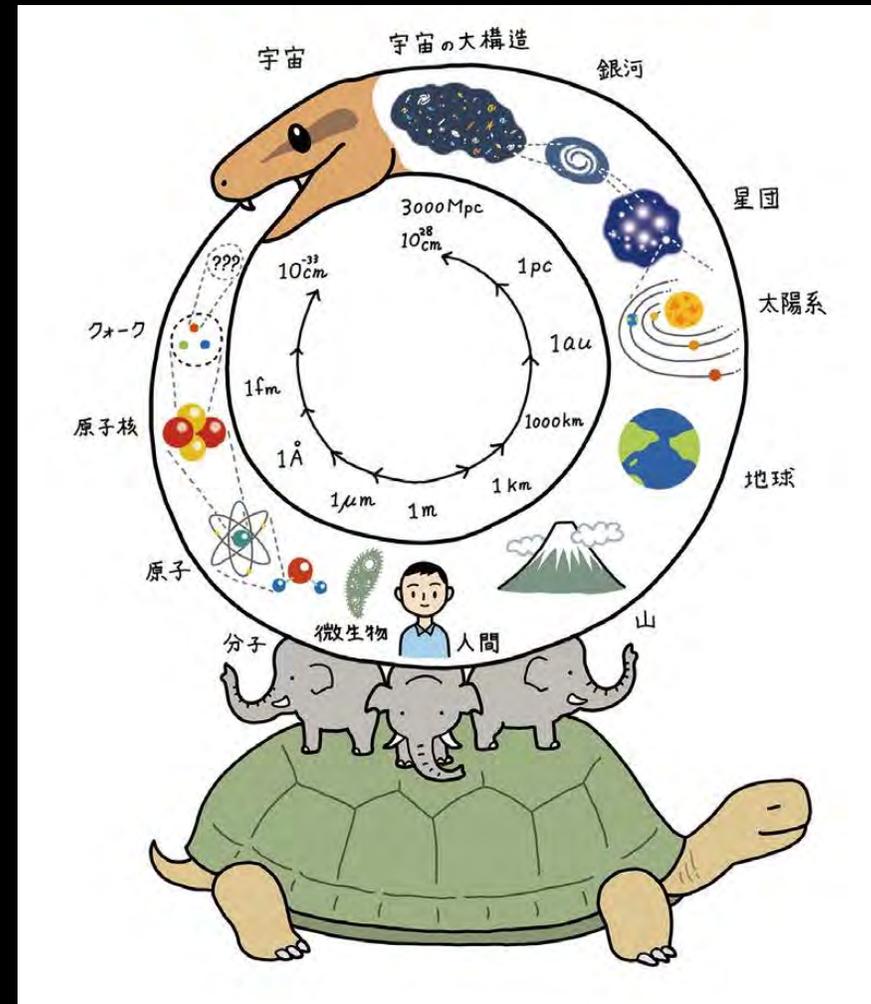
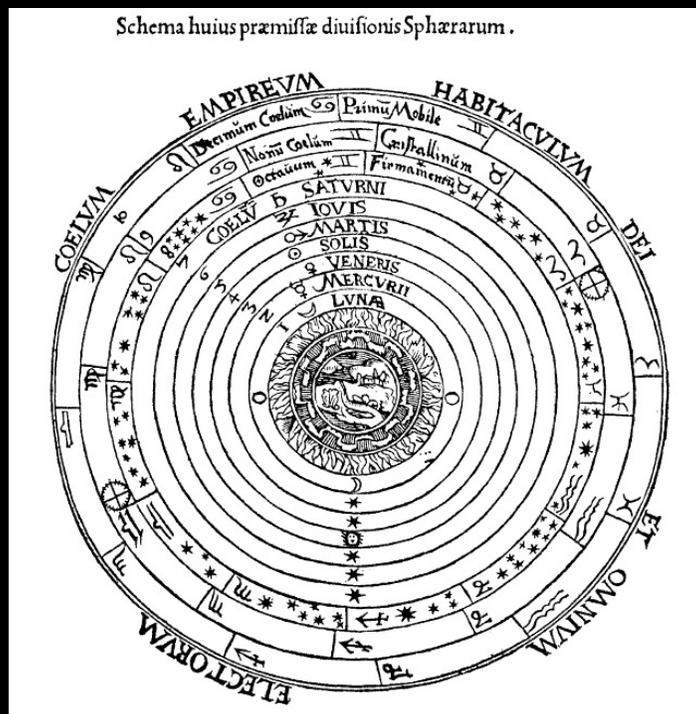


物理学は世界をどのように記述するのか



物理学概論 第1回～第3回

2022年4月12, 15, 19日 15:10-16:40

@高知工科大学 オンライン

東京大学大学院理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖



講義予定

- | | | |
|----------------|---|-------------------|
| 第1回
(4月12日) | 1 | はじめに：高校物理と大学での物理学 |
| | 2 | 物理学とはなにか |
| | 3 | 科学の意義 |
| | 4 | 世界を近似する物理学 |
| 第2回
(4月15日) | 5 | 経験則から物理法則へ |
| | 6 | 物理法則による記述の驚くべき正確さ |
| 第3回
(4月19日) | 7 | 古典論的世界観と量子論的世界観 |
| | 8 | まとめ：工学と科学・技術 |

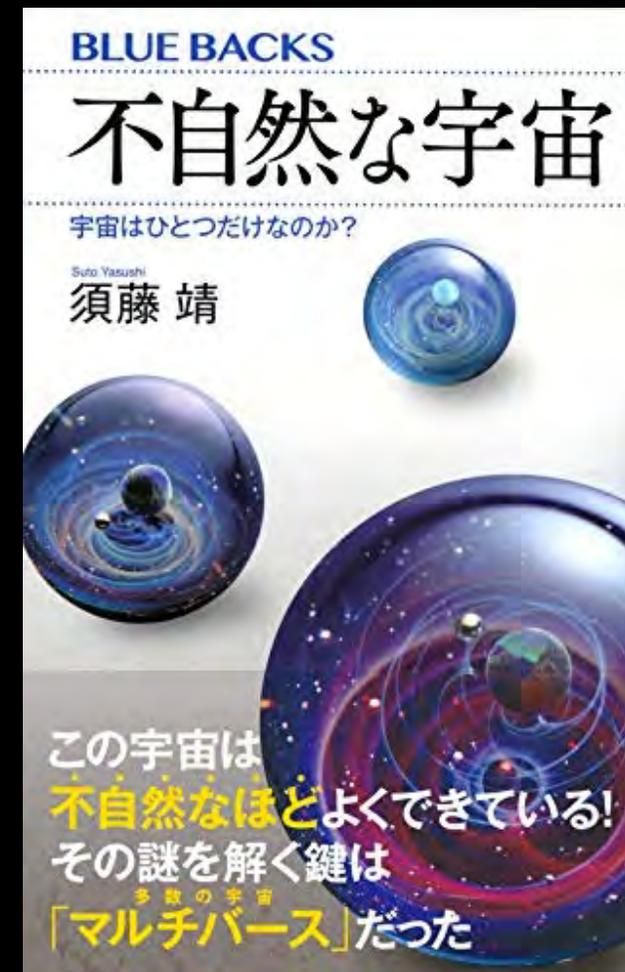
今回の講義の内容に関する主な参考文献



朝日新書 2022年

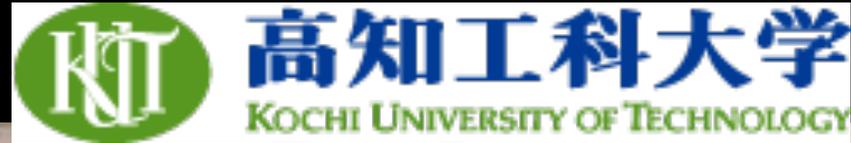


東京大学出版会
初版 2006年 第2版 2021年



講談社ブルーバックス 2019年

1 はじめに： 高校物理と大学での物理学



高校で習う物理は面白いのか

$$m\vec{a} = \vec{F}$$

$$\frac{1}{2}mv^2 - G\frac{Mm}{r} = E$$

$$H = \frac{i}{2\pi r}$$

$$f' = f \frac{v - u'}{v - u}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$$

$$y = A \sin \frac{2\pi}{T} \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

$$C = \frac{\epsilon S}{4\pi k_0 d}$$

- (微分方程式を教えない高校では) 理解できない「公式」だらけ
 - 高校物理 (の教科書) は全くイケテナイ
 - できなくてもつまらなくても気にしないで良い
- 「本当」の物理学 (=世界) は面白さに満ちている

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



すとう やすし
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く。一方で、分割するだけでは到底説明できない多体現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

我々が義務教育で学ぶべき最も重要な社会規範

「人々はlaw(法律)を遵守しなくてはならない」

- 法律に反する出来事は必ずしも珍しくない
 - 「原理的には」すべての人々は法を遵守すべきであるが、「実際には」合法と違法の判断には限界がある
 - 「違法である」という結論自身が絶対的ではない
- 「合法だからやってもよい」あるいは「法律は絶対的真理である」は、明らかな間違い
 - 社会は明確な法律(law)に加えて、道徳や倫理からなる
- 法律リテラシー：法律の有効性と限界をともに理解し疑うことができること ≠ 六法全書の暗記 (AI裁判官)

我々が義務教育で学ぶべき最も重要な科学観
「世界はlaw(法則)に従っている」

- 物理法則に矛盾する現象は絶対に起こらない
 - 「原理的には」すべての物事は予言可能なはずであるが、「実際には」その信頼性には限界がある
 - 一方「科学的にあり得ない」という結論はほぼ信頼できる
- しかし、「科学的結論だから絶対正しい」あるいは「科学は万能である」は、明らかな間違い（まさに非科学的）
 - 科学は単純な基本法則(law)に加えて、複雑な条件+推論からなる
- 科学リテラシー：科学の有効性と限界をとともに理解し疑うことができること ≠ 科学的知識の暗記

(高校)物理を学ん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」、あるいは「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、**という経験的事実以上に驚くべき発見はないのでは？

2 物理学とはなにか



Galileo Galilei
(1564-1642)

Isaac Newton
(1642-1727)



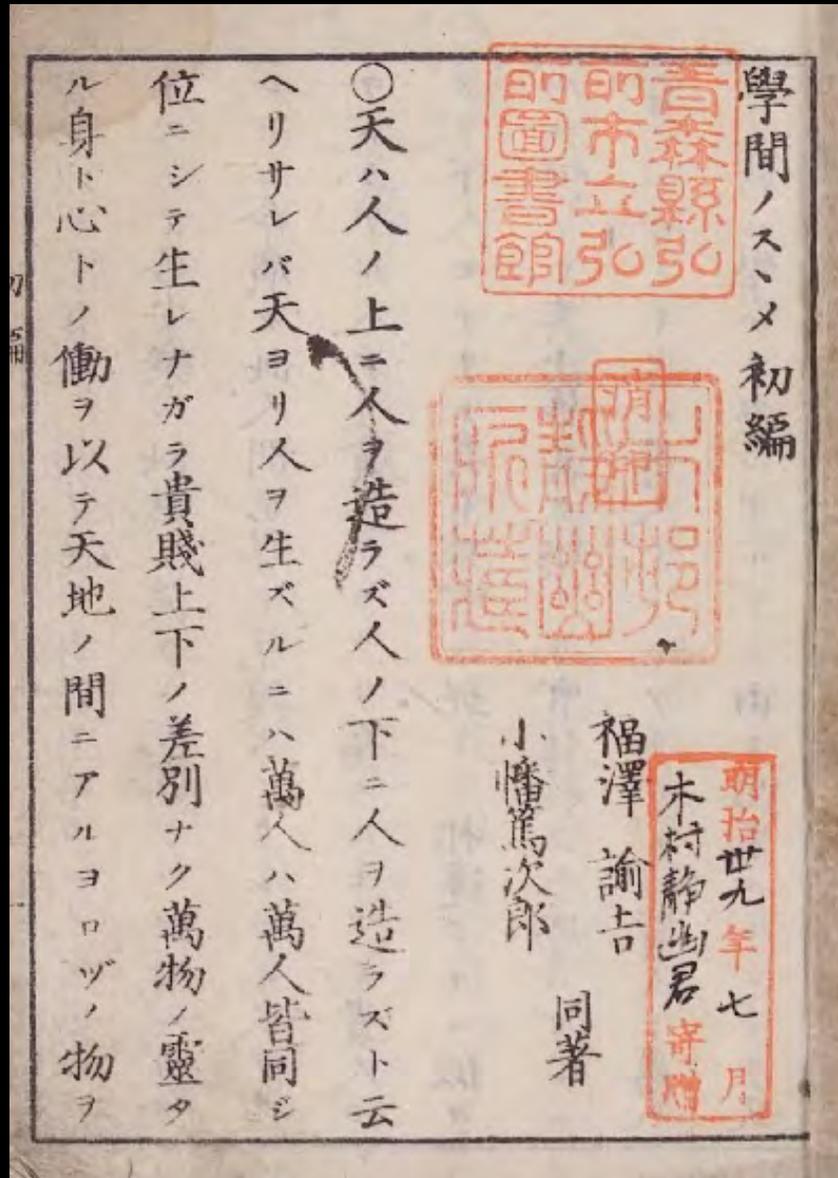
James Clerk Maxwell
(1831-1879)

Albert Einstein
(1879-1955)



