

宇宙はどこまで解明されたか

- 4月25日 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何が先か？
- 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前**
- 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

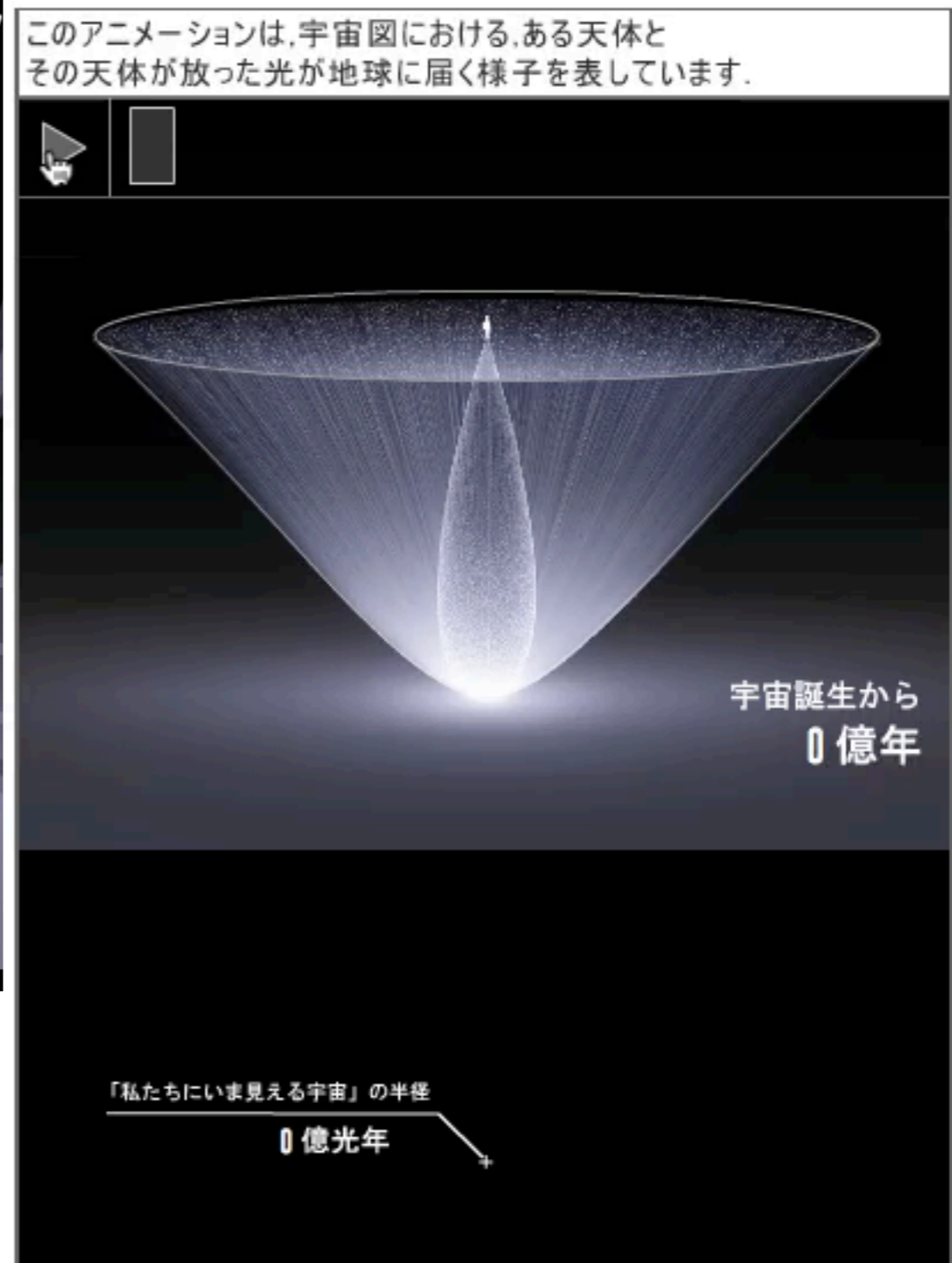
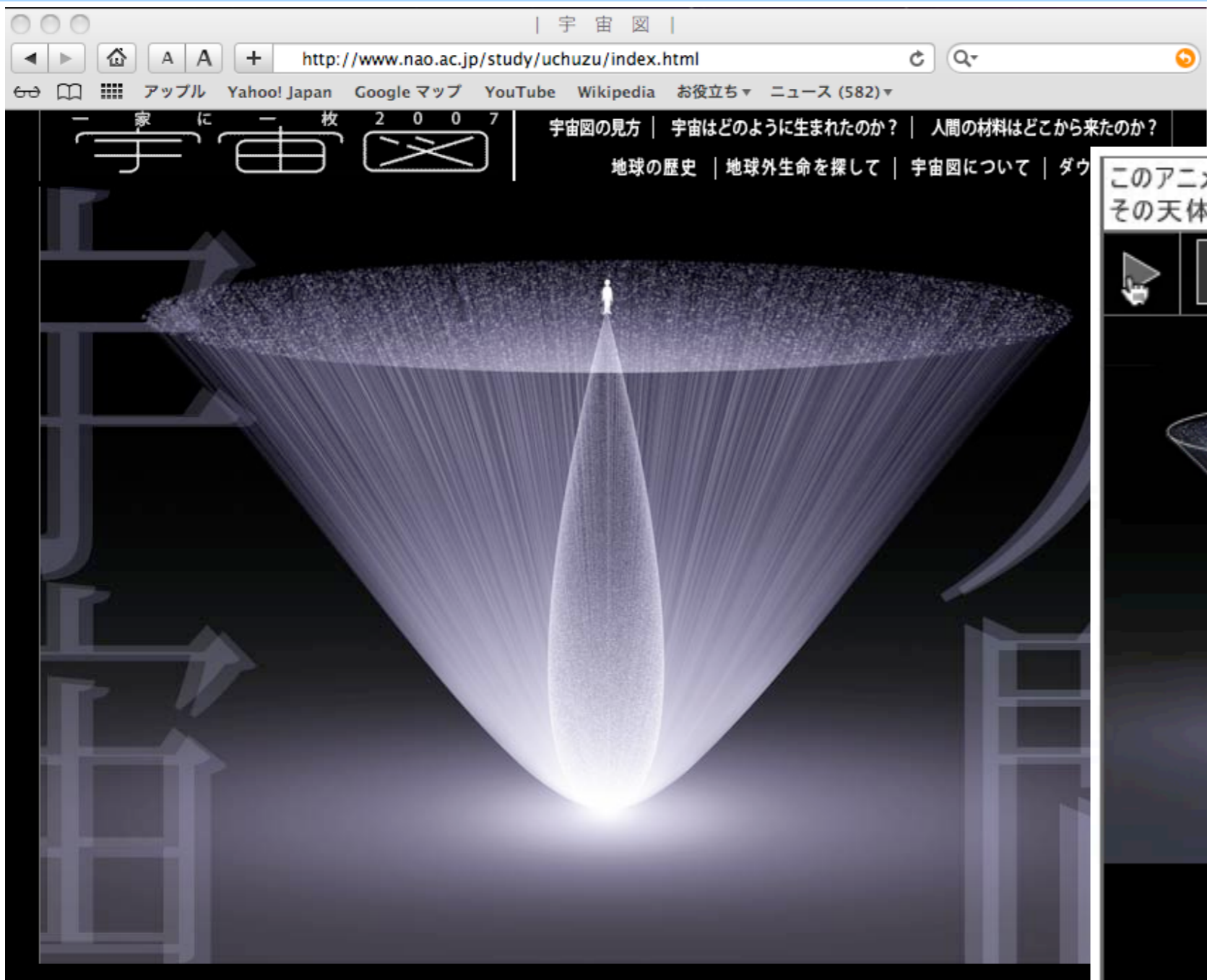
理化学研究所 客員研究員



<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>

宇宙図の見方

<http://www.nao.ac.jp/study/uchuzu/rule.html>



宇宙図の見方

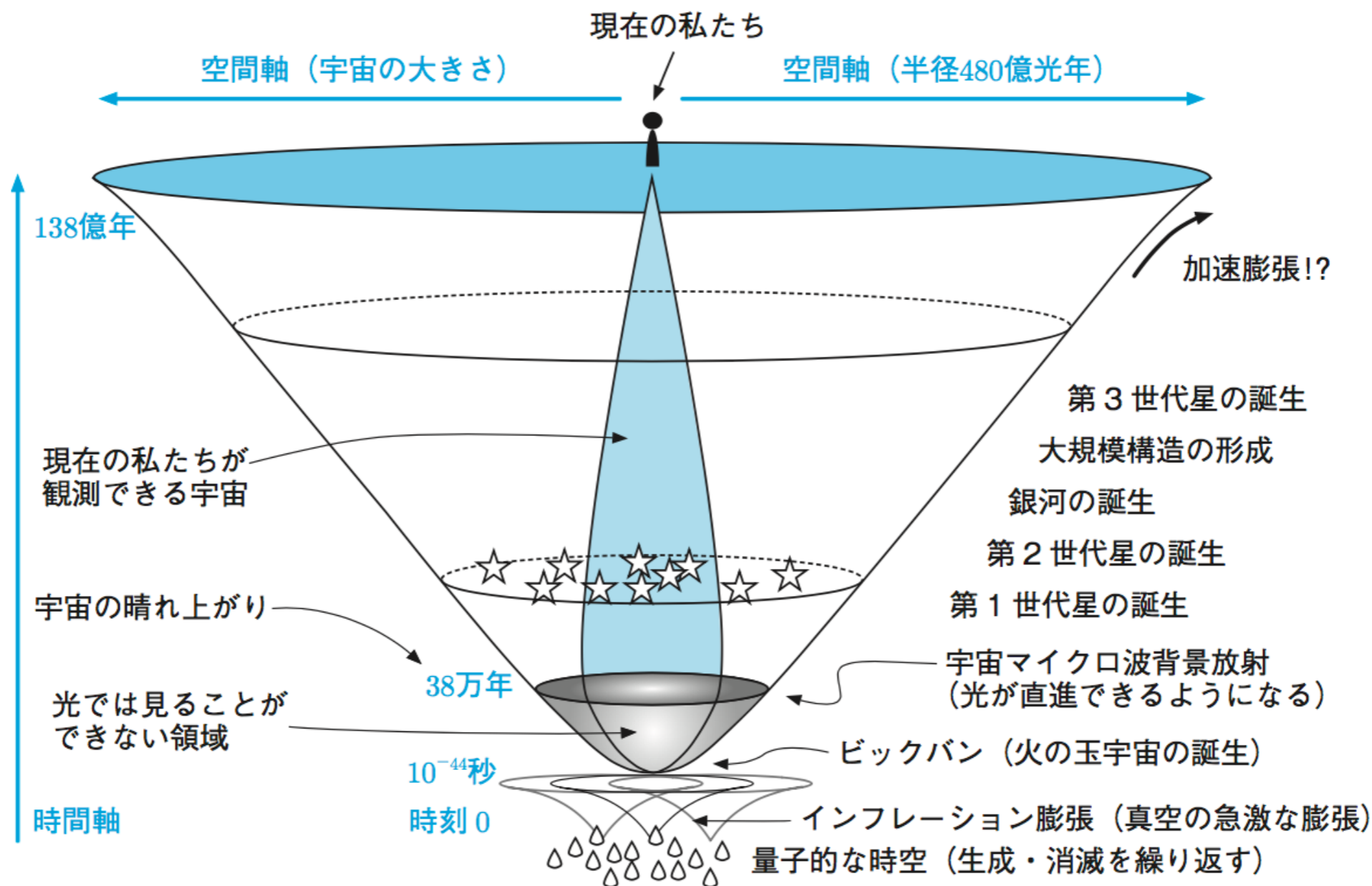


図 5.18 ビッグバン宇宙モデルの概略図。時間の進み方を上向き、空間の広がり方を横軸にして示す。現在の私たちは図の上の中央部分にいる。宇宙誕生直後にはインフレーションと呼ばれる急膨張を起こす。インフレーション後に高温高密度の火の玉宇宙が出現する。38 万年後に光が直進できるようになる。電磁波では、この時点以降の観測が可能になる。最近では、宇宙は加速膨張をしていることが明らかになった。宇宙が広がる様子が示されているが、実際に私たちが見られる宇宙は、中央の涙のしずくの部分に限られる。

宇宙図の大きさ 半径480億年

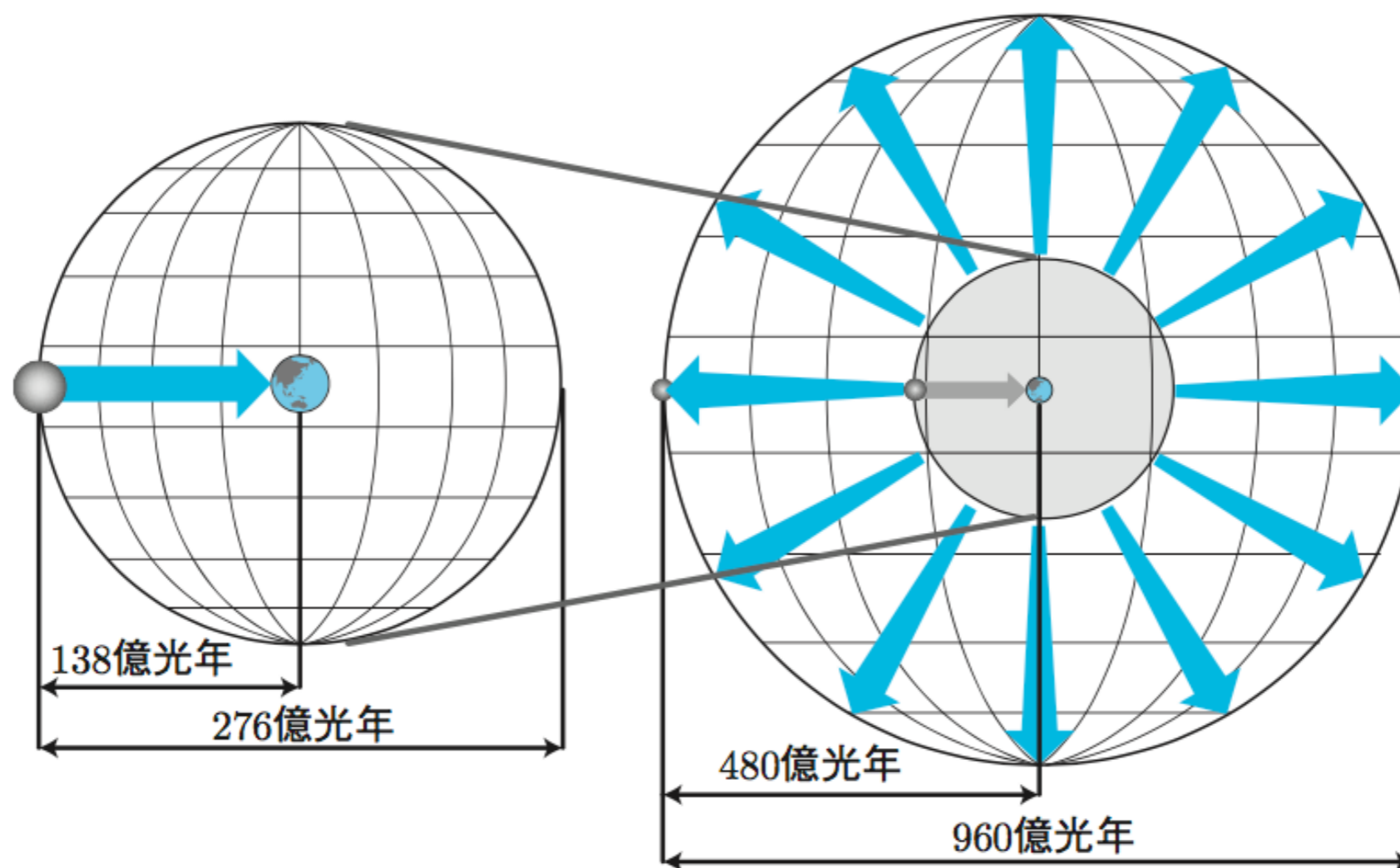
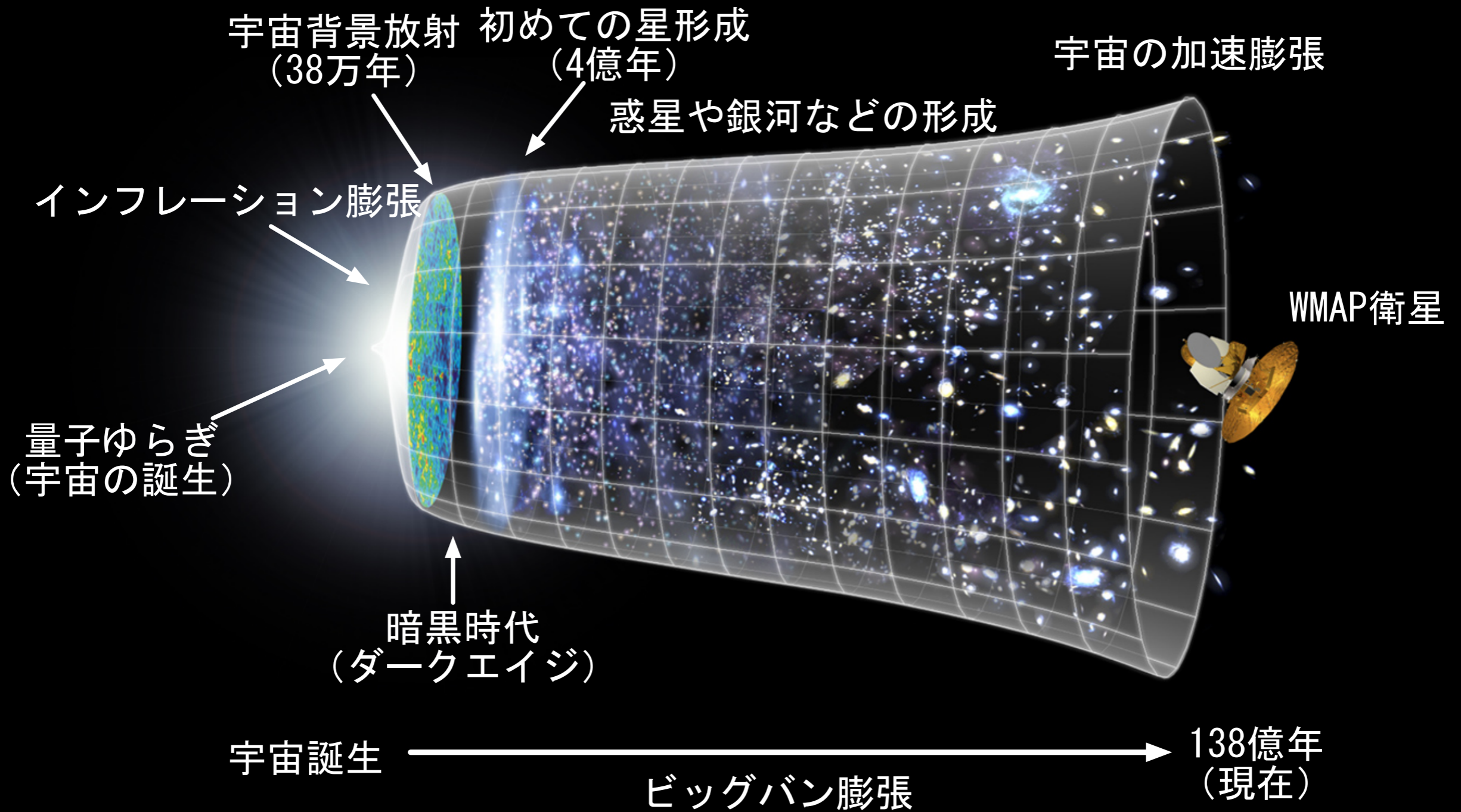


