

クレジット:

UTokyo Online Education 学術俯瞰講義 2017 須藤靖

ライセンス:

利用者は、本講義資料を、教育的な目的に限ってページ単位で利用することができます。特に記載のない限り、本講義資料はページ単位でクリエイティブ・コモンズ 表示-非営利-改変禁止 ライセンスの下に提供されています。

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

本講義資料内には、東京大学が第三者より許諾を得て利用している画像等や、各種ライセンスによって提供されている画像等が含まれています。個々の画像等を本講義資料から切り離して利用することはできません。個々の画像等の利用については、それぞれの権利者の定めるところに従ってください。

2. 宇宙は物理法則に従っている

ESA
Space in Images
PLANCK CMB (BLACK BACKGROUND)
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/04/Planck_CMB_black_background
Copyright ESA and the Planck Collaboration

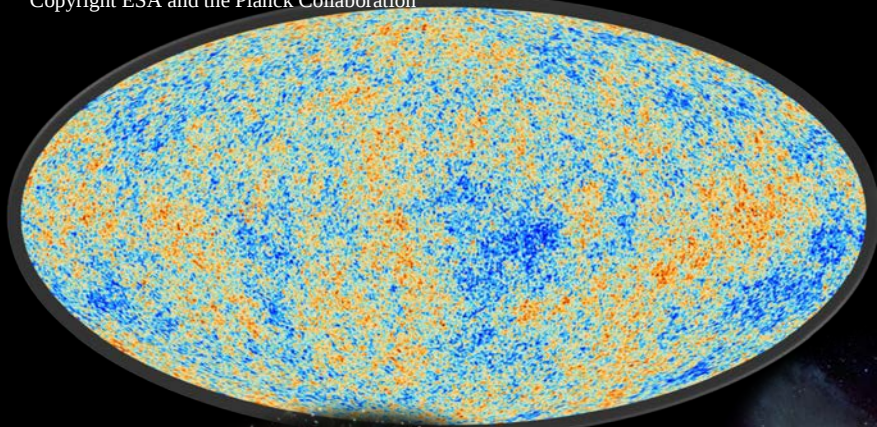


Photo by Brett Jordan ,from Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IPhone_4S_unboxing_17-10-11.jpg
CC BY 2.0



©HSC Project / 国立天文台



Photo from Wikipedia



理学系研究科 物理学専攻 須藤 靖

学術俯瞰講義 2017年10月5日16:50-18:35

http://www-utap.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~suto/mypresentation_2017j

Hubble Space Telescope
Hubble's colourful view of the Universe
Credit: NASA, ESA, H. Teplitz and M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (STScI), R. Windhorst (Arizona State University), and Z. Levay (STScI)
<http://www.spacetelescope.org/images/heic1411a/>

第2回 宇宙は物理法則に従っている

2.1 複雑な世界の背後の単純な摂理

2.2 自然界の4つの相互作用

2.3 ものの大きさは基本物理定数で
決まっている

2.4 宇宙を物理法則で読み解く

2.5 まとめ

補足資料 2.A 知的好奇心

2.1 複雑な世界の背後の 単純な摂理

物理法則と初期条件

■ 物理学的世界観

- 自然界は単純な物理法則に支配されている
- 個々の現象は初期条件が与えられればその後の進化を正確に予言できる
 - 少なくとも無生物界の記述においては、すでに確立
 - ただし量子論的不確定性が重要となるような現象では、必ずしもこの限りではない
 - 決定論的な巨視的世界 vs. 確率論的な微視的世界
- 宇宙、さらには世界そのものもまた、物理法則によって完全に理解できるのか？
 - 宇宙あるいは世界の初期条件はどうやって決まる？

高校までに学ぶべき最も重要な科学観

「世界は法則に従っている」

- だからこそ、科学を用いて、「原理的には」すべての物事は予言可能。と同時に「実際には」、その予言の信頼性には必ず限界がある
 - 「科学的にあり得ない」という結論はたいてい正しい
 - しかし、「科学を用いて得られた結論だから絶対正しい」、あるいは「科学は万能である」は、明らかに間違っている(非科学的である)
- 科学リテラシー: 科学の有効性と限界をともに理解し疑うことができること ≠ 科学的知識の暗記

例：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、予想不可能な複雑なパターンを示す
 - 検索、あるいはウィキペディアを参照することを勧める

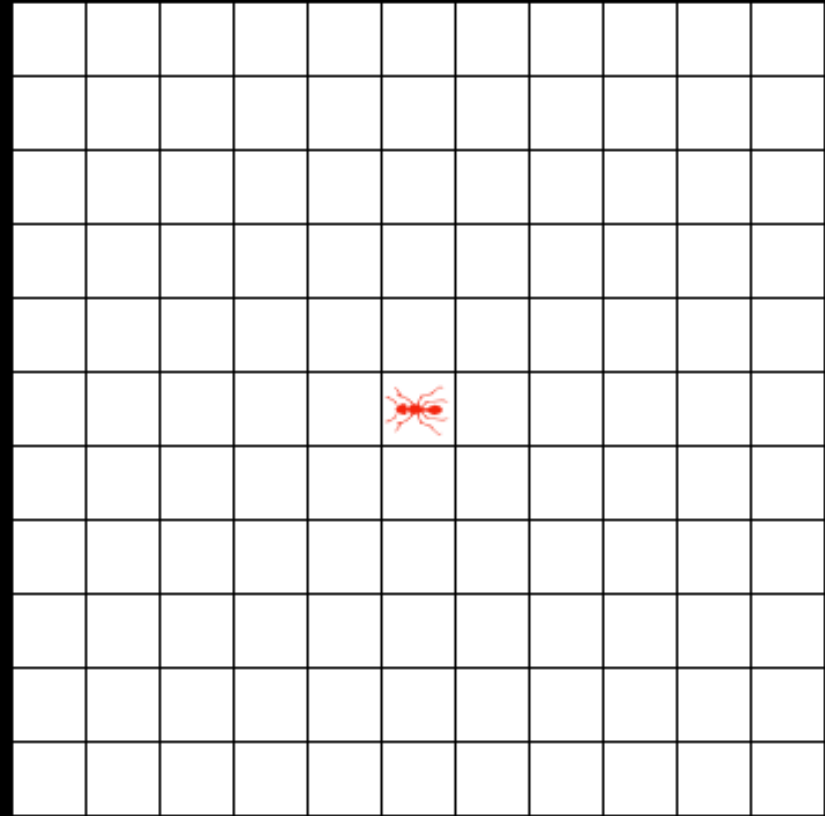


Step: 199

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
 - 黒いマスにアリがいた場合、 90° 右に方向転換し、そのマスに色をつけ、1マス前進する
 - 白いマスにアリがいた場合、 90° 左に方向転換し、そのマスの色を黒にして、1マス前進する
- 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



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

- 複雑に見える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、生物・経済・社会・心理現象、脳などまさに森羅万象)

複雑に見える世界であっても
それを支配する原理そのものは単純？
(=「言われてみれば簡単」ということ)

**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

どの程度なら「正しい」理論と言える？

ニュートン力学と水星の近日点移動

- 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
 - ただし、他の惑星の重力のために、この楕円の軸が100年間に531秒角だけずれる(水星の近日点移動)
 - 観測値は574秒角、すなわち100年に43秒角だけの差が謎
- そもそもニュートン力学の予言力がすごい



- 水星は100年 $\div$ 88日 $\div$ 400回以上公転
- つまり、一公転あたりわずか0.1秒角のズレしかない
- ニュートン力学および天文観測の驚異的な精度と信頼性

Image by WillowW ,from
Wikipedia Commons
https://en.wikipedia.org/wiki/Precession#/media/File:Precession_Kepler_orbit_280frames_e0.6_smaller.gif

CC BY 3.0

どの程度なら「正しい」理論と言える？：

一般相対論と水星の近日点移動

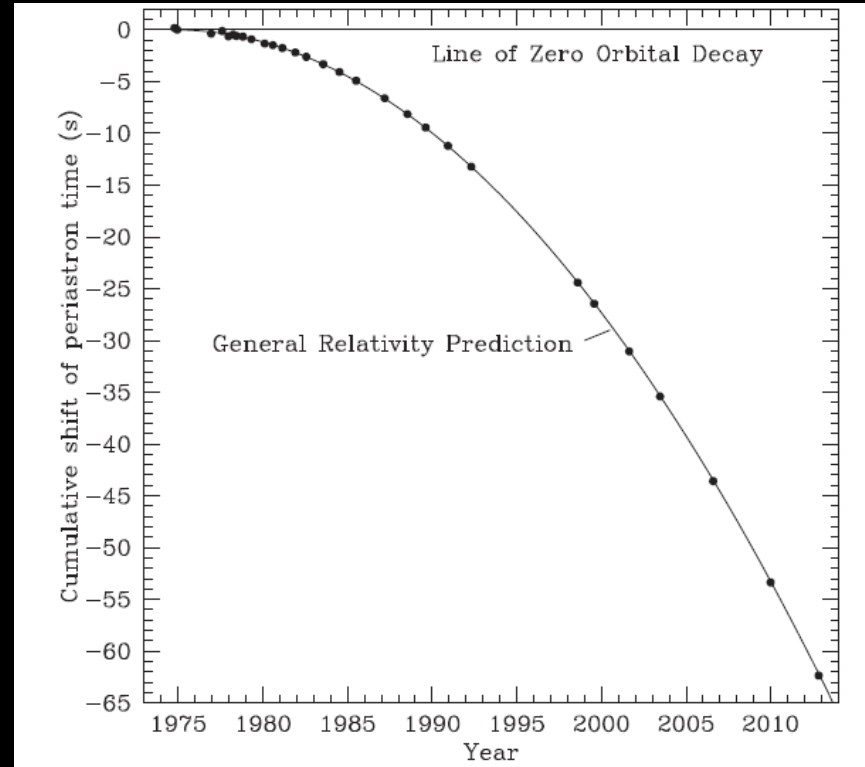
- 何と一般相対論は、この水星の近日点移動が、ニュートン力学の予言に比べて43秒角だけずれることを説明
 - 観測の誤差0.5秒角の精度で一致
 - アインシュタインの時代には観測値は 45 ± 5 秒角
 - このずれを説明する「ため」の理論などではない
 - 意外性・統一性・定量性が物理学の理論の「正しさ」を示す
- 単なる解釈や価値観、偶然とは明らかに異なる
 - ただしその元となったニュートン力学も同等にすごい
 - 「ニュートン力学は間違い」といった表現はあまりに皮相的
 - 世界は法則にしたがっていることが実感できる(物理教)

どの程度なら「正しい」理論と言える？

重力波の間接的検出

- 連星系をなす中性子星(半径わずか10kmの太陽質量天体:星自体が巨大な原子核)の公転周期Pが重力波放射によるエネルギー損失によって減少

J. M. Weisberg and Y. Huang "RELATIVISTIC MEASUREMENTS FROM TIMING THE BINARY PULSAR PSR B1913+16" The Astrophysical Journal, 829:55, 2016
p9,fig3
<http://iopscience.iop.org/article/10.3847/0004-637X/829/1/55/meta>



- 一般相対論の予言: $\Delta P / \Delta t = -2.402531 \pm 0.0014 \times 10^{-12} \text{ s/s}$
- (理論値)/(1975年から2005年の観測結果) = 0.997 ± 0.002
- 1993年ノーベル物理学賞(ハルスとテイラー)