福沢諭吉：学問ノススメ初編

- 「天は人の上に人を造らず人の下に人を造らず」と言えり
- されども今広くこの人間世界を見渡すに、かしこき人あり、おろかなる人あり、貧しきもあり、富めるものあり、貴人もあり、下人もありて、その有様雲と泥との相違あるに似たるは何ぞや
- その次第甚だ明らかなり。「実語教」に、「人学ばざれば智なし、智なき者は愚人なり」とあり。されば賢人と愚人との別は、学ぶと学ばざるとに由って出来るものなり



究理学（福沢諭吉： 学問ノススメ初編）

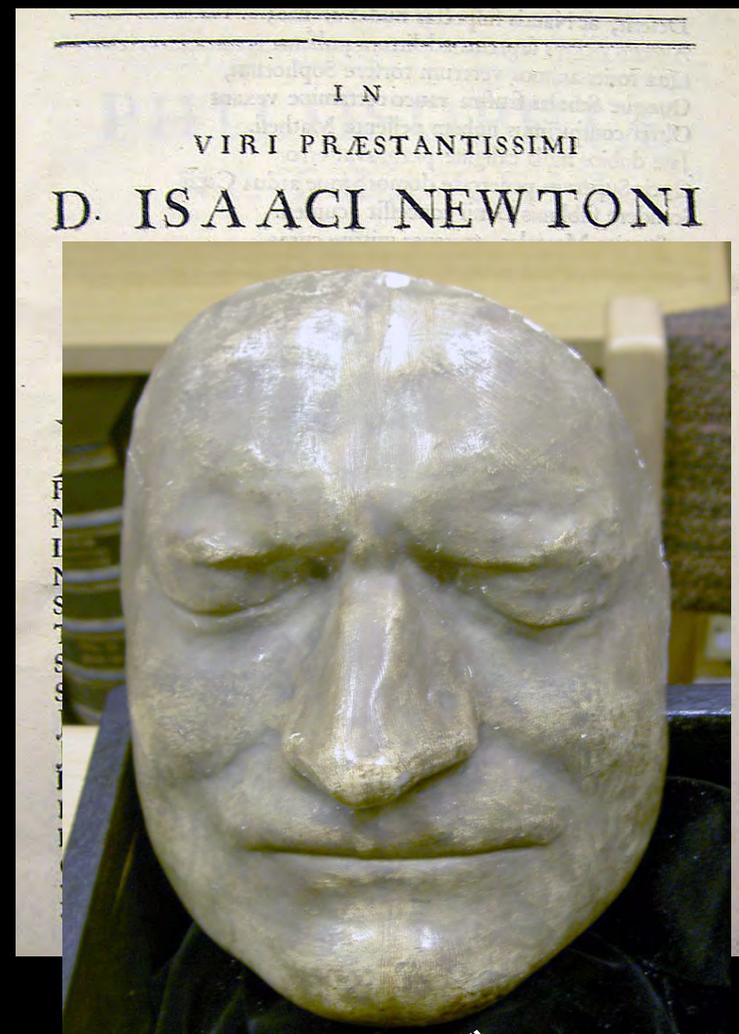
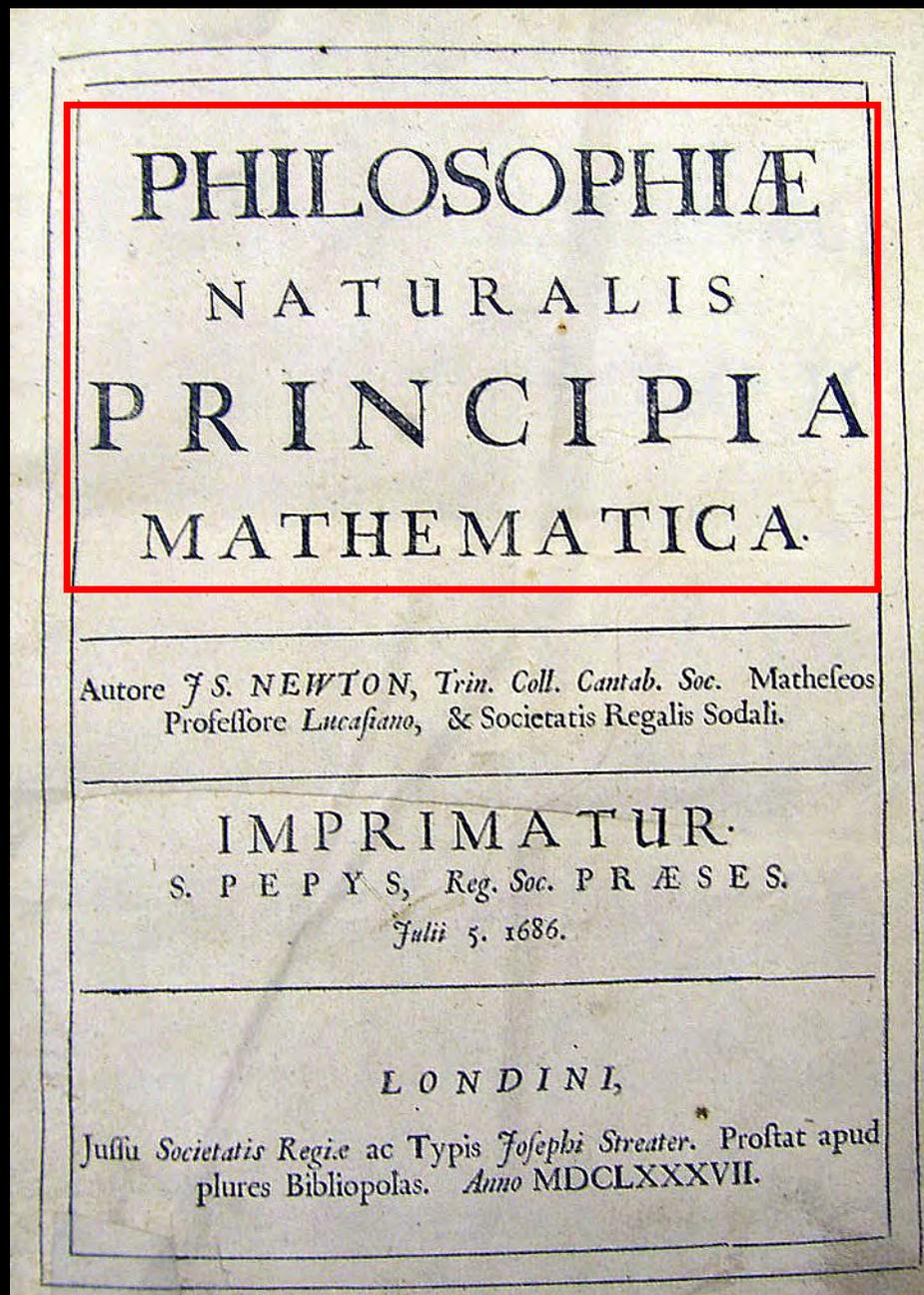
- されば今かかる実なき学問は先ず次にし、専ら勤むべきは人間普通日用に近き実学なり
- 譬えば、いろは四十七文字を習い、手紙の文言、帳合の仕方、算盤の稽古、天秤の取扱い等を心得、なおまた進んで学ぶべき箇条は甚だ多し
- 究理学とは天地万物の性質を見てその働きを知る学問なり

證據ナリサレバ今斯ル實ナキ學問ハ先ヅ次ニシ專ラ
勤ムベキハ人間普通日用ニ近キ實學ナリ譬ヘバイロ
ハ四十七文字ヲ習ヒ手紙ノ文言帳合ノ仕方算盤ノ稽
古天秤ノ取扱等ヲ心得尚又進テ學ブベキ箇条ハ甚多
シ地理學トハ日本國中ハ勿論世界萬國ノ風土道案内
ナリ究理學トハ天地萬物ノ性質ヲ見テ其働ヲ知ル學

究理学と物理学

- 究理学 = natural philosophy (広義)
 - 17世紀頃の英国で、思弁的な哲学と区別して人々が教養として身につけるべき「実験的な自然の哲学」を意味した
 - Philosophiae naturalis principia mathematica
 - 究理学 = 物理学 (本来は + 心理学) ÷ 理学
- 物理学 = physics (狭義)
 - 19世紀末頃から実用的な知識の重要性を認識し、natural philosophyがphysicsに置き換わる
 - 自然学 (広義のphysicsあるいはscience)
= 自然法則の究明 (natural philosophy)
+ 断片的な事実の集積 (狭義のphysics)

プリンキピアの初版本 (1686)



ニュートンのデスマスク

物理学とは何だろうか

■ 朝永振一郎

- 『物理学とは何だろうか』（岩波新書）
- われわれをとりかこむ自然界に生起するもろもろの現象 —ただし主として無生物にかんするもの—の奥に存在する法則を、観察事実に拠りどころを求めつつ追求すること

■ 佐藤文隆

- 『科学と幸福』（岩波現代文庫）
- 宇宙がビッグバンでできたなどという知識は二束三文の価値しかない。問題はなぜそう考えられているのかだ

科学とは何か

■ リチャード・ファインマン

■ 『科学とは何か: ファインマンさんベストエッセイ』(岩波書店)

- 今まで引き継がれてきたことがみな真実だという考えに疑いを抱き、過去の経験を伝えられてきたままの形で鵜呑みにせず、実際の経験をとおしてまったくのはじめから、実際はどうなのかを発見し直すということです。これこそが科学です。つまり、過去から継承されてきた種族としての経験を必ずしも信用せず、もっと直接の新しい経験からそれを調べ直す価値を発見した結果が、科学なのです。これが僕の科学観で、僕にできる最上の定義はこれ以外にありません。
- 僕はみなさんが専門家を、たまにどころか、必ず疑ってかかるべきだということを、科学から学んで頂きたいと思います。事実、僕は科学をもっと別な言い方でも定義できます。科学とは専門家の無知を信じることです。

神 vs 自然法則

- 物理学者は神を信じない人が多い（私もそうである）が、必ずしも宗教の存在価値までを否定するものではない
 - 2010年9月、スティーブン・ホーキングが著書で「宇宙の誕生を説明するのに神は必要ない」と（当たり前前の）主張をして議論を巻き起こした
 - 大半の日本人にとってはそれが話題となること自体が理解できまい
- 科学と宗教の関係は難しいが、本来は相補的であるべきもの
 - そもそも神は定義があいまいなので、科学的な議論になじむものではない
 - 物理学者が自然法則と呼んでいるものは、宗教で神と呼んでいるものと似た役割をしていることが多い⇒「物理教」
- しかし、神あるいは宗教が単に営利を目的として用いられている場合があるとすれば、それは断固拒絶すべきである

「物理教」の経典



- 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、実際にわかっていない現象も多いが
 - 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 ⇒ 究極理論への道）
- つまり、単に我々がまだ未熟者であるだけで、もっと修行を積みばわかるようになるはず
 - 学ぶ、さらに学び続けることの意義
- 「神様」を持ち出す必要はない

3 科学の意義



Jules-Henri Poincaré
(1854-1912)



寺田寅彦
(1878-1935)



Richard P. Feynmann
(1918-1988)

自然科学とえせ科学との違い

■ 自然科学の特徴

- 決して「厳密な」自然界の説明が必要というわけではない
- より良い近似的説明を更新し続ける行為
- 論理自身は正しくとも、実験で否定されることがある

■ 「正しいのか間違っているのか区別可能な手段をもつ」 ことこそ自然科学の本質的定義

- “falsifiable” 「うそであることを示しうる」(カール・ポパー)
- 間違っているか判断できない曖昧な主張(例えば、神が存在する)は自然科学の範疇外(神の定義がなされていないから)
- 「説明できない事実が存在する」は自然科学の限界ではなくむしろ重要な出発点

自然科学は進歩する

- 失敗する（できる）からこそ進歩する
 - 失敗したことが明確に認識でき、その反省がフィードバックされた結果としてやがて次の成功を生む
 - 過去の文献はどんなに偉大な貢献をしたものであっても、やがて新しい結果にとって代わられる
- 自然科学は決して万能ではないし、記述できることには限界がある
 - 「自然」あるいは実験・観測事実と矛盾すれば、どれほど論理的にすばらしい美しい理論であってもそれは（自然が残念ながら採用しなかったという意味で）間違いであり、捨て去らざるを得ない
- しかしそれらの試行錯誤は「世界」をより深く理解するためには、不可欠で本質的な作業

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

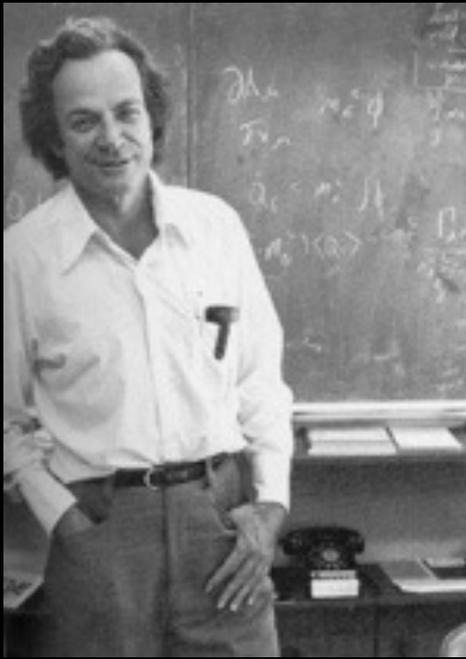
東京帝国大学物理学教授



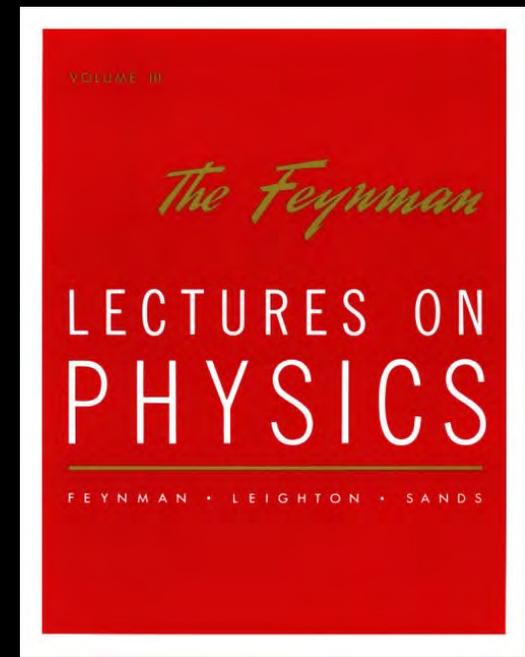
Henri Poincaré (Science et méthode, 1908)



