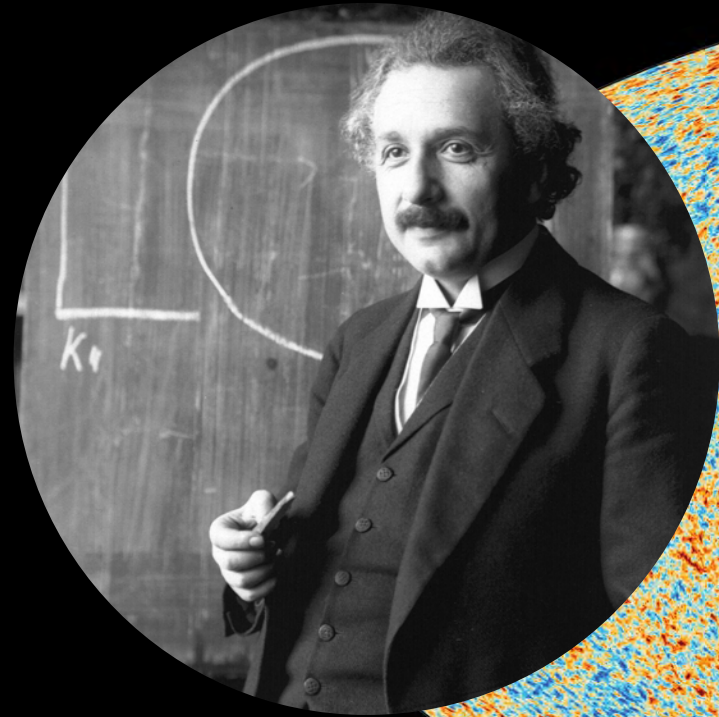


# 宇宙が数式にしたがっている理由 (1)



$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

早稲田大学オープンカレッジ 八丁堀校 @ 2023年3月4日 13:00-16:30

# 講義概要

- この宇宙は物理法則に支配されています。さらに、それらは数学を用いて美しく(簡潔に)記述できるようです。これは驚くべき事実なのでしょうか、あるいは、この世界のなかから都合の良い一部の現象しか見ようとしなない物理学者の無知あるいは思い上がりすぎないのでしょうか。
- 実は私は「宇宙が数学に支配されていると信じる派」です。この講座では、なぜ私がそのような信念を持つに至ったのかを、古代ギリシャのプトレマイオス的世界観からアインシュタインの一般相対論に至る科学史、そして現代宇宙論の最新の成果を紹介しながら説明したいと思います。宇宙が、そして世界が数学で記述される不思議さを共有してもらおうことを目指します。

# 理学の本棚

## 「宇宙は数式でできている」

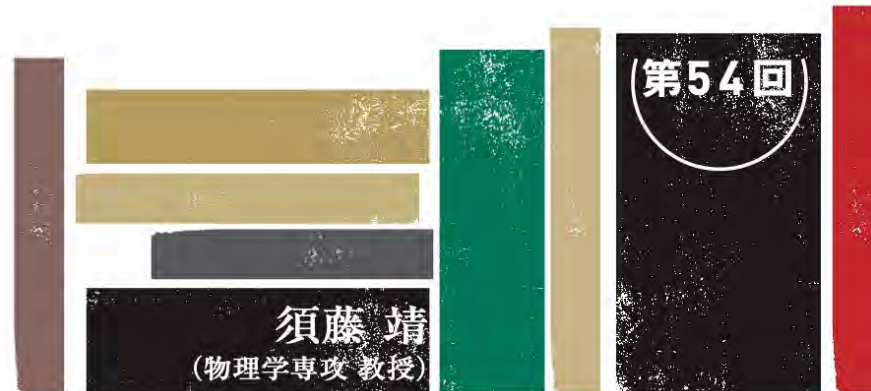
宇宙論で博士号を取得後、キャリアを変更し裁判官となったかつての学生がいる。彼に依頼され、4年前に全国の裁判官の方々が集まる研修会で「lawの番人」というタイトルで、こんな話をした。

義務教育では「人々はlaw（法律）を遵守しなくてはならない」と学ぶのに、実際には守らない人がある。だからこそ、何が違法なのかを判断する法律の番人=裁判官は不可欠だ。これに対して「世界はlaw（法則）にしたがっている」という事実を学校で教えられた記憶はないが、法則に矛盾する「違法」な現象は決して起きない。つまり、物理学者は法則の番人ではなく、法則とは何かを日々考える商売である。

我ながら、裁判官の方々を前に、よくもまあこんな意味不明の内容で2時間も喋ったものだ。しかし、物理屋にとっては自明の「世界は法則にしたがっている」は、必ずしも世間一般には共有されていない。「社会は必ずしも法律にしたがっていない」からだろうか。一方で、シュレーディンガー

方程式やアインシュタイン方程式を解いて得られた数学的解は、この世界で必ず実現していると信じて疑ったことがない純朴過ぎる学生も考えものかもしれない。

やや盛り気味の「宇宙は数式でできている」というタイトルの本書は、この両者に向けて、宇宙が法則にしたがっているのみならず、物理法則は微分方程式で書き下してしまう（らしい）という非自明な不思議さを布教すべく書いてみた。読んだ上で入信しない人も、決して不幸になる心配はない。安心して自分の頭で判断する材料として活用いただければ幸いである。



須藤 靖 著  
「宇宙は数式でできている」  
朝日新書 (2022年)  
ISBN 978-4022951601

# 今回と次回の講義内容案

## ■ 3月4日：プトレマイオスからアインシュタインへ

- 古代ギリシャの世界観から、コペルニクス、ケプラー、ニュートン、アインシュタインを経て、現代の宇宙観が形成された歴史を概観します。その過程で、宇宙が法則にしたがっている、さらにはその法則が数学(微分方程式)で記述できる、という2つの驚くべき事実が本質的な役割を果たしていることを紹介します。

## ■ 3月11日：物理法則と数学と宇宙の関係

- 宇宙がなぜ物理法則にしたがっているのか。物理法則はなぜ数式で記述できるのか。これらについて正解は知られていません。それどころか、正解があるかどうかもわかりません。しかし、その謎の鍵となるかもしれないのは、そもそもなぜ宇宙が存在するのか、というさらに上位の難問です。ここでは、「我々の宇宙」以外にも宇宙が存在するというマルチバース世界観から、物理法則と数学と宇宙の関係を考えてみます。

今回（2023年3月4日）

# 「プトレマイオスからアインシュタインへ」

- 1 太陽系の構造と世界観の変遷
- 2 法則とはなにか
- 3 法則はどこに書かれているのか
- 4 宇宙に刻み込まれたビッグバンの化石  
～宇宙マイクロ波背景輻射～
- 5 世界は法則にしたがっている
- 6 今回のまとめと次回のテーマ

# 1 太陽系の構造と世界観の変遷

# 遠くの世界はどうなっているのだろうか？

JWST First Deep Field  
SMACS 0723

古代インド



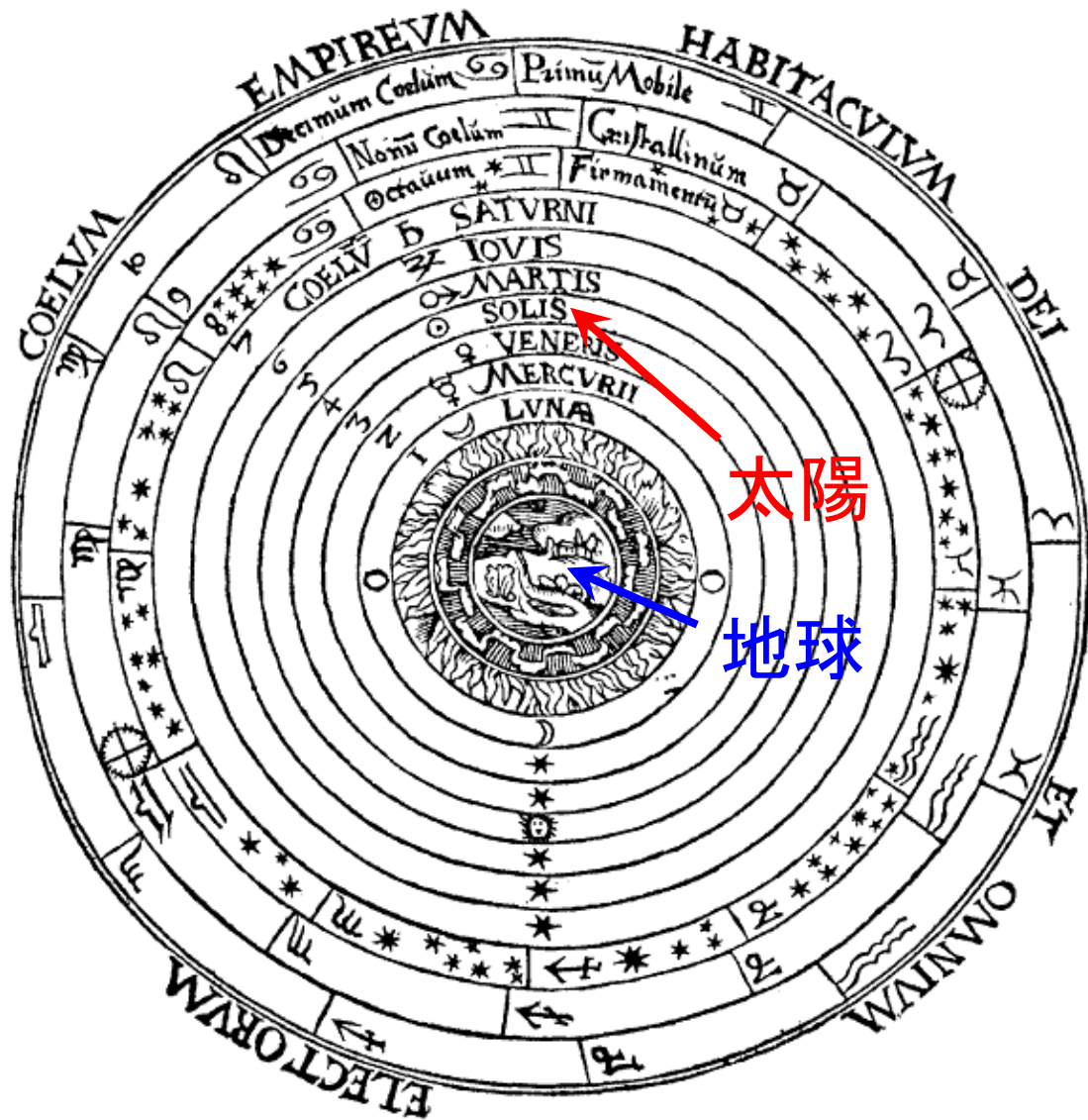
古代中国



古代エジプト

<https://www.nasa.gov/image-feature/goddard/2022/nasa-s-webb-delivers-deepest-infrared-image-of-universe-yet>

# 古代ギリシャの世界観



## ■ プトレマイオス 「アルmagest」

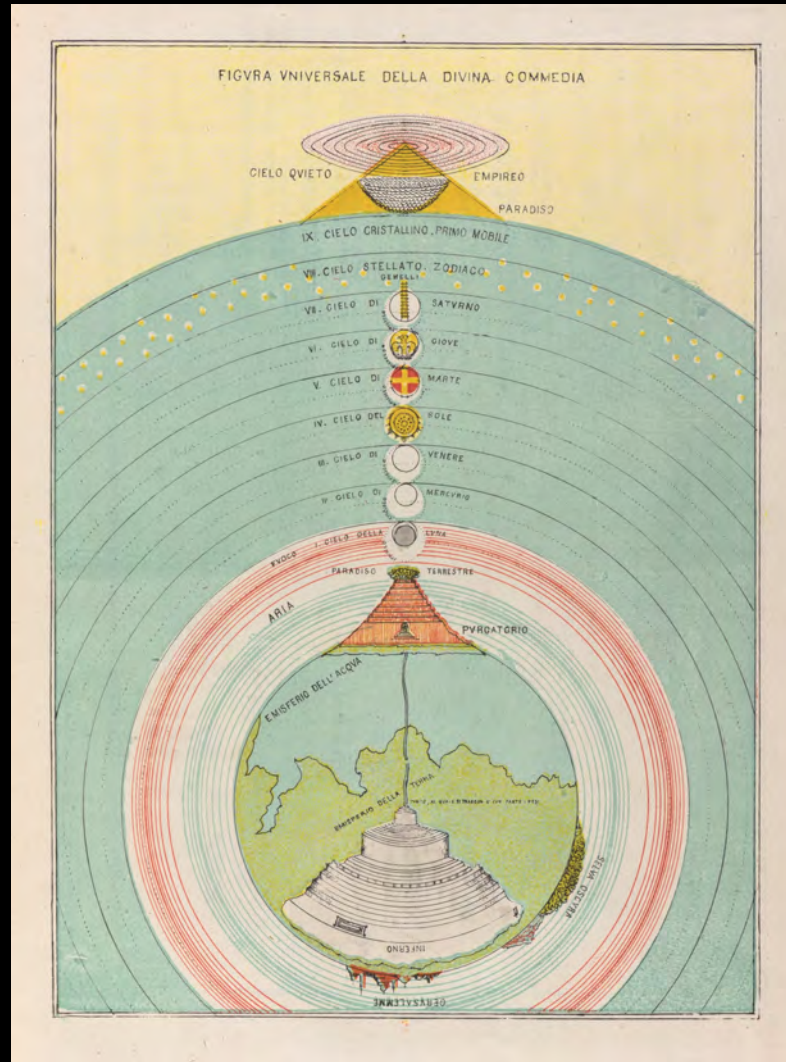
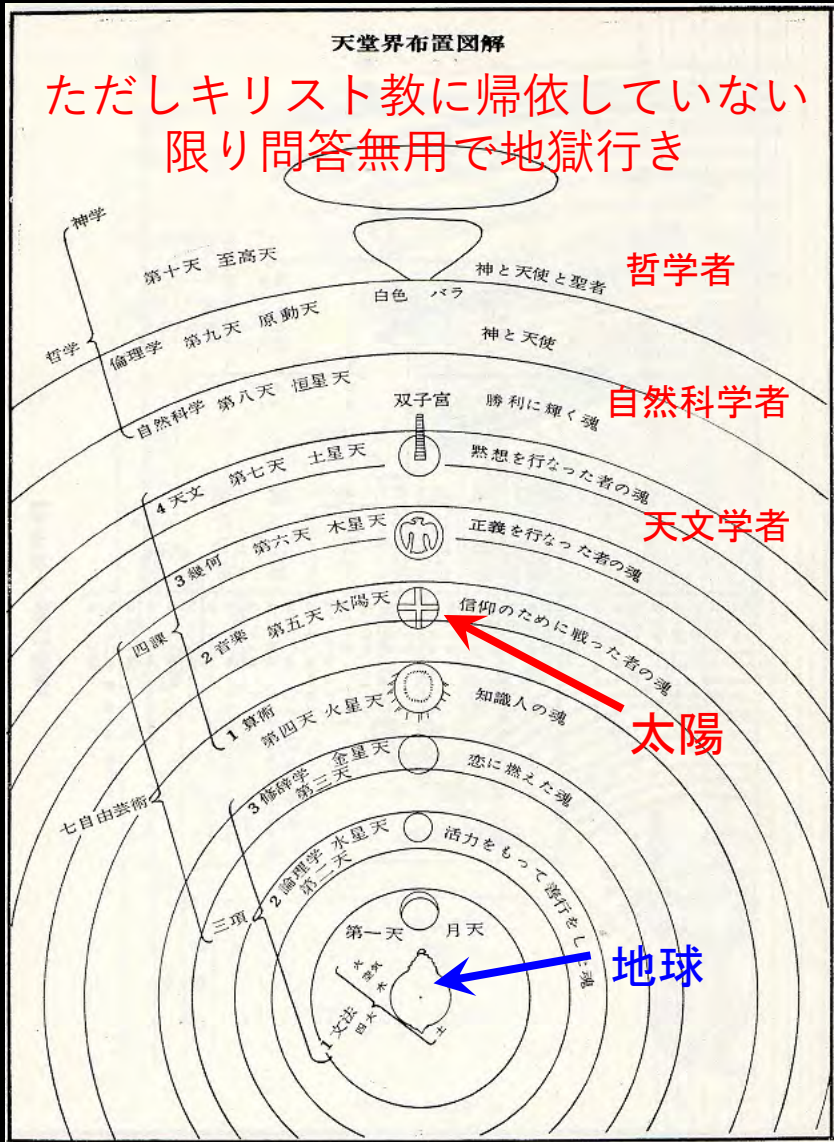
(紀元150年頃)

- 古代ギリシャ天文学の集大成
- アリストテレス的宇宙観
- 天動説
- その後10世紀以上にわたって大きな影響を与え続けた

ペトルス・アピアヌス Cosmographia (1539年)  
Wikipediaより



# ダンテ「神曲」(1304-1321)



宇宙(≡太陽系)の構造  
と世界の体系(摂理)と  
が直接対応すると解釈  
されていた  
↓  
宇宙≡法則  
天の世界=地の世界

La materia della Divina commedia di Dante Alighieri, dichiarata in VI tavole, by Michelangelo Caetani (1804-1882) from Wikipedia

# 旧約聖書 創世記 天地創造

- 初めに神は天地を創造された
- 地は混沌であって闇が深淵の面にあり神の霊が水の面を動いていた
- 神は言われた  
「光あれ」 (*let there be light*)  
こうして光があった

カリフォルニア大学  
バークレー校のロゴ

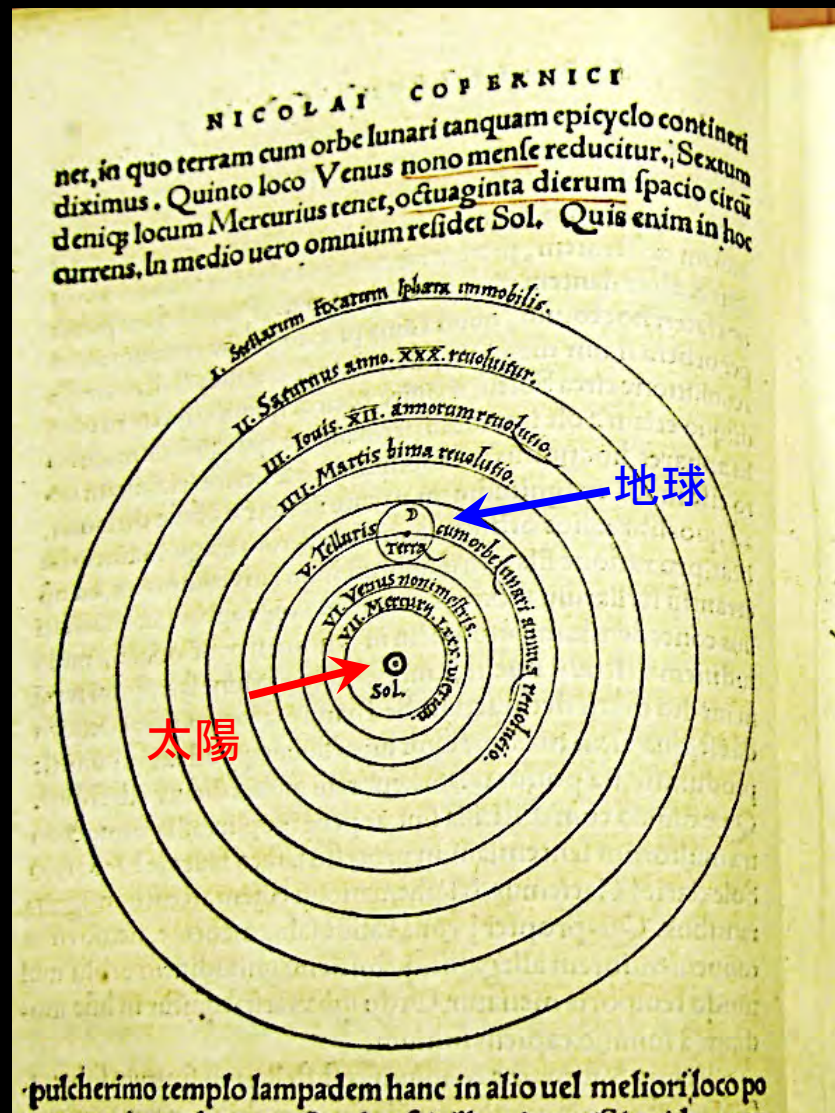


# アナクシマンドロス（紀元前610年頃 - 紀元前546年）



- 極めて先駆的な古代ギリシャの哲学者
  - 天候は神の意志ではなく自然現象で、雨水はもともとは海や川の水である
  - 大地は無限の平面ではなく、虚空に浮遊する有限な大きさの物体だ
  - あらゆる動物は原初の水に起源をもつ。最初の動物は魚で、やがて陸にあがり適応し人間となった
  - 自然を形づくる事物の多様性はすべて、目に見えないなにかを起源とする

# ニコラウス・コペルニクス (1473年2月19日 - 1543年5月24日)



天球の回転について (1543)



# コペルニクス生誕550年国際会議 @2023年2月19日 - 21日



# コペルニクス生誕地 トルン@ポーランド



# コペルニクスの生家@トルン



# コペルニクスの書斎



TV VRODZIŁ SIĘ  
MIKOŁAJ KOPERNIK  
19 LUTEGO 1473  
WSTRZYMAŁ SŁOŃCE RUSZYŁ ZIEMIĘ  
POLSKIE WYDAŁO GO PLEMIE  
1923 R.



コペルニクス生誕550年記念式典



# コペルニクスのお墓 @フロムボルク、ポーランド



## 2 法則とはなにか

# 経験 (⇒ 占い) ⇒ 法則

- 太陽は東から昇り西へ沈む
  - 毎年夏から秋にかけて台風が来る
  - 一年ごとに四季が繰り返す
  - 日食が起きる
  - 夕焼けの翌日は晴れる
- 
- これらの例はいずれも経験にもとづいて予想されるもの。その中には、ある程度科学的に説明できるものもあるし、厳密に計算・予言できるものもある。現代の科学者が過去に行けば、占い師として大儲けできることも可能。

# 経験から（物理）法則へ

- **法則A:** 季節はほぼ一年で周期的に変化
- **法則B:** 天の世界は地の世界を中心として1年周期で変化
- **法則C:** 地球は太陽（天）のまわりを1年周期で公転
- **法則D:** 惑星は太陽を焦点とする楕円軌道を描く
  - ケプラーの法則
- **法則E:** 距離 $r$ だけ離れた2つの質量 $m$ と $M$ の間には  $-G mM/r^2$  という万有引力が働く
  - ニュートンの法則
- **法則F:** 質量をもつ物体は周りの時空を歪める
  - 一般相対論

# 物理法則を記述する第一言語(母国語)は数学

## 1. ケプラーの第一法則

(左の数式の日本語「訳」)

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f}$$

惑星は太陽を焦点とし、軌道長半径a、離心率e、の楕円軌道を描く

## 2. ケプラーの第三法則

$$GM = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 a^3$$

太陽の周りを公転する惑星の軌道長半径aの3乗と、円周率の2倍を公転周期Tで割ったものの2乗との積は、太陽と惑星の質量の和にニュートンの重力定数をかけたものに等しい

## 3. ニュートンの重力の逆二乗法則

$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = -\frac{Gm}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

質量mの物体から距離rに位置する別の物体は、引力を受けて、質量mの物体の向きに、rの2乗に逆比例しGmに比例する加速度を得る

## 4. アインシュタイン方程式

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

「物体が存在すると時空は歪む」という抄訳(超訳?)でない限り、日本語に翻訳すると数ページを超える長さになり、結局意味が理解できないだけだろう

数学を用いれば、4から3を、3から1と2を証明できる。右の日本語訳だけからでは証明は絶対不可能

# 経験から(物理)法則へ (1)

- **法則A: 太陽は毎日東から昇り西に沈む。夜空の星々の分布もほぼ一日周期で変化する**
  - これは誰でもすぐ気づく程度の経験事実
- **法則B: 四季は一年周期で繰り返す**
  - 数年間以上にわたり注意深く観察(記録)する必要があるものの、気づくのはさほど難しくない
- **法則C: 天の世界(太陽、星々)は我々の世界(地球)を中心として(一日と一年の周期性をもって)運動している(プトレマイオス)**
  - 天動説: 上述の経験を世界の振る舞いに帰着させた点で優れた解釈(仮説)
  - 生まれたときからずっと電車に乗ったままであれば、自分ではなく外の景色(世界)のほうに運動していると考えるのは自然だろう。実は動いているのは(自転、公転ともに)地球なのではと考えた人もいたが(例えば紀元前3世紀のサモスのアリストアルコス)、ほとんど無視された

# 経験から(物理)法則へ (2)

- 法則D: 地球は一日で自転し、太陽のまわりを1年で公転している  
(コペルニクス)
  - 地動説：天動説よりすっきりしているものの、複雑ではあるが完成した天動説に比べてより優れた仮説ではなかった
- 法則E: 地球のみならず惑星は太陽を焦点とする楕円軌道を描く  
(ケプラーの第1法則)
  - コペルニクスの地動説にしたがって、ティコ・ブラーエが裸眼で行った驚異的観測データから法則性を導いた
  - 微積分学が存在しなかった、幾何学的記述しかできなかった
  - しかしながら、今でも（今では）ブラーエほどの高精度の裸眼観測ができる天文学者はいないだろう
  - 第3法則：公転周期  $\propto$  (楕円の長半径)<sup>3/2</sup> は素晴らしい発見だが、あくまで経験則でしかなく、現在の物理学で呼ぶところの法則ではない



# 経験から(物理)法則へ (3)

## ■ 法則F: 重力の逆二乗則 (ニュートンの法則)

- ニュートンの運動方程式と組み合わせて解くと、ケプラーの法則を導くことができる

$$\vec{F} = -\frac{GmM}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{G(M+m)}}$$

- 重要なのはこの解の公式ではない
- この世界における物質の振る舞いは、微分方程式で表現される物理法則の数学的解として (近似的に?) 記述できる。これはどれほど強調してもし切れないほど驚くべき事実
- ニュートンは、このような世界の記述を可能とする微積分学を発見し、法則 (微分方程式) に基づく物理学的方法論を確立したと言ってよい

