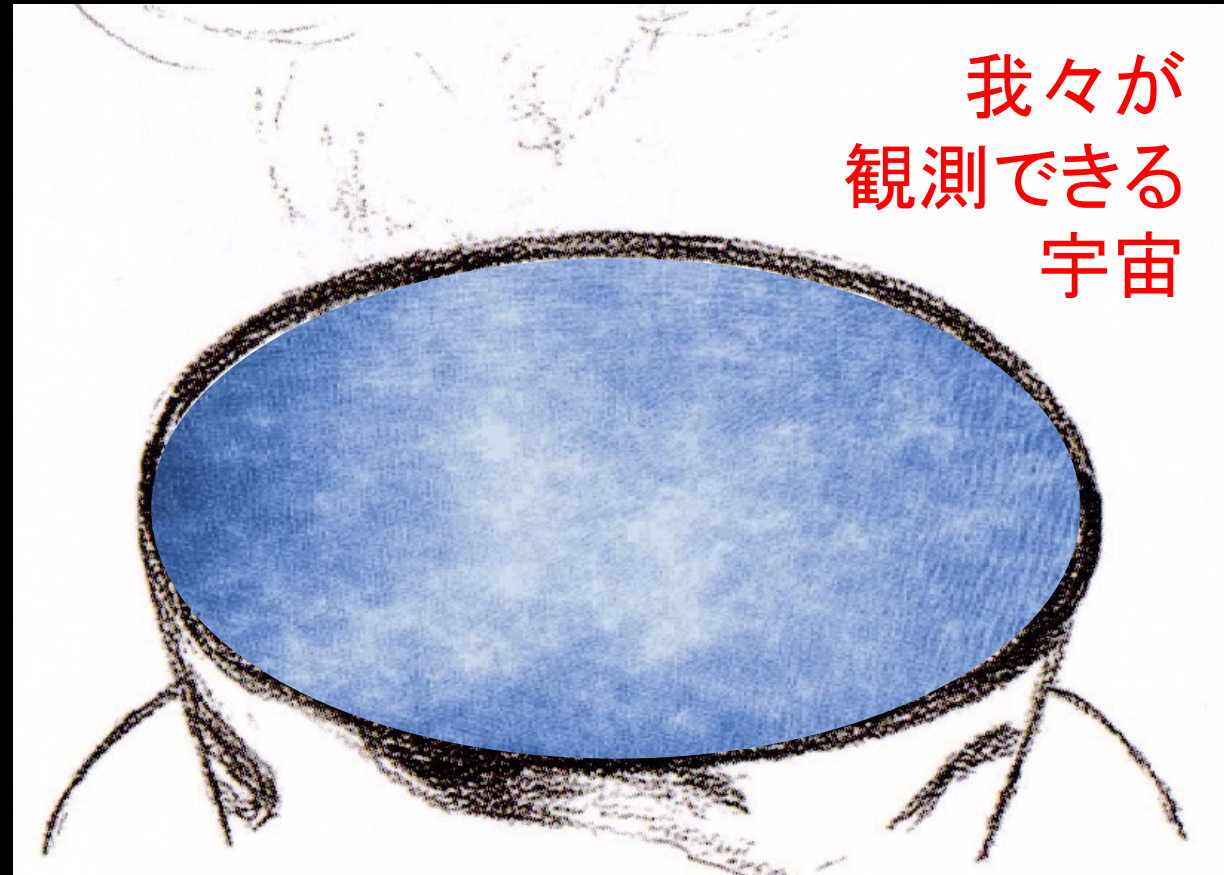


# 「茶わんの湯」の世界の中と外



我々が  
観測できる  
宇宙

理学系研究科物理学専攻 須藤 靖

「茶わんの湯」から最新の科学を考える 第10回

2022年12月15日 13:15-14:45 @東京大学駒場 全学自由研究ゼミナール

# 今回の内容

- 1 茶わんの湯
- 2 茶わんの湯の中で起きていること  
－宇宙の進化と物理法則－
- 3 茶わんの外の世界  
－ユニバースからマルチバースへ－
- 4 茶わんの中も外も  
世界は法則にしたがっている

# 1 茶わんの湯

科学絵本

茶わんの湯

文 寺田寅彦

解説 高木隆司

川島禎子

高橋昌子





科学絵本  
茶わんの湯

科学絵本

文 寺田寅彦

解説 高木隆司

絵 高橋昌子  
川島禎子

## 一杯の茶わんの湯に見る全宇宙の法則

鈴木三重吉が創刊した児童文学雑誌『赤い鳥』。そこから生まれた寺田寅彦の名作「茶碗の湯」。科学と文学が渾然一体となって光る、自然の不思議をみつめる深い眼差し。

窮理舎 定価（本体 2,000 円 + 税）



# 寺田寅彦 「茶わんの湯」



ここに茶わんが一つあります。  
中には熱い湯がいっぱいはいっております。  
ただそれだけではなんのおもしろみもなく  
不思議もないようですが、  
よく気をつけて見ていると、  
だんだんにいろいろの微細なことが目につき、  
さまざまの疑問が起こって来るはずで  
す。  
ただ一ぱいのこの湯でも、  
自然の現象を観察し研究することの好きな人  
には、  
なかなかおもしろい見物です。

# 答えを知るより疑問に思う心が大切

眼は、いつでも思った時にすぐ閉じることができるようになっている。  
しかし、耳のほうは、自分では自分を閉じることができないようになっている。

なぜだろう。

(大正十年三月、渋柿)

