

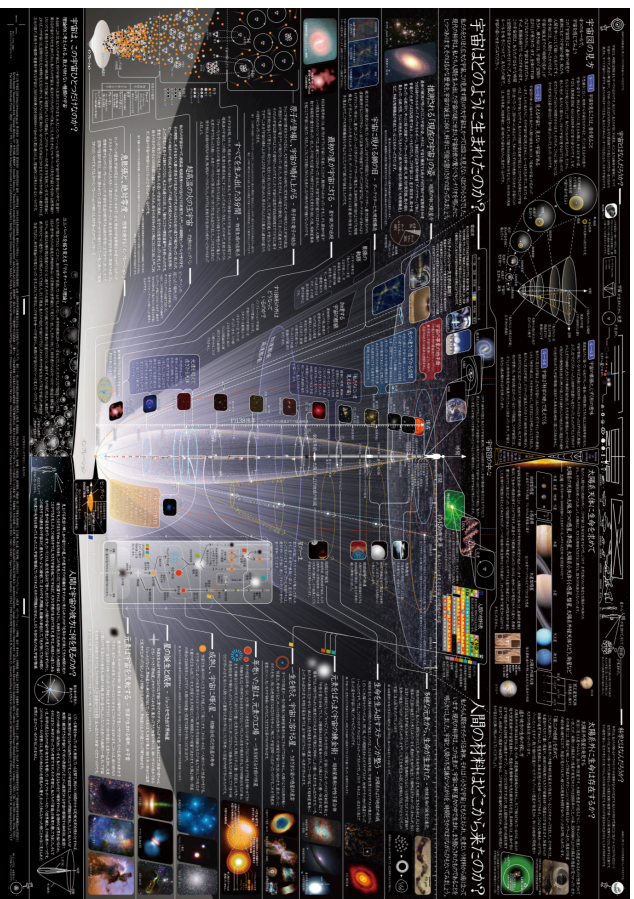
# 宇宙はどこまで解明されたか

- 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：構造形成は何か先か？
- 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)

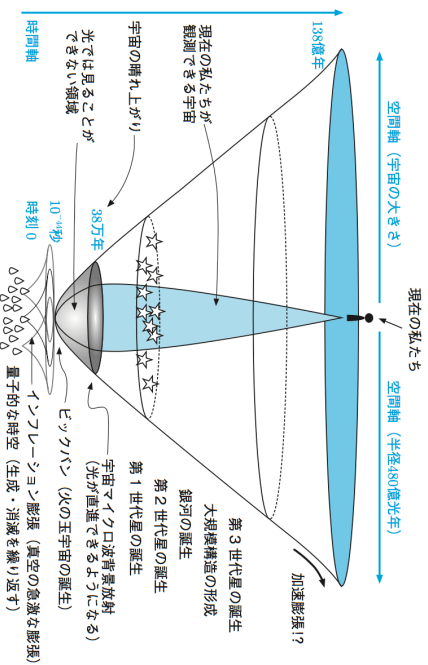


大阪工業大学 情報科学部 教授  
 武庫川女子大学 非常勤講師  
 理化学研究所 客員研究員  
<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mainichi/>



宇宙図2018 <http://www.nao.ac.jp/study/uchuz2018/>

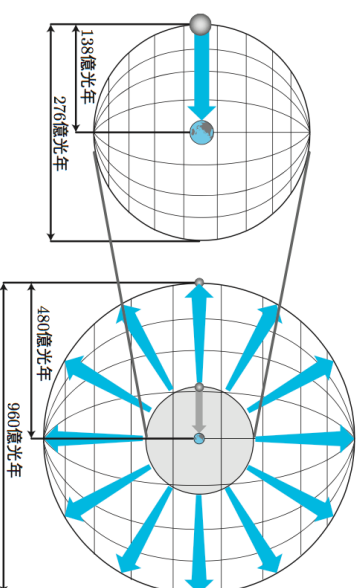
## 宇宙図の見方



**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。38万年後に光が進出できるようになる。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、中央の狭い部分に限られる。

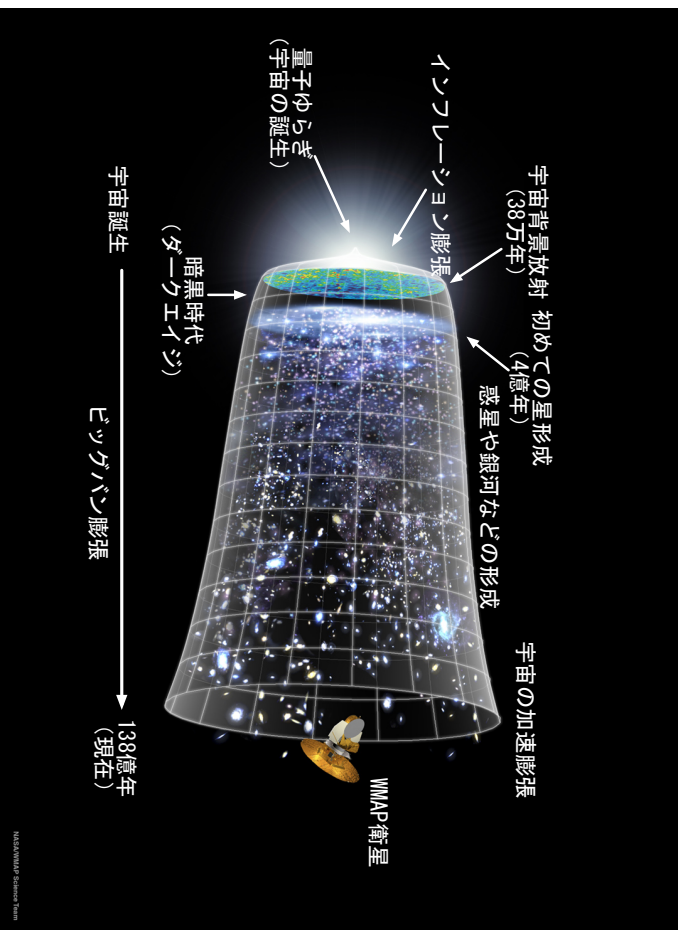
真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」 [第5回] 素粒子論が描く宇宙のはじまり 2019/9/29 毎日文化センター(株) 4