# 経験から(物理)法則へ(4)

- 法則G: 重力とは質量をもつ物体による時空の歪みの結果である  
(アインシュタインの一般相対論)

- アインシュタイン方程式と4次元時空の計量

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

- アインシュタインは、ニュートンの運動方程式がどんな座標系においても成り立つように一般化した結果、重力は空間の性質として導かれることを発見した(物理学の幾何学化)
- 彼のアイディアは、非ユークリッド幾何学を取り扱うリーマン幾何学として知られていた数学を用いて、具体的に書き下すことができた
- アインシュタイン方程式の数学的解として導かれたブラックホール、宇宙膨張、重力レンズ、重力波などはすべてその後信じがたい精度で確認された

# 宇宙に関する重要な発見の歴史年表

年	項目	
~150	「アルマゲスト」(天動説の集大成)	プトレマイオス
1543	「天球の回転について」(地動説)	コペルニクス
1609, 1619	ケプラーの法則	ケプラー
1665	重力の逆二乗則	ニュートン
1846	海王星	ルベリエ、アダムズ、ガレ
1916	一般相対論	アインシュタイン
1927	宇宙膨張	ルメートル、ハッブル
1946	ビッグバンモデル	ガモフ
1965	宇宙マイクロ波背景輻射	ペンジアス、ウィルソン
1978	連星中性子星	ハルス、テイラー
1989	宇宙マイクロ波背景輻射温度ゆらぎ	COBE
1995	太陽系外惑星	マイヨール、ケロー
2015	連星ブラックホールからの重力波	LIGO

### 3 法則はどこに書かれているのか

# 法律と法則の違い： 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、法律違反は珍しくないし、法律と照らし合わせて違反かどうか判定する人間（裁判官）も必要
- 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、どのような法則があるのかを探し続ける人間（科学者）も存在する
- とすれば、宇宙そのものが法則と同一なのでは？
  - 何を言っているのかわからないはずなので、以下、詳しく説明してみる

見えているものだけがすべてではない



*Mon dessin ne représentait pas un chapeau. Il représentait  
un serpent boa qui digérait un éléphant*

# 大切なものは目に見えない



*J'ai alors dessiné  
l'intérieur du serpent boa, afin que les grandes personnes puissent  
comprendre. Elles ont toujours besoin d'explications*



# ラングトンの蟻

- 極めて単純な決定論的規則でありながら、予想不可能で複雑なパターンが生まれる
  - 検索するとネット上にいろいろな例が紹介されている



Step: 199

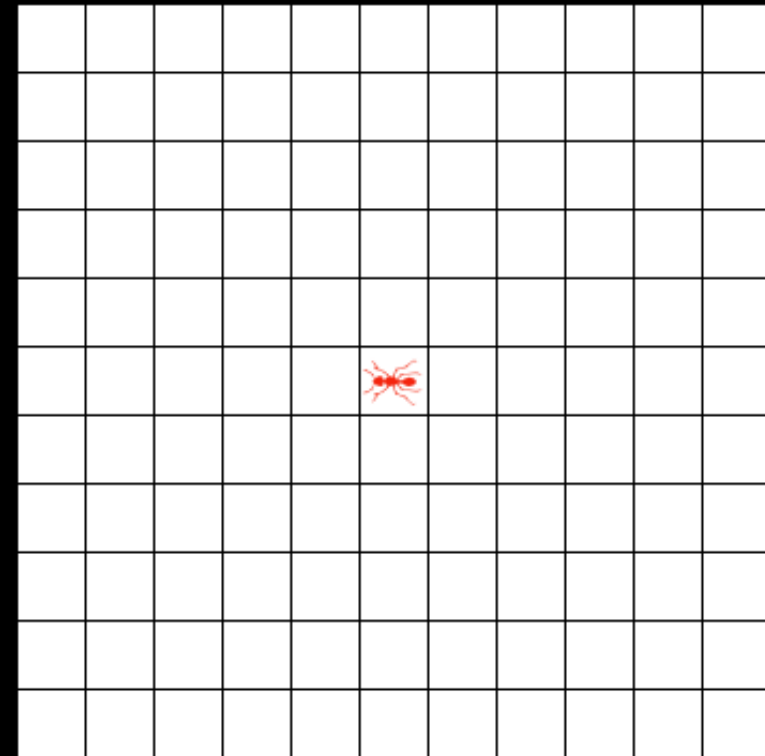
ウィキペディアからダウンロードしたアニメーション



# 複雑な世界に隠された単純な摂理

- 黒と白の2色からなる2次元タイルをアリが以下の**単純な法則**にしたがって動く
  - 黒いマスに入ると、90° 左に方向転換し、そのマスに色をつけ、1マス前進
  - 白いマスに入ると、90° 右に方向転換し、そのマスの色を黒にして、1マス前進
- 最初の黒と白のタイルの配置(**初期条件**)によって複雑なパターン(**世界**)が生まれる

我々の世界も同様に、背後の法則で完全に記述されているのでは？（メタバース、映画マトリクス）



ウィキペディアより

# 単純な法則から生まれる複雑な世界



Step: 199

ウィキペディアより

- 物理学における二つの大きな目標
  - 一見複雑そうな現象からその背後にある単純な法則を見抜く
  - 単純な法則からなぜこのような多様性が生まれるかを理解する
  - 対象が何であるかは問わない（物質のみならず、生命、社会現象、心理現象、脳などまさに森羅万象）

どんなに複雑そうに見える世界であっても、  
その本質を支配する原理（法則）は単純  
＝言われてみれば簡単という意味

**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**

# ニュートンの慣性の法則の起源

## ■ 質点は、力が作用しない限り静止または等速直線運動する

- この日本語だけでは、「そうですか、、、」としか答えようがないが、前半を数式で書き直すと、後半はその式を解いて導ける

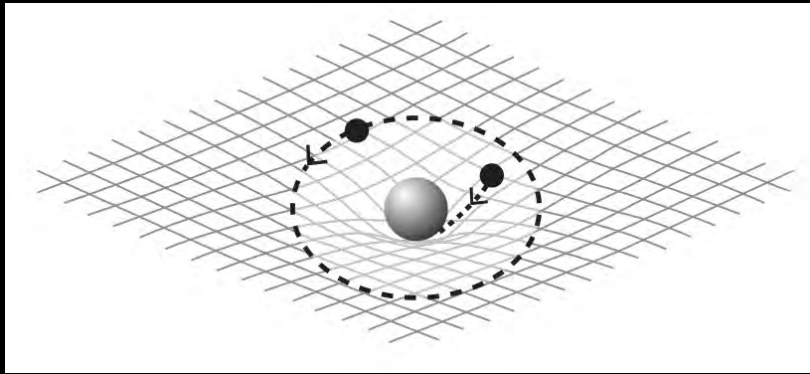
$$\frac{d^2\vec{r}}{dt^2} = 0 \quad \Rightarrow \quad \vec{r}(t) = \vec{v}_0 t + \vec{r}_0$$

- さらに重要なのは、これが**時空（宇宙）の幾何学的性質と深く結びついていること**
- 進行方向に対して左右上下に区別がない限り、どれかの方向に曲がる理由がない⇒そのまま直進するしかない。これは空間が曲がっていないことに対応する（ユークリッド幾何学）

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2$$

# では空間が曲がっていたら？

- 質点は時空の曲がりにしたがって運動する（≠等速直線運動）
  - これこそが一般相対論の本質



- 左図のように、原点にある重い物体が、その周りの空間を曲げているとする
- その周りの質点は、原点に引き寄せられる（ような気がする）

## ■ 物理法則の幾何学化 ⇒ 法則は時空に刻み込まれている！

- 上で述べた日本語を数式で表現すると、重力の逆二乗則を導くことができる
- ニュートン理論での「仮定」 一般相対論による定式化

$$ds^2 = -dt^2 + dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$\frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = -\frac{Gm}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

$$ds^2 = -(1 - 2Gm/r)dt^2 + \frac{dr^2}{1 - 2Gm/r} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

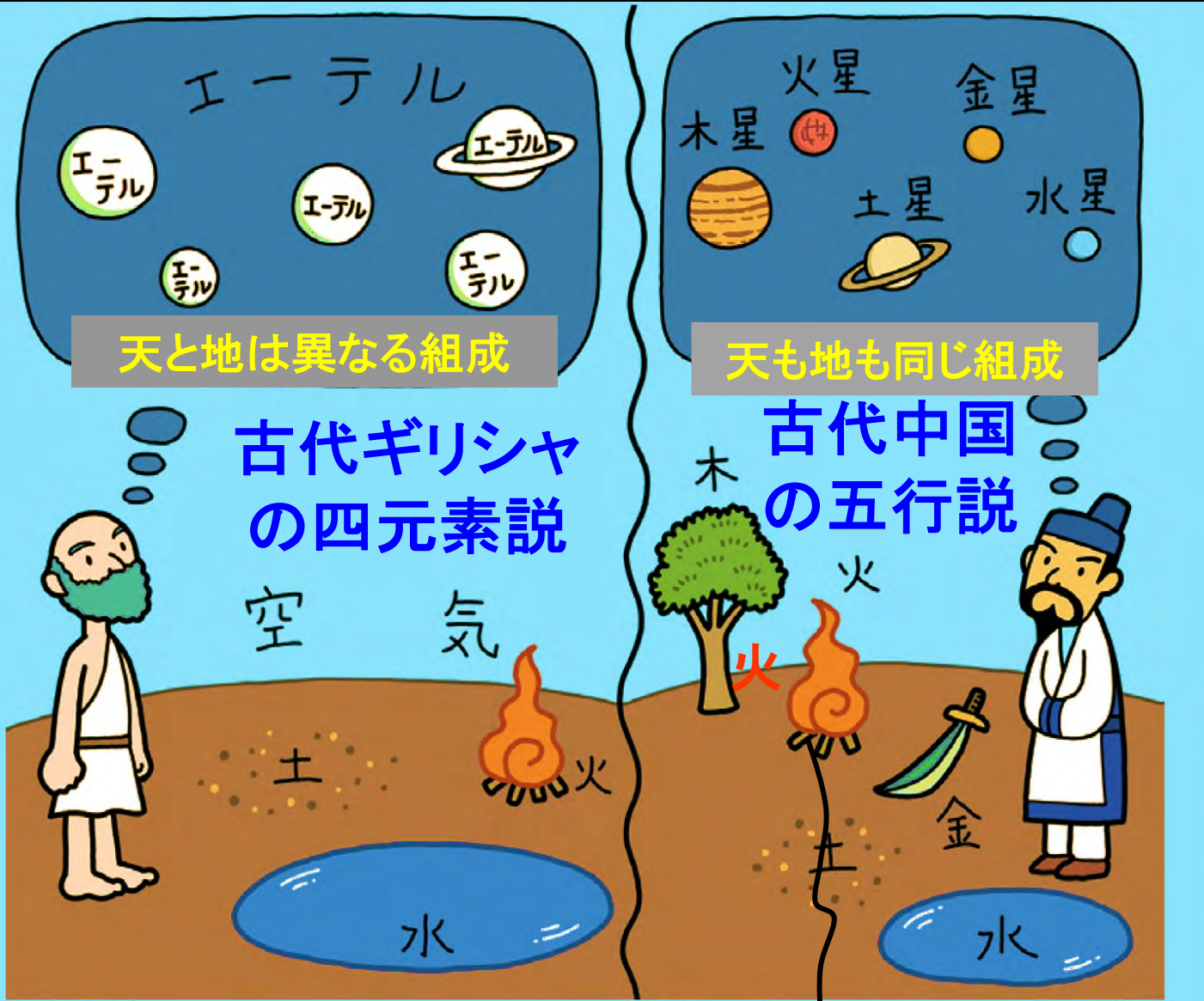
$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0$$

# 法則は時空の至るところに刻み込まれている

- 一般相対論は、時空の幾何学が物理法則となることを端的に示した例
  - 時空の幾何学は数式で書き表すことができる
  - したがって、物理法則もまた数式で表現できることになる
- ただし、すべての物理法則が、一般相対論の場合と同じく、時空の幾何学的性質に帰着できるかどうかは不明
  - 量子論を考慮すると、一般相対論はそのままでは成り立たず、変更が必要であることはわかっている（未完の量子重力理論）
  - にもかかわらず、時空（宇宙）がないにもかかわらず法則だけが存在できるとは考えにくいのでは？ ⇒ 来週のテーマ

# 4 宇宙に刻み込まれたビッグバンの化石 ～宇宙マイクロ波背景輻射～

# 天の世界と地の世界



日月火水木金土

## 五行説

■ 日本の惑星と曜日名の由来

## ■ 古代の素粒子論

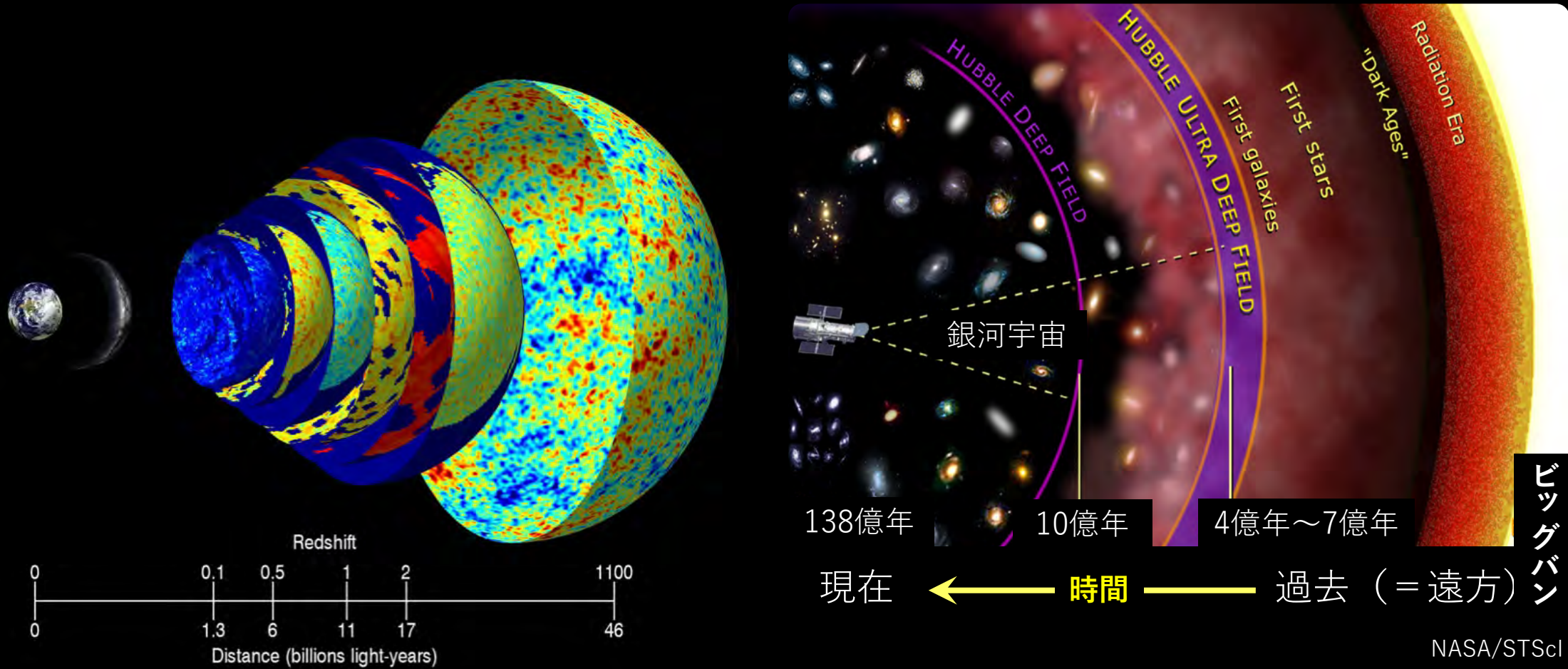
	陽	陰
木	きのえ 甲	きのと 乙
火	ひのえ 丙	ひのと 丁
土	つちのえ 戊	つちのと 己
金	かのえ 庚	かのと 辛
水	みずのえ 壬	みずのと 癸

(いづもりよう: 須藤靖「ものの大きさ」図1.1より)



# 遠くの宇宙には過去と歴史が刻まれている

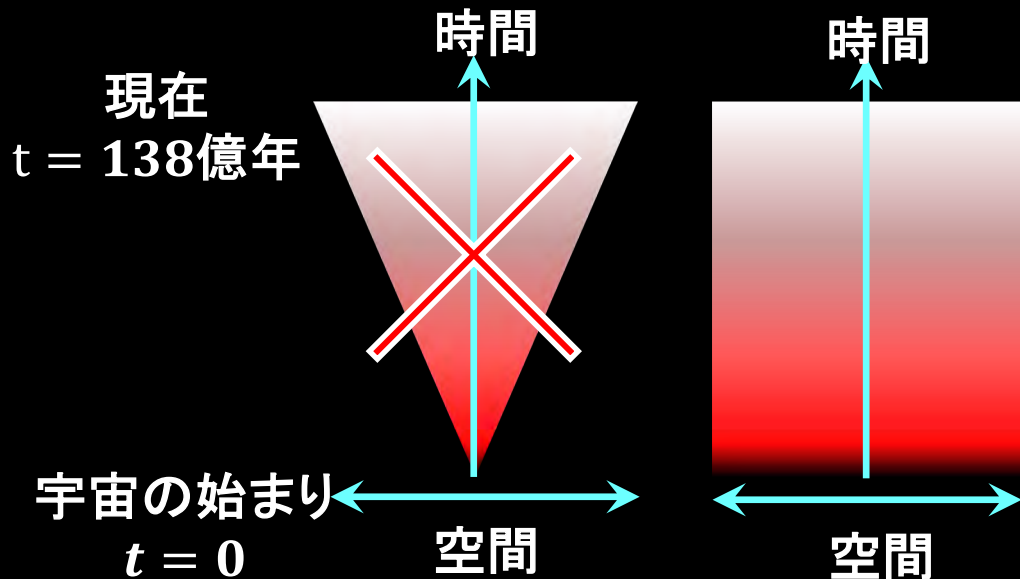
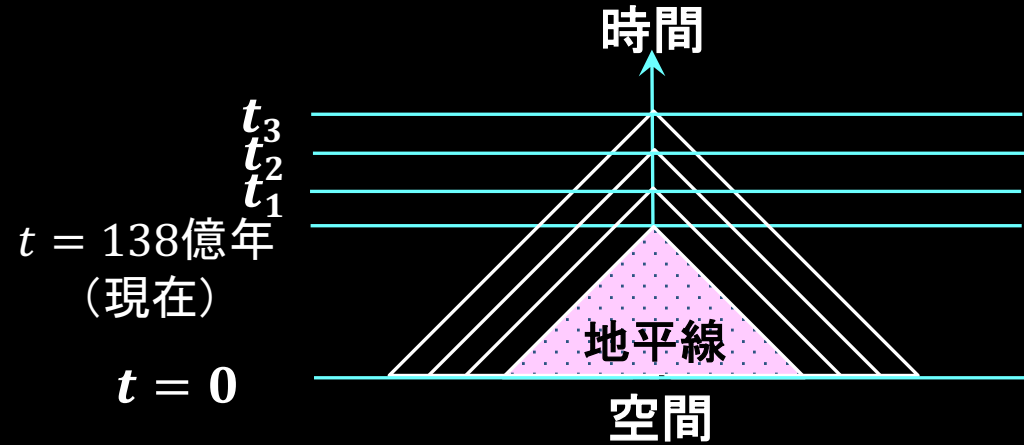
光の速度は有限なので遠くの宇宙は同時に過去の宇宙でもある



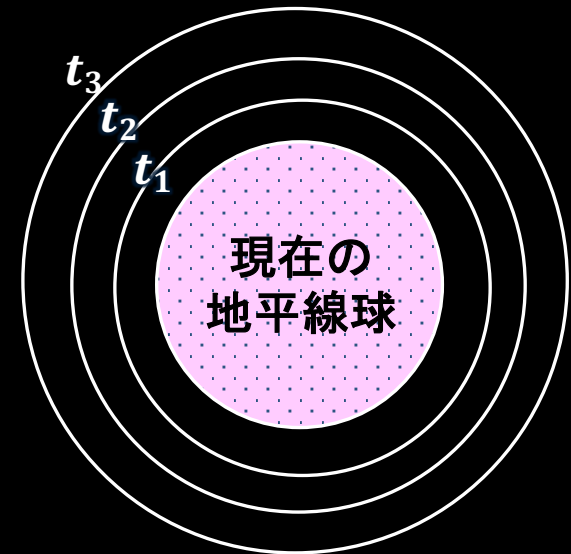
# ビッグバン＝宇宙初期の高温高密度状態 ≠宇宙のなかの大爆発

## ■ 宇宙の地平線

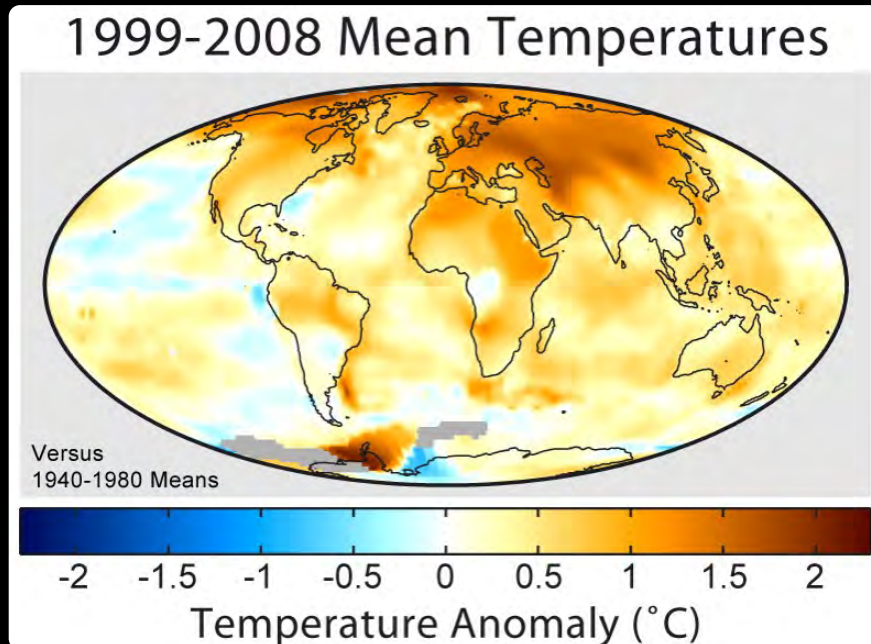
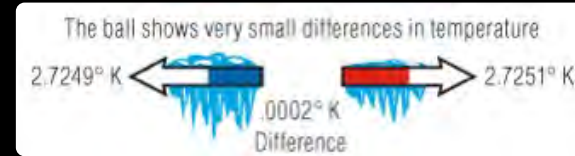
- 誕生直後の宇宙は点ではなくむしろほぼ無限に広がっていると考えるべき



宇宙の地平線の半径は時間とともに増大する  
⇒高い山に登るとより遠くの平地が見えてくるのと同じ

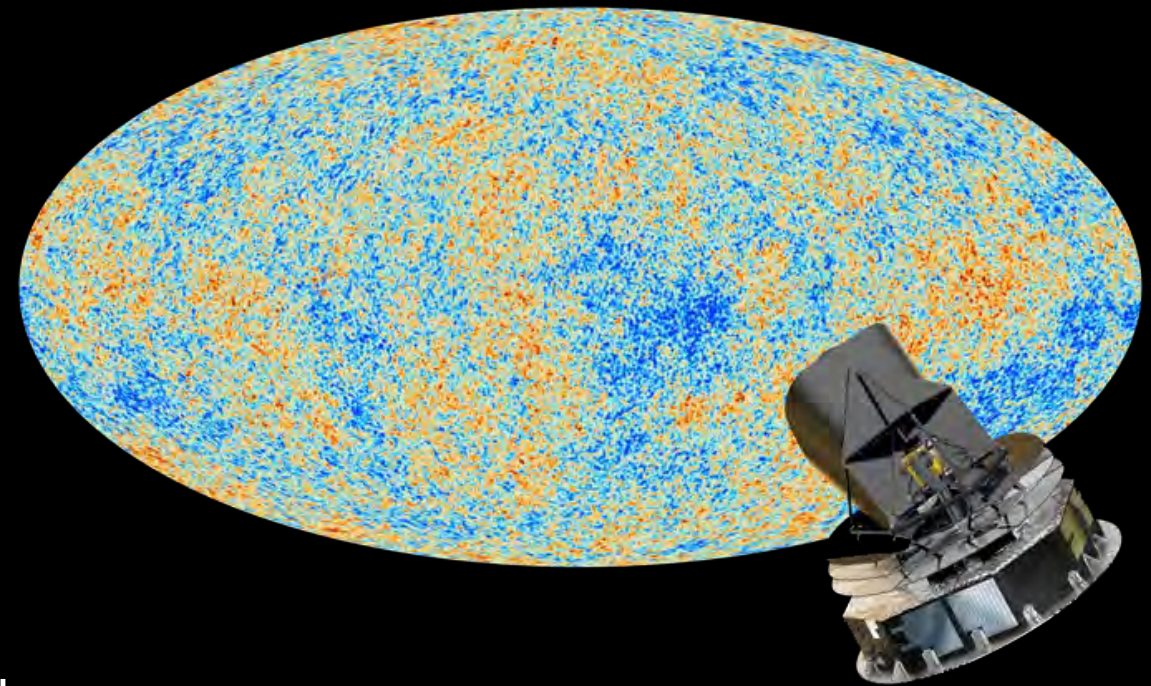


# 宇宙を満たすビッグバンの名残(光の化石): 宇宙マイクロ波背景輻射温度地図



Robert A. Rohde

地球の温暖化を表す温度地図

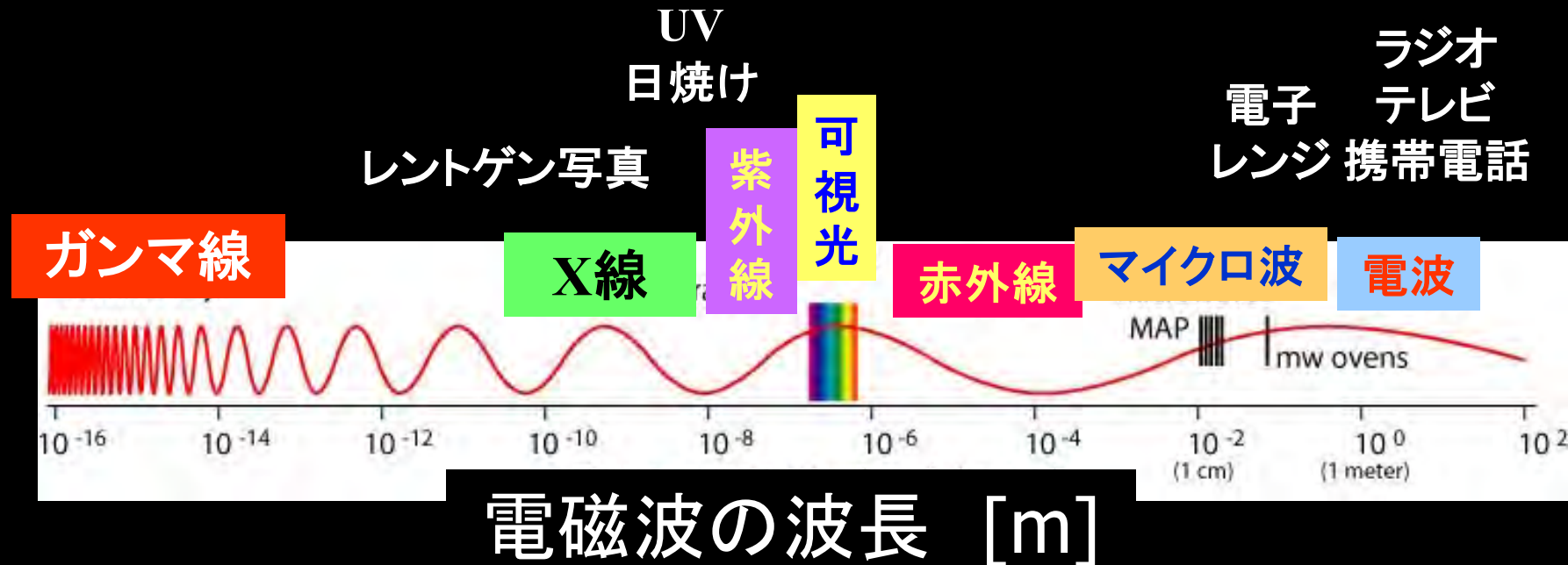


ESA and the Planck Collaboration - D. Ducros

プランク衛星のデータ(2013)