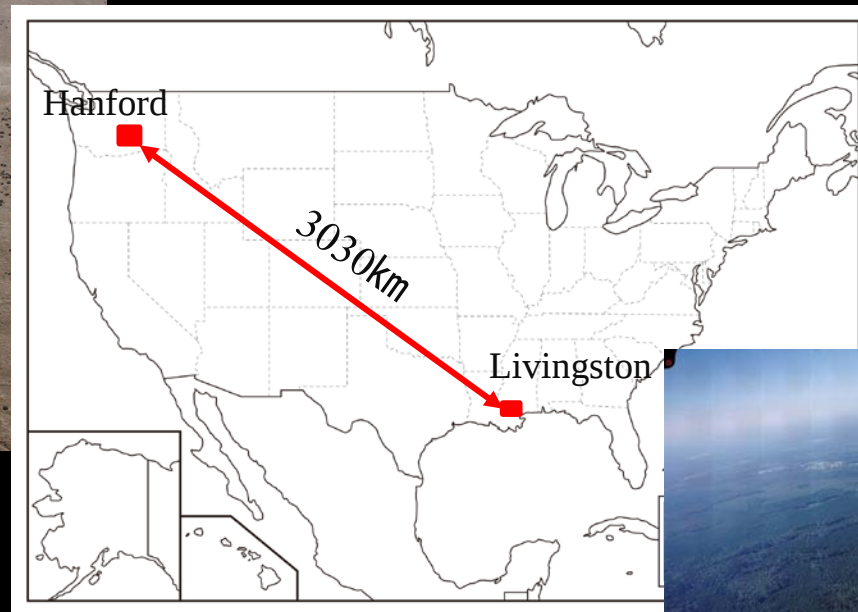
Weisberg, Nice & Taylor:
ApJ 722(2010)1030

重力波の直接検出に成功

advanced LIGO(Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory)



LIGO Hanford
<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20150731d>
Ref.20171013



LIGO Livingston
<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20150731a>
Ref.20171013

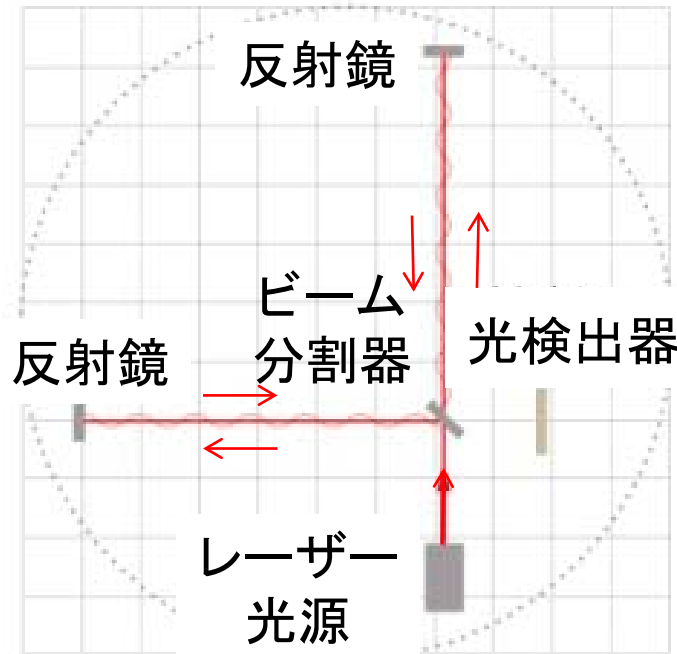


地図: 白地図専門店

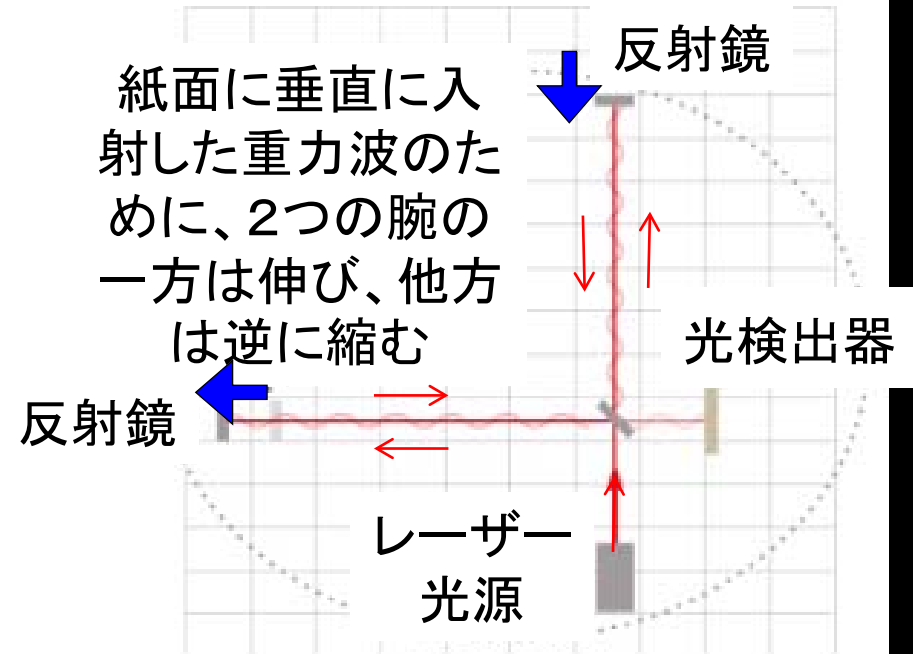
<https://www.ligo.caltech.edu/>

レーザー干渉計による重力波検出原理

Daide Castelvechi & Alexandra Witze, "Einstein's gravitational waves found at last
LIGO 'hears' space-time ripples produced by black-hole collision"
Nature News, Feb 11, 2016
<http://www.nature.com/news/einstein-s-gravitational-waves-found-at-last-1.19361>
How LIGO Caught a Wave