図 5.19 〔左〕宇宙誕生直後から進む光を見て、私たちは宇宙の年齢を 138 億年と理解する。〔右〕しかし、宇宙は膨張しているのです、現時点での宇宙の大きさは半径 480 億年になる。



COBE衛星 (1992), WMAP衛星 (2003), Planck衛星 (2013)

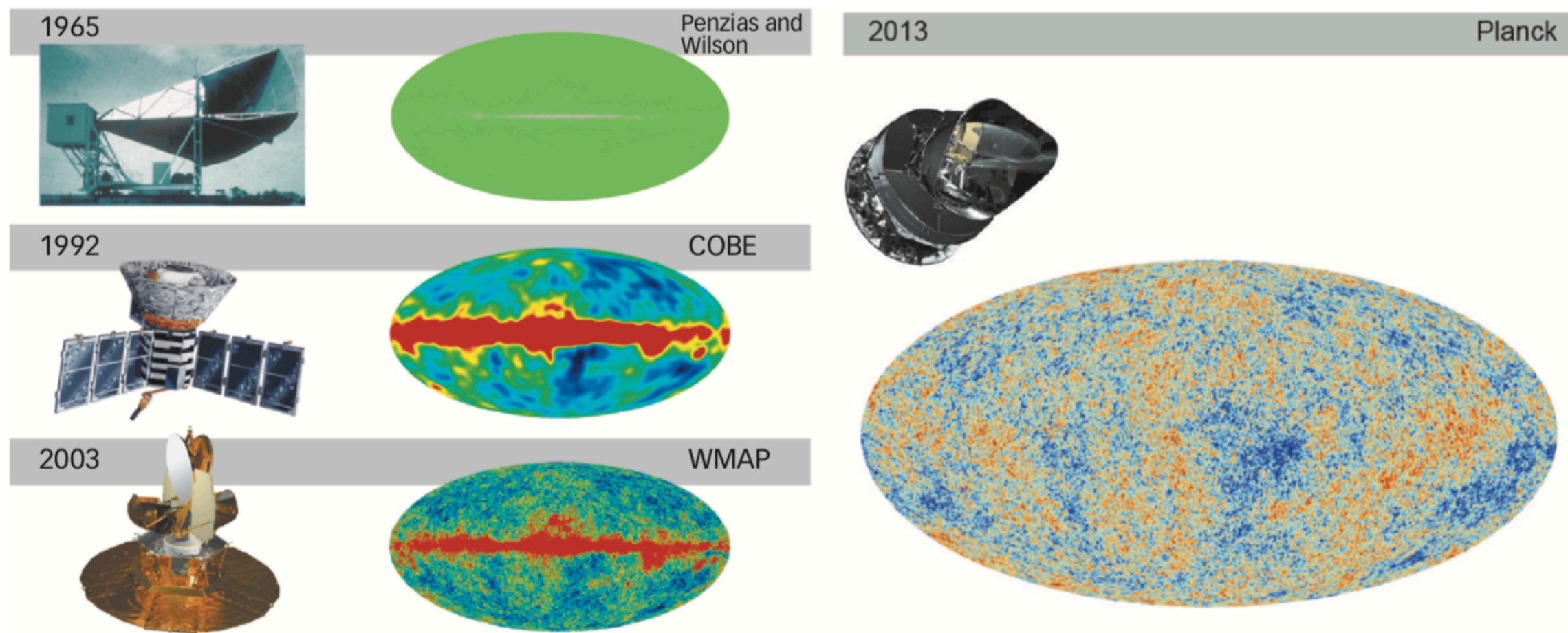
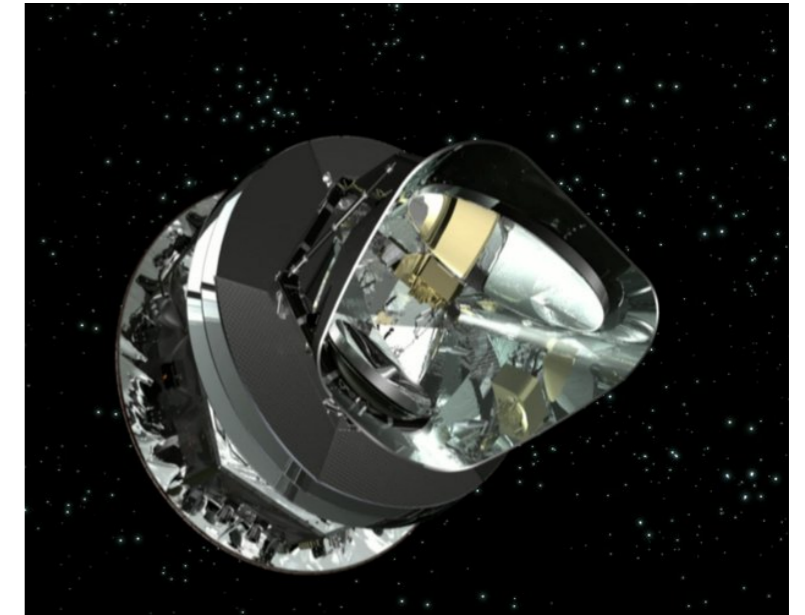
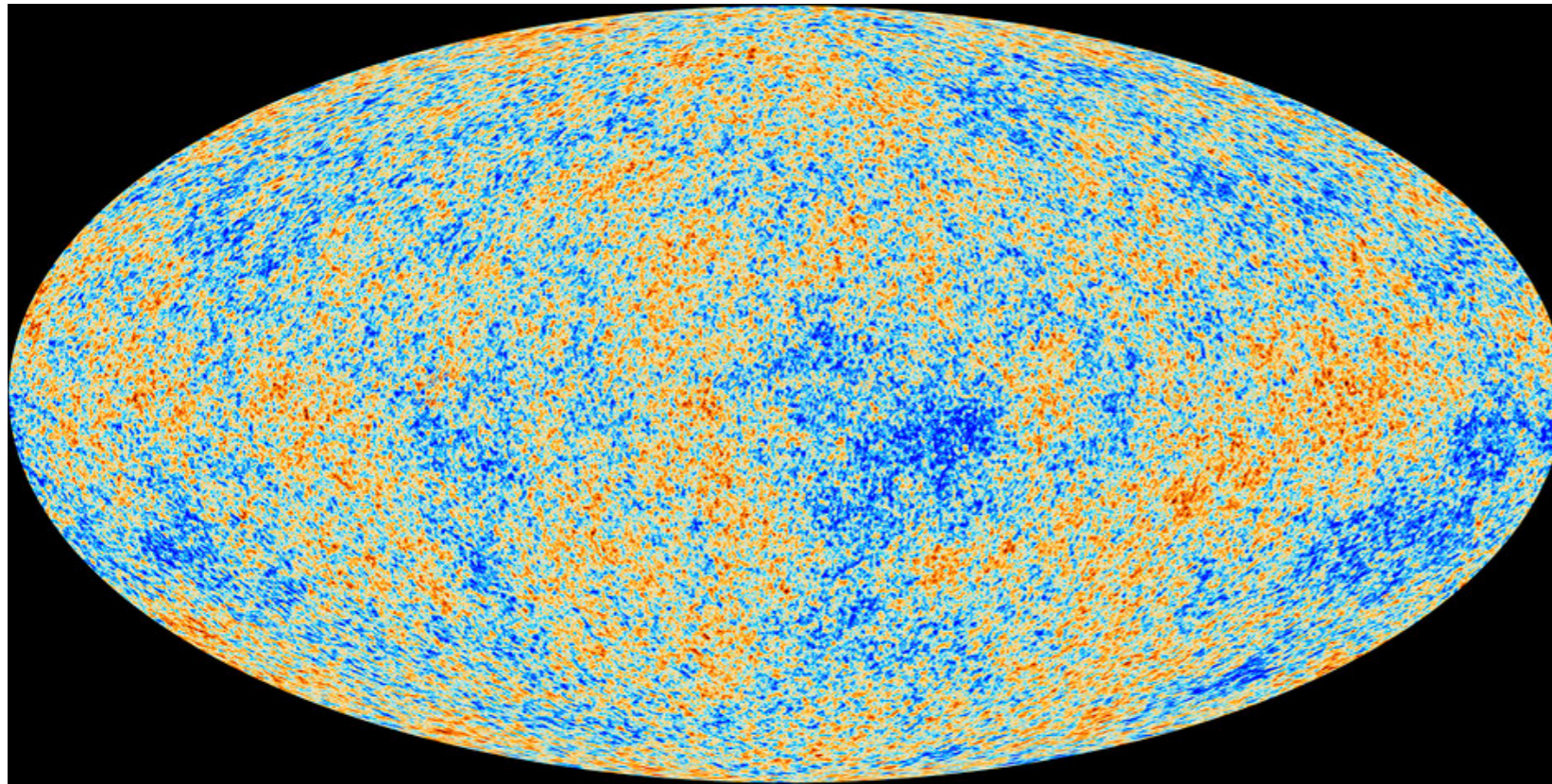


図 5.38 (本文 186 ページ)

CMB で描いた全天図を観測年代ごとに比較したもの。中心の水平軸は天の川銀河面を示す。1965 年のペンジアスとウィルソンの観測では「全天から一様な CMB」、1992 年の COBE 衛星は「10 万分の 1 程度のゆらぎ」が報告された。2003 年の WMAP 衛星、2013 年の Planck 衛星の観測結果は、ゆらぎの観測の角度分解能が格段に上がり、より精密なデータが得られるようになった。

2013年, Planck衛星によるCMBの測定

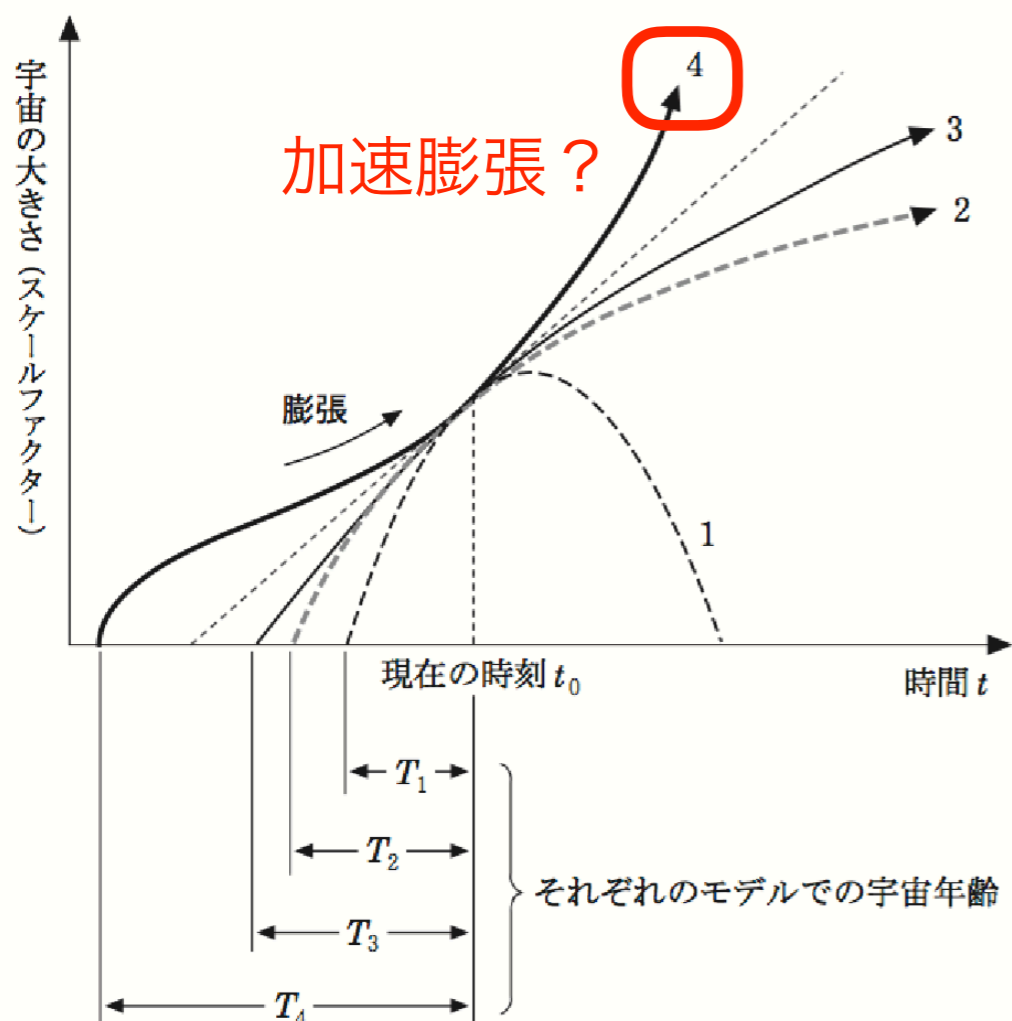


38万年

宇宙誕生後、~~37万9000~~年ほど経つと、光がさえぎられずに直進できるようになる。その時の温度が放射されて残っているはず。
約**3000 K** 宇宙膨張で温度下がって ~~2.7251~~ K 位

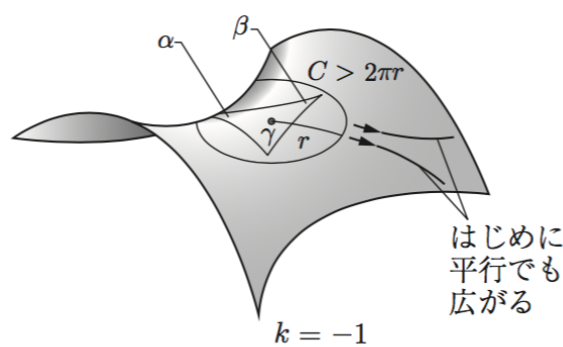
2.72548±0.00057 K

膨張宇宙モデル，現在考えられているのは？



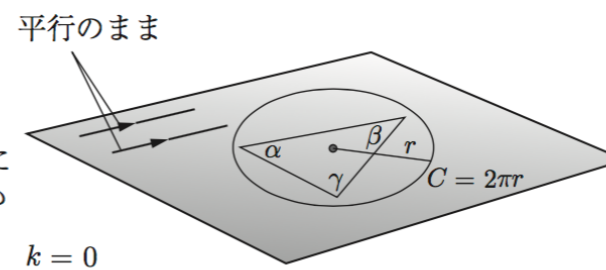
1. 閉じた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = +1$.
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = 0$.
3. 開いた宇宙で宇宙項なし. $\Lambda = 0, k = -1$.
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり. $\Lambda > 0, k = 0$.