## 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、現時点での宇宙の大きさは半径 480 億年になる。

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」 [第5回] 素粒子論が描く宇宙のはじまり 2019/9/29 毎日文化センター(株) 5



宇宙論パラメータの決定

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

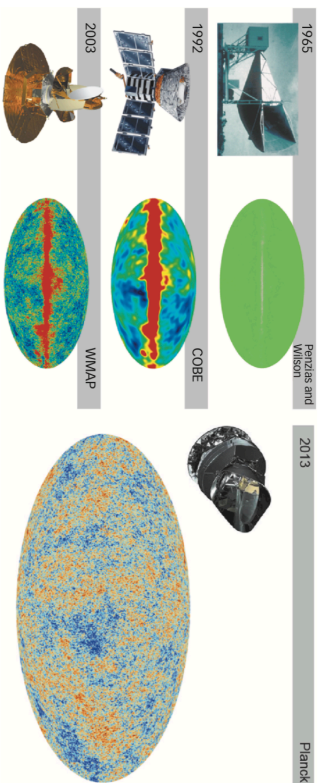
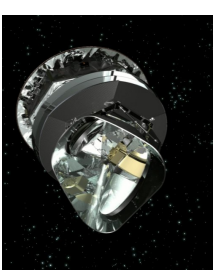
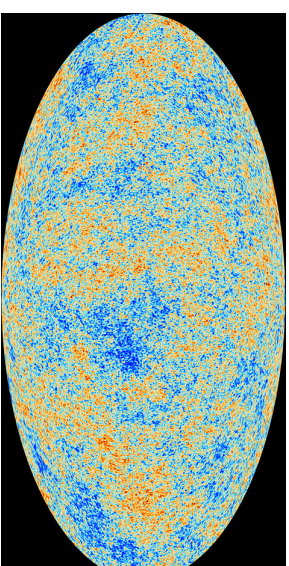


図 5.38 (本文 186 ページ)

CMB で描いた全天図を観測年代ごとに比較したものの、中心の水平軸は天の川銀河面を示す。1965 年のペンジアー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。

前回の復習

## 2013年, Planck衛星によるCMBの測定



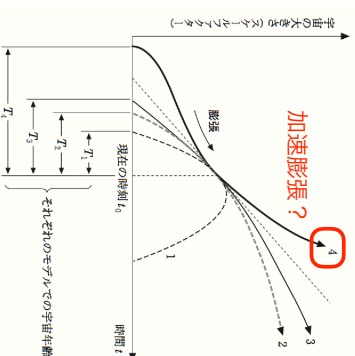
**38万年**

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 ~~27251~~ K 位

**2.72548±0.00057 K**

前回の復習

## 膨張宇宙モデル, 現在考えられているのは?

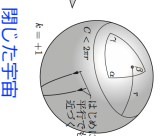
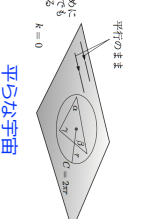
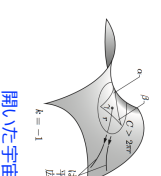


1. 閉じた宇宙で宇宙項なし.  $\Lambda = 0, k = +1$ .
2. 平坦な宇宙で宇宙項なし.  $\Lambda = 0, k = 0$ .
3. 開いた宇宙で宇宙項なし.  $\Lambda = 0, k = -1$ .
4. 平坦な宇宙で宇宙項あり.  $\Lambda > 0, k = 0$ .