反射して戻って来た2つの
光が互いに打ち消して、光
検出器には届かないように
調整しておく



腕の長さが変化したため
に、反射して戻って来た2
つの光はもはや打ち消さ
れず光検出器に届く

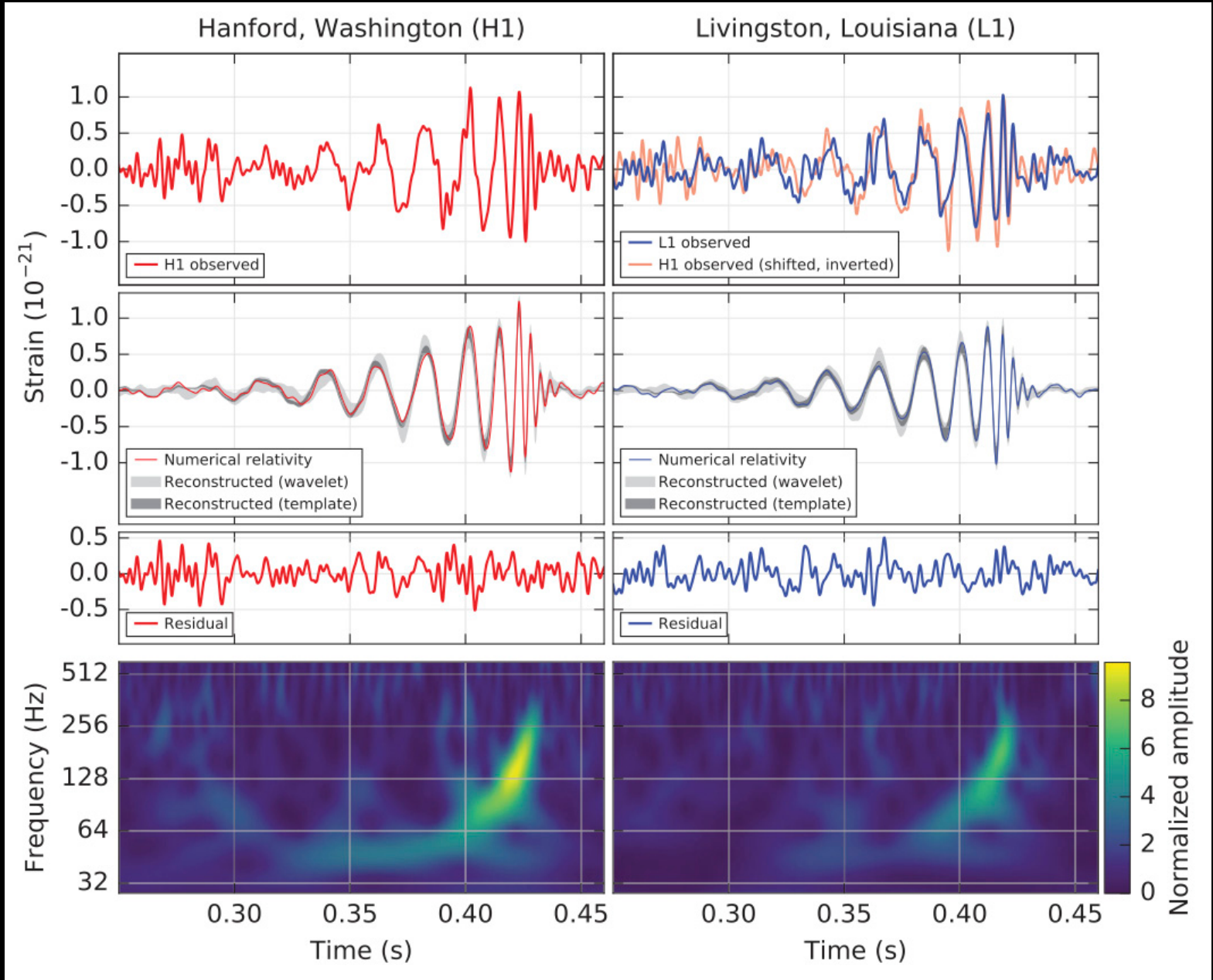


Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

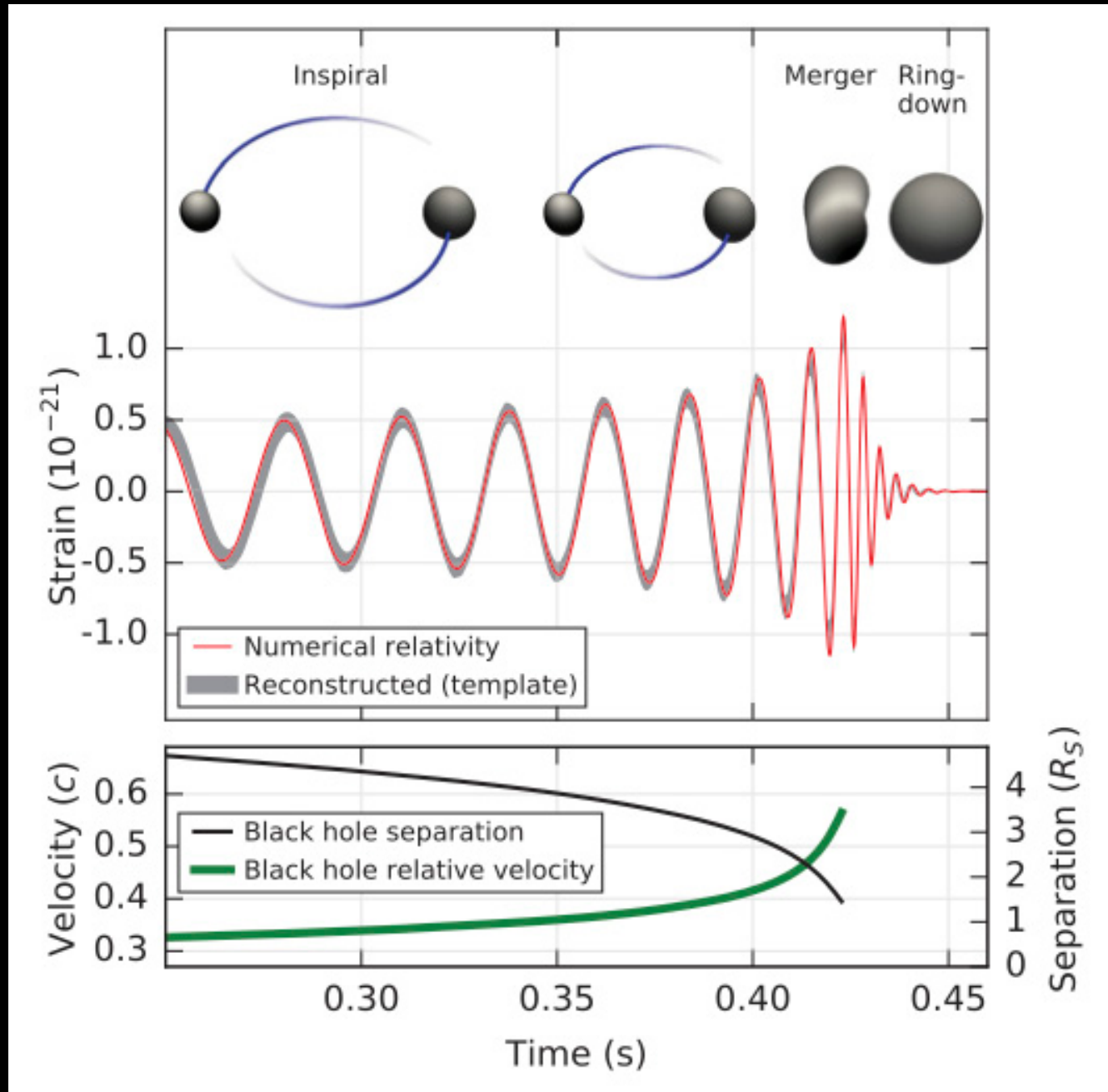
B. P. Abbott *et al.*^{*}
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

2015年9月14日 9時50分45秒 (協定世界時)



ブラックホール連星の合体



2017年ノーベル物理学賞

Rainer Weiss



Photo by Michael Hauser from Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rainer_Weiss_-_December_2006.jpg
CC BY-SA 3.0

Barry C. Barish

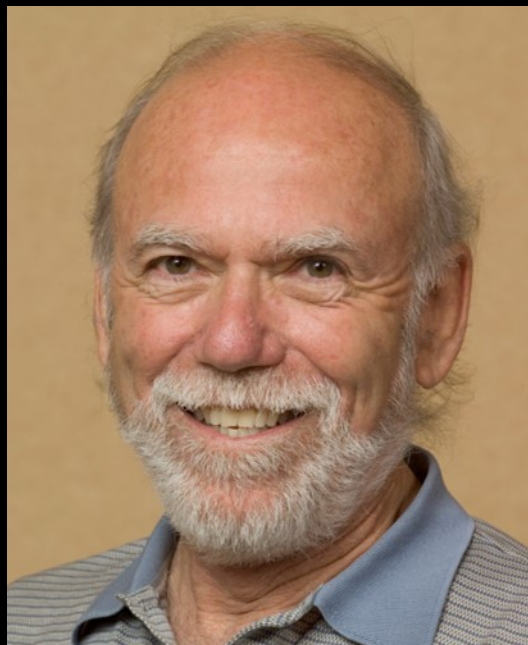


Photo by R. Hahn from Wikimedia Commons

Kip S. Thorne



Photo by Keenan Pepper from Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kip_Thorne_at_Caltech.jpg
CC BY-SA 3.0

■ *for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves*

<https://www.nobelprize.org/>

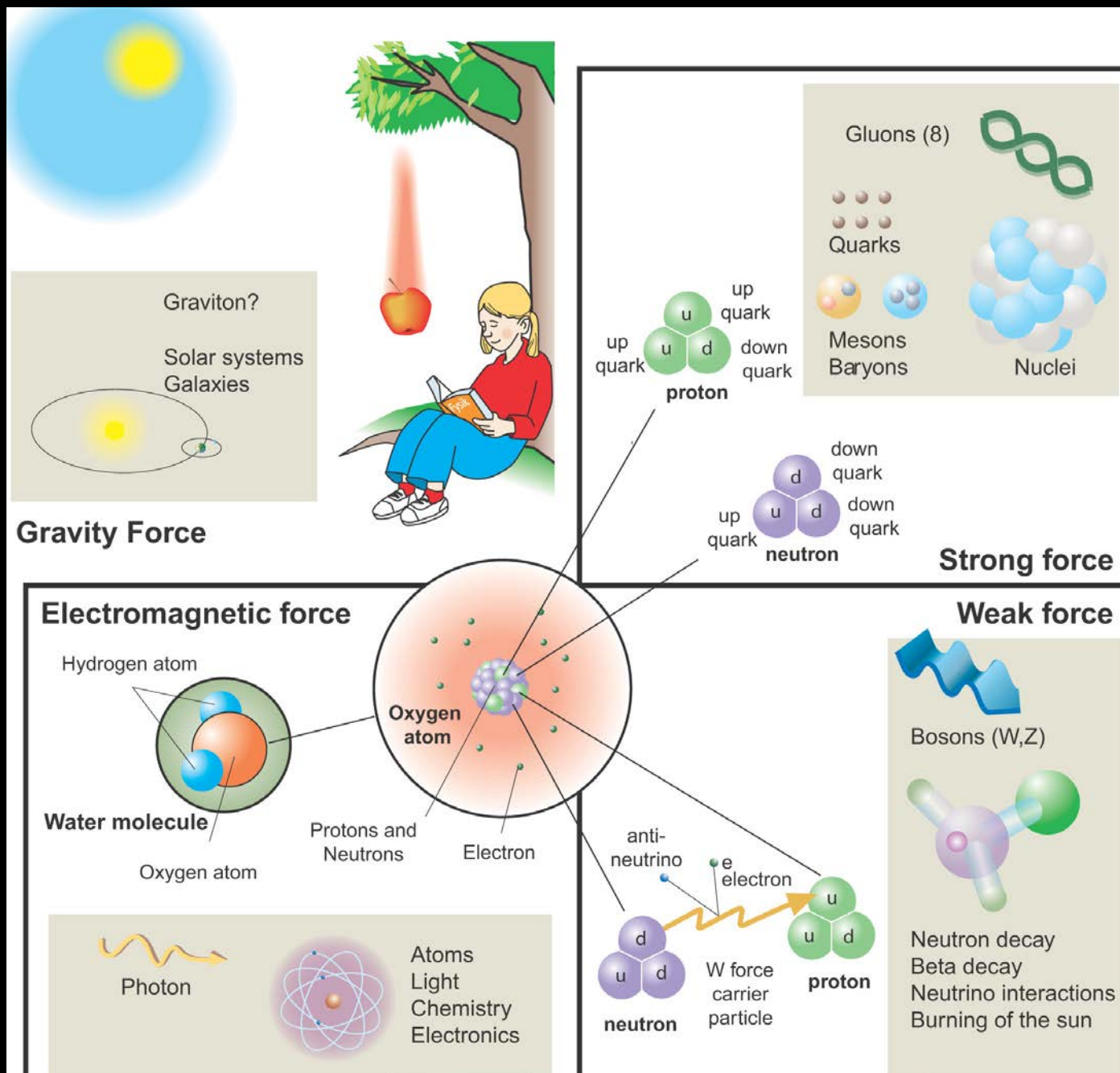
「大山鳴動鼠一匹」と揶揄された 一般相対論が今や天文観測の主演

- 世界は法則に従っている
- 「光」で見えない宇宙の本当の姿
 - ダークマターはどのように分布している？
 - ダークエネルギーとは何か？
 - 太陽系外惑星を探す
 - 宇宙はブラックホールで満ちているのか？
- 科学の地平開拓は技術の進歩に支えられている
 - 不可能としか思えないことが、技術の飛躍的進展によって可能となる (10^{-16}cm の精密計測)

2.2 自然界の4つの相互作用

自然界 に働く 「力」は すべて この4つ に帰着

(c) Typoform/The Royal Swedish Academy of Sciences
The Nobel Prize in Physics 2004, Popular Information
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/popular.html
ref. 20171024
Fig. 1. The four forces (or interactions) of Nature
https://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2004/physpub1highen.jpg

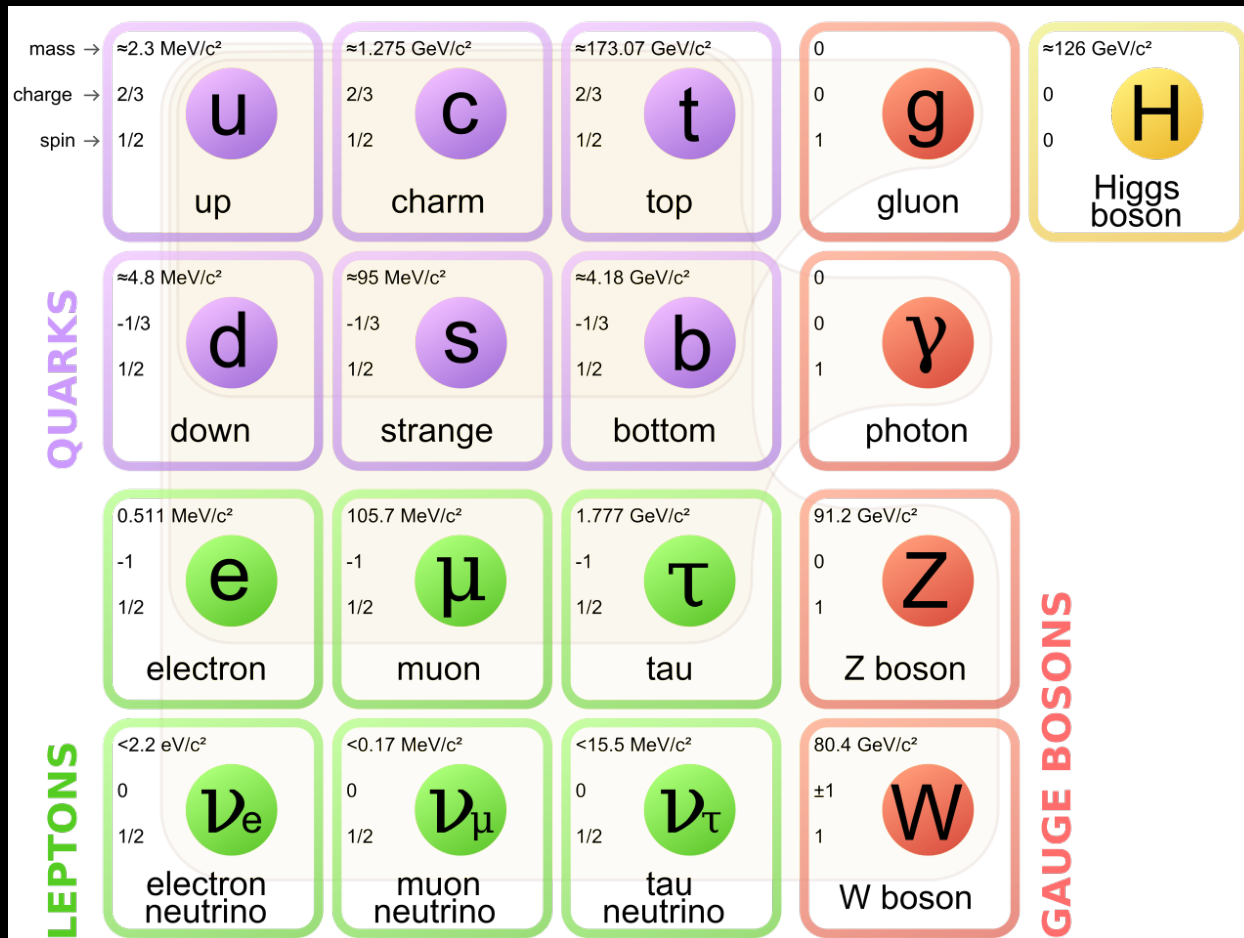


自然界の4つの相互作用(=力)