(a) 開いた宇宙
 $\alpha + \beta + \gamma < 2\pi$



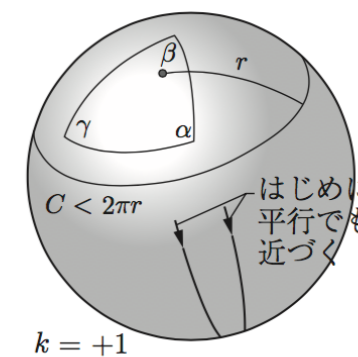
開いた宇宙

(b) 平坦な宇宙
 $\alpha + \beta + \gamma = 2\pi$



平らな宇宙

(c) 閉じた宇宙
 $\alpha + \beta + \gamma > 2\pi$



閉じた宇宙

ビッグバン宇宙モデルのまとめ

(1) 宇宙膨張の発見 (1929)

遠くの銀河は私たちの銀河からの距離に比例した速度で一様に遠ざかっている。

(2) 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の発見 (1964)

等方的に、かつて宇宙が高温だったことを示すマイクロ波が観測された。

(3) He, 重水素の存在比の観測

初期宇宙の熱核反応で、陽子と中性子から生成されると考えられる He と重水素の存在比が、星間空間で観測される値とほぼ一致した。

標準ビッグバン宇宙論は正しい

たった6つのパラメータで宇宙を説明できる！

ビッグバン宇宙モデルの問題点

- (A) 地平線問題. なぜ, CMB は全天で一様に近い温度分布を示すのか.
- (B) 平坦性問題. なぜ, 現在の宇宙は平坦 (曲率が 0) に見えるのか.
- (C) 構造形成の種問題. 星や銀河など物質ができるためのゆらぎはどうやって生まれたのか.
- (D) モノポール問題. 宇宙初期の相転移で生じる位相欠陥のうち, とくにモノポールはどのように消滅していくのか.
- (E) バリオン数生成の問題. なぜ, 宇宙には物質だけ存在して反物質が存在しないのか.
- (F) 宇宙の初期特異点問題. 時刻 0 のとき, 宇宙は密度が無限大の特異点になる. 物理的にどうやって説明するのか.
- (G) 時空の次元問題. 私たちの住む時空は, なぜ, 4 次元であって 3 次元や 5 次元でないのか.

インフレーション宇宙モデル (1981年)

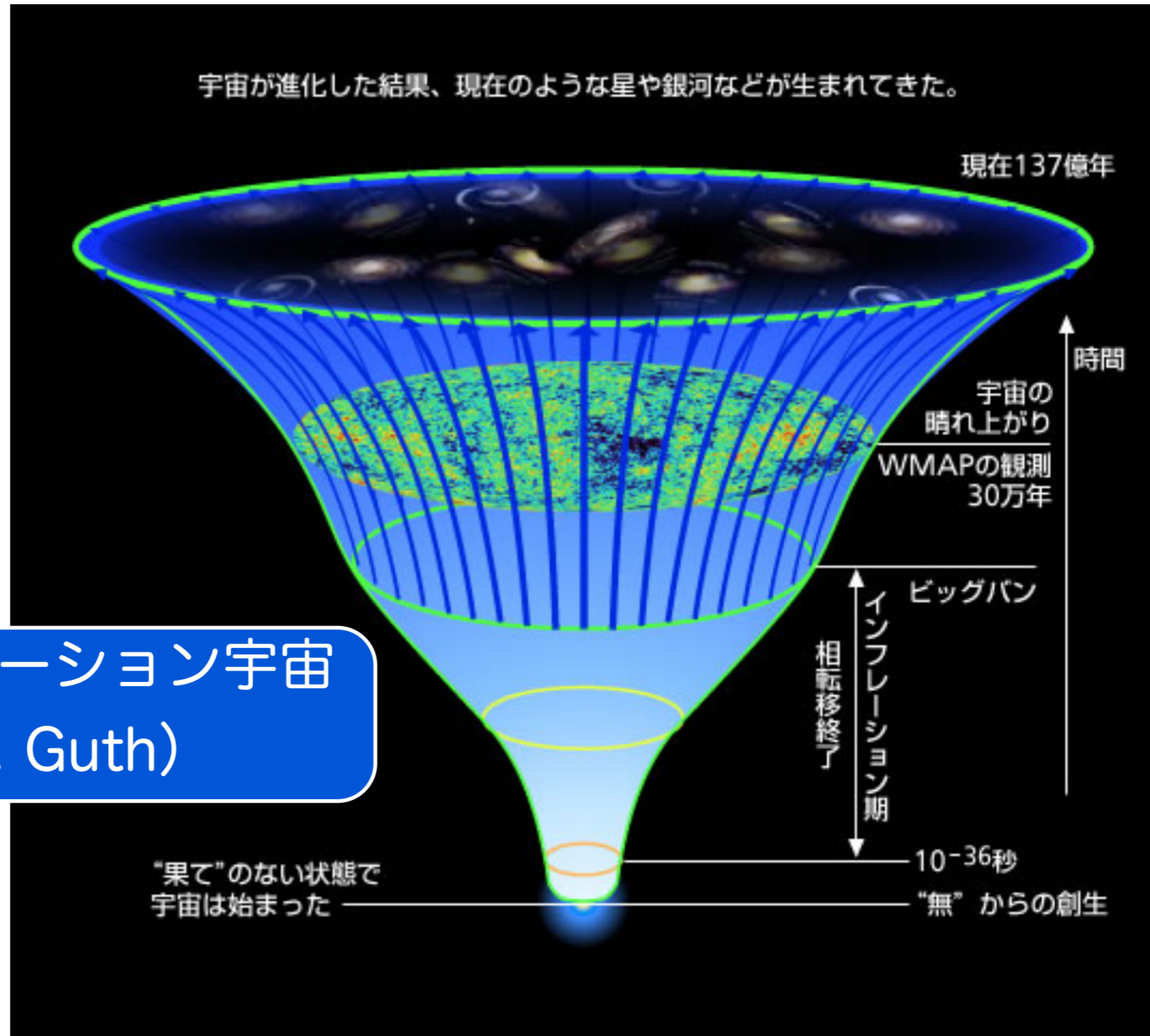
宇宙の誕生直後、 10^{-36} 秒後から 10^{-34} 秒後、体積が 10^{78} 倍になった。

宇宙の初期に急激な膨張があった
(インフレーション宇宙モデル)

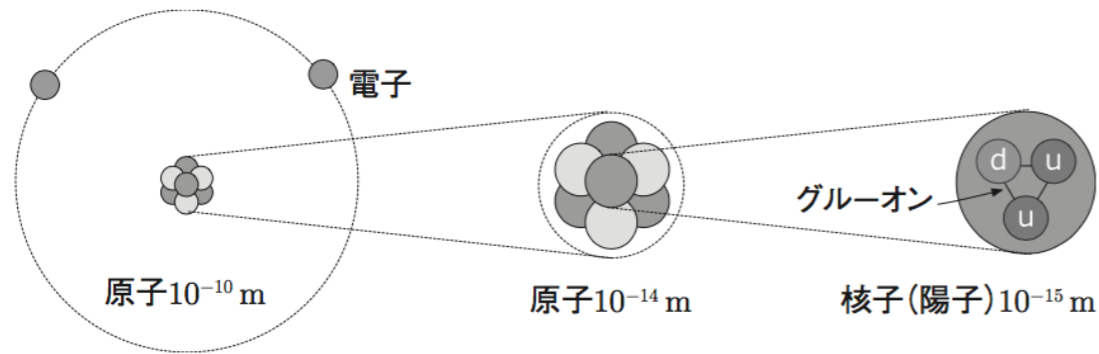


初期の宇宙は
指数関数的膨張
(佐藤勝彦)

インフレーション宇宙
(A. Guth)



素粒子と相互作用



「どうして、原子核はくっついていられるのだろうか？」

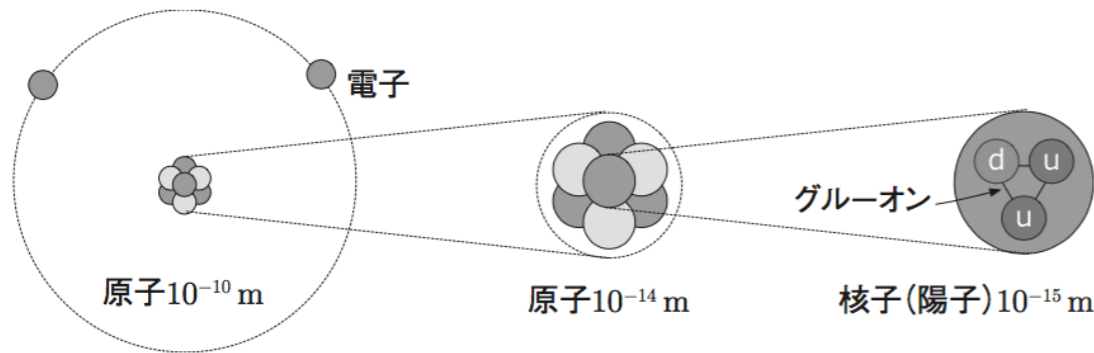
陽子と中性子が中間子を交換していると考えよう。
(1935年)。「**中間子論**」

現在では、強い相互作用（強い力）で結びついている
と考える。



湯川秀樹 (1907-81)

素粒子と相互作用



クォーク (quark) は 3 個で核子を構成する。クォーク理論の提唱者ゲルマン (M. Gell-Mann, 1929-) はカモの鳴き声にちなんで kwork とする予定だったが、ジョイス (J. Joyce) の小説『フィネガンズ・ウェイク』 (Finnegans Wake) に、 “Three quarks for Muster Mark!” (マーク大将のために三唱せよ、くっくっクォーク) とあることからスペルを変えた。

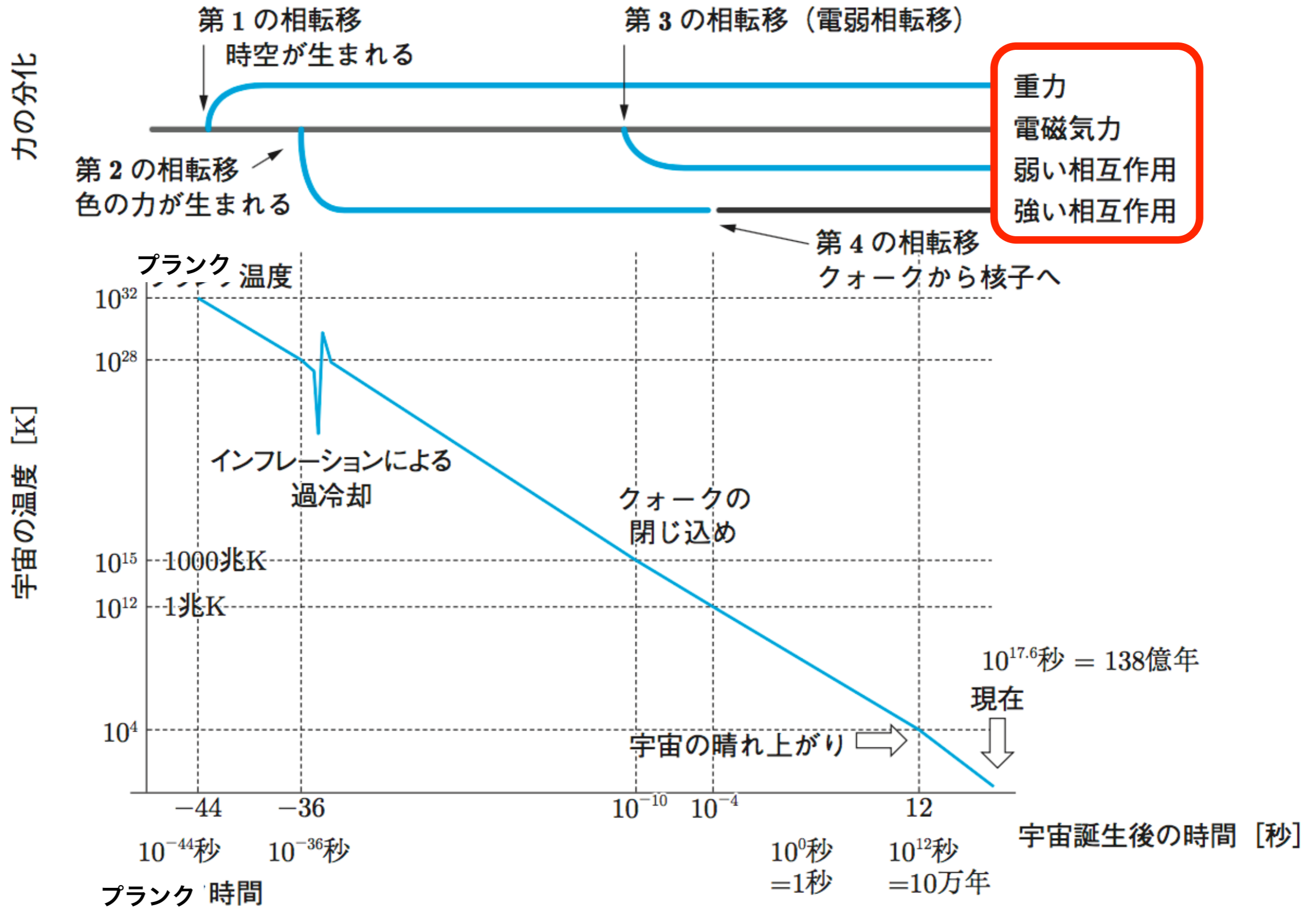
物質を構成する素粒子

	電荷	スピン	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク Quarks	+2/3	1/2	アップ up 1968年	チャーム charm 1974年	トップ top 1995年
	-1/3	1/2	ダウン down 1968年	ストレンジ strange 1964年	ボトム bottom 1977年
レプトン Leptons	+2/3	1/2	電子 electron 1897年	ミュー粒子 muon 1947年	タウ粒子 tau 1975年
	0	1/2	電子ニュートリノ e-neutrino 1956年	ミュー・ニュートリノ m-neutrino 1962年	タウ・ニュートリノ t-neutrino 1998年