- *The scientist does not study nature because it is useful to do so. He studies it because he takes pleasure in it, and he takes pleasure in it because it is beautiful. If nature were not beautiful, it would not be worth knowing and life would not be worth living.*

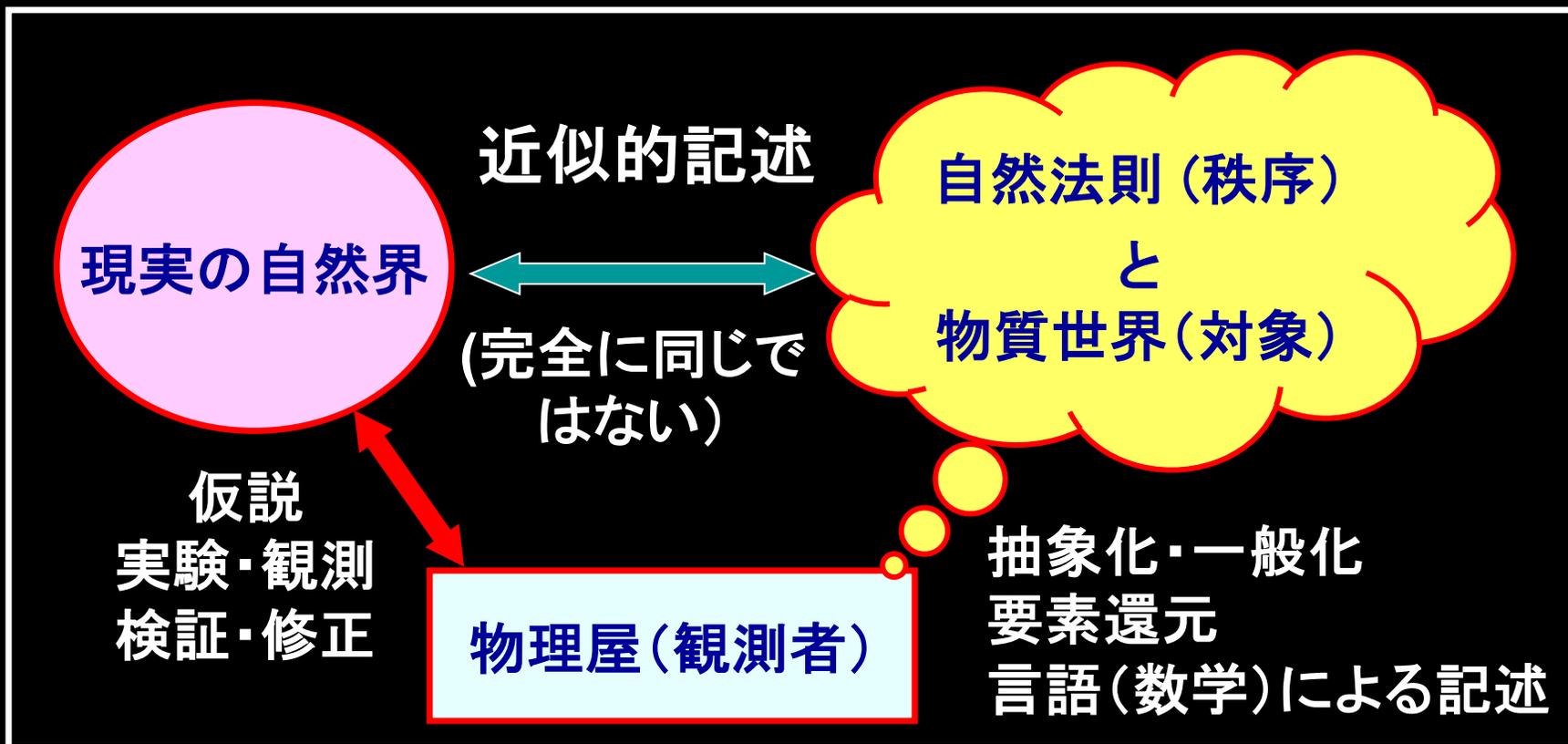


Richard Feynman
(The Feynman lectures
on physics, volume III,
Feynman's Epilogue)



- I wanted most to give you some appreciation of the wonderful world and the physicist's way of looking at it, which, I believe, is a major part of the true culture of modern times. *(There are probably professors of other subjects who would object, but I believe that they are completely wrong.)*

4 世界を近似する物理学



このループを繰り返しながら近似の精度を高めていくのが科学という営み

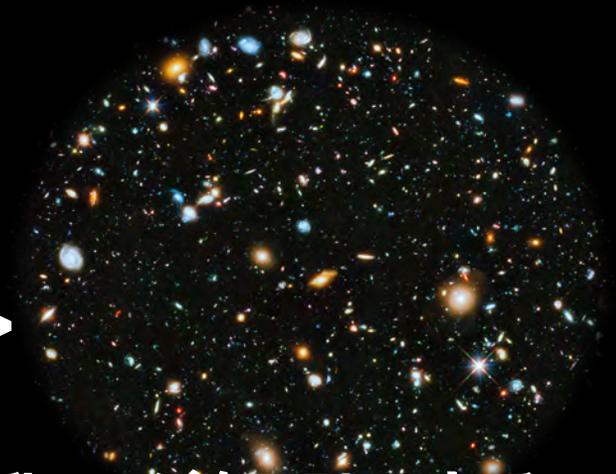
宇宙と世界

- 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)

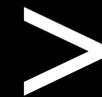
(広義の)世界



(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？

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/>

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



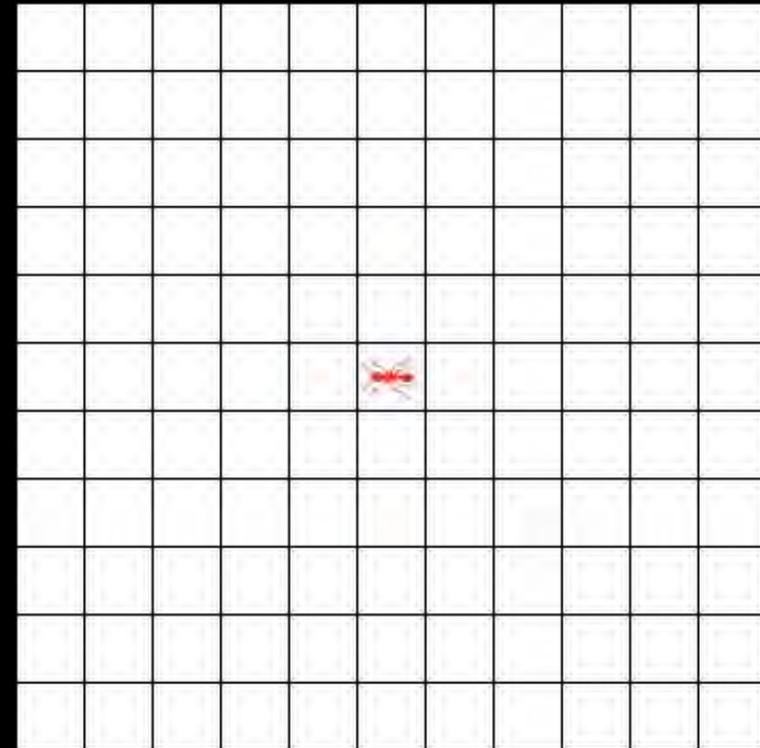
Step: 199

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)という意味だが、本当にそうなのだろうか？

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

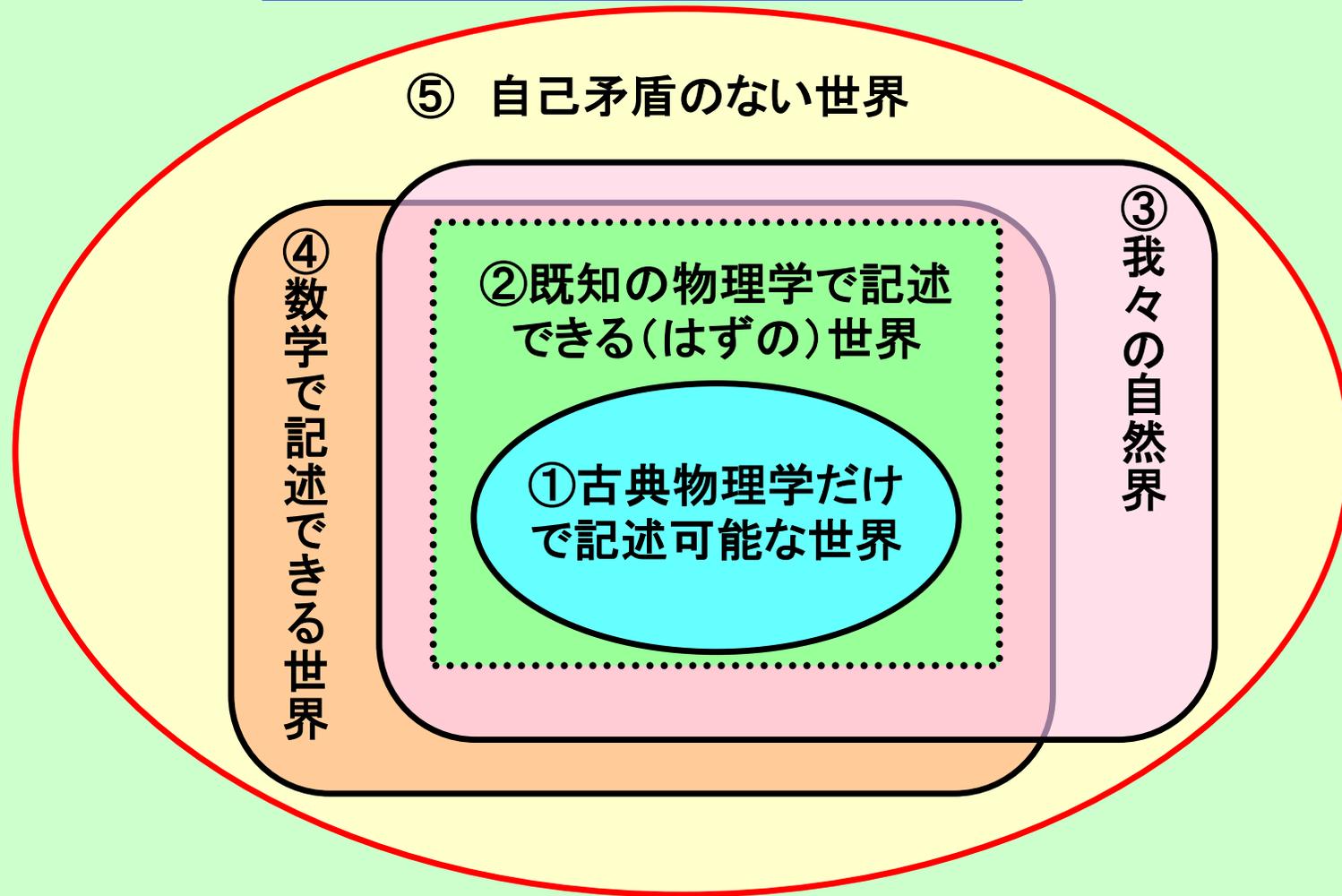
- Galileo Galilei

2010年10月7日@カリフォルニア工科大学天文学教室講堂

数学と物理学が記述する世界と自然界

ありとあらゆる可能性

自己矛盾を含む世界



物理学(自然科学)と数学の違い

■ 物理学(自然科学)

- あくまで「この現実世界」と矛盾してはならない
- いくら論理的に正しく美しい理論であろうと、実験・観測事実と矛盾すれば、間違っている(それ以上考える意味はない)

