

最先端物理学が描く宇宙

Frontiers of Physics & Cosmology

第13回 2024/12/16

標準宇宙論(2)

インフレーション宇宙モデル

真貝 寿明

Hisaaki Shinkai



<https://www.oit.ac.jp/is/shinkai/mukogawa>

課題

- 「光を波と考えるか、粒子と考えるか」の論争点は何か。現状ではどう理解するのが正しいか。
- 朝永振一郎の書いた『光子の裁判』(1949)のプリントを第9回の授業時に配布しています。この要旨をまとめてください。
- そして、次のキーワードから2つ以上を使って、論争点と解決案を説明してください。
『神はサイコロをふらない』『確率解釈』『不確定性原理』『観測問題』『シュレーディンガーの猫』『EPR パラドックス』『トンネル効果』『コペンハーゲン解釈』『多世界解釈』
- 最後に、皆さんのこの問題に関する感想をお願いします。

作成要領

- A4用紙3-5枚程度。表紙は不要。必要であれば、図や表を添付してよい（ページ枚数に含める）。
- 参考とした文献（web ページ含む）は必ず記すこと。（剽窃、無断転載行為が判明したら受理しない。きちんと引用するならOK）。

提出手順

- Google Classroom の課題として提出。手書きの場合は写真撮影したものを提出。
- 提出〆切は、**2024年12月29日（日）23:59 成績20点分**
- 提出ファイルの名前は、「Q 学科 XXXXXXXX ○○○○」の形式とすること。（Q は Quantum の頭文字でレポート区別するためのもの、学科は大日/短生など2文字で、XXXXXXX は学籍番号、○○○○は氏名）とすること。ファイル名には空白を入れず、学籍番号は半角で。一括ダウンロードして読むため、このファイル名をお願いします。
- ファイル内の初めにも、タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること。
- pdf ファイルが望ましいが、word ファイルでもよい。

レポートを作成するにあたって準備を始めました。前回のレポートも難しい内容で頭がパニックです。先生が配布された「光子の裁判」は全て読むべきですか？ ← レポートを作成するにあたって...

課題

- 1 以下の問題 (1)-(6) より, 1つ選んで説明せよ. (A4 1~1.5 枚程度)
- 2 以下の問題 (7)-(12) より, 1つ選んで説明せよ. (A4 1~1.5 枚程度)
- 3 この講義で扱ったトピックについて, 自分で問題を考えて, 解答例を示せ. (枚数自由)

論点

- (1) ケプラーが発見した惑星法則
- (2) ガリレオが発見した天体観測の成果
- (3) ニュートン物理学が受け入れられていく過程
- (4) 物理学史における 1905 年の持つ意義
- (5) アインシュタイン・ポドルスキー・ローゼンのパラドックス
- (6) ビッグバン膨張宇宙論と定常宇宙論の論争
- (7) アインシュタインの導入した「宇宙項」
- (8) ダークマターとダークエネルギー
- (9) インフレーション宇宙モデル
- (10) ブラックホールが存在することはどうしてわかるのか
- (11) マルチメッセンジャー天文学の成果
- (12) 星までの距離の測定方法

3ヶ月のレポート課題を難しうた="7"ど、がんばります!!

レポートに追いつける生活楽しみます。

成績30点分

作成要領

- 参考とした文献 (web ページ含む) などがあれば, **必ず** 記すこと. 剽窃行為が認められる場合は評価を下げます. (参考文献から引用するのは構いませんが, 引用範囲は必ずそう明記すること.)
- インターネット上の文献を引用するときは, 書き手が不明な個人のものとは避けること.
- 表紙は不要. 必要であれば, 図や表を添付してよい (ページ枚数に含める).

提出手順

- Google Classroom の課題として提出. 手書きの場合は写真撮影したものを提出
- 提出メ切は, **2025年1月27日 (月) 23:59**
- 提出ファイルの名前は, 「C 学科 XXXXXXXX ○○○○」 (C 大日 2212345 武庫川子) の形式とすること. (C は Cosmology の頭文字でレポート区別するためのもの, 学科は大日/短生など 2 文字で, XXXXXXXX は学籍番号, ○○○○は氏名) とすること. ファイル名には空白を入れず, 学籍番号は半角で. 一括ダウンロードして読むため, このファイル名でお願いします.
- ファイル内の初めにも, タイトル・学部学科学年・学籍番号・氏名を記載すること.

前回のミニッツペーパーから

UFOは本当にいると思いますか？

Unidentified Flying Objectsはたくさんあります。
90%は風船だそうです。

先生が尊敬している物理学者(宇宙関連)は誰ですか。

賢くてもフレンドリーで、若手にも敬意を払う人はいいですね。

The Big Bounce, Signs in the CMB? A Loop Quantum Gravity update

先生は、ブラックホールが先か、銀河が先か、...
これは宇宙物理最大の謎の1つです。
どっちか1つには限られないかもしれませんね。

たまご  が先か  が先か



Abhay Ashtekar

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

前回のミニッツペーパーから

学者の人たちが残すコメントは、何を言いたいのかわからない、哲学的なコメントが多いと思った。シュレーディンガーの猫のボアの「重ね合わせ」とか...

今回の講義は数式が少なくて出てきたので「文系である私には頭が混乱してしまうような内容でした。」

前回に引き続き、計算式がたくさんでてきて頭がパンクしてしまいました。

アインシュタインは友人パイスに向かって尋ねた。
「月は君が眺めている間だけ実在している、などということ、本当に信じているのか」

ベルの不等式の破れは、その通りで、
「月は誰も眺めていないとき、そこに実在していない」ことを結論する。



水素は化学が特に見かける原子だと思っていたので、最先端の物理学でも高頻度でおもしろいと思いましたが、出てきて

アインシュタイン・ボア論争の再来を危惧して来た。

量子論 死かいいか...

前回のミニッツペーパーから

11-4 アインシュタインに会って話してみたいとはありまか？
量子論の復習にほりそう動画あるか探してみようと思...



重力波は予言から100年経ってようやく検出できたよ。

それはうれしいねえ。もう一個ノーベル賞もらえるかな..

一般相対性理論は、100年経っても一番正しい重力の理論だよ。

あたりまえだのクラッカー

EPRパラドックスは成立しないことが実験で確かめられたよ。
Einsteinの考えは違っていただけ、量子もつれの現象から新しい「量子コンピュータ」が生まれつつあるよ。

量子論が生活の中心になっていくのは、どうも好かん



木曜日の夜は、ぜひ夜空を見て流星群を探してみようと思います。
余談ですが、先生とアインシュタインの会話の中で、アインシュタインが「あたりまえだのクラッカー」と言ったところで少し笑ってしまいました。

長野県・阿智村
2022.12.14

ふたご座流星群2022
プレイバック



<https://www.youtube.com/watch?v=knF3PIENjAc>

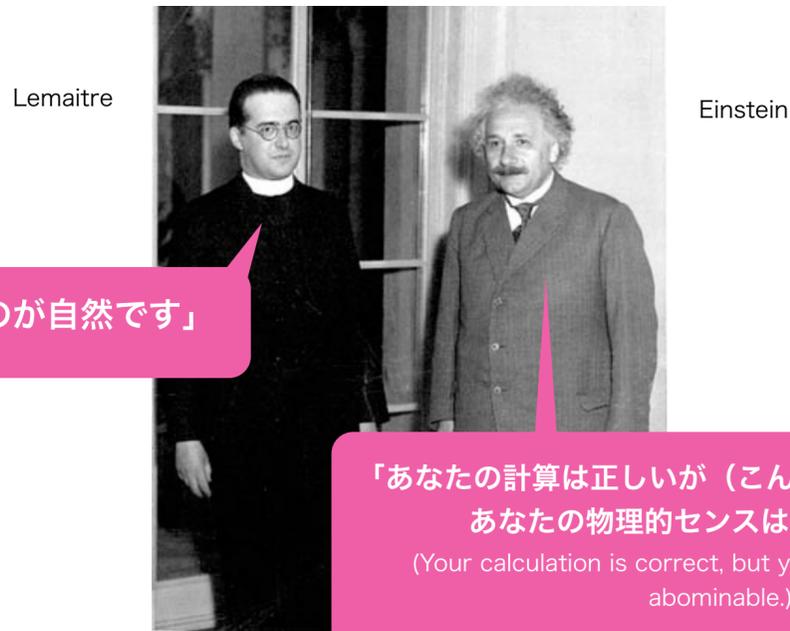
前回のミニッツペーパーから

あなた「偉大な科学者と称されるアインシュタインでも誤りは」とされることバ「あつたことに驚きまじつ」。

宇宙図の見方が難しかったけど興味があったので自分でも詳しく調べてみたいと思った。

5. 宇宙論 》 5.1 宇宙膨張がわかるまで 教科書 p156

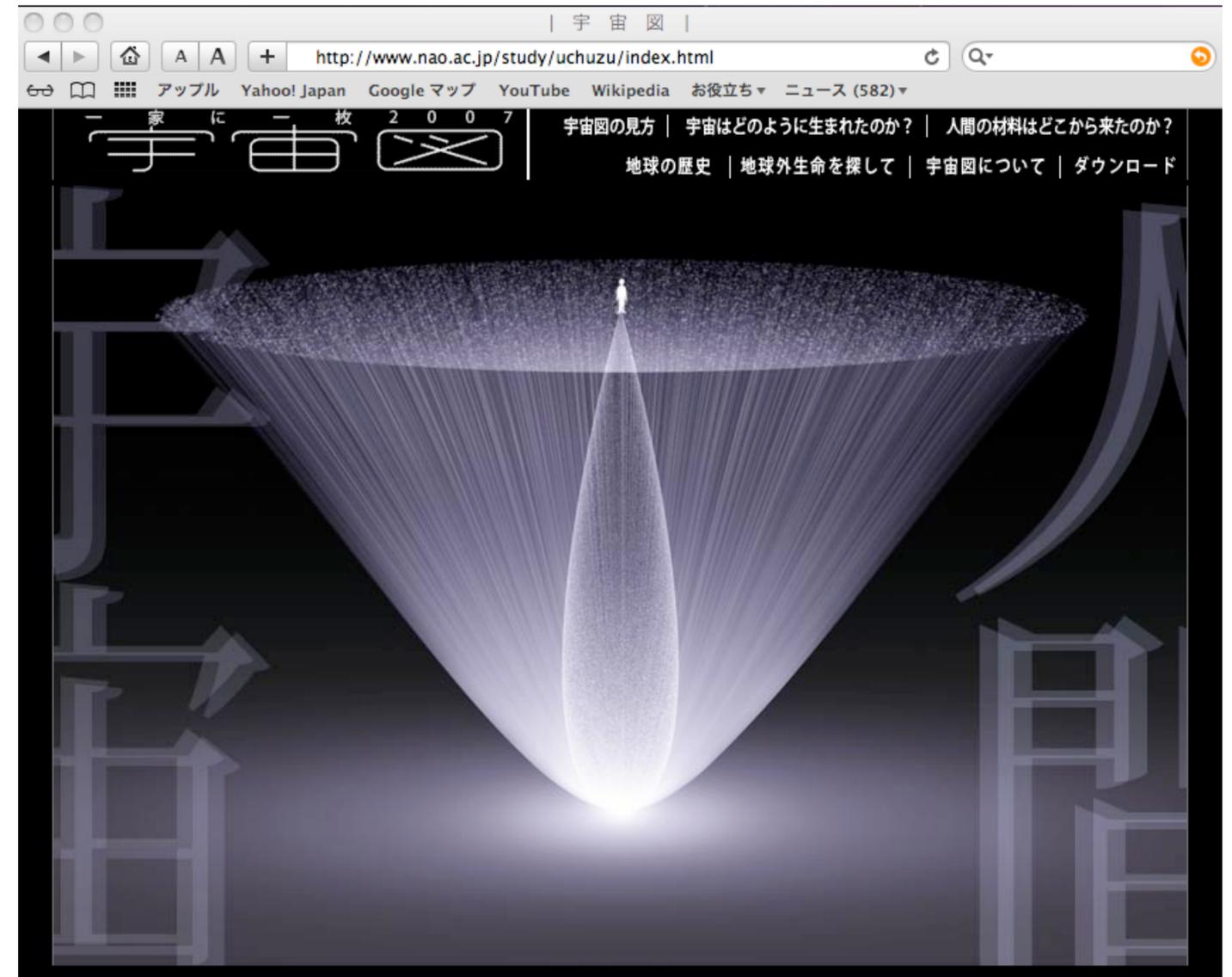
アインシュタインは膨張宇宙を信じなかった



「宇宙は膨張するのが自然です」

「あなたの計算は正しいが（こんな解を信じるなんて）あなたの物理的センスは言語道断だ。」
(Your calculation is correct, but your physical insight is abominable.)

48



ビッグバンという言葉は皮肉。批評から名付けられたというのはおもしろいなと思いました。

ガモフとホイルの宇宙のことに関する討論はとても興味深いな、と思いました。

宇宙の話はやはり面白いなと感じました。

宇宙の話を聞くと、宇宙自体はどこかに存在しているわけじゃないと宇宙の外側が気になって、不思議な気持ちになります。

ビッグバンはいつ、どのように発見されたのかなど、この授業で出てくる疑問はそもそもなぜ考えられているのかと思いました。

5. 宇宙論 >> 5.2 ビッグバン標準宇宙論

教科書 p159

~~火の玉~~宇宙論 vs 定常宇宙論

ビッグバン宇宙論

「宇宙には始まりがあった」

宇宙誕生後、3分で軽元素の合成がされた

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしても新たに物質が生成していれば大丈夫



ガモフ

彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)から始まったと言っている

ビッグバン, いい名前だ. ビッグバン宇宙論, と呼ぶことにしよう



ホイル

前回のミニッツペーパーから

【12-1】アインシュタインが自ら「生涯最大のひらめき」と称したものは何か。

加速度は局所的に消去が可能(等価原理)であり、重力の正体は時空の歪みであること。

自由落下する物体は重力を感じない、

自然落下するエレベーターの思考実験
から 加速度は局所的に消去可能という等価原理

エレベーターの思考実験 重力の正体は時空の曲がり具合であること

一般相対性理論を考えるきっかけとなったエレベーターの思考実験

【12-2】アインシュタインが「生涯最大の誤り」と語ったものは何か。

重力作用に反対する方程式の中の宇宙項の導入

一般相対性理論の方程式に宇宙項を追加した
こと。

宇宙項の導入 (宇宙膨張をアインシュタインは信じなかったこと)

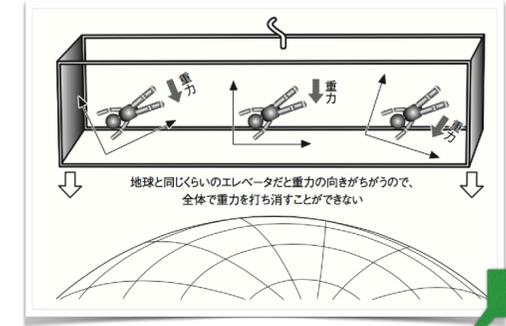
宇宙項の導入

「宇宙は永遠に不変であるべきだ」という考えのもと、定常的な宇宙モデルをつくるために、方程式を修正し、重力作用に反対する斥力を導入したこと

重力の原因は、空間のもつ性質だ

「重力加速度は、自由落下しているエレベータでは相殺されてしまう」

= 加速度は局所的に消去可能 (等価原理)



人生で最も幸福なひらめき

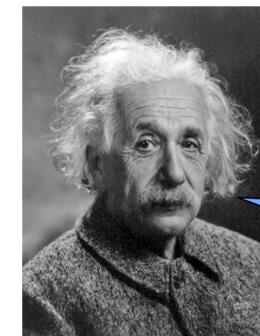
= 重力は、大域的には消去できない。

= 重力の正体は、時空のもつ曲がり具合である。

曲がった時空の幾何学 = 「一般相対性理論」

アインシュタインが一般相対性理論を思いつくきっかけ (p81)

アインシュタイン、膨張宇宙をついに信じる



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

「宇宙項の導入はわが人生最大の過ちであった」
(Introduction of cosmological constant is the biggest blunder in my life.)