(a) 開いた宇宙

(b) 平坦な宇宙

(c) 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樣に遠ざかっている。

### (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！**

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第5回】素粒子論が描く宇宙のはじまり 2019/8/29 毎日文化センター(株田)

10

火の玉宇宙になる前は？

## 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.

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第5回】素粒子論が描く宇宙のはじまり 2019/8/29 毎日文化センター(株田)

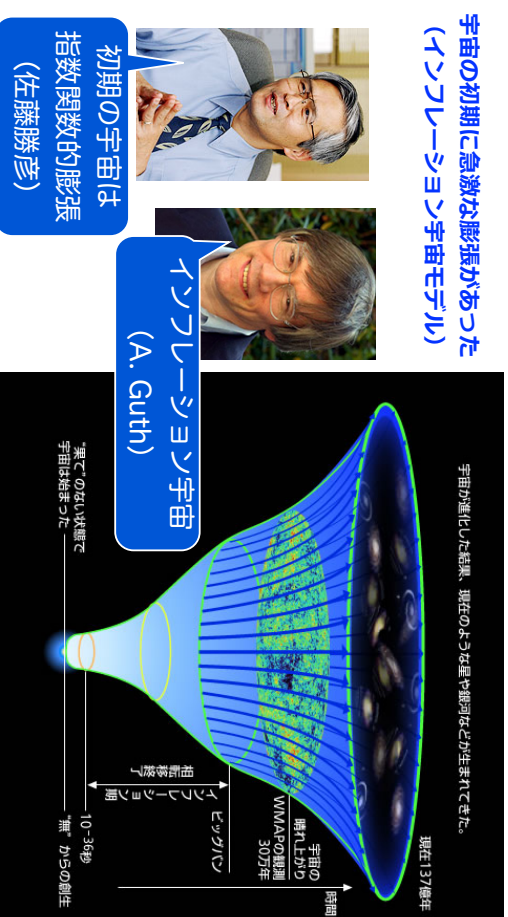
11

火の玉宇宙になる前は？

## 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。**

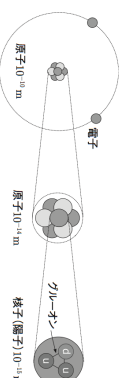
**宇宙の初期に急激な膨張があった  
(インフレーション宇宙モデル)**



真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第5回】素粒子論が描く宇宙のはじまり 2019/8/29 毎日文化センター(株田)

12

## 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) で結びついていて  
と考える。

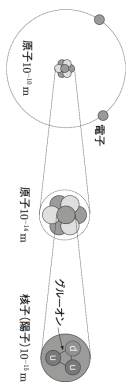


湯川秀樹 (1907-81)

真貝寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第5回】素粒子論が描く宇宙のはじまり 2019/8/29 毎日文化センター(株田)

13

## 素粒子と相互作用

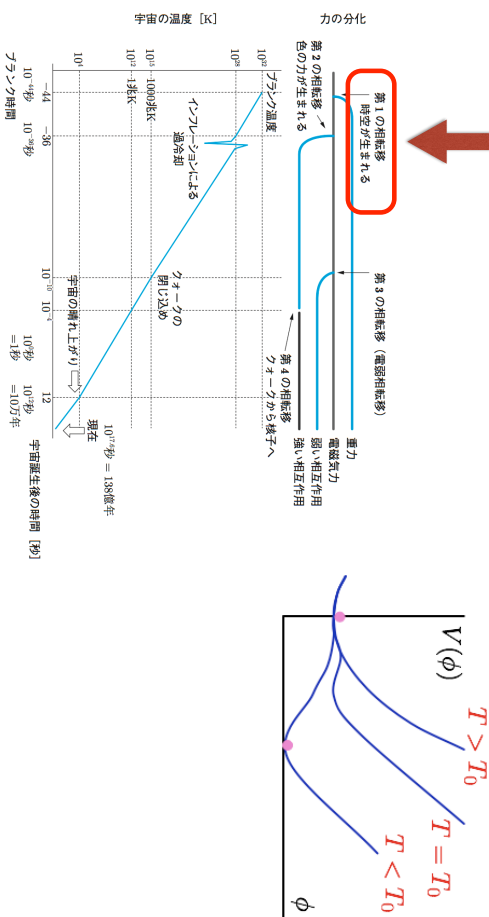


クォーク (quark) は3個で核子を構成する。クォーク理論の提唱者ゲルマン (M. Gell-Mann, 1929-) はカモの鳴き声にちなんで kwork とする予定だったが、ジョイス (J. Joyce) の小説『フィンネガズ・ウェイク』 (Finnegans Wake) に, “Three quarks for Muster Mark!”(クォーク大将のために三唱せよ, くっくクォーク)とあることからスベルを変えた。

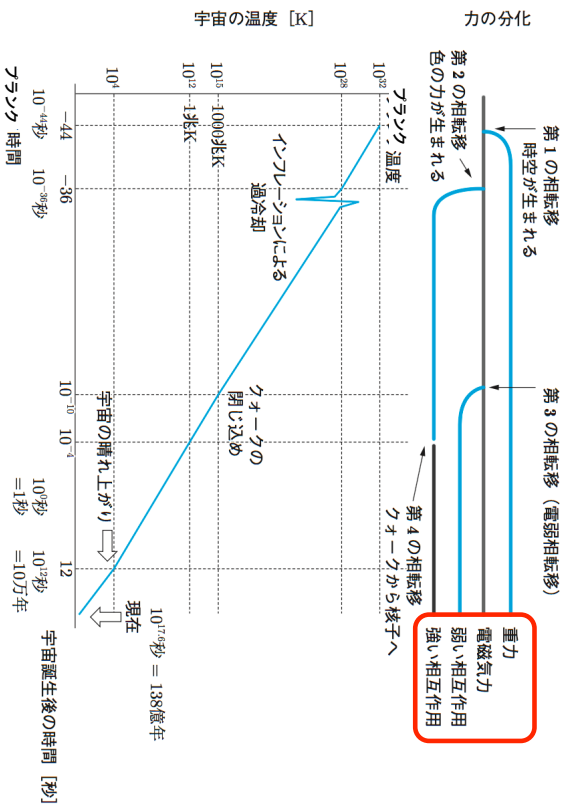
物質を構成する素粒子		力を媒介する素粒子	
電荷	スピン	ゲージ粒子 gauge bosons	質量を与える素粒子
クォーク Quarks	+2/3 1/2 -1/3 1/2	強い相互作用 電磁気力 弱い相互作用 重力	ヒッグス粒子 Higgs boson 2012年
第1世代 アップ u ダウン d	第2世代 チャーム c ストレンジ s	グルーオン gluon 1979年	重力 ? グラビトン 未観出
第3世代 トップ t ボトム b	第4世代 タウ tau ニュートリノ nu	光子 photon 1905年	W boson 1983年
レプトン Leptons	電子 e ミュー粒子 mu タウ粒子 tau	Z boson 1983年	
ニュートリノ e-neutrino mu-neutrino tau-neutrino			