# マイクロ波とは

- 「光」は、電磁波と呼ばれる波の一種（別名といっても良い）
- 電磁波は波長に応じて異なる名前をもつ
  - 現代天文学は、すべての波長の電磁波を駆使した観測を行っている
- **マイクロ波は、波長1mm(300GHz)から1m(300MHz)**
  - 電波望遠鏡は主としてこの波長域を利用している



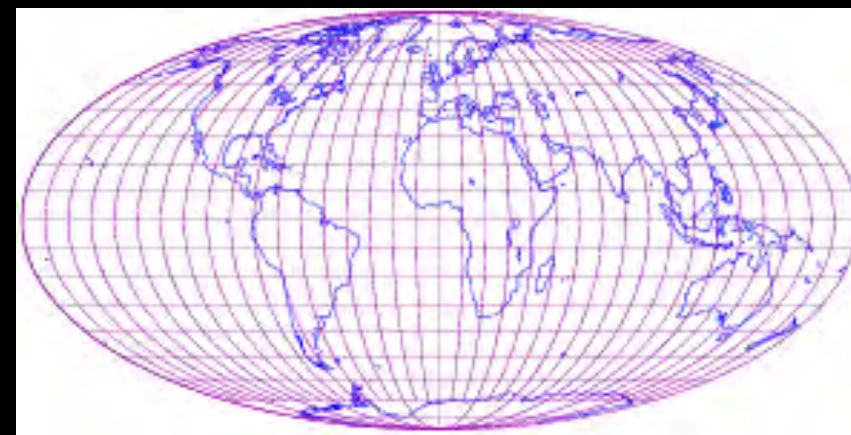
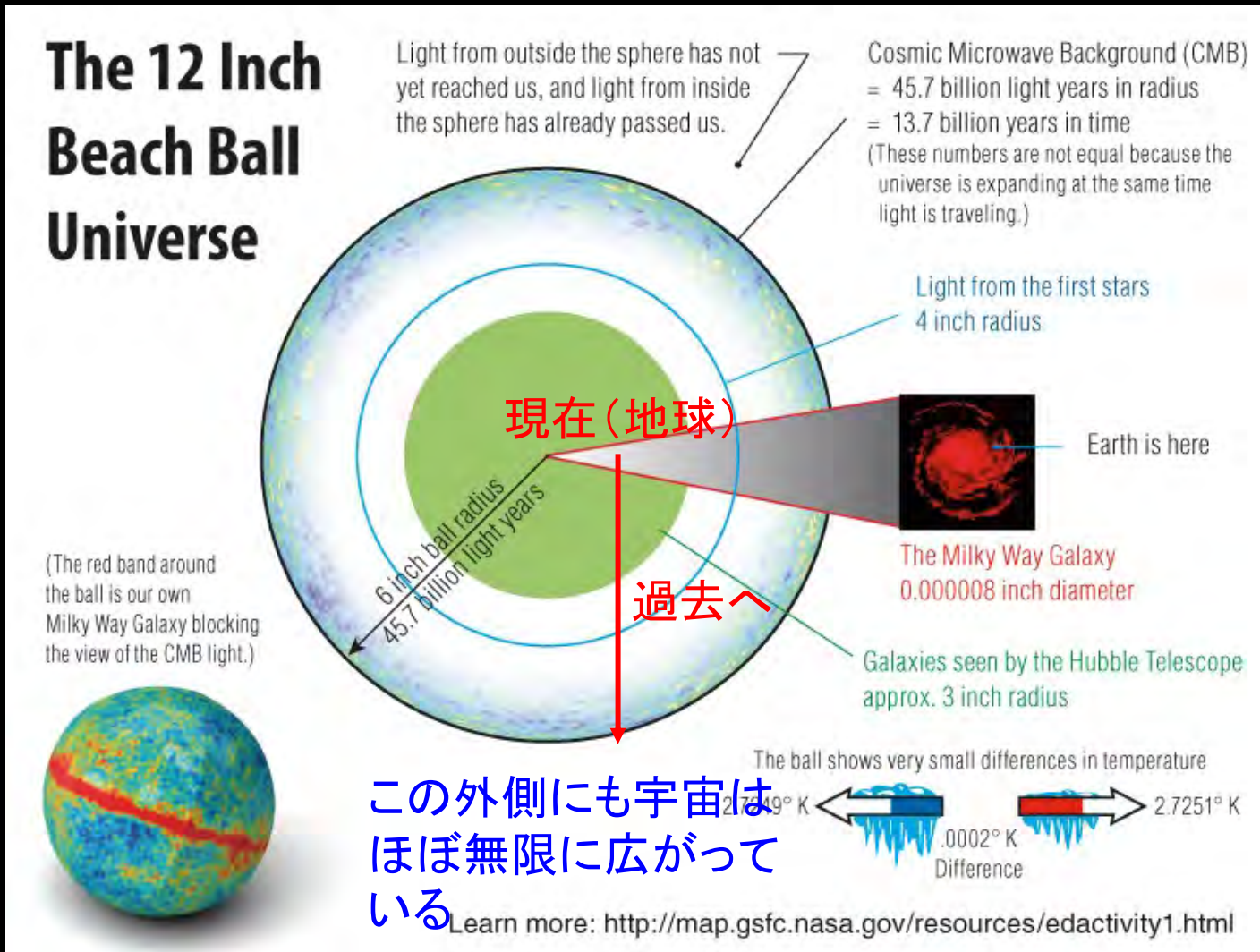
# CMB: Cosmic Microwave Background

- 現在の宇宙を満たす等方的な電磁波の熱放射分布
  - 熱い火の玉宇宙の名残
  - ペンジアスとウィルソンが1964年に発見
  - ビッグバンモデルが認められるきっかけとなった
- 現在の宇宙の温度 =  $2.728 \pm 0.002\text{K}$
- CMB温度揺らぎ全天地図は、宇宙論パラメータを知るためのもっとも重要な情報源

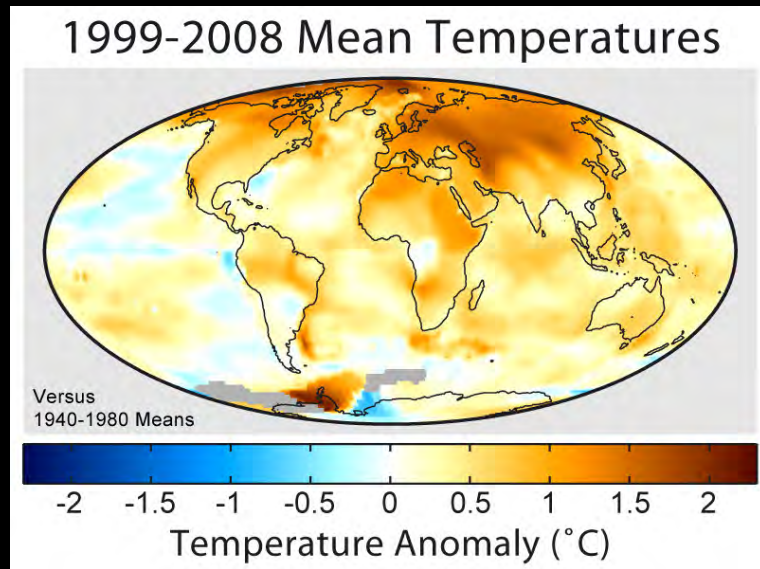
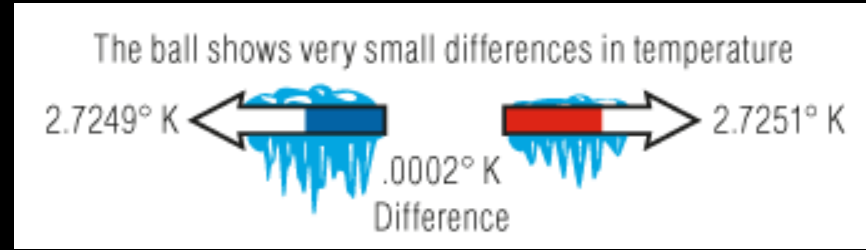
# 電磁波で現在観測できる宇宙の果て

## 宇宙マイクロ波背景輻射 = ビッグバン時の光の化石

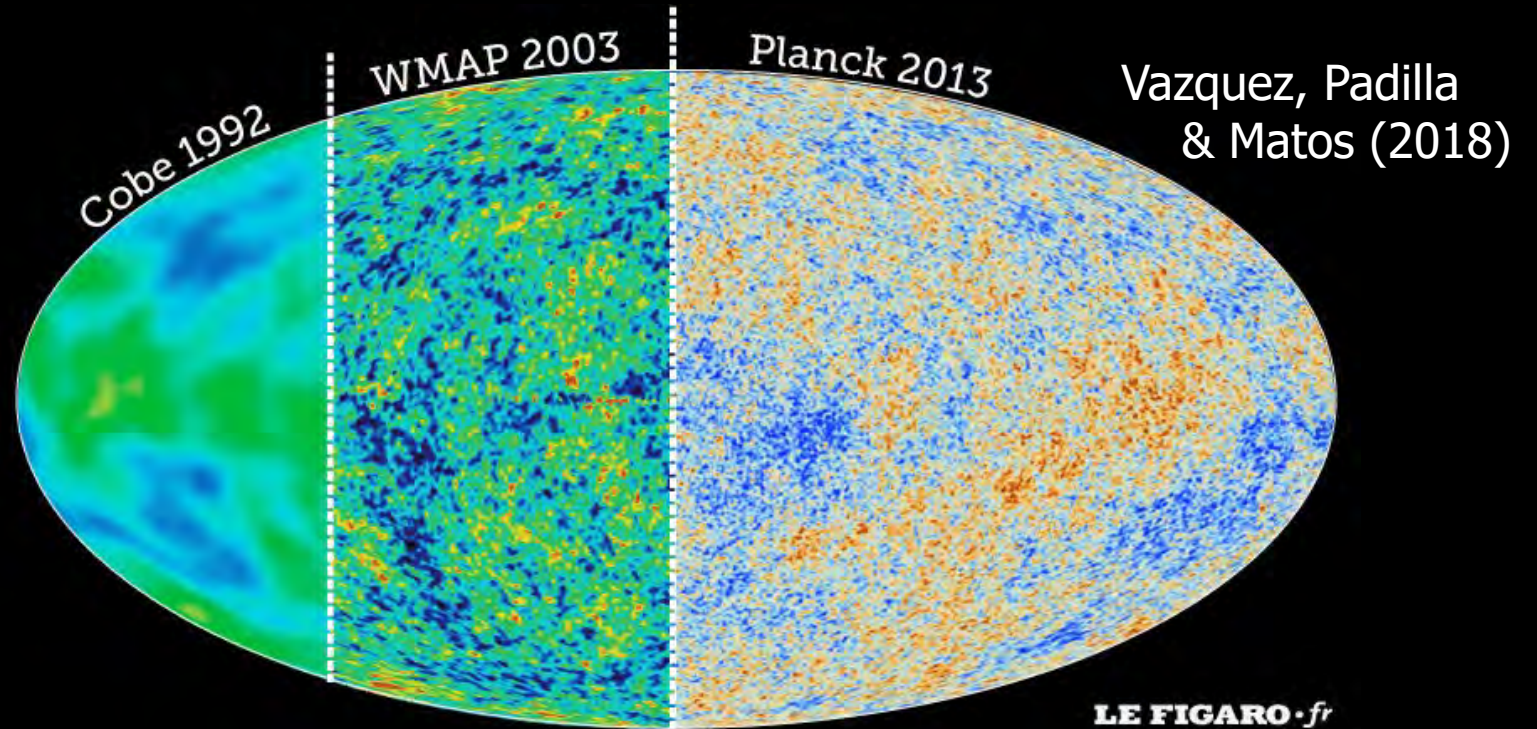
地球から天球面での温度地図を逆転させて表現した天球儀



# 宇宙マイクロ波背景放射 温度ゆらぎ地図



参考: 地球の温暖化を表す地図  
(ウィキペディア)

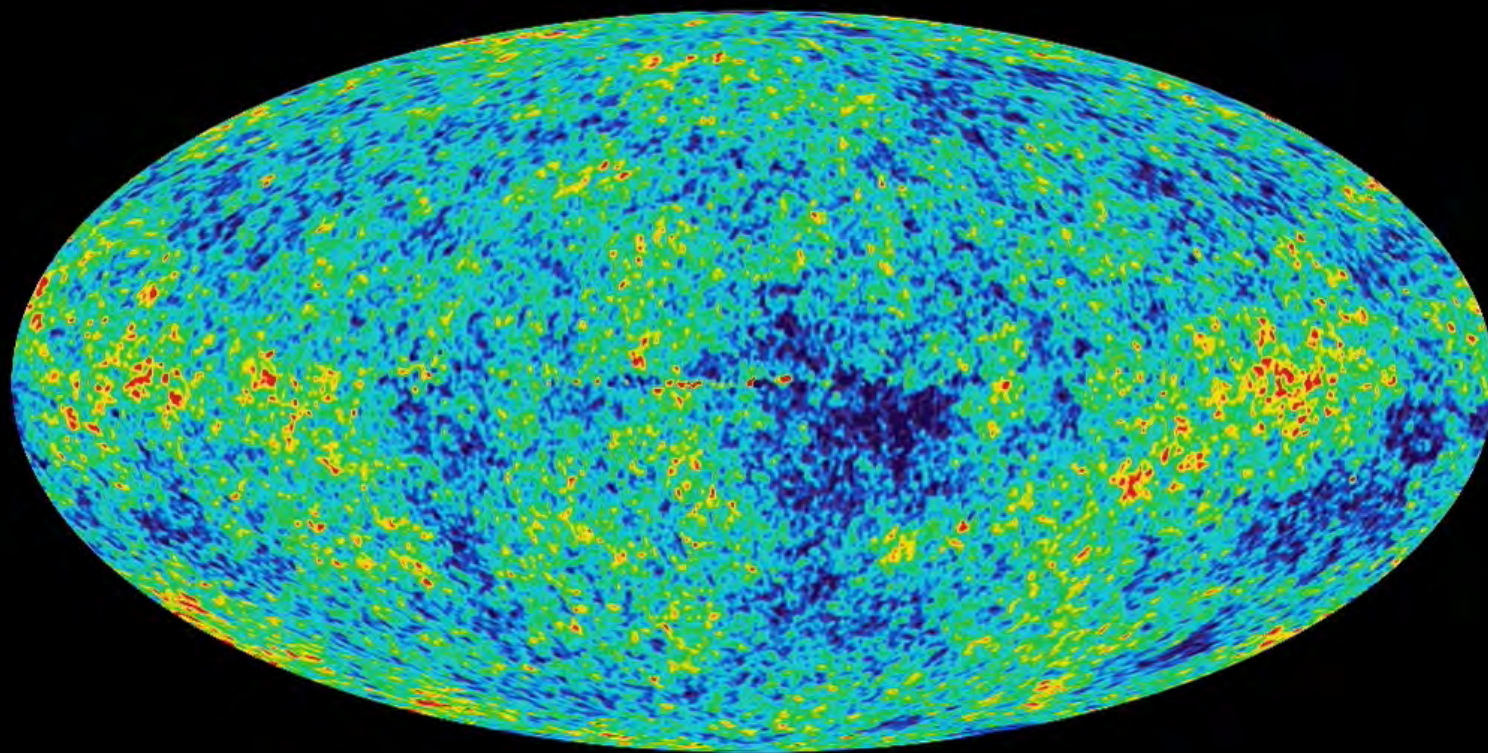


COBE衛星

WMAP衛星 (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe)

Planck衛星

宇宙マイクロ波背景輻射から銀河宇宙へ：  
宇宙誕生後38万年から138億年までの進化





# 138億年前の古文書の暗号解読方法 (ここは難しいです、すいません)

- 暗号化された状態の古文書
  - 宇宙マイクロ波全天温度地図

- 暗号を解く鍵

- 球面調和関数展開

$$\frac{\delta T}{T}(\theta, \phi) = \sum_{l,m} a_{lm} Y_{lm}(\theta, \phi)$$

- 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

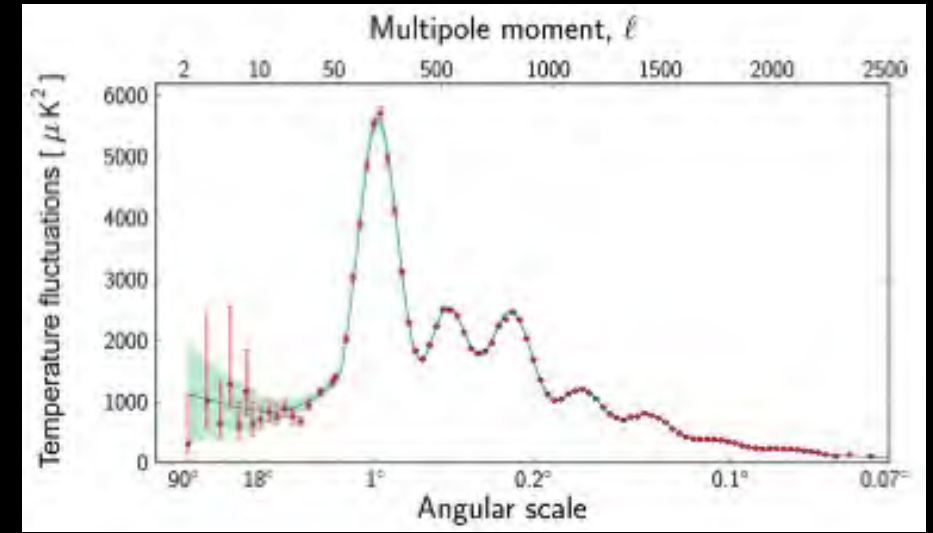
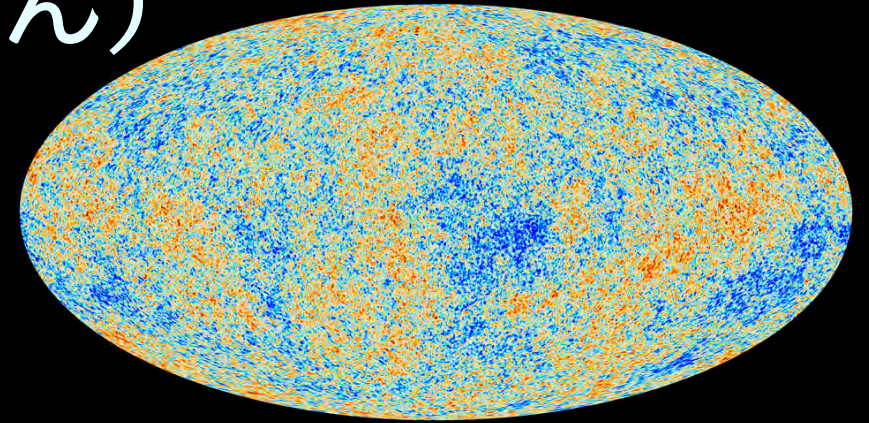
$$C_l = \langle a_{lm} a_{lm}^* \rangle$$

- 古文書を理解するための文法

- 冷たいダークマターモデルの理論予言

- 宇宙最古の古文書に隠されている情報

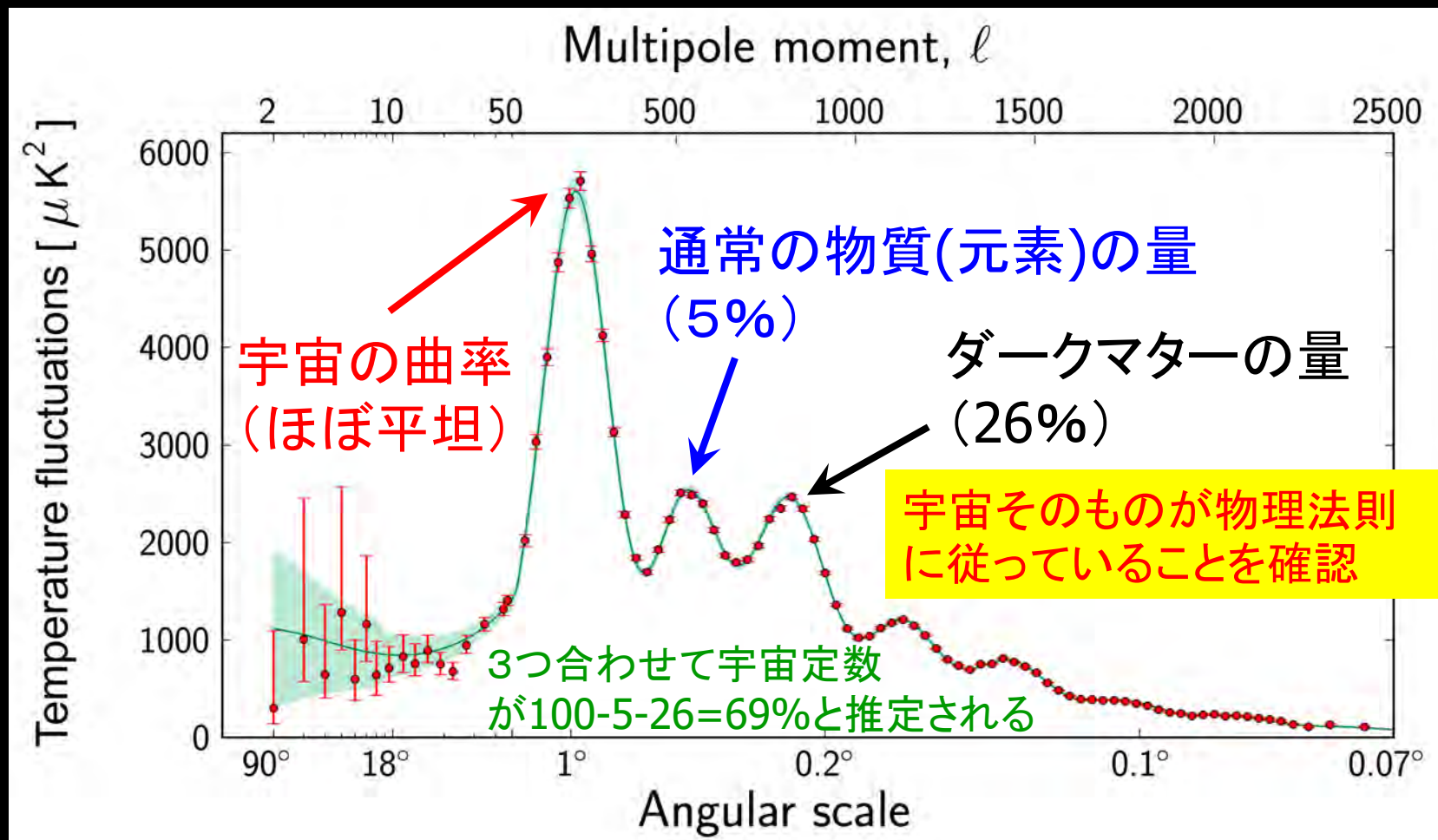
- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成、、、



# 標準宇宙モデル ( $\Lambda$ CDM)

- 主成分は、**元素** (普通の物質)、**ダークマター** (見えない物質)、**宇宙定数** (負の圧力をもち宇宙を一様に満たす) の3つ
  - それ以外にも、光 (電磁波)、ニュートリノ、重力波も宇宙を満たしているが、それらの割合は上記の3成分に比べるとほぼ無視できる
- ユークリッド幾何にしたがう空間 (**平坦**、曲がっていない)
- 一般相対論を仮定して、6つの自由度 (パラメータの値) をうまく選べば、ほぼすべての観測データを見事に説明する
- 宇宙定数 ( $\Lambda$ ) と冷たいダークマター (Cold Dark Matter) を組み合わせて **平坦な  $\Lambda$ CDMモデル** と呼ばれる

