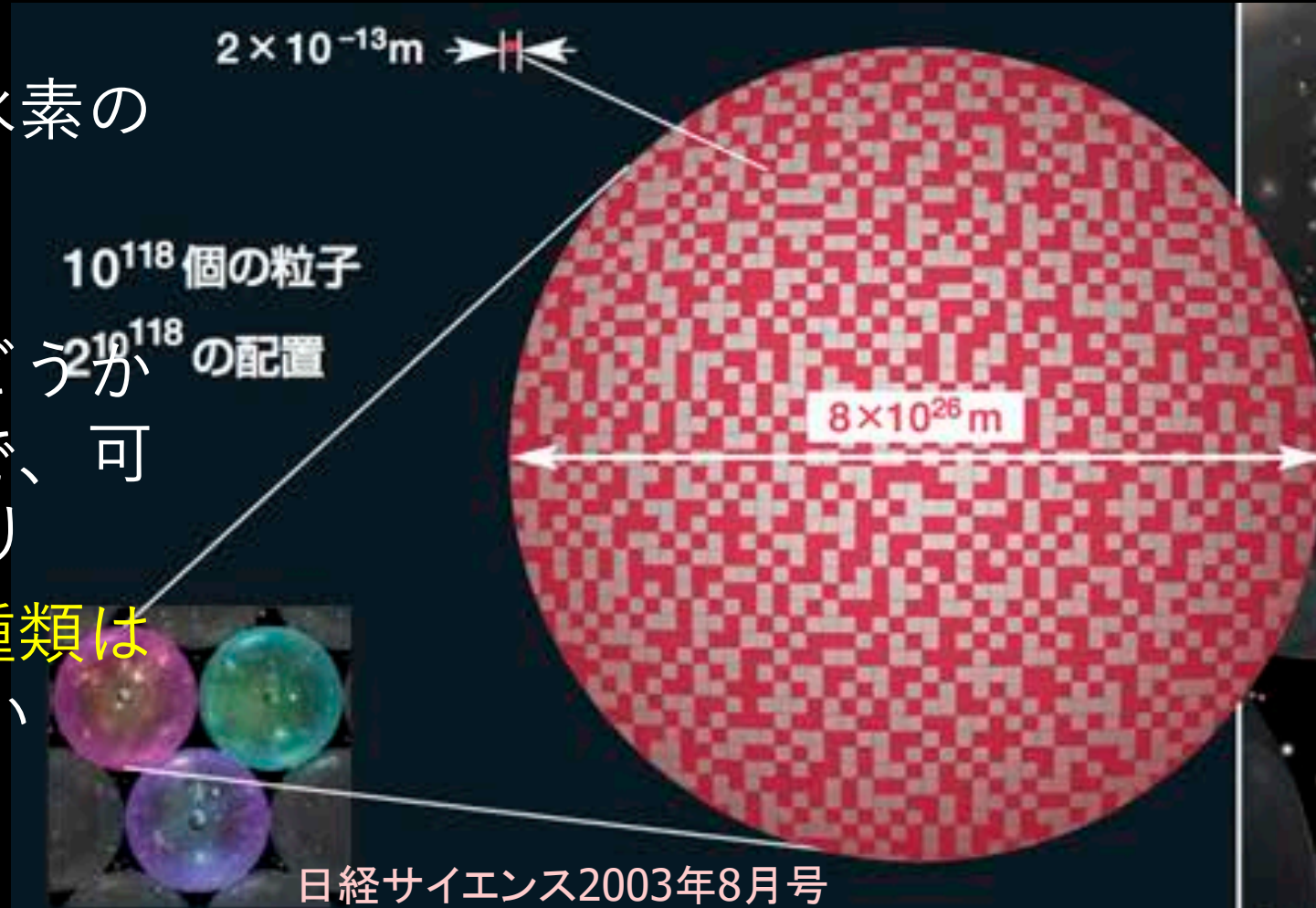


- この作業を繰り返していくと、いずれは近似ではなく本物（と区別できないクローン宇宙）に到達する？
  - すべての物質は有限個の素粒子からなる（量子論を無視する）
  - 時間と空間も連続ではなく離散的かも？
  - とすれば宇宙はデジタル情報に帰着するので、3Dプリンターで宇宙を創り続けると、いずれクローン宇宙が出現するはず？