既知のすべての現象は「原理的には」この4つの相互作用で説明尽くされる(要素還元主義)

種類	性質	強さ	力の媒介粒子	到達距離
重力	質量を持つ物体間に働く万有引力	$\alpha_G = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 10^{-38}$	重力子 (質量ゼロ)	無限大 ($\propto 1/r^2$)
弱い力	レプトン、クォーク間に働く(原子核の崩壊に寄与し、引力とか斥力というイメージではない)	$\alpha_W = \frac{g_W^2}{4\pi\hbar c} \approx 0.03$	W+, W-, Zボソン (質量約100GeV)	10^{-15} m
電磁力	電荷を持つ物体間に働く引力あるいは斥力	$\alpha_{EW} = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$	光子 (質量ゼロ)	無限大 ($\propto 1/r^2$)
強い力	クォーク間、あるいは核子間に働く結合力	$\alpha_s = \frac{g_s^2}{4\pi\hbar c} \approx 1$	グルオン(質量ゼロ)、 あるいはパイ中間子 (質量約140MeV)	10^{-18} m

物質界の基本構成要素： 標準素粒子モデルにおける素粒子の階層



- この描像の確立には、多くの日本人物理学者が寄与
- 湯川秀樹 (1949年ノーベル物理学)
- 坂田昌一
- 小林誠、益川敏英、南部陽一郎 (2008年ノーベル物理学賞)
- 梶田隆章 (2015年ノーベル物理学賞)
- 4回目から担当される浅井祥仁先生は、2013年のノーベル物理学賞対象となったヒッグス粒子の発見に大貢献

素粒子の標準模型

クォーク

第1世代	第2世代	第3世代	電荷
u (アップ)	c (チャーム)	t (トップ)	+2/3
d (ダウン)	s (ストレンジ)	b (ボトム)	-1/3

レプトン

第1世代	第2世代	第3世代	電荷
ν_e (電子ニュートリノ)	ν_μ (ミューニュートリノ)	ν_τ (タウニュートリノ)	0
e (電子)	μ (ミュー粒子)	τ (タウ粒子)	-1

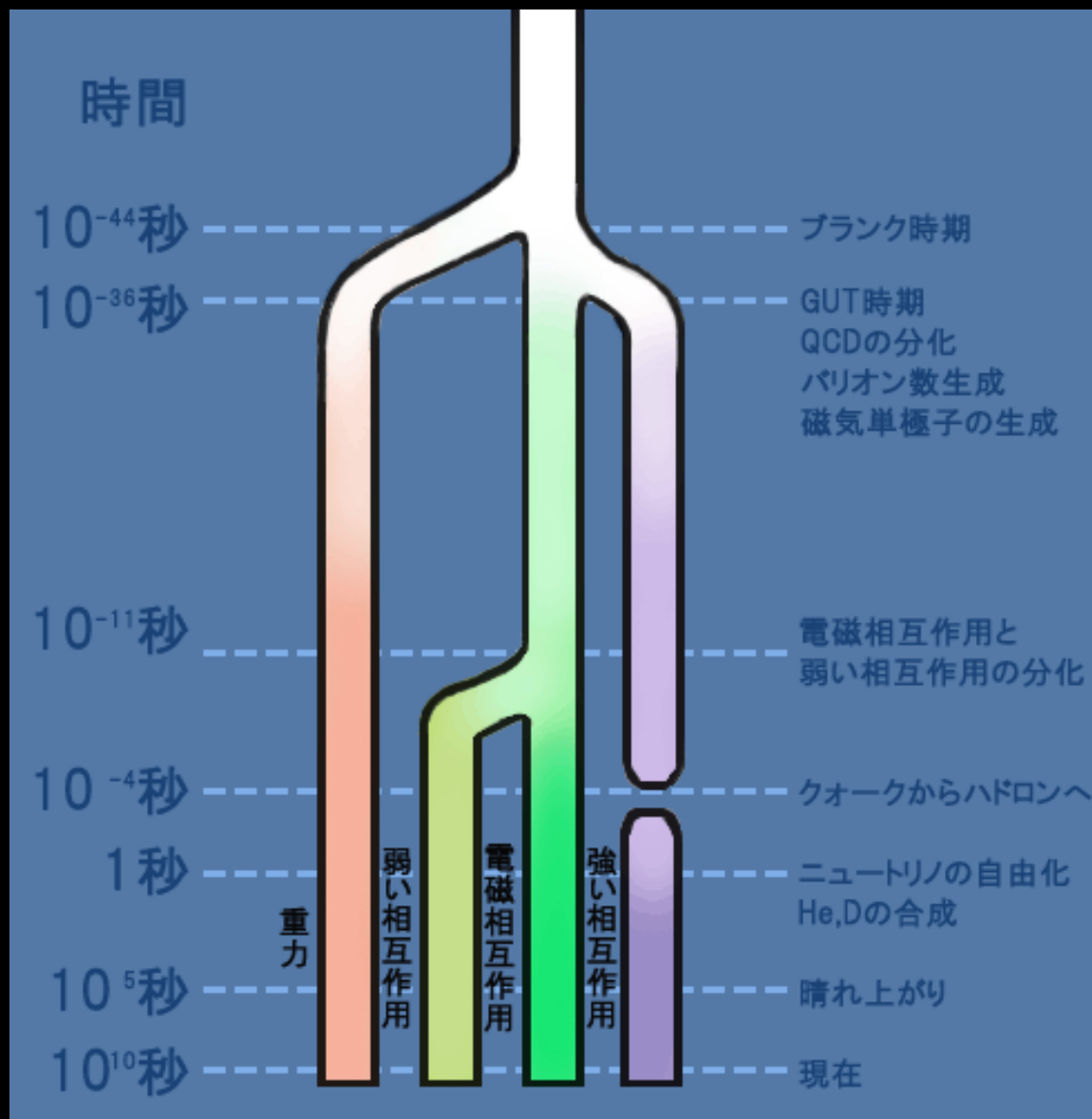
ゲージ粒子

電磁相互作用	γ (光子)
強い相互作用	グルオン
弱い相互作用	Z粒子、W粒子

自然界の不思議さ: 4つの相互作用

- 自然現象は4つの相互作用(力)ですべて説明できる
 - 強い相互作用 (クォークが核子を、核子が原子核を作る)
 - 弱い相互作用 (中性子のベータ崩壊)
 - 電磁相互作用 (クーロンの法則)
 - 重力相互作用 (ニュートンの逆二乗則)
- なぜ4つなのか、実は1つに帰着するのでは？
(後者は「力の統一」というアイディア: 統一理論)
 - 高エネルギー(宇宙初期)では1つしかなかった相互作用が、低エネルギー(現在)で4つに分化したと考える
 - 電弱統一 = 弱い力 + 電磁力 = ワインバーグ・サラム理論
 - 強弱電統一 = 大統一理論(GUT)、超対称性理論
 - 重力を含めたすべての統一 = 量子重力理論、超紐理論

宇宙史における4つの相互作用の分化



重力の誕生

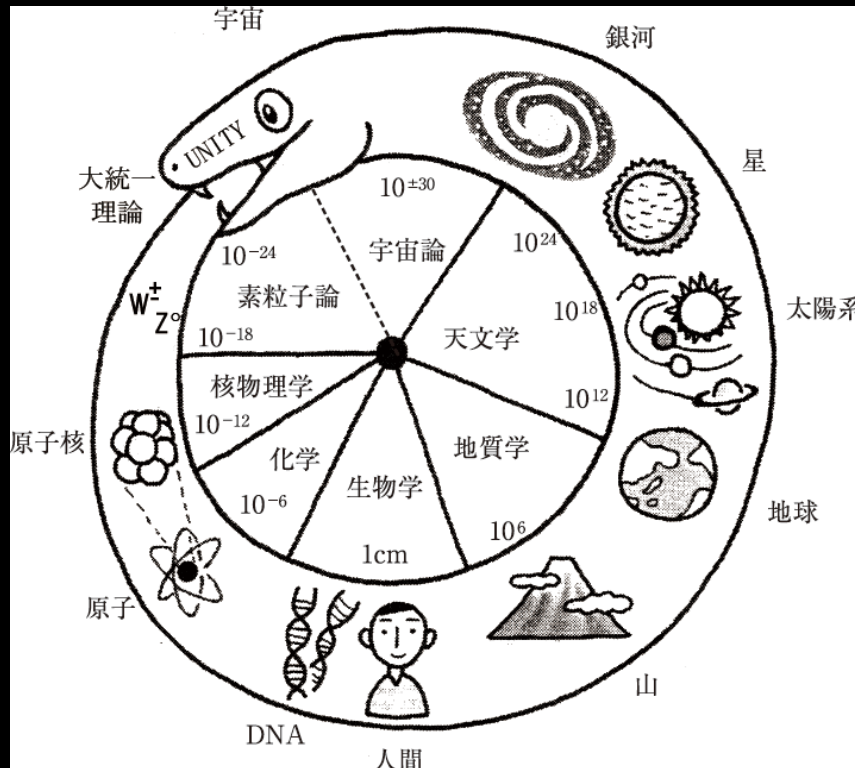
強い力の誕生

弱い力の誕生

陽子の誕生

佐藤文隆・佐藤勝彦
「自然」1978年12月号より

宇宙の階層と物質の階層



約60桁も異なる
巨視的世界(宇宙論)と
微視的世界(素粒子論)は
宇宙の進化を通じて
密接に結びついている

S.L.Glashow “Interaction” (Warner Books)

「ものの大きさ—自然の階層・宇宙の階層」 fig04-01 須藤靖 著、東大出版会 (2006年)

イラスト:いずもりよう

すべての物質は素粒子からなる

- If, in some cataclysm, all scientific knowledge were to be destroyed, and only one sentence passed on to the next generations of creatures, what statement would contain the most information in the fewest words? **I believe it is the atomic hypothesis** (or atomic fact, or whatever you wish to call it) that all things are made of atoms — little particles that move around in perpetual motion, attracting each other when they are a little distance apart, but repelling upon being squeezed into one another. **In that one sentence you will see an enormous amount of information about the world, if just a little imagination and thinking are applied.**

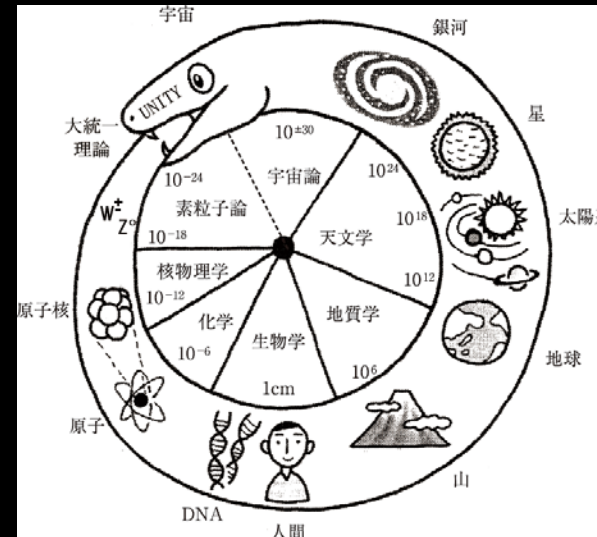
- The Feynman Lectures on Physics (1964) 1–2 Matter is made of atoms
<http://www.feynmanlectures.caltech.edu/>