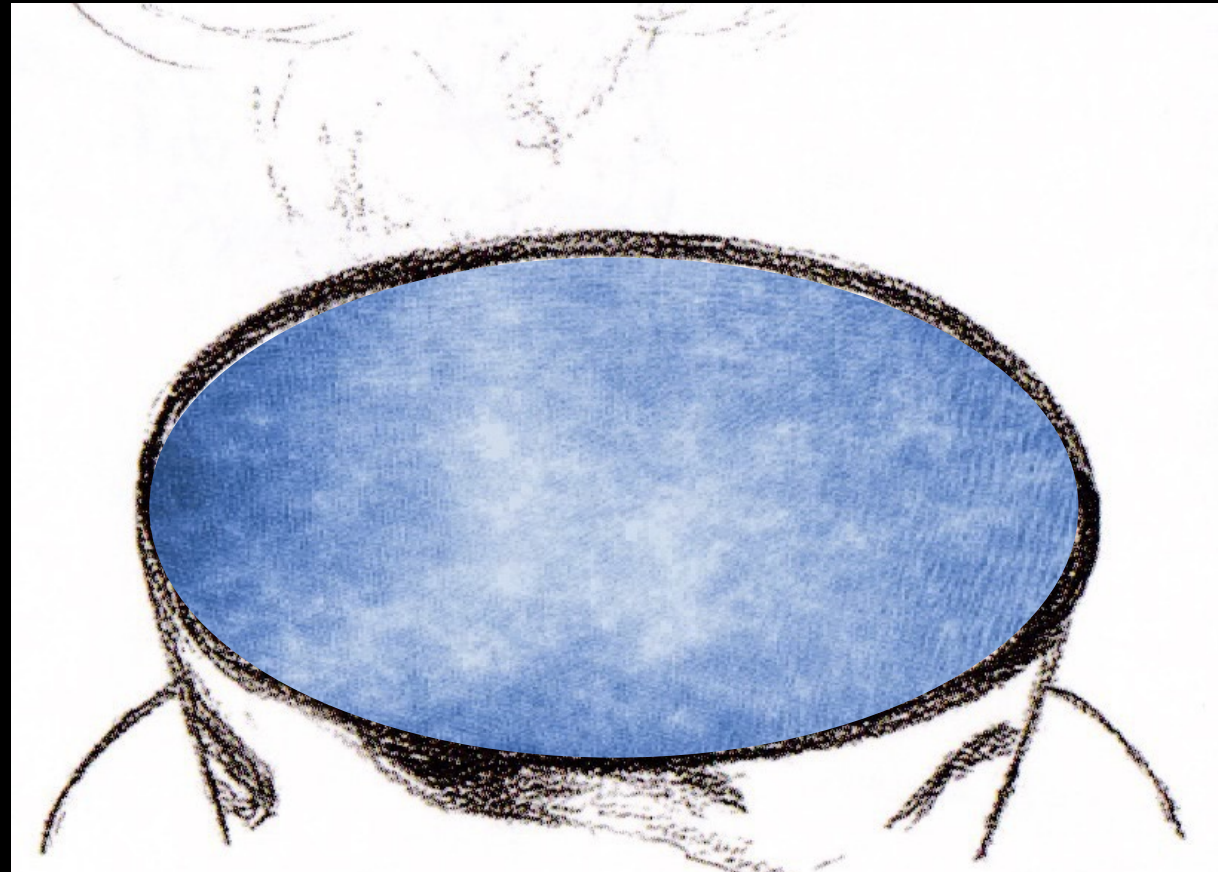
寺田寅彦 1878年11月28日～1935年12月31日

高知県出身

東京帝国大学物理学教授



## 2 茶わんの湯の中で起きていること — 宇宙の進化と物理法則 —

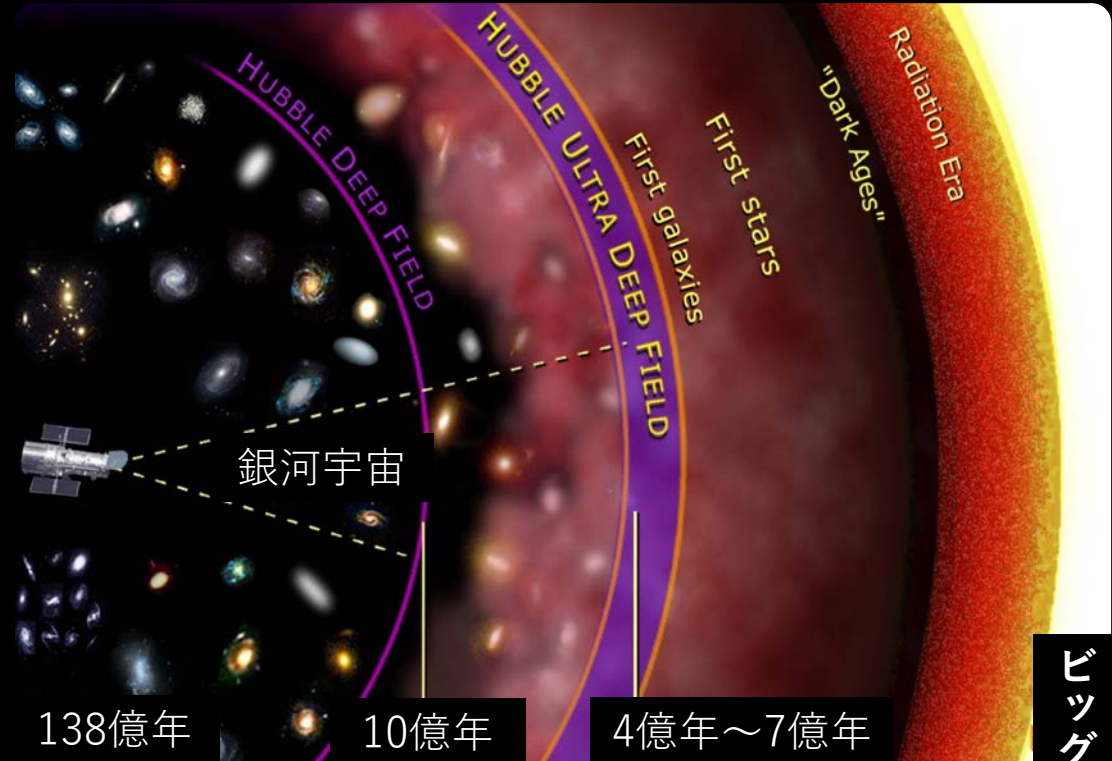
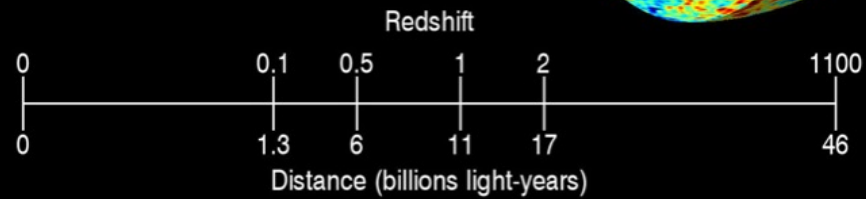
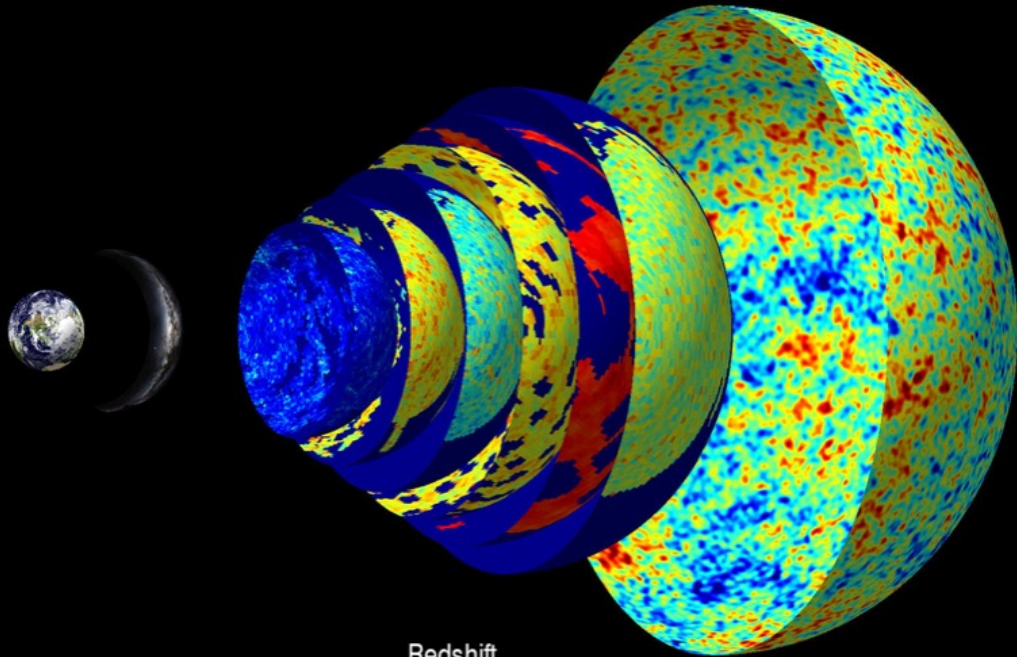




# 遠くの宇宙には過去の歴史が刻まれている

光の速度は有限 ⇒ 観測できる遠くの宇宙は必然的に過去の宇宙

茶わん



138億年

10億年

4億年～7億年

現在

← 時間

過去 (= 遠方)

ビッグバン

# ゆらぎ

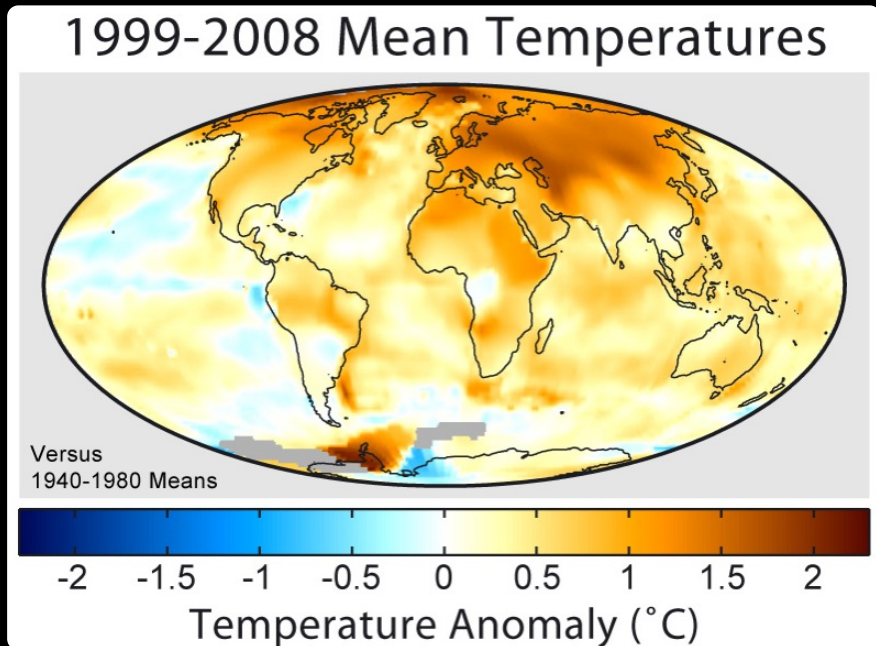
- 多数の要素からなる集団の性質はある分布にしたがう
  - 日本の異なる場所の人口密度（空間的变化）
  - 自分が毎日歩く歩数（時間的变化）
  - クラスの生徒の体重や身長（要素ごとの変化）
- 異なる要素が持つ物理量すべてが同じ値ではありえない
  - 大まかには、この平均値からのずれをゆらぎという
  - ある物理量の空間的非一様性（空間的密度ゆらぎ）
  - ある物理量の時間変化パターン（時間的ゆらぎ）
- このゆらぎが物理法則にしたがって進化した結果、世界の多様性が生まれる

# Q1: 宇宙の温度ゆらぎ

- 地球の表面温度は、季節と場所によって摂氏マイナス20度からプラス40度程度変化している。絶対温度（ケルビン）に換算すると250Kから310Kなので、平均温度のまわりの「温度ゆらぎ」の大きさは約 $\pm 10\%$ ということになる。
- 誕生後38万年経過した時点での宇宙の平均温度は約3000Kであることが知られているが、その温度ゆらぎの大きさとして予想する値を以下から選べ
  - A)  $\pm 1\%$
  - B)  $\pm 0.01\%$
  - C)  $\pm 0.0001\%$



湯 = 宇宙を満たすビッグバンの名残(光の化石)  
 湯の中の温度ゆらぎ = 光の温度の空間的非一様性  
 宇宙の構造の種 = 宇宙マイクロ波背景放射温度地図

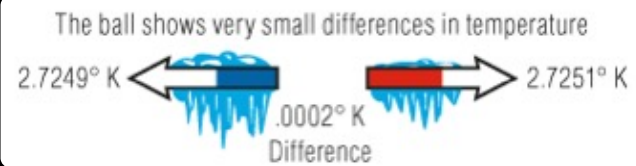
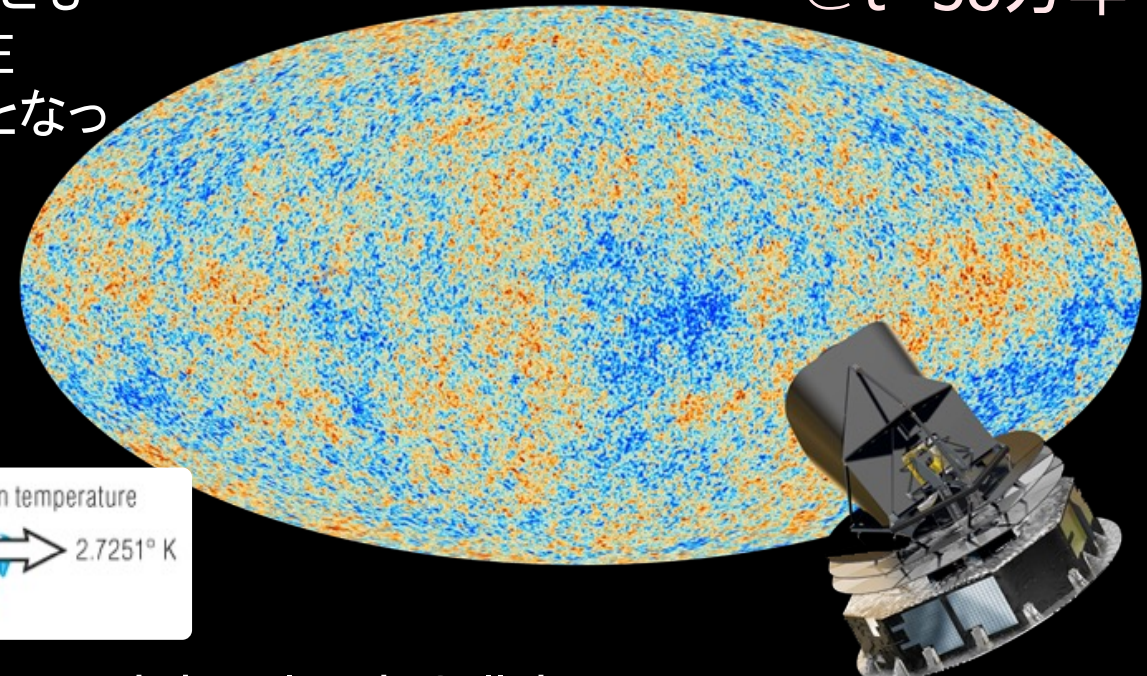