宇宙項の導入 (p158)

第5章 宇宙論

5.1 宇宙が膨張しているとわかるまで 一般相対性理論による膨張宇宙の予言

1929年 ハッブル・ルメートルの宇宙膨張の発見

5.2 ビッグバン宇宙論

火の玉宇宙論と定常宇宙論

1965年の宇宙背景放射の発見

5.3 インフレーション宇宙モデル

1981年, 佐藤勝彦とグースが独立に提唱

ほぼ確定か? 2014年3月のニュースは誤報だった。

火の玉宇宙論の誕生

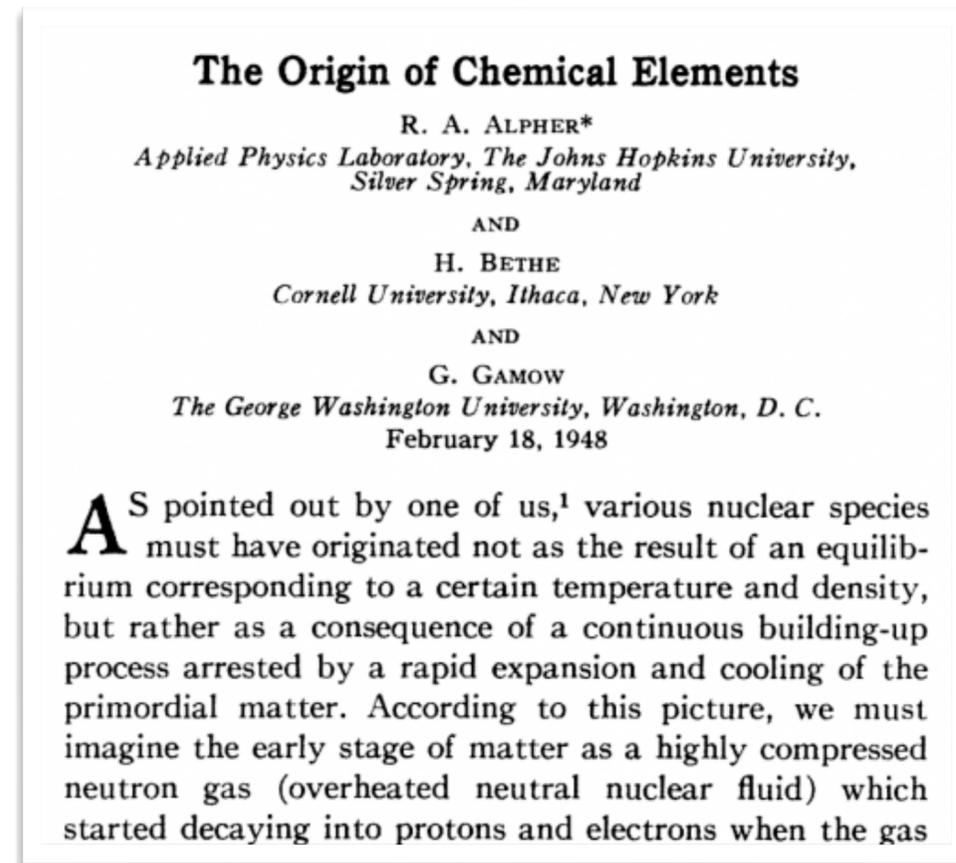


ガモフ

宇宙膨張が本当なら、過去は小さな宇宙だったはず。
宇宙のはじまりは、すべての物質とエネルギーが集まり、
非常に高温で高密度の状態だったことになる。

1946年、ガモフ、「宇宙が高温高密度の火の玉の状態だったときに、短時間で元素が合成されていた」

1948年、 $\alpha\beta\gamma$ 、「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で、すべての~~元素~~が~~つ~~くられる」



Physical Review, 1948/4/1

火の玉宇宙論 vs 定常宇宙論

1948年, $\alpha\beta\gamma$, 「高温高密度の宇宙初期に起こる核反応で, すべての元素がつくられる」

1950年, 林, 「はじめの3分間で軽元素がつくられる」

しかし,

当時の観測データからは, 宇宙年齢は18億年

vs 地球の岩石からは, 地球年齢は30億年

定常宇宙論

「宇宙に始まりも終わりもない」



Fred Hoyle
(1915–2001)

~~火の玉~~宇宙論 vs 定常宇宙論

ビッグバン宇宙論

「宇宙には始まりがあった」

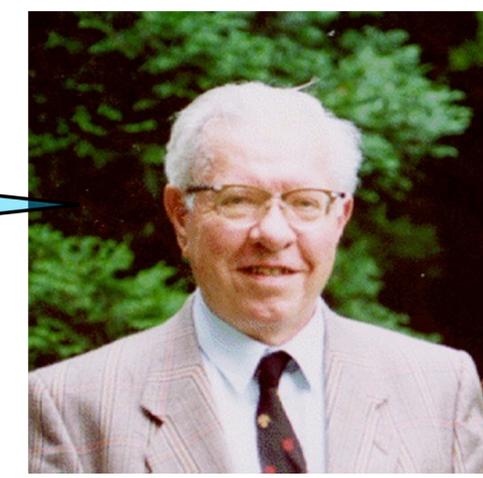
宇宙誕生後、3分で軽元素の合成がされた



ガモフ

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしても新たに物質が生成していれば大丈夫



ホイル

彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)から始まったと言っている

ビッグバン, いい名前だ.
ビッグバン宇宙論, と呼ぶことにしよう

「ビッグバン宇宙」の命名者は誰？

「定常宇宙モデル」のホイル

(「火の玉宇宙論」を揶揄して使った言葉から)

5. 宇宙論 》 5.2 ビッグバン標準宇宙論

教科書 p159

~~火の玉~~宇宙論 vs 定常宇宙論

ビッグバン宇宙論

「宇宙には始まりがあった」

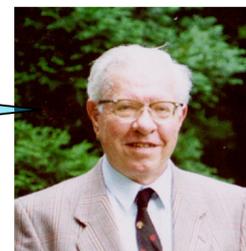
宇宙誕生後、3分で軽元素の合成がされた



ガモフ

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしても新たに物質が生成していれば大丈夫



ホイル

彼らは宇宙が大きな爆発(ビッグバン)から始まったと言っている

ビッグバン、いい名前だ。ビッグバン宇宙論、と呼ぶことにしよう

ビッグ・バンの命名が「宇宙がドッカーンと大爆発した説」というものからきていると知って、少し面白かったです。正直な理由だなと思いました。

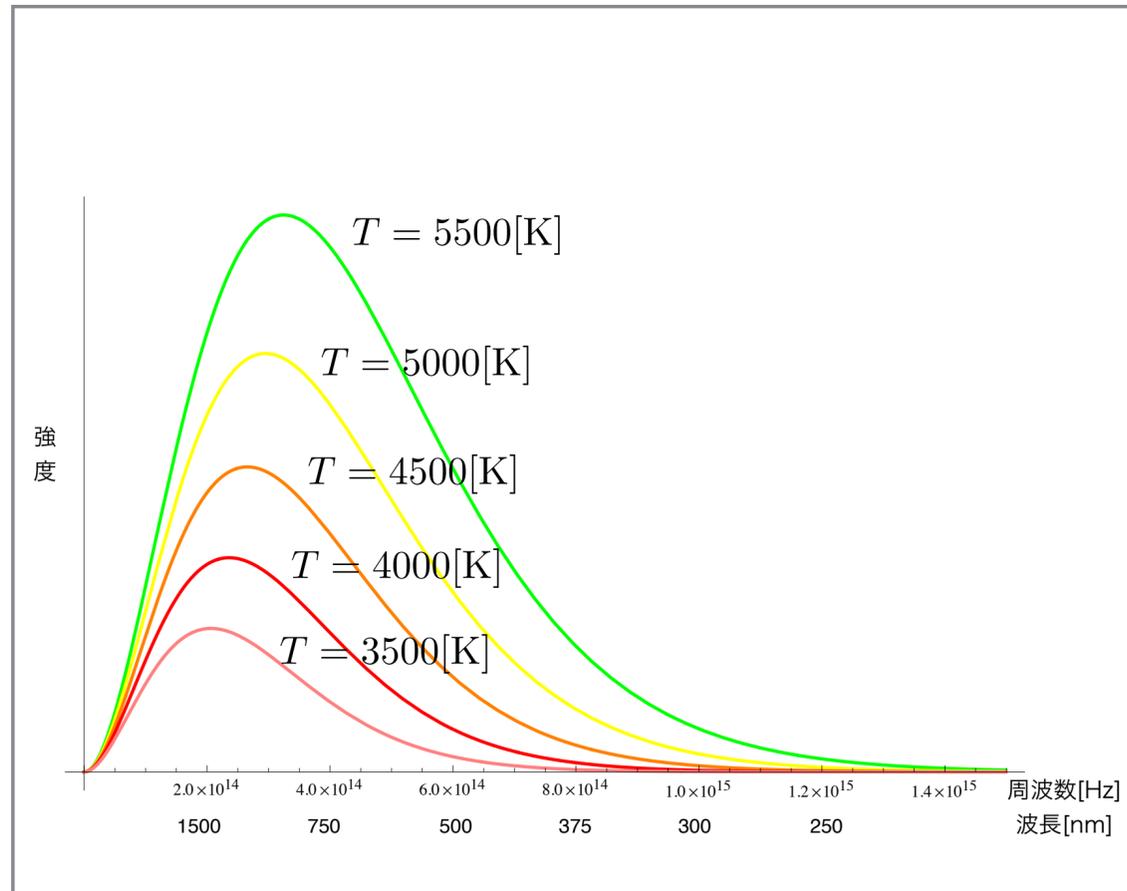
ビッグバン宇宙論 vs 定常宇宙論

表 5.1 ビッグバン宇宙モデルと定常宇宙モデルの比較.

	ビッグバン宇宙モデル	定常宇宙モデル
宇宙膨張	宇宙全体が 1 点からはじまり, 膨張を続けている. 過去は高温高密度の火の玉だったが, 現在は膨張のため, 温度が低下した.	膨張を続けているが, 物質生成がつねに行われているので, 宇宙の物質密度は一定である. 宇宙の姿は, 過去も現在も不変である.
宇宙マイクロ波背景放射	過去の火の玉宇宙の名残りとして 5 K ~ 7 K で存在するはずだ.	存在する必要はない.
元素の存在比	元素合成の理論から, 軽元素 (H, He) の存在比は説明できた. それ以外はまだできていない.	(説明せず)
宇宙年齢	宇宙膨張を観測することによって, 宇宙年齢が決まる.	宇宙は大局的に不変なので, 宇宙年齢を考える必要はない.
宇宙誕生	宇宙はある時刻にはじまった. しかし, そのメカニズムを説明できない.	議論する必要はない.

宇宙マイクロ波背景輻射

Cosmological Microwave Background Radiation (CMB)



黒体放射(黒体輻射)

= 物体は、温度に応じて
熱を電磁波の形で放射する

過去に宇宙が高温だったら、
その証拠の「放射」があるはず

宇宙誕生後、30万年ほど経つと、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(約3000K)が放射されて残っているはず。

宇宙膨張で温度下がって 5~7K (-268°~ -266°)位

宇宙マイクロ波背景輻射の発見

Discovery of CMB



Arno A. Penzias (1933-)
Robert W. Wilson (1936-)

ベル研究所, 電波通信の実験
「どうしても取り除けないノイズがある」
「昼夜によらず, 季節によらず, 方向によらないノイズがある」

1978年, ノーベル物理学賞受賞

宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 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**(約**3000K**)が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって ~~5~7K~~ (-268°~ -266°)位
3.5K

宇宙マイクロ波背景輻射の発見

Discovery of CMB



ガモフがペンジアスと
ウィルソンに宛てた手紙

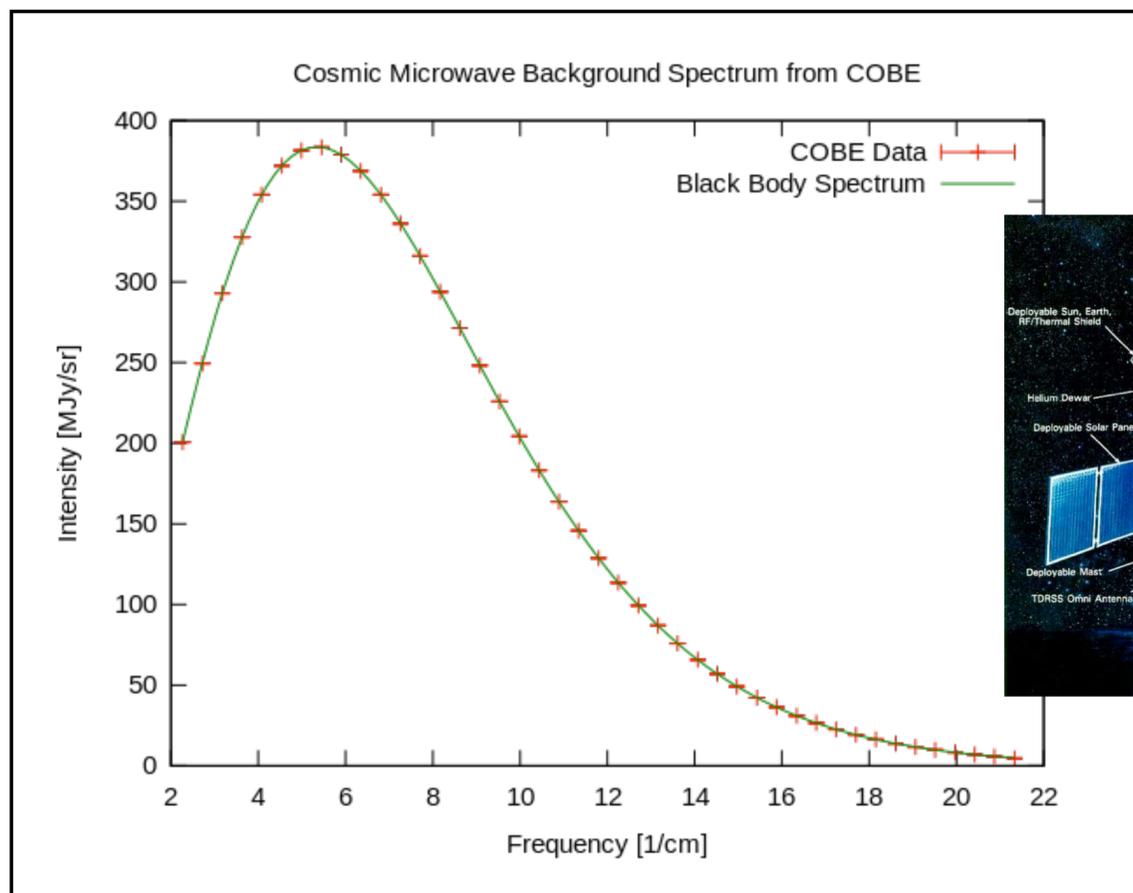
The Sept 29th 1963
Gamow Dacha
785 - 6th Street
Boulder, Colorado

Dear Dr. Penzias,
Send Thank you for sending me your paper on 3°K radiation. It is very nicely written except that "early history" is not "quite complete". The theory of, what is now known as, "primordial fireball" was first developed by me in 1946 (Phys. Rev. 70, 572, 1946 ; 74, 505, 1948 ; Nature 162, 680, 1948). The prediction of the numerical value of the present (residual) temperature could ~~can~~ be found in Alpher & Herman's paper (Phys. Rev. 75, 1093, 1949) who estimate it as 5~~7~~°K, and ~~in~~ in my paper (Kong. Dansk. Ved. Sels. 27 no. 10, 1953) with the estimate of 7°K. Even in my popular book "Creation of Universe" (Viking 1952) you can find (p. 42) the formula $T = 1.5 \cdot 10^{-10} / t^{1/2}$ °K, and the upper limit of 50 °K. Thus, you see the word did not start with mighty Dicke. Sincerely J. Gamow?