力を媒介する素粒子

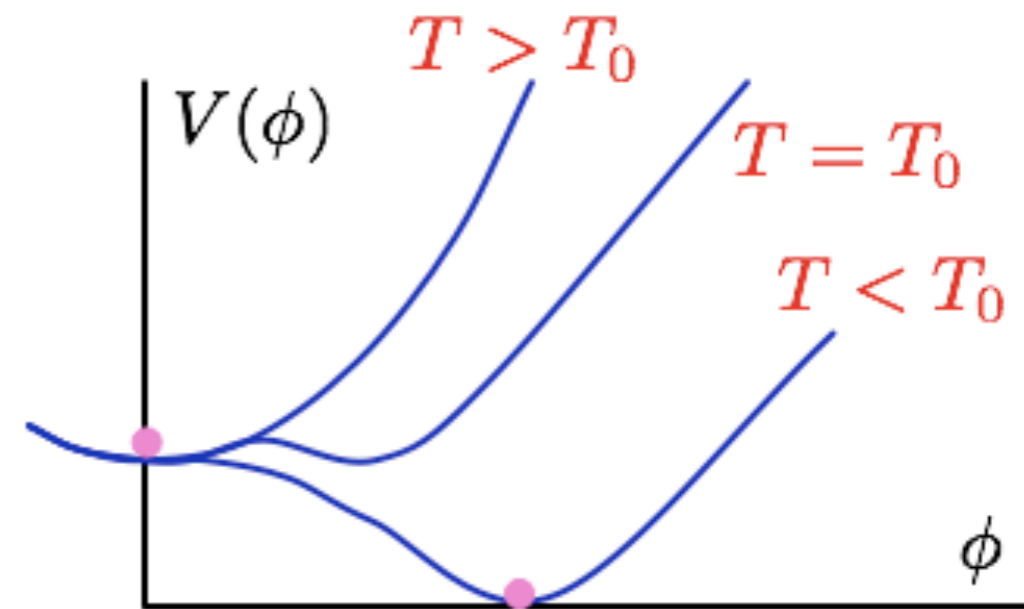
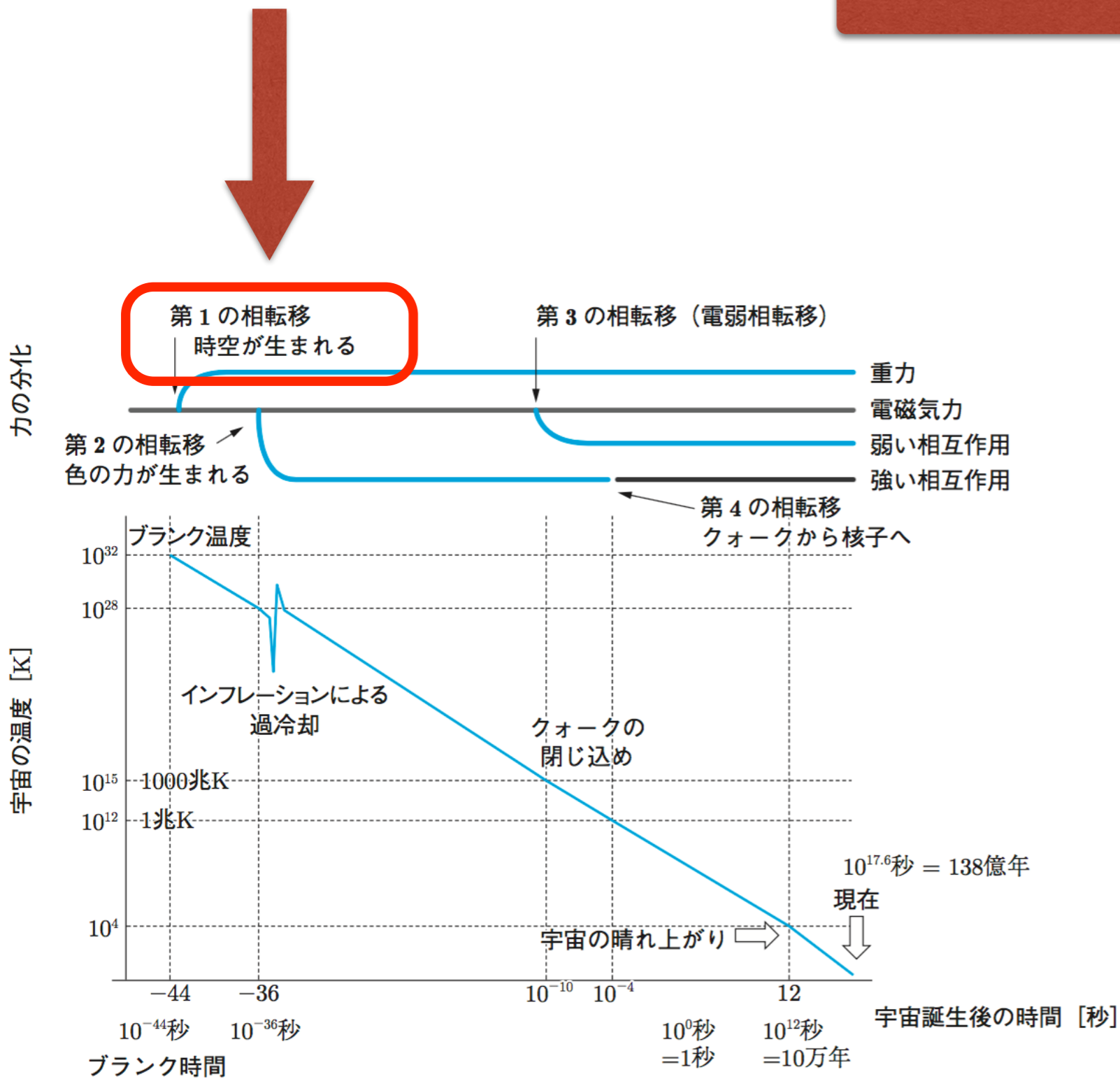
ゲージ粒子 gauge bosons	
強い相互作用	グルーオン gluon 1979年
電磁気力	フォトン photon 1905年
弱い相互作用	W粒子 W boson 1983年
	Z粒子 Z boson 1983年
重力	グラビトン graviton 未検出
質量を与える素粒子	ヒッグス粒子 Higgs boson 2012年

宇宙の相転移



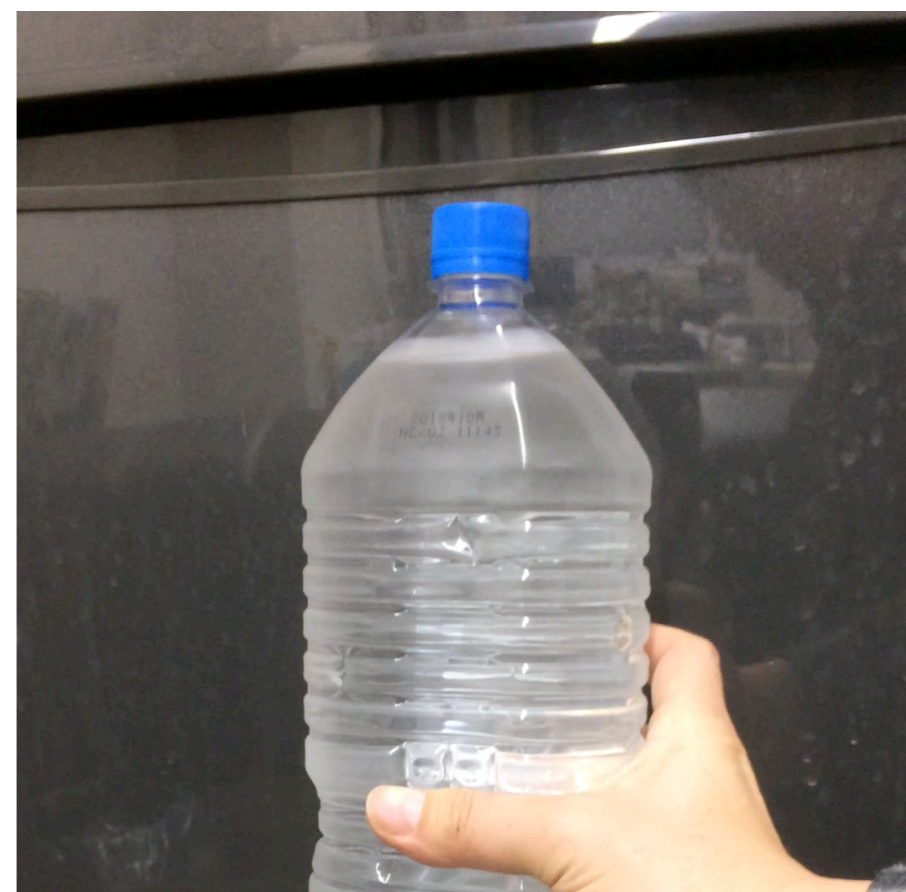
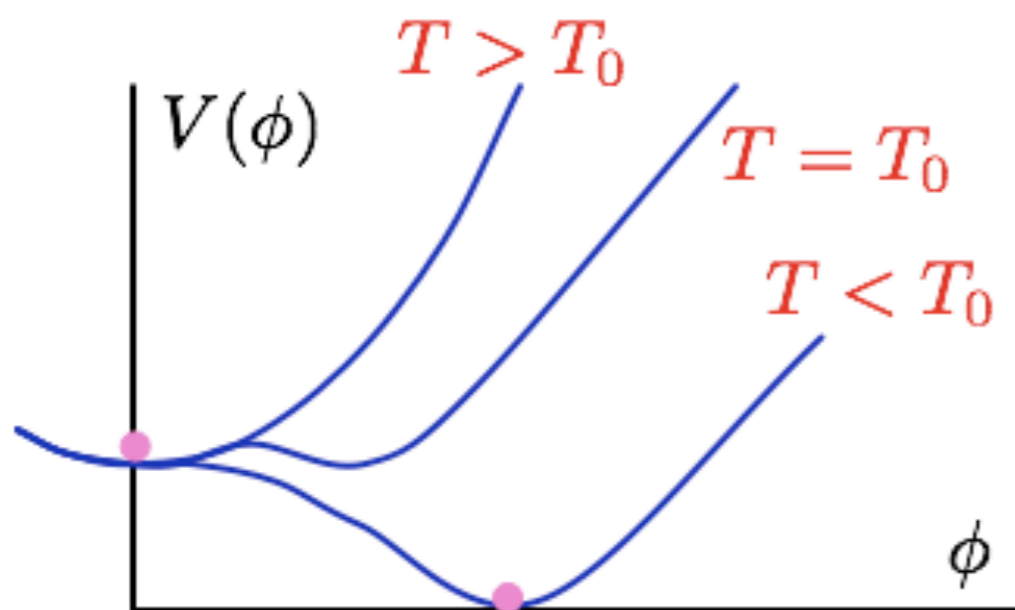
宇宙初期の相転移現象

物質の状態が変化すること
例) 温度が下がると, 水→氷



冷蔵庫にいられていたペットボトルの水を出すと、一瞬で凍った。

= 過冷却現象



Topic 過冷却と樹氷

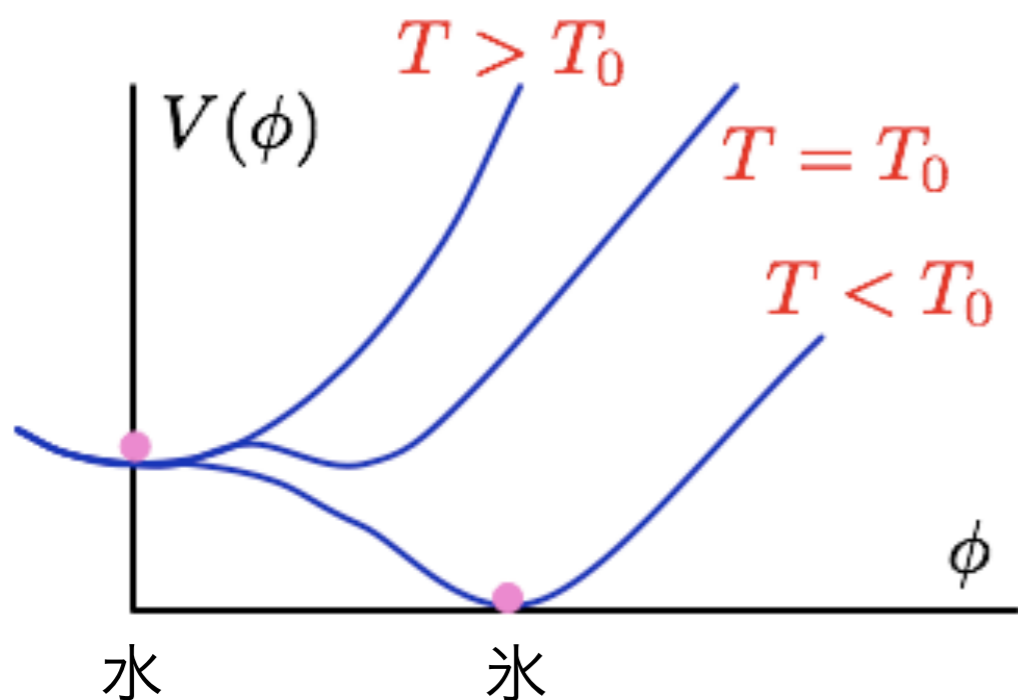
水が凍ったり，沸騰したりするきっかけは，不純物の混入による．精製水をゆっくりと -5°C の冷蔵庫で凍らせようとしても，液体のまま（過冷却状態）であり，外気に触れた瞬間に凍りつくことになる．雪国などでみられる樹氷は，過冷却状態の水滴が木にぶつかって，一瞬で凍ることが一つの理由だという．



図 4.8 ぶつかると凍る過冷却の風

冷蔵庫にいられていたペットボトルの水を出すと、一瞬で凍った。

= 過冷却現象

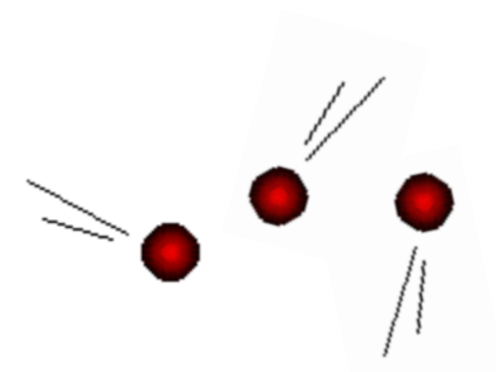


横軸 ϕ は、状態を表す変数
 縦軸 $V(\phi)$ は、エネルギー。
 (下へ行くほど安定な坂道)

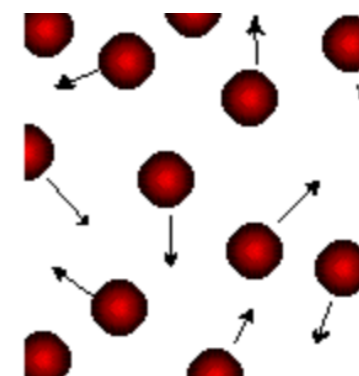
固体から液体へ = 相転移現象

phase transition

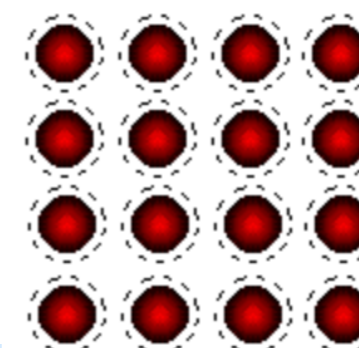
気体 (気相)



液体 (液相)



固体 (固体相)



日本人のノーベル物理学賞 受賞者 (2008)

Nobel Laureates in Physics: Japanese Laureates



南部陽一郎 (米国籍) (2008)

素粒子物理学と核物理学における自発的対称性の破れの発見



小林誠



益川敏英 (2008)

クォークの世代数を予言する対称性の破れの起源の発見

one half awarded to Yoichiro Nambu "for the discovery of the mechanism of spontaneous broken symmetry in subatomic physics", the other half jointly to Makoto Kobayashi and Toshihide Maskawa "for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature".



The Official Web Site of the Nobel Prize

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/

自発的対称性の破れ

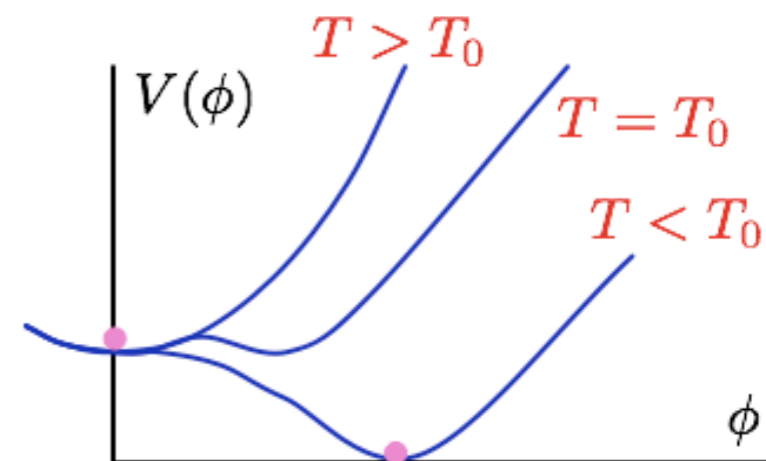


南部陽一郎 (米国籍)

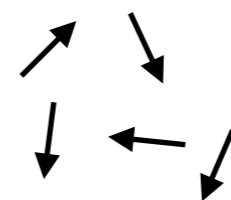
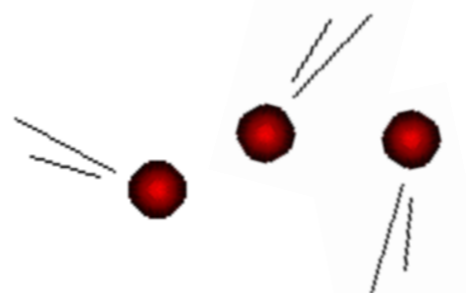
(ノーベル物理学賞 2008)

素粒子物理学と核物理学における
自発的対称性の破れの発見

*for the discovery of the mechanism of
spontaneous broken symmetry in subatomic physics*

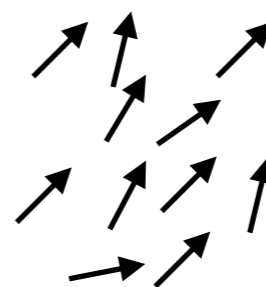
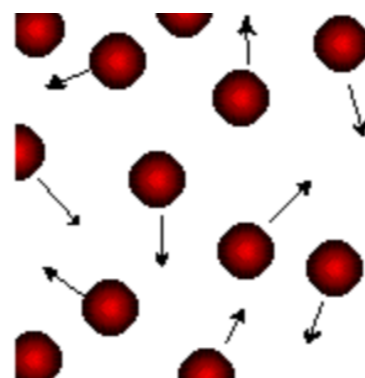


気体 (気相)

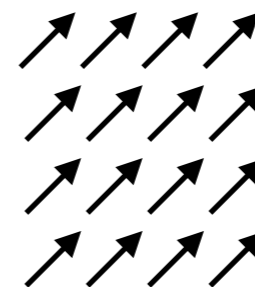
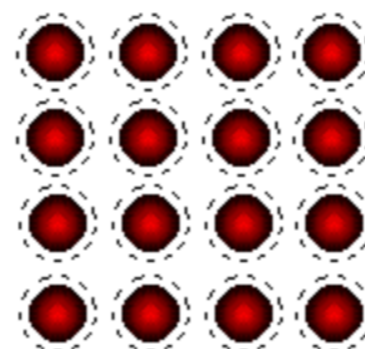