Robert A. Rohde

地球の温暖化を表す温度地図

t=38万年に温度3000K  
 だった光は、時間とともに  
 温度を下げ、現在  
 (t=138億年)は3Kとなっ  
 ている

宇宙の温度ゆらぎ全天マップ  
 @t=38万年

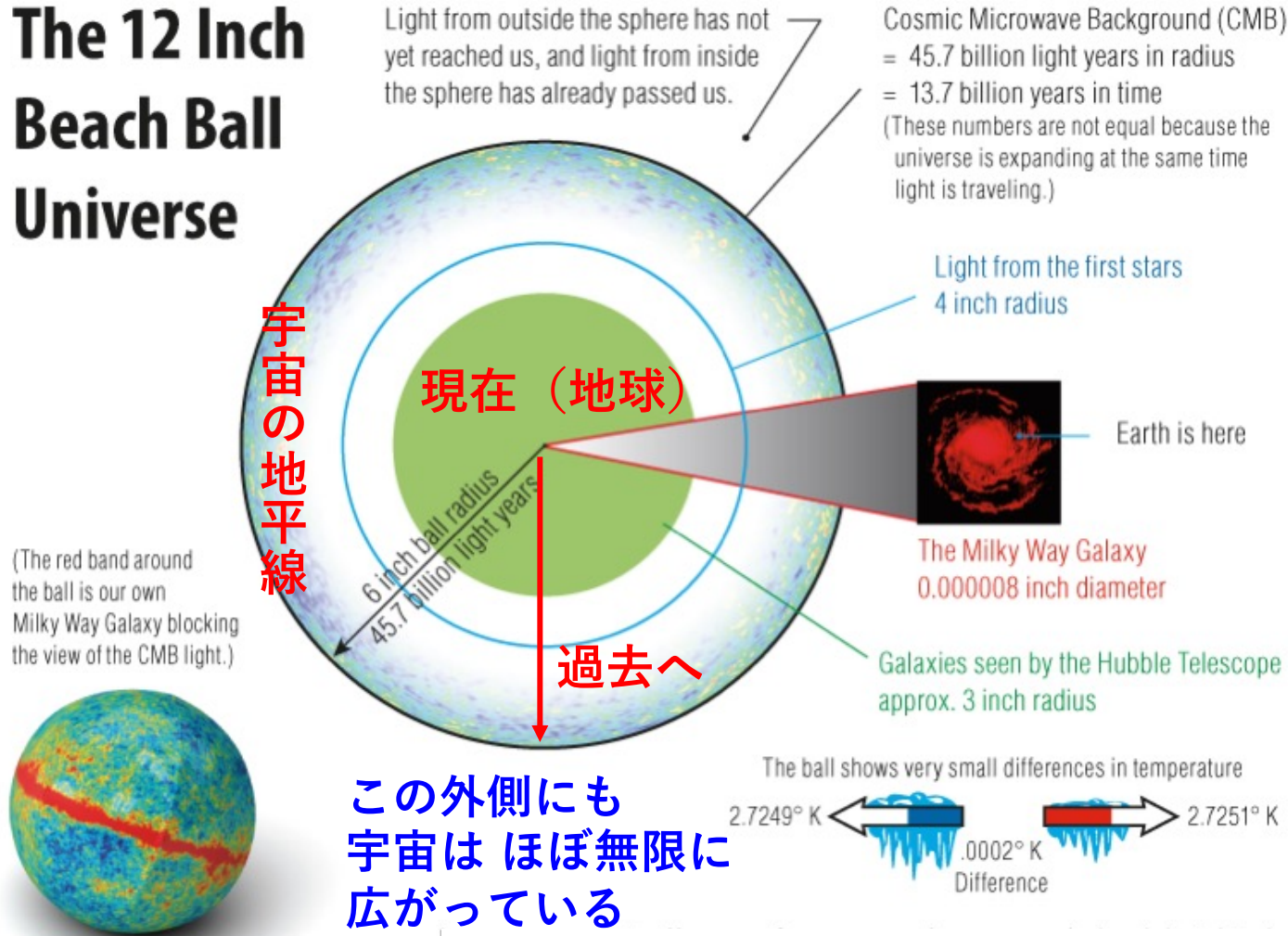


ESA and the Planck Collaboration - D. Ducros  
 プランク衛星のデータ(2013)

# 宇宙マイクロ波背景輻射と宇宙の果て

地球から天球面での温度地図を  
逆転させて表現した天球儀

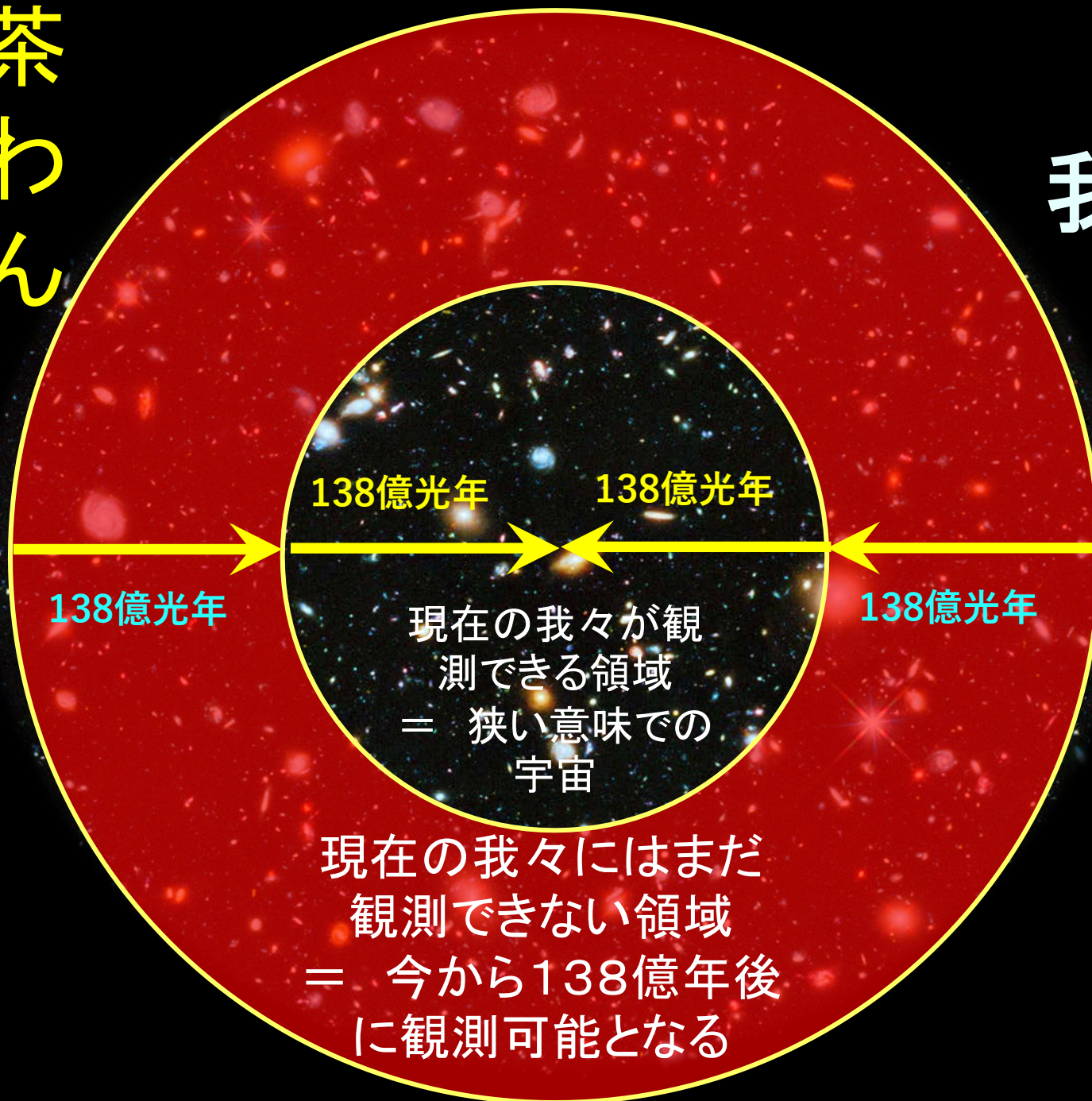
## The 12 Inch Beach Ball Universe



地平線球を  
満たす光  
= 茶わんの湯



茶わん



# 茶わん=地平線球 我々が観測できる宇宙

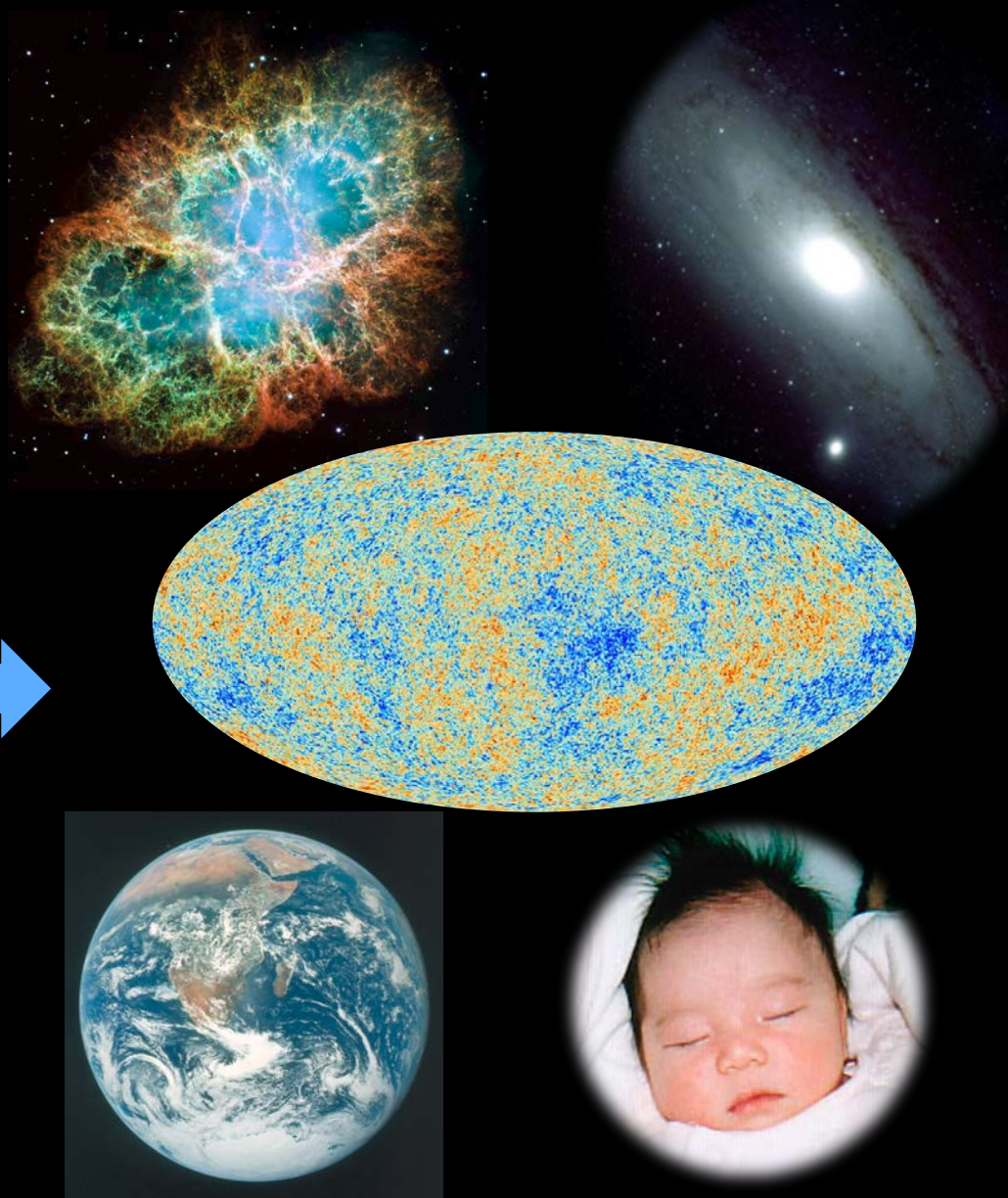
- われわれが観測可能な領域は宇宙年齢で決まっている(地平線球)
- その外は現在観測不可能
- **宇宙=時空間+物質**
  - 茶わん=宇宙の時空間
  - 湯=宇宙を満たす物質
- **宇宙=茶わん+湯**



# 茶わんの湯（宇宙の中の物質）は物理法則にしたがって進化する



高温高密度（ビッグバン）



# 天体の形成：ゆらぎと重力とダークマター



宇宙の  
構造形成  
シミュレーション

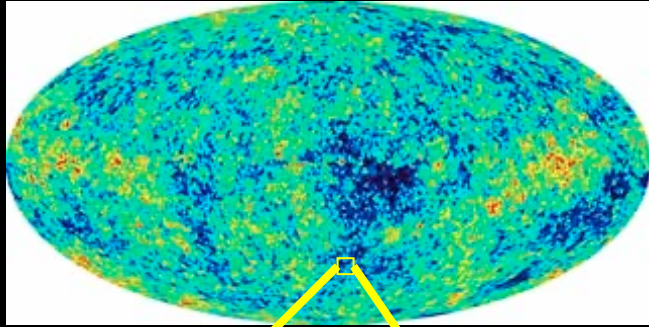
吉川 耕司  
樽家 篤史  
景 益鵬  
須藤 靖

- 初期宇宙に存在した空間的密度のゆらぎが、宇宙の膨張とともに成長し現在の宇宙を満たす多様な天体諸階層を生み出した
- 天体は重力によって成長、重力を支配するのはダークマター