2.3 ものの大きさは 基本物理定数で決まっている

自然界に内在する特徴的スケール

■ 自然界に存在する物質階層の特徴的スケール

- 原子核: 10^{-15}m
- 原子: 10^{-10}m
- 細胞: 10^{-6}m
- 人間: 1m
- 星: 10^9m
- 銀河: 10^{20}m



「ものの大きさ—自然の階層・宇宙の階層」 fig04-01 須藤靖 著、東大出版会（2006年）
イラスト: いずもりよう

- 我々が観測できる宇宙(地平線球): 10^{25}m

■ なぜか？

- 人間が1ミクロン、あるいは100kmでは困るのか
- 自然界の相互作用の強さ(それに対応する基本物理定数の値)で決まっている

自然界を支配する物理定数（次元を持つ）

■ 光速度（相対論）

- c ($\doteq 3 \times 10^{10} \text{cm/s}$)
- すべてのものはこの速さを超えて情報を伝えることはできないという因果律を保証。光の速度はいかなる座標系でも同じ。

■ ニュートンの万有引力定数（古典力学）

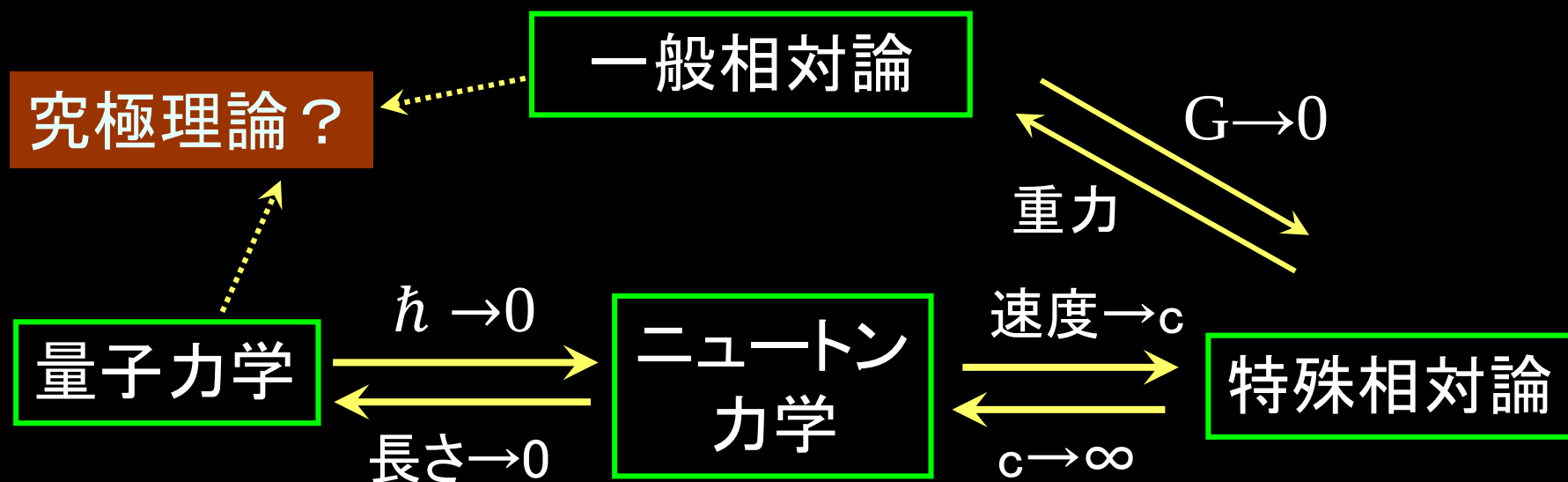
- G ($\doteq 6.67 \times 10^{-8} \text{cm}^3/\text{g/s}^2$)
- 重力の逆二乗則: $F = GmM/r^2$

■ 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 $\hbar$: 作用の最小単位
- これらの値が異なる世界は、我々の世界とは全く異なる振る舞いをする(より根源的な法則の存在?)



物理定数の値で決まるプランクスケール

- 物理定数である c , G , $\hbar$ を組み合わせてできる長さ、質量、時間の次元を持つ量は一意的に決まる

- プランク長さ

$$\ell_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^3}} = 2 \times 10^{-33} \text{ cm}$$

- プランク質量

$$m_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 2 \times 10^{-5} \text{ g}$$

- プランク時間

$$t_{pl} = \sqrt{\frac{\hbar G}{c^5}} = 5 \times 10^{-44} \text{ sec}$$

- これらの値が自然界のどこかに埋め込まれている
- 逆にこれらが日常的現象のスケールからかけ離れていることが、この宇宙に存在する階層の安定性を保証する

須藤靖:『ものの大きさ』(東大出版会、2006)

この自然界の相互作用の強さの比は どう考えても不自然そのもの

■ 電磁気力の強さ: 微細構造定数 (無次元数)

$$\alpha_E = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

e は陽子の電荷
陽子同士に働くクーロン力 e^2
を無次元化した数値

■ 重力の強さ: 重力微細構造定数 (無次元数)

$$\alpha_G = \frac{Gm_p^2}{\hbar c} \approx 6 \times 10^{-39}$$

m_p は陽子の質量
陽子同士に働く重力 Gm_p^2
を無次元化した数値

■ 電磁気力と重力の強さの比 $\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \approx 10^{36}$

この比はとてつもなく大きな数値なので不自然 (理論的に説明が困難)。しかし、だからこそ少々地面に落とそうが原子は決して壊れない。つまり、この不自然な値が世界の安定性を保証している。

相互作用の強さの比が、物質世界の階層の安定性を決めているらしい

■ 天体の質量の大雑把な理論的推定 (『ものの大きさ』第4章)

$$\frac{\text{惑星の質量}}{\text{陽子の質量}} = \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \right)^{3/2} \approx 10^{54}$$

$$\frac{\text{恒星の質量}}{\text{陽子の質量}} = \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}} \right)^{3/4} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \right)^{3/2} \approx 10^{57}$$

$$\frac{\text{銀河の質量}}{\text{陽子の質量}} = \alpha_E^3 \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}} \right)^{1/2} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \right)^2 \approx 10^{67}$$

$$\frac{\text{銀河の質量}}{\text{恒星の質量}} = \alpha_E^3 \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}} \right)^{-1/4} \left(\frac{\alpha_E}{\alpha_G} \right)^{1/2} \approx 10^{10}$$

$$\frac{\text{恒星の質量}}{\text{惑星の質量}} = \left(\frac{\text{陽子の質量}}{\text{電子の質量}} \right)^{3/4} \approx 10^3$$

■ 自明ではない重要な結論

- 巨視的世界(天体)もまた物理法則に支配されている
- $\alpha_E/\alpha_G \approx 10^{36}$ が巨視的世界と微視的世界をつなぐと同時に、かつそのスケールの隔たりの原因

■ これらは観測データとそれなりに良く一致している

無次元物理定数の値はなぜ決まっている？

It has been a mystery ever since it was discovered more than fifty years ago, and all good theoretical physicists put this number up on their wall and worry about it. Immediately you would like to know where this number for a coupling comes from: is it related to π or perhaps to the base of natural logarithms? Nobody knows. It's one of the greatest damn mysteries of physics: a magic number that comes to us with no understanding by man. You might say the "hand of God" wrote that number, and "we don't know how He pushed his pencil."



http://en.wikipedia.org/wiki/File:Richard_Feynman.png

Richard Feynman “QED :
The Strange Theory of
Light and Matter” (1985)
微細構造定数 $\alpha_E \doteq 1/137$ に
ついて

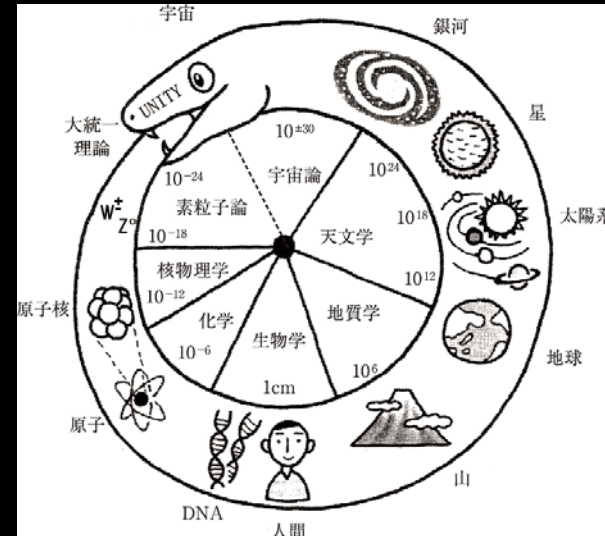
巨視的世界 と微視的世界は 物理法則で繋 がっている

微視的世界:量子力学
粒子性と波動性
プランク定数 h

須藤靖:『ものの大きさ』
(東大出版会、2006)より

ちなみに、物理学において、古典とは「量子論的ではない」という意味
通常、古典力学とはニュートン力学、
解析力学、あるいは相対論的力学
のどれかの意味で用いられる

素粒子と宇宙：一般相対論
時間・空間と物質、物理学の幾何学化
座標系に対する不変性、光速 c



「ものの大きさ—自然の階層・宇宙の階層」 fig04-01 須藤靖 著、東大出版会（2006年）
イラスト:いずもりよう

巨視的世界:ニュートン力学
慣性系における運動方程式
プランク定数=0かつ光速= ∞ の極限

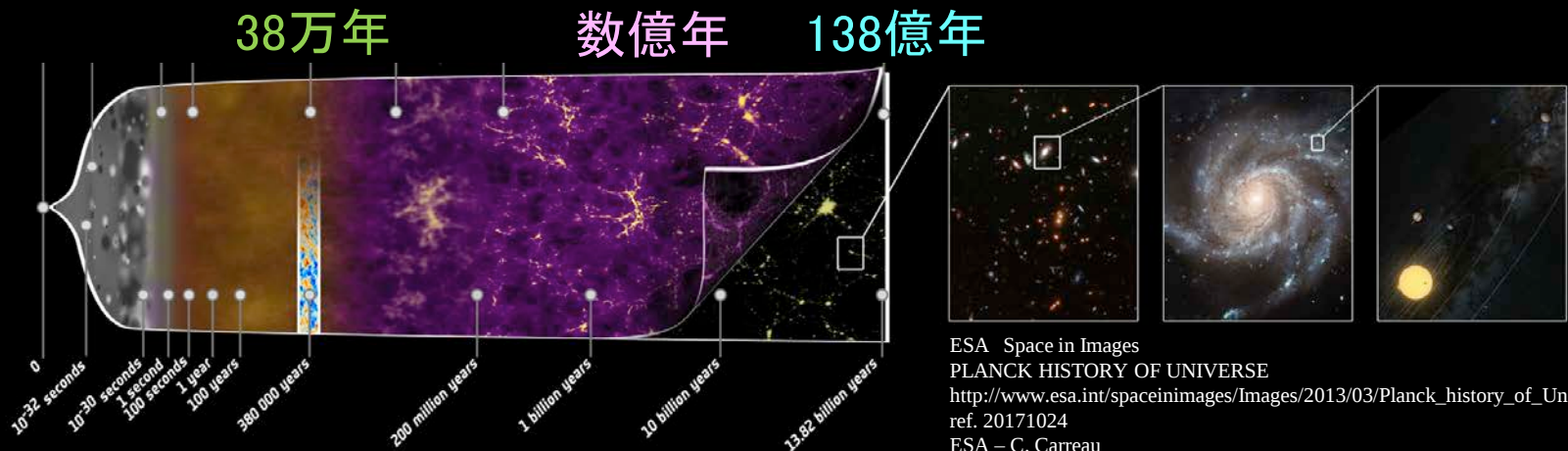
2.4 宇宙を物理法則で読み解く

宇宙膨張と物質世界の進化

- 宇宙は膨張しながら密度と温度を下げる
 - 光に満ちた単純な宇宙から、複雑で多様な天体世界へ
- $t \doteq 3$ 分: 軽元素(ヘリウム)合成
- $t \doteq 38$ 万年: 電離した宇宙が中性化 (陽子+電子 から 水素原子)
- $t \doteq$ 数億年: 第一世代天体の誕生
- $t \doteq$ 数億年 ~ 138億年: 星形成(重元素合成)、銀河・銀河団形成+生命