対称性の高い状態
(平均すればゼロ)

液体 (液相)

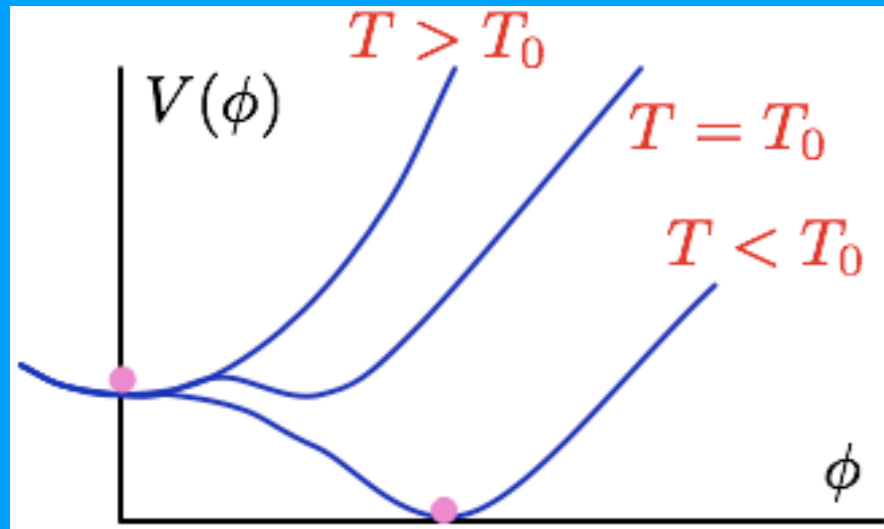


固体 (固体相)



対称性の破れた状態

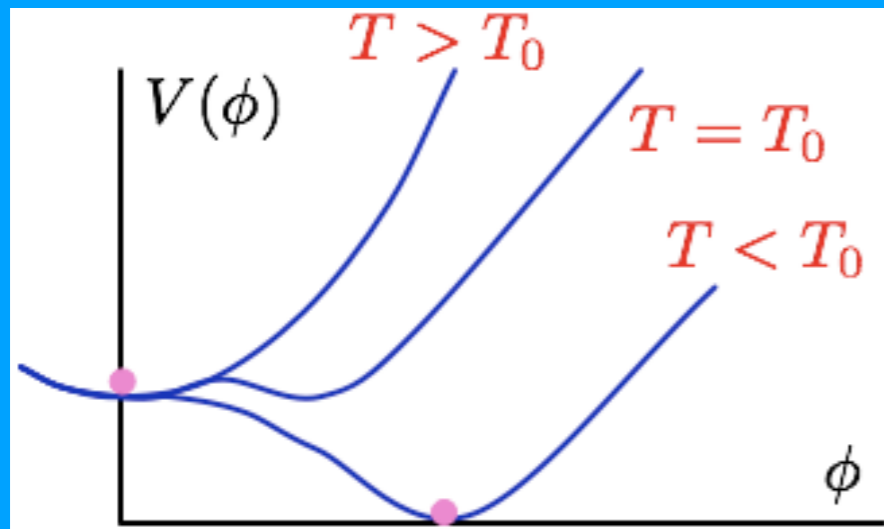
インフレーション宇宙モデル



偽真空 **真の真空**

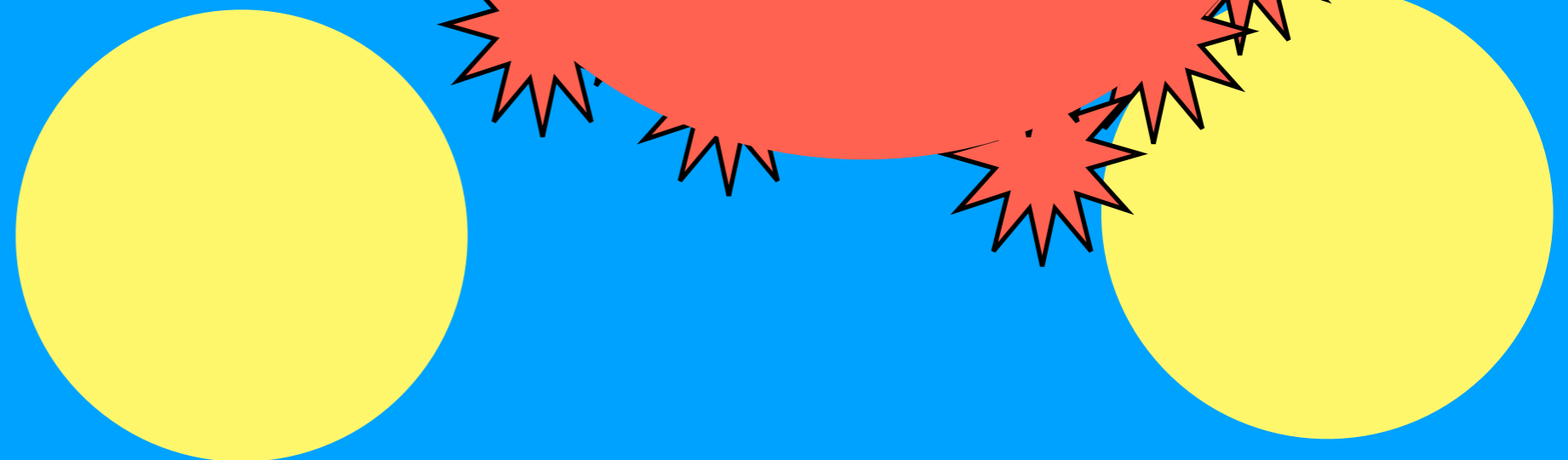


インフレーションは偽真空の泡の衝突で終わる



偽真空

超高温超高密度の
ビッグバンのはじまり



インフレーションモデル

インフレーションを引き起こす場

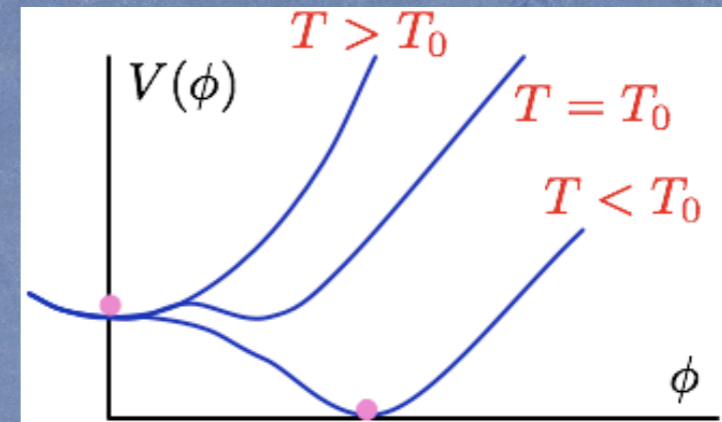
$$S = \int d^4x [L_{\text{gravity}} + L_{\text{matter}}]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} R$$

(original model)

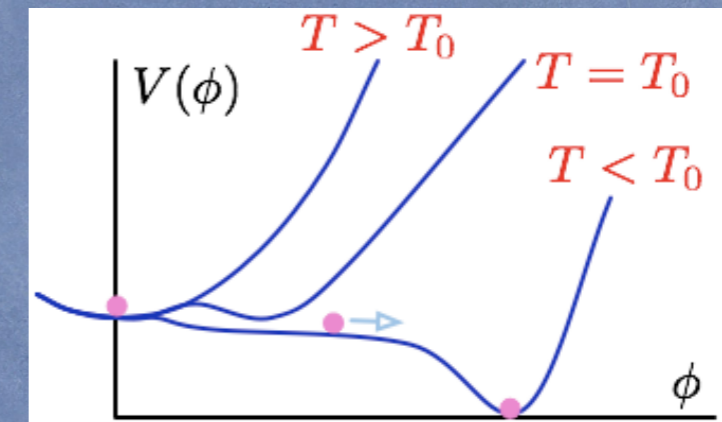
old inflation

Guth 81, Sato 81



new inflation

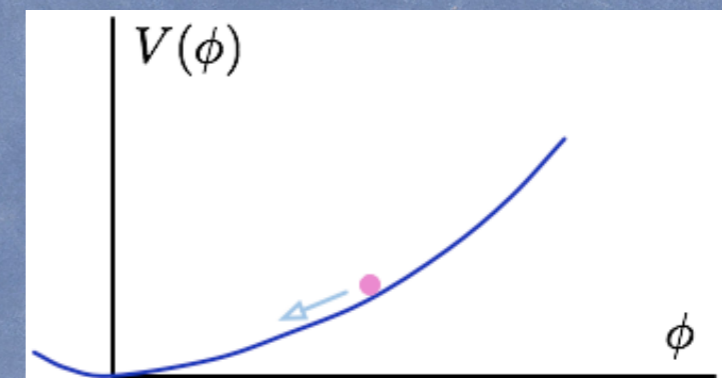
Linde 82



chaotic inflation

“inflaton”

Linde 83



インフレーションモデル

インフレーションを引き起こす場

$$S = \int d^4x [L_{\text{gravity}} + L_{\text{matter}}]$$

重力理論の補正

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} R$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2 + \beta R^3]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2 + \gamma R \square R]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha e^{\beta\phi} R^2 + (\nabla\phi)^2]$$

$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2] - \frac{1}{2}\xi\phi^2 R - \frac{1}{2}(\nabla\phi)^2$$

old inflation
new inflation
chaotic inflation

インフレーションモデル

$$S = \int d^4x [L_{\text{gravity}} + L_{\text{matter}}]$$

インフレーションを引き起こす場

重力理論の補正

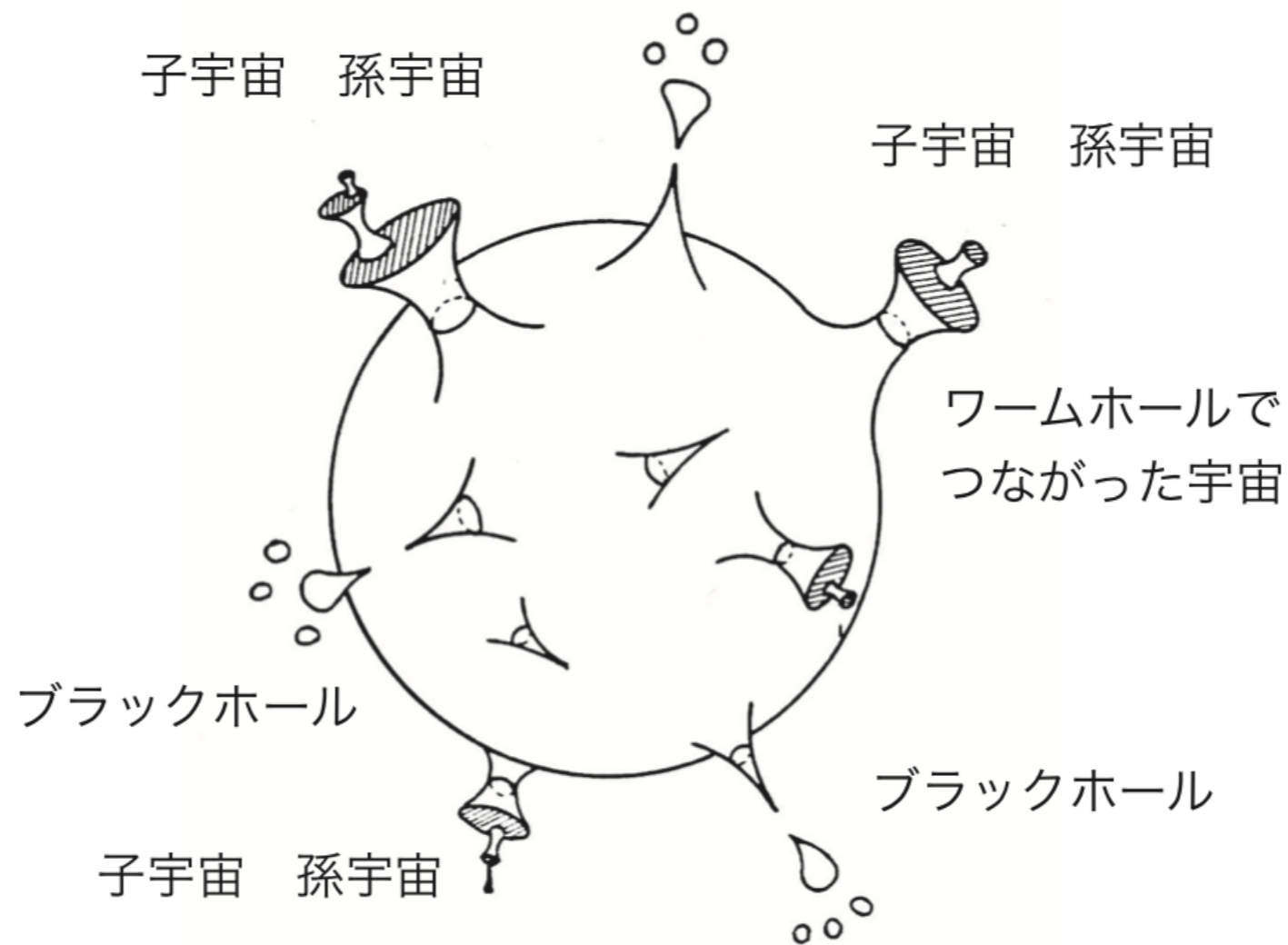
Einstein
R2-cosmology
non-minimum coupling
Induced gravity
Brans-Dicke gravity
Kaluza-Klein theory
Gauss-Bonnet gravity
etc.

old inflation
new inflation
chaotic inflation
soft inflation
extended inflation
hybrid inflation
topological inflation
open inflation
dilation inflation

power-law inflation
natural inflation
supernatural inflation
eternal inflation
mexican inflation
bubble inflation
creeping inflation
galloping inflation
hyper inflation
etc. etc.

「インフレーションモデルは研究者の数だけある」

宇宙は我々の宇宙だけではなかった



~~universe~~

multiverse

2014年3月 宇宙背景輻射にBモードのゆらぎを発見！

→ インフレーション宇宙を確認！！



2014年6月 結論は尚早. 他のグループでの確認必要.

インフレーション宇宙の証拠を発見？

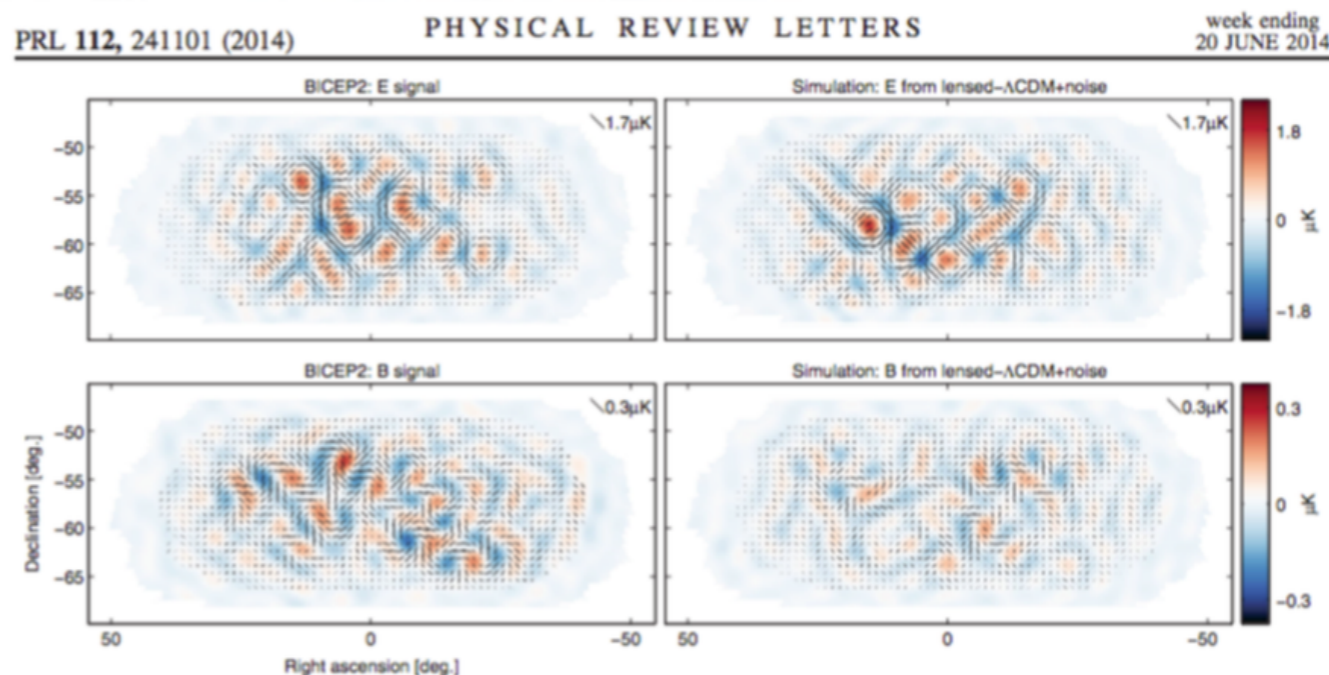
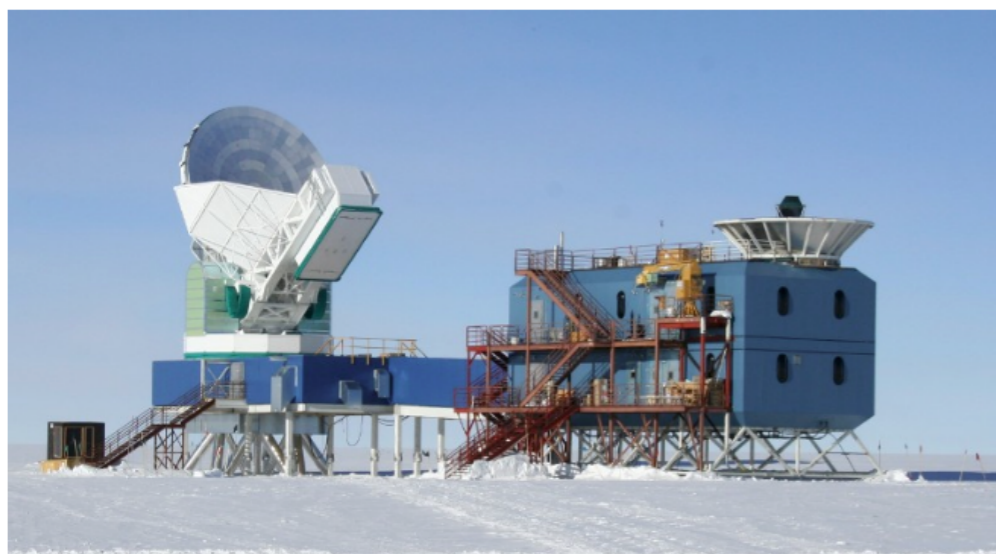