COBE衛星によるCMBの測定

Cosmological Background Explorer, 1992



John C. Mather (1946-)
George F. Smoot III (1945-)

2006年, ノーベル物理学賞受賞

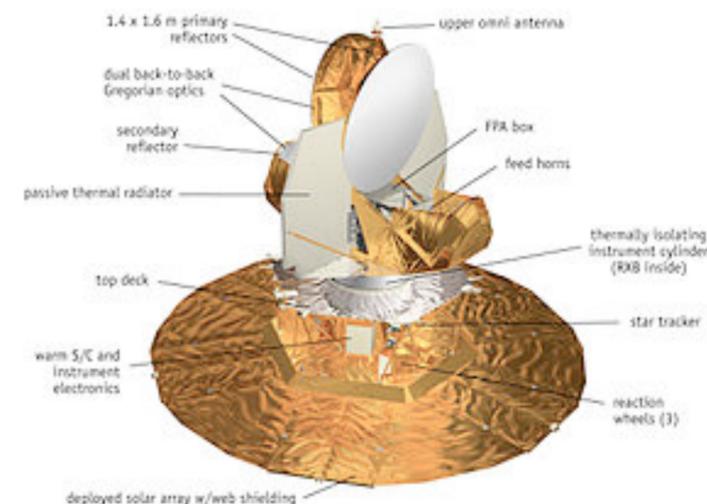
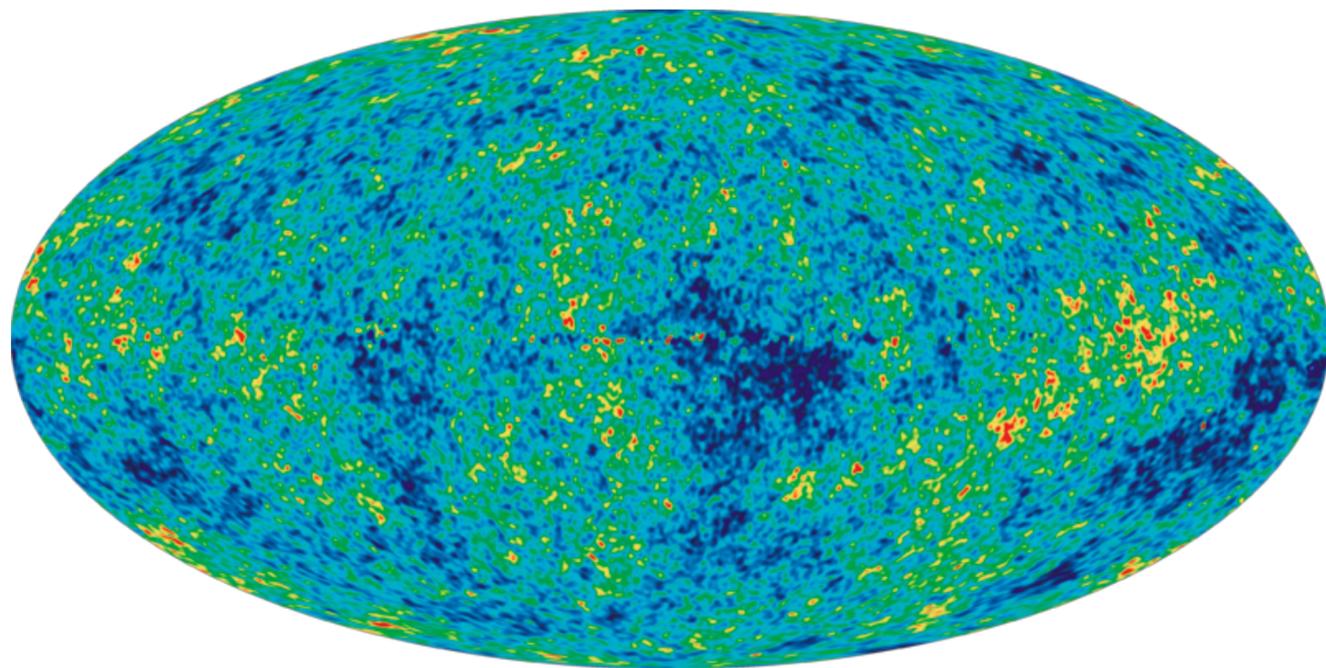
宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. **その時の温度** (約**3000K**) が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって

~~5~7K~~ ~~3.5K~~ **2.73 K**

WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



37万9000年

宇宙の年齢は 137 ± 1 億年, と報告

宇宙誕生後, ~~30~~万年ほど経つと, 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** (約**3000K**) が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって

~~5~7K~~

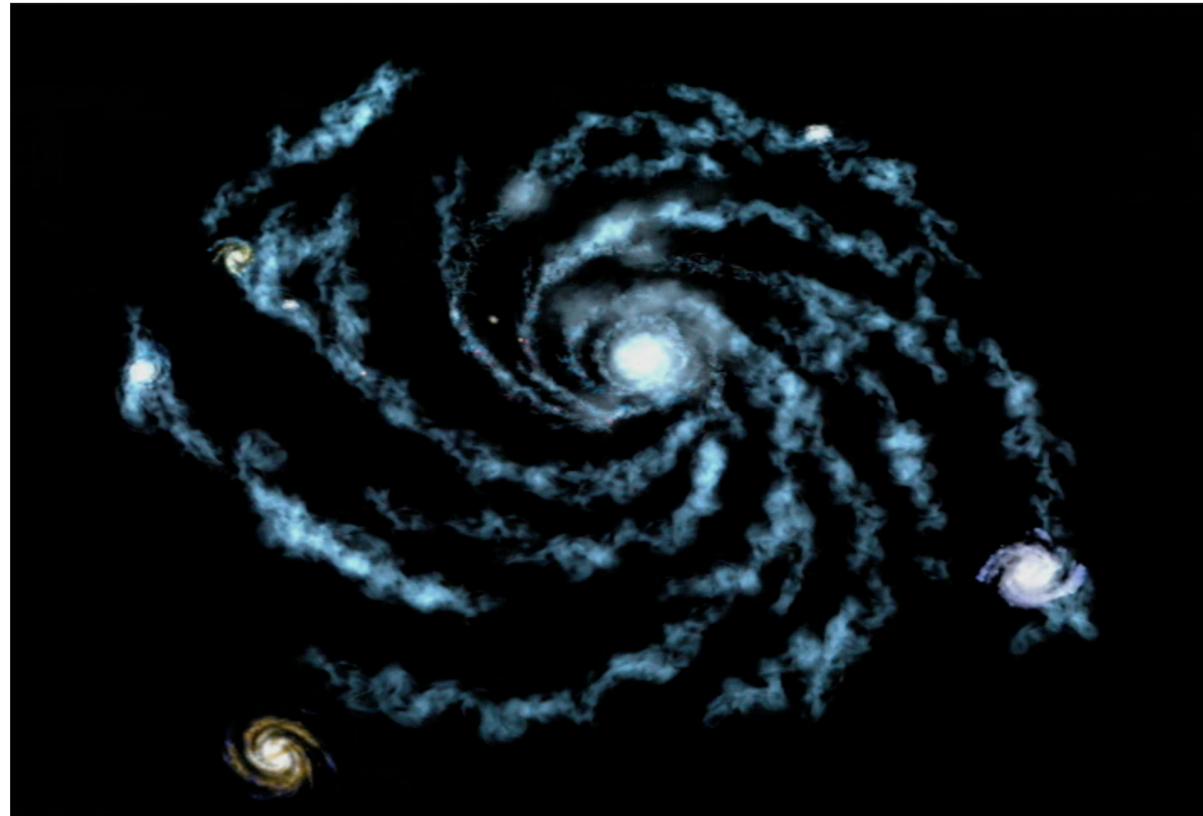
~~3.5K~~

~~2.73 K~~

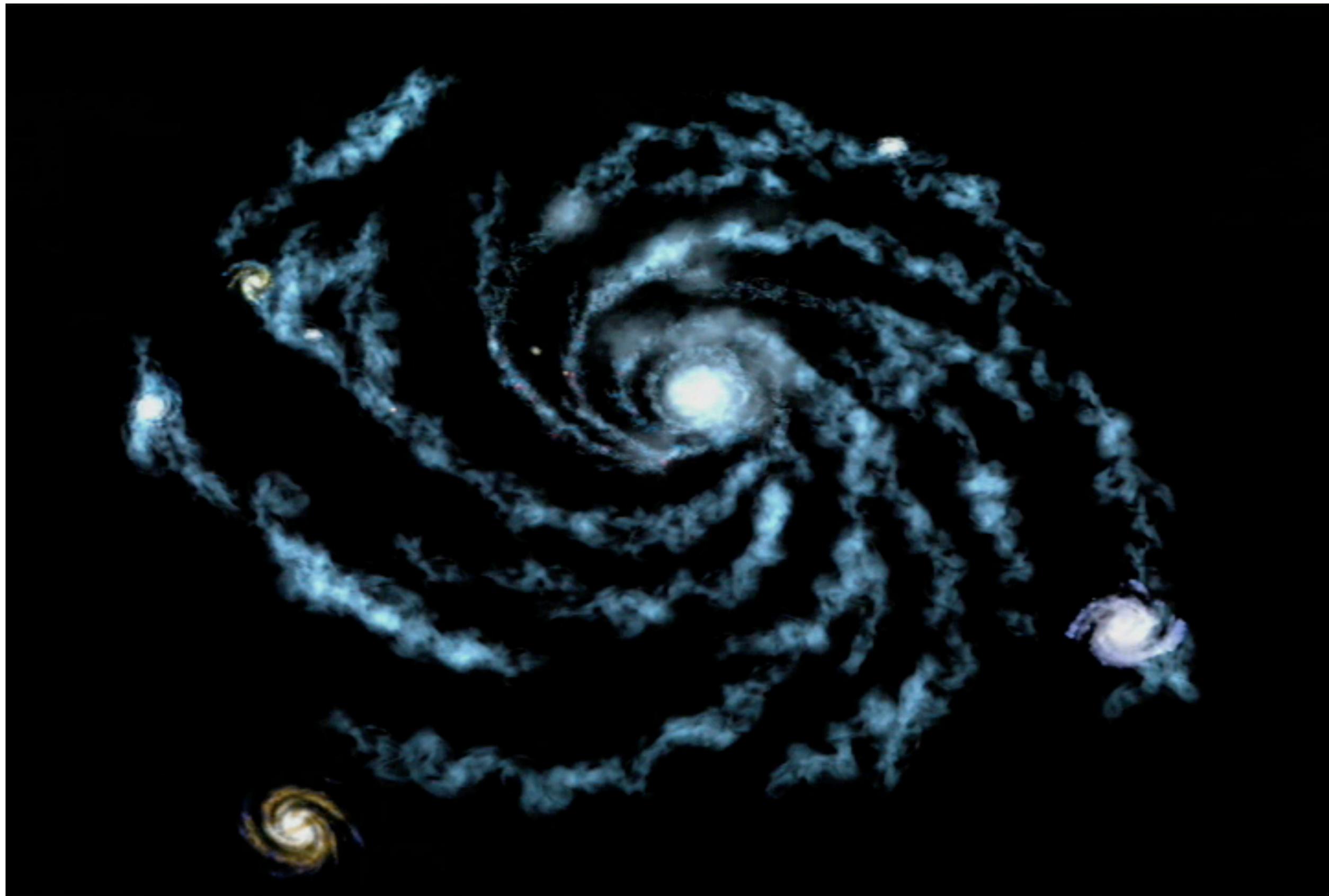
2.725K

WMAP衛星によるCMBの測定

Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, 2002



- The mean temperature of photons in the Universe today is 2.725 K
- WMAP is capable of measuring the temperature *contrast* down to better than **one part in millionth**