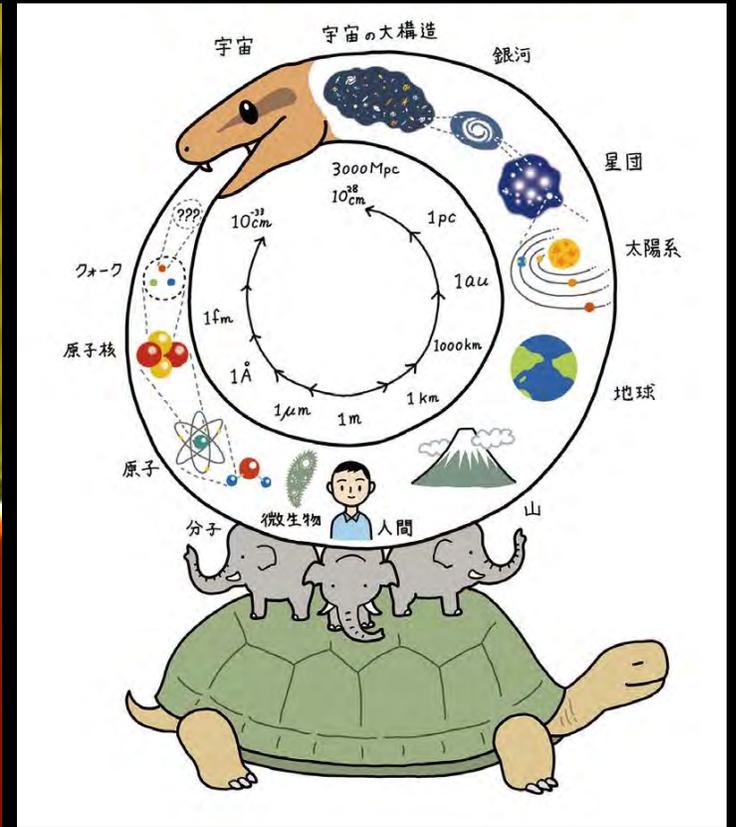
■ 数学

- この世界における実験・観測事実とは無関係
- 論理的に自己矛盾しない限り、一つの体系として意味をもつ
- 知り合いの数学者によれば、数学は矛盾する体系を記述できないのではなく、意味がないから通常はやらないだけだという

■ 数学の世界≠自然界だとしても、その2つの包含関係は不明

- 数学で扱える世界が、現実の自然界を完全に記述できる保証はない
(数学の世界 \subset 自然界?)
- 数学は「われわれの」自然界と矛盾する世界も記述可能(数学の世界 \supset 自然界)

5 経験則から物理法則へ



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、おそらく今でも (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)^{3/2} 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)

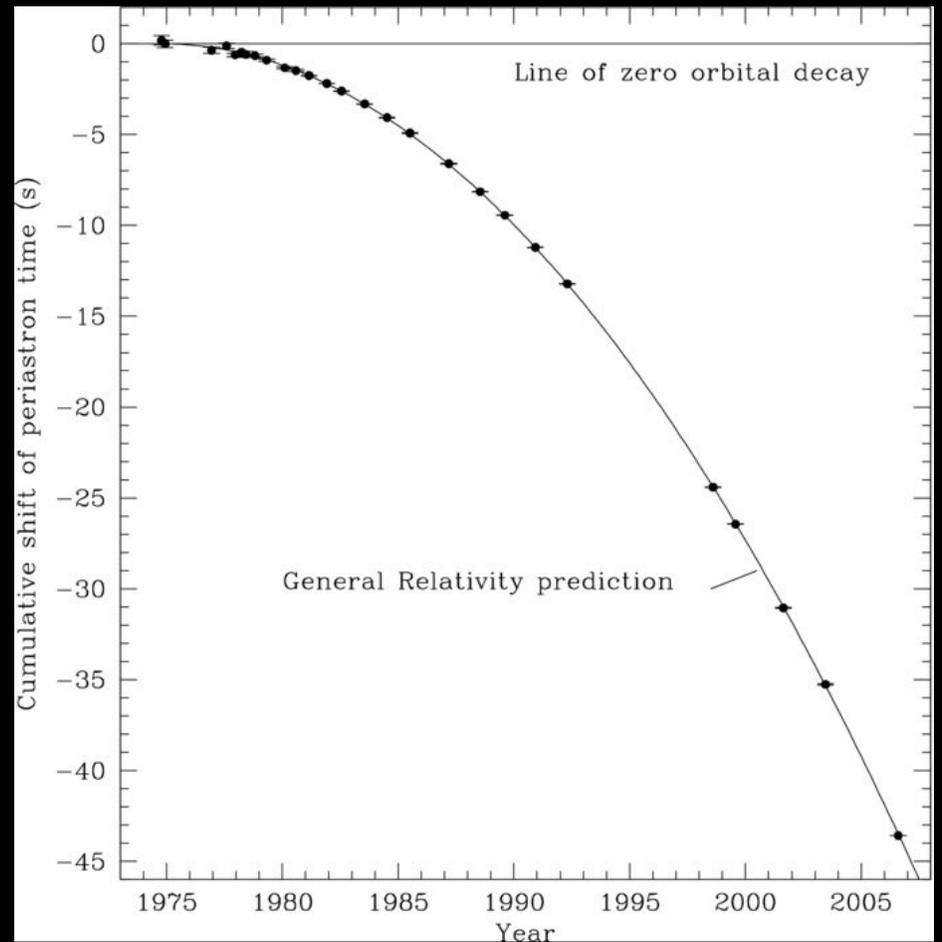
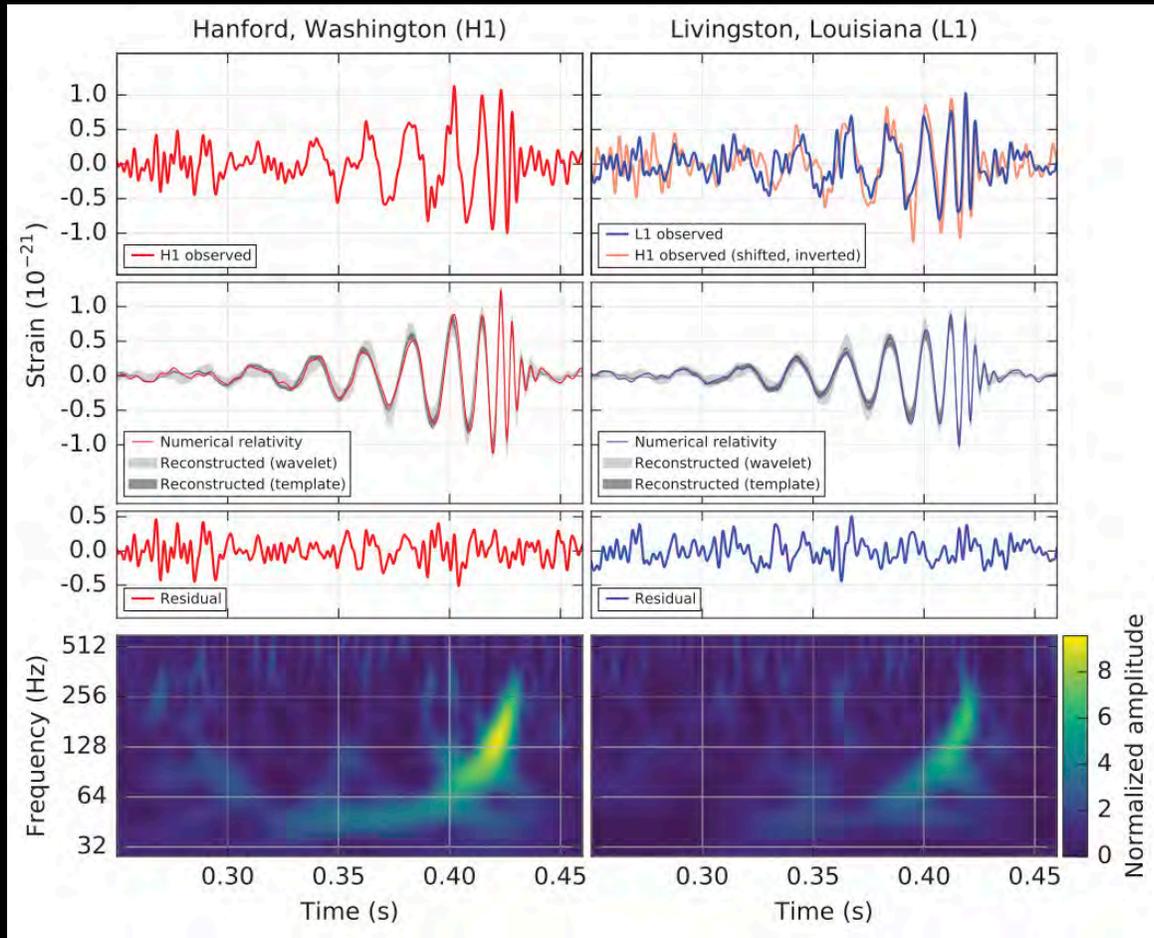
- アインシュタイン方程式と4次元時空の計量

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

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

- 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

6 物理法則による記述の 驚くべき正確さ



物理学はあくまで世界を近似する試み (?)

- 物理学は、観察や実験に基づいて多様で複雑な世界の振る舞いの本質を解明する営み
 - ここで示した例のように、物理学は常により信頼度の高い理論を追究するエンドレスなプロセスと言うべき
 - その意味で、「ニュートン力学は間違っており一般相対論が正しい」といったよく見かける表現は浅薄でしかない
 - ニュートン力学は普遍性の高い優れた物理理論であり、その近似精度をさらに高めたものが一般相対論であるに過ぎない
 - 同様に、一般相対論も厳密に正しいわけではなく、あくまで現時点で知られている最も優れた近似理論だと解釈すべき
 - ある関数を級数展開した場合、それが実際に収束するかどうかは自明でないのと同じ

我々の世界を支配する物理定数

■ 光速度（特殊相対論）

- $c (\doteq 3 \times 10^{10} \text{cm/s})$

- この速さを超えて情報を伝えることはできない（因果律の存在）。光の速度はどの系でも同じ

■ ニュートンの万有引力定数（古典力学）

- $G (\doteq 6.67 \times 10^{-8} \text{cm}^3/\text{g}/\text{s}^2)$

- 重力の逆二乗則： $F = GmM/r^2$

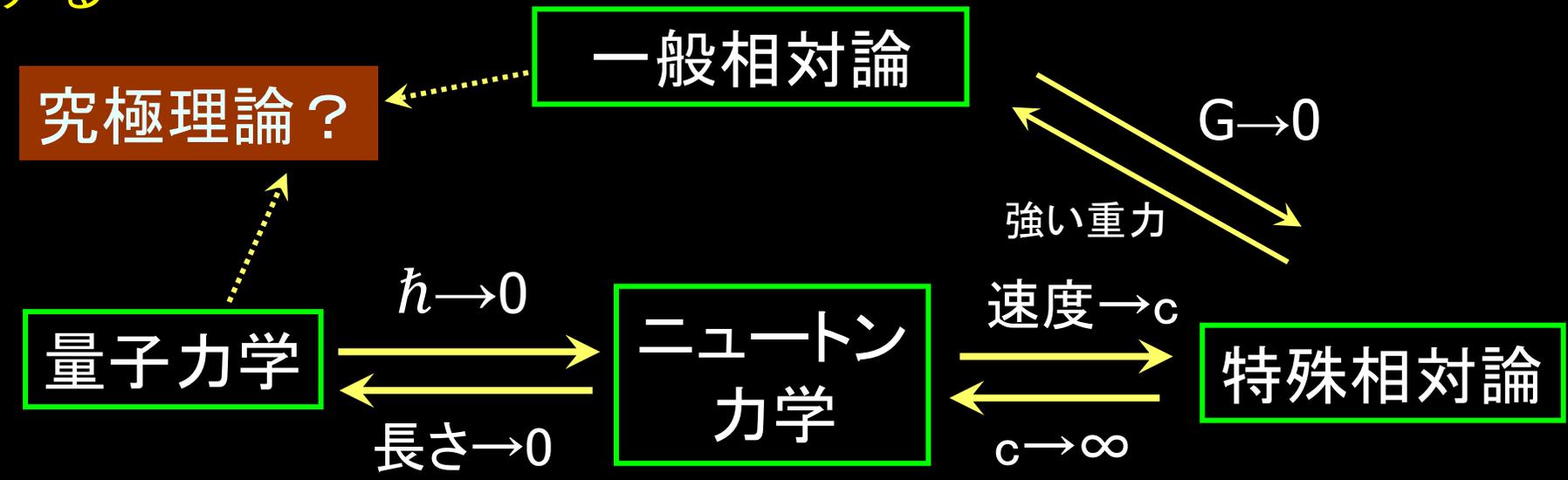
■ プランク定数（量子力学）

- $\hbar (=h/2\pi \doteq 1.05 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{s})$

- 角周波数 ω の光のもつエネルギー： $E = \hbar \omega$

この世界を支配する基本原理と物理定数

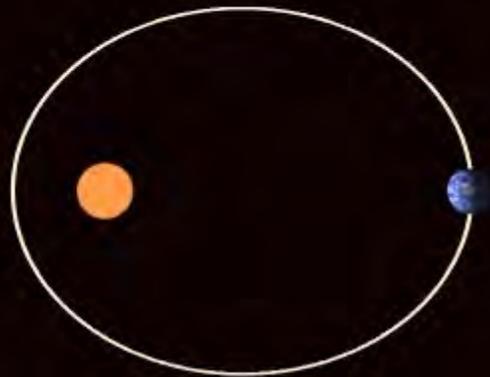
- 自然界のスケールは基本物理定数の値で決まる
 - ニュートンの重力定数 G : 重力の強さ
 - 光速 c : 情報が伝わる速度の上限
 - プランク定数 \hbar : 角運動量の最小単位
- これらの数値が異なる世界は、我々の世界とは全く異なる振る舞いをする



どの程度なら「正しい」理論と言える？ (1)