FIG. 3 (color). Left: BICEP2 apodized E -mode and B -mode maps filtered to $50 < \ell < 120$. Right: The equivalent maps for the first of the lensed- Λ CDM + noise simulations. The color scale displays the E -mode scalar and B -mode pseudoscalar patterns while the lines display the equivalent magnitude and orientation of linear polarization. Note that excess B mode is detected over lensing+noise with high signal-to-noise ratio in the map ($s/n > 2$ per map mode at $\ell \approx 70$). (Also note that the E -mode and B -mode maps use different color and length scales.)

図 5.15: [左] BICEP2 望遠鏡. [右] BICEP2 グループが発表した偏光データとシミュレーション結果の比較. 上が『Eモード』下が『Bモード』. [2]

*¹¹ BICEP は, Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization の略で, 南極点近くのアムンゼン - スコット基地に設置された望遠鏡を用いて, 宇宙背景放射の偏光観測を行うプロジェクト. 望遠鏡が 2 代目のため, 2 がついている.

インフレーション宇宙の証拠を発見？

■インフレーション宇宙の証拠発見？

2014年3月17日、カリフォルニア工科大学のチームによって「宇宙背景放射の観測によって、インフレーション理論の直接的な証拠を発見」とした発表があった。南極に設置した BICEP2 望遠鏡^{*11}が、重力波特有の『Bモード』（図 5.14）と呼ばれる偏光の存在を約 1 度角スケールで発見した、というものだ。

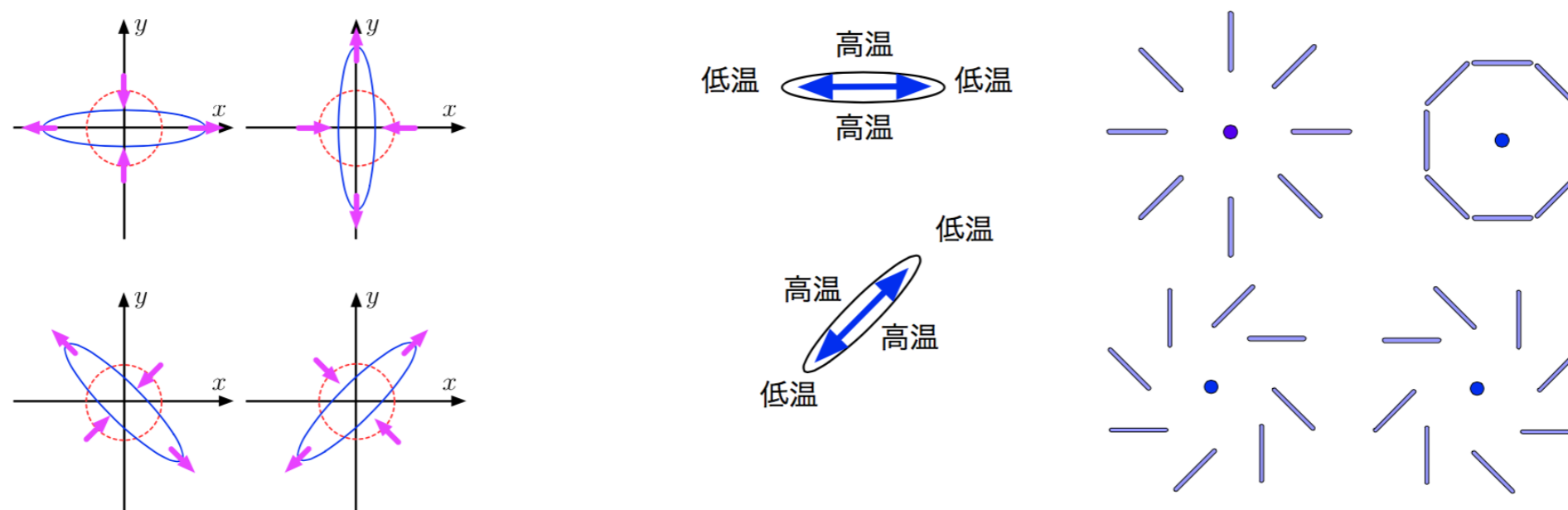
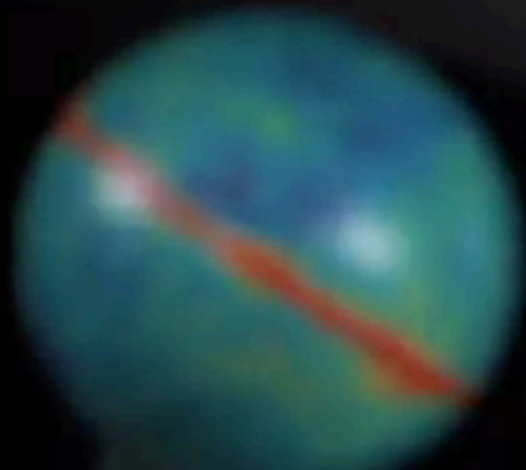


図 5.14: 〔左〕重力波の振動モード。紙面に垂直に波が進んでいるときに、空間を歪ませる方向が 2 つ存在する。〔中〕空間に温度ゆらぎがあれば、時空の振動方向もゆがむ。〔右〕宇宙背景放射の観測結果に予想される『Eモード』（上）と『Bモード』（下）。

宇宙最前線
～137億年の謎～
宇宙科学の現在

Discovery
CHANNEL



大学共同利用機関法人
自然科学研究機構 機構長

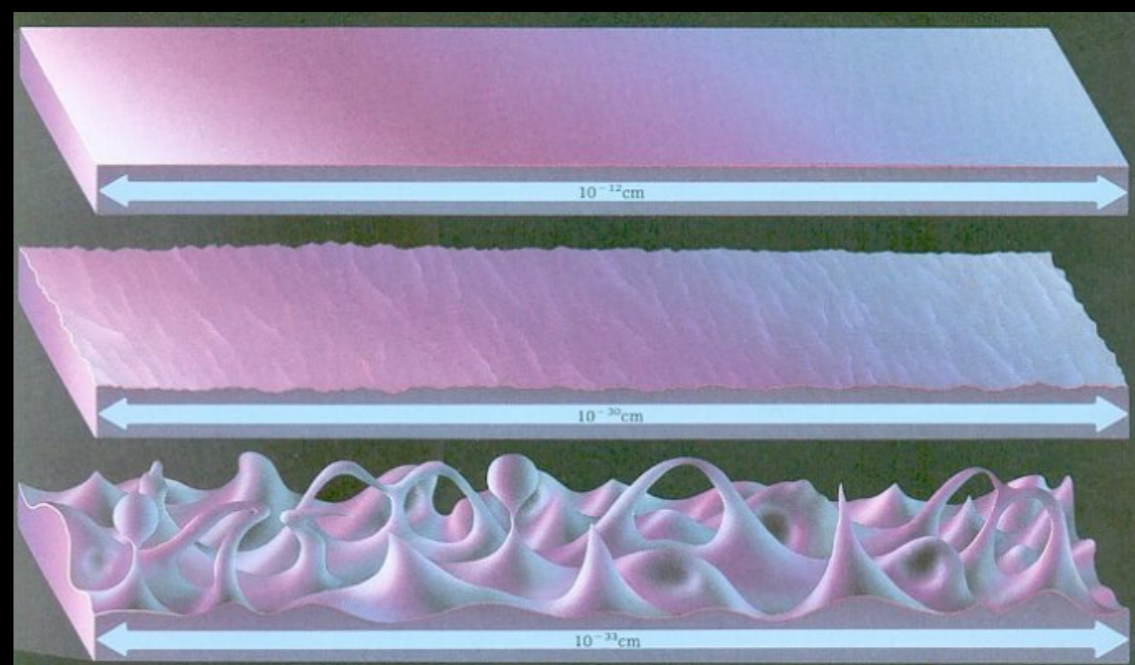
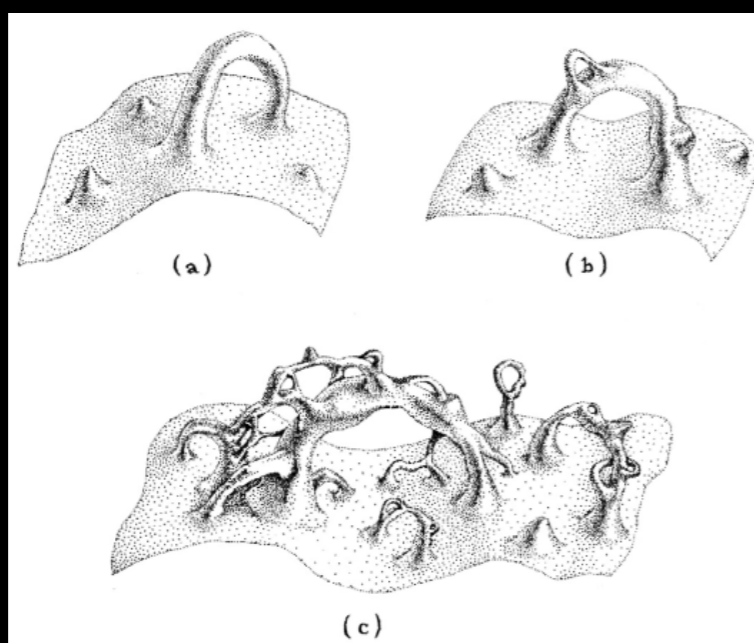
佐藤 勝彦



宇宙最前線～137億年の謎～ 宇宙科学の現在

<https://www.youtube.com/watch?v=crHnzNJCKSo>

- ビッグバン宇宙の始まり
=インフレーション膨張した
偽の真空泡の衝突
- その前は？



混沌とした量子時空の世界？ or else?

無境界仮説による宇宙のはじまりの解釈

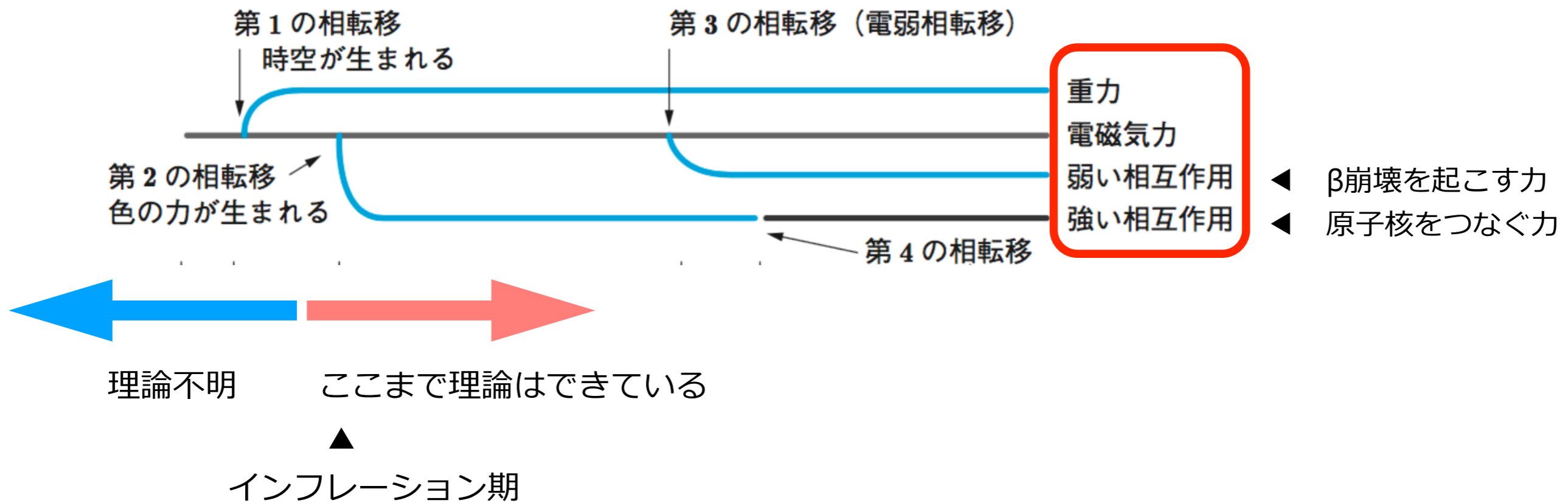


ホーキング、膜宇宙論を語る《2007年、東京大学》 (3) start on click 1'09"

量子重力理論

宇宙誕生の瞬間を説明したいが、...

時空の理論（相対性理論）と素粒子の理論（量子論）をまとめた理論が必要だが、まだ未完成



そもそも重力だけが、他の3力に比べて極端に弱いのは何故か。
(力の階層性問題 hierarchy problem)

一般相対性理論

特殊相対性理論

ニュートン力学

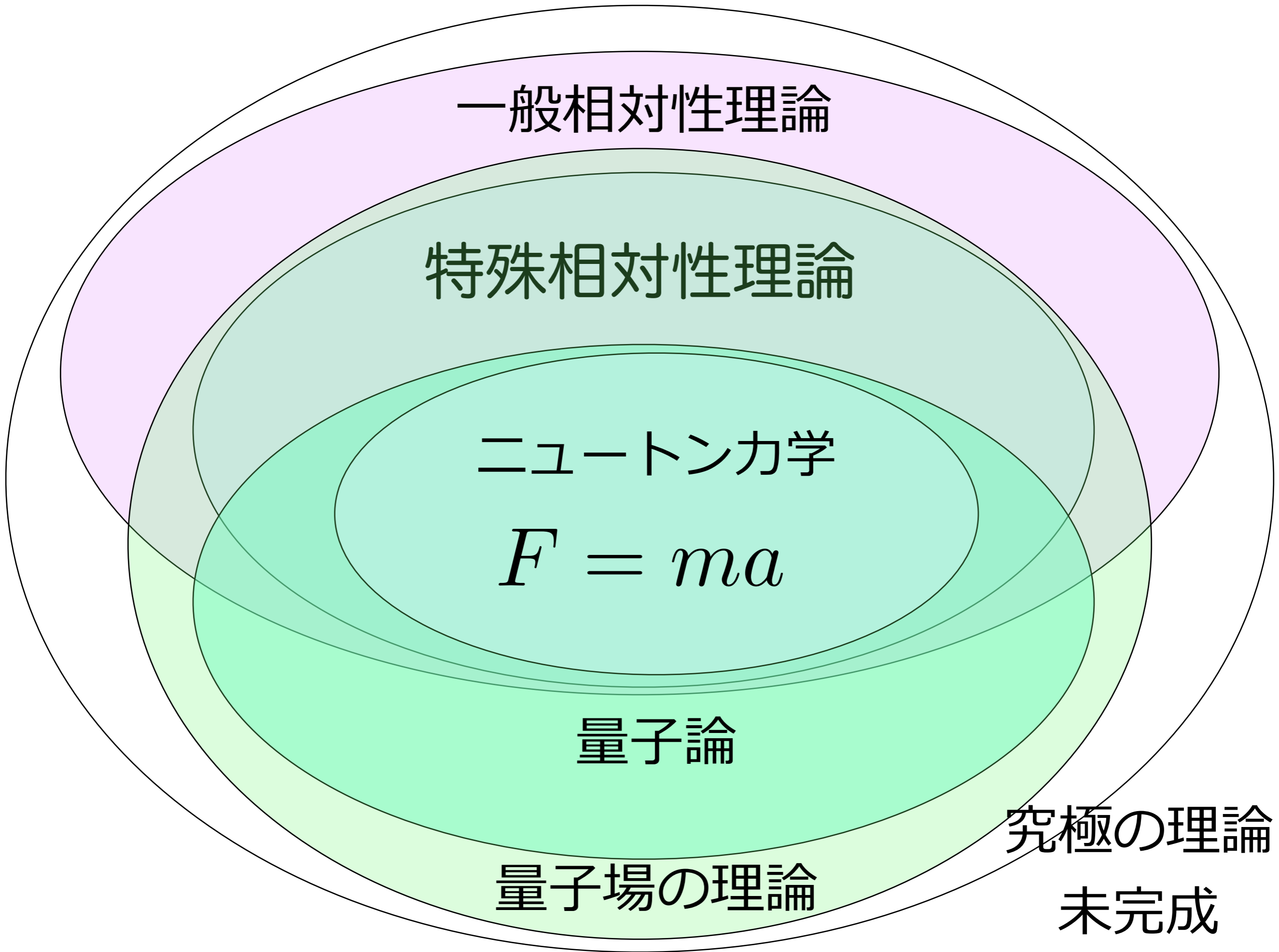
$$F = ma$$

量子論

量子場の理論

究極の理論

未完成



超ひも理論



ホーキング, 膜宇宙論を語る《2007年, 東京大学》 (5)