小松英一郎氏のviewgraphより

CMBの測定

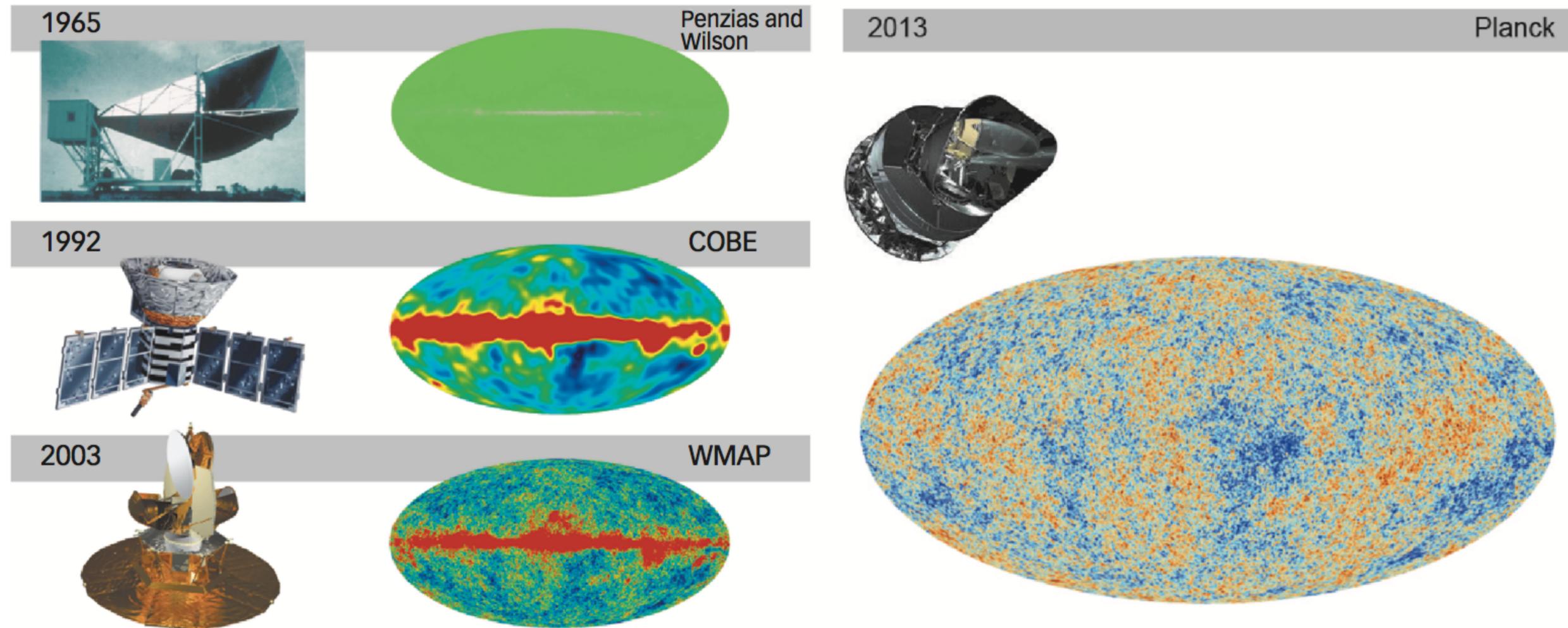
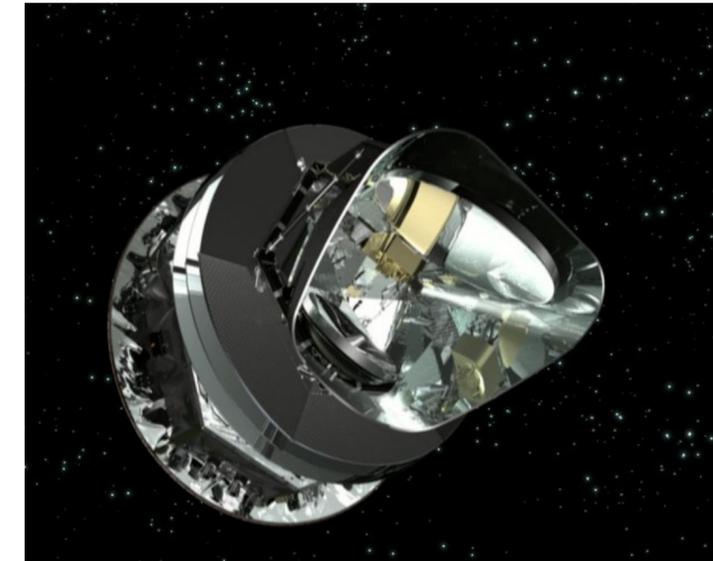
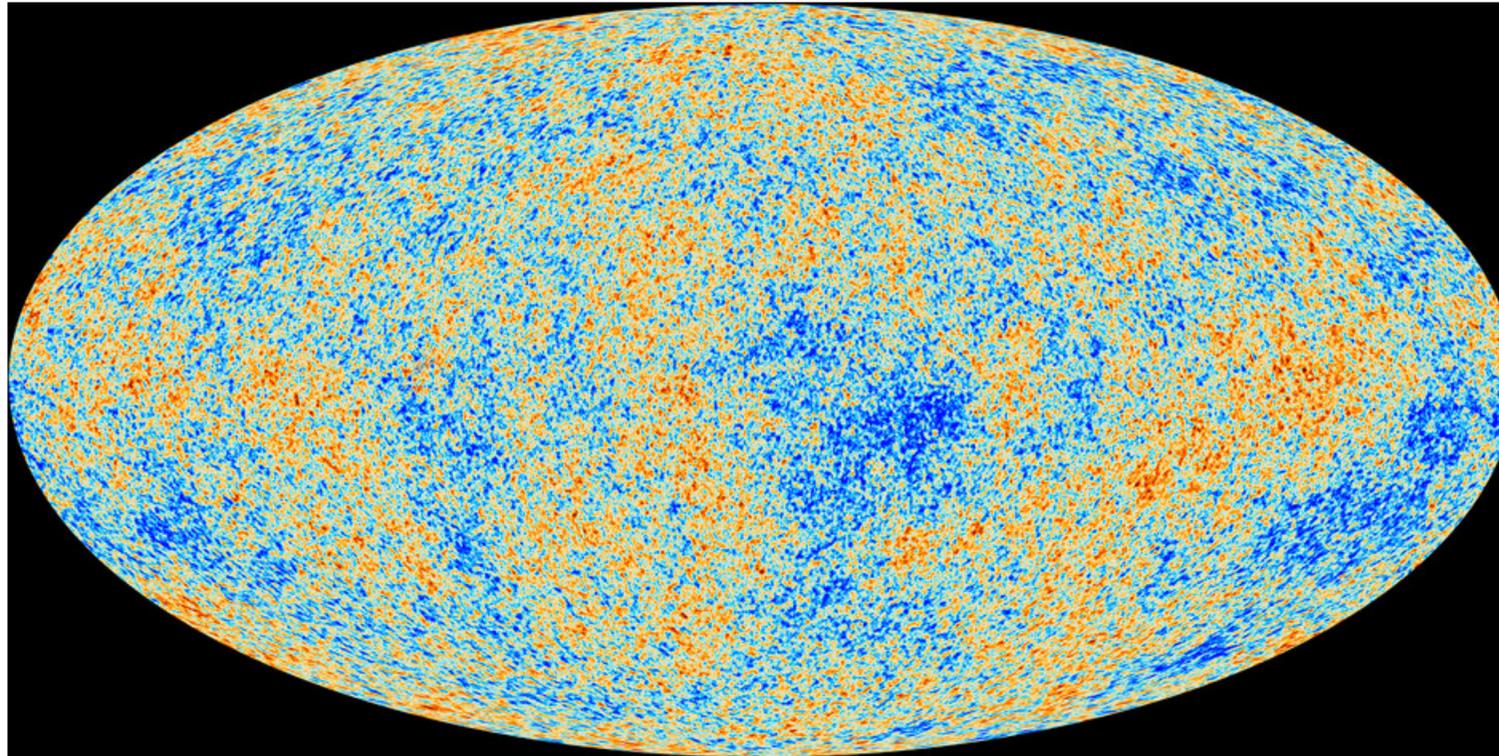


図 5.38 (本文 186 ページ)

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。

Planck衛星によるCMBの測定

Planck, 2013



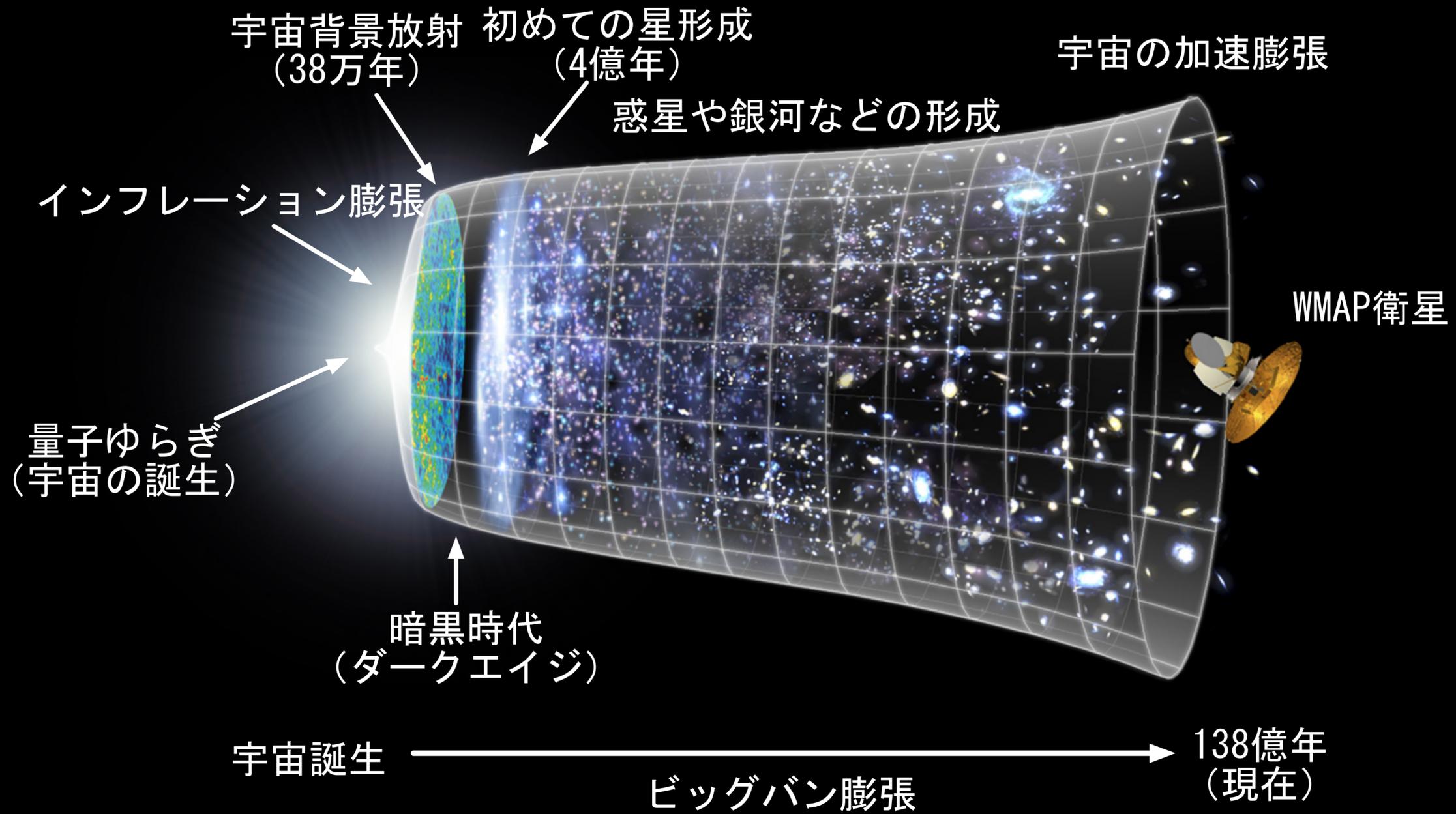
38万年

宇宙の年齢は 138 ± 0.5 億年, と報告

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** (約**3000K**) が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって ~~2.725~~K (-270°)位

2.72548 ± 0.00057 K



標準ビッグバンモデル: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。

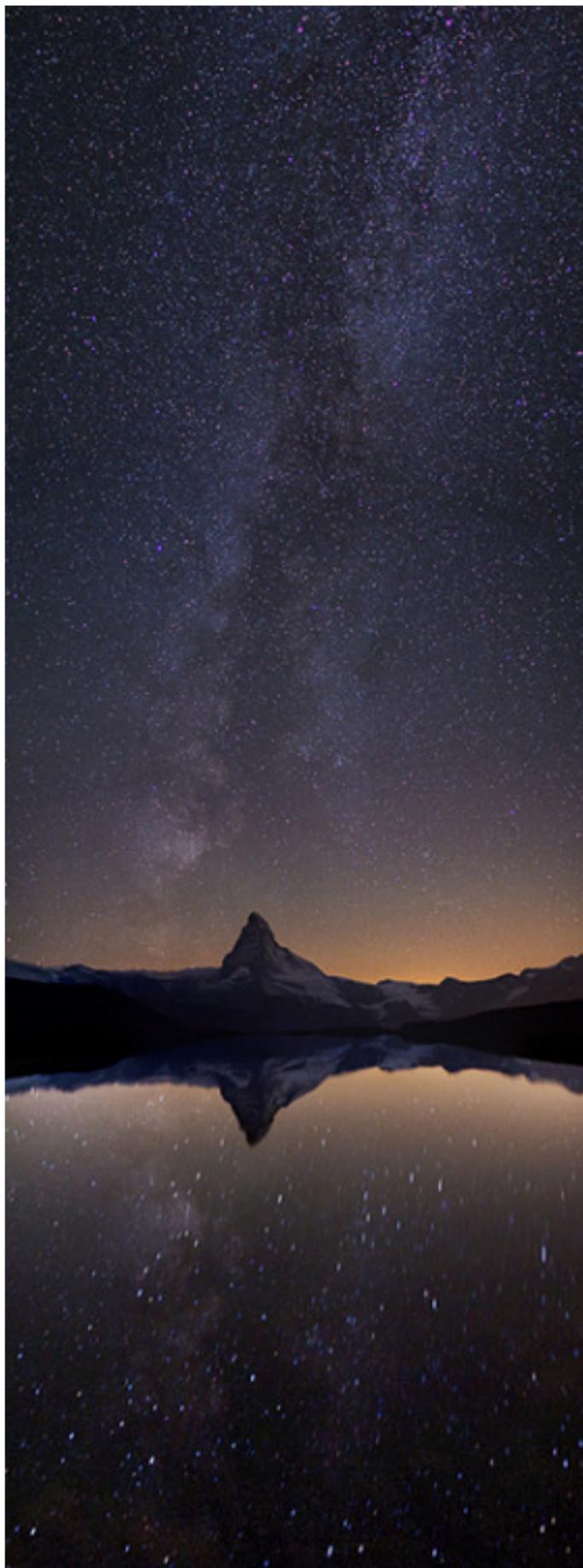
(2) 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の発見 (1964)

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



宇宙はどうやってはじまったのか.

宇宙に終わりはあるのか.

宇宙は何でできているのか.

宇宙の法則は何か.

宇宙にどうして我々がいるのか.