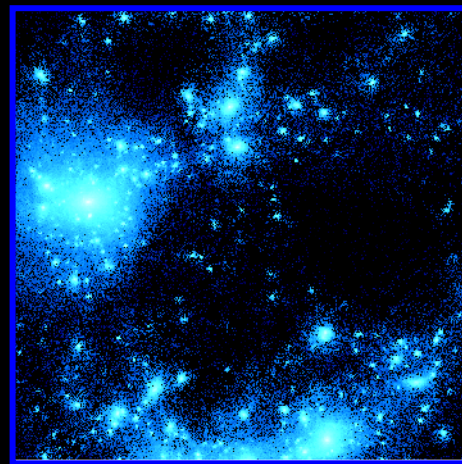
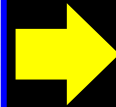
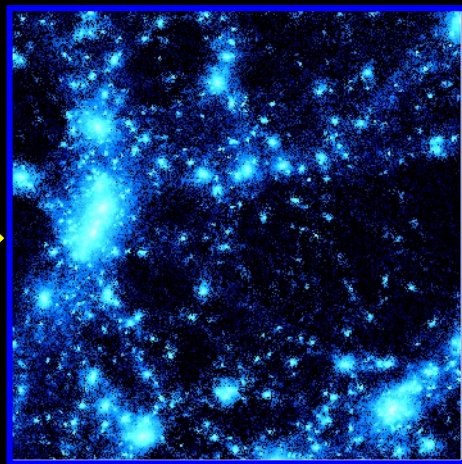
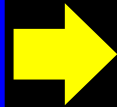
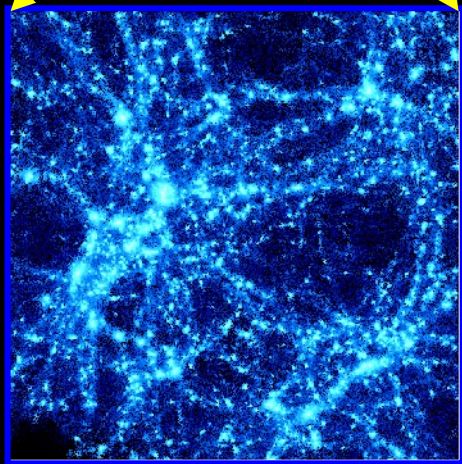


# 宇宙における銀河・星・惑星の形成と進化

宇宙初期の空間ゆらぎ



- はじめに小さな構造が形成され、時間とともにより大きなスケールの構造へ進化する
- 小さな天体の中で時間をかけてより複雑な構造（生物！）が誕生する
- 天体のみならず生物もまたゆらぎから生まれた



万有引力(重力)によってでこぼこ度合いがどんどん成長する

茶わんの湯

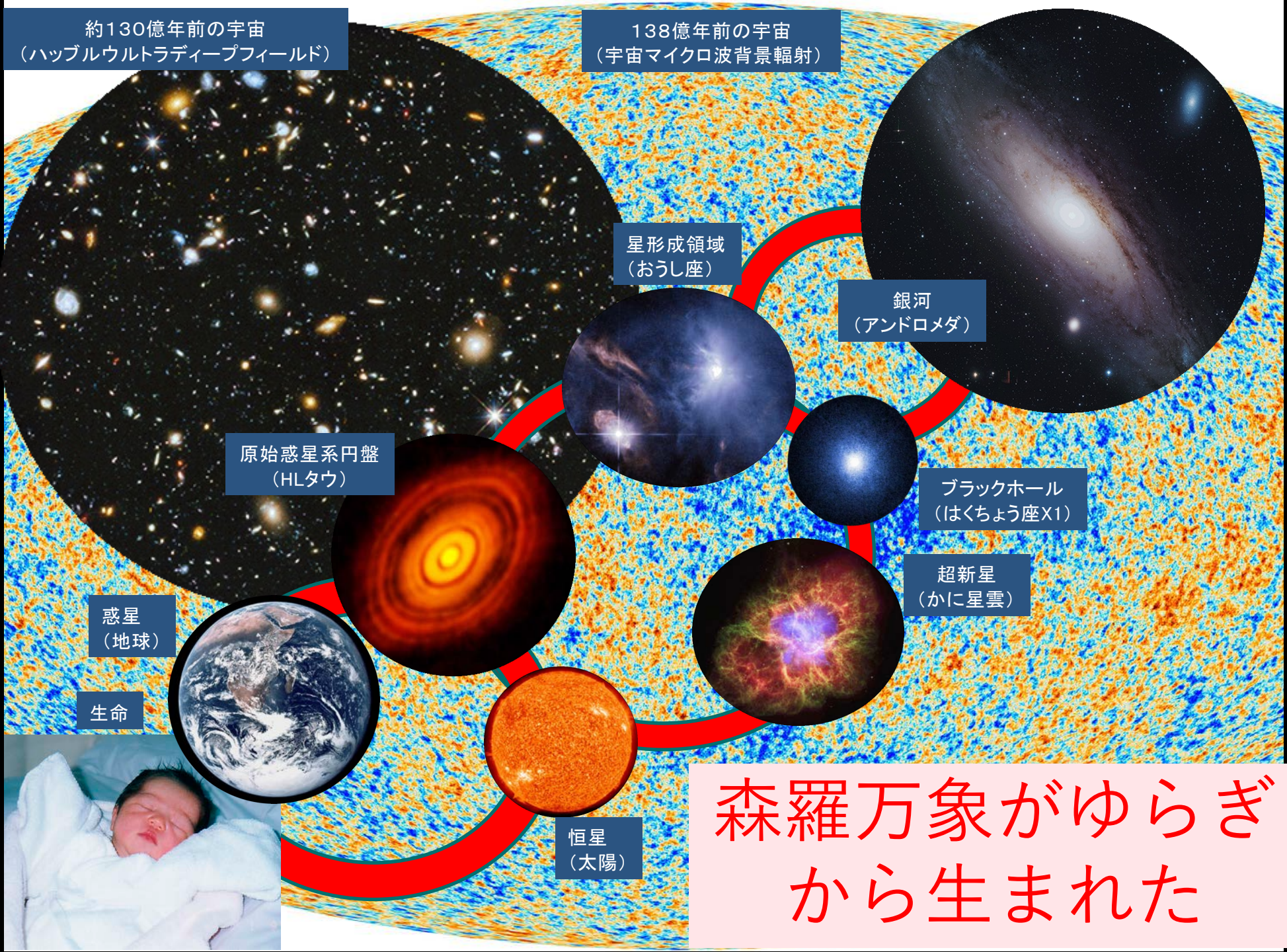




宇宙の元素循環と生命の誕生・進化

「茶わんの湯」の世界の中

森羅万象がゆらぎから生まれた



約130億年前の宇宙  
(ハッブルウルトラディープフィールド)

138億年前の宇宙  
(宇宙マイクロ波背景放射)

星形成領域  
(おうし座)

銀河  
(アンドロメダ)

ブラックホール  
(はくちょう座X1)

超新星  
(かに星雲)

恒星  
(太陽)

惑星  
(地球)

生命

原始惑星系円盤  
(HLタウ)

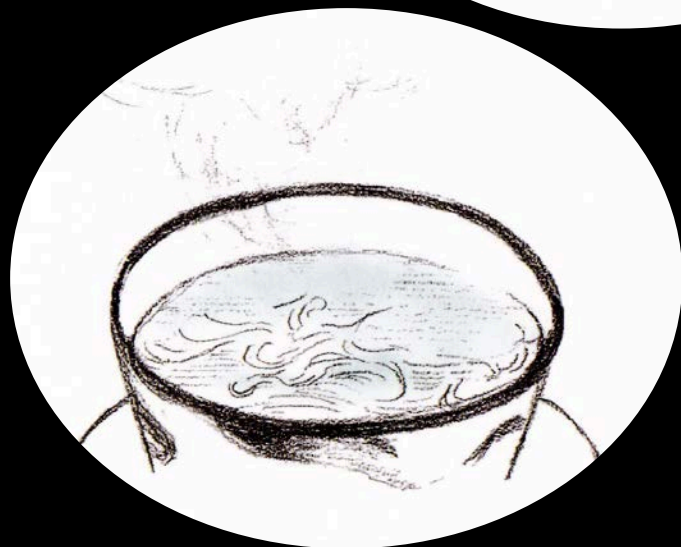
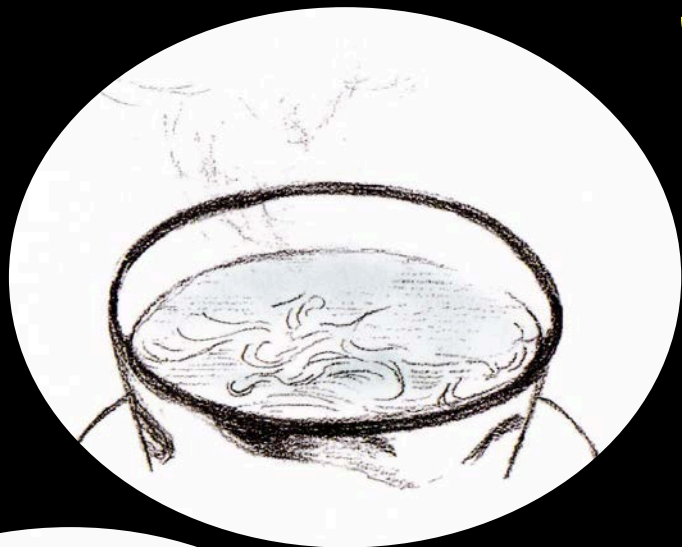
138億年の宇宙史における天体の進化