## 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

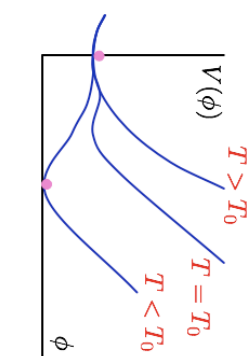


## 宇宙の相転移



宇宙の相転移?  
冷蔵庫にいら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

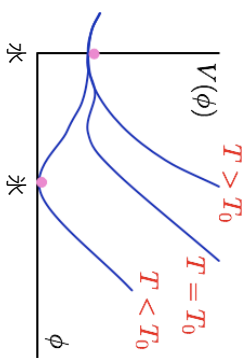
水が凍ったり, 沸騰したりするきっかけは, 不純物の混入による。精製水をゆっくりと-5℃の冷蔵庫で凍らせようとしても, 液体のまま(過冷却状態)であり, 外気に触れた瞬間に凍りつくことになる。雪国などでみられる樹氷は, 過冷却状態の水滴が木につかかって, 一瞬で凍ることが一つの理由だという。



図 4.8 ぶつかるて凍る過冷却の雪

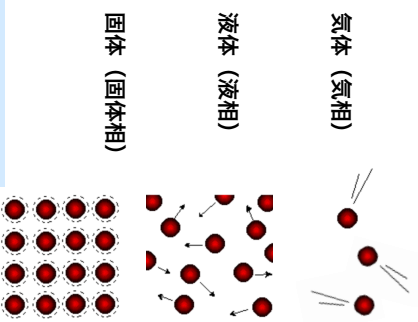
冷蔵庫にいられたペットボトルの水を出すと、一瞬で凍った。

= 過冷却現象



横軸  $\phi$  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)

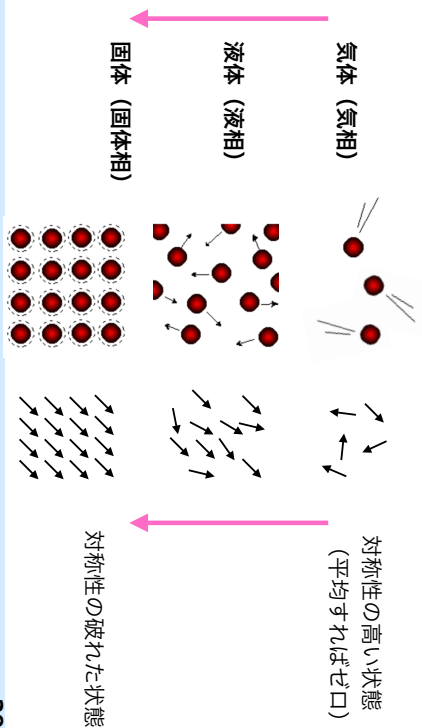
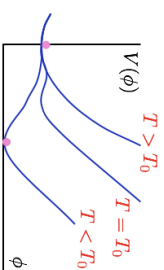
固体から液体へ=相転移現象  
phase transition



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



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 (2008)

クォークの世代数を予測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.



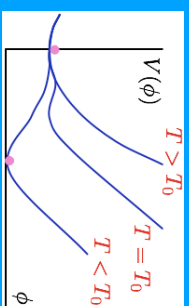
益川敏英 (2008)



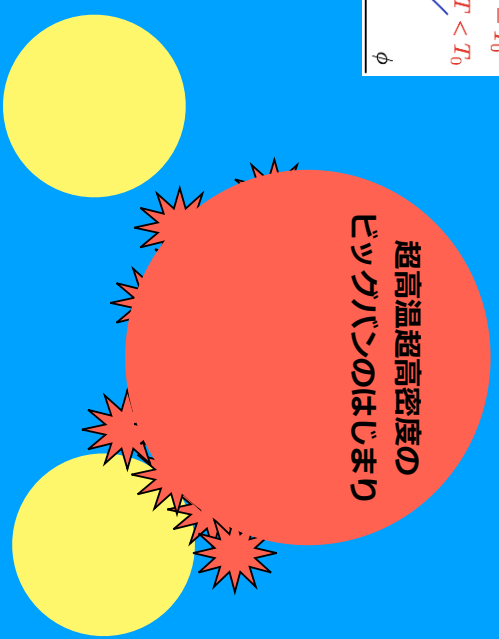
The Official Web Site of the Nobel Prize