水星の近日点移動とニュートン力学の近似精度

- 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は変化しない（ケプラー問題）
 - 他の惑星の重力のために、この楕円軌道は100年間に532秒角だけ回転する（ニュートン力学の範囲内で予想される水星の近日点移動）
 - 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 8×10^{-8})
 - ニュートン力学は十分正しいと言って良い
- 物理学理論と天文観測データのいずれもが驚異的な精度と信頼性をもつことの例
 - 政治経済や医学分野ではありえない精度が科学を支えている

どの程度なら「正しい」理論と言える？ (2)

一般相対論と水星の近日点移動

- 一般相対論は、ニュートン力学では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説明した
 - 観測の誤差0.5秒角の精度で完全に一致
 - アインシュタインの時代には観測値は 45 ± 5 秒角だった
 - このズレを説明する「ため」に考えられた理論ではなく、重力はなぜ働くかを追及した結果、「重力＝時空のゆがみ」という驚くべき結論に至ったのが一般相対論
 - この信じがたい結論を支持するのは、高精度の観測データとの定量的な一致（理論のみならず技術の発展が不可欠）
- 単なる解釈や主張、価値観、偶然とは全く異なる
 - 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

どの程度なら「正しい」理論と言える？ (3)

重力波の間接的検出

■ PSR B1913+16

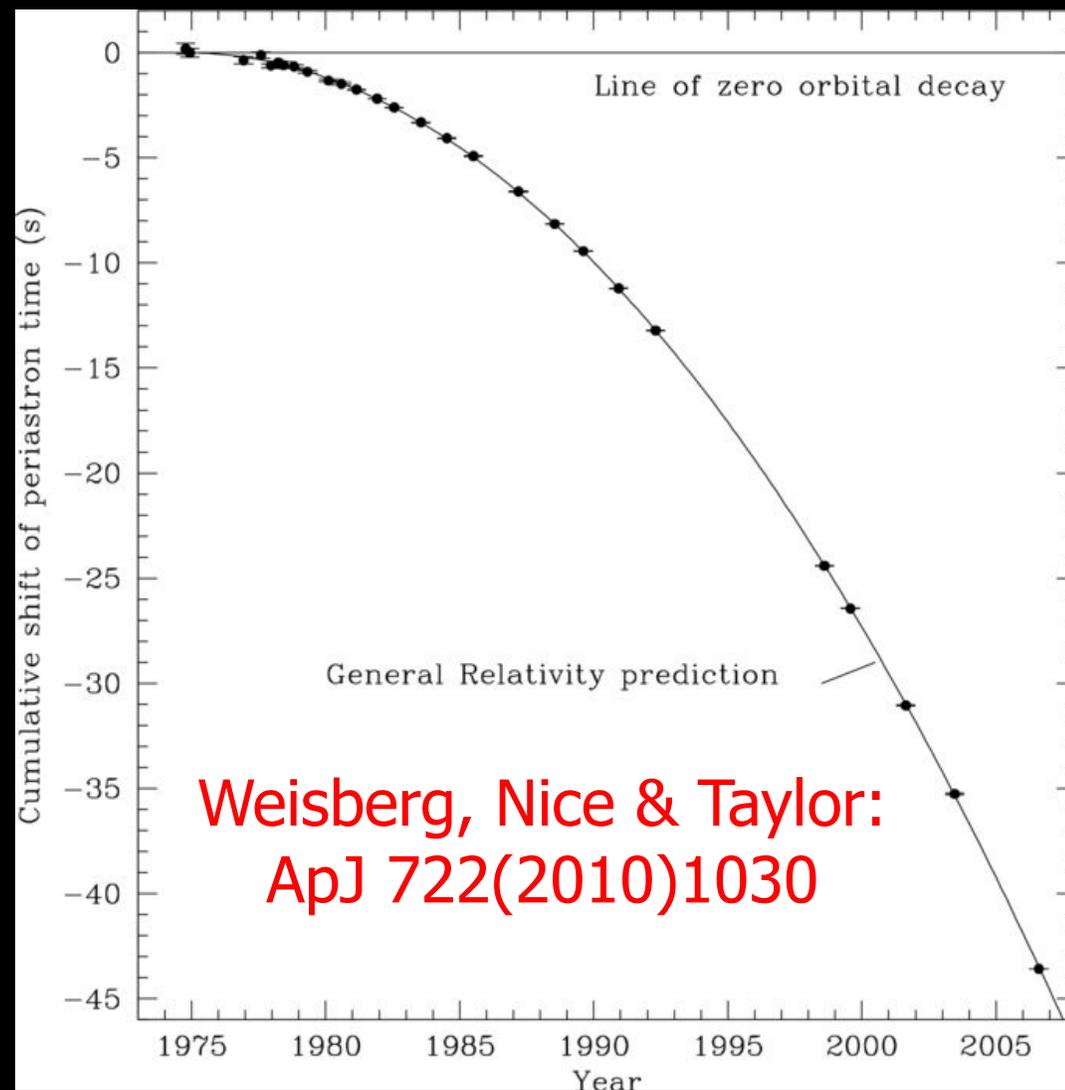
- 連星系をなす中性子星（半径わずか10キロメートルの太陽質量をもつ天体：星自体が巨大な原子核）の公転周期 P (=7.75時間)が重力波放射によるエネルギー損失によって減少

■ 一般相対論の予言：

- $\Delta P / \Delta t = -(2.402531 \pm 0.000014) \times 10^{-12}$
= -76.5 μ 秒/年

■ (一般相対論の予言値)/(1975年から2005年の観測結果)= 0.997 ± 0.002

- 1993年のノーベル物理学賞となった業績



どの程度なら「正しい」理論と言える？ (4)