# 3 茶わんの外の世界

ーユニバーズから

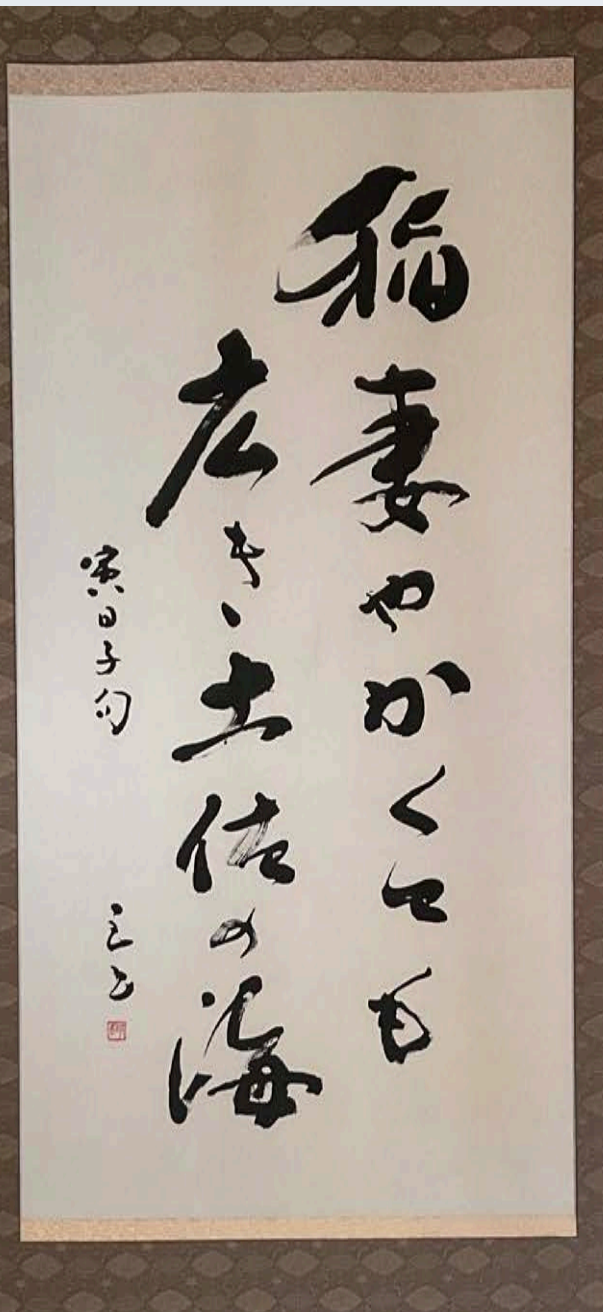
マルチバーズへー



# 50年前の私にとっての「世界」 @高知県安芸市

「子供の頃 海を見て育っちょらん  
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？





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？







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？

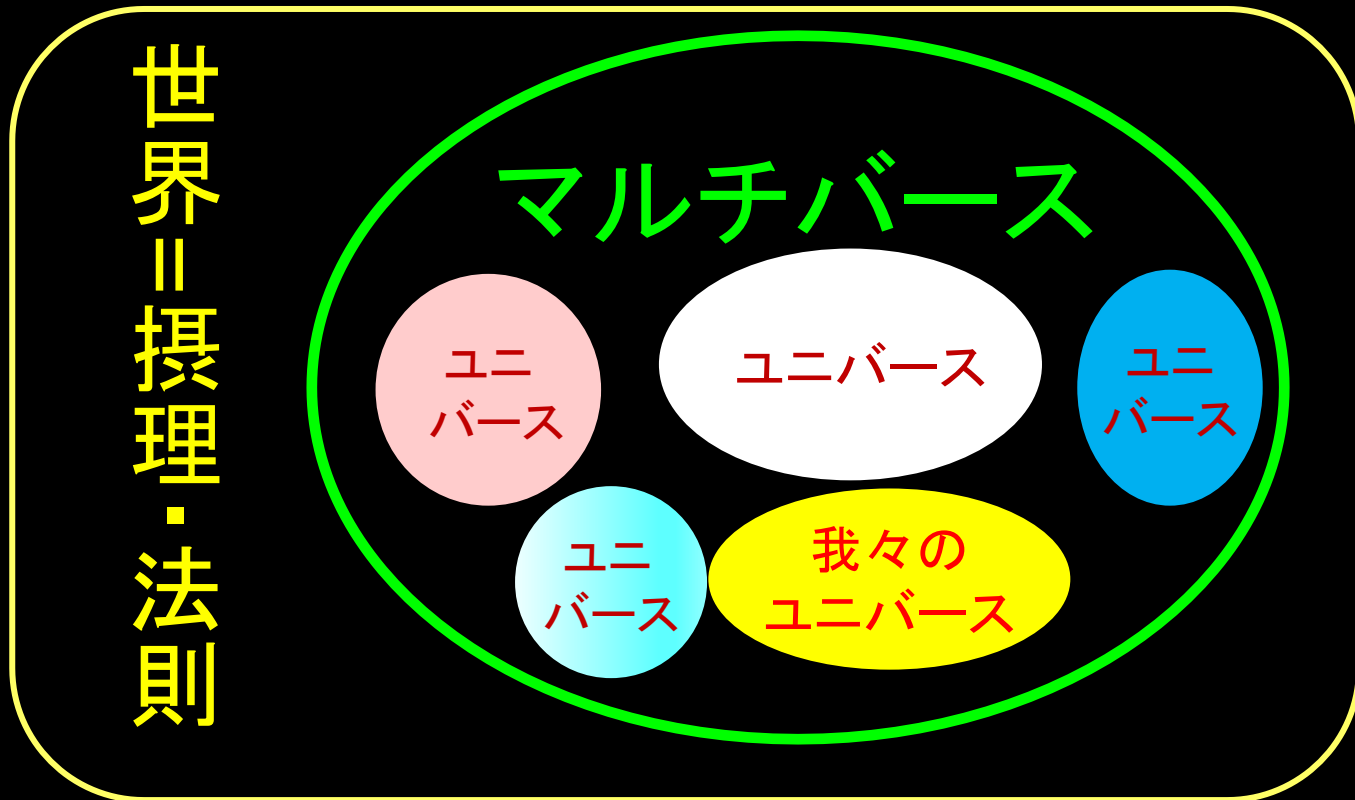


## Q2: 現在観測できる宇宙の外の世界

- かつて、観測可能な宇宙の領域は、観測機器（裸眼、望遠鏡）の性能で決まっていた。しかし今や、宇宙年齢かけて光が伝達できる138億光年という原理的な限界まで観測可能となった。したがって、その先に存在しているはずの宇宙は原理的に検証できず、通常の意味での科学の対象とは言い難い
- それを前提とした上で、その先にある宇宙に対して自分がもっとも「自然」だと思う可能性を以下から選べ
  - A) われわれの住む領域の宇宙と全く異なる性質の宇宙が広がっている
  - B) われわれの住む領域の宇宙と、統計的にはほぼ同じ性質の宇宙が広がっている
  - C) われわれの住む領域の宇宙と全く異なる性質の宇宙から、区別できない並行宇宙に至るまで、多様な宇宙が同時に「実在」している

# 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



- **コンプライアンス的注意**
  - 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



# 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

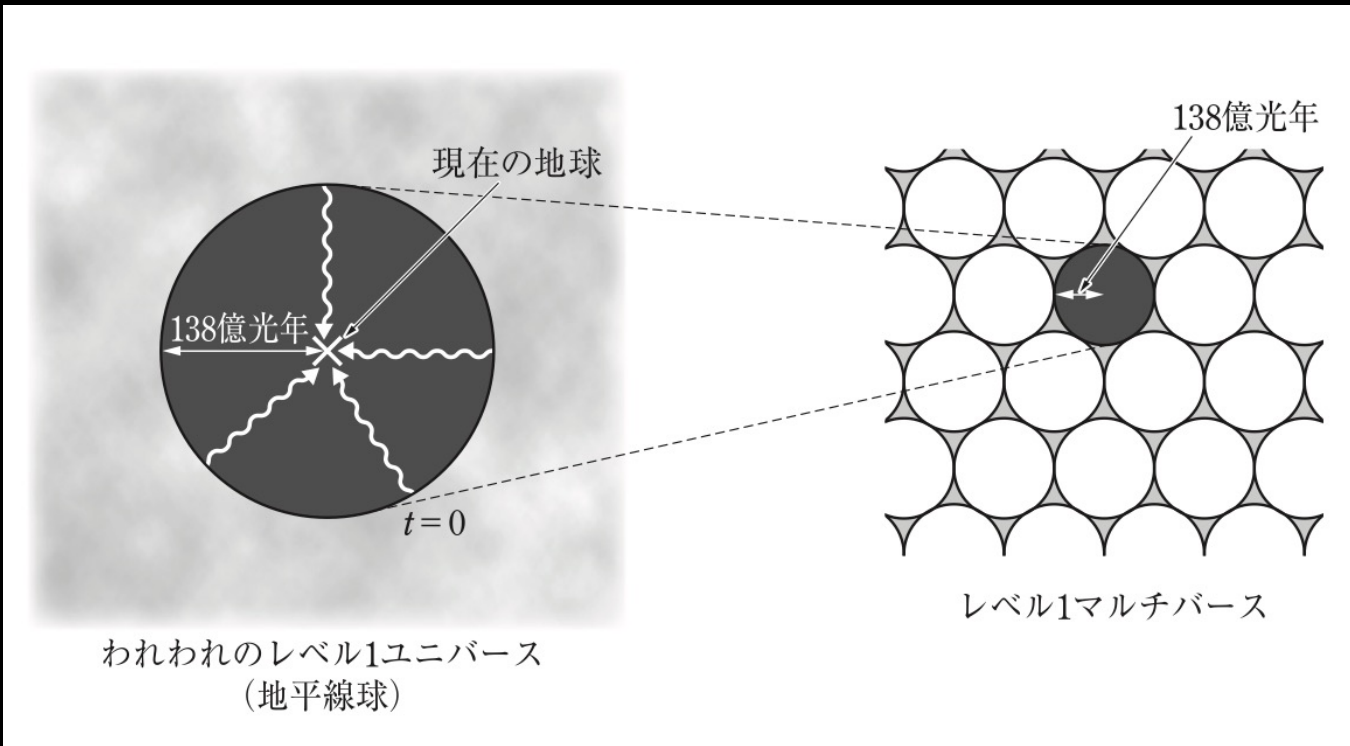
# レベル1 マルチバース

- 我々の地平線球の外側にも、同じ地平線球（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
- 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
- 同じレベル1マルチバース内のレベル1ユニバースは、初期条件が異なるものの物理法則は同じ



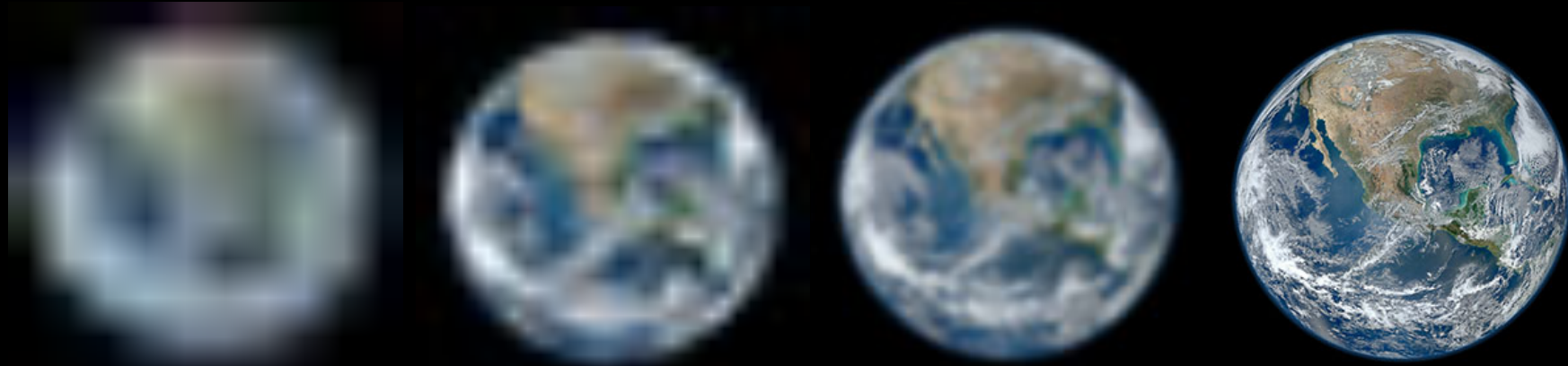


# レベル1マルチバースは間違いなく実在する



- 単に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、一応分類としておいた程度の意味
- 
- 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