ダークマター問題

未知の物質？

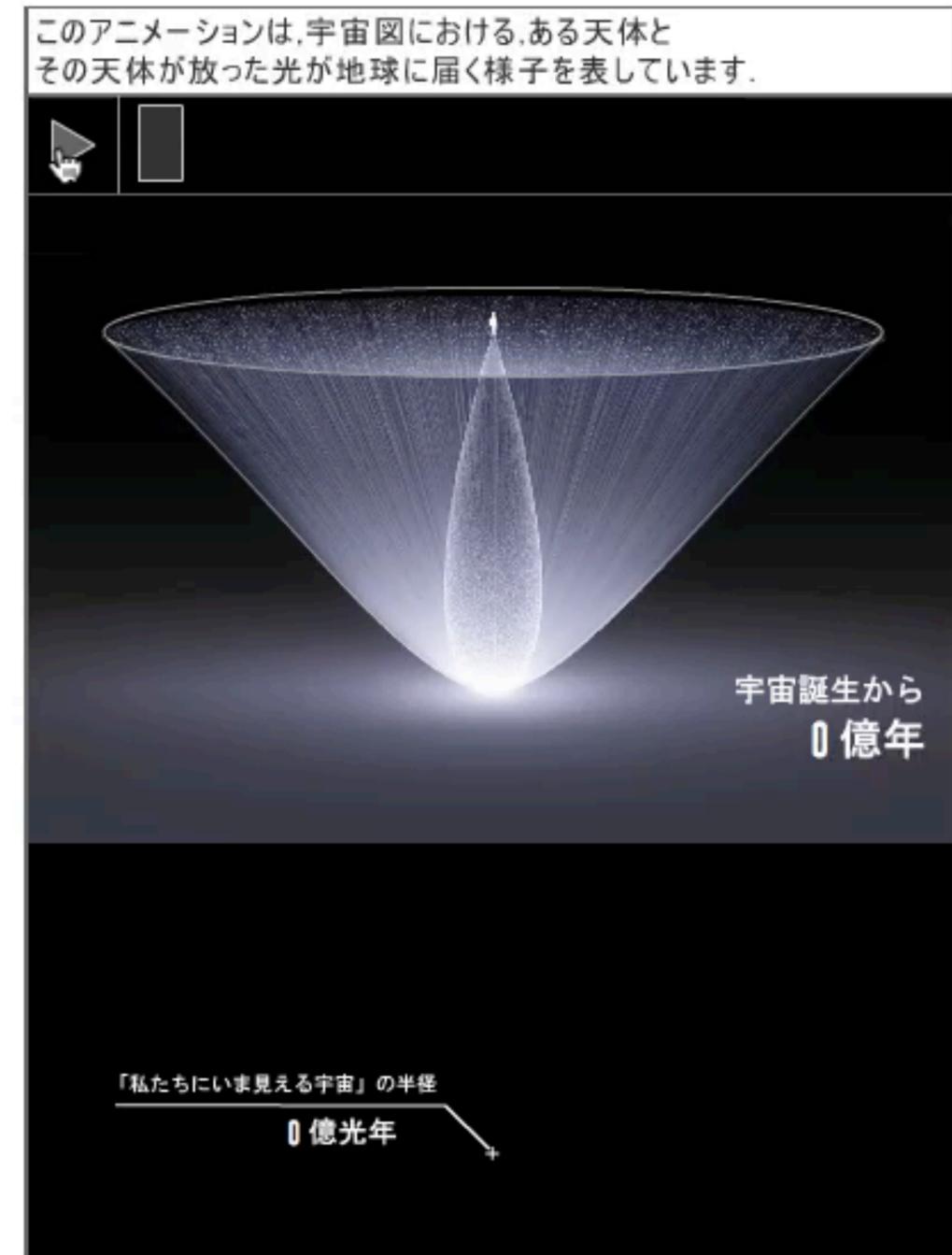
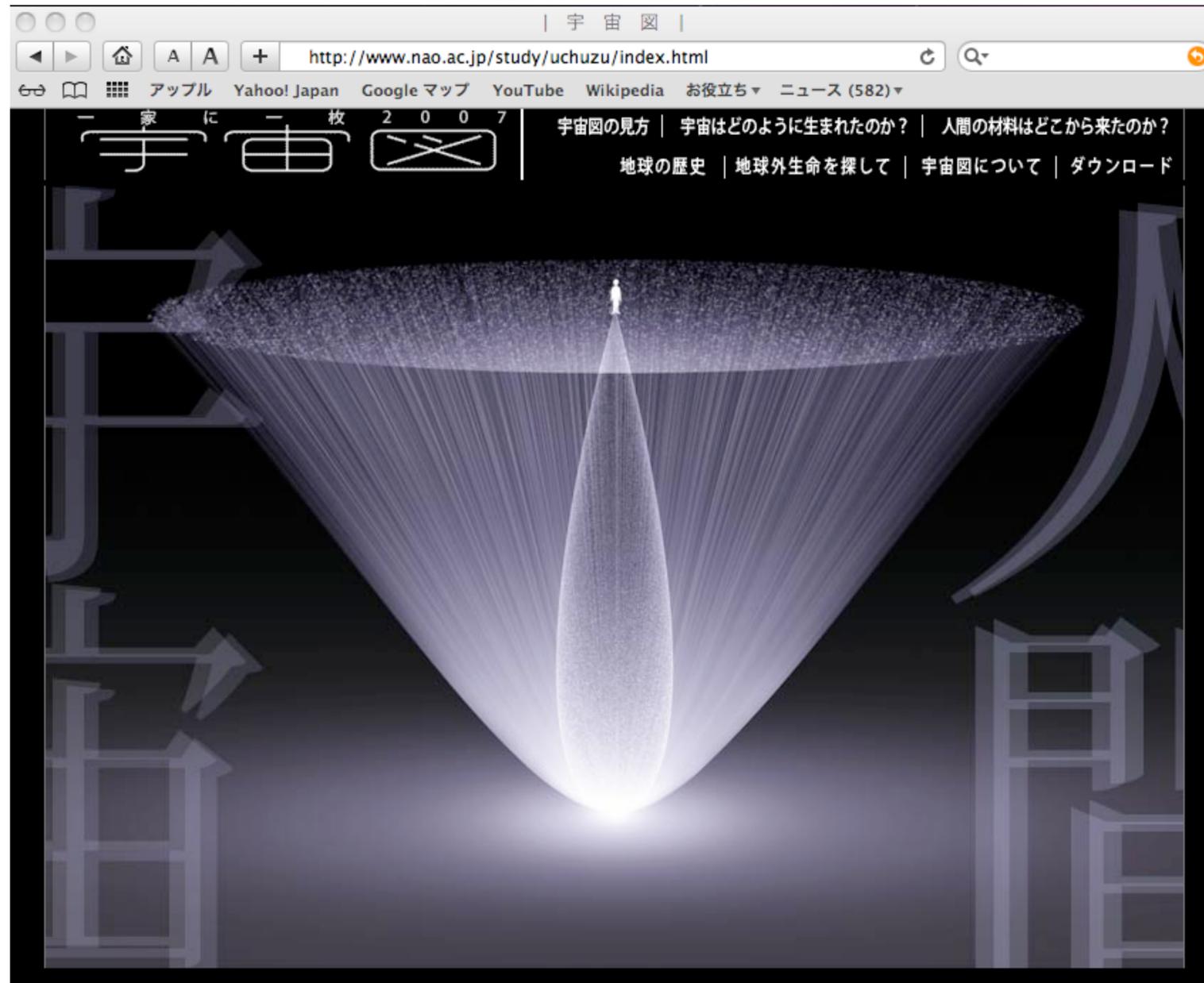
ダークエネルギー問題

加速膨張の原因？

ダークエイジ問題

初代の星はどうやってできた？

「一家に一枚 宇宙図」の見方



宇宙図

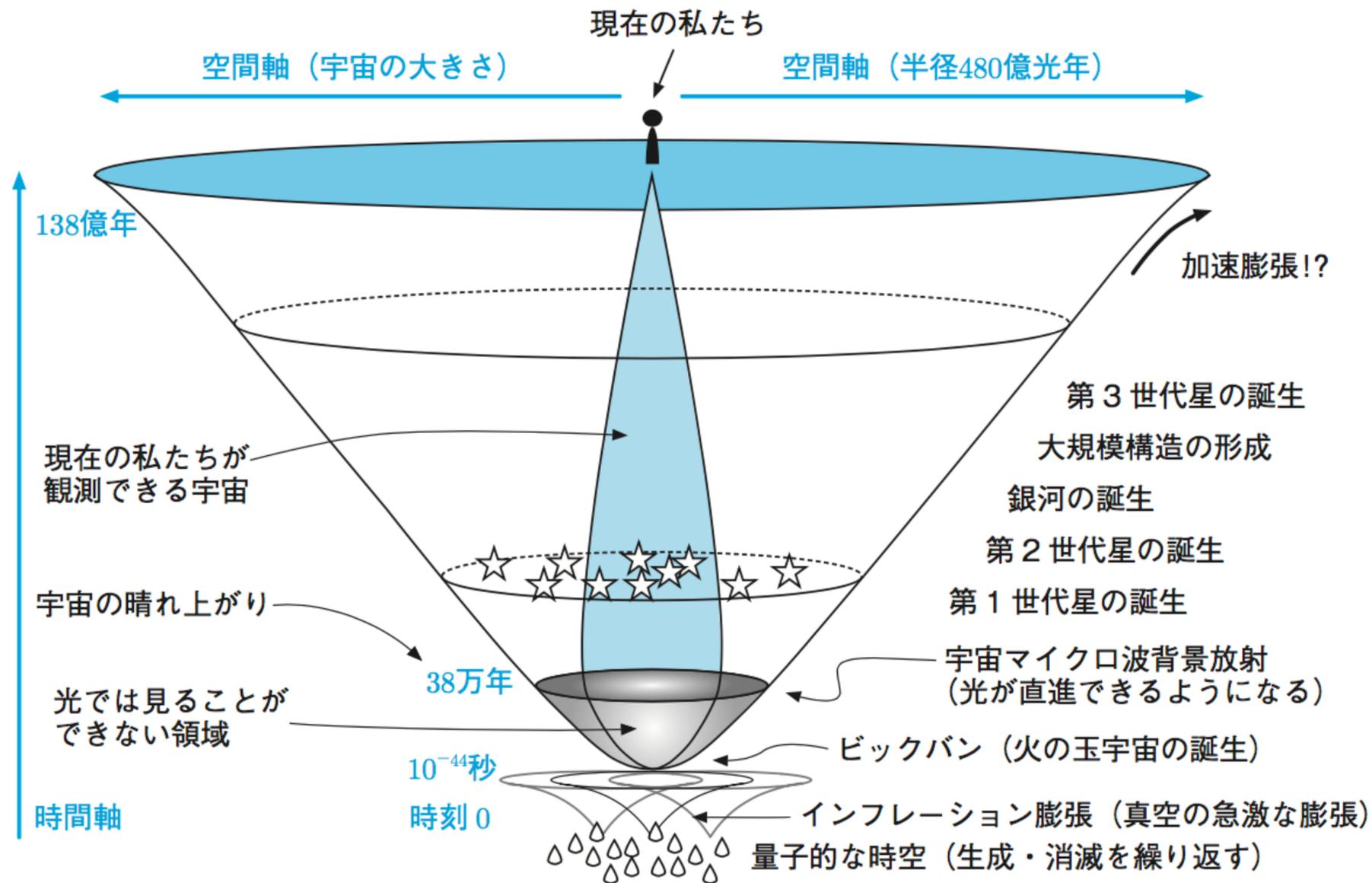


図 5.18 ビッグバン宇宙モデルの概略図。時間の進み方を上向き、空間の広がりをも横軸にして示す。現在の私たちは図の上の中央部分にいる。宇宙誕生直後にはインフレーションと呼ばれる急膨張を起こす。インフレーション後に高温高密度の火の玉宇宙が出現する。38万年後に光が直進できるようになる。電磁波では、この時点以降の観測が可能になる。最近では、宇宙は加速膨張をしていることが明らかになった。宇宙が広がる様子が示されているが、実際に私たちが見られる宇宙は、中央の涙のしずくの部分に限られる。

宇宙の大きさ

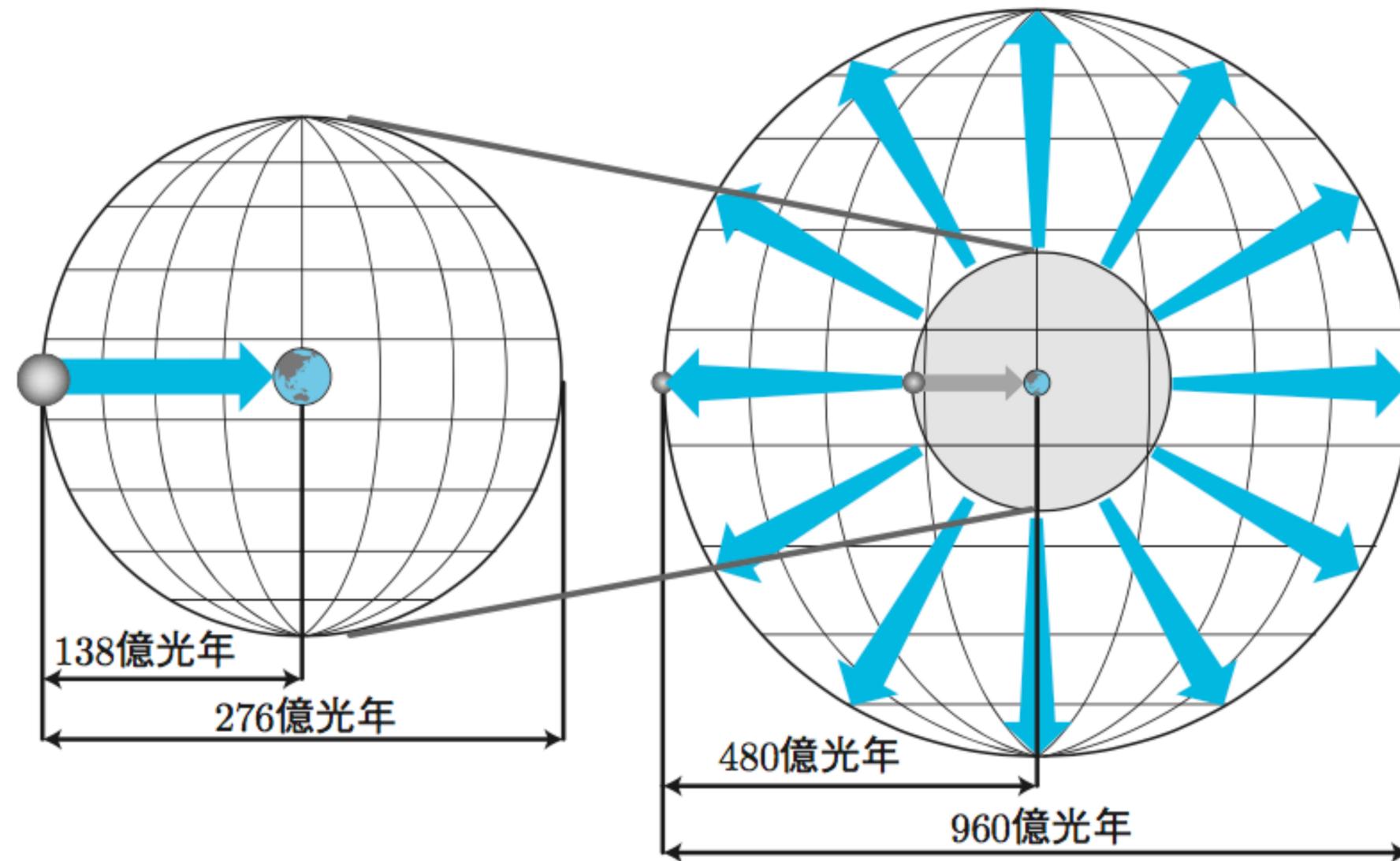


図 5.19 〔左〕宇宙誕生直後から進む光を見て、私たちは宇宙の年齢を 138 億年と理解する。〔右〕しかし、宇宙は膨張しているため、現時点での宇宙の大きさは半径 480 億年になる。