宇宙の中性化: その時の宇宙の光の化石が、現在の宇宙を満たしている宇宙マイクロ波背景輻射

宇宙の誕生



ESA Space in Images
PLANCK HISTORY OF UNIVERSE
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_history_of_Universe
ref. 20171024
ESA - C. Carreau

http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck

地球儀と世界地図の関係

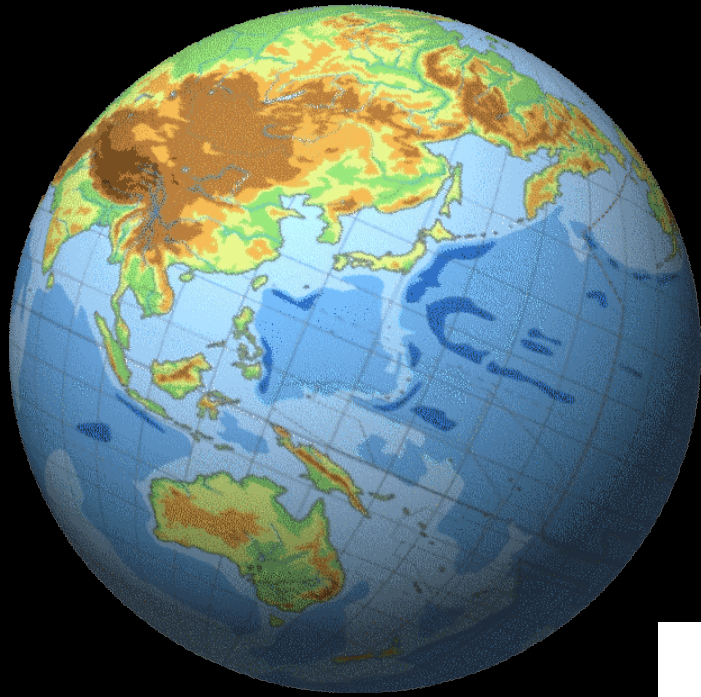


Image by Syouzou Imai from
GIFMAGAZINE
地球儀を作りたい。イメージ図
https://gifmagazine.net/post_images/711019



Image by Mdf from Wikimedia Commons

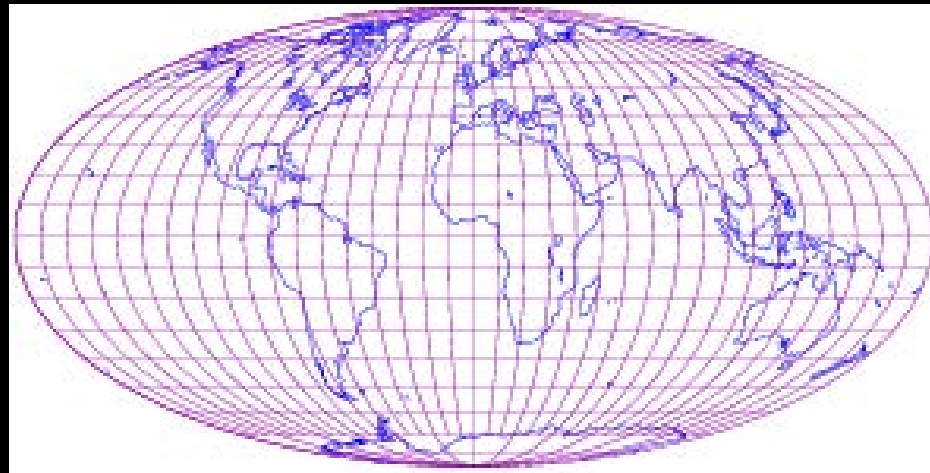


Image by prasin0s from Wikimedia Commons

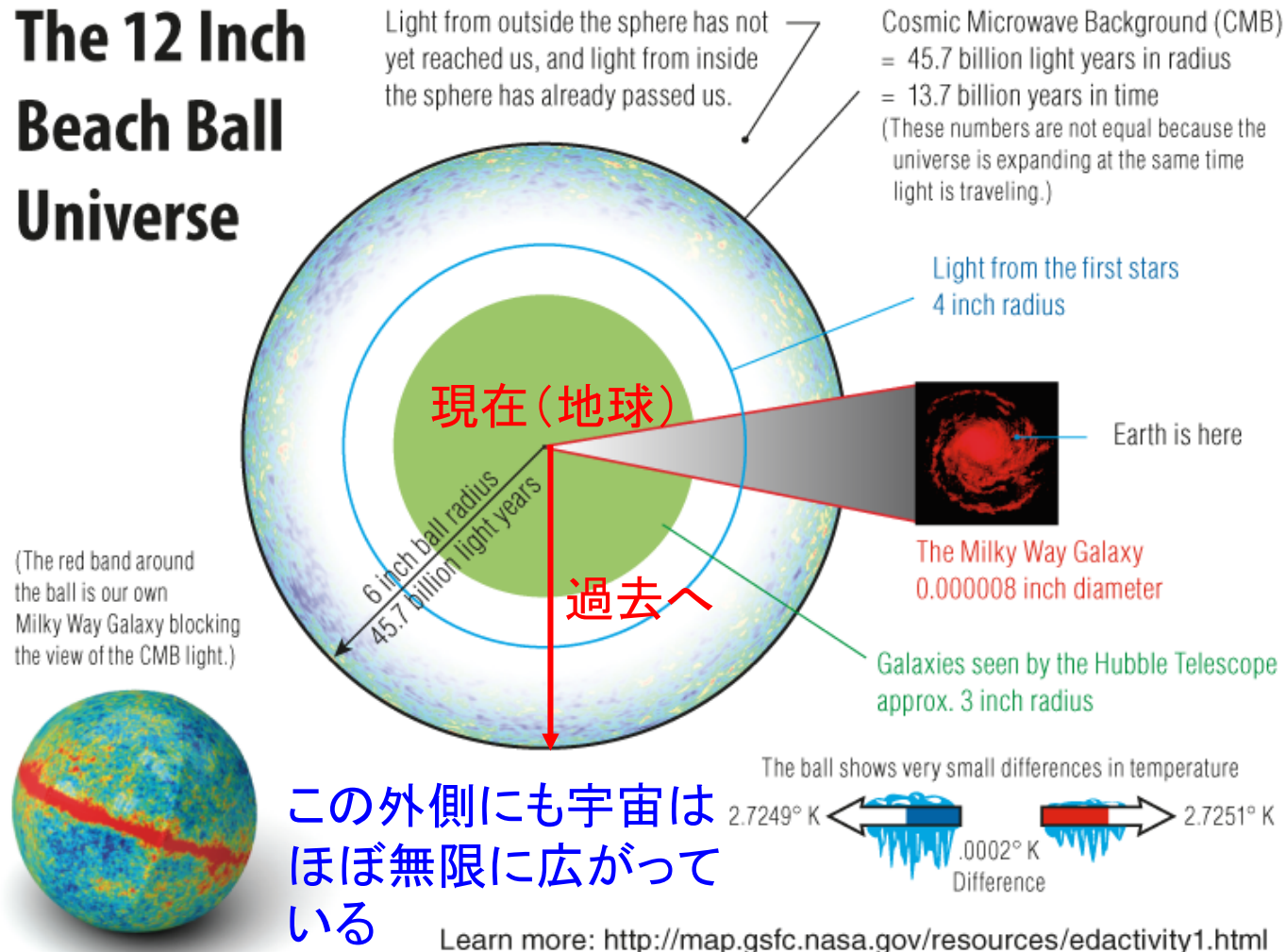
電磁波で現在観測できる宇宙の果て

宇宙マイクロ波背景輻射(ビッグバンの光の化石)

NASA / WMAP Science Team
12-inch Model of the Universe
<https://wmap.gsfc.nasa.gov/media/091057/index.html>
Ref. 20171018