# 標準宇宙モデル: わずか6つのパラメータで 見事に説明できる



# 宇宙論パラメータ：定義

## ■ 標準宇宙モデル (flat $\Lambda$ CDM model) の特徴

- ほぼ平坦な宇宙(空間曲率が0のユークリッド空間):  $K \approx 0$
- 元素 (バリオンと呼ばれることが多い) :  $\rho_b$
- ダークマター :  $\rho_d$
- 宇宙定数 (より一般的にはダークエネルギー) :  $\Lambda$

$$\Omega_b \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{b0}$$

$$\Omega_d \equiv \frac{8\pi G}{3H_0^2} \rho_{d0}$$

## ■ フリードマン方程式と宇宙論パラメータ

時刻  $t$

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_b + \rho_d) - \frac{K}{a^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

現在  $t = t_0$   
( $a = a_0 = 1$ )

$$H_0^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_{b0} + \rho_{d0}) - \frac{K}{a_0^2} + \frac{\Lambda}{3}$$

$$\Omega_K \equiv \frac{K}{a_0^2 H_0^2}$$

$$\Omega_\Lambda \equiv \frac{\Lambda}{3H_0^2}$$

$$1 + \Omega_K = \Omega_b + \Omega_d + \Omega_\Lambda$$

# 宇宙論パラメータ：推定値のまとめ

記号	名前	推定値
$H_0$	ハッブル定数 ( $=100h\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ )	$(67.27 \pm 0.66)\text{km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$
$\Omega_b$	バリオン密度パラメータ	$(0.04917 \pm 0.00035) \left(\frac{h}{0.6727}\right)^{-2}$
$\Omega_d$	ダークマター密度パラメータ	$(0.2647 \pm 0.0033) \left(\frac{h}{0.6727}\right)^{-2}$
$\Omega_\Lambda$	(無次元化された)宇宙定数	$0.6844 \pm 0.0091$
$\Omega_K$	宇宙の曲率パラメータ	$(-4.0^{+3.8}_{-4.1}) \times 10^{-2}$
$t_0$	宇宙年齢	$(138.13 \pm 0.26)$ 億年

“Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters”  
Astronomy & Astrophysics 594, A13(2016) の表4と表5に基づくまとめ

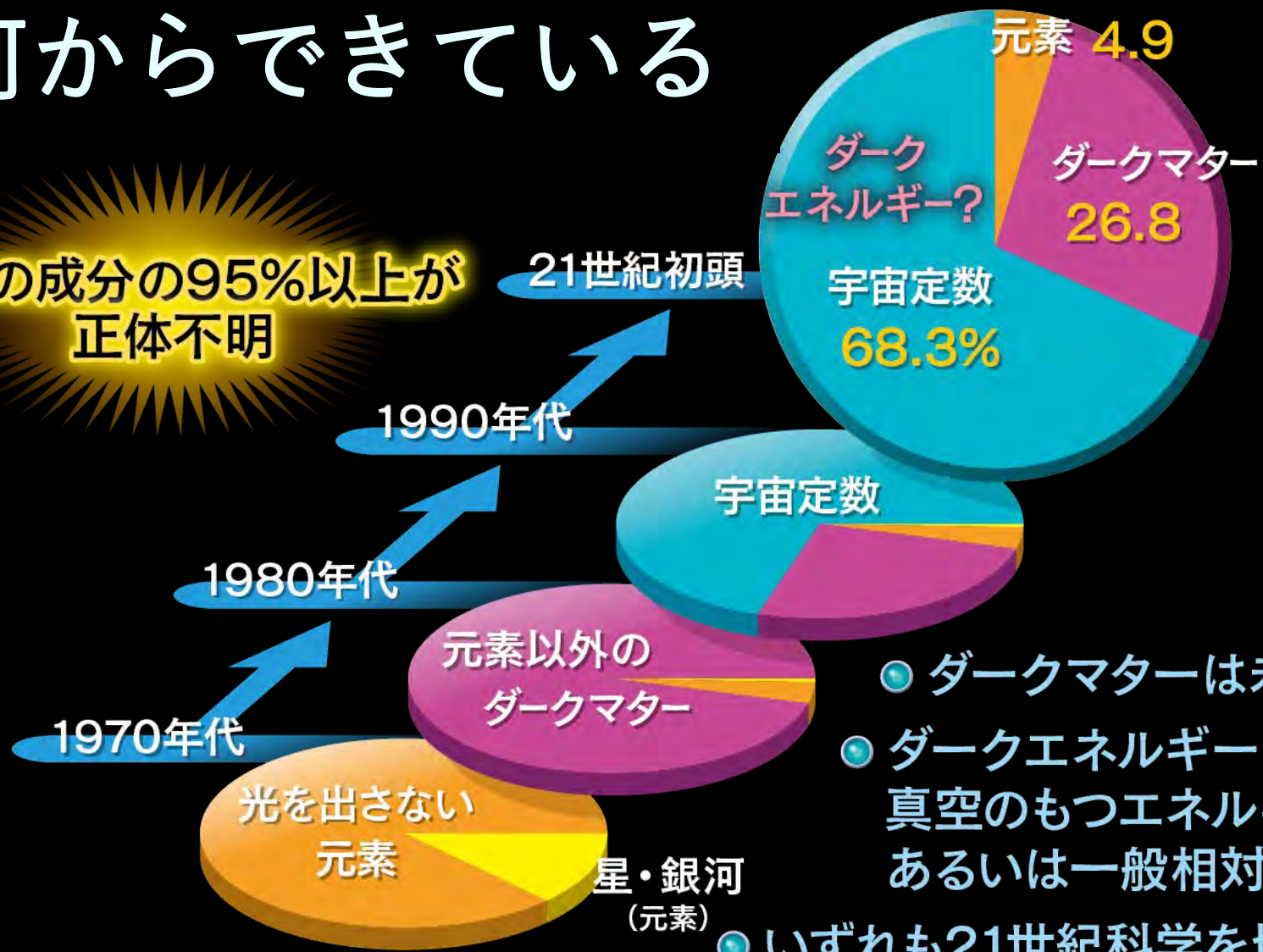
本当はこんな感じ（驚くほど精密であることだけわかってもらえれば、、、）

Parameter	Planck best fit	Planck [1]	CamSpec [2]	([2] - [1])/σ <sub>1</sub>	Combined
$\Omega_b h^2$	0.022383	0.02237 ± 0.00015	0.02229 ± 0.00015	-0.5	0.02233 ± 0.00015
$\Omega_c h^2$	0.12011	0.1200 ± 0.0012	0.1197 ± 0.0012	-0.3	0.1198 ± 0.0012
100θ <sub>MC</sub>	1.040909	1.04092 ± 0.00031	1.04087 ± 0.00031	-0.2	1.04089 ± 0.00031
τ	0.0543	0.0544 ± 0.0073	0.0536 <sup>+0.0069</sup> <sub>-0.0077</sub>	-0.1	0.0540 ± 0.0074
ln(10 <sup>10</sup> A <sub>s</sub> )	3.0448	3.044 ± 0.014	3.041 ± 0.015	-0.3	3.043 ± 0.014
n <sub>s</sub>	0.96605	0.9649 ± 0.0042	0.9656 ± 0.0042	+0.2	0.9652 ± 0.0042
$\Omega_m h^2$	0.14314	0.1430 ± 0.0011	0.1426 ± 0.0011	-0.3	0.1428 ± 0.0011
H <sub>0</sub> [km s <sup>-1</sup> Mpc <sup>-1</sup> ]	67.32	67.36 ± 0.54	67.39 ± 0.54	+0.1	67.37 ± 0.54
Ω <sub>m</sub>	0.3158	0.3153 ± 0.0073	0.3142 ± 0.0074	-0.2	0.3147 ± 0.0074
Age [Gyr]	13.7971	13.797 ± 0.023	13.805 ± 0.023	+0.4	13.801 ± 0.024
σ <sub>8</sub>	0.8120	0.8111 ± 0.0060	0.8091 ± 0.0060	-0.3	0.8101 ± 0.0061
S <sub>8</sub> ≡ σ <sub>8</sub> (Ω <sub>m</sub> /0.3) <sup>0.5</sup>	0.8331	0.832 ± 0.013	0.828 ± 0.013	-0.3	0.830 ± 0.013
z <sub>re</sub>	7.68	7.67 ± 0.73	7.61 ± 0.75	-0.1	7.64 ± 0.74
100θ <sub>*</sub>	1.041085	1.04110 ± 0.00031	1.04106 ± 0.00031	-0.1	1.04108 ± 0.00031
r <sub>drag</sub> [Mpc]	147.049	147.09 ± 0.26	147.26 ± 0.28	+0.6	147.18 ± 0.29

Table 1 of “Planck 2018 results VI. Cosmological parameter”, A&A, 641, A6 (2020)

# 宇宙“論”の進化： 宇宙は何からできている

宇宙の成分の95%以上が  
正体不明

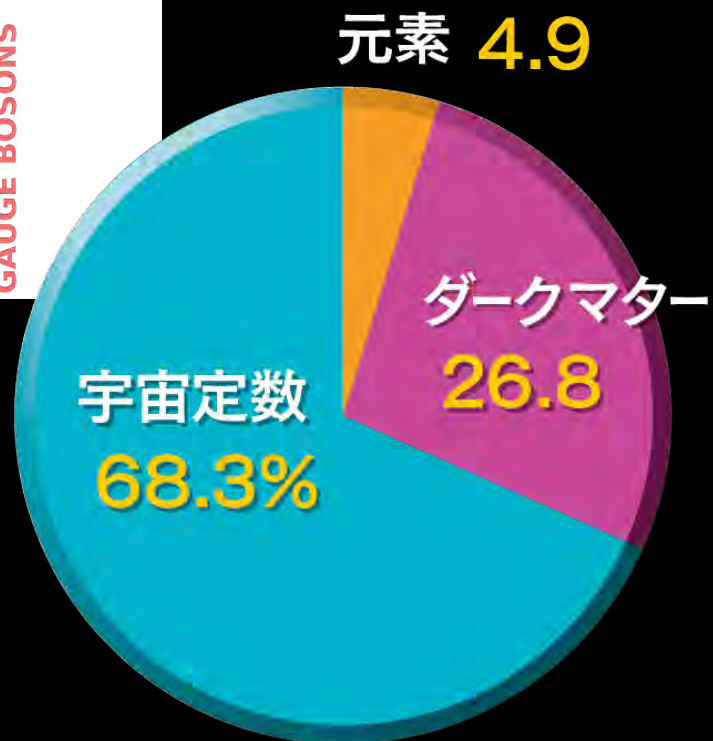


- ダークマターは未知の素粒子?
- ダークエネルギーは真空のもつエネルギー?あるいは一般相対論の破綻?

● いずれも21世紀科学を切り拓く鍵

# 宇宙観測と素粒子実験が明らかにした宇宙の組成

mass →	≈2.3 MeV/c <sup>2</sup>	≈1.275 GeV/c <sup>2</sup>	≈173.07 GeV/c <sup>2</sup>	0	≈126 GeV/c <sup>2</sup>
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluon	<b>H</b> Higgs boson
<b>QUARKS</b>					
	≈4.8 MeV/c <sup>2</sup>	≈95 MeV/c <sup>2</sup>	≈4.18 GeV/c <sup>2</sup>	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> photon	
	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>	91.2 GeV/c <sup>2</sup>	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>e</b> electron	<b>μ</b> muon	<b>τ</b> tau	<b>Z</b> Z boson	
<b>LEPTONS</b>					
	<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>	80.4 GeV/c <sup>2</sup>	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	<b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	<b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	<b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	<b>W</b> W boson	
					<b>GAUGE BOSONS</b>



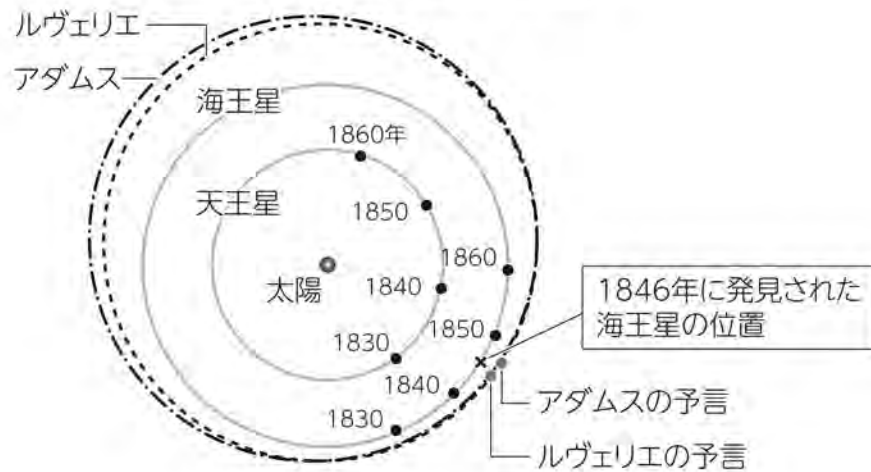
- 宇宙の主成分は宇宙定数で約7割を占める
- その次は約3割を占めるダークマター
- 我々の身の回りの世界を構成している元素はわずか5%程度でしかない
- 宇宙の約95%はその正体が未だ解明されていない



# 5 世界は法則にしたがっている

# 5.1 海王星の発見：古典力学(ニュートン)の信頼性

- 太陽系内惑星のうち、水星、金星、地球、火星、木星、土星の6つは、誰が最初に発見したかわからないほど昔から知られていた
- 天王星はウィリアム・ハーシェルが、1781年に偶然発見
- その軌道を詳細に観測したところ、ニュートン理論の予言とわずかに矛盾していた。ニュートンは間違っていたのか？
  - ユルバン・ルヴェリエとジョン・クーチ・アダムズは、1846年、天王星の軌道を説明できるようにその外側を好転する未知の惑星の存在を独立に予言



- ガレは、ルヴェリエの予言からわずか0.9度、アダムズの予言から2.5度しか離れていない位置に新たな惑星を発見
- 法則が未知の天体の存在を正しく予言
  - ニュートンは正しかった！

## 5.2 水星軌道の近日点移動と古典力学の一致

### ■ 太陽の周りの水星の楕円軌道公転運動

- 他の惑星がなければこの楕円軌道は変化しない（ケプラー問題）
- ただし他の惑星からの重力のために、ニュートン力学の範囲内で、水星の楕円軌道は100年間に532秒角だけ余分に回転するはず（左下図：太陽にもっとも近い位置が徐々にずれるので、近日点移動と呼ばれる）
- しかし実際の観測値は575秒角 ⇒ **100年に43秒角だけ謎のズレが存在**



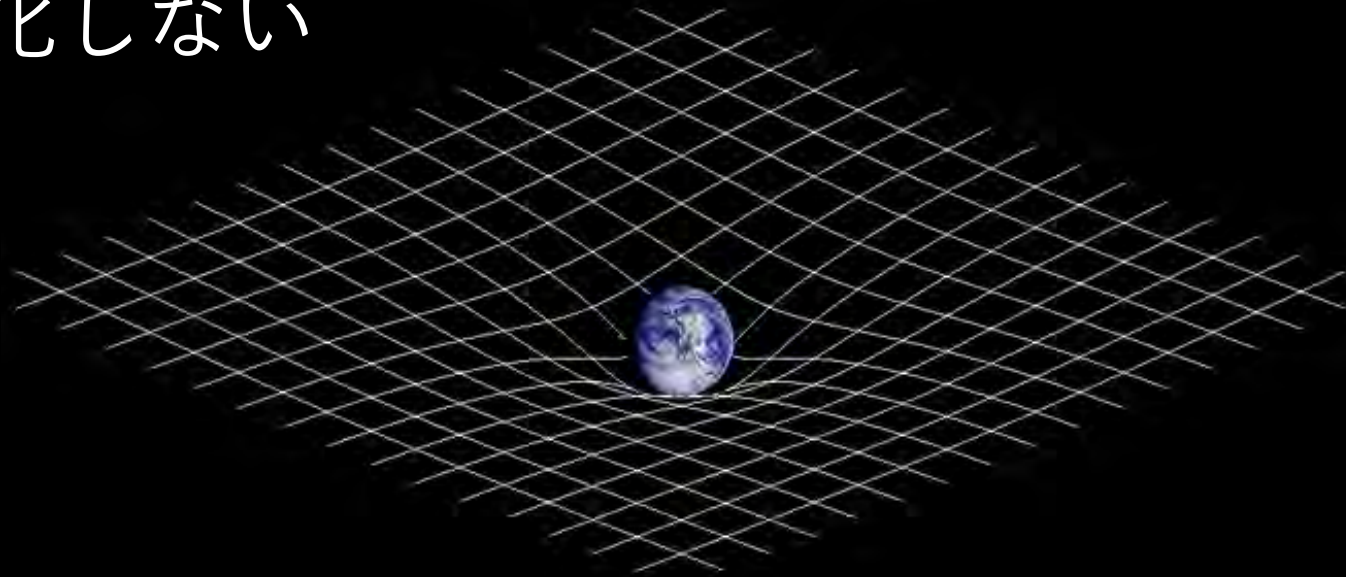
- 水星の公転周期は88日なので、100年間に約400回公転
- 1公転あたりわずか0.1秒角のズレ(比にすると $8 \times 10^{-8}$ )
  - ニュートン力学は事実上十分正しいと言って良い
  - 政治経済や医学分野ではありえない精度で、物理学理論と天文観測データは一致している
- とはいえ、この100年に43秒角のズレは、天文学者の観測の間違いなのか、ニュートン力学の間違いなのか

## 5.3 水星軌道の近日点移動と一般相対論の一致

- 驚くべきことに、アインシュタインの一般相対論は、ニュートン力学が説明できなかった水星の近日点移動の43秒角のズレを自然に解決した
  - 一般相対論は、このズレを説明する「ため」に考えられた理論ではない。重力はなぜ働くかを追及した結果、「重力は時空のゆがみによって生まれる」という驚くべき結論に至ったもの
  - **水星の近日点移動の値 (575" per century)**  
= 276.38(金星) + 91.41(地球) + 2.48(火星) + 153.98(木星)  
+ 7.31(土星) + 0.14(天王星) + 0.04(海王星) + **43(一般相対論)**
- 単なる主張や感想、価値観、偶然などではない
  - 一般相対論はより正しい理論（しかし最終的なものではない）
  - 「世界は法則に（厳密に）したがっている」を実感できる例

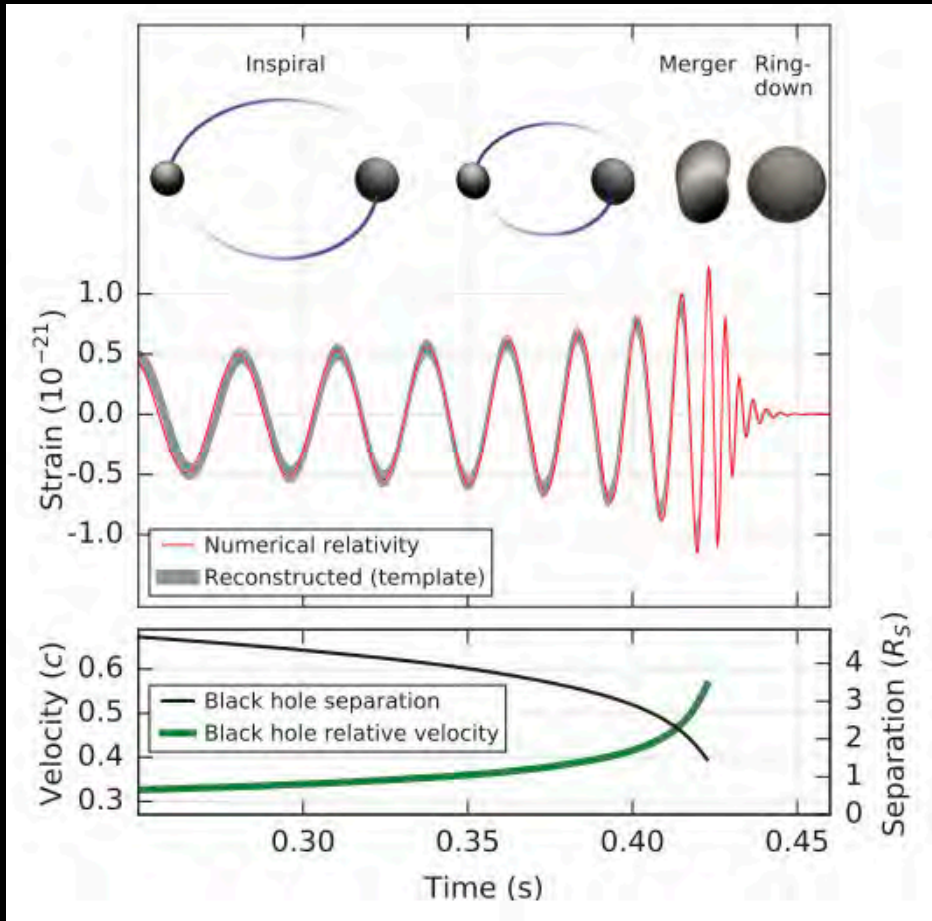
## 5.4 時空の歪みを伝える波（重力波）と一般相対論（1）

- 物体が静止している時には、それによって生まれる空間の歪みは変化しない



- しかし一般相対論によると、物体が激しく運動すれば歪みのパターンが時間変化し、波として伝わる（重力波）
- とはいえ、その振幅はとてつもなく小さい

## 5.4 時空の歪みを伝える波（重力波）と一般相対論（2）



Abbott et al.

Phys.Rev.Lett. 116 (2016) 061102

<https://www.ligo.caltech.edu/>

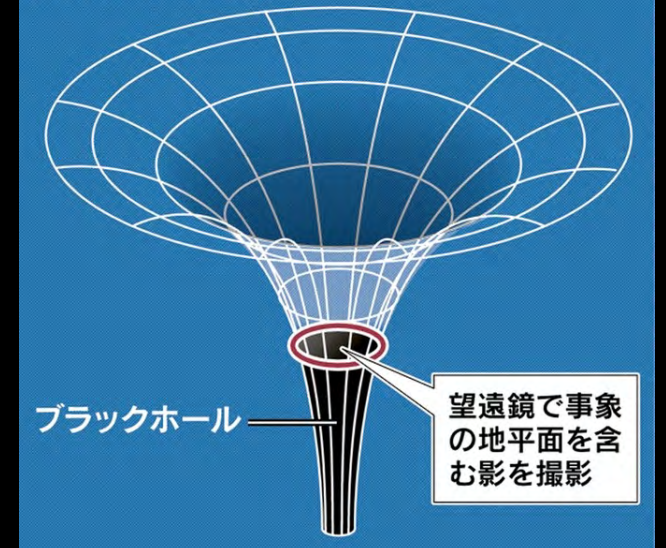
- 3km離れた2点間の距離  $L$  の変化を  $\Delta L/L=10^{-21}$  の精度で検出 (2015年)
  - 地球・太陽間の距離がわずかに原子1個分だけ変化した程度に対応する驚異的な感度
  - 2017年ノーベル物理学賞を受賞した大発見
  - 一般相対論の予言以来100年後の確認
  - 基礎物理学理論と最新測定技術発展のすごさ
- 一般相対論は世界を近似しているのではなく、厳密に記述しているのではないか？
  - 「間違った」理論がここまで定量的に観測事実を予言する偶然などありえない

# 5.5 ブラックホールシャドウの撮影 (1)

- 一般相対論が完成した直後の1916年、シュワルツシルトが、奇妙な性質を持つ解を発見
  - そこからは、光を含むいかなる物質も外に出ることはできない
  - 現在ブラックホールと呼ばれているこの天体は、アインシュタインでさえ、現実的にはありえない数学的解に過ぎないと考えた
  - しかし、その後の観測によってブラックホールだと考えられる天体が数多く発見されてきた
  - しかし、ブラックホールは本当に「ブラック」なのか（そこから光は脱出できないのか）確認されたわけではなかった



のみ込まれた物質や光はブラックホールの外に脱出できない

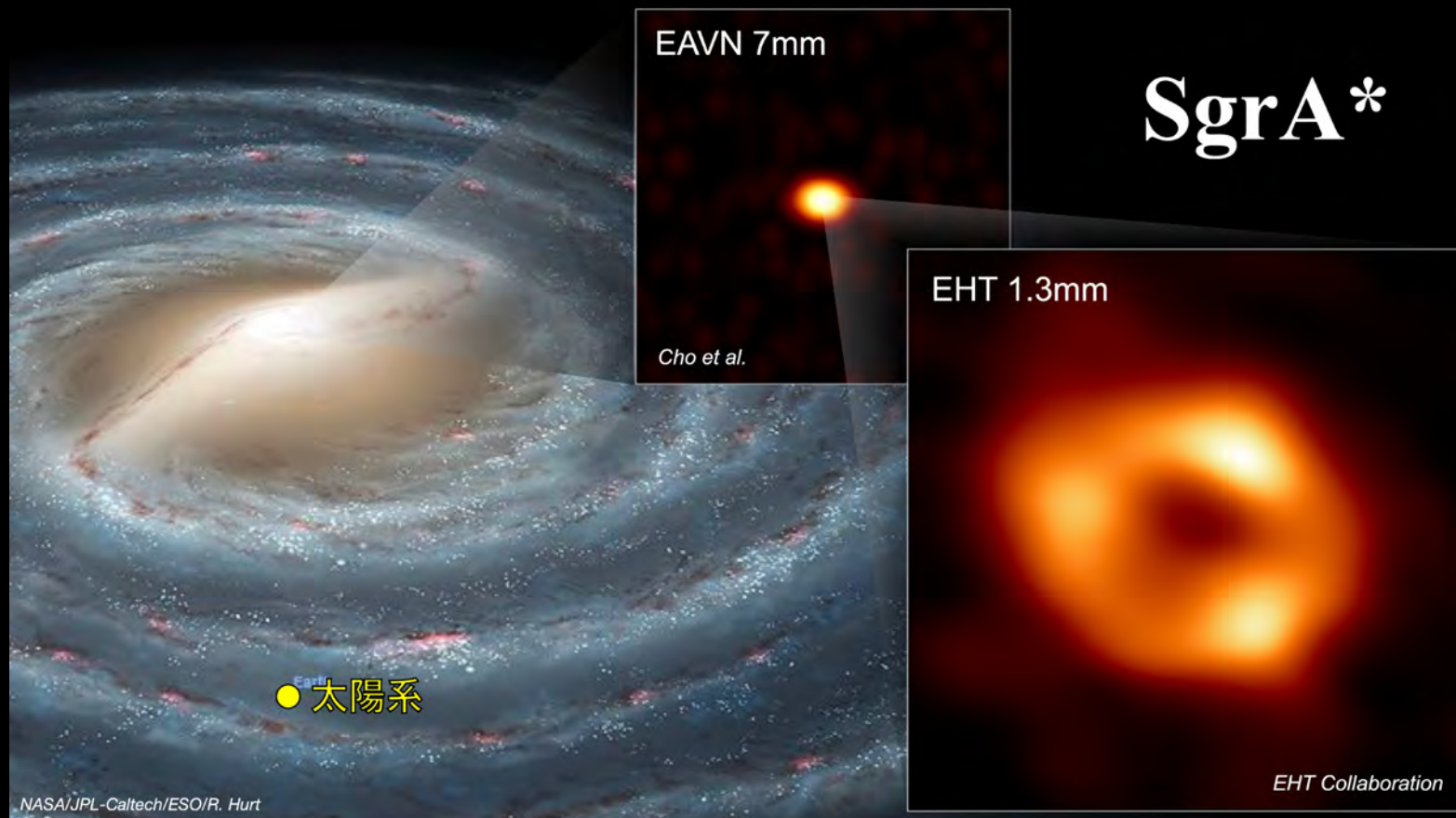


## 5.5 ブラックホールシャドウの撮影 (2)

- 2022年5月12日、国際共同プロジェクトEHT(Event Horizon Telescope:事象の地平線望遠鏡)が、天の川銀河の中心にあるブラックホールの「影」の撮影結果を発表