第5章 宇宙論

5.1 宇宙が膨張しているとわかるまで

一般相対性理論による膨張宇宙の予言

1929年 ハッブル・ルメートルの宇宙膨張の発見

5.2 ビッグバン宇宙論

火の玉宇宙論と定常宇宙論

1965年の宇宙背景放射の発見

5.3 インフレーション宇宙モデル

1981年, 佐藤勝彦とグースが独立に提唱

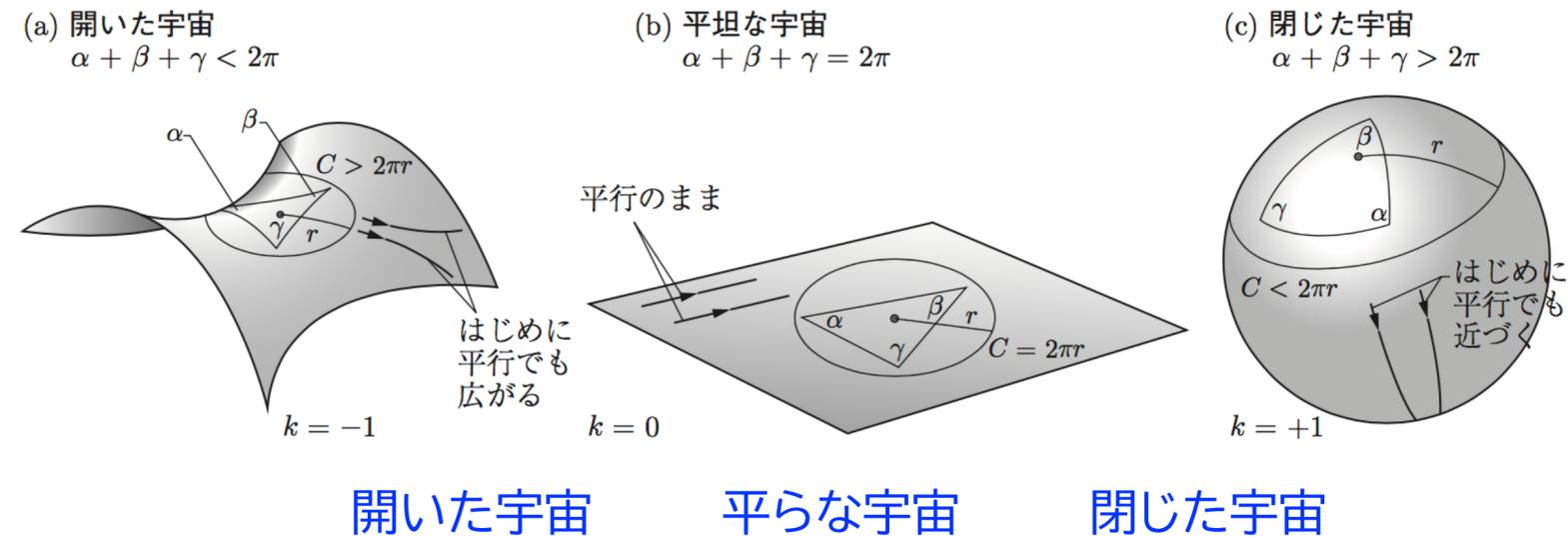
ほぼ確定か? 2014年3月のニュースは誤報だった。

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.

宇宙原理 (cosmological principle)

➡ 球対称時空として, 3つのタイプが許される



➡ アインシュタイン方程式を解くと, 大きさが時間と共に変化する時空の解(フリードマン解)が出てくる

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a^2(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2) \right]$$

Friedmann, Robertson, Walker, Lemaitre (1920s)

完全流体, 一様等方時空 (球対称) でのEinstein方程式の厳密解

インフレーション宇宙モデル (1981年)

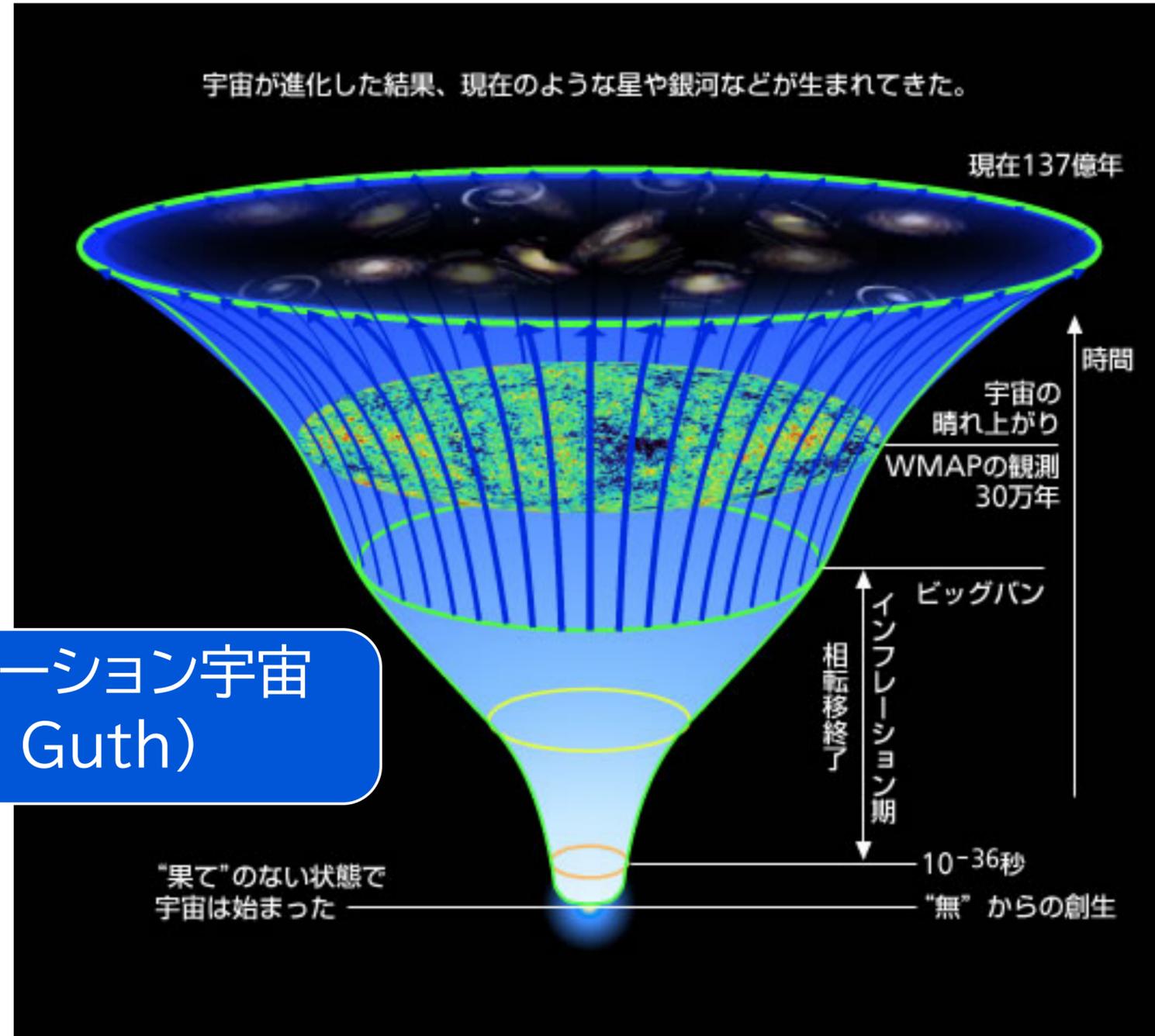
宇宙の初期に急激な膨張があった, と考える



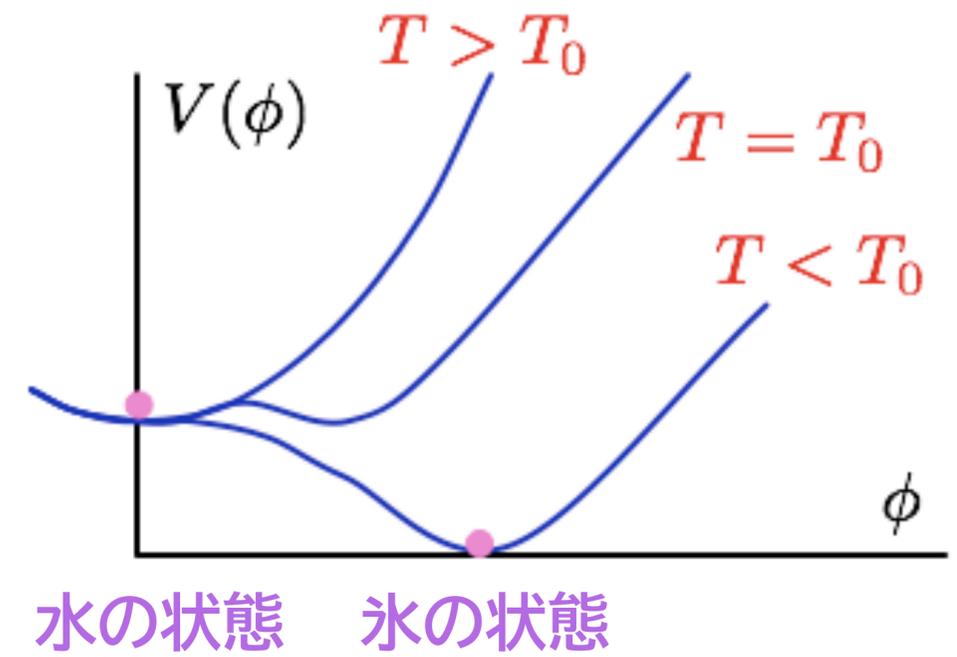
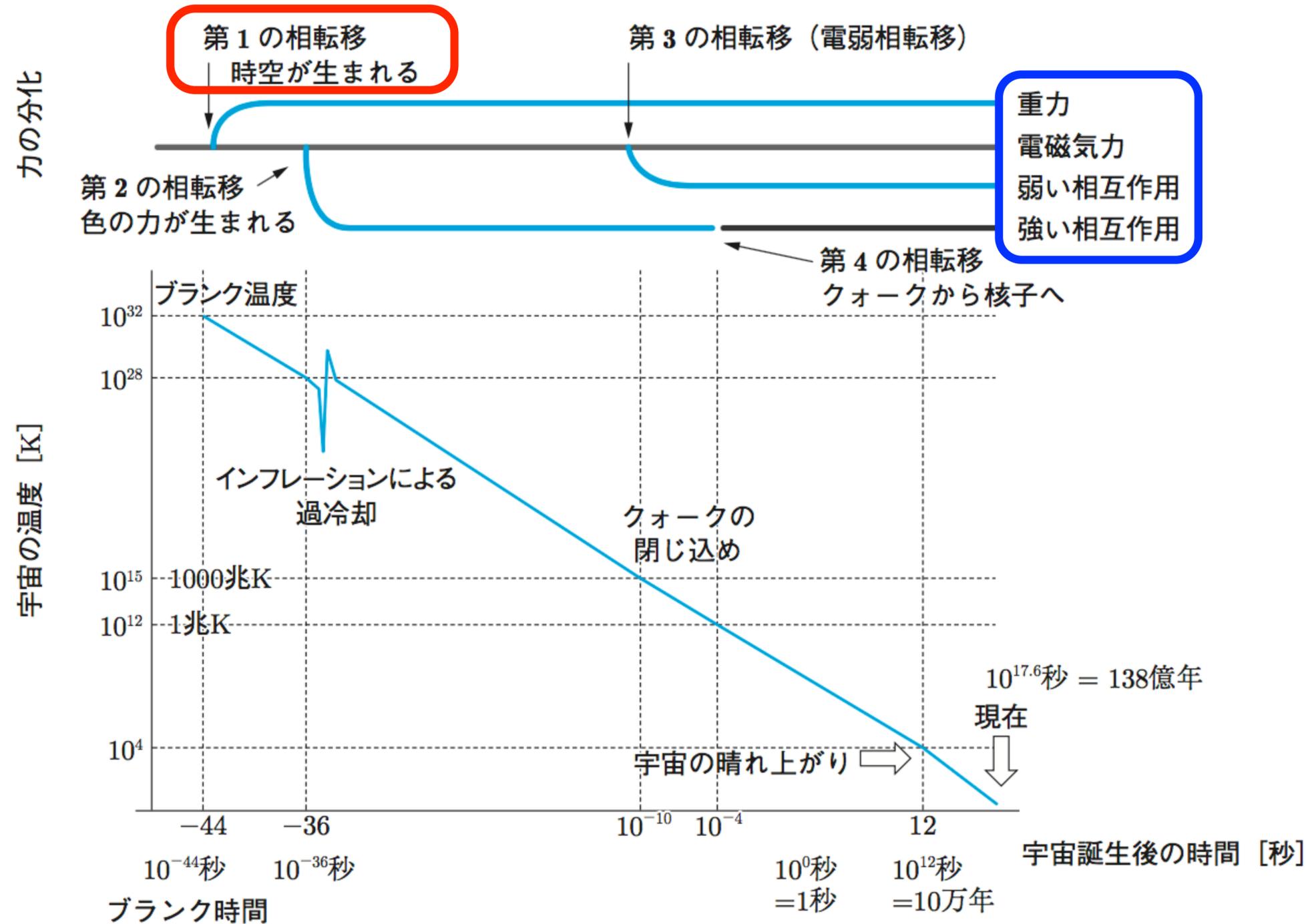
初期の宇宙は
指数関数的膨張
(佐藤勝彦)



インフレーション宇宙
(A. Guth)



宇宙初期の力の相転移

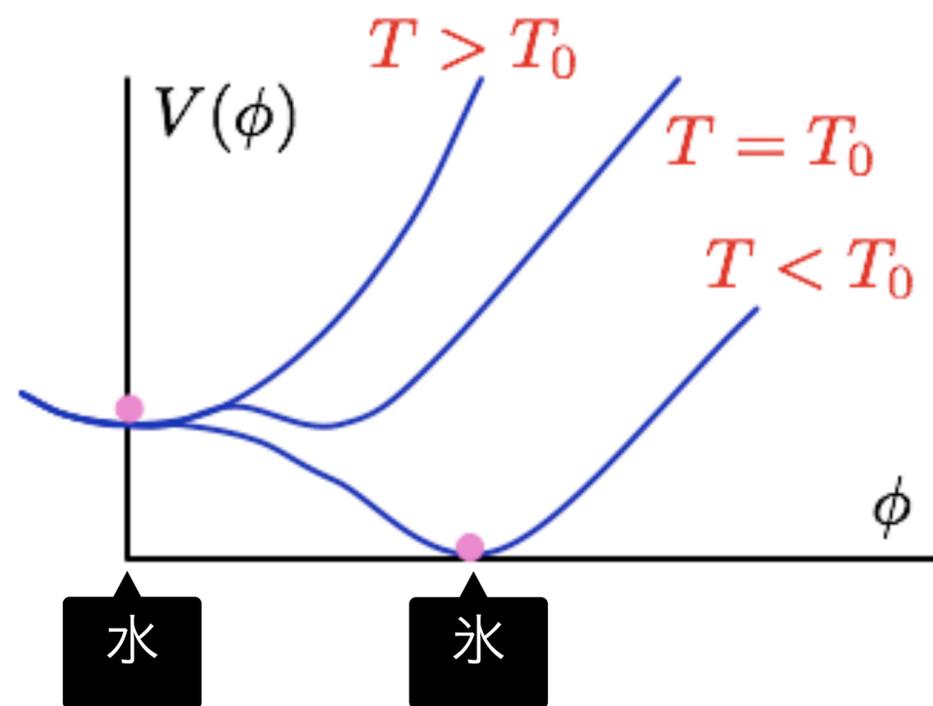


相転移
= 物質の状態が変化すること
例) 温度が下がると, 水→氷

相転移現象

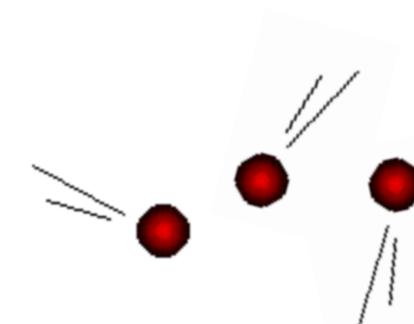
固体から液体へ = **相転移現象**

phase transition

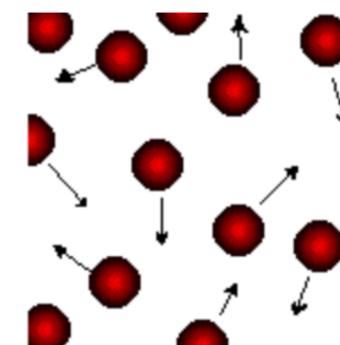


横軸 ϕ は, 状態を表す変数
縦軸 $V(\phi)$ は, エネルギー.
(下へ行くほど安定な坂道)