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

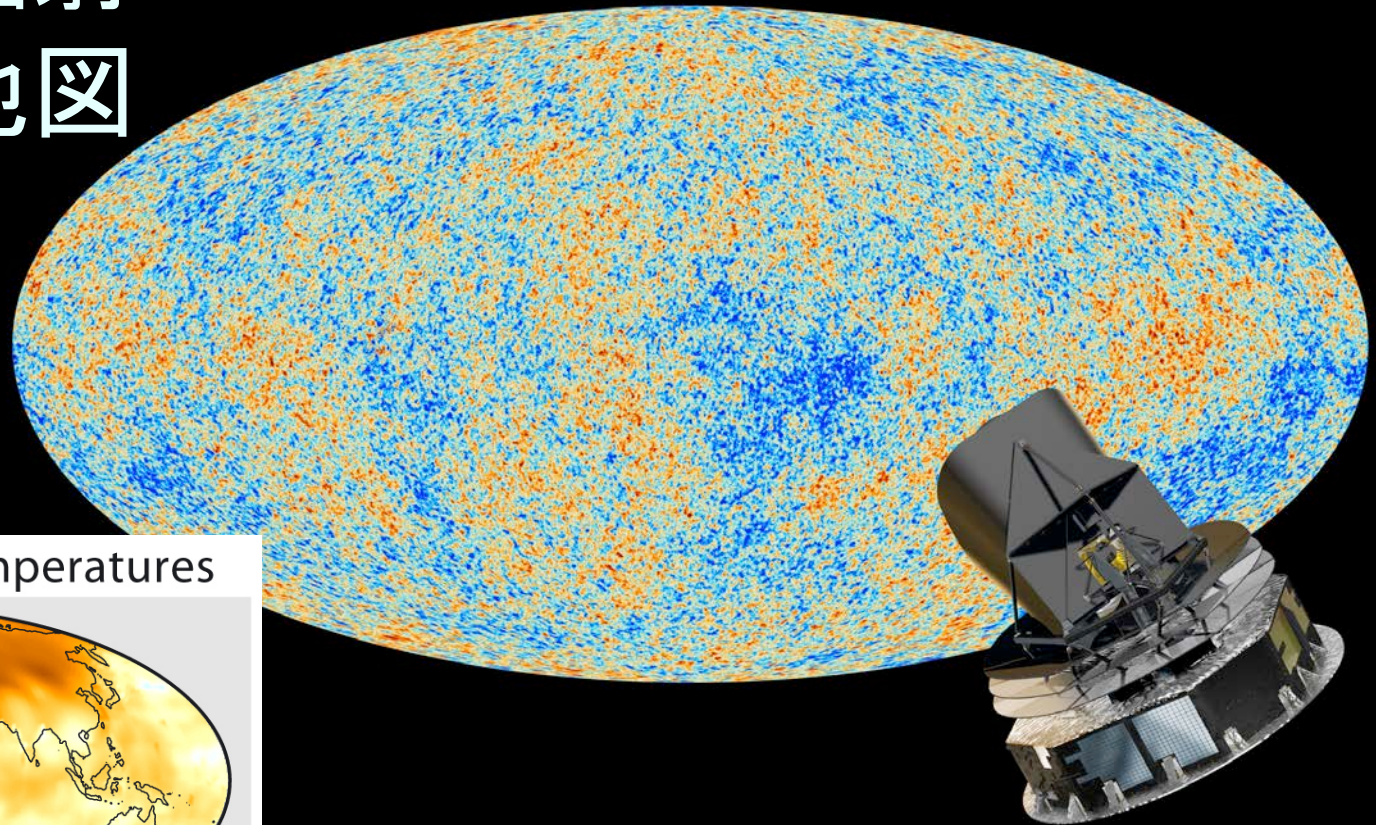
The 12 Inch Beach Ball Universe



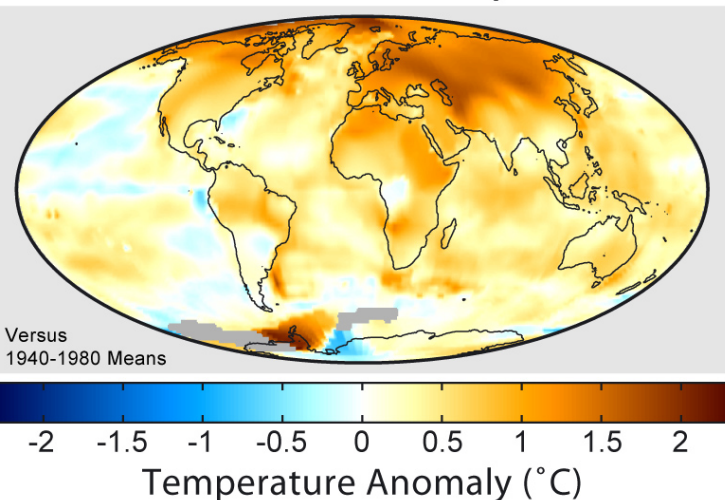
宇宙マイクロ波 背景輻射 温度地図

The ball shows very small
differences in temperature

2.7249° K  $.0002^{\circ}\text{ K}$
Difference  2.7251° K



1999-2008 Mean Temperatures



プランク衛星の観測データ(2013)

ESA Space in Images PLANCK AND THE COSMIC MICROWAVE BACKGROUND
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_and_the_cosmic_microwave_background
ref. 20171024

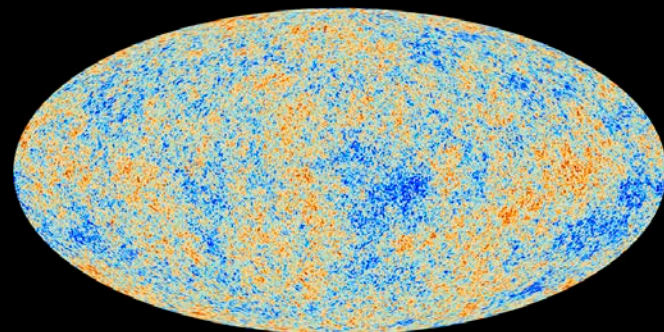
Copyright ESA and the Planck Collaboration - D. Ducros

参考: 地球の温暖化を表す地図(ウィキペディア)

138億年前の古文書の解読方法

■ 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

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

ESA
Space in Images
PLANCK CMB (BLACK BACKGROUND)
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/04/Planck_CMB_black_background
Copyright ESA and the Planck Collaboration
ref. 20171024

■ 解読された古文書内容

- 温度ゆらぎスペクトル

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

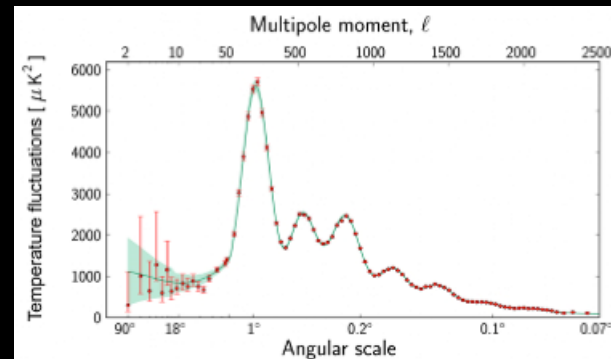
ESA
Space in Images
PLANCK POWER SPECTRUM
Copyright ESA and the Planck Collaboration
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_Power_Spectrum
ref. 20171024

■ 古文書を理解するための文法

- ダークマターモデルによる理論予言

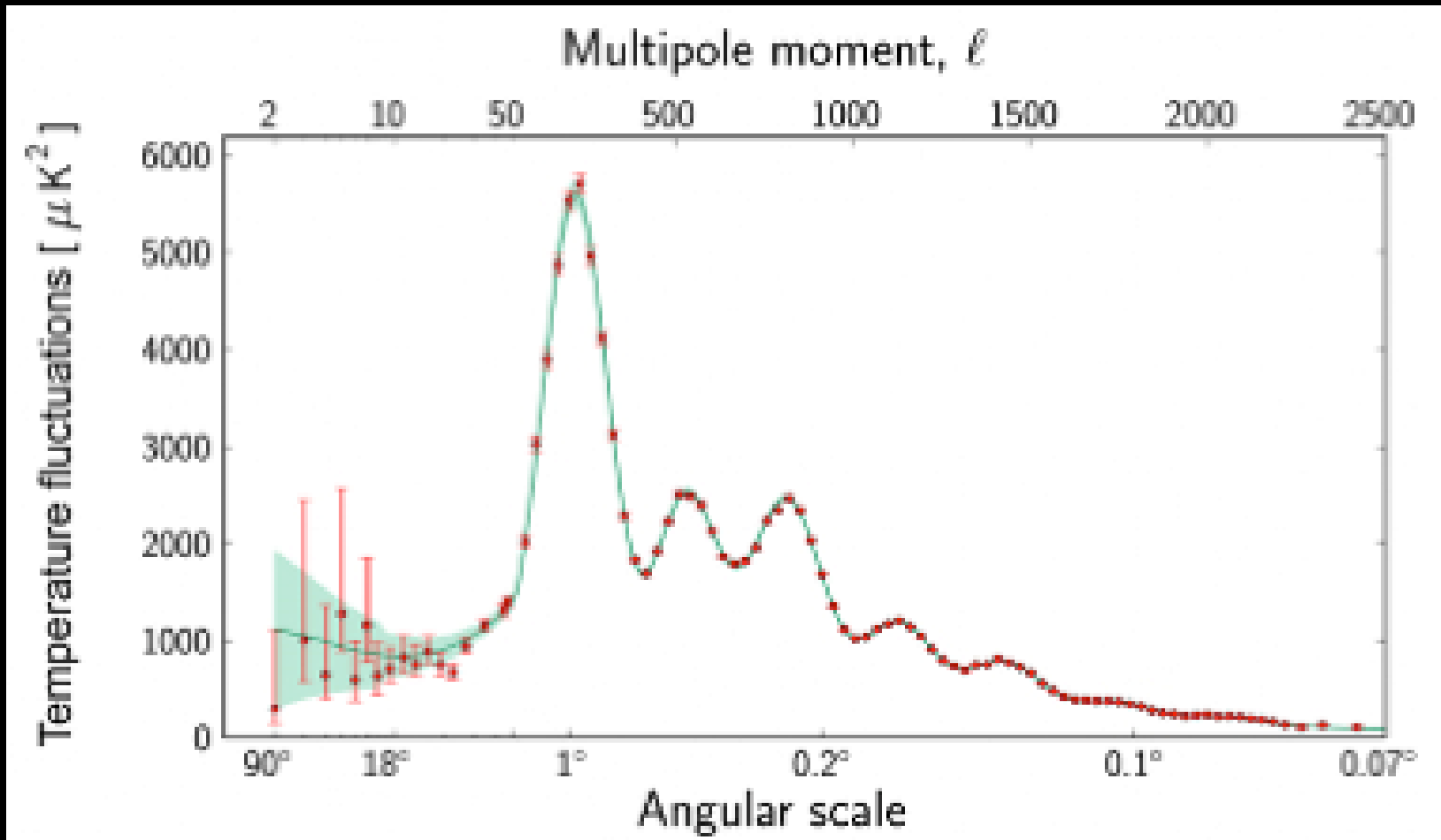
■ 夜空ノムコウに隠されている情報

- 宇宙の年齢、宇宙の幾何学的性質、宇宙の組成



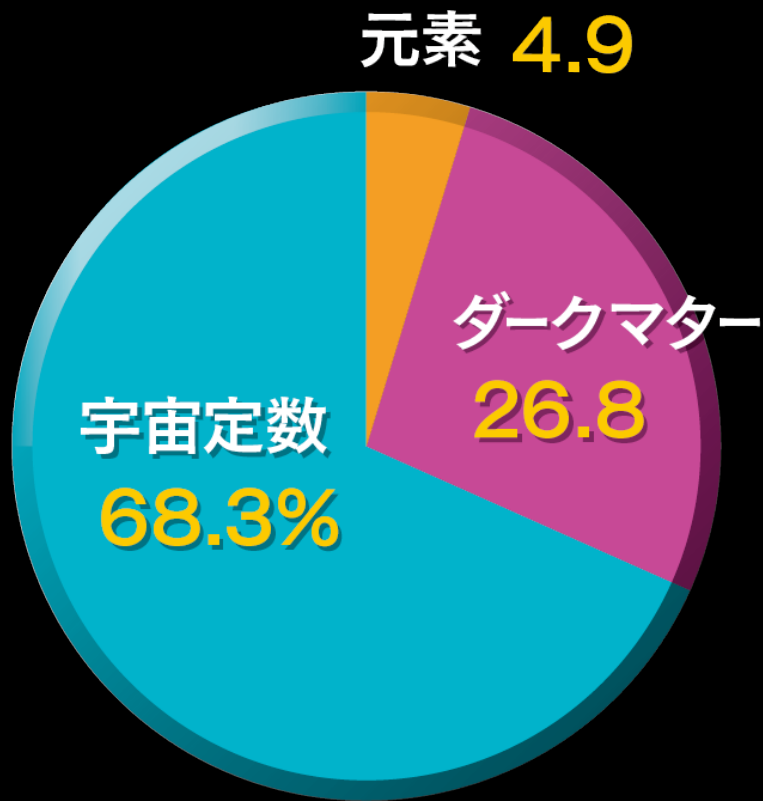
標準宇宙モデル: わずか6つのパラメータでぴったり説明できる

ESA
Space in Images
PLANCK POWER SPECTRUM
Copyright ESA and the Planck Collaboration
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/03/Planck_Power_Spectrum
ref. 20171024