# 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

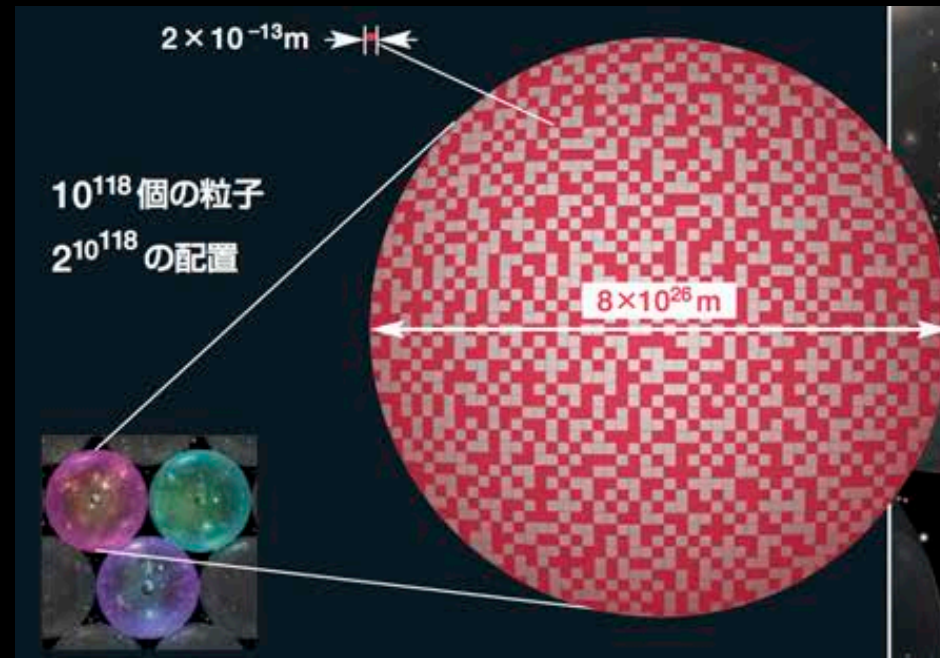


# パラレルユニバースが実在するための仮定

- **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）が**有限個の離散的自由度**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**

パラメータの値は連続的でなく、離散化されていると仮定する必要がある → 真面目に突き詰めていけば、時空もまた離散化されている必要がある。正しいかどうかは分からないがプランクスケールがその量子化の基本単位かもしれない（それ以下のスケールは世界の振る舞いに影響しないという可能性も含む）