<https://www.youtube.com/watch?v=n8Mcl81oLOc>

start on click 2'00"

超ひも理論

- **超ひも理論 (超弦理論 superstring theory)**
= 11次元時空中で構成された量子重力理論の候補

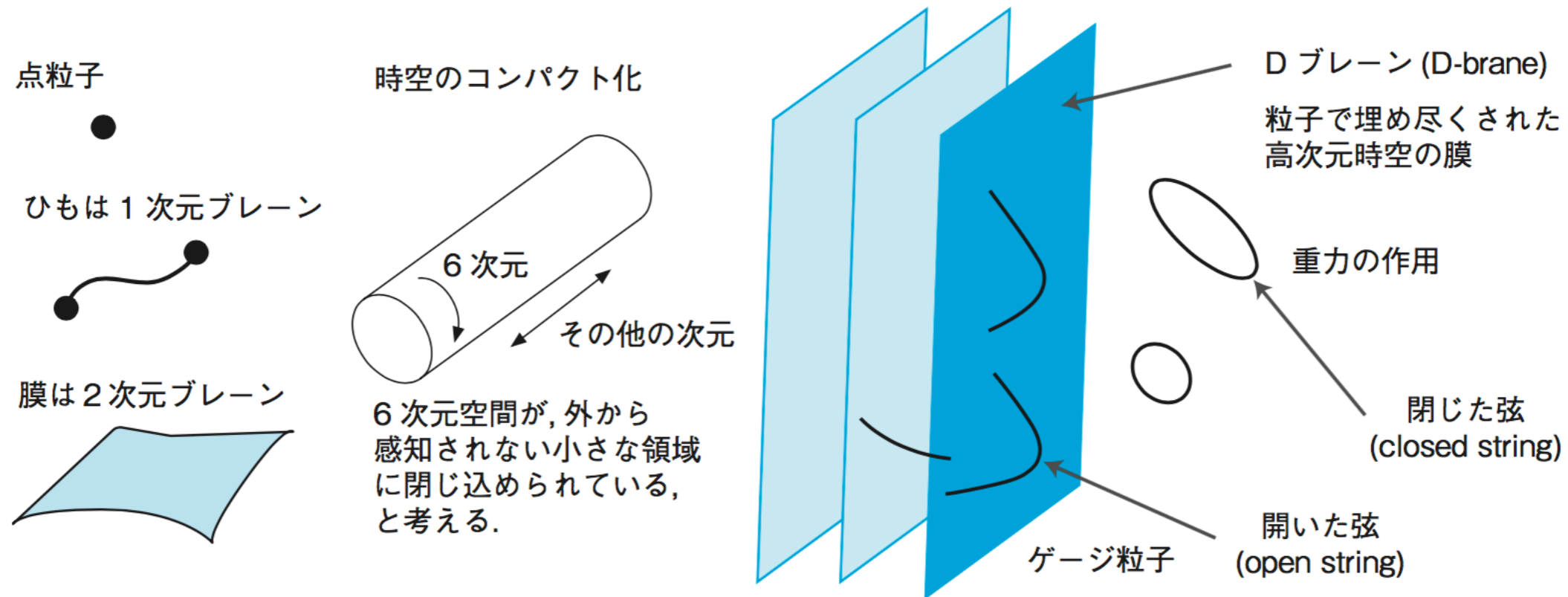
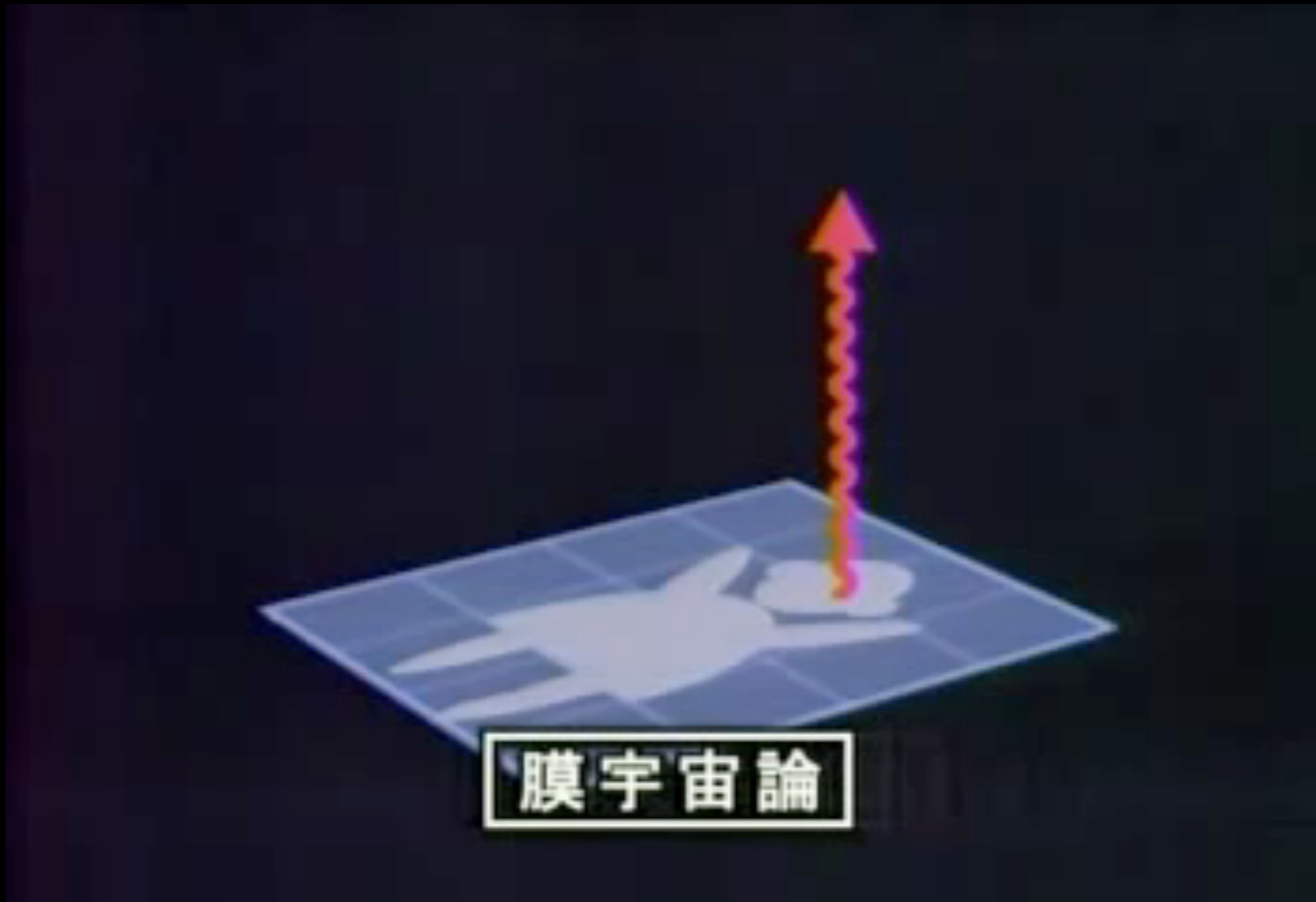


図 5.30 超弦理論に登場するさまざまな概念。弦（ひも）は、さまざまな振動モードを持ち得るが、その振動モードの違いが、素粒子の種類を表している、と考える理論である。数学的には 10 次元空間で弦を考えることが一番無理なく粒子を表現できる。現実の時空は 4 次元時空なので、余分な 6 次元空間は見えないように小さく閉じ込められている、と考える。1995 年以降、弦（粒子）が多数重ね合った D ブレーン (D-brane) と呼ばれる高次元の膜が、超弦理論の要素としてモデル化された。

膜宇宙論 (Brane-World cosmology)



ホーキング, 膜宇宙論を語る《2007年, 東京大学》 (5)

<https://www.youtube.com/watch?v=n8Mcl81oLOc>

start on click 2'00"

膜宇宙論 (Brane-World cosmology)

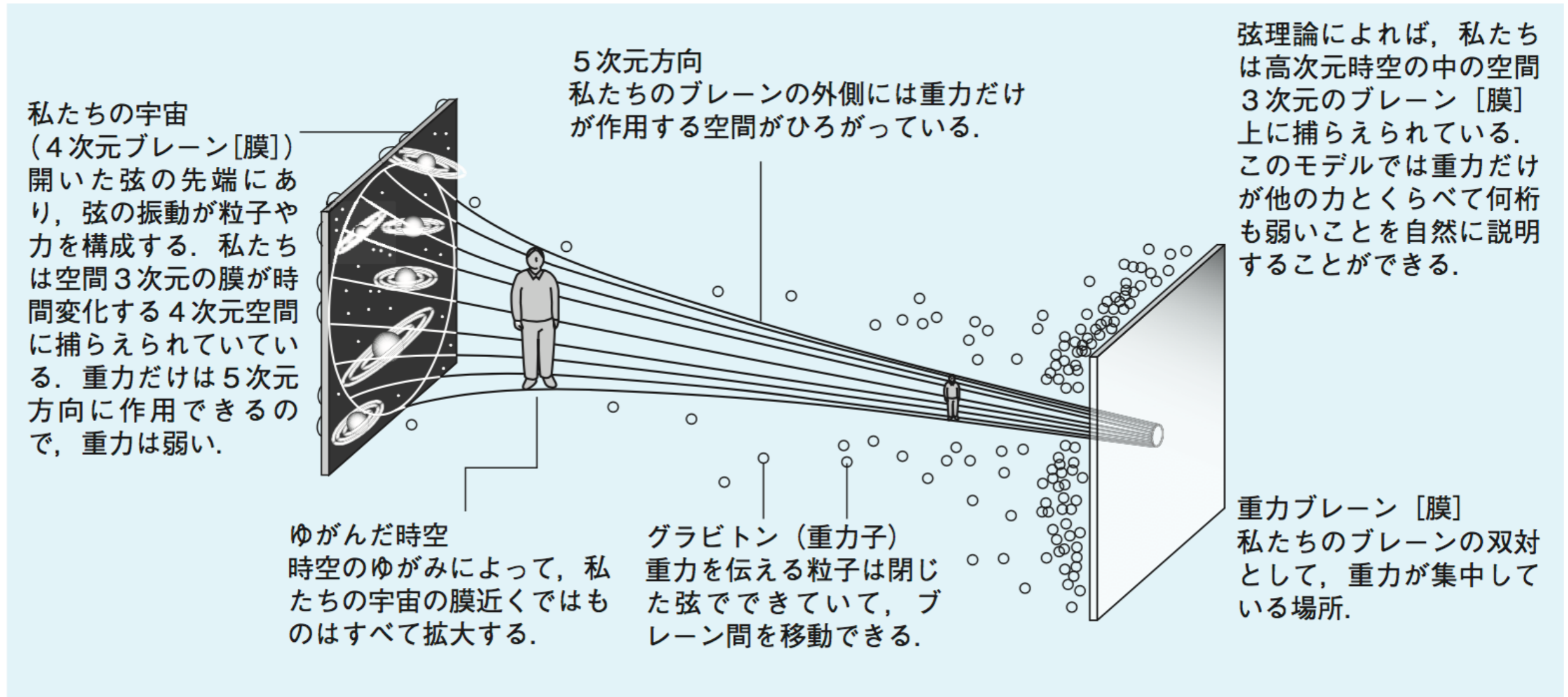


図 5.31 ランドールとサンドラムが提案したブレーンワールド・モデルの1つ。(膜宇宙モデル, 1999)

L. Randall & R. Sundrum (1999)

膜宇宙論 (Brane-World cosmology), 大きな余剰次元

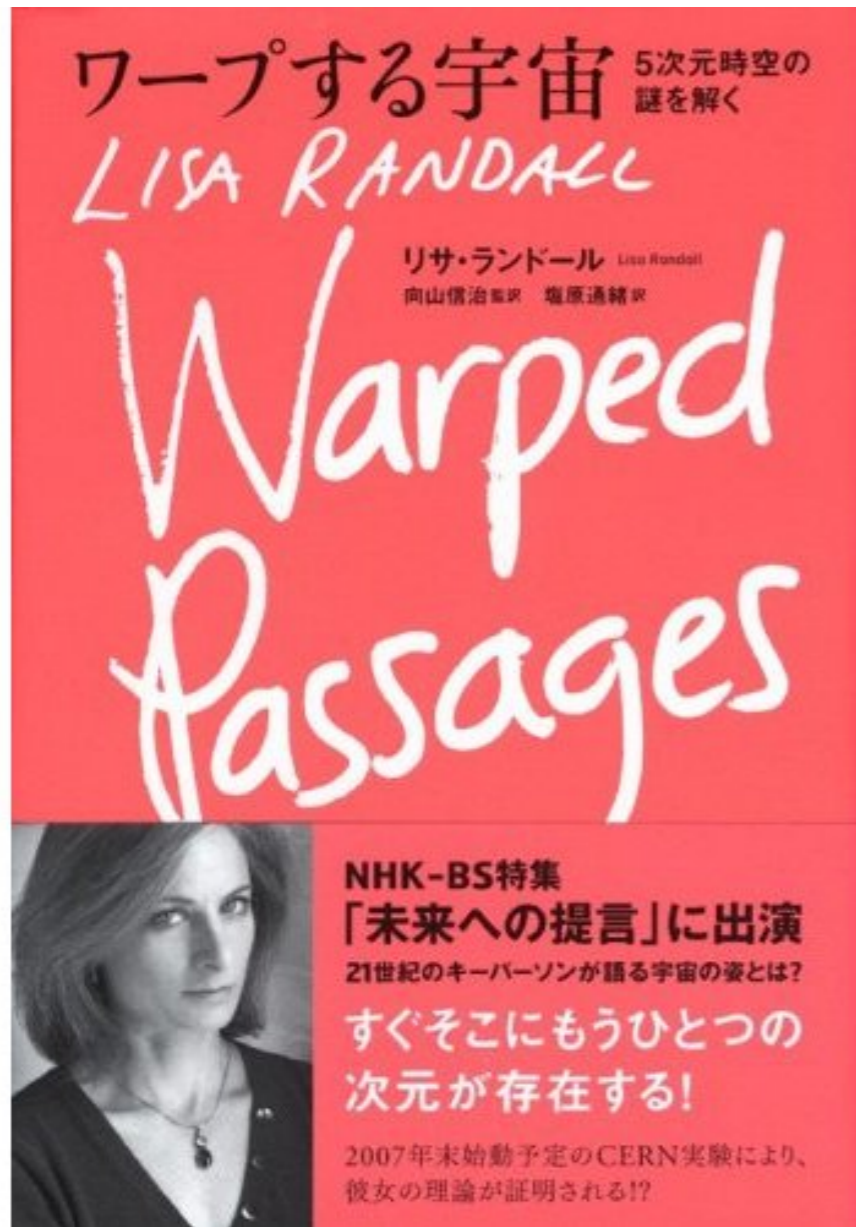


NHK BS 異次元への招待 (2007/8)