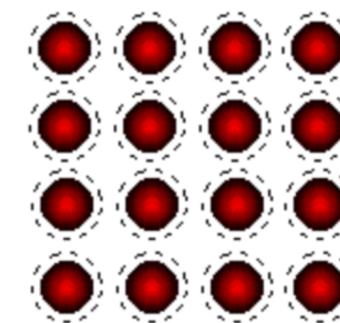
気体 (気相)



液体 (液相)



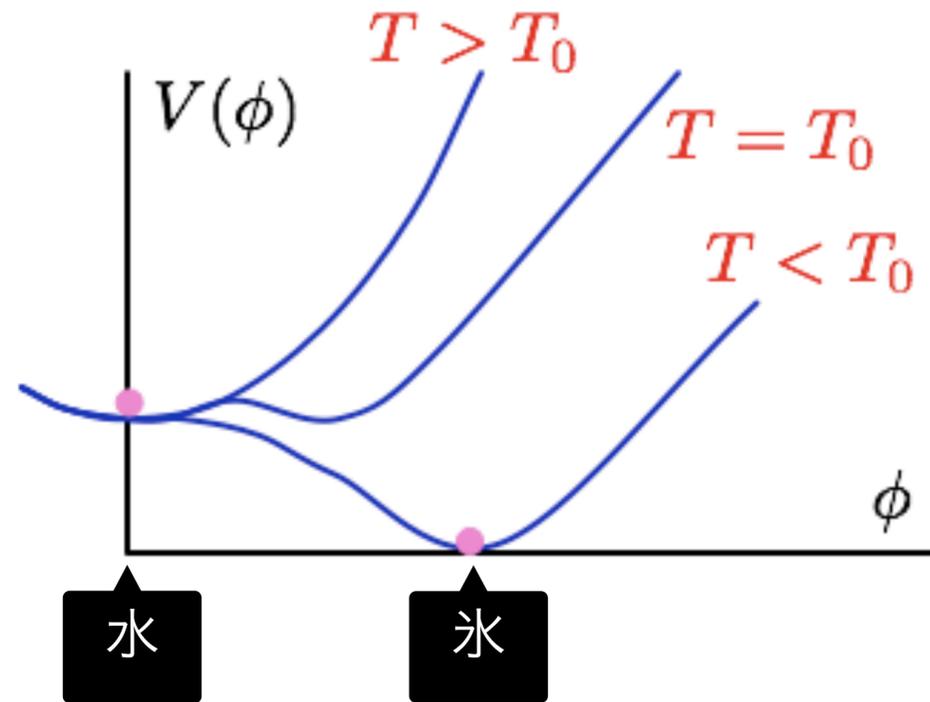
固体 (固体相)



相転移は同時に一様に生じるわけではない

冷蔵庫にい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)



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

樹氷の写真

2021/11/13 大普賢岳 (1787m)

前日の雪が霧氷となって木に残っていました。
昼過ぎにはなくなっていました。

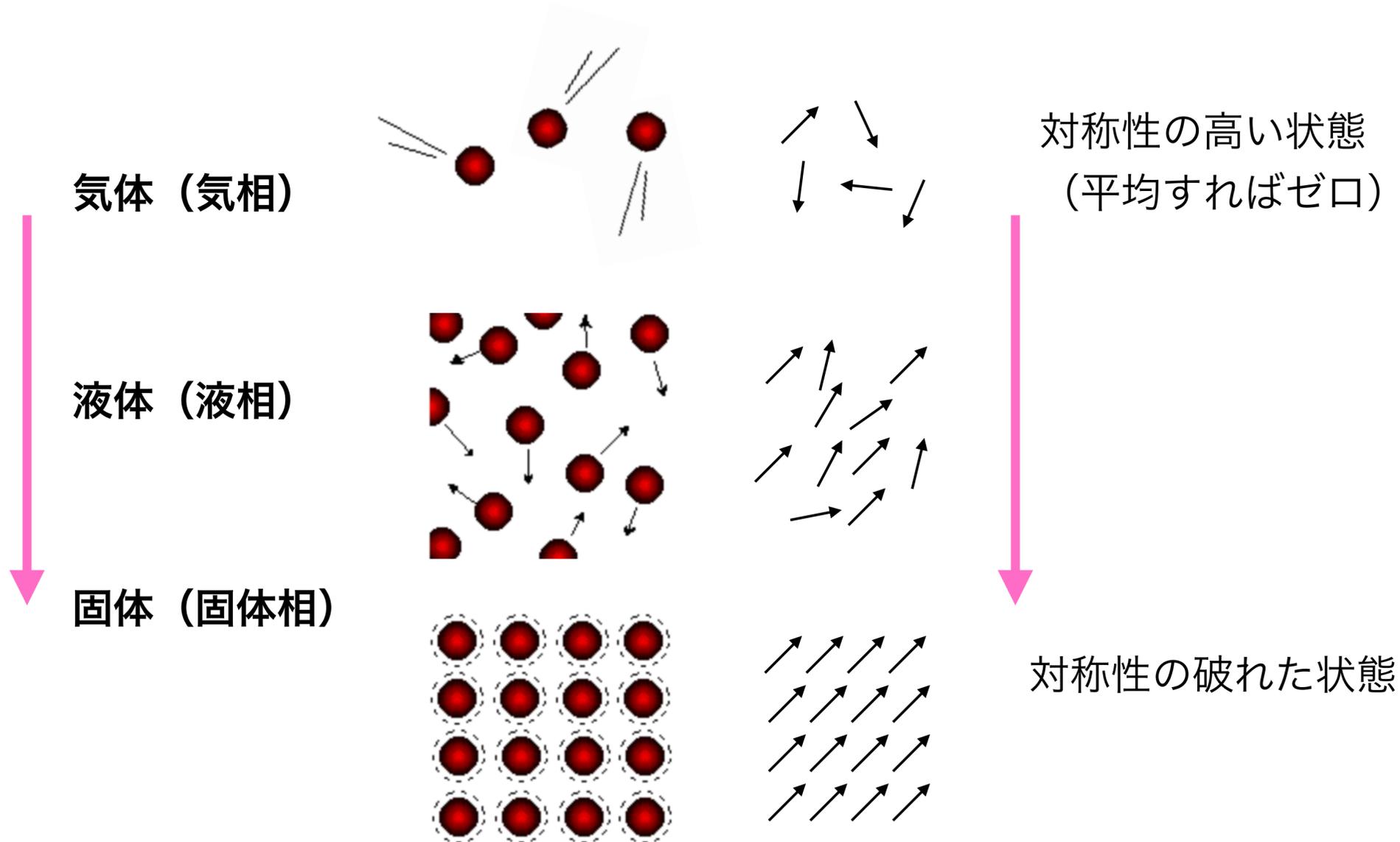
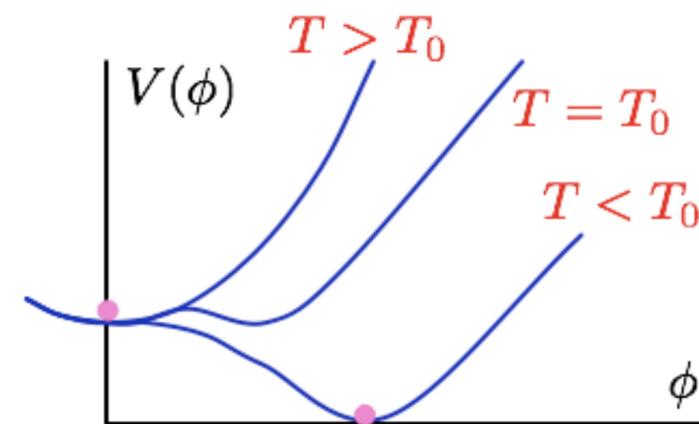


自発的対称性の破れ

Spontaneous symmetry breaking



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*





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*

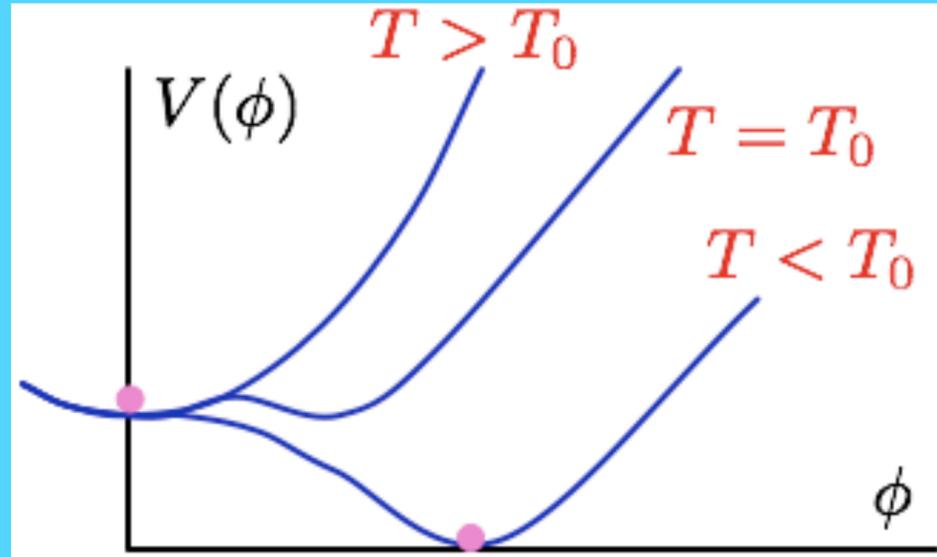
小林誠

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

"for the discovery of the origin of the broken symmetry which predicts the existence of at least three families of quarks in nature".

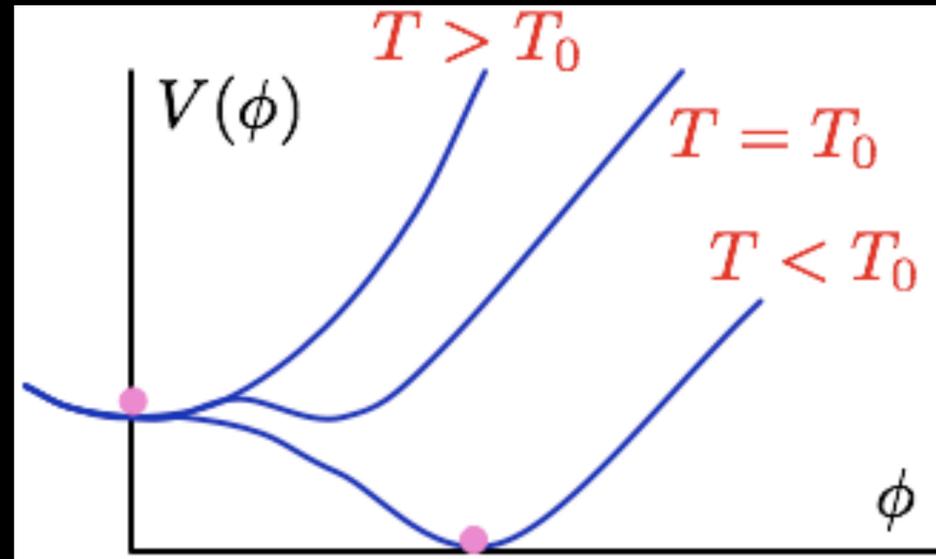
インフレーション宇宙モデル



偽真空 **真の真空**

インフレーション膨張

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

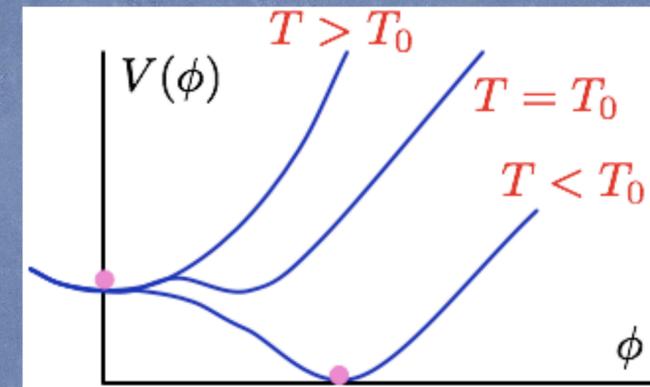
$$S = \int d^4x [L_{\text{gravity}} + L_{\text{matter}}]$$

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

(original model)

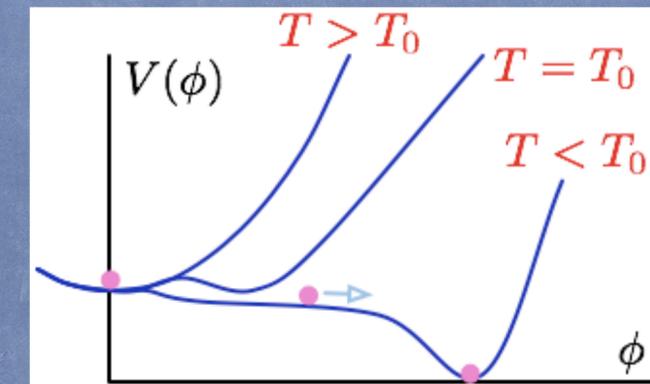
old inflation

Guth 81, Sato 81



new inflation

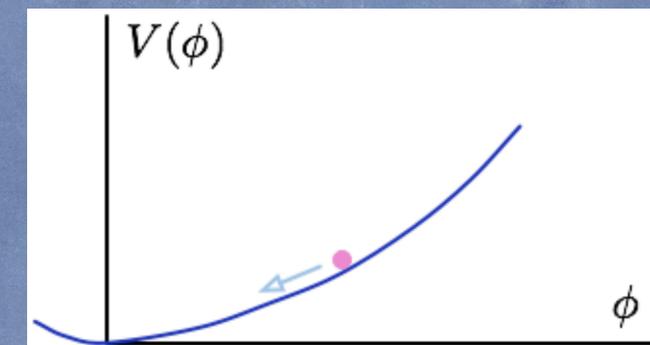
Linde 82



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」

インフレーション宇宙モデル (1981年)