- 2019年4月10日の楕円銀河M87 (5千万光年先)の中心ブラックホールに続く2例目

- **ブラックホールは本当に「ブラック」であることを証明**





## 6 今回のまとめと次回のテーマ

# 宇宙を記述する数式(微分方程式)

## ■ 重力の逆二乗則 と運動方程式 (ニュートン)

$$\vec{F} = -\frac{GmM}{r^2} \frac{\vec{r}}{r} + m \frac{d^2 \vec{r}}{dt^2} = \vec{F}$$

- りんご、ロケット、天体など驚くべきほど広範な現象が、この式によって記述される

## ■ 一般相対論の基礎方程式 (アインシュタイン)

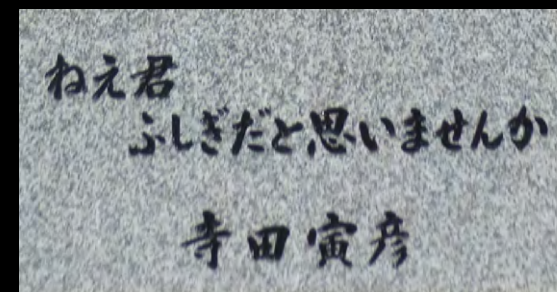
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

$$ds^2 = \sum_{\mu=0}^3 \sum_{\nu=0}^3 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

- 極めて難しく見えるものの、実際は上のような式を複雑にした10個の連立方程式に対応するだけなので、原理的には同じ
- これらは世界の近似なのか、厳密な表現なのか？

# 微分方程式で表された物理法則の数学的解は 実際にこの宇宙のどこかで実現しているらしい

- この世界の振る舞いを経験的にうまく説明できるように提案されたものが物理法則
  - その法則自体は世界の近似に過ぎないはず。さらにその法則を具体的に書き下した微分方程式は、決して厳密な意味での世界の記述ではないはず
  - にもかかわらず、それらの方程式の今まで知られていなかった数学的性質や厳密解を発見すると物理学者は大興奮する
  - 物理学者は、微分方程式が厳密にこの世界を記述するものと勘違いしているだけでは？
- ところが、この宇宙では当初は数学的な解に過ぎないと思われた現象が次々と発見されてきた。これはなぜなのか？
  - 中性子星、ブラックホール、重力波、、、
  - やっぱり宇宙は法則（微分方程式）に従っている！



# 宇宙は法則にしたがっている

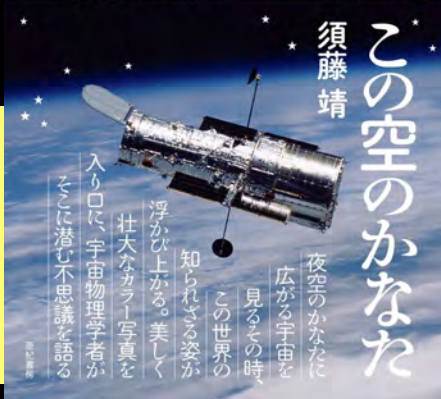
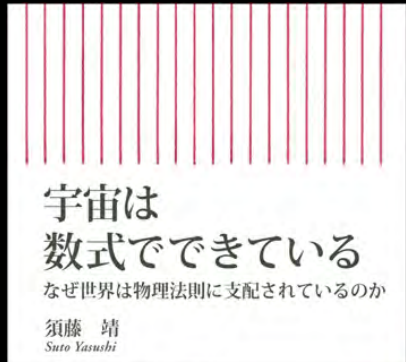
- 宇宙には物理法則がある
  - 物理法則に矛盾する現象は（知られてい）ない
- 物理法則は数学（微分方程式）を用いて書き下せる
  - その微分方程式は、宇宙の現象を近似するのか、あるいは厳密に記述し尽くせるのかはわかっていない
  - しかし、その方程式を解いて得られる数学的な解が、以前知られていなかった新たな現象を正確に予言してきたことは事実
- なぜ宇宙の法則は数学で書かれている（ように見える）のか
  - 物理法則とは宇宙の幾何学的性質を数式で表現したものでは？
  - この（意味不明な）主張をさらに掘り下げるのが次回のテーマ

今日の話の内容をもっとよく知りたければ

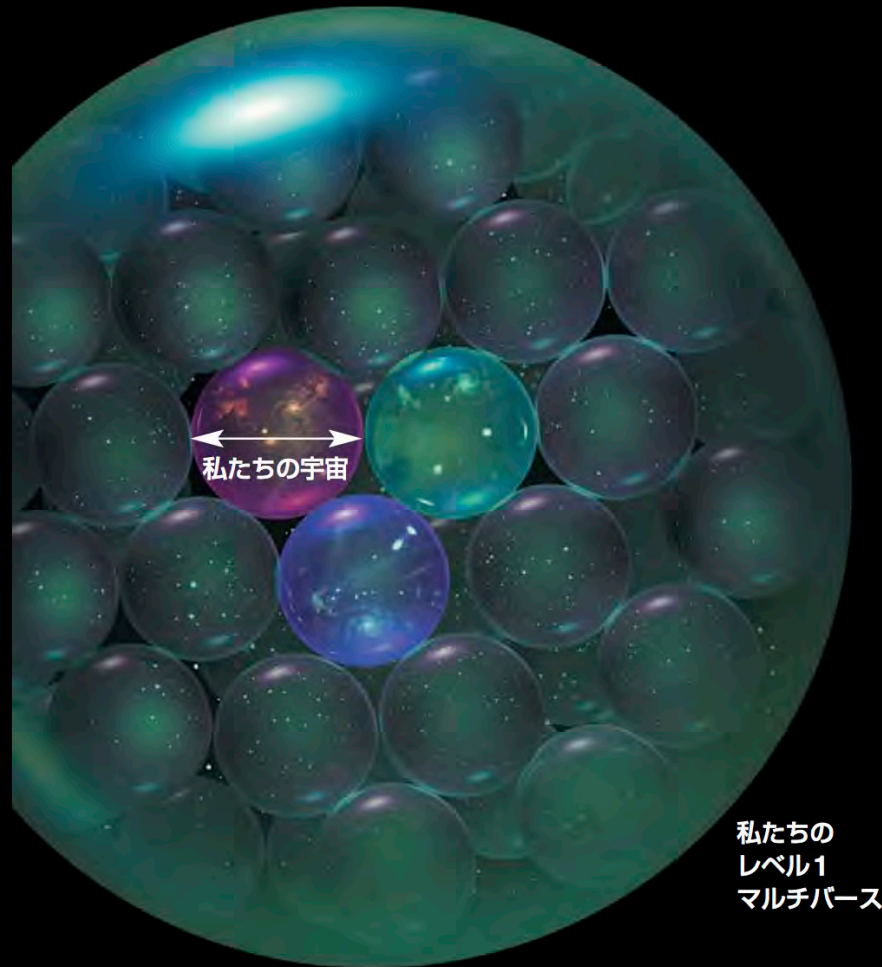


参考文献

高知新聞連載 (2016-2019) をまとめたもの



# 宇宙が数式にしたがっている理由 (2)



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)



東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

早稲田大学オープンカレッジ 八丁堀校 @ 2023年3月11日 13:00-16:30

# 今回（2023年3月11日）

## 「物理法則と数学と宇宙の関係」

- 1 何を問題としているのか
- 2 「現在観測できる宇宙」はほんの一部
- 3 マックス・テグマークによるマルチバースの4分類
  - 3.1 レベル1 マルチバース
  - 3.2 レベル2 マルチバース
  - 3.3 レベル3 マルチバース
  - 3.4 レベル4 マルチバース
- 4 人間原理：マルチバースの選択律
- 5 レベル4 マルチバース ～実在 = 数学的体系 = 物理法則～

1 何を問題としているのか



# なぜ法則は数学で正確に記述可能なのか

## ■ 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

## ■ アルベルト・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

## ■ 実は、世界（法則）と数学は同じものなのでは？

# 宇宙は法則にしたがっている

- 宇宙には物理法則がある
  - 物理法則に矛盾する現象は（知られてい）ない
- 物理法則は数学（微分方程式）を用いて書き下せる
  - その微分方程式は、宇宙の現象を近似するのか、あるいは厳密に記述し尽くせるのかはわかっていない
  - しかし、その方程式を解いて得られる数学的な解が、以前知られていなかった新たな現象を正確に予言してきたことは事実
- なぜ宇宙の法則は数学で書かれている（ように見える）のか
  - ⇒ 「物理法則とは宇宙の幾何学的性質を数式で表現したものである」
  - この（意味不明な）主張を掘り下げるのが今回の目的

# 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



# あらかじめお断りしておくのと、、、

- 前回は、すでに確立した物理学に基づいたものであり、安心して信じていただいても良い
- 今回の話は、現在の物理学に（ある程度）基づいた予想・仮説というべきで、本当に正しいのかは責任を持ってない
  - 現在知られている物理学とは矛盾していないという意味において、決して非科学的な怪しい仮説というわけではない
  - 一方、その真偽を検証する実験は不可能であり「科学的仮説はfalsifiableであるべき」とするカール・ポPPERの定義は満たさない
  - 物理学や天文学を突き詰めると、やがて既存の確立した物理学の枠内では解決できない(falsifiableではない)哲学的な疑問にたどり着いてしまう
  - 非科学的（科学と矛盾する）とまでは言わずとも、不科学的（科学では取り扱えない）な「神」を導入することなく、科学の枠内で森羅万象を理解する試みの一つだと解釈してほしい

## 2 「現在観測できる宇宙」はほんの一部

# 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？
- もしあるならそこに広がる風景はこの世界と同じなのか？

# 地球は平面か？



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？





# 世界の相対化：日本を俯瞰する

国際宇宙ステーション

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


# 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/>

この星空の先に  
さらに別の世界が広がっているのか？



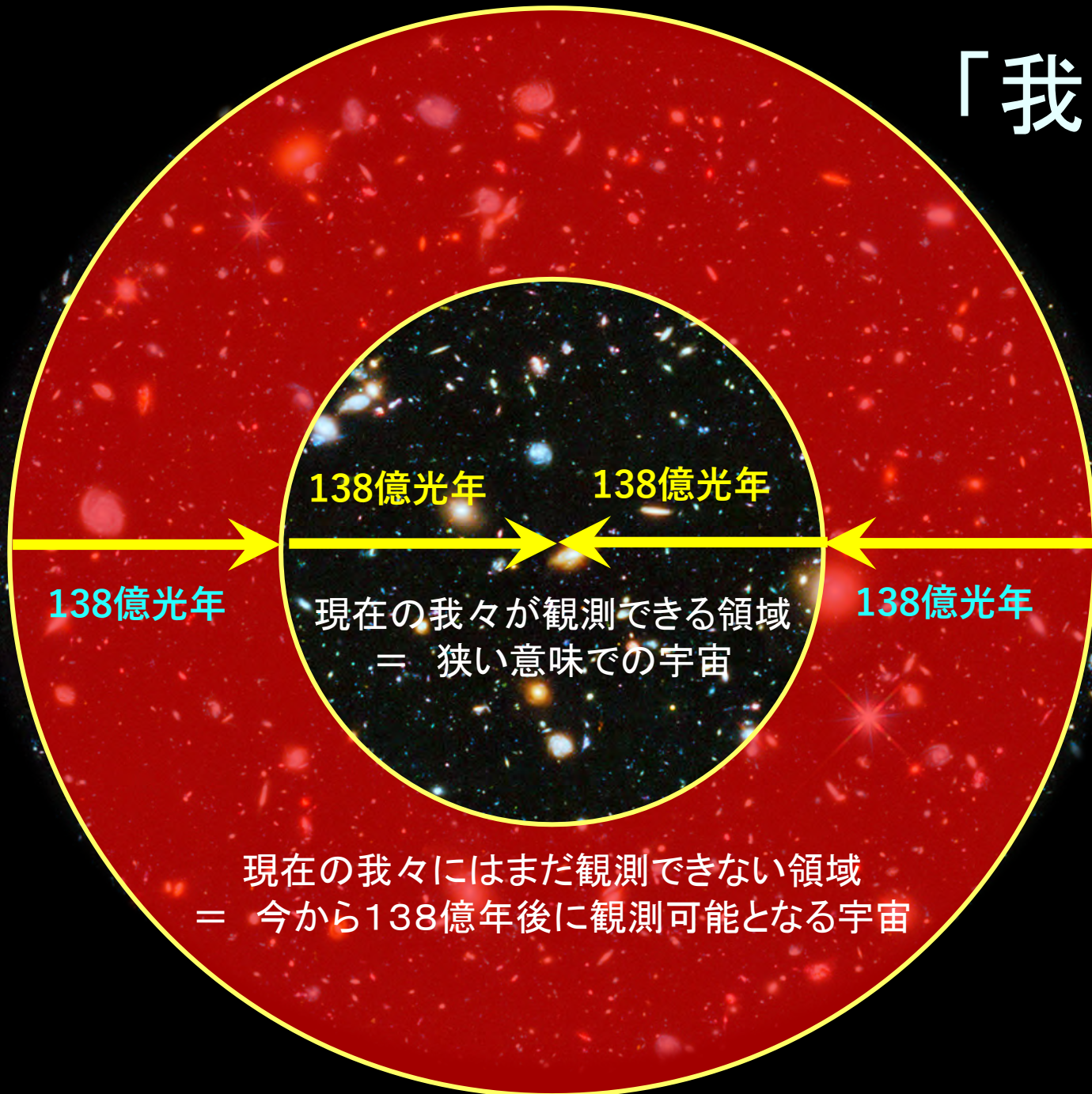


現在観測できる宇宙  
(地平線球)の先にも  
観測できない別の世界が  
広がっているのか？

# 「宇宙」は異なる意味で用いられているため混乱を招く

- 宇宙 = 空間 + 時間 (= 天地四方上下 + 往古来今)
  - 語源：淮南子（紀元前139年の中国の哲学書）
- 宇宙 = 半径138億光年の地平線球内の観測可能領域
  - 天文学者が宇宙と言う場合は、ほとんどがこの意味
- 宇宙 = 地球外空間あるいは太陽系 = space
  - 惑星科学や天文学における観測探査機などの場合に多い
  - *“Space, the final frontier. These are the voyages of the starship Enterprise. It’s five-year mission, to explore strange new worlds, to seek out new life and new civilizations, to boldly go where no man has gone before...” (Star Trek)*
- ○○の宇宙 = 人文系で格好づけに用いられる意味不明なレトリック

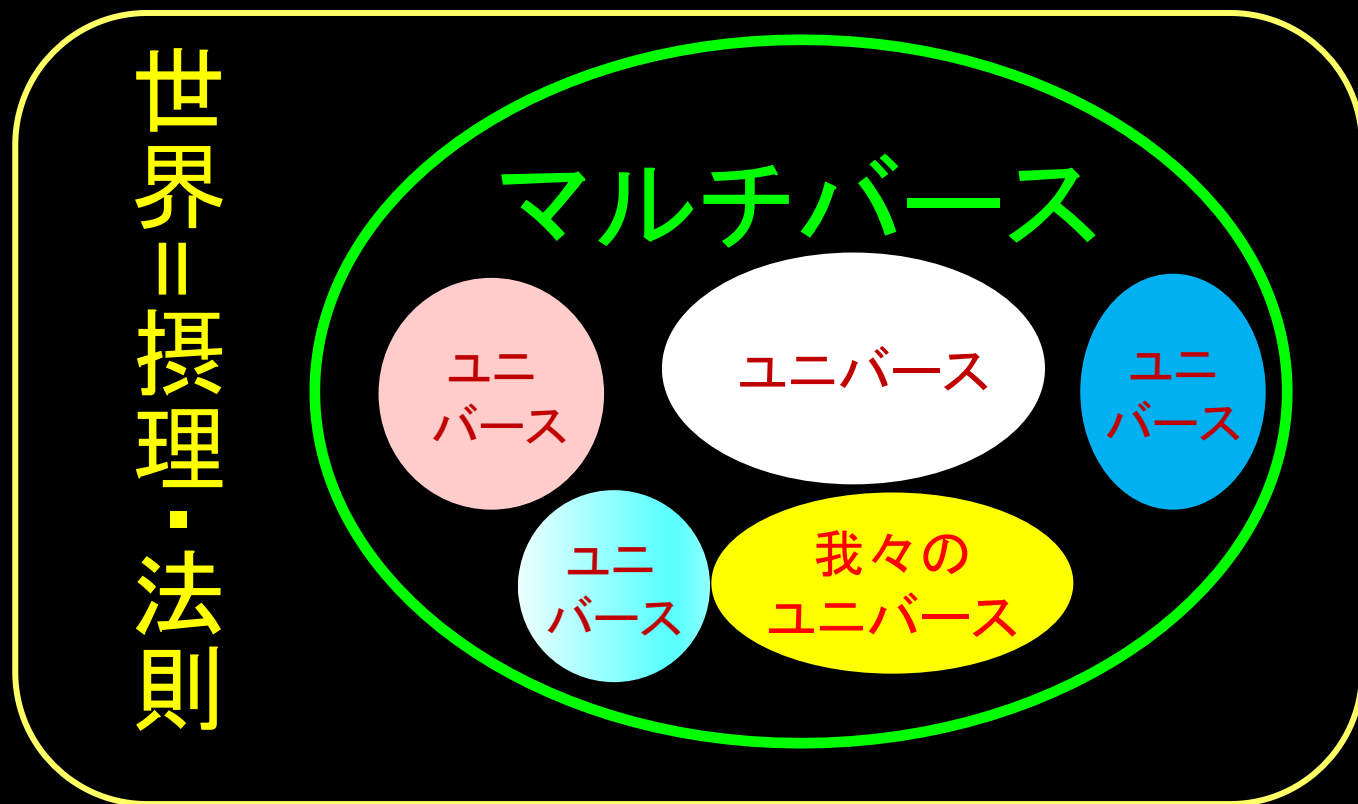
# 「我々が観測できる」宇宙 =地平線球



- 現在われわれが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の物理学的考察から推定できる
- しかし、どこまでも遠くに行けば、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」というよく聞く質問は、「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、信教の自由はもちろん遵守するのでご安心を

### 3 マックス・テグマークによる マルチバースの4分類



# 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

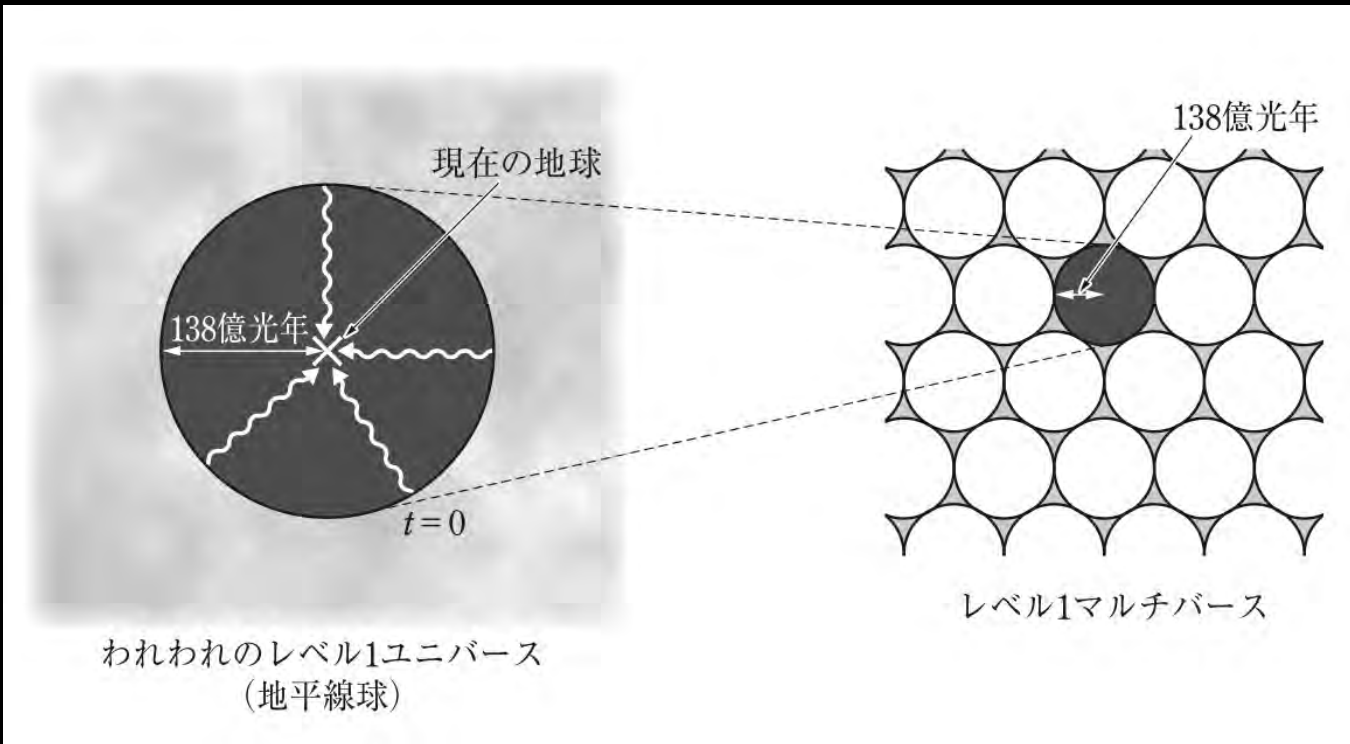
レベル	説明
1	現在観測可能ではない地平線の外側にも、同様のユニバースが無限に存在。それらは徐々に観測可能な領域に入る。これら同じ物理法則をもつユニバースの集合がレベル1マルチバース（これをマルチバースと呼ぶかどうかは定義の問題で、存在は確実）
2	無限個のレベル1マルチバースは、原理的にも因果関係を持たないまま、階層的に存在するかもしれない。それらは物理法則が異なるかもしれない。それらの集合をレベル2マルチバースとする
3	量子力学の多世界解釈に対応する無数の時空の集合。レベル3マルチバース内の異なる元を遍歴する軌跡の一つが我々のユニバースであると解釈することができる
4	異なる数学的構造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