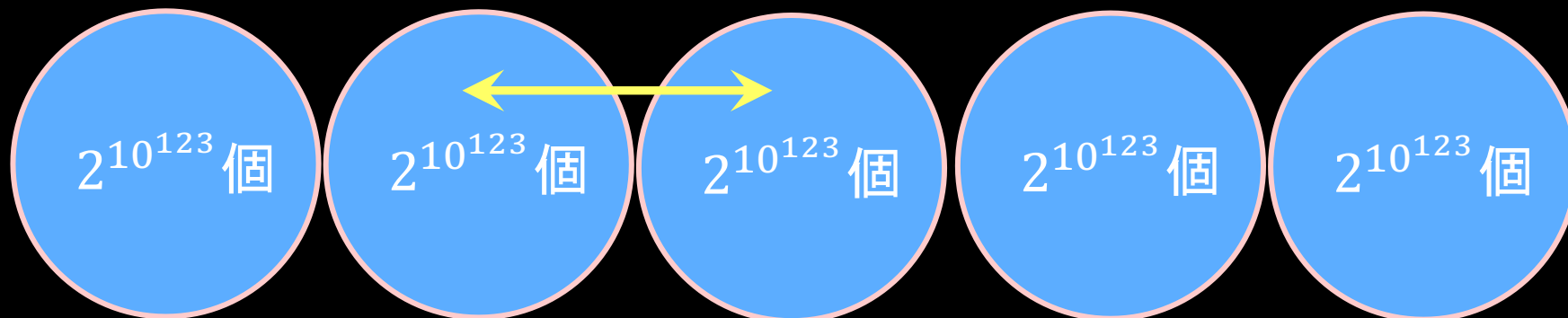
日経サイエンス2003年8月号





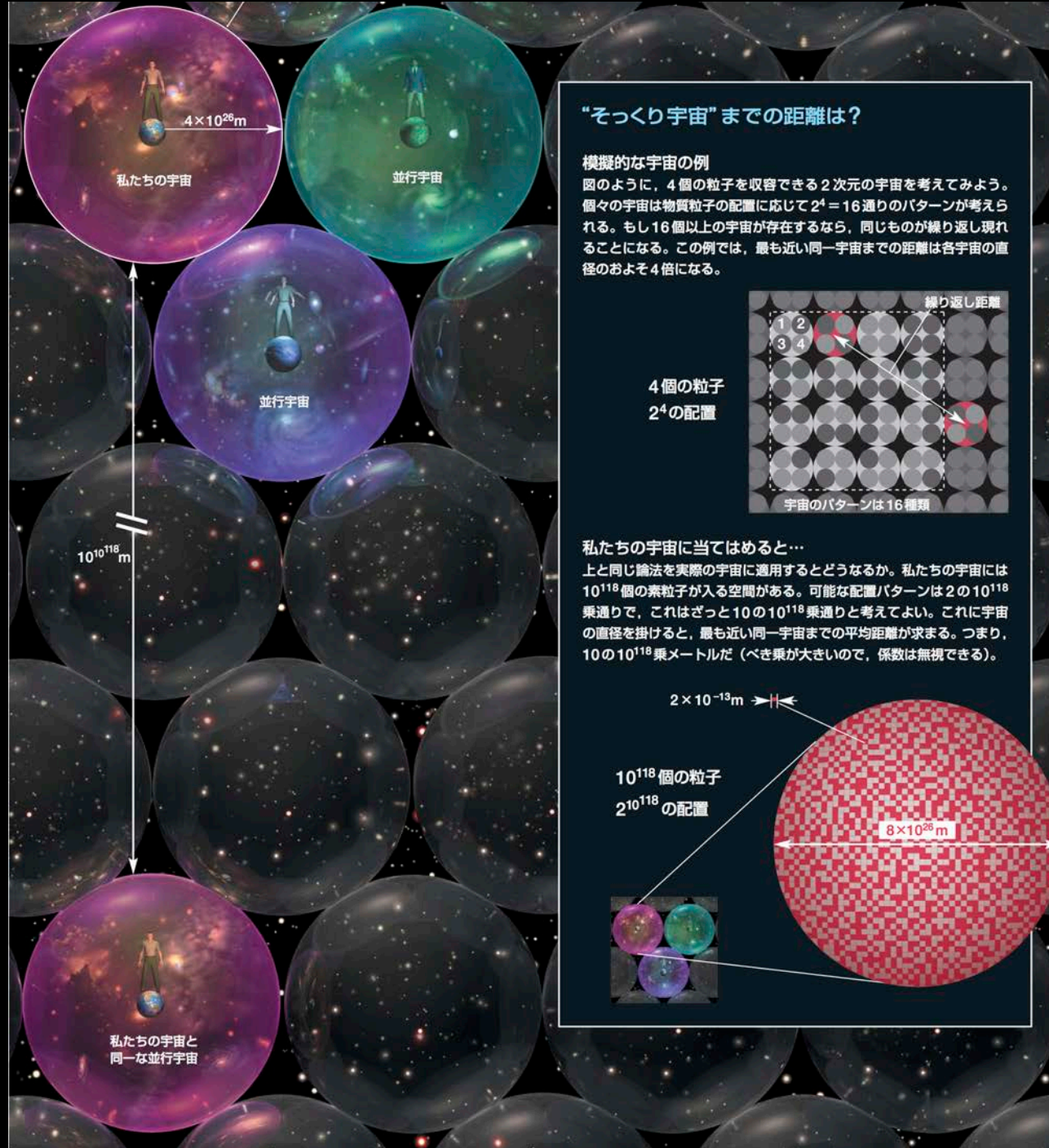
# 隣のクローン宇宙までの距離

- 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
  - 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考えて良からう
- 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）  
138億光年  $\times$  (2 の  $10^{123}$  乗) $^{1/3}$   $\sim$  (10 の  $10^{122}$  乗)億光年



# パラレル宇宙 (クローン宇宙) は実在する!?

- 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**まで含めて同じ人間 (≠クローン人間) となるのか?
- 自由意志と古典的決定論