# 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？—



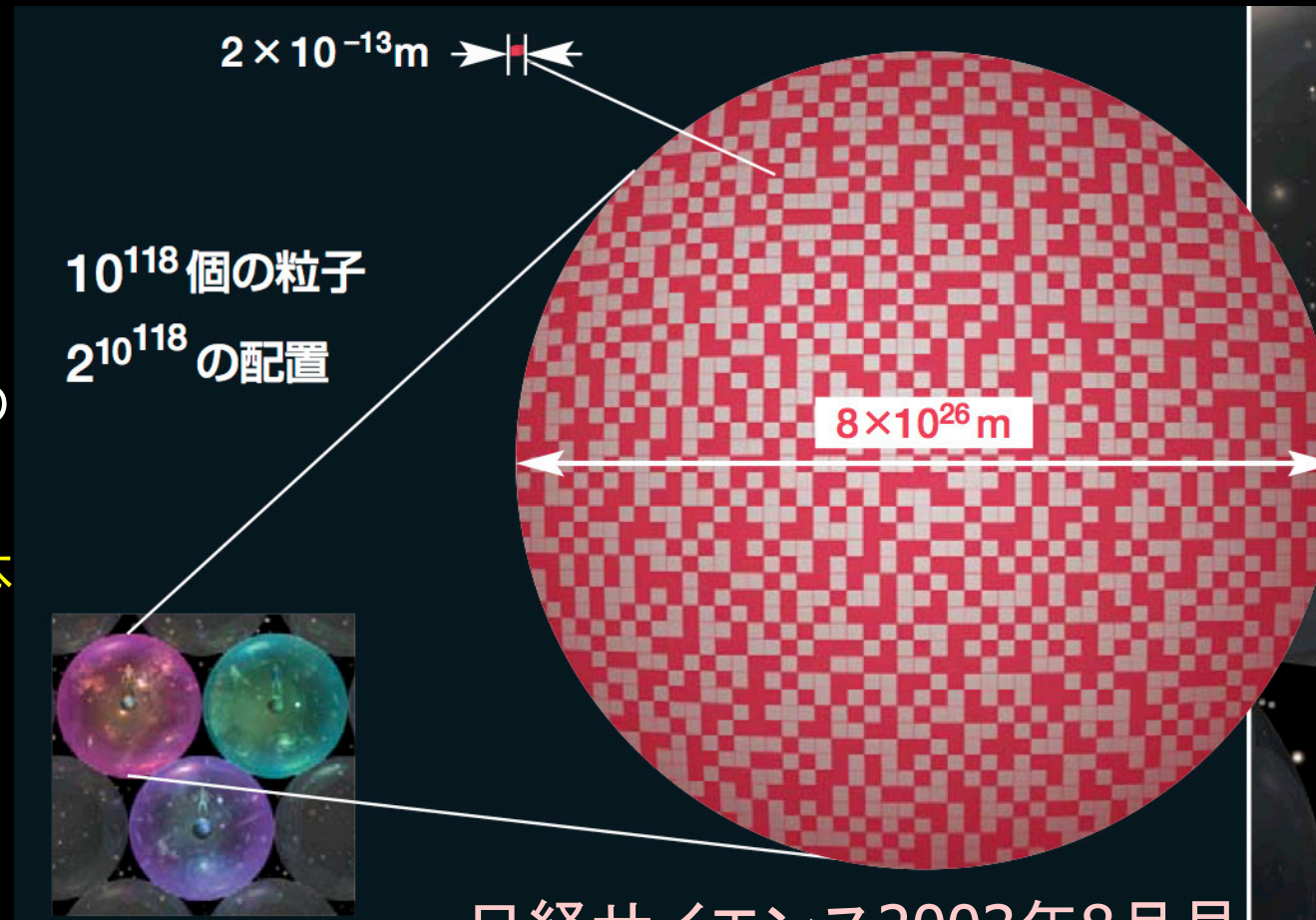
- この作業を繰り返していくと、いずれは近似ではなく本物（と区別できないクローン宇宙）に到達する？
  - すべての物質は有限個の素粒子からなる（量子論を無視する）
  - 時間と空間も連続ではなく離散的かも？
  - とすれば宇宙はデジタル情報に帰着するので、3Dプリンターで宇宙を創り続けると、いずれクローン宇宙が出現するはず？



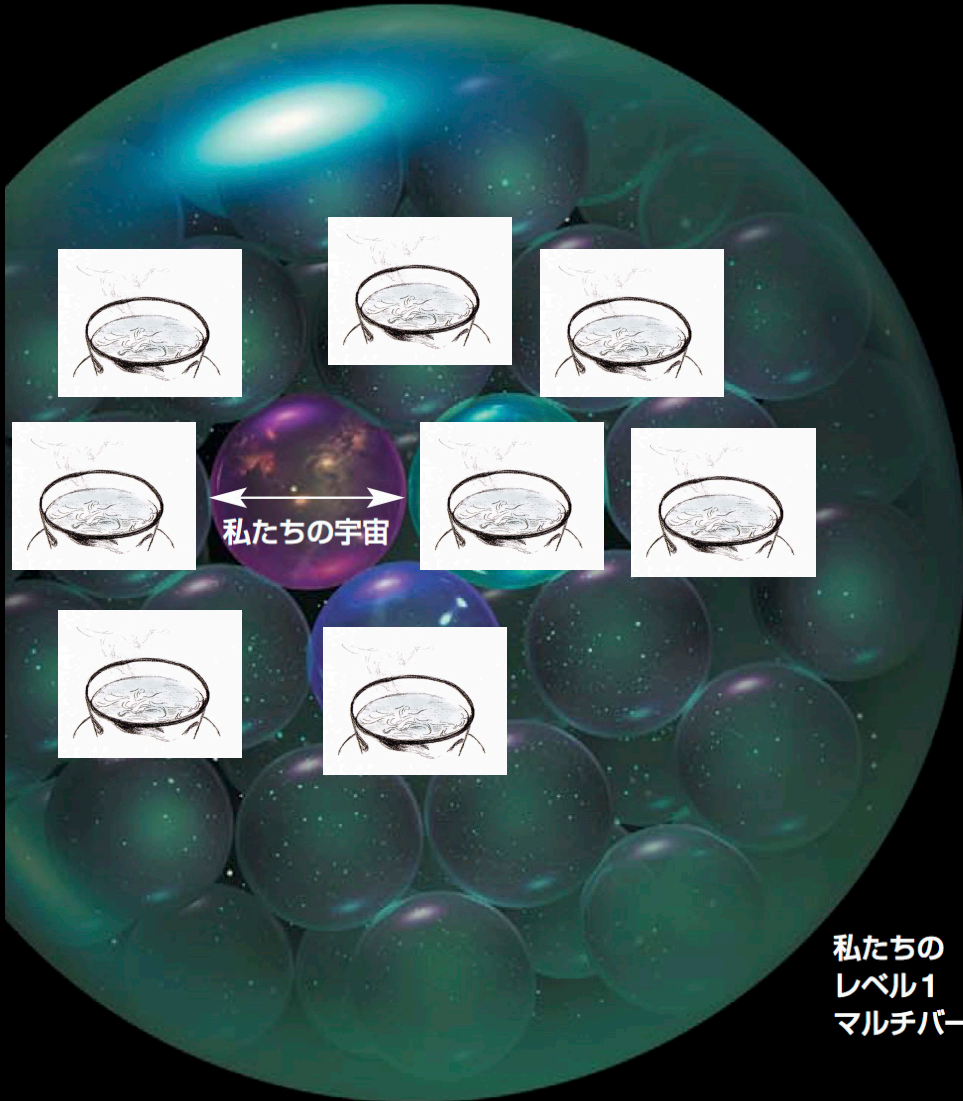
# 我々の地平線球が持つ「古典的」情報量

- 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通りに対応して、可能な配置数は2の $10^{123}$ 乗通り\*しか\*ない（われわれの宇宙はその中の一例）
- 2の $10^{123}$ 乗個以上の地平線球を含む体積の宇宙の中には、全く同じものが繰り返し出現しているはず
- でも量子論を無視したこのような古典的考察がどこまで正しいかは不明