# 3-1 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ユニバースに合体し続けていくことに注意

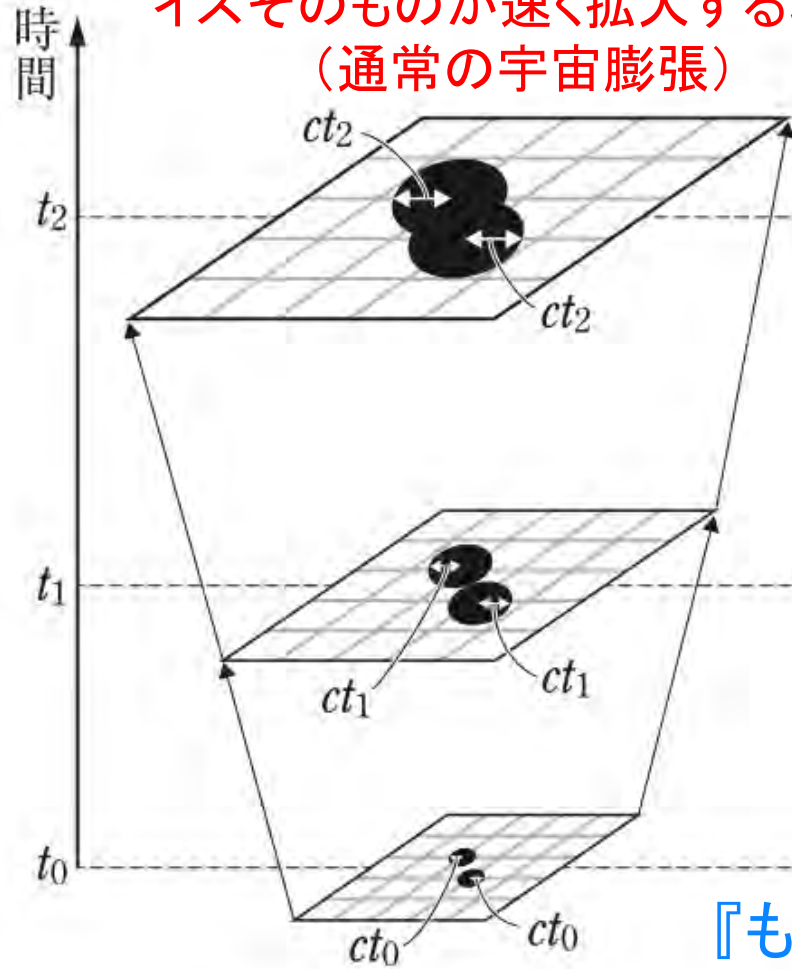
## 3.2 レベル2マルチバース

### 因果関係を持たない異なるレベル1マルチバースの集合

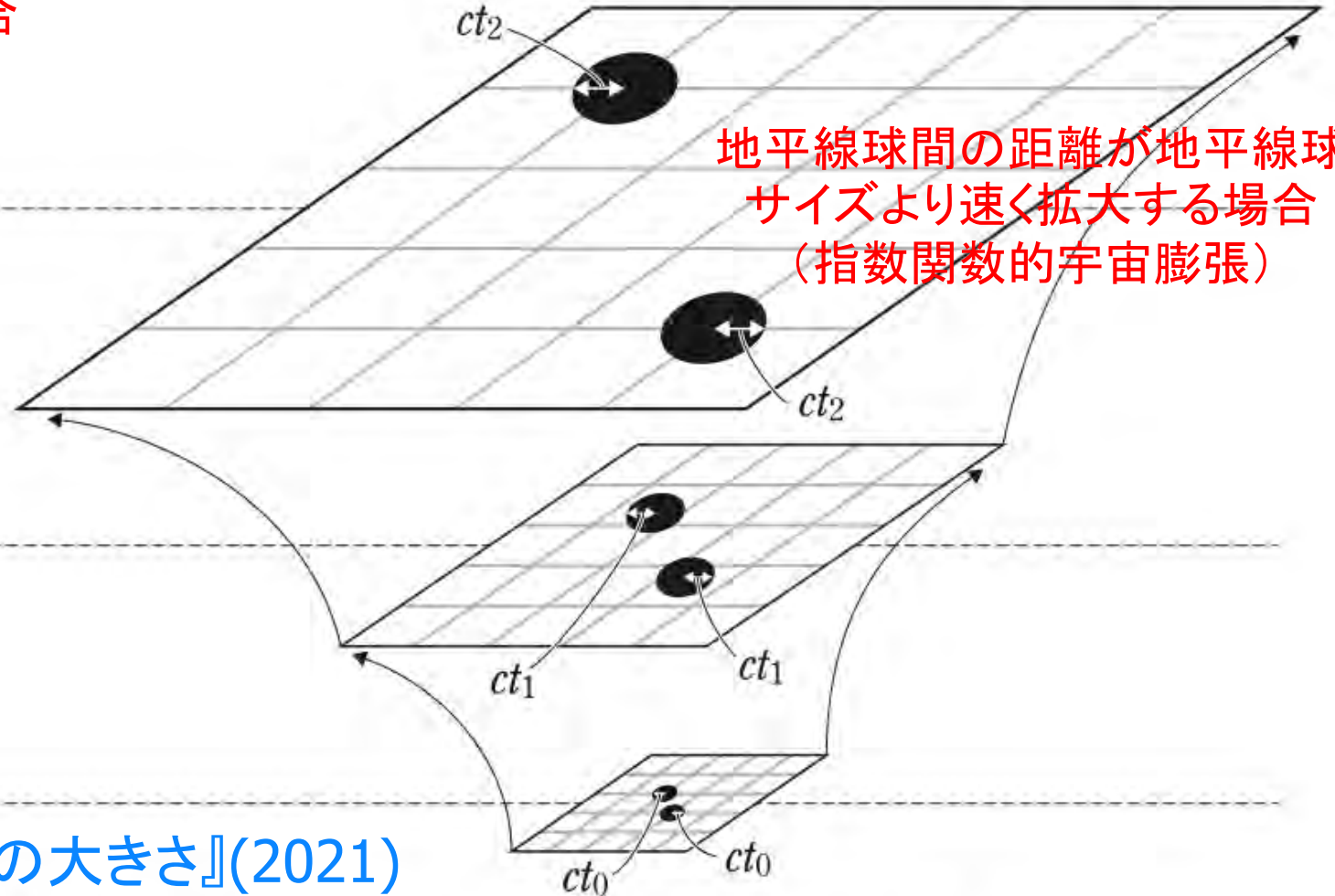
- 同じレベル1マルチバースに属する異なるレベル1ユニバース同士は同じ時空と物理法則を共有している
  - 現在は因果関係を持たないのだが、時間が経てばやがて互いの存在を確認できるようになる
- これに対して、レベル2マルチバースを構成する異なるレベル1マルチバース同士は、仮に同じ時空上に存在していようと、互いに因果関係を持たない（さらには異なる空間次元に存在しているかも）ので、互いの存在は決して確認できない
  - 現在の宇宙は膨張が加速しているため、時間が無限大経過しても地平線の大きさが増加せず、外側と因果的に孤立した領域を形成する可能性が高い

# 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)



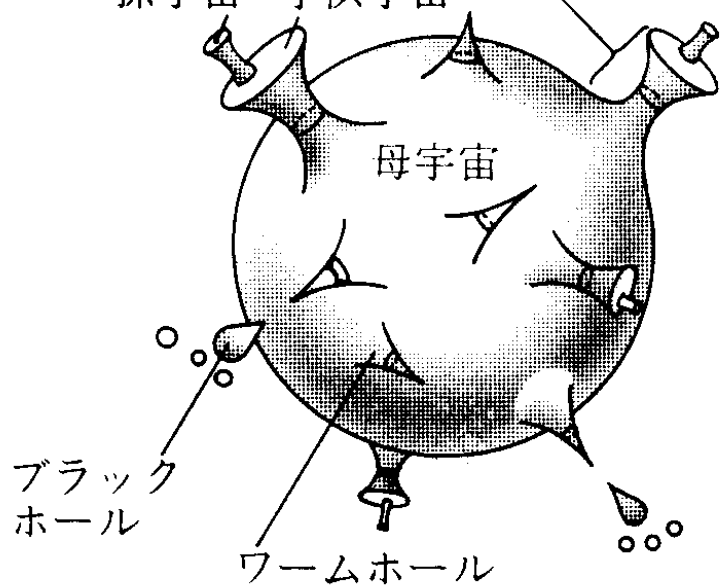
地平線球間の距離が地平線球サイズより速く拡大する場合  
(指数関数的宇宙膨張)



『ものの大きさ』(2021)

# 例えば、インフレーション中の宇宙の多重発生

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

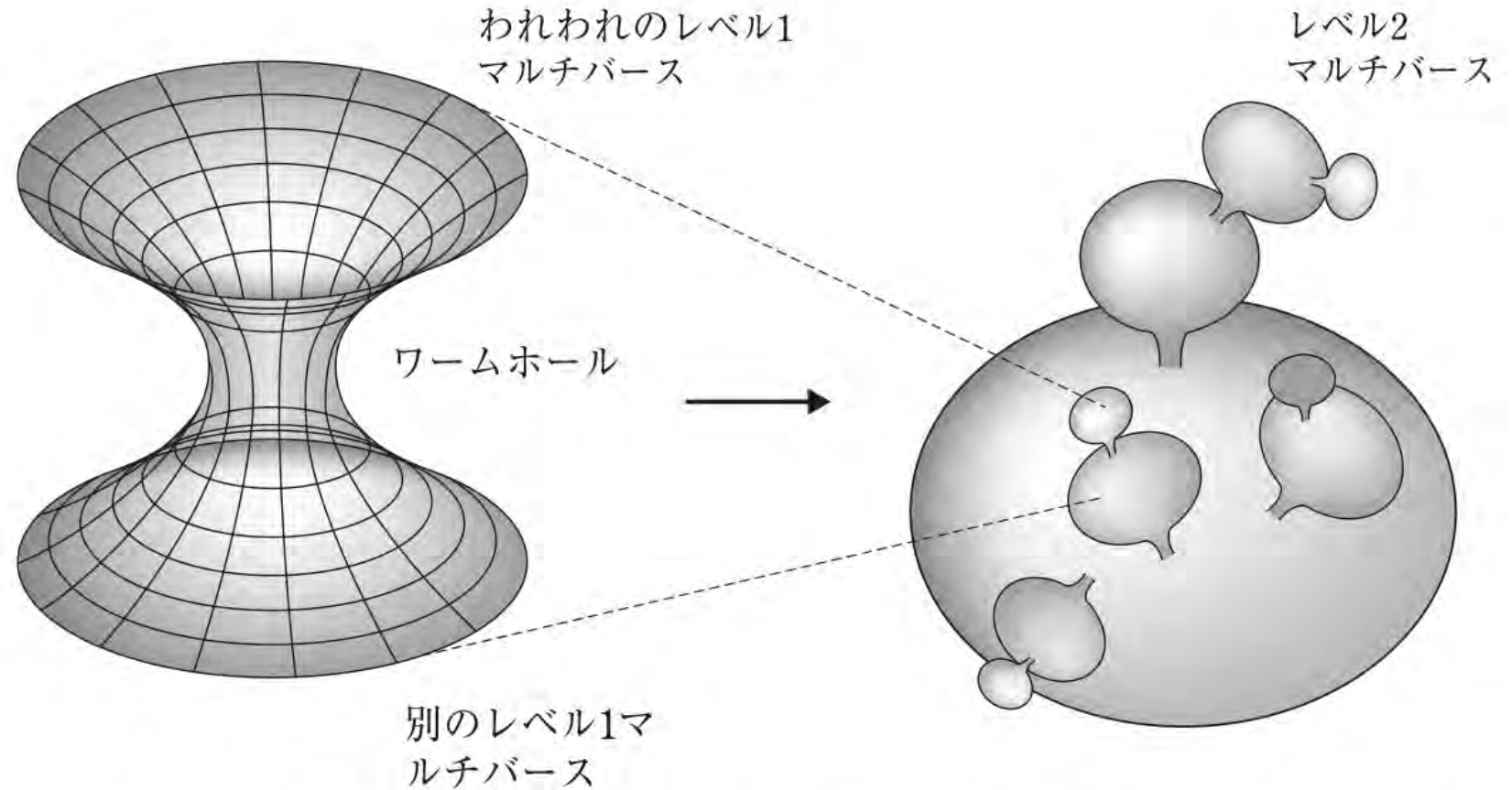
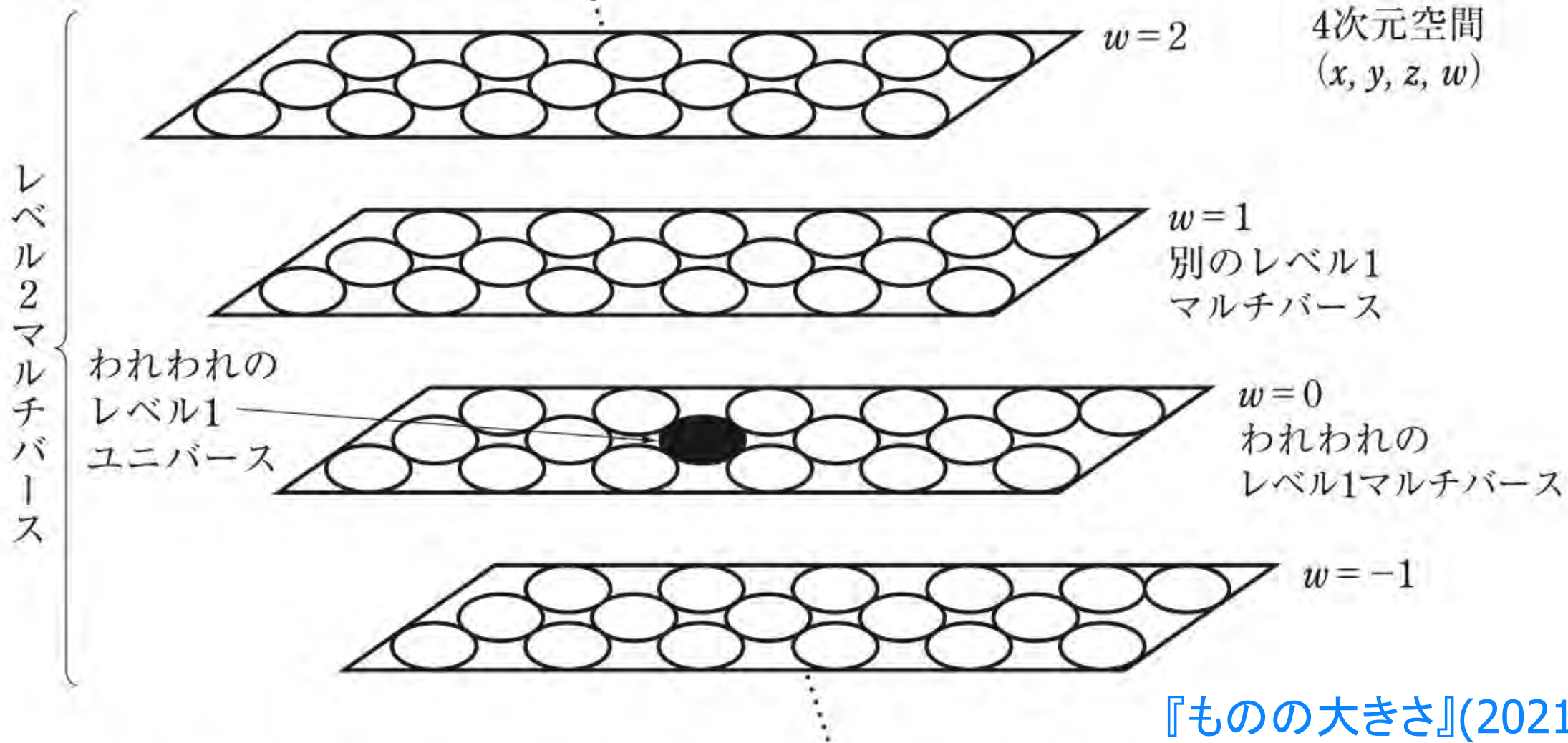


図 6.5 ワームホールで隔てられた異なる宇宙の集合としてのレベル 2 マルチバース. 左のようにワームホールで隔てられた宇宙 (レベル 1 マルチバース) が階層的にどこまでも続き, 右のような集合としてのレベル 2 マルチバースを構成する可能性がある. そのなかの 1 つがわれわれが属するレベル 1 マルチバースに対応する.

『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

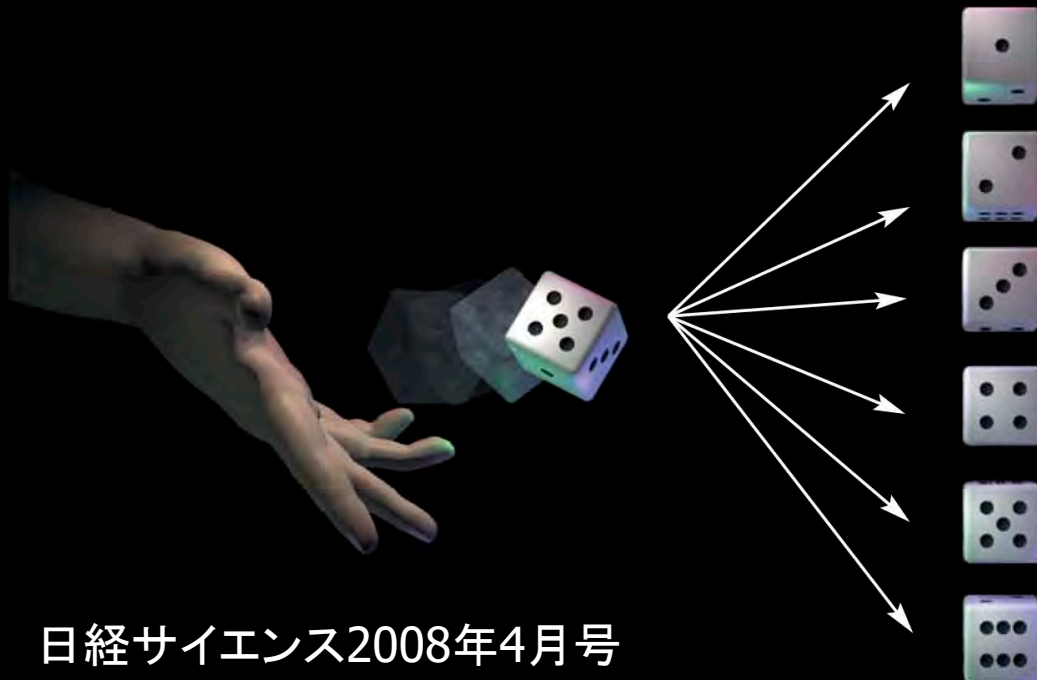


『ものの大きさ』(2021)

# 3.3 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**実在すると考える**
- 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に観測者が分岐する(が自分はそのことを知り得ない)
- 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。



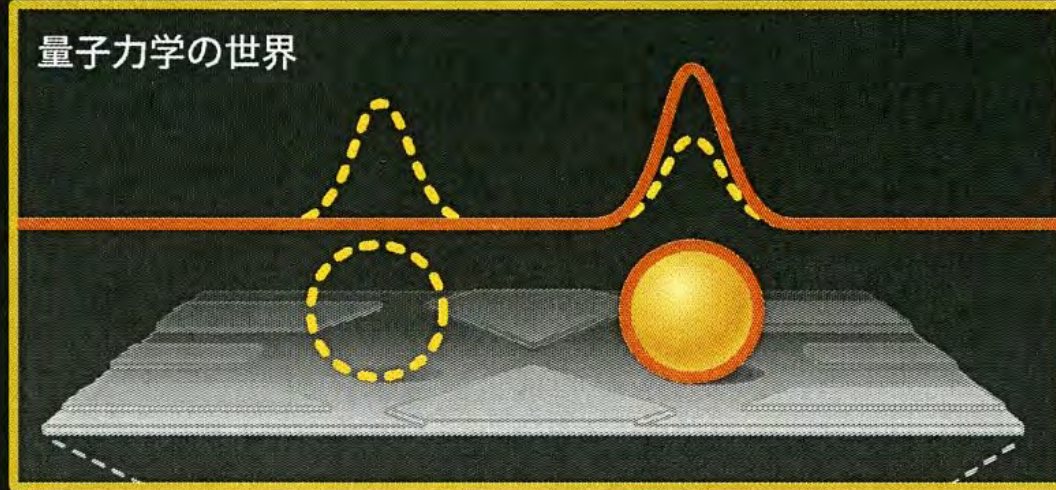
# 量子力学のコペンハーゲン解釈

日経サイエンス2008年4月号

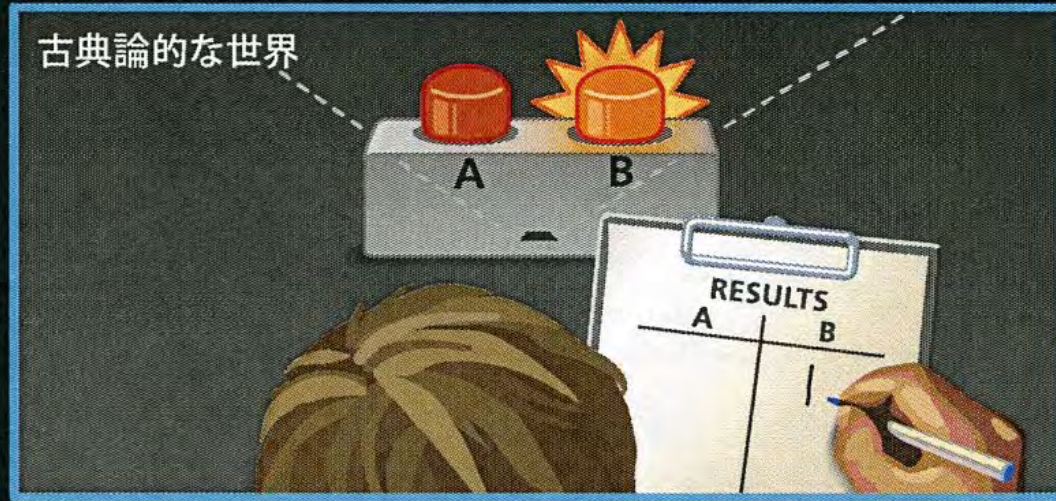
## コペンハーゲン解釈

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



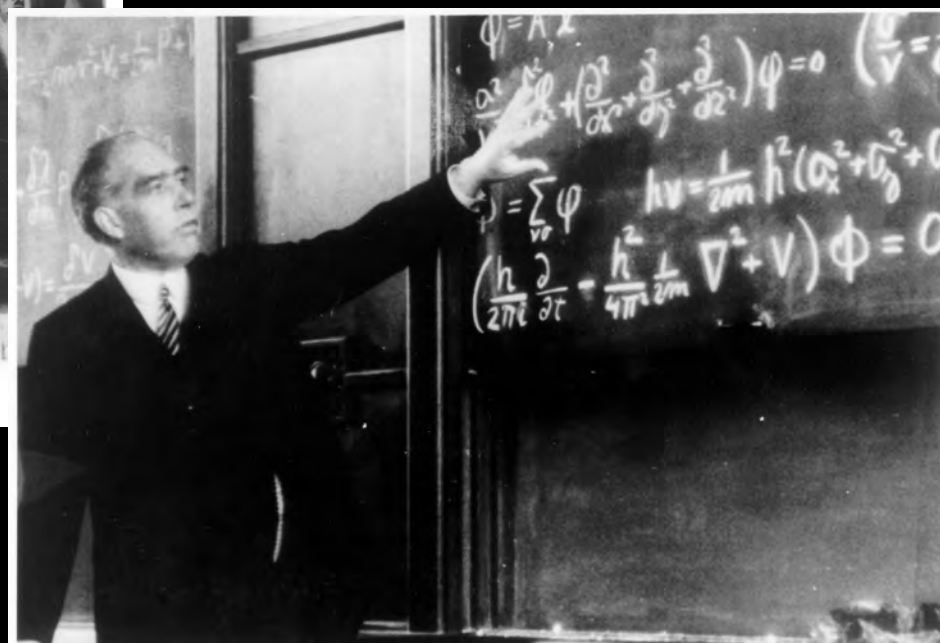
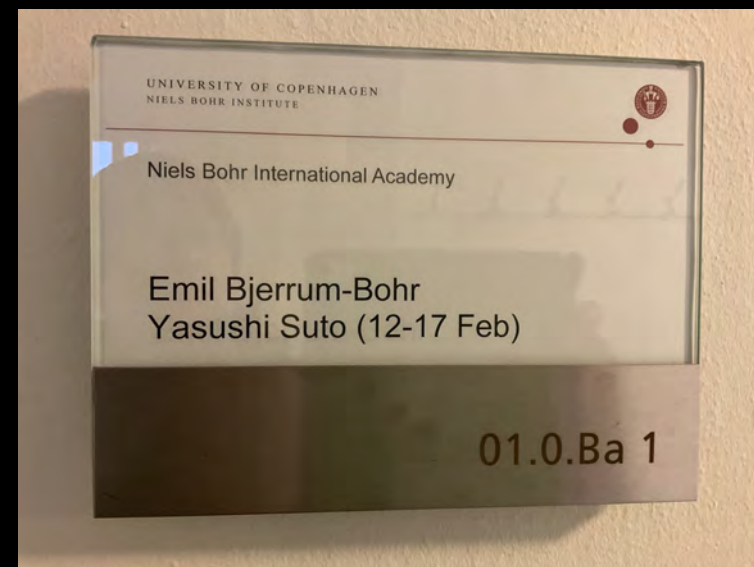
量子力学の建設に大きな寄与をしたニールス・ボーアが、コペンハーゲンで発展させたもので、現在の量子力学の標準的「解釈」

# 世界3大がっかり名所@コペンハーゲン



ニールス・ボーア研究所  
(2023年2月14日)





# 量子力学の多世界解釈

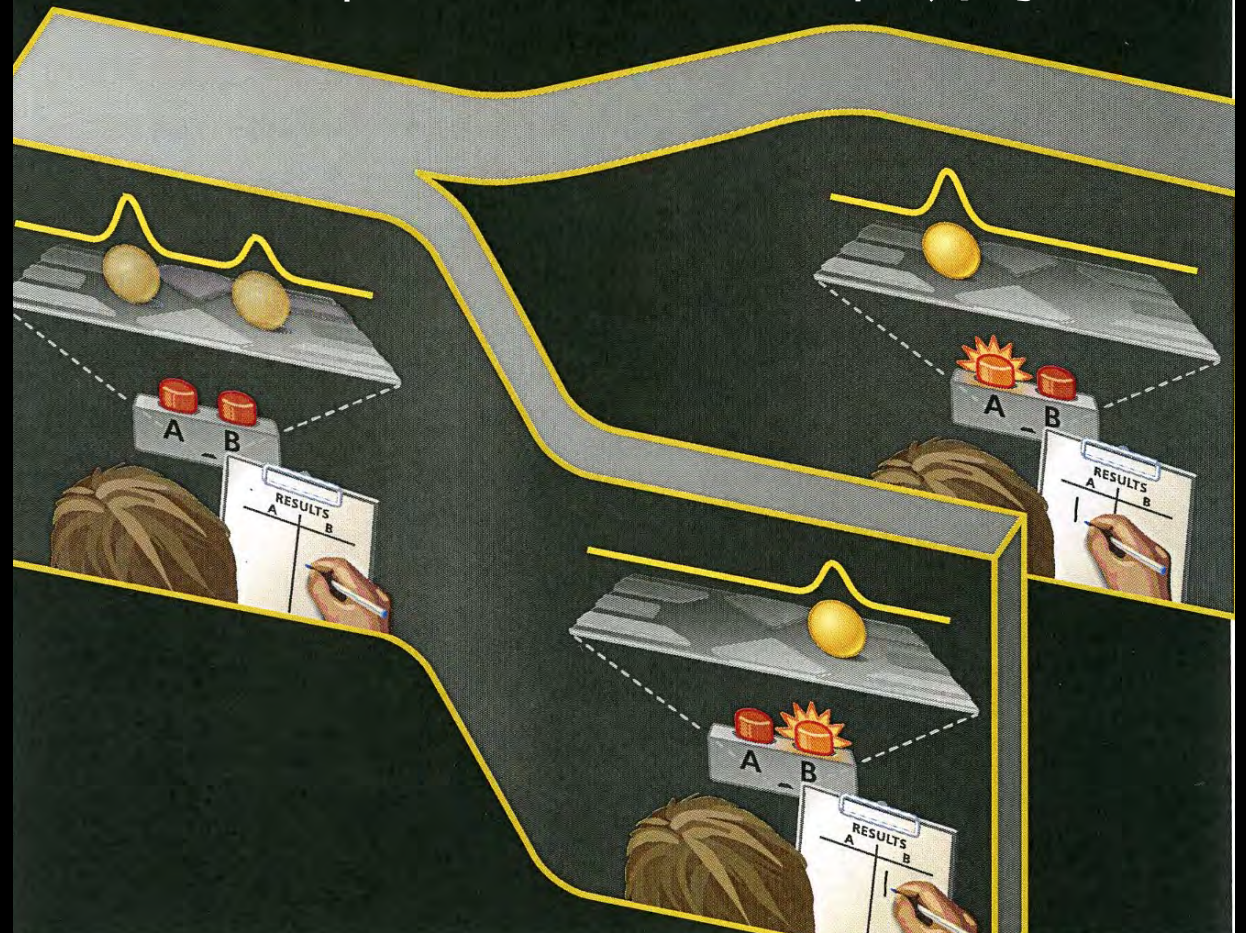
- コペンハーゲン解釈によれば、「我々が住む」唯一の宇宙には異なる量子状態が共存しており、なんらかの観測を行って初めてそのうちの一つだけが選ばれて確定する
  - 観測前には、生きた猫と死んだ猫の状態が共存しているし、右の窓から侵入した波乃光子も左の窓から侵入した波乃光子も同等に状態として共存している
- そうではなく、これらの異なる状態はすべて実現するのであり、それら一つ一つの実現した結果が異なる宇宙として実在していると考えるかどうか（エベレットの多世界解釈）
  - 異なる状態にある無数の宇宙が並行に存在し、観測者は観測するたびに自分がそのなかのどの宇宙に存在しているか「確認」するに過ぎない