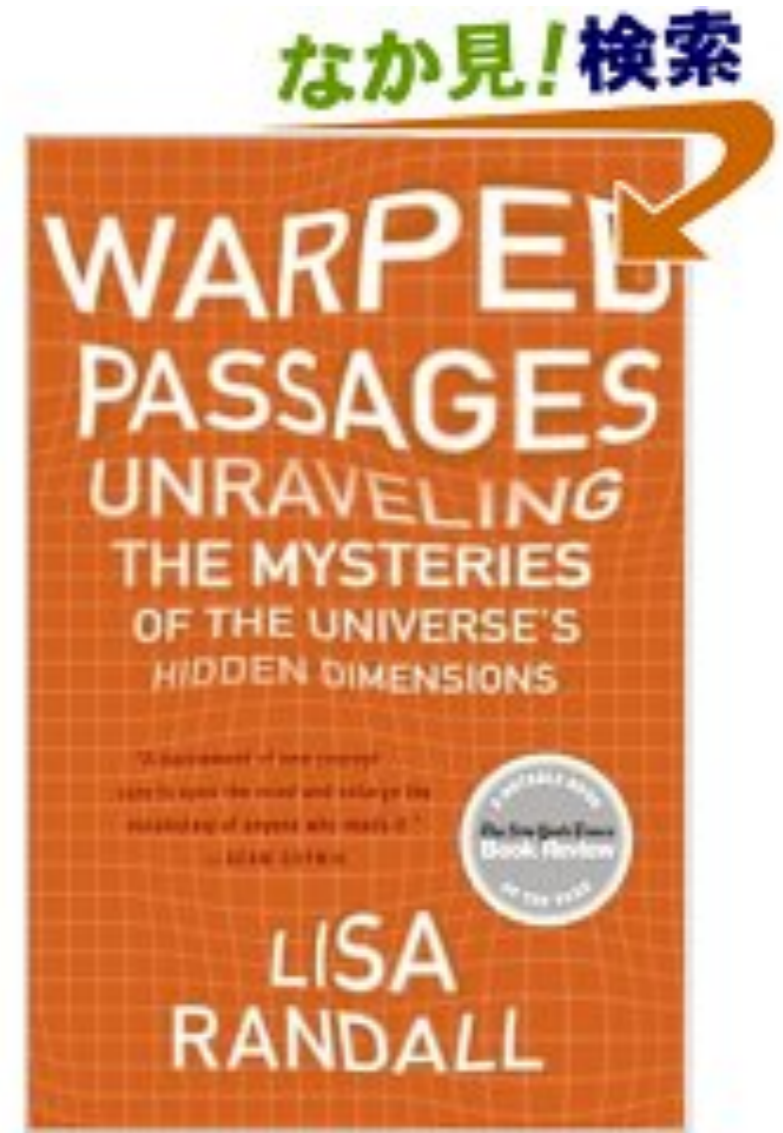
<http://www.dailymotion.com/video/x3c5iy> リサ-ランドール-異次元への招待1-4 news

on click 1min

膜宇宙論 (Brane-World cosmology), 大きな余剰次元



*フアン・ガルシア・ベリド、アンドリュウ・シャンブリン、ロベルト・エンパラン、ルース・グレゴリー、ステイヴ・ホーキング、ゲリー・T・ホロヴィッツ、ネマーニャ・カロパー、ロバート・C・マイヤーズ、ハーヴェイ・S・リアル、真貝寿明、白水徹也、トビー・ワイズマンなど。



*They include Juan Garcia-Bellido, Andrew Chamblin, Roberto Emparan, Ruth Gregory, Stephen Hawking, Gary T. Horowitz, Nemanja Kaloper, Robert C. Myers, Harvey S. Reall, Hisa-aki Shinkai, Tetsuya Shiromizu, and Toby Wiseman.

432

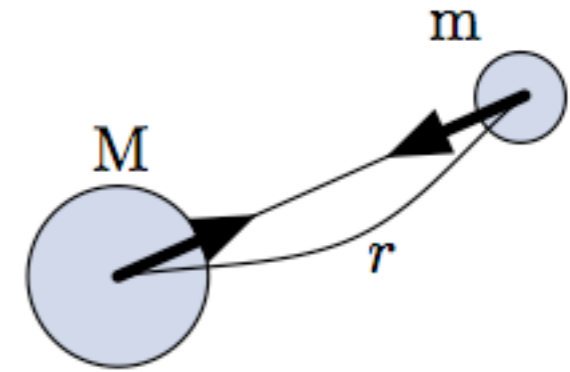
重力理論はミクロスケールではまだ検証されていない

万有引力の法則

すべての物体は引力で引き合う。質量 M と m の物体が距離 r だけ離れているとき、万有引力の大きさ F は

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

である。 G は定数で、 $G = 6.67 \times 10^{-11} [\text{Nm}^2/\text{kg}^2]$ である。



地球表面での重力

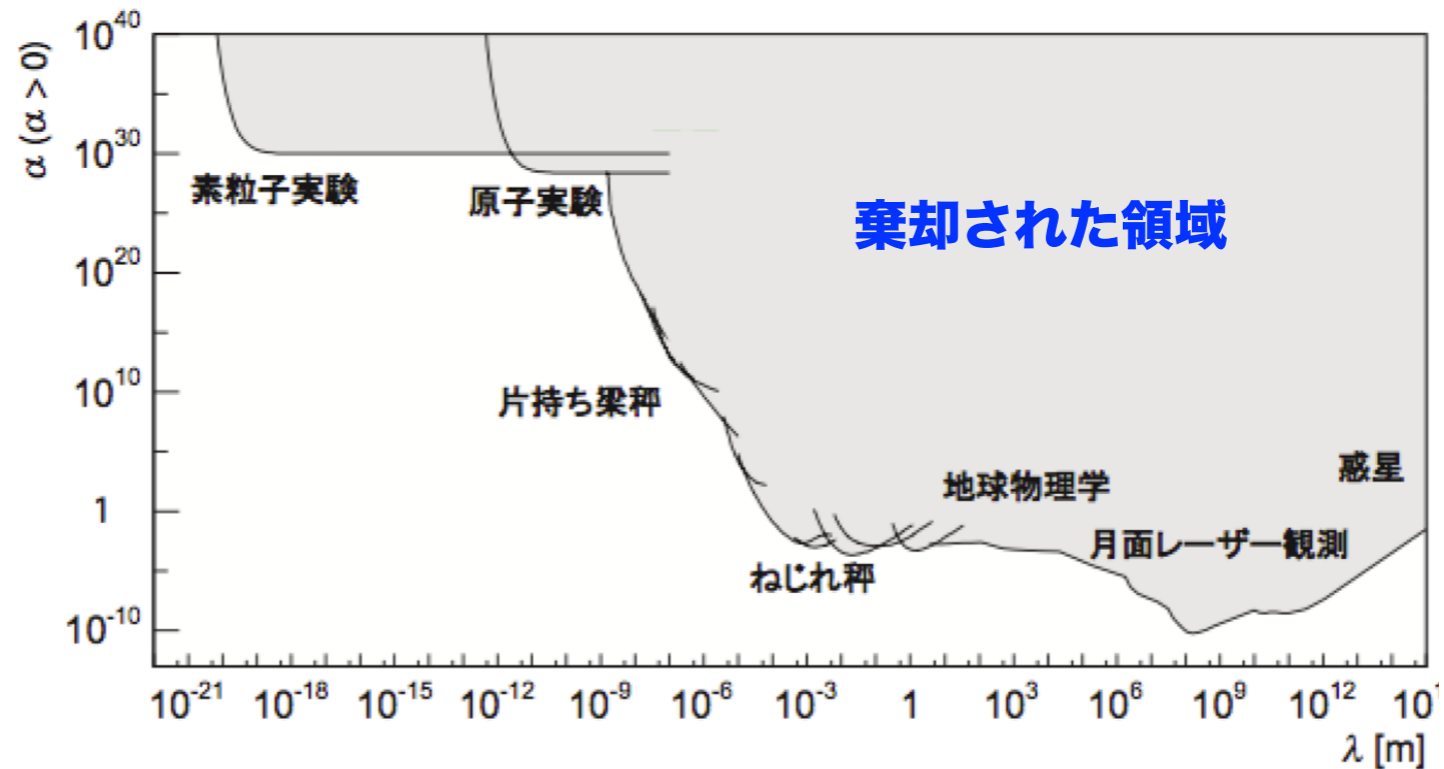
地球の表面での万有引力の大きさはほぼ一定で、質量 m の物体に対して

$$F = mg$$

である。 g は重力加速度と呼ばれ、 $g = 9.8 [\text{m}/\text{s}^2]$ である。

$$V = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

「重力と宇宙の事典」 (朝倉書店, 2019)



コラム 34 余剰次元は存在するか

時空の次元が変わると、ニュートンの万有引力の法則も変更される。2つの質量 M と m の物体が距離 r だけ離れているとき、万有引力の大きさ F は、万有引力定数を G_4 , G_5 などとして

$$4 \text{次元では } F = G_4 \frac{Mm}{r^2}, \quad 5 \text{次元では } F = G_5 \frac{Mm}{r^3}$$

となる。6次元以上でも分母の r のべき指数が順に増えていく。この式は、距離 r が半分になると、4次元では2倍の大きさの万有引力になるが、5次元では8倍の大きさの万有引力になることを示している。つまり、時空の次元が大きくなると、重力の大きさは大きくなるといえる。

地球上でもっとも大きなエネルギーを出せる実験装置は、スイスにある欧州原子核研究機構（CERN, セルン）が所有する全周 27 km の大型ハドロン衝突型加速器（LHC）である。LHC では光の速さの 99.9999% まで加速した陽子を衝突させる。衝突時のエネルギーは、最大で 14 TeV に到達する。もしかして、私たちの時空が 6 次元以上あるとするならば、加速器実験で非常に小さなブラックホールが一瞬形成されて消えていく現象が見られるかもしれない。（量子論のスケールのブラックホールは、放射現象で蒸発することをホーキングが示している。）もしそのような実験結果が報告されれば、私たちの宇宙観を根底から変えるパラダイムシフトになるだろう。

膜宇宙論 (Brane-World cosmology), 大きな余剰次元



NHK BS 異次元への招待 (2007/8)

<http://www.dailymotion.com/video/x3c5iy> リサ-ランドール-異次元への招待1-4 news

on click 3min

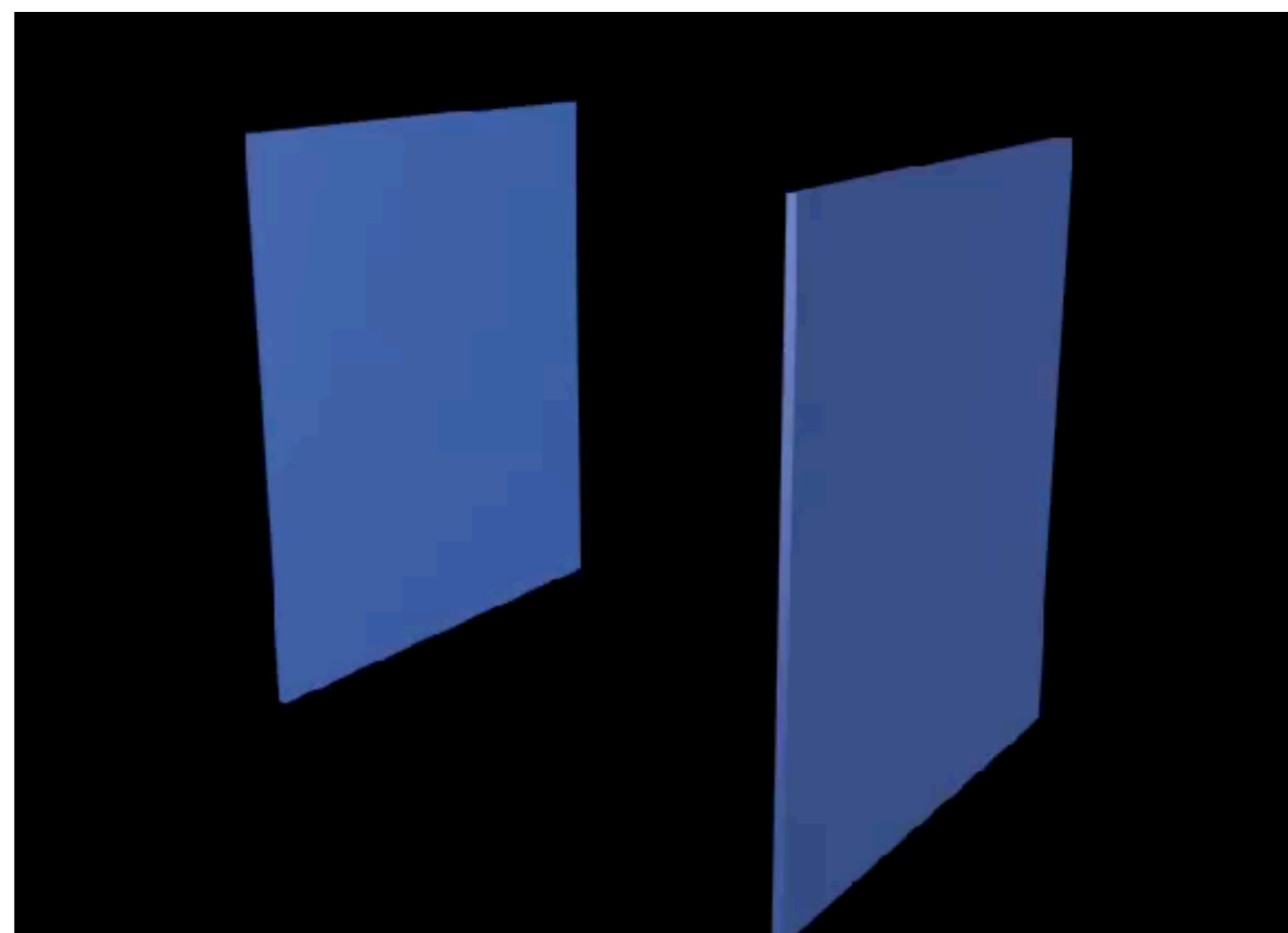
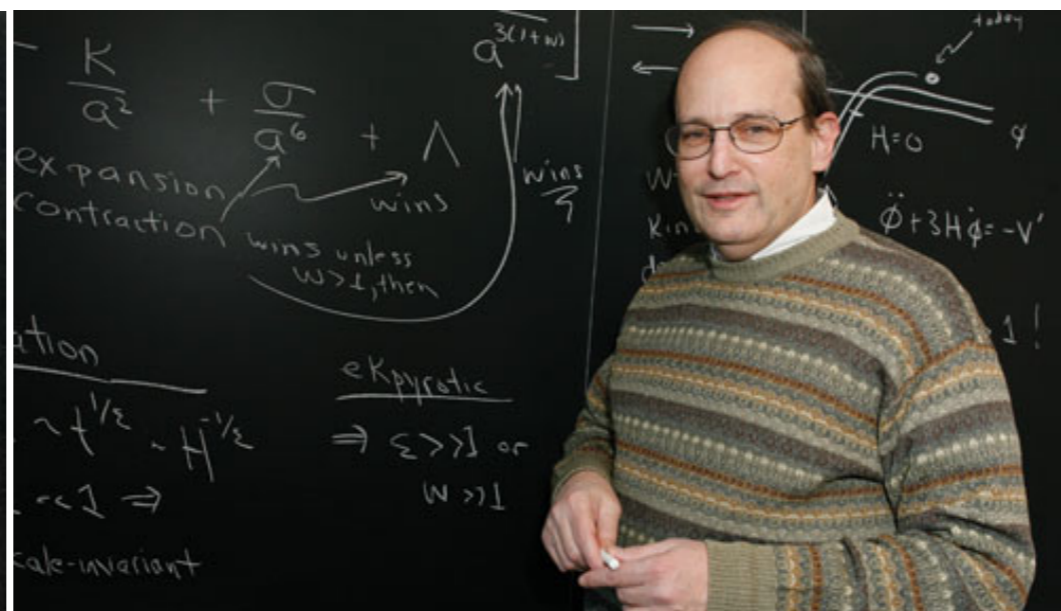
膜宇宙論 我々は5次元時空をただよう4次元膜上か？



ホーキング, 膜宇宙論を語る《2007年, 東京大学》 (2)

<https://www.youtube.com/watch?v=ckq5xMVddvU> start on click 3'05"

エピキロティック理論 膜宇宙の衝突でビッグバン？



<http://www.physics.princeton.edu/~steinh/cycliccosmology.html>

宇宙はどこまで解明されたか

- 4月25日 天文学と宇宙物理学：観測技術の進展と星までの距離の測定
- 5月23日 惑星探査と太陽系外惑星探査：地球外生命体は見つかるか？
- 6月27日 星とブラックホールと惑星系と銀河：構造形成は何が先か？
- 7月25日 超新星爆発と宇宙論：6つのパラメータで描かれる膨張宇宙
- 8月29日 初期宇宙と素粒子物理：高次元モデルが描くビッグバン以前
- 9月26日 重力波と重力理論：アインシュタインはどこまで正しいか？**

真貝寿明（しんかい ひさあき）

大阪工業大学 情報科学部 教授

武庫川女子大学 非常勤講師

理化学研究所 客員研究員



<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>