# レベル2 マルチバース

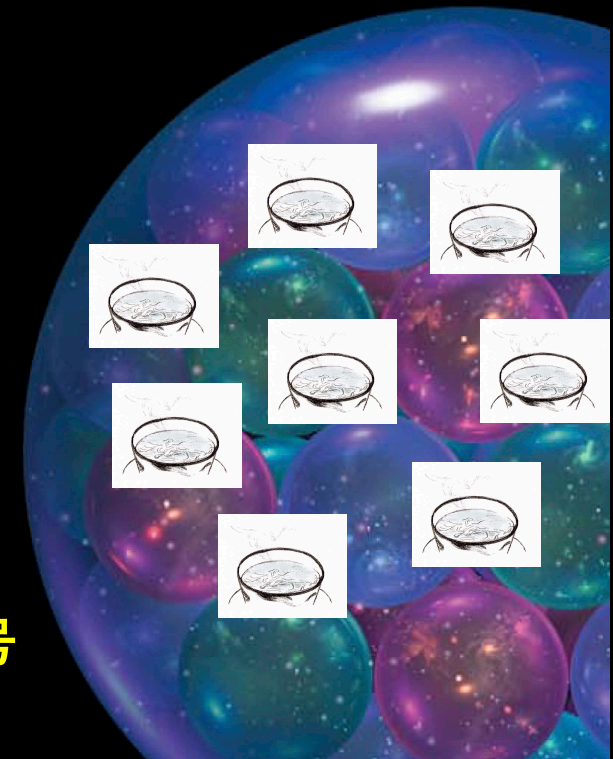


私たちの  
レベル1  
マルチバース



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

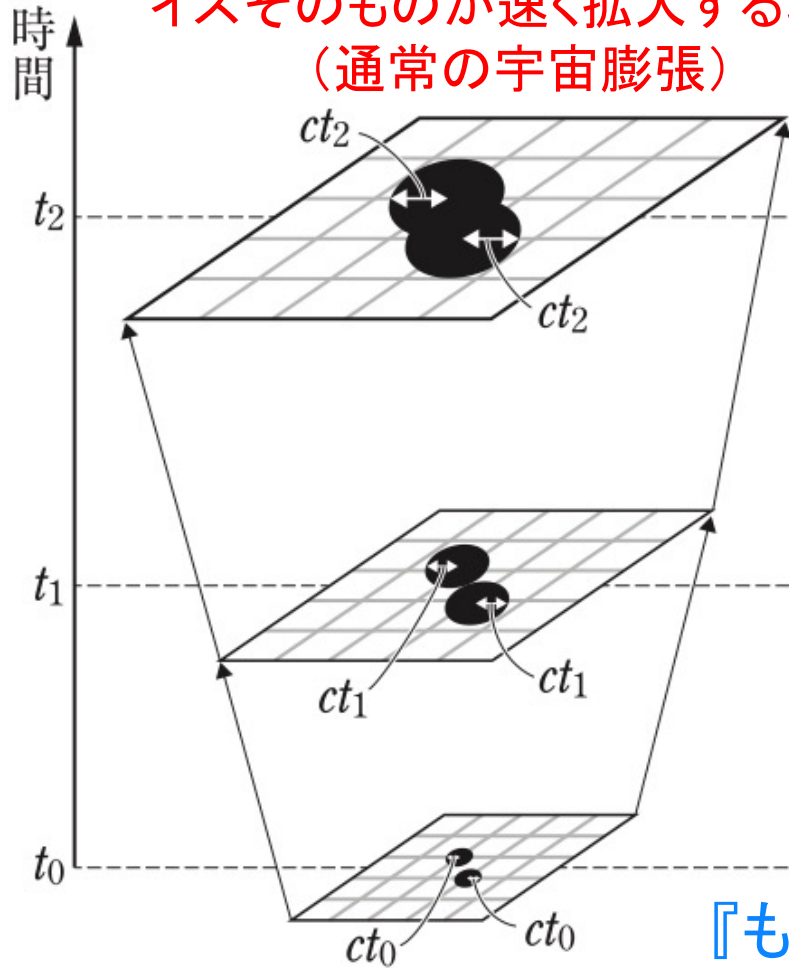


# レベル2マルチバース＝因果関係を持ちえない 異なるレベル1マルチバースの集合

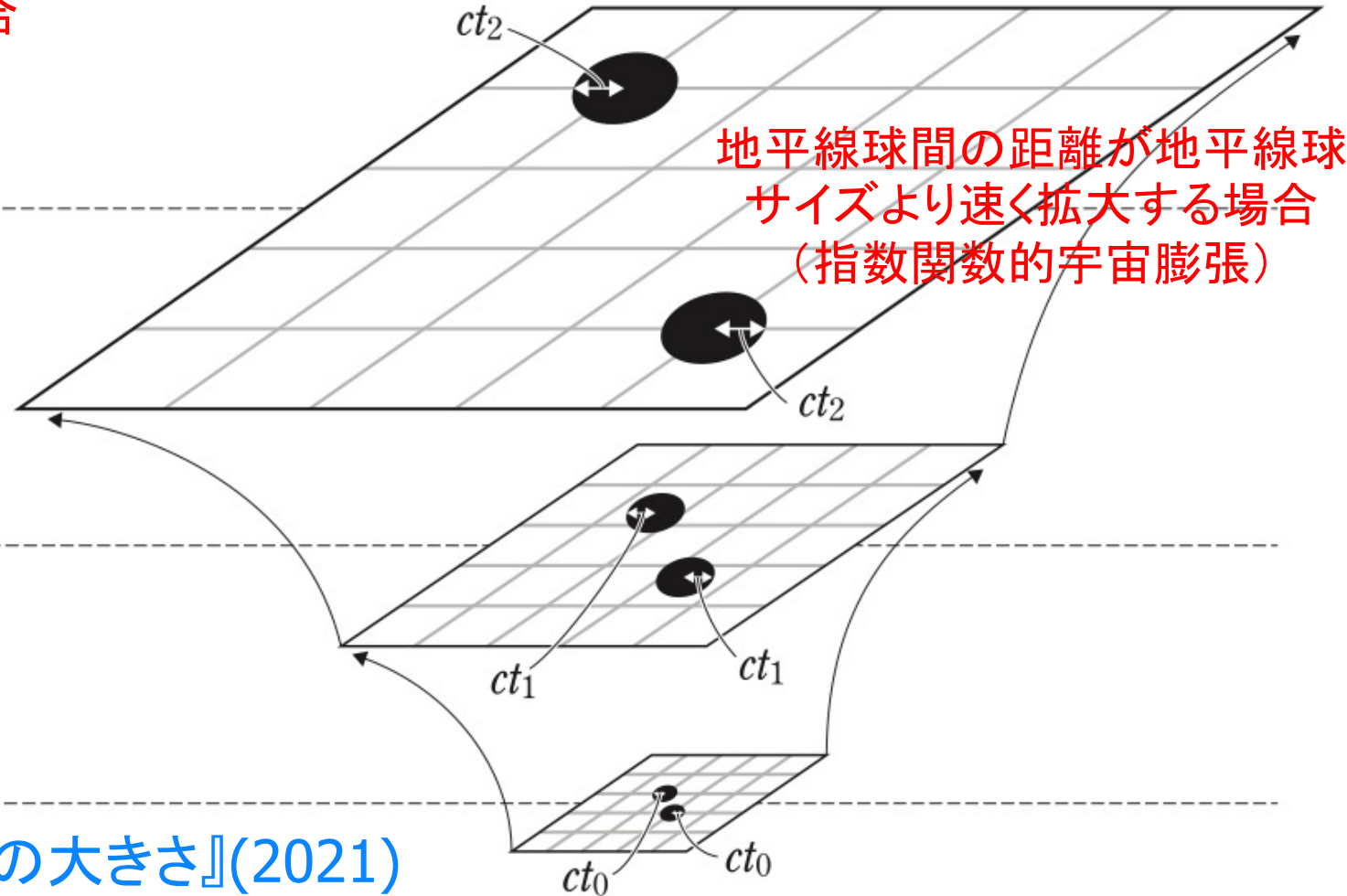
- 同じレベル1マルチバースに属する異なるレベル1ユニバース同士は同じ時空と物理法則を共有している
  - 現在は因果関係を持たないのだが、時間が経てばやがて互いの存在を確認できるようになる
- これに対して、レベル2マルチバースを構成する異なるレベル1マルチバース同士は、仮に同じ時空上に存在していようと、互いに因果関係を持たない(さらには異なる空間次元に存在しているかも)ので、互いの存在は決して確認できない
  - 現在の宇宙は膨張が加速しているため、時間が無限大経過しても地平線の大きさが増加せず、外側と因果的に孤立した領域を形成する可能性が高い

# 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)

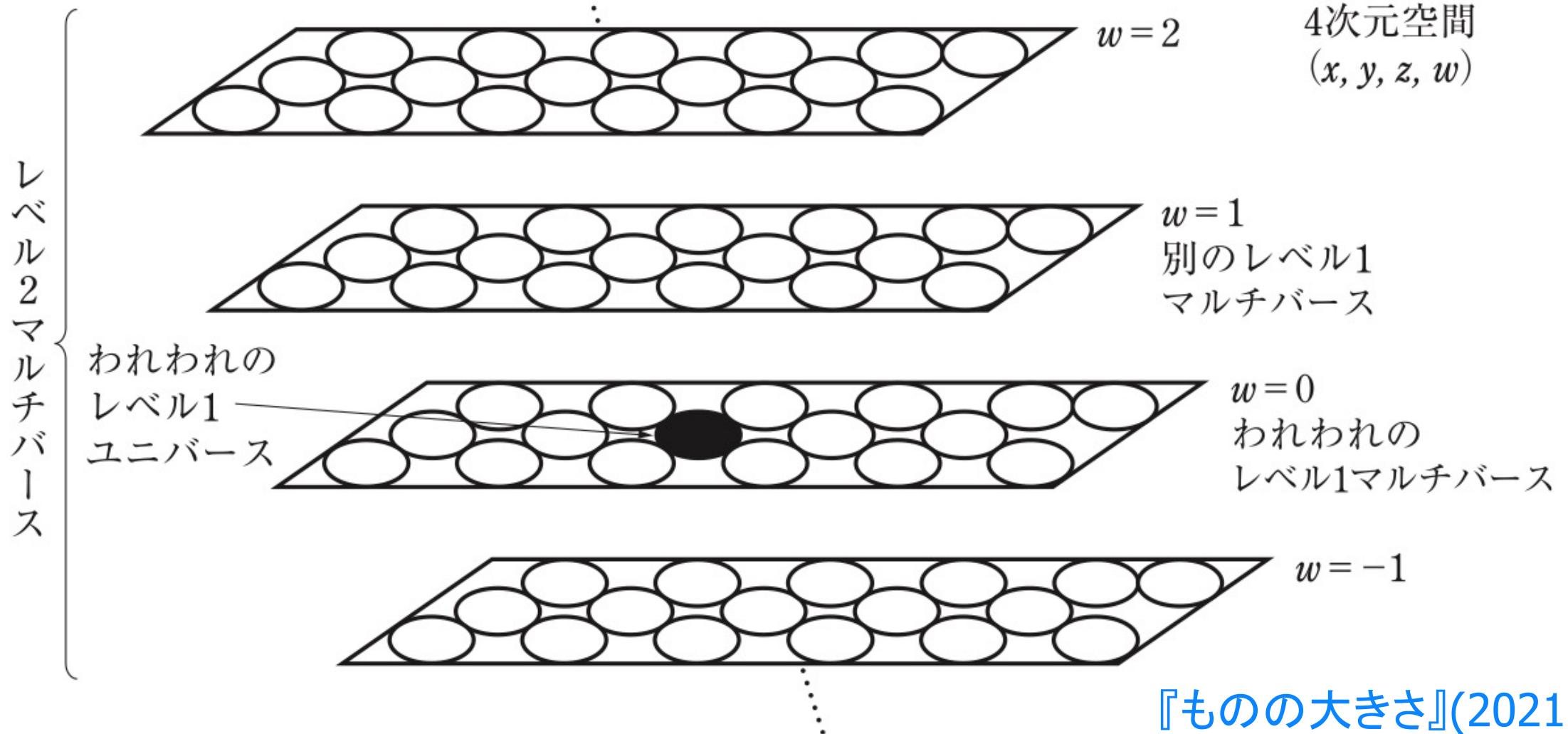


『ものの大きさ』(2021)



# 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



# 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

- 異なる数学的論理体系が複数あるならば、それに対応して異なる物理法則を持つ世界(レベル4マルチバース)が実在しているのではないか
- とすればこの宇宙の法則が数学で記述できるのは当たり前

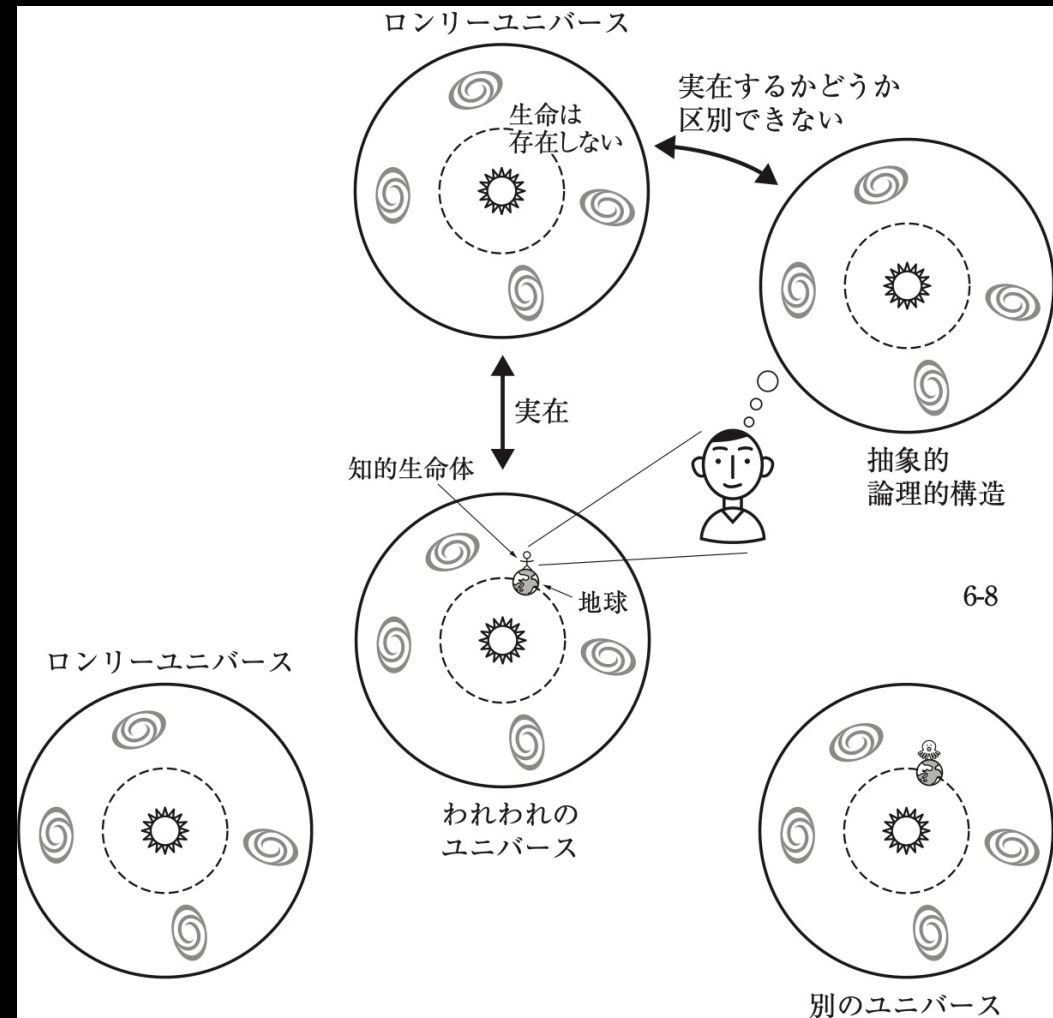
## ■ 世界 = 数学的構造 = 物理的実体 = 宇宙

- 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
- (標準的考え) 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
- (危ない考え) たまたま我々の宇宙で採用されていないだけで、それを採用する別の宇宙がどこかに実在していることを意味しているのでは？



# 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(知的生命)が必要＝人間原理



# Q3: 並行宇宙は実在するか

- われわれが観測できる空間領域をはるかに超えて宇宙は広がっている。その体積が無限大で、われわれが観測できる領域の宇宙が有限個の自由度で記述され尽くされると仮定すれば、それと瓜二つの並行宇宙(そこに存在する皆さんの記憶や意識まで含めて)がどこかに存在する可能性が高い
- 上述の議論を念頭に、以下から自分の意見にもっとも近いものを選び  
A) 無限体積とはあくまで理想化された数学的概念でしかなく現実の宇宙にはあり得ないので、並行宇宙は実在しない  
B) 素粒子で構成されている物質については成り立つとしても、この自分の意識までもが有限個の情報で完全に記述できるとは思えないので、並行宇宙は実在しない  
C) 原理的に検証不可能だとしても、少なくとも現時点での科学と矛盾しないという意味では並行宇宙は科学的にも納得できる仮説であり、それが実在する可能性は高い