[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/)

インフレーションは偽真空の泡の衝突で終わる



偽真空

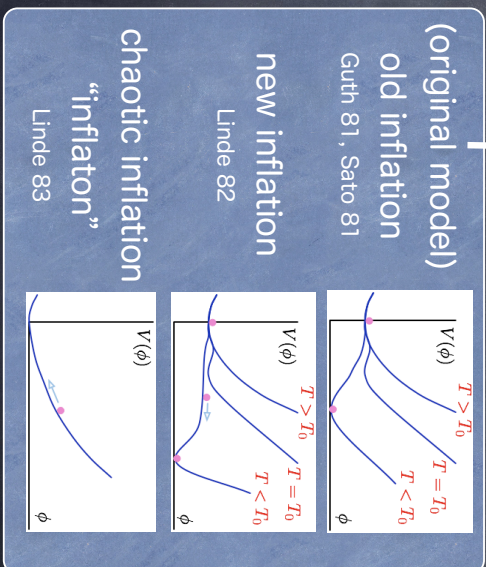


# インフレーションモデル

インフレーションを引き起こす場

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

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



# 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

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

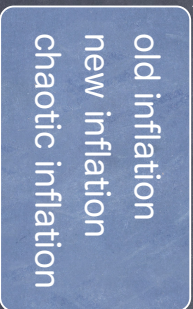
$$\frac{\sqrt{-g}}{2\kappa^2} [R + \alpha R^2]$$

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

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

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

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



# 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

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

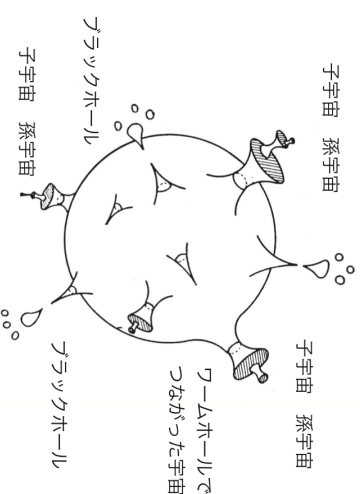
重力理論の補正

- 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」

インフレーション宇宙モデルの予言

宇宙は我々の宇宙だけではなかった



Xiniverse multiverse

## 2014年3月 宇宙背景放射に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？

■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。

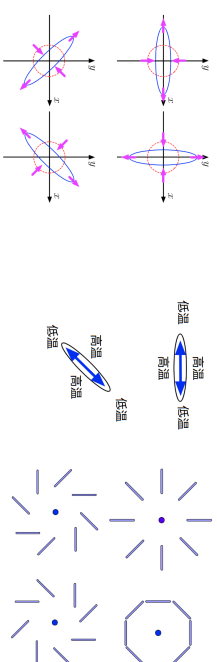


図 5.14: (左) 重力波の振動モード。紙面に垂直に波が進んでいくときに、空間を歪ませる方向が 2 つ存在する。(中) 空間に温度ゆらぎがあれば、時空の振動方向もゆがむ。(右) 宇宙背景放射の観測結果に予想される「Eモード」(上)と「Bモード」(下)。

## インフレーション宇宙の証拠を発見？

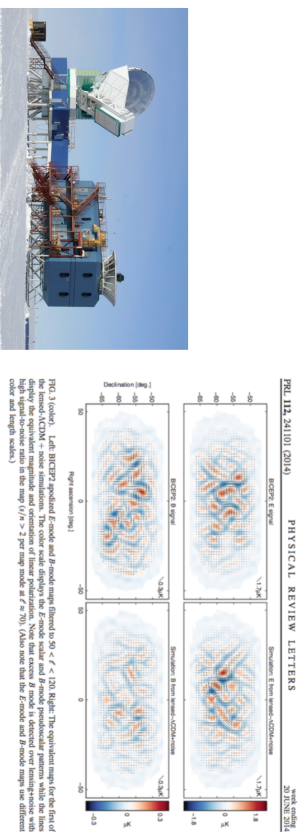
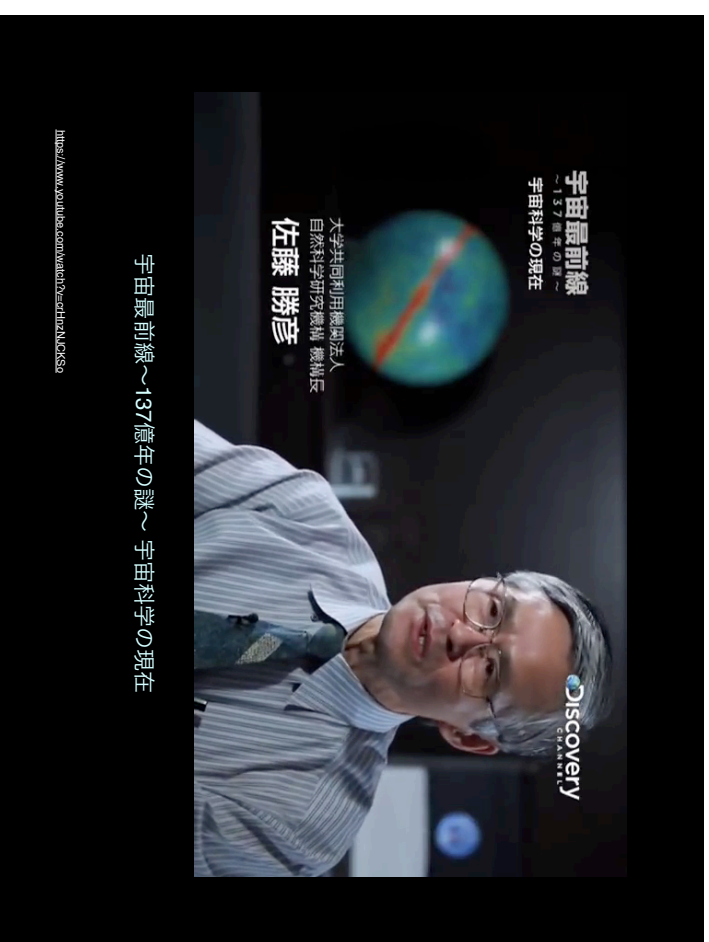