http://www.esa.int/Our_Activities/Space_Science/Planck

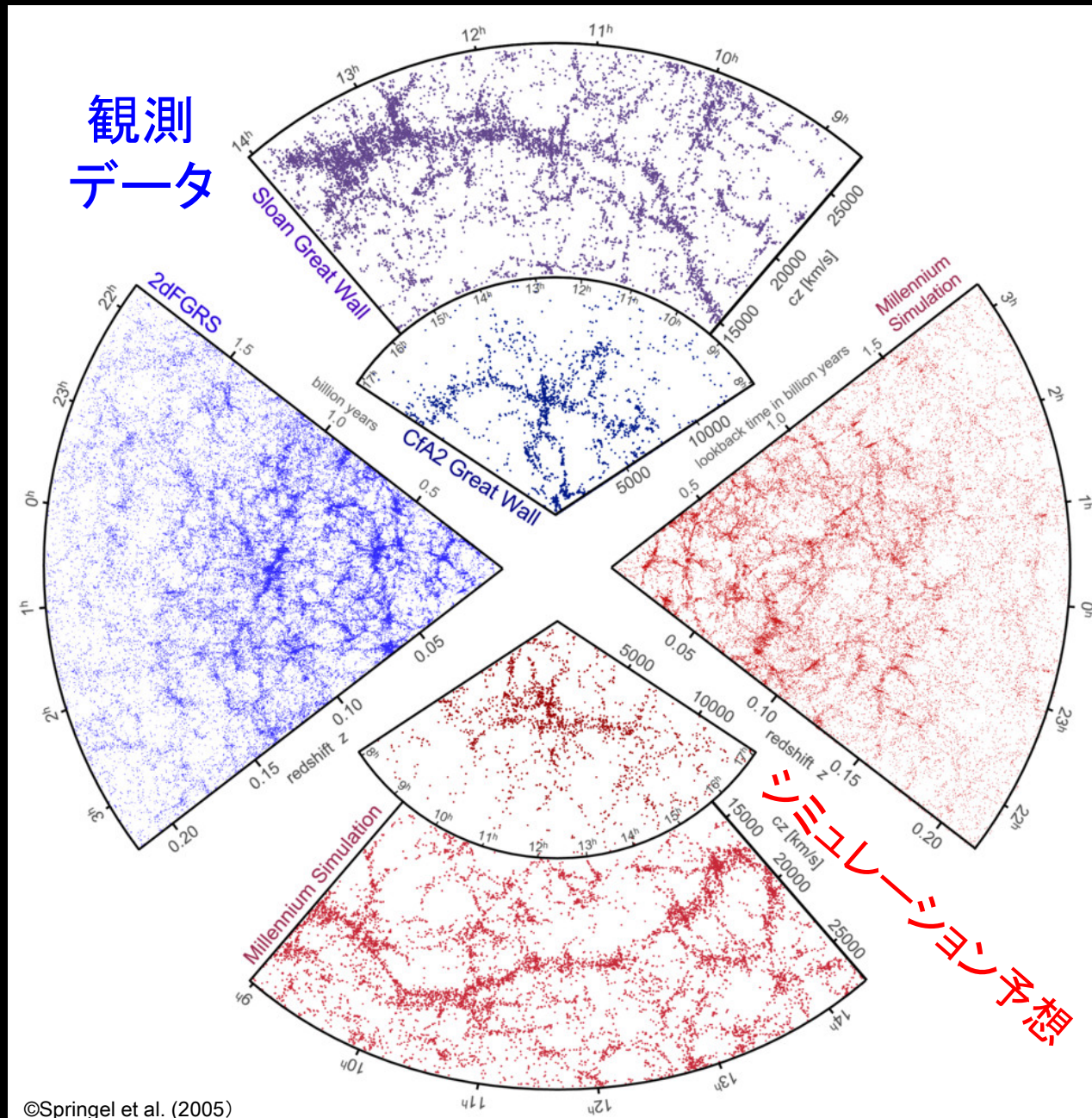
この宇宙マイクロ波背景輻射地図 と物理法則からわかったこと： 現在の宇宙の組成



- 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

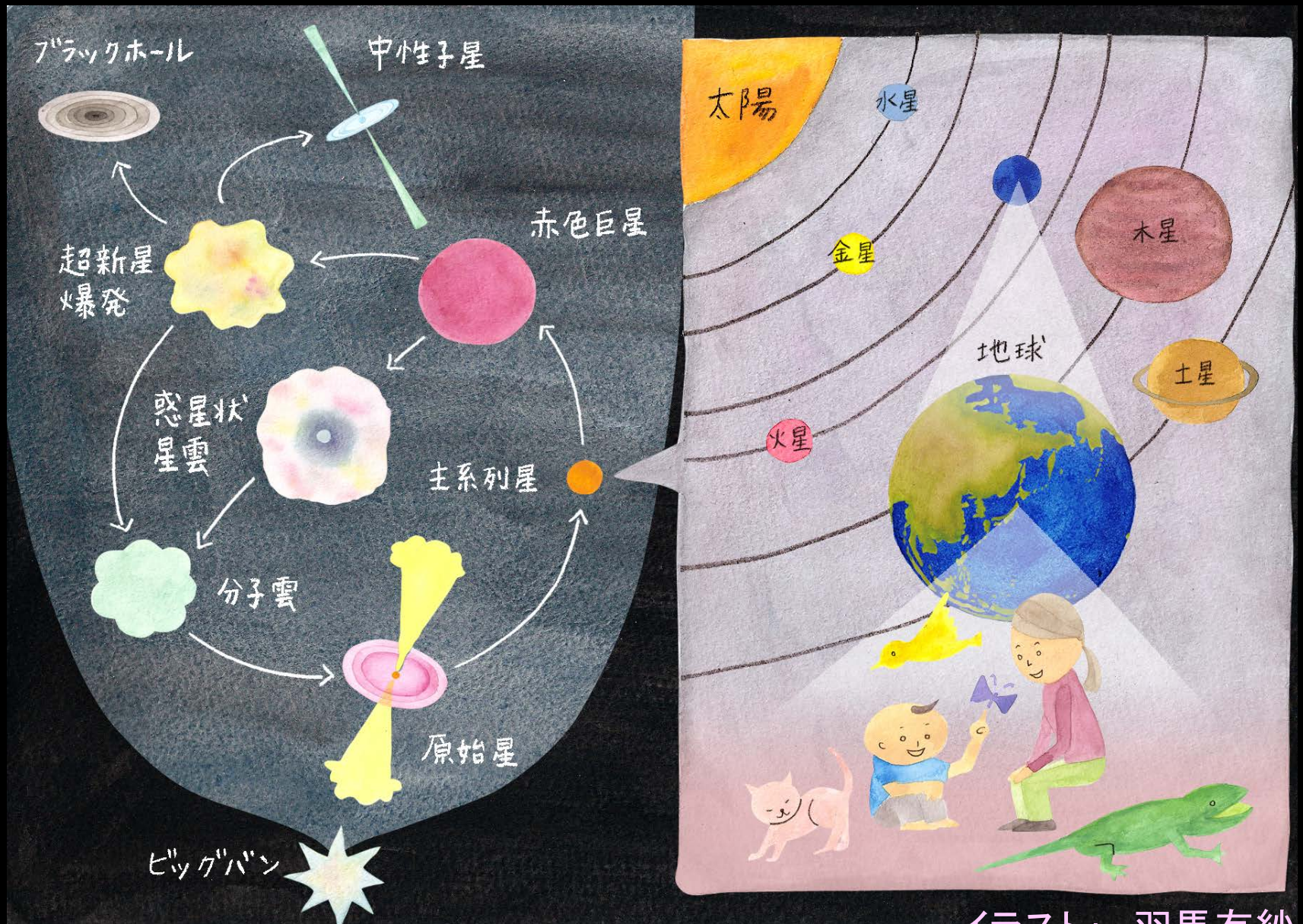
理論予言 (数値計算) と観測データ: 銀河の 3次元分布

- 宇宙モデルを決める少数のパラメータを与えるだけで、近傍宇宙における銀河の分布が見事に再現できる
- 宇宙は法則に従っている



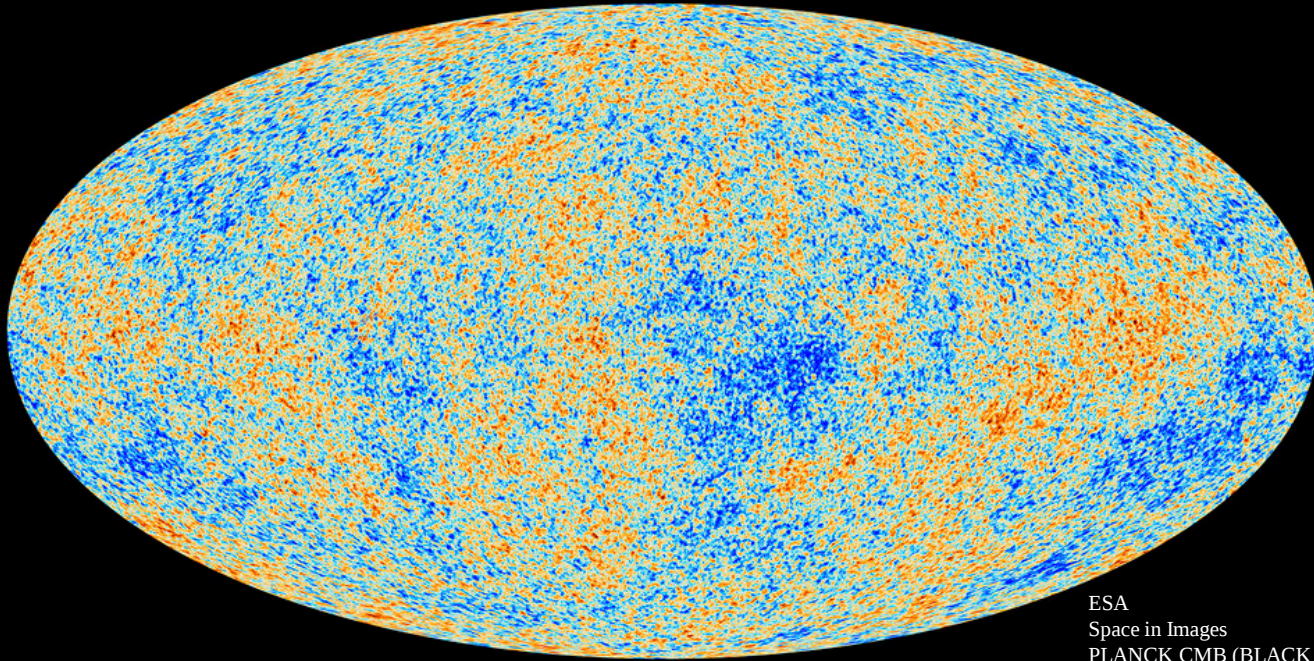
2.5 まとめ

宇宙・天体・物質・生命の共進化



現在の宇宙(世界)に関する全情報が 原理的にはここに刻み尽くされている

誕生後38万年の宇宙の「初期条件」＝宇宙マイクロ波背景輻射



ESA
Space in Images
PLANCK CMB (BLACK BACKGROUND)
http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/04/Planck_CMB_black_background
Copyright ESA and the Planck Collaboration
ref. 20171024

■ 宇宙論の中心的教義

初期条件+(既知の)物理法則 = 現在の宇宙

宇宙＝天体＋生命＋技術＋社会.....

Hubble Space Telescope

Hubble's colourful view of the Universe

Credit: NASA, ESA, H. Teplitz and M. Rafelski (IPAC/Caltech), A. Koekemoer (STScI), R. Windhorst (Arizona State University), and Z. Levay (STScI)

<http://www.spacetelescope.org/images/heic1411a/>

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute

Jet Propulsion Laboratory, NASA

The Day the Earth Smiled: Sneak Preview

<https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=pia17171>
ref. 20171101

宇宙の構造

銀河

惑星系

技術と社会

生命と知性

地球と月

©HSC Project / 国立天文台

NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute
One Special Day in the Life of Planet Earth – Close-Up
https://www.nasa.gov/mission_pages/cassini/multimedia/pia17170.html#.WfmADGi0OUk
ref. 20171101



Photo by Brett Jordan, from Wikimedia Commons
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:IPhone_4S_unboxing_17-10-11.jpg
CC BY 2.0