# 4 茶わんの中も外も 世界は法則にしたがっている





# 謎解きはジュケンの後で

## 『東大ing 2014』（東京大学新聞社）

- 決して面白いとは言いがたい高校物理は通過儀礼でしかない。大学でなぜそうなるのかを学べばすっきりする。さらにこの世界が少数の単純な摂理に支配されているという驚くべき事実に感動すらしてしまうかも
- その先には膨大な謎とさらなる摂理の探求の地平が広がっている。時間がかかろうと、科学を学ぶことで初めて解明できる無数の謎が残っている。それにチャレンジする人生も悪くない

### 物理



須藤 靖 教授  
(理学系研究科)

30年以上も前のことなのであまり良く覚えていないのだが、高校の物理を面白いと思った記憶がない。一方で、数学の難しい問題を考えている時間は楽しくて仕方なかったし、美しい解き方を思いつくとある種の感動を抱いたりもした。なぜだろう。

高校数学はある意味では自己完結しているのに対して、高校物理はそれだけでは結局理解できない事実が多すぎるからそう考えればつじつまがあいそうだ。この世界の物質すべては少数の素粒子

に還元できる。それらを支配する相互作用と対称性が、原理的にはこの世界の振る舞いを決めている。一方で、分割するだけでは到底説明できない多体现象がこの世界の多様性を保証する。

ミクロな世界とマクロな世界は何によつて区別されるのか、真空と何か、宇宙には始まりはあるか、宇宙は見えている物質だけでできているのか、この空間は本当に3次元なのか、物理「定数」は時間変化しない定数なのか。

高校物理の先にこれほど魅力的で、哲学的とすら形容すべき問題が待ち構えており、しかもそれらが先人達による科学の蓄積によつて解き明かされつつあることなど、ほとんど想像不可能ではあるまいか。

どう考えても面白いとは思いがたい斜面上の物体の運動、高校物理の範囲では意味が分かるはずのない交流回路のリアクタンス、数学で習っていないがなぜか

謎解きはジュケンの後で



# 科学で覚えておくべきたった一つの結論

- 物理学者リチャード・ファインマンは、「この科学文明が滅亡するとした場合、次の世代に伝えたいたった一つの知識は何か」という問いに対して、「**すべての物質は原子からできていること**」だと答えたと言われている
  - これは「世界は粒でできている」、「この世界の多様性は少数の基本構成要素の組み合わせで説明尽くされる」と言い換えられる
- 私なら「**この世界が（数学で記述された）物理法則に支配されていること**」と答えたい
  - どの問題に対してどの公式（物理法則）を用いるべきかなどは些細なこと。**科学（法則）を用いれば原理的には世界を理解できる**という経験事実以上に驚くべき発見はないのでは？

# 「その」世界の先を探る = 「学」 + 「問」

## 学びて問い続けるべき理由

- 幸せで楽しい人生を送るため！
  - 有名な会社に入り、安定した収入を得るためではない
  - 人より優れている必要はない（そもそも他人との比較は無意味）
  - 自分がうちこめること、興味を持てるものを見つけて、社会に貢献できればそれ以上の幸せはない
  - 自分以外にできないこと(=生きる真の意味)をじっくり探そう
- 学び知る事で見えなかったものが見えてくる
  - 自分の世界、人生の可能性が広がる
  - 自分が嫌な事を無理やり強制されてやる必要はない
  - 何もせず無駄に時間を過ごしているだけでは、せっかく生まれてきたのにもったいない



科学絵本

# 茶わんの湯

文 寺田寅彦

解説 高木隆司

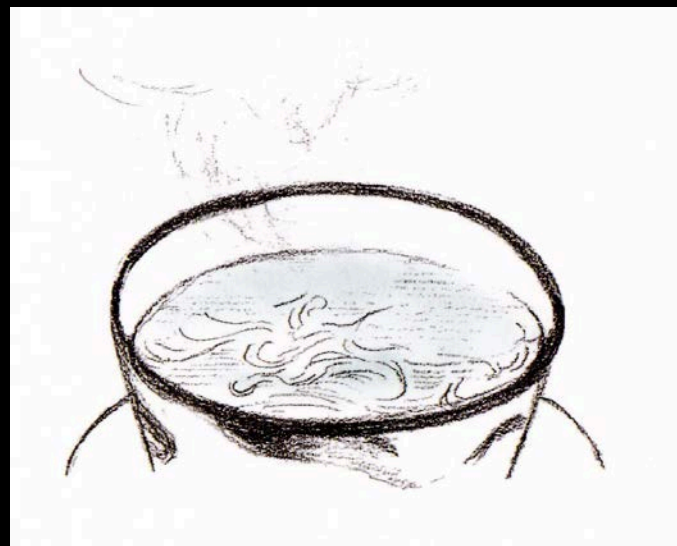
絵 高橋昌子

川島禎子

## 一杯の茶わんの湯に見る全宇宙の法則

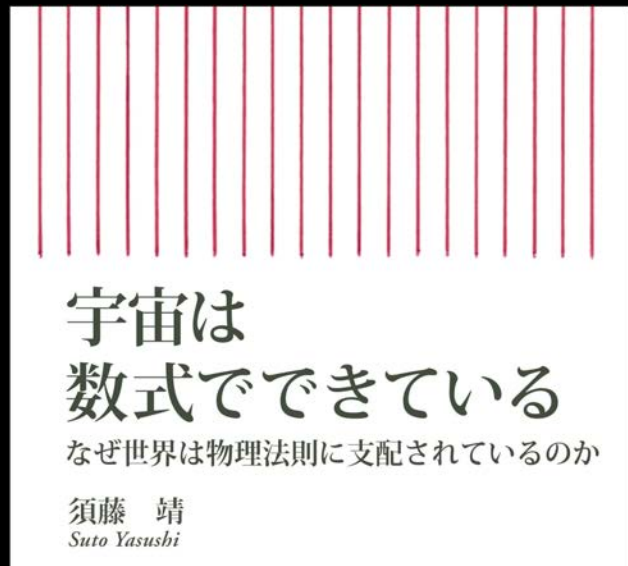
鈴木三重吉が創刊した児童文学雑誌『赤い鳥』。そこから生まれた寺田寅彦の名作「茶碗の湯」。科学と文学が渾然一体となって光る、自然の不思議をみつめる深い眼差し。

窮理舎 定価（本体2,000円+税）

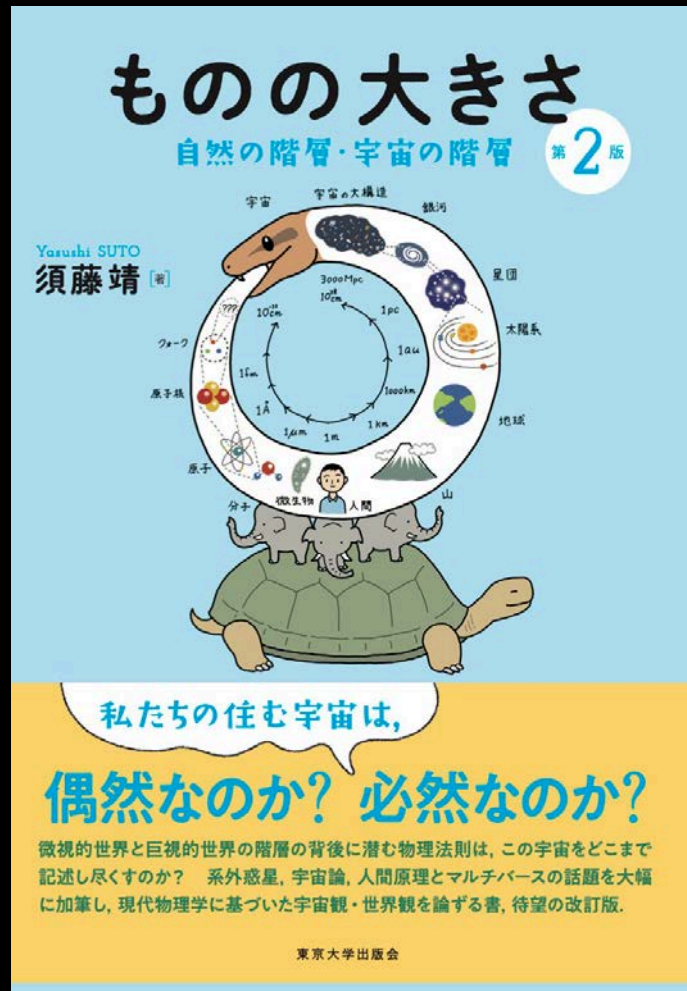




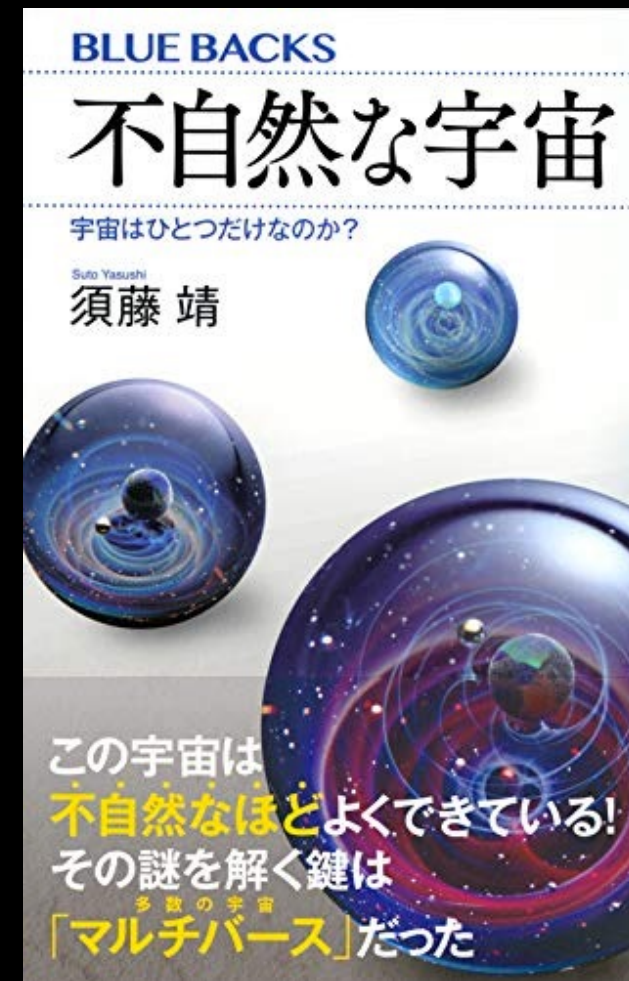
# 今回の講義の内容に関する主な参考文献



朝日新書 2022年



東京大学出版会  
初版 2006年 第2版 2021年



講談社ブルーバックス 2019年



# 2022年12月15日 第10回講義の課題

- 以下から一つ選び、理由を付して自分の意見を簡単に述べよ
  - A) 自然現象（ただしここでは生命現象は除外する）は、初期条件（ゆらぎ）と物理法則によって完全に説明し尽くされるという物理屋的世界観に納得できるか、あるいは納得できないか
  - B) A)をさらに一般化すると、人間の「心」（意識、思考、意志）もまた、人間を構成する物質とその振る舞いを支配する物理法則だけでは説明できるという考えに至る。一方で、これに同意しない人々が多い。どちらの立場により共感するか
  - C) レベル1 マルチバース的並行宇宙が実在するという考えに納得できるか、あるいは納得できないか
  - D) レベル4 マルチバース的に、現実が存在する宇宙と概念的な世界構造とが区別できないとする見方に納得できるか、あるいは納得できないか