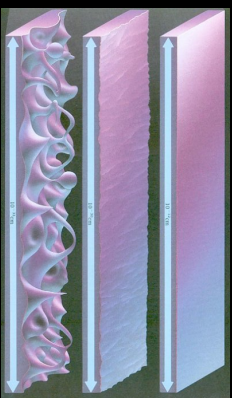
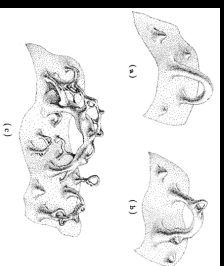
図 5.15: (左) BICEP2 望遠鏡。(右) BICEP2+QUIET が発表した偏光データとシミュレーション結果の比較。上が「Eモード」、下が「Bモード」。<sup>[2]</sup>

\*11 BICEP は、Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization の略で、南極点近くのアムゾン-スノコ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。



- ビッグバン宇宙の始まり  
=インフレーション膨張した  
億の真空泡の衝突

● その前は？



混沌とした量子時空の世界？ or else?

真田寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第5回】素粒子論が推く宇宙のはじまり 2019/8/29 毎日文化センター(株)田

宇宙のはじまりを説明しようとする1つのモデル

無境界仮説による宇宙のはじまりの解釈

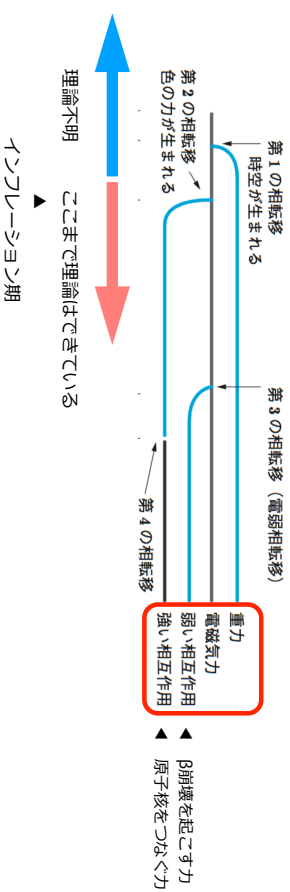


ホーキング、膨宇宙論を語る 《2007年、東京大学》 (3) start on click 1'09"

真田寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第5回】素粒子論が推く宇宙のはじまり 2019/8/29 毎日文化センター(株)田