# 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し、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
- 「解釈」という言葉からわかるように、この解釈を採用しようと、量子力学の結果がコペンハーゲン解釈と異なるわけではない

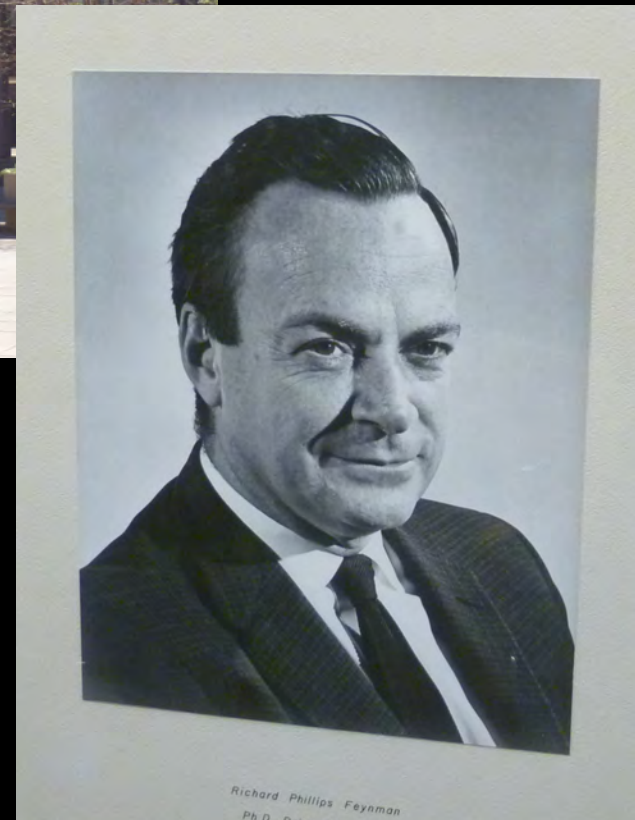
エヴェレット解釈は、観測する側である測定器（と測定する人）を、量子力学の通常の原理と方程式に従うもう1つの量子系であるとみなして、観測の過程を解析したという点で革新的だ。解析の結果、エヴェレットは次のように結論づけた。観測後に得られるのは異なる観測結果の重ね合わせであり、その重ね合わせの各要素は、分岐した宇宙に対応するそれぞれの分枝のようなものだ。私たちがマクロな世界で重ね合わせを見ることができないのは、それぞれの分枝にいる多くの「私」は、自分がいるその分枝の中のことしか知覚できないからだ。

日経サイエンス2008年4月号



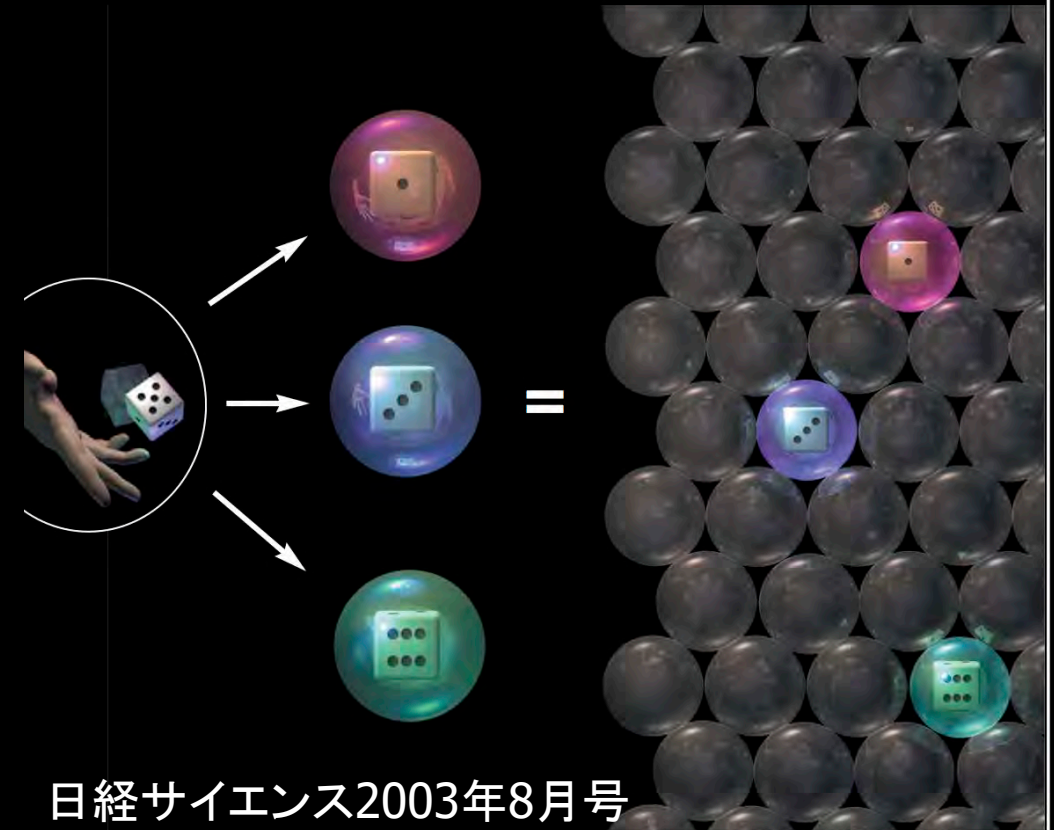
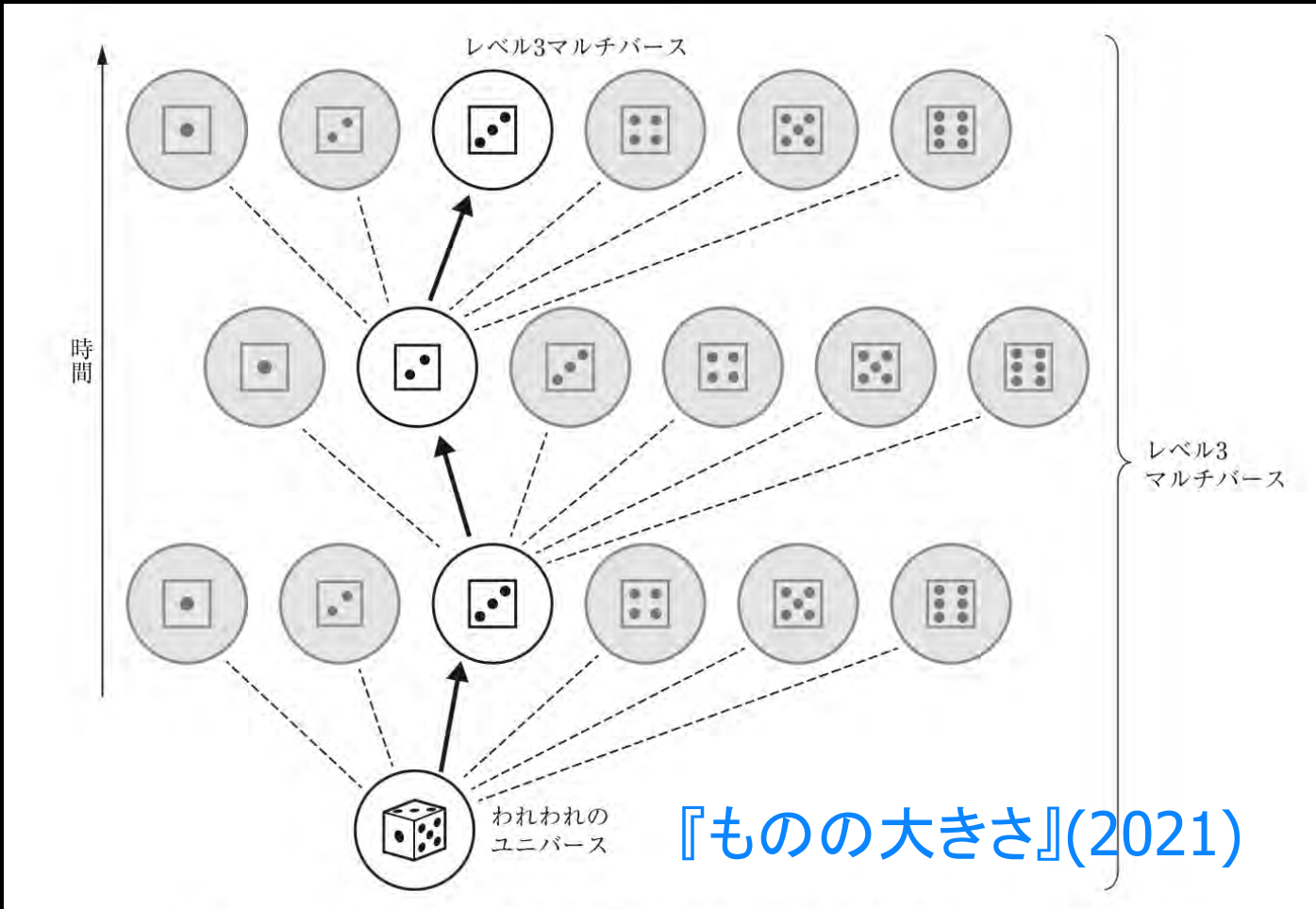


JADWIN HALL



Richard Phillips Feynman  
Ph.D.

# レベル3 マルチバースの例

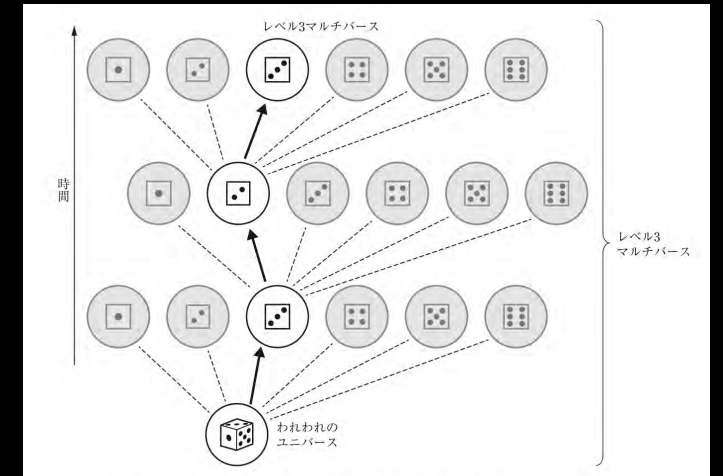


- 量子サイコロ(決定論的な古典サイコロではないことに注意!)を振るたびに世界が分岐すると考えても良いし(左)、無数に存在する量子的並行宇宙のどれかに落ちて着くと考えても良い(右:その集合がレベル3マルチバース)



# 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)



# 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)

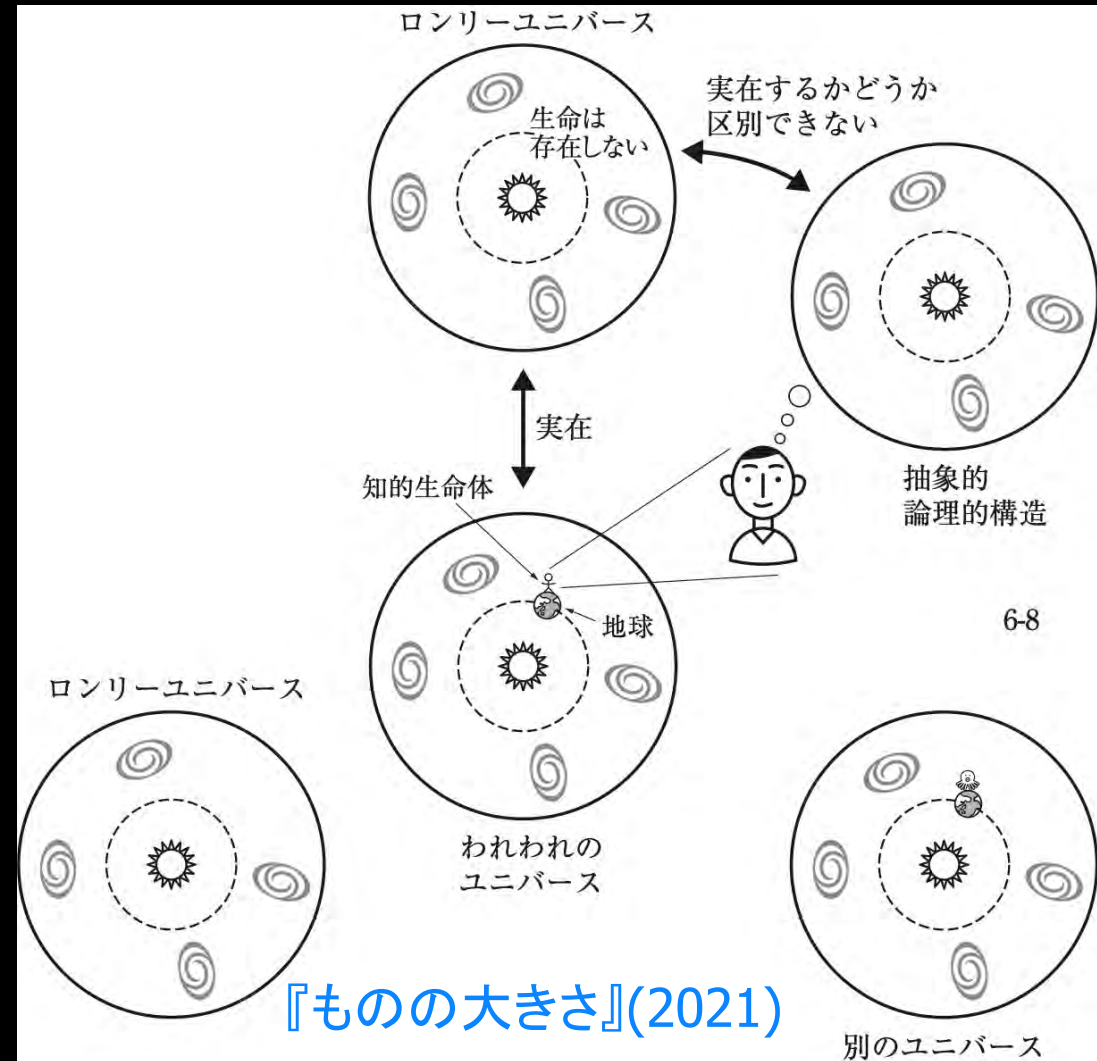
- コンプライアンス的注意：仮に多世界解釈に完全に納得したとしても、決して真似してはいけません
- 瞬時に死に至らしめる量子論的な（決定論的ではない）弾丸発射装置
  - 弾丸が発射するかしないかは半々の確率で量子的に（因果的ではなく）決まる
  - その装置の試し撃ちを外から見ていると、平均2回に一回、実弾が発射される
- 実際にその装置の前に自分の頭をおく
  - もしマルチバースがなければ、平均としては2、3回後にはほぼ確実に死んでしまう
  - もしレベル3マルチバース（あるいは並行宇宙）が実在するなら、自分が死んだ宇宙は認識できないからそこで終わり。一方、空撃ちが起こった宇宙では自分を認識できる。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

## 3.4 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



# 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（標準的考え）
  - 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？
- 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）
  - 物理法則とまで言わずとも、異なる物理定数の組みを持つ宇宙が無数に存在するとするのがレベル2マルチバース
  - レベル4はそれをさらに過激に推し進めたもの
- 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が実在するという主張と区別できないのでは？

# 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
- とすれば宇宙そのものが法則(摂理、論理構造)と同じなのでは
  - 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である。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して解釈できる

## 4 人間原理：マルチバースの選択律

# 森羅万象はどこまで必然のみで理解できるのか

- 科学のゴールは、この世界（あるいは我々のユニバース）の振る舞いを少数の基本原則から説明し尽くすこと
  - それが本当に可能なのかどうか、保証はない
  - だからこそ、ゴールとして掲げる意味がある
- 科学の終着点の2つの可能性
  - 究極理論 (Theory of Everything) を発見し、全てを必然的に説明し尽くす
  - ある程度少数の基本法則にまでは還元できるものの、結局なぜそれらでなくてはならないのかまでは説明できず、どこかで偶然を認めざるを得ない
- 究極理論といえどこの宇宙を一意的に説明するには、初期条件まで決める原理が必要だが、これは不可能では？
- この初期条件の選択の偶然が、世界を認識する人間の存在を保証しているのでは？



# 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



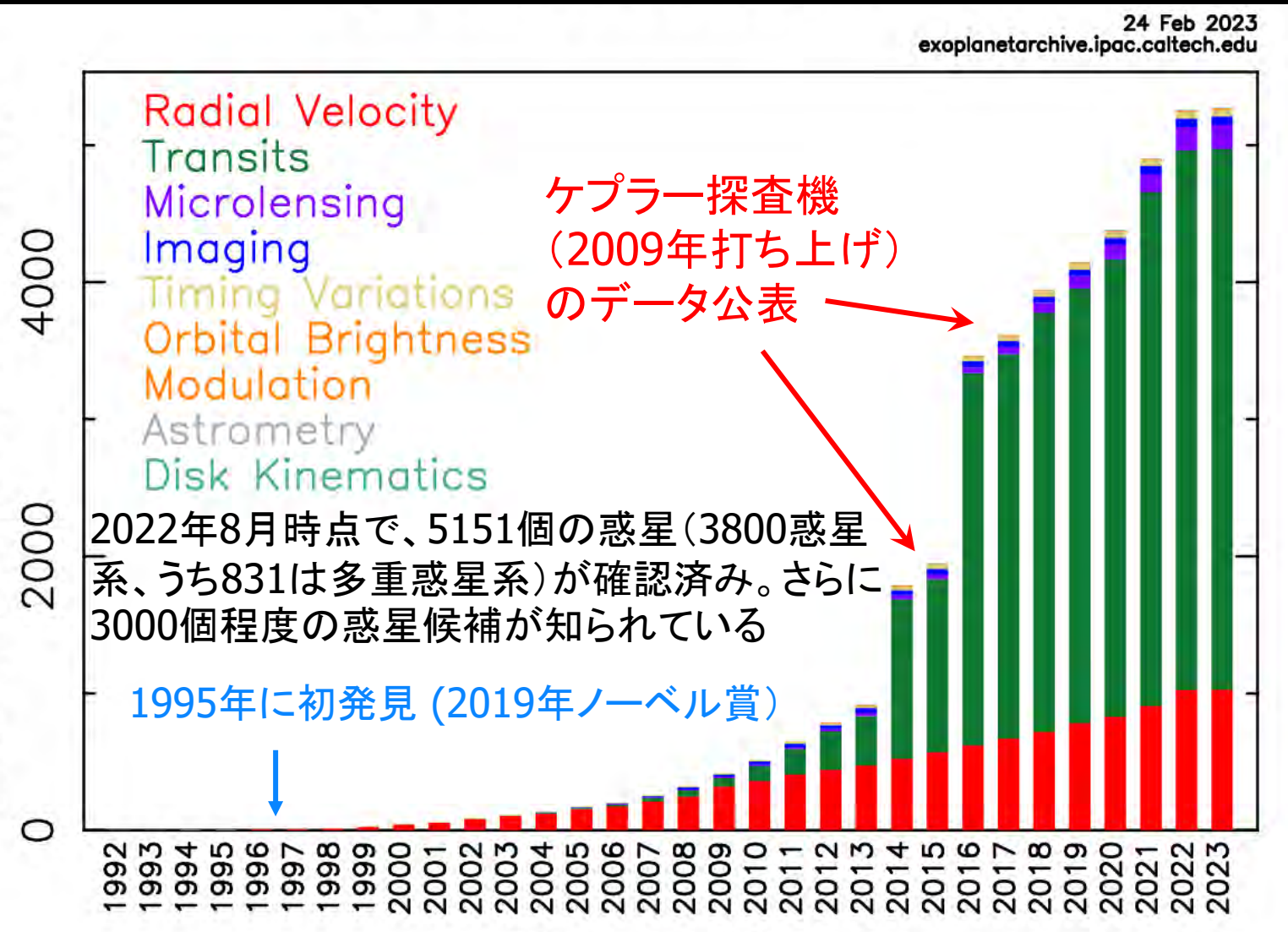
- **例題**: 地球上に液体の水が存在するには、太陽との距離が現在の値と±10%以内の狭い範囲になくなくてはならない。これから何かわかることはあるのか？

# 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

人間原理とは何か？

## なぜ宇宙は人間に都合がよいのか？

宇宙のことが明らかになればなるほど、ある一つの疑問がわいてきます。「この宇宙は、人間（あるいは知的生命）が存在するために都合がよい状況が見事に整いすぎている。まるで宇宙が『知的生命よ、誕生しなさい』とでも言っているかのようだ。なぜ宇宙は、人間にとってこれほど都合よくできているのだろうか」。たとえばプラスとマイナスで引きつけ合う電気の力がほんの少し強かっただけでも、人間は誕生できなかったはずだといえます。

この疑問に対して、誰もが納得できる答はまだみつかっていません。ただし近年、「人間原理」という考え方が、物理理論から導かれた「マルチバース（多宇宙）」という宇宙の描像と組み合わせることで、支持を広げてきています。人間原理とマルチバースによる新しい宇宙観をのぞきみてみましょう。

協力

須藤 靖

東京大学大学院理学系研究科教授

### 悩める人類

右ページイラストの人間のシルエットは、人類が「宇宙はなぜこれほど人間の存在に都合がよい条件がそろっているのか」と頭を悩ませている状況の象徴である。大きな球体は人類が所属する宇宙全体をあらわしており、シルエットが入っている小さな球体は、人間にとって観測可能な宇宙の領域をあらわしている。大きな球体の外側にある色とりどりの球体は、私たちが所属する宇宙とは別の宇宙をあらわしたものである。これら別の宇宙では、物理法則などが、私たちの宇宙とはことなっている可能性がある。

## ■ 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？

Newton 2016年4月号

# 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、同等にありえない事象(人間の存在)と関係づ
- $P(\text{不思議なこと}) \ll 1$  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

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

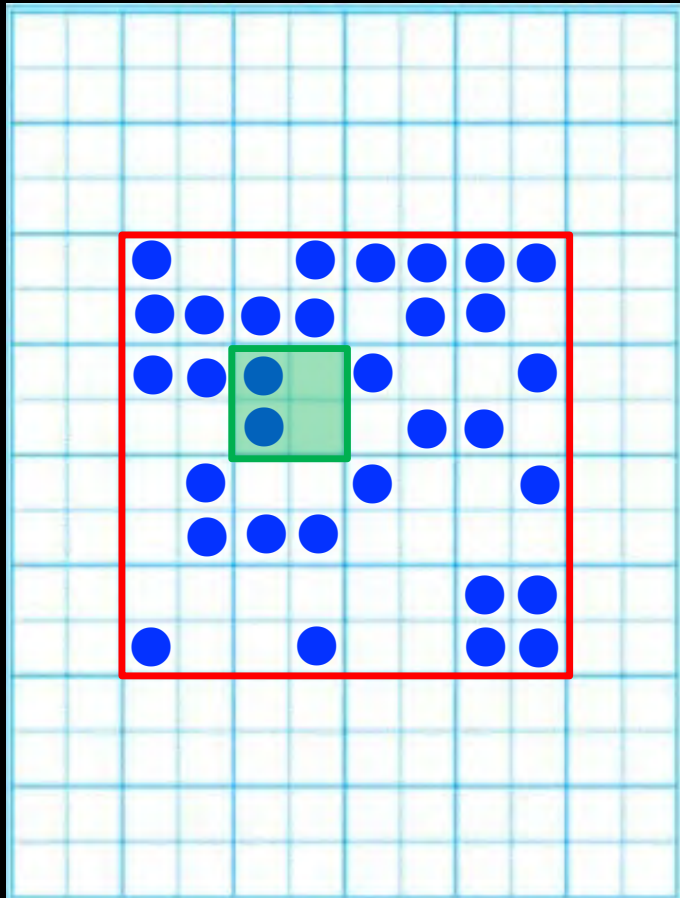
- 不思議さが減り、何か心が安らぐような気がする(自然科学と呼ぶべきかどうかは別として精神面では大切)
  - しかし、金銭を要求するたぐいのものではない(あってはならない)



# めったに起こらない ≠ 起こらない

- *Everything not forbidden by the laws of nature is mandatory*  
— *Carl Sagan, Contact*
  - 確率Pの事象をN回試行すると、その事象が起こる期待値はNP
  - つまり、どれほどPが小さくとも0でない限り、 $N(\gg P^{-1})$ 回試行すれば、その事象は1回以上実現するはず
- 例) サイコロを100回振って、1の目が100回連続して出る
  - 確率  $P=1/6^{100}=10^{-78}$
  - しかしこれは「サイコロを100回振る」を $10^{78}$ 回繰り返せば、平均的には1回起こらないとおかしいことでもある
  - サイコロを一回振るのに1秒かかるとすると、 $100秒 \times 10^{78} \doteq$  (現在の宇宙年齢) の $10^{62}$ 倍だけの時間をかければ起こって当然