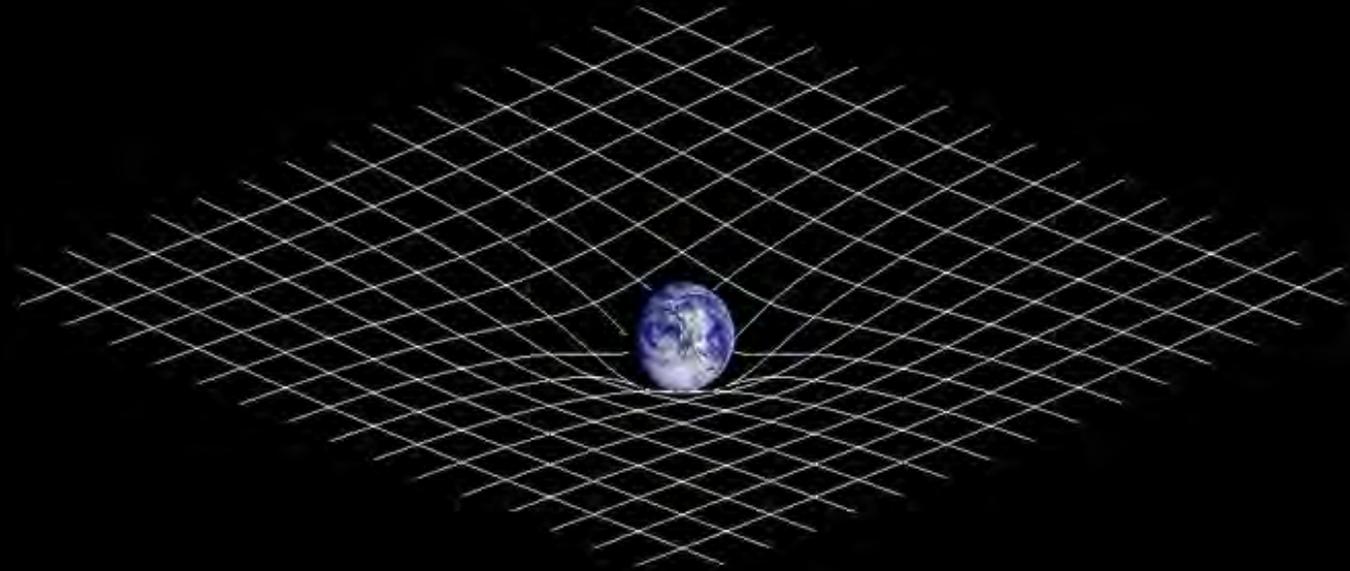
重力波の直接検出



- 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はありえない

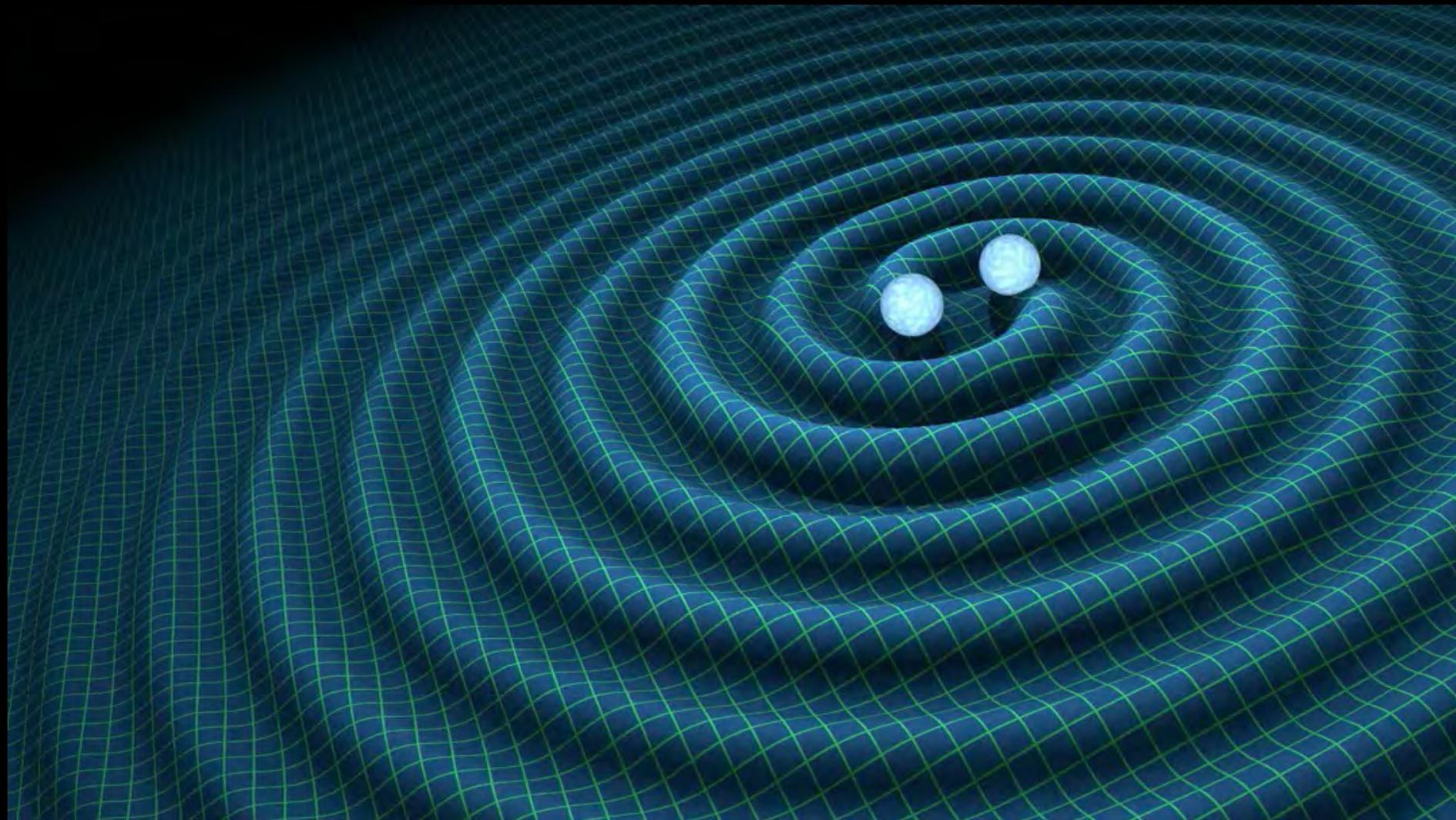
重力波：時空の歪みは波として伝わる

- 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

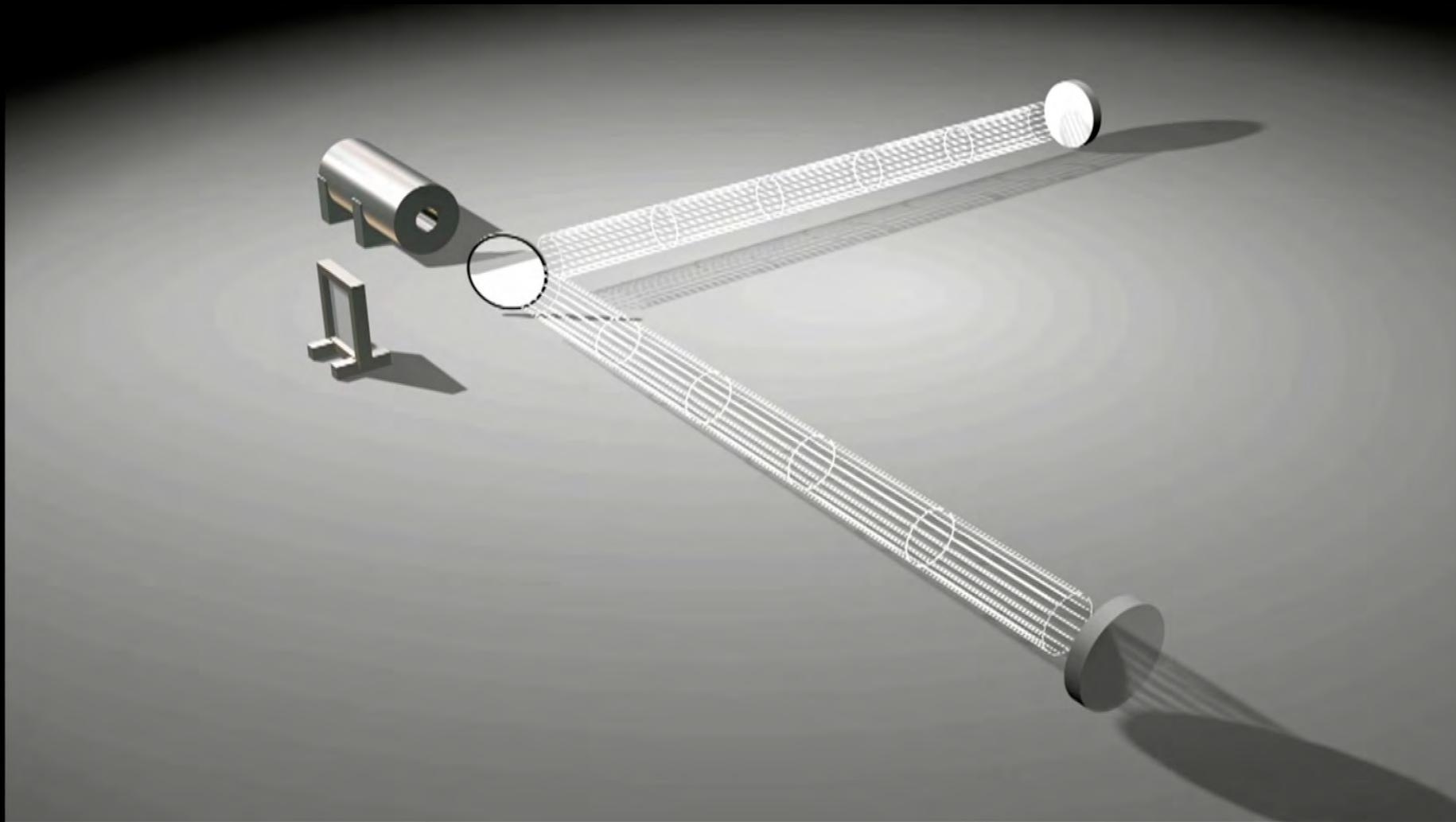


- しかし、物体が運動していると、歪みのパターンが時間変化する → 波が発生し伝搬する（重力波）

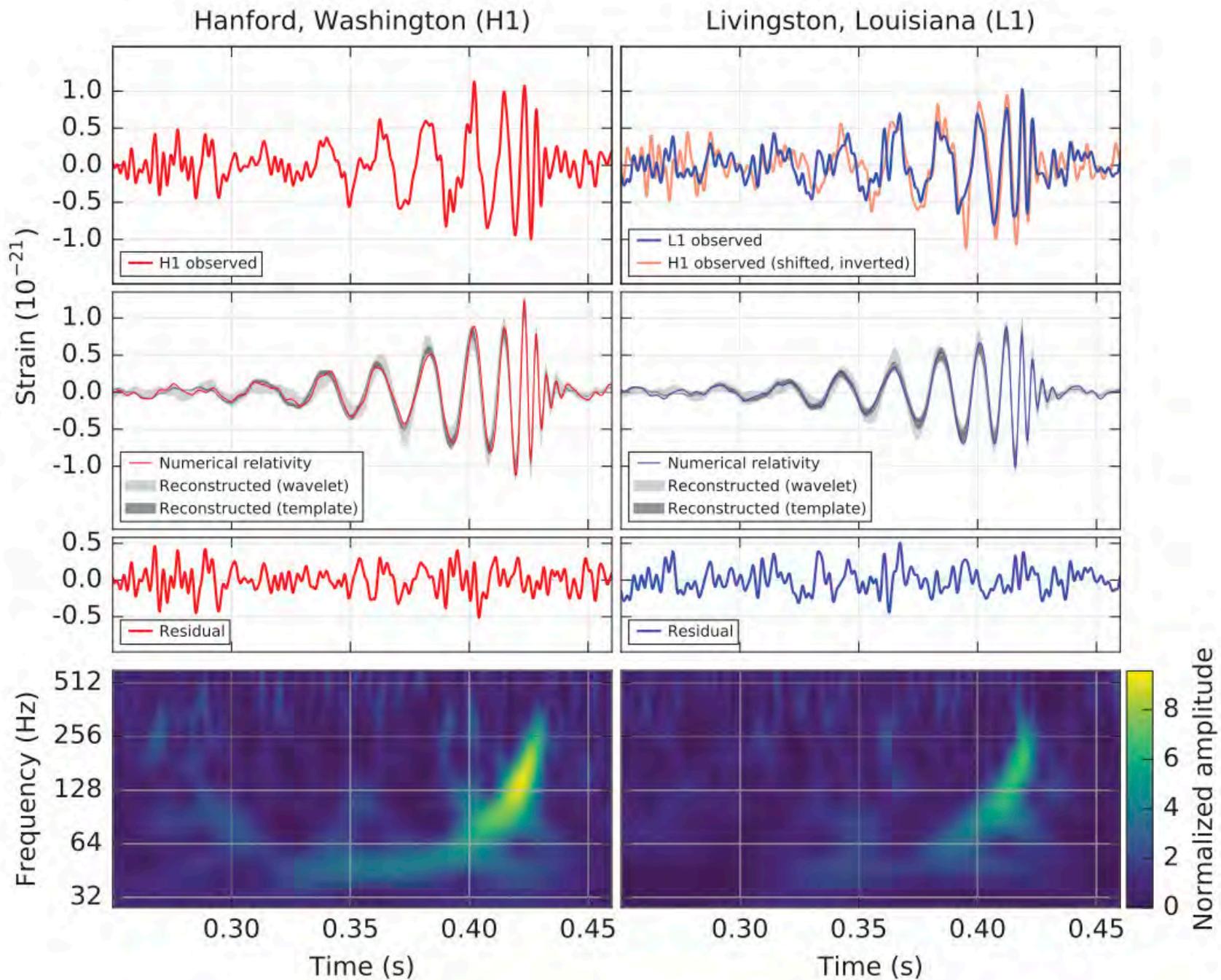
連星中性子星合体時の重力波



レーザー干渉計重力波検出器

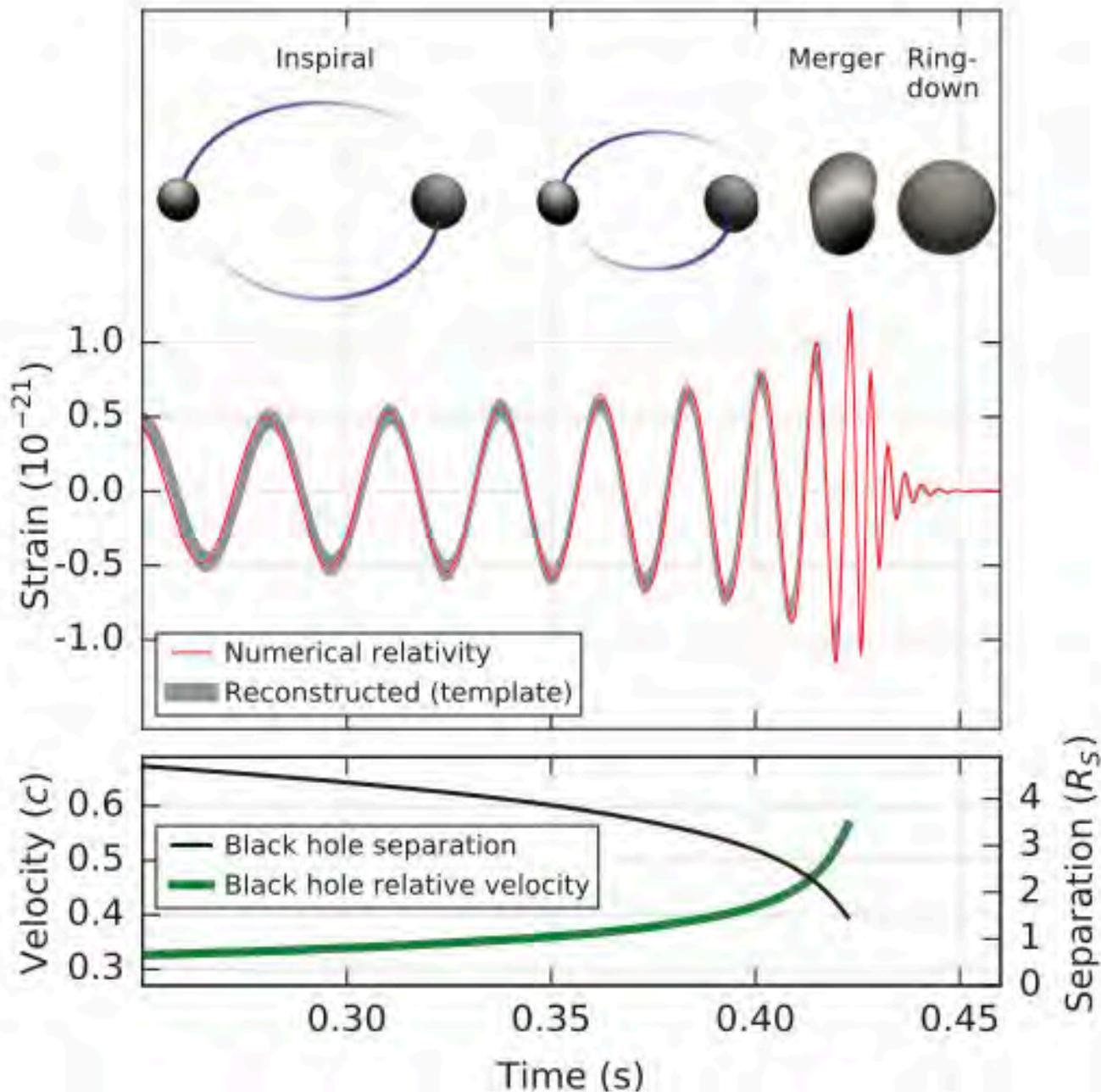


2015年9月14日 9時50分45秒 (協定世界時)



Abbott et al.
Phys.Rev.Lett.
116(2016)
061102

ブラックホール連星の合体



Abbott et al.
Phys.Rev.Lett.
116(2016)
061102

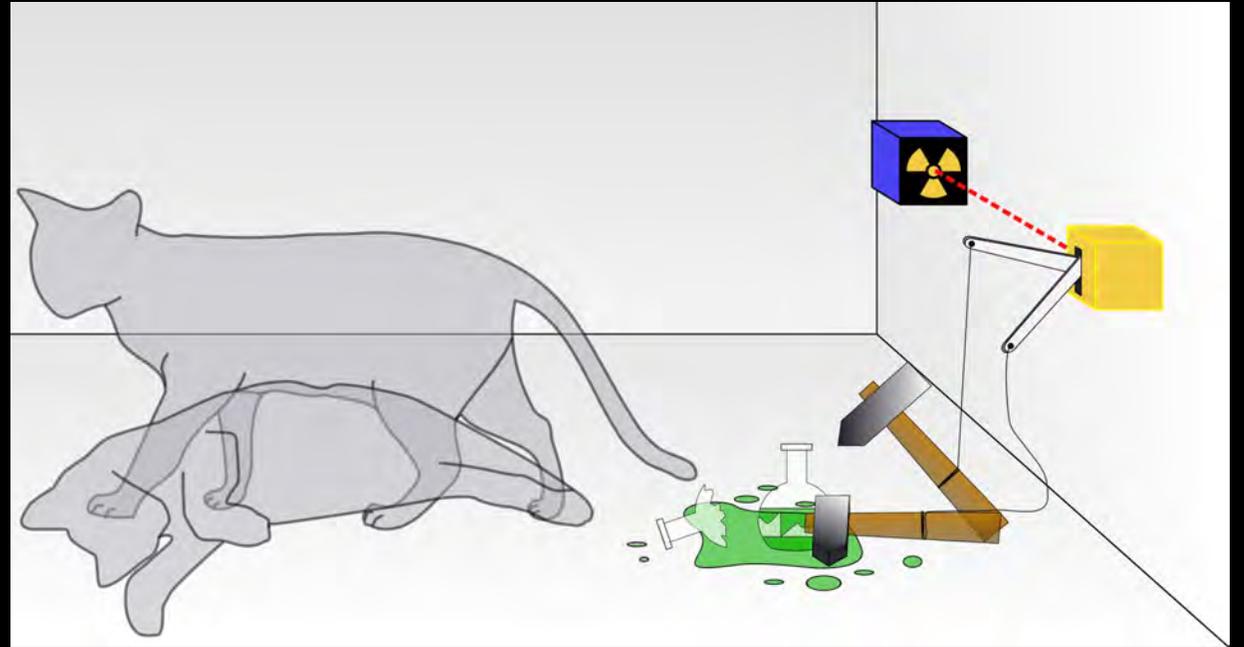
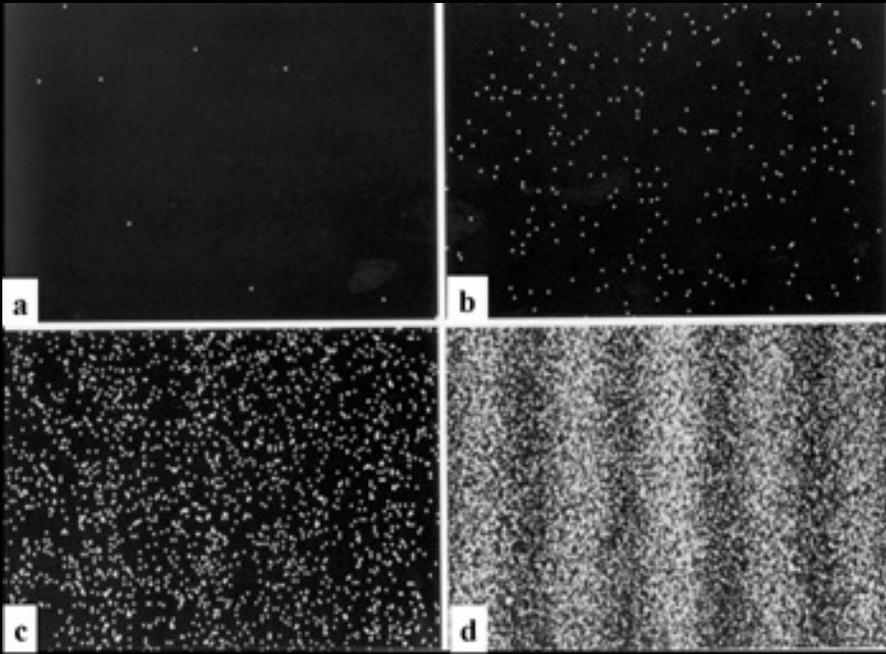
微分方程式で表された物理法則の数学的解は実際にこの宇宙のどこかで実現しているらしい