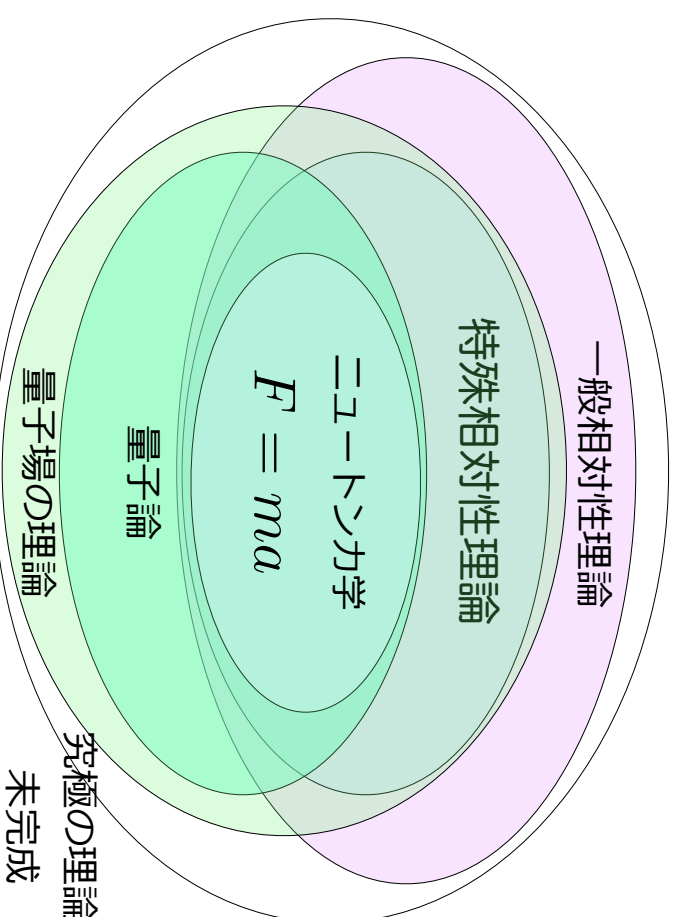
量子重力理論

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



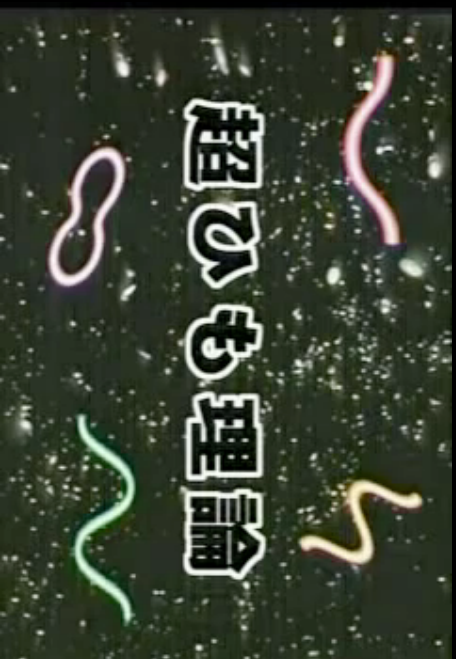
そもそも重力だけが、他の3カに比べて極端に弱いのは何故か、  
(力の階層性問題 hierarchy problem)

真田寿明 「宇宙はどこまで解明されたか」【第5回】素粒子論が推く宇宙のはじまり 2019/8/29 毎日文化センター(株)田





## 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=n8Rld81d1dQc>

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

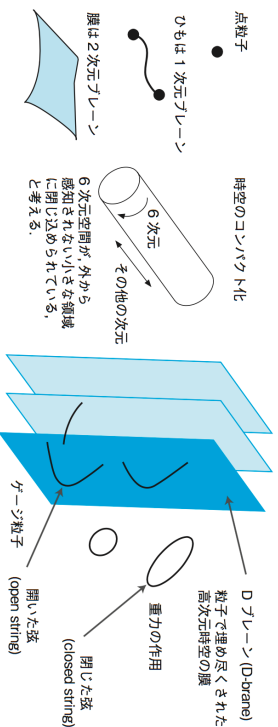
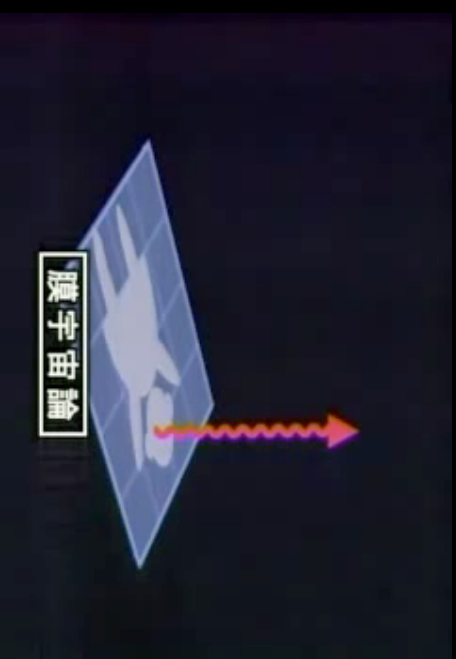


図 5.30 超弦理論に登場するさまざまな概念。弦(ひも)は、さまざまな振動モードを持ち得るが、その振動モードの違いが、素粒子の種類を表している。と考える理論である。数学的には10次元空間で弦を考えると一番無理なく粒子を表現できる。現実の時空は4次元時空なので、余分な6次元空間は見えないように小さく閉じ込められている。と考える。1995年以降、弦(粒子)が多数重ね合わせたDブレーン(D-brane)と呼ばれる高次元の膜が、超弦理論の要素としてモデル化された。

## 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=n8Rld81d1dQc>

start on click 2'00"