# 有限自由度の系は、数多く集めれば必ず繰り返し現れる



- $2 \times 2 = 4$ のマス目内に、粒子があるかないかの2通りの可能性を持つ系は、 $2^4 = 16$ 種類しかない(左図の赤枠内)
- 左図には $2 \times 2$ のマス目は合計 $6 \times 8 = 48$ 個あるので、任意の特定の配置は平均的に3回現れる
- 外に広がるずっと大きな領域を考えれば、ある特定の配置(例えば緑枠の配置)は繰り返し何度も現れるはず
- 仮にそうでなければ、何らかの理由(物理法則あるいは詐欺師)によって、その特定の配置が禁止されていると考えるべき

- この議論の本質:有限自由度の系と(ほぼ無限に近い)広大な外界の存在

# キツテルの『熱物理学』にある常識的教え

- 運動方程式の可逆性は「十分に長い時間待てば、その系はたとえどんなに確からしくない配列であるにせよ必ず現れるはずである」ことを示唆する。しかしこれは誤りである。“十分に長い”とは長すぎて“決して現れない”と同じ意味だからである。
  - 問題4・4: タイプライターには44個のキーがあり、サルは1秒間に10のキーを打てるとする。『ハムレット』には $10^5$ の文字があるとしたとき、 $10^{10}$ 匹のサルが宇宙年齢( $10^{18}$ 秒)の間タイプライターを打ち続けると『ハムレット』は創作されるか。
    - その期待値は  $\frac{1}{44^{100000}} \times 10^{10+18+1} \cong 10^{-164316}$
- これは私が学部時代に読んだ優れた教科書。この解説も問題も素晴らしいし、常識的な時間スケール(宇宙年齢以下)を考える限り正しい
- しかし、非常識な時間スケールをものともしない宇宙論屋にとって、上述の解説は単なる間違いに過ぎない(論理的に破綻している)

# 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必ず実現する

- 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奇跡的な事実が納得できる

# 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？—

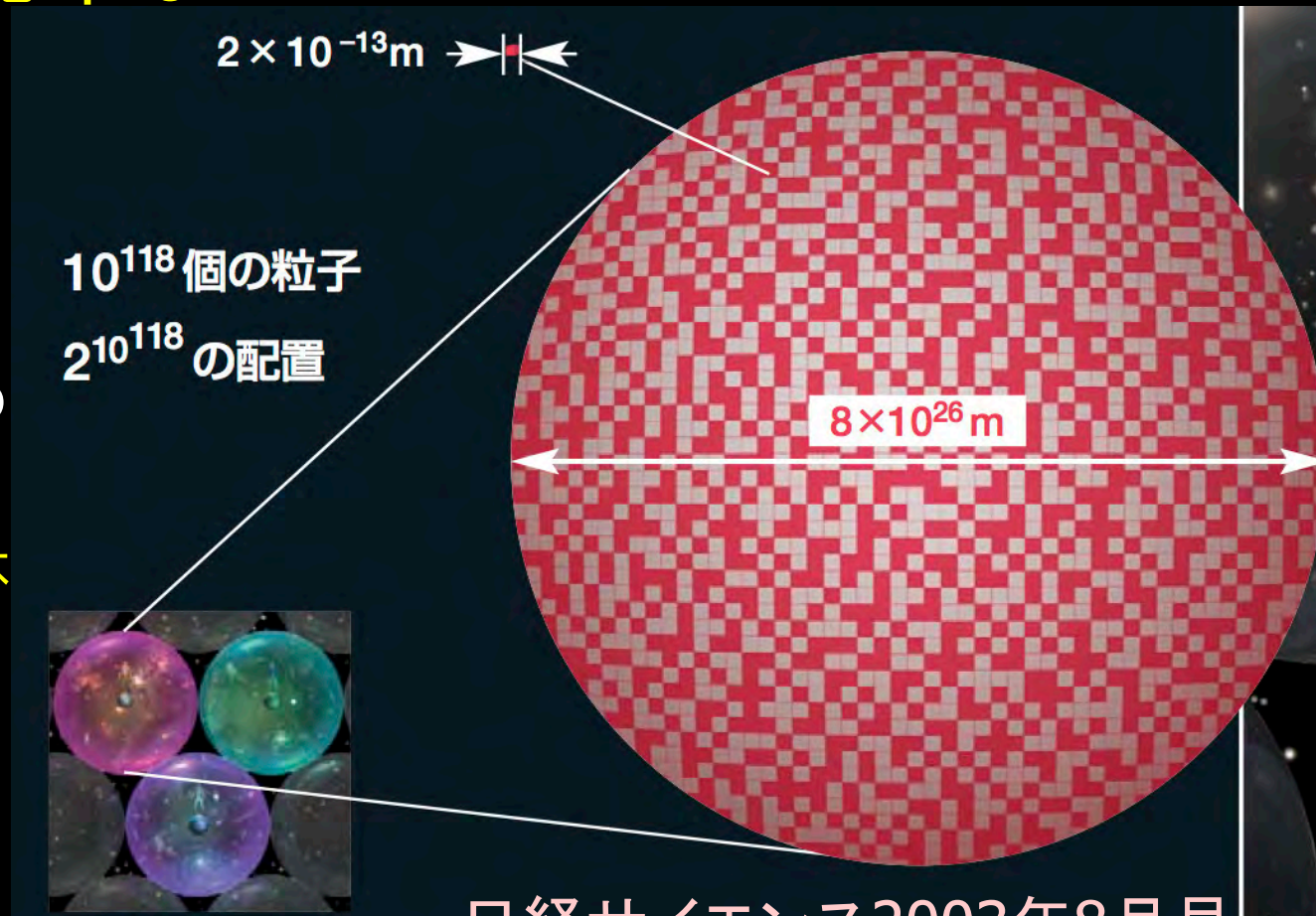


- この作業を繰り返していくと、いずれは近似ではなく本物(と区別できないクローン宇宙)に到達する？
  - すべての物質は有限個の素粒子からなる(量子論を無視する)
  - 時間と空間も連続ではなく離散的かも？
  - とすれば宇宙はデジタル情報に帰着するので、3Dプリンターで宇宙を創り続けると、いずれクローン宇宙が出現するはず？

# 我々の地平線球が持つ「古典的」情報量

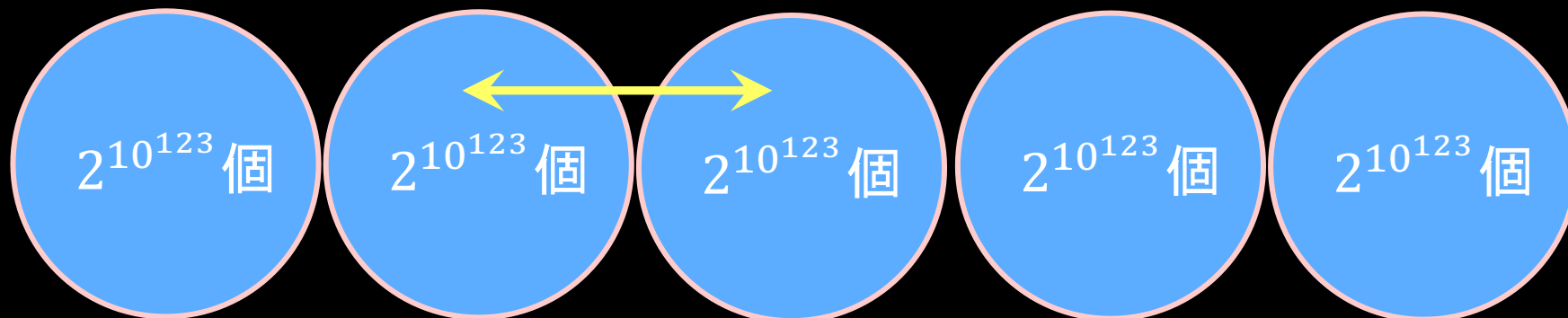
- 水素の原子核の大きさは $\sim 10^{-13}\text{cm}$
- 地平線球の半径138億光年は $\sim 10^{28}\text{cm}$

- 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



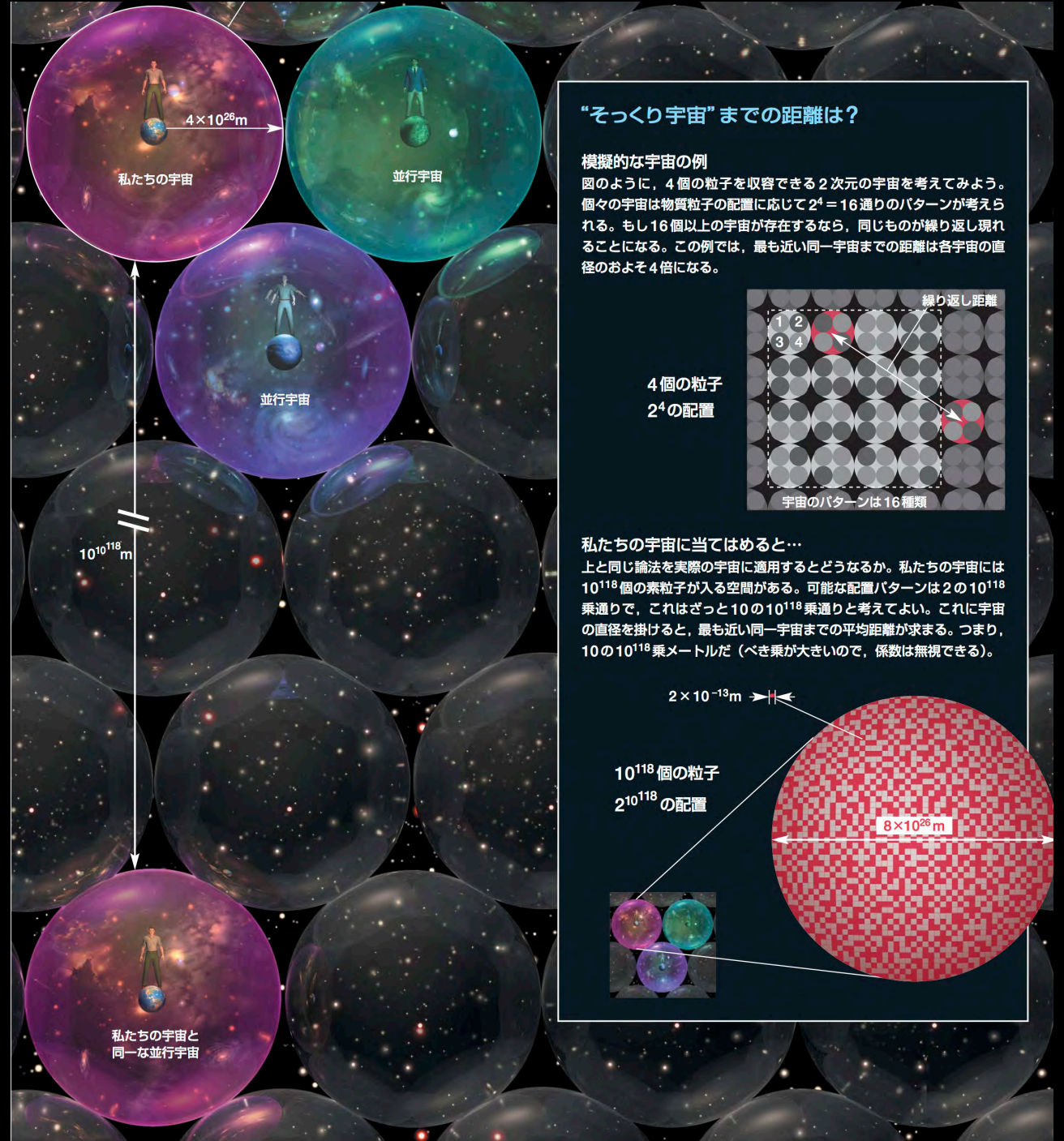
# 隣のクローン宇宙までの距離

- 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)  
138億光年  $\times$  (2の $10^{123}$ 乗) $^{1/3}$   $\sim$  (10の $10^{122}$ 乗)億光年



# 並行宇宙、さらには並行人間は実在するか

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





# 量子論的世界観の応用：自由意志は存在するか

## ■ 人間の心や意識もまた物理法則に従っているか

- (ほとんどの) 科学者はそう信じているはず(唯物論)
- かなりの人間はそうは思っていない(心身二元論)

## ■ 自由意志

- 我々は毎日自分の意志で行動していると思っている。しかし、唯物論＋古典的決定論に従えば、我々が自由に判断する余地はなく、すべては宇宙が誕生したときに完全に決まっているはず(単に我々はそれを知り得ないだけ)
- (特に哲学者が好きな) 未解決問題：自由意志は幻想か？
- むろん量子論的世界観からは気にする必要ないという考えもありうるが、人間の意識に量子論が本質的役割をしているかどうかは自明ではない

## 5 レベル4マルチバース

～実在＝数学的体系＝物理法則～

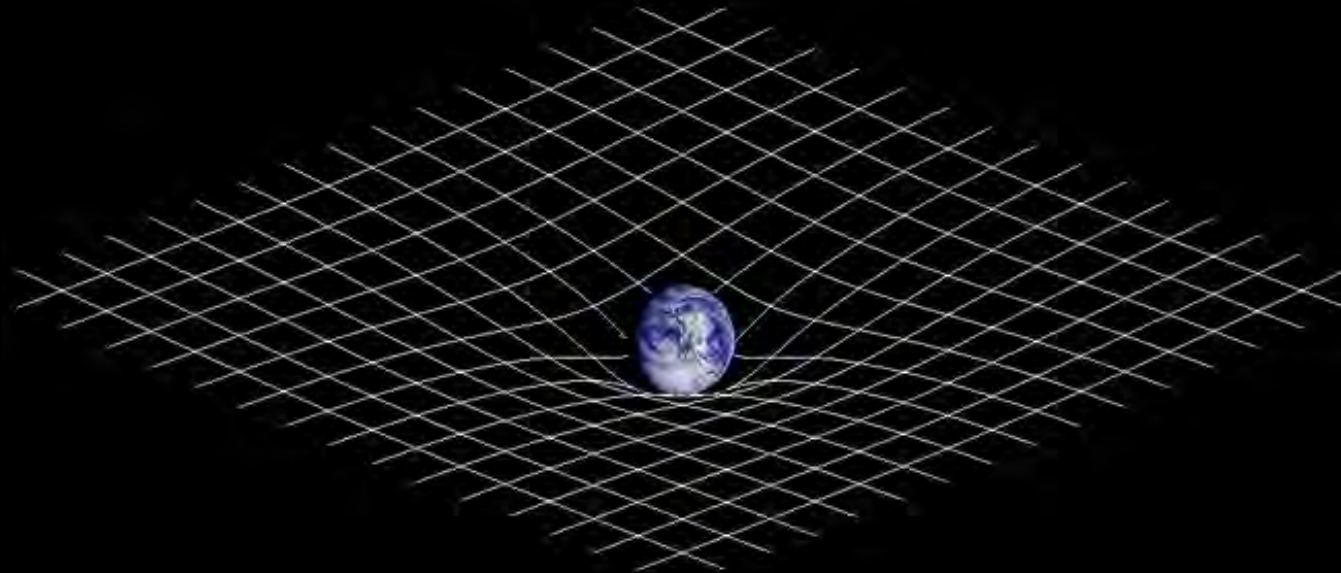
# 宇宙が数式にしたがっている理由

- 今回たどり着いた仮説は、宇宙 = 数式だからというもの
  - 単なる言葉遊びに過ぎないように思えるかもしれないが、物理法則は宇宙 (= 時空) の至るところに刻まれているという幾何学的解釈 (一般相対論はまさにその例となっている) を認めるならば、
    - 幾何学は数式で記述されるもの
    - 幾何学の対象たる宇宙が存在しなければ法則も存在し得ない
- によって、「宇宙 = 法則 = 数式」という関係が予想できる
- これは、まさにレベル4 マルチバースの考え方なのでは？
  - 無矛盾な数学的論理構造は、必ずそれに対応する幾何学的時空 (= 宇宙) を実在としてもつ。我々の住む宇宙はそのなかの一例に過ぎない。

# 物理学の幾何学化

= 物理法則は時空の各点に刻み込まれている

- あらゆる場所で時空は歪んでいる
  - その歪みに沿って物体は自然に動く = 物理法則
  - 一般相対論の粒子の運動方程式 = 数学的な測地線方程式
- これが物理学の幾何学化
  - 物理法則はあらゆる場所の時空の局所的性質として刻み込まれている



# ギリシャ哲学への原点回帰？



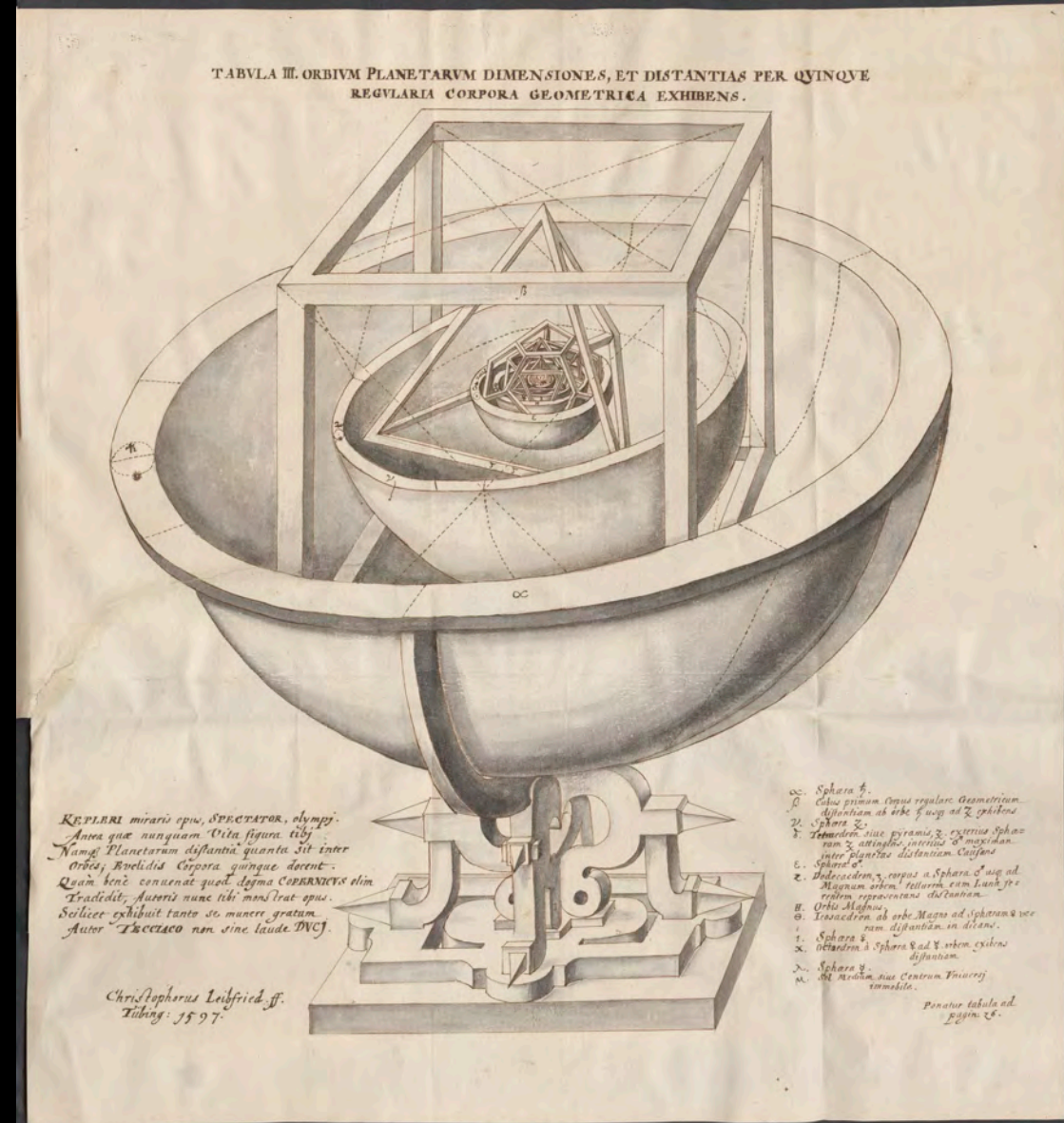
ヨハネス・ケプラー  
『宇宙の神秘』  
“Mysterium  
Cosmographicum”  
(1597)

## ■ ピタゴラス学派

- 紀元前 6 世紀頃の古代ギリシャの宗教教団

## ■ 万物は数なり

- 宇宙のすべては人間の主観ではなく数の法則に従うのであり、数字と計算によって解明できる

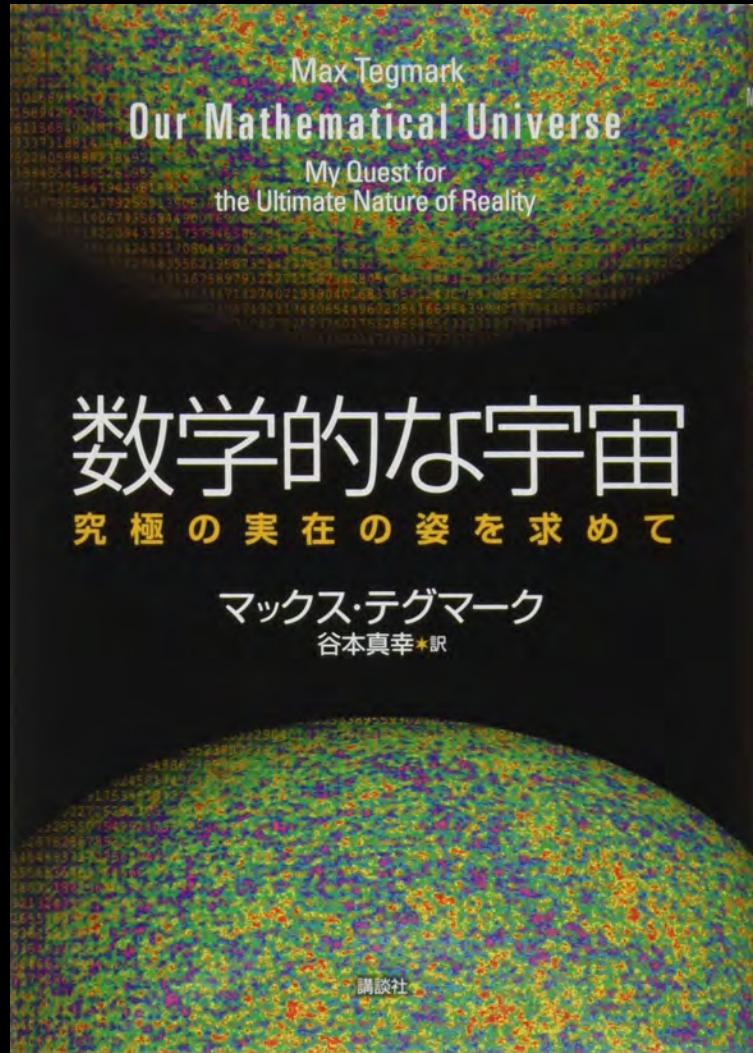


# 正解を知り得ないであろう疑問の数々(=本来の科学哲学)

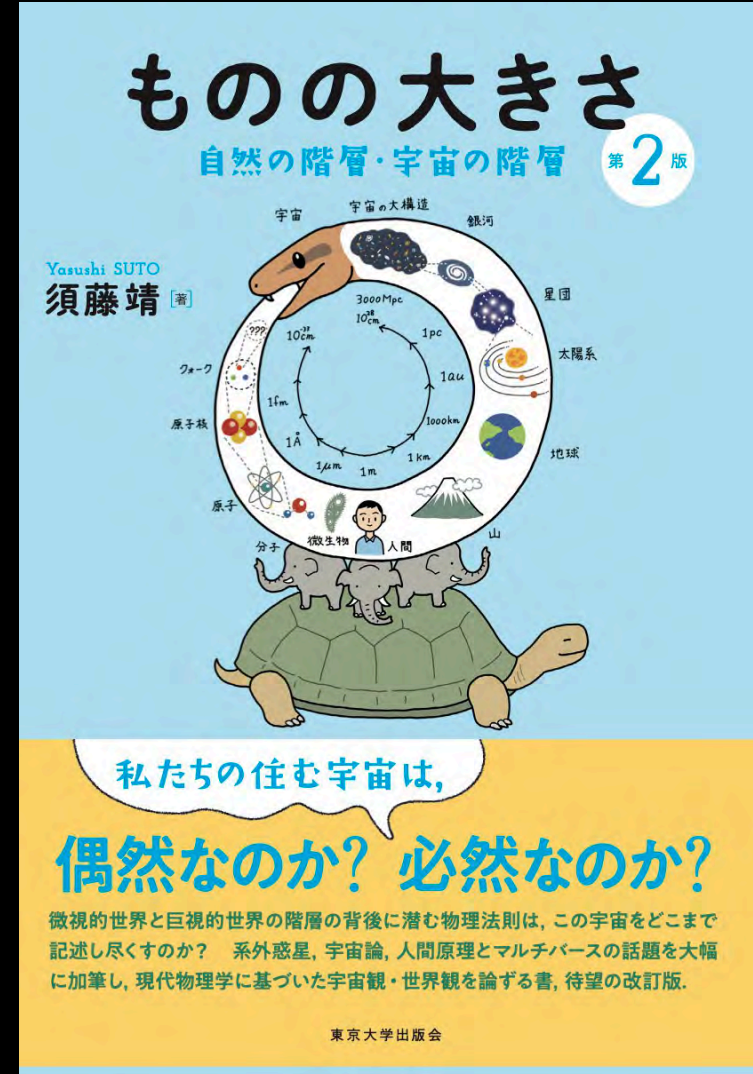
non-scientific philosophy of scienceからscientific philosophyへ

- 宇宙が数式にしたがっている理由は結局「宇宙とはなにか」という根源的な疑問そのものに帰着
  - 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
    - 実在としての宇宙が数学的な意味での無限体積となり得るのか
  - 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⇒並行宇宙が実在するはず
  - 宇宙における（知的）生命の普遍性
    - 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、数学的論理構造と実在する宇宙との違いはあるのか

# 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