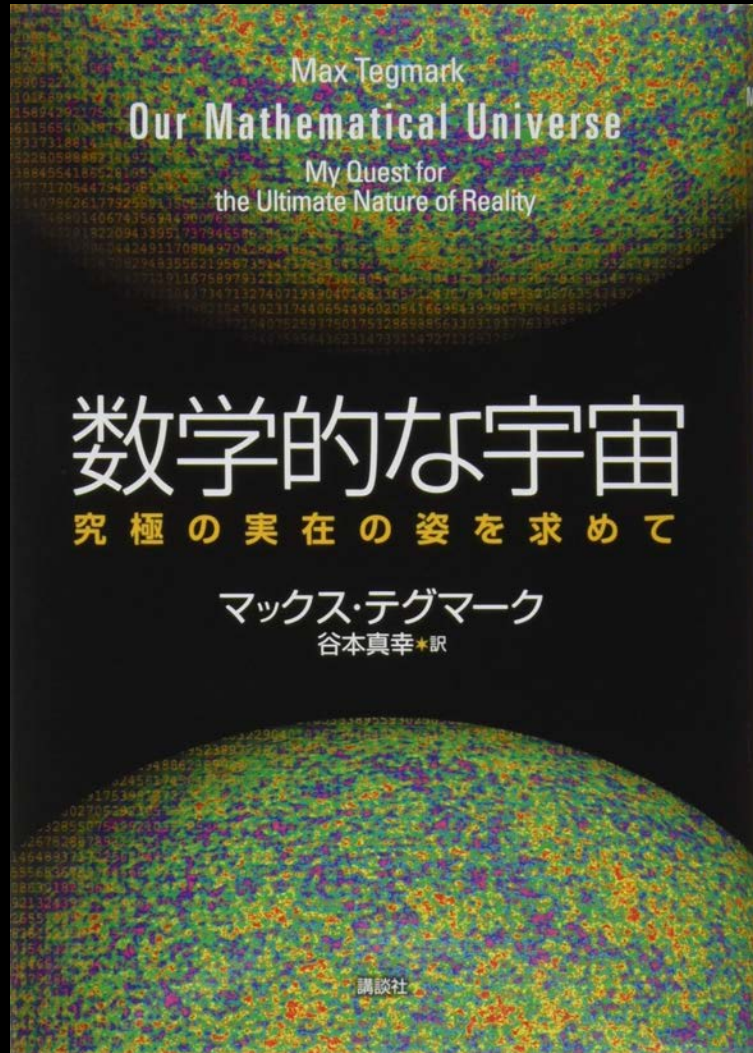
## 7 まとめ：

(マルチバース + 人間原理)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(世界)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度のみで表現され尽くされるなら、その中の任意の有限体積の領域は、無限体積の中に繰り返し登場する。  
⇒ 我々の宇宙に対する並行宇宙は実在する（かも）。
- (マルチバース + 人間原理)的世界観
  - 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を区別する必要はない？ ⇒ これこそ、我々の住む宇宙が数学的な物理法則に（厳密に）したがる理由なのかも？

# 参考文献



講談社 (2016年)



東京大学出版会 (初版 2006年 第2版 2021年)

# 今回の内容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