- 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
 - ある時点で物理学者は、その微分方程式が厳密にこの世界を記述するものと誤解してしまったのでは？
- 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、、、

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？

7 古典論の世界観と量子論の世界観



https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schrodingers_cat.svg

By Doug Hatfield

<http://www.hitachi.co.jp/rd/research/em/doubleslit.html>

物理学における古典論とは

■ 通常の意味での古典 (クラシック)

- 昔書かれ、今も読み継がれる書物。転じて、いつの世にも読まれるべき、価値・評価の高い書物 (広辞苑より抜粋)

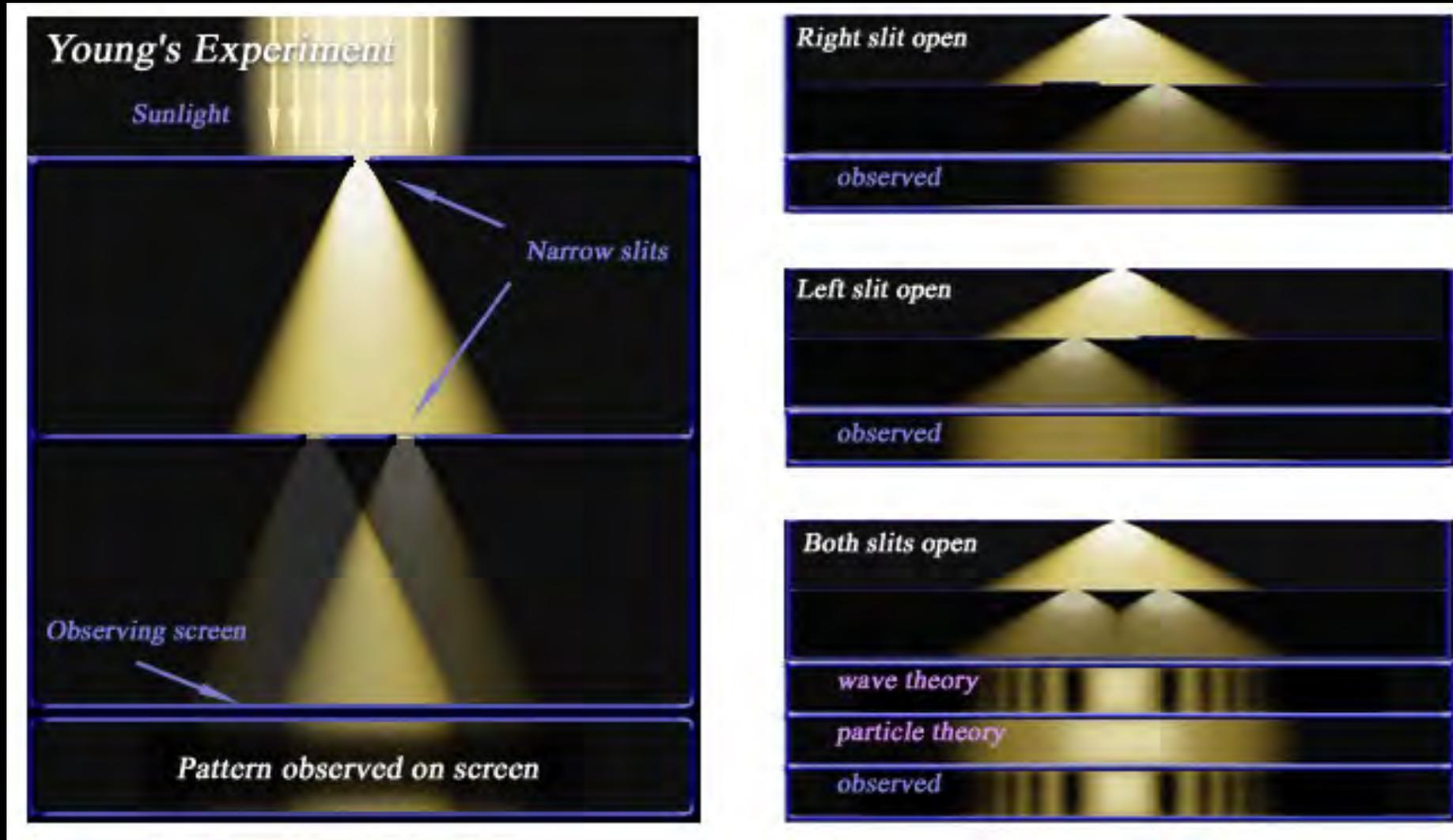
■ 物理学では、量子論を無視した理論を古典論と呼ぶ

- 代表例は、ニュートン力学、一般相対論、電磁気学
- これらの基本方程式は、時間に関する2階微分方程式なので、初期条件 (初期座標と初期速度) を与えれば未来は完全に決まる
- この宇宙が (古典論の) 2階微分方程式で表現される物理法則に厳密に従うとするならば、その未来は誕生した瞬間に完全に決定されているはず (古典的決定論)
- ただし我々はその初期条件を無限の精度で知ることは不可能なので未来はわからない (バタフライ効果)

この世界は古典論では記述し尽くされない

- (少なくとも) ミクロなスケールでは、物質の振る舞いは古典論と矛盾している
 - 水素原子は古典論で計算するとあっという間に不安定
 - 光は、波としての性質（屈折、干渉）と粒子としての性質（光電効果、コンプトン効果）をあわせ持つ
 - これらを説明するのが量子力学で、その基礎方程式がシュレーディンガー方程式。この方程式を解くと、マクロな世界では任意の値をとり得るエネルギーや運動量が、ミクロな世界では離散的な値しかとれない場合がある。これを量子化と呼び、量子 (quantum) という単語の語源
 - ちなみに、マクロな世界が量子力学に従っていないのではなく、通常は量子的效果が小さくて無視できるだけ

ヤングの干渉実験：光は波である



光子の裁判（朝永振一郎）

- 検察官「その部屋には二つの窓が前庭に向けて並んでいる。被告はそのどちらの窓から侵入したのか。この点は非常に重要なことだから、はっきりと答弁してほしい」
- これに対する被告の答は、はなはだ奇想天外なものでありました。
- 被告「私は二つの窓の両方を一緒に通って室内に入ったのです」

『光子の裁判』： 朝永振一郎著 「量子力学と私」(岩波文庫)より
被告の名前は波乃光子

量子論的記述：波動関数と確率密度

■ 量子論的実在：粒子・波動二重性

$$\Psi(x, y, z, t)$$

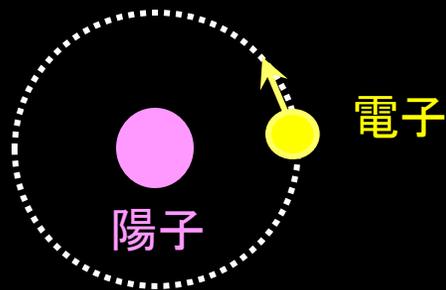
- 量子論的に物質を記述すると、粒子性と波動性をあわせ持つという意味だが、正しくは、量子論的実在は古典的対応物を持たないと解釈すべき
- 上半身だけを見たら人間だが、下半身は魚という存在は常識的には信じがたいが、人魚姫が実在したとしたら単にそういう存在を受け入れるしかない

■ 確率振幅に対応する「波動関数」が量子論的世界観の本質

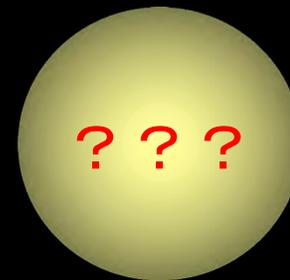
- 粒子が時刻tに座標 (x,y,z)に存在する確率(密度)は、複素数で表される波動関数の絶対値の2乗で与えられる
- 実際の物質の密度分布（実在波）ではない

$$P(x, y, z, t) = |\Psi(x, y, z, t)|^2$$

古典力学的水素原子の描像



量子力学的水素原子の描像



電子の雲

あくまで確率密度の意味で、電子がどこにあるのかは「わからないのではなく決まっていない」

量子論的世界観

■ 古典論的世界観

- 粒子の位置と運動量は一意的に(無限の精度で)確定している
- 現実的には我々はそれを知り得ないため未来は完全にはわからない

■ 量子論的世界観

- 粒子の位置と運動量はそもそも確定していない
- ハイゼンベルクの不確定性関係

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

(粒子の位置と運動量を同時に完全に決定することは不可能)

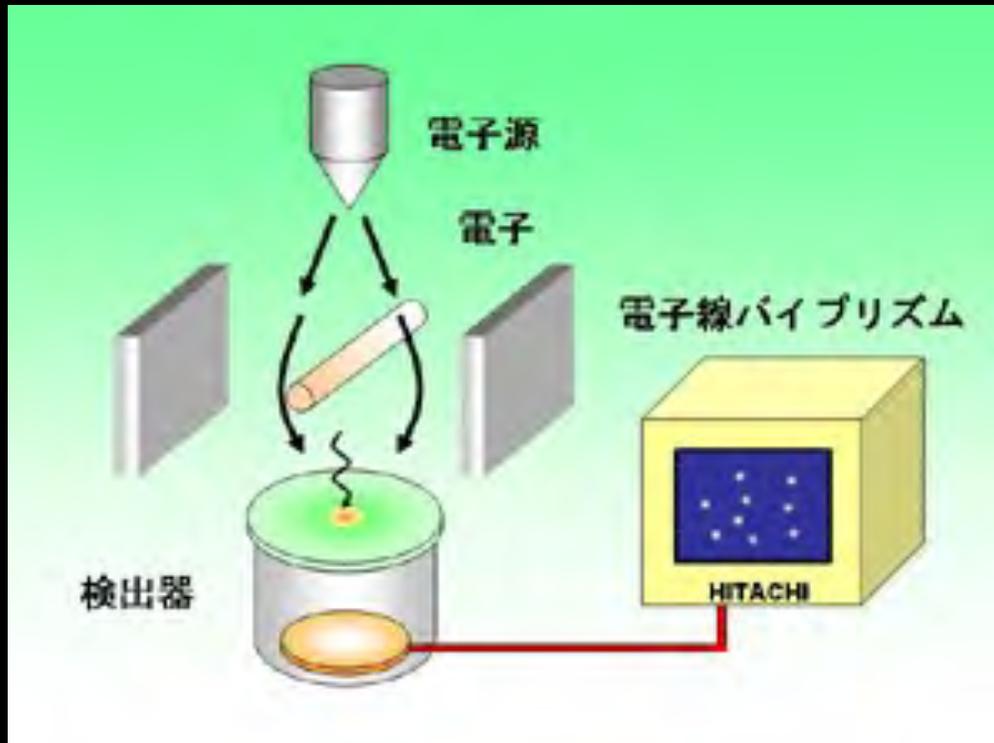
- 「我々が知ることができない」という意味ではない
- 初めて聞くと何を言っているかすらわからないと思うが、それこそが量子論の本質的な不可解性。経験的に確信してきた古典的世界観が実は正しくないという衝撃的な結論

Richard Feynman:

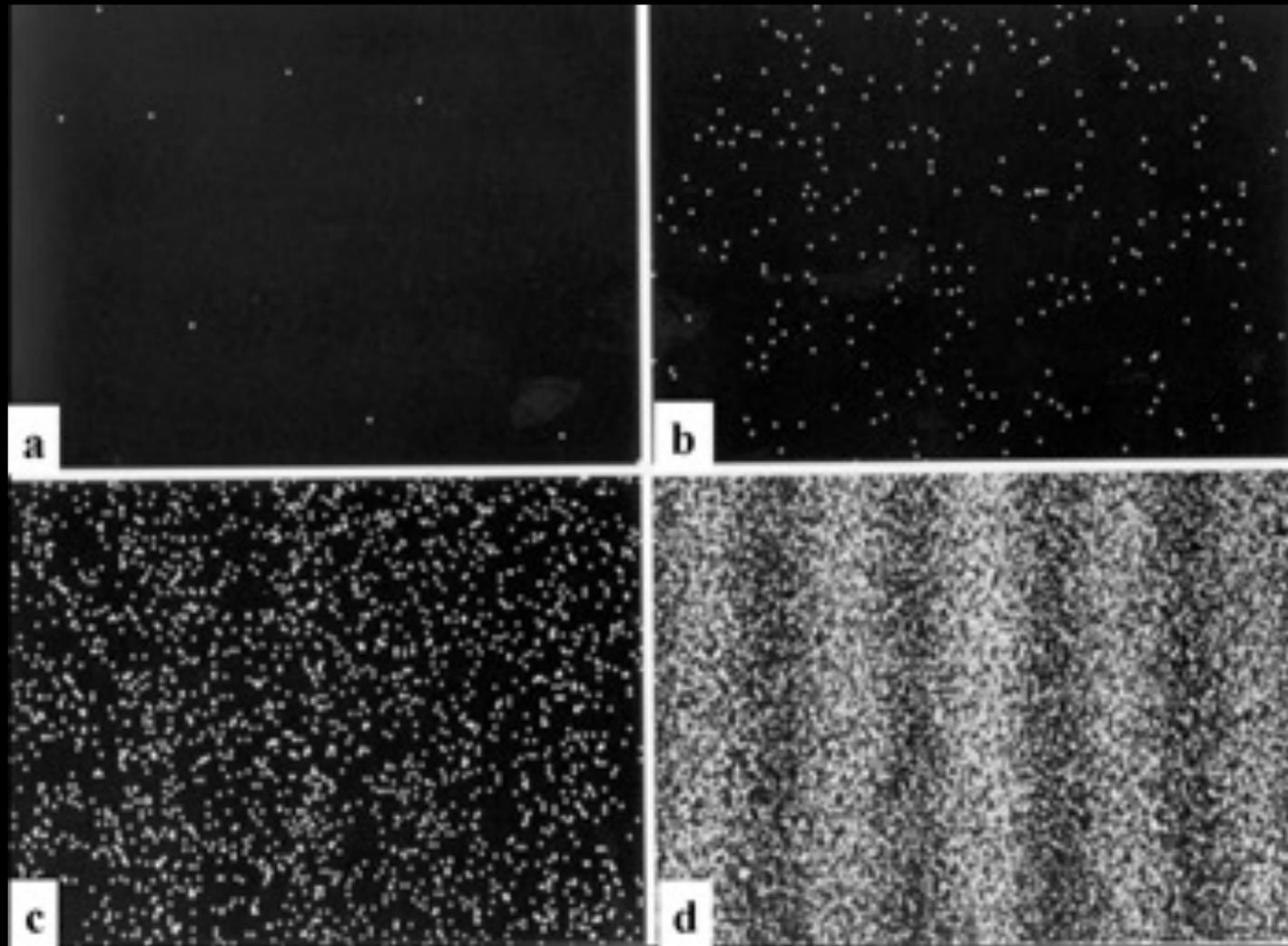
*I think I can safely say
that nobody understands
quantum mechanics*

電子は粒子でもあり波でもある

- 外村彰による電子の二重スリットの通過実験
 - 量子力学の不思議さを明確に示す美しい実験

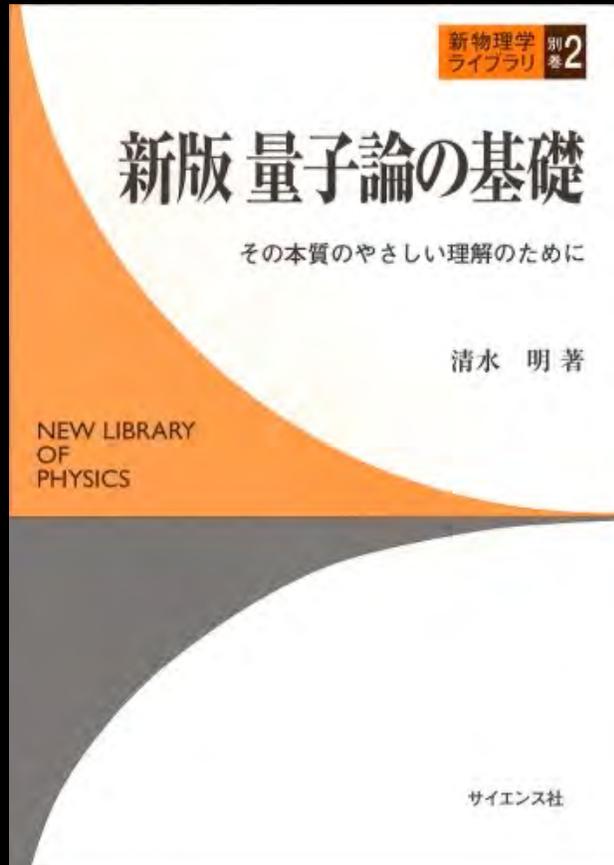


電子「一個」の干渉パターン： 確率密度に対応する波動関数の証拠

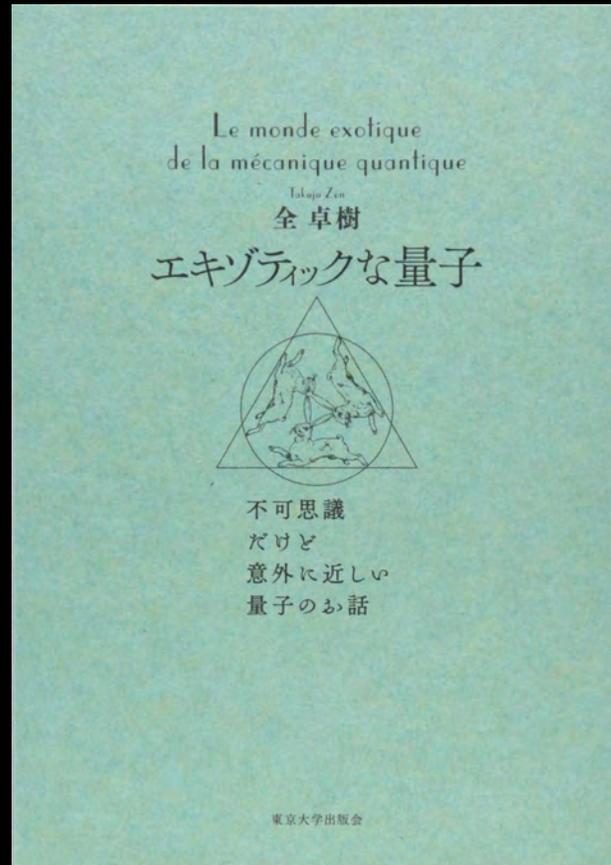


- 外村彰による電子の二重スリット通過実験

量子論の本質を理解するために、以下はお薦め



清水明
サイエンス社 (2004)



全卓樹
東京大学出版会 (2014)



須藤靖
東京大学出版会 (2019)

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

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？—

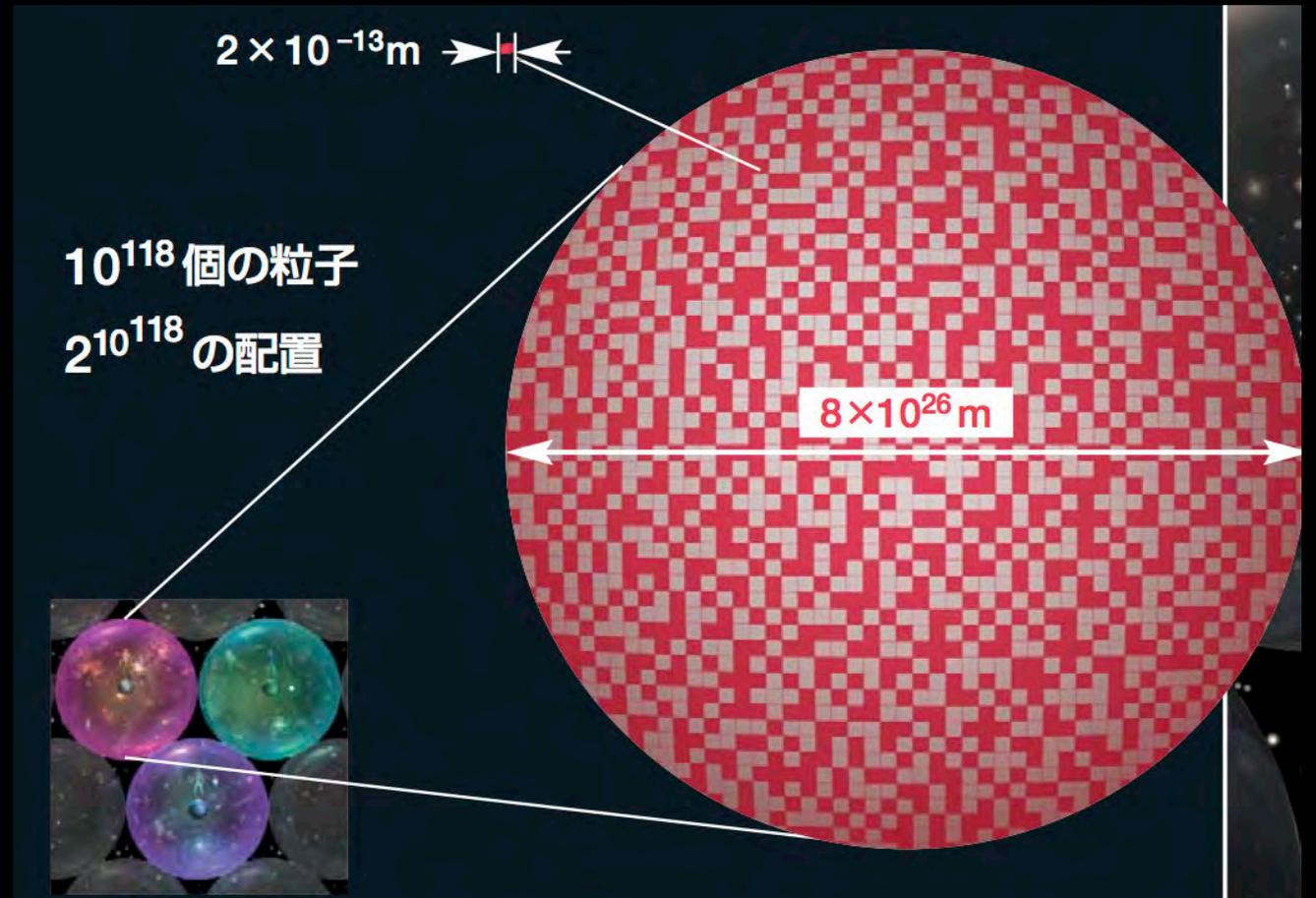


- この作業を繰り返していくと、いずれは近似ではなく本物（と区別できないクローン宇宙）に到達する？
 - すべての物質は有限個の素粒子からなる（量子論を無視する）
 - 時間と空間も連続ではなく離散的かも？
 - とすれば宇宙はデジタル情報に帰着するので、3Dプリンターで宇宙を創り続けると、いずれクローン宇宙が出現するはず？

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
- でも量子論を無視したこのような古典的考察はどこまで正しいのだろうか？



8 まとめ： 工学と科学・技術



工学（技術）と理学（科学）

- ごく大雑把に言えば
 - 工学（技術）は役に立つ
 - 理学（科学）は（すぐには）役に立たない
- しかし、科学と技術はいわば車の両輪で相補的
 - 技術なしに科学の進歩はありえない(重力波、量子論)
 - 科学なしに技術を向上させる動機は薄い
- 科学技術という言葉は適切ではない
 - Science and Technology ≠ Scientific Technology
 - 日本学術会議は「科学・技術」を推奨

科学・技術が拓く明るい（？）未来の例

- これらは現時点では不可能であるからこそ、それらを目指す挑戦が社会の未来にとって重要
 - 天災の制圧
 - 人間の機械化（壊れた脳すら置きかえる）
 - 機械の人間化（知能をもつロボット）
 - すべての病気を薬だけで治癒
 - 遺伝子操作による不老不死
 - 人間が働かなくて良い社会
 - 異なる言語の完全自動翻訳
 - 核廃棄物の完全な処理法の確立



科学・技術の進歩にともなう社会の不安定化

- 必ずしも持続可能で安定な社会に向かうとは限らない
 - 地上の限られたエネルギーで維持できる人口
 - 不老不死が実現すると、子供を生む、あるいは（老）人の死は社会が判断して決定するしかない
 - 科学・技術の成果を享受するためのコストを払える人と払えない人との格差
 - ごく一部の危険な人々による、生物・化学兵器、核兵器、サイバー攻撃などによって地球の大半を壊滅することが可能
 - 働かなくてもよい不老不死の社会において、人間はなんのために生きるのか、そもそもそれは現在よりも幸福な社会なのか

試験が得意な人 ≠ 新しいことを開拓する人

- 通常の「試験」での評価基準
 - 正解が存在することがわかっている問題を
 - 決められた時間内に
 - 一人だけで何も見ず
 - すべての科目を万遍なく解答することが求められている
- これらは社会の現場とはすべて「矛盾する」
 - 試験での秀才は必ずしも優れた研究者・社会人ではない
- 人間の才能は1次元に数値化できるものではなく、多次元パラメータで表現すべきもの
 - 必ずしも（とびぬけて）優秀である必要はない
 - 何でも良いから余人をもって代えがたい度合いが重要
- 何よりも自分が楽しく没頭できることを見つけるべき