## 膜宇宙論 (Brane-World cosmology)

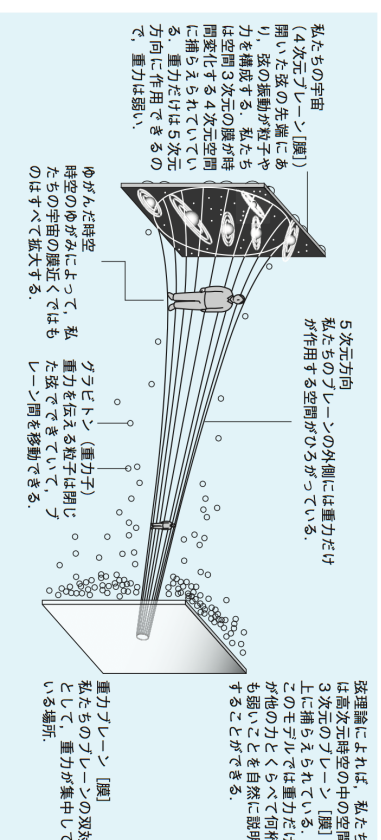
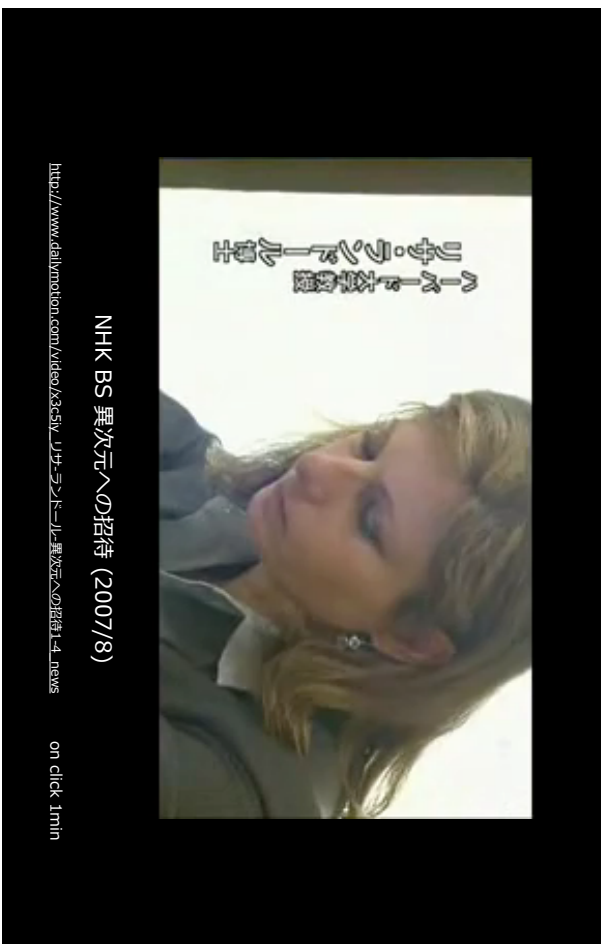
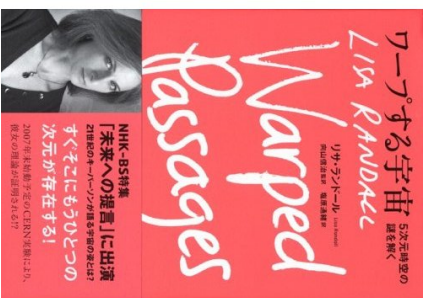


図 5.31 ランドールとサンドラムが提案したブレーンワールド・モデルの1つ。(膜宇宙モデル, 1999)

## 膜宇宙論 (Brane-World cosmology), 大きな余剰次元



## 膜宇宙論 (Brane-World cosmology), 大きな余剰次元



「異次元への超量」に出演したLisa Randallの講演映像を収録したDVD。最新の理論が紹介されています。



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

## 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

すべで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

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

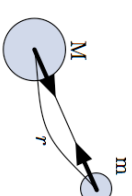
である。  $G$  は定数で、  $G = 6.67 \times 10^{-11} [\text{Nm}^2/\text{kg}^2]$  である。

### 地球表面での重力

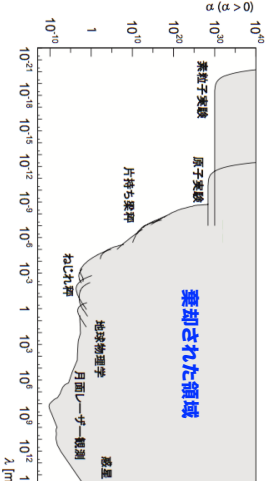
地球の表面での万有引力の大きさはほぼ一定で、質量  $m$  の物体に対して

$$F = mg$$

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  $G_n$ 、  $G_5$  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 27km の大型ハドロン衝突装置は、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 27km の大型ハドロン衝突装置は、スイスにある欧州原子核研究機構 (CERN, セルン) 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。もしもかして、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プラックホールの形成が瞬間的に消えていく現象が現れるかもしれない。(量子論のスケールのプラックホールは、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/X3c51v\\_1jサ-ラドニール-異次元への招待-14\\_news](http://www.dailymotion.com/video/X3c51v_1jサ-ラドニール-異次元への招待-14_news)

on click 3min

## 膜宇宙論 我々は5次元時空をたどろう4次元膜上か？

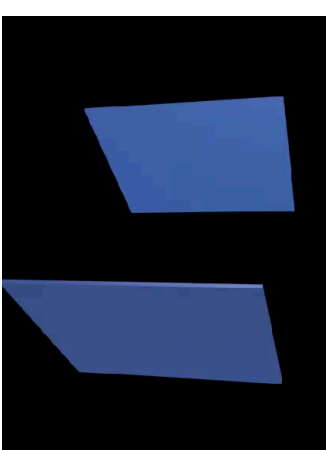
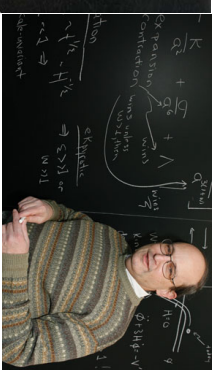


ホーキング、膜宇宙論を語る (2007年, 東京大学) (2)

<https://www.youtube.com/watch?v=cKq5xMvddxU>

start on click 3'05"

## エピクロテイク理論 膜宇宙の衝突でビッグバン？



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

毎日文化センター 2019年度

## 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：構造形成は何か先か？
- 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/>