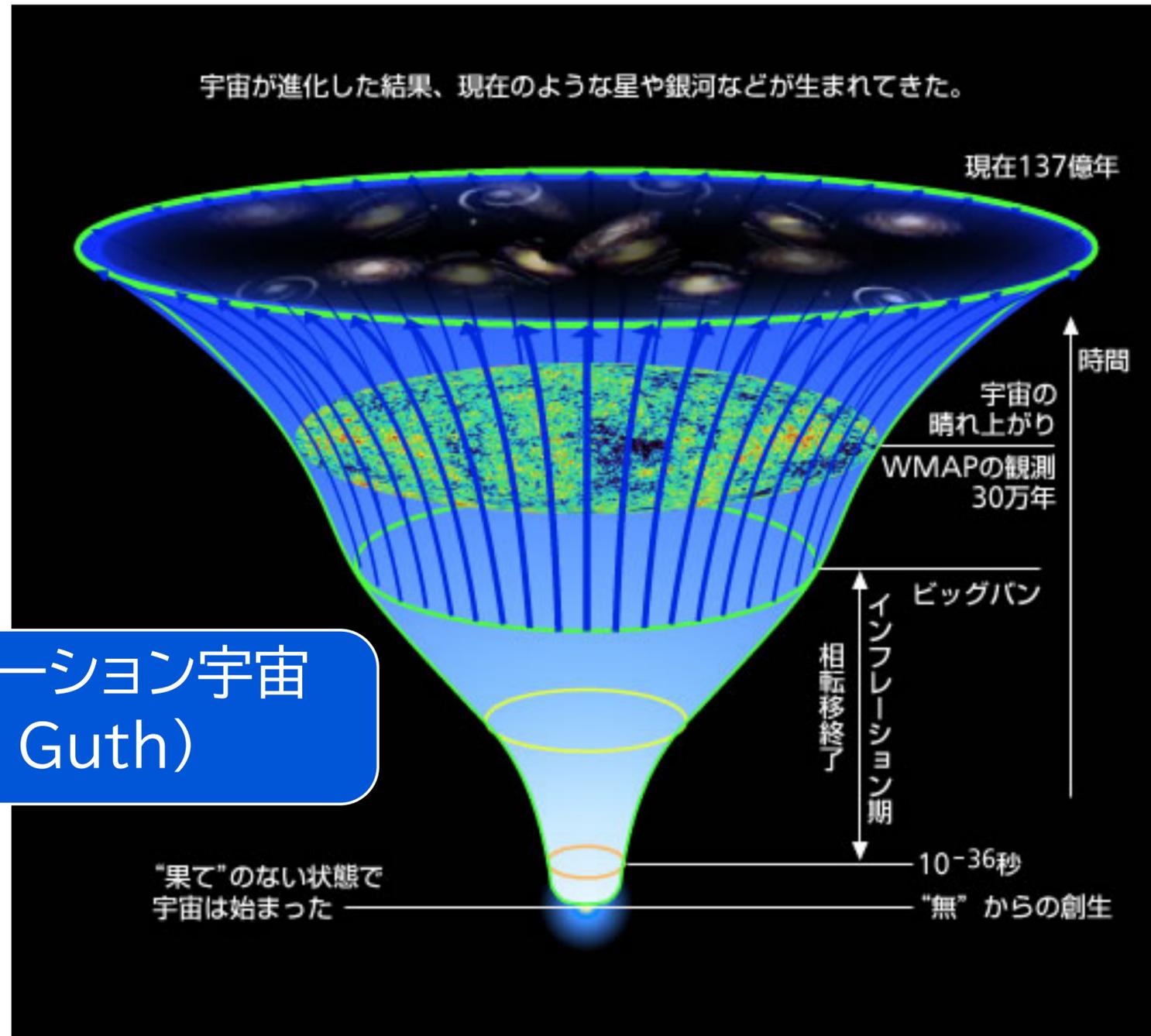
宇宙の初期に急激な膨張があった, と考える



初期の宇宙は
指数関数的膨張
(佐藤勝彦)

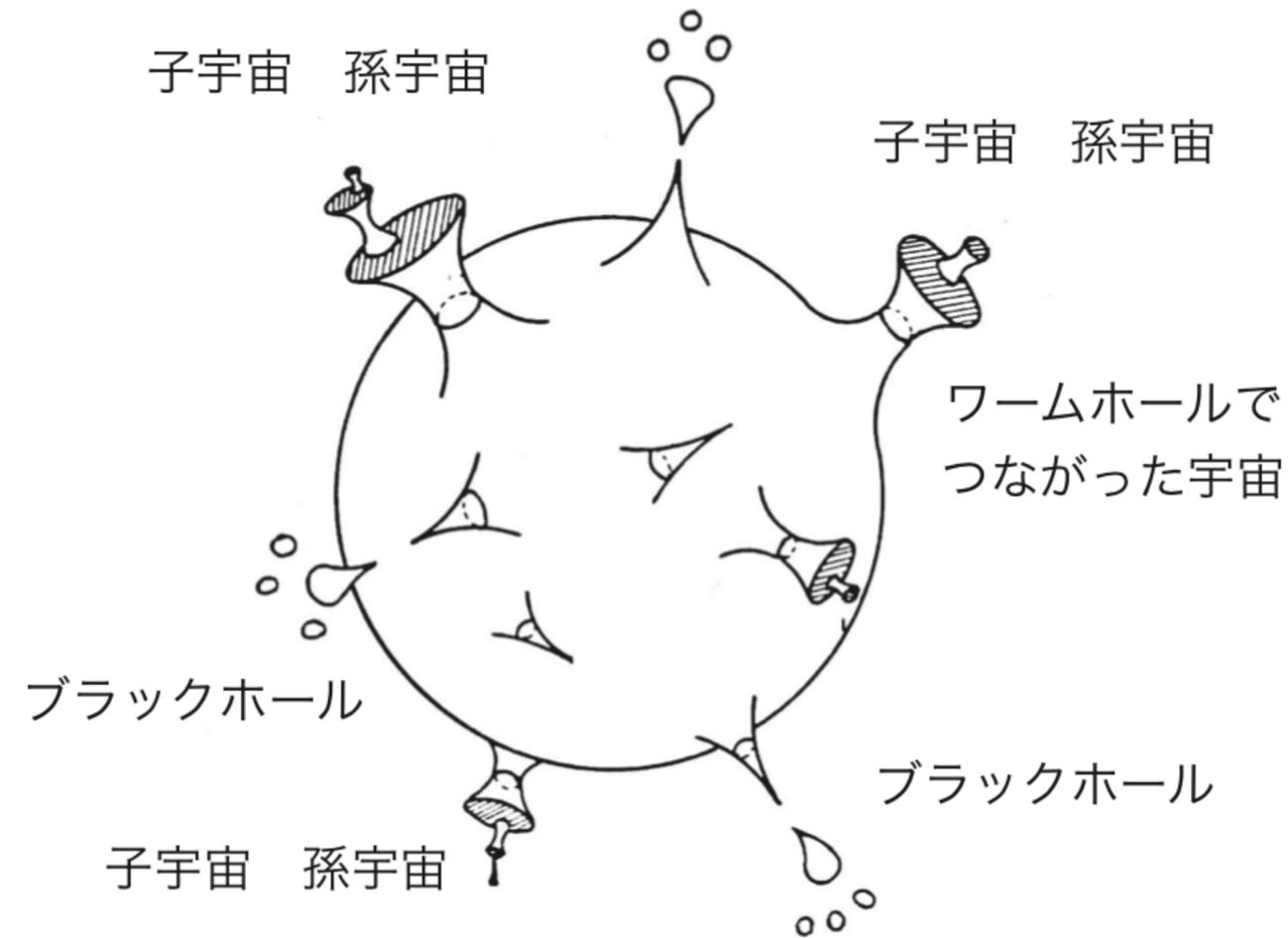


インフレーション宇宙
(A. Guth)



インフレーション宇宙モデル

宇宙は我々の宇宙だけではなかった



~~u~~niverse
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.

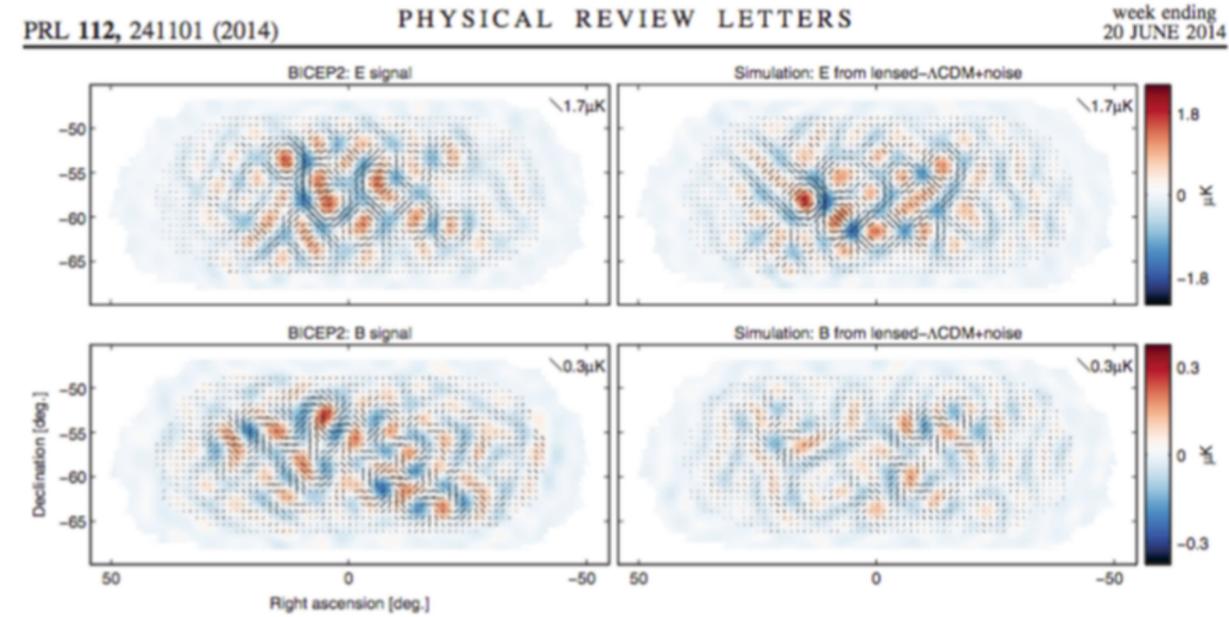


FIG. 3 (color). Left: BICEP2 apodized E -mode and B -mode maps filtered to $50 < \ell < 120$. Right: The equivalent maps for the first of the lensed- Λ CDM + noise simulations. The color scale displays the E -mode scalar and B -mode pseudoscalar patterns while the lines display the equivalent magnitude 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, 宇宙背景輻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。

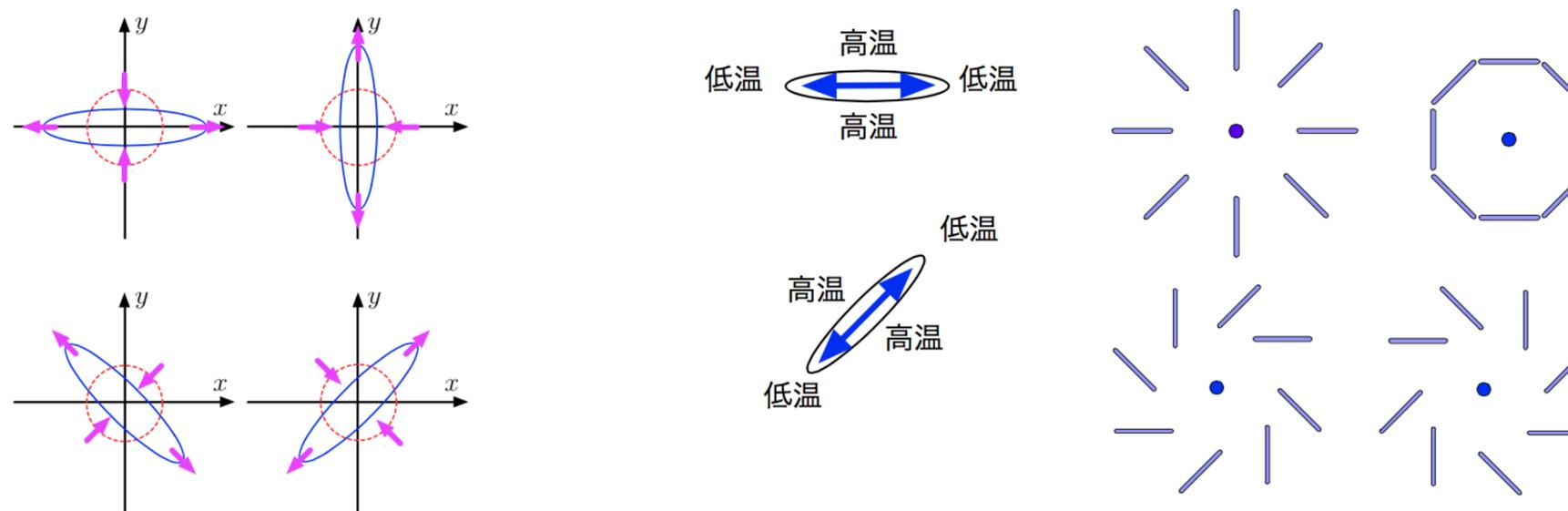
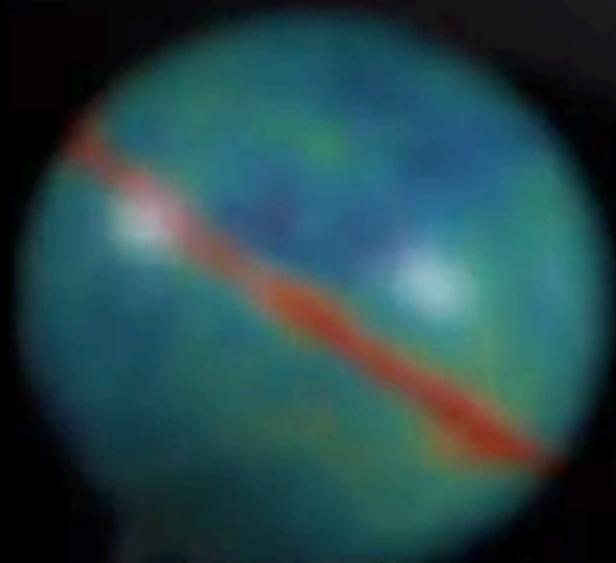


図 5.14: 〔左〕重力波の振動モード。紙面に垂直に波が進んでいるときに、空間を歪ませる方向が2つ存在する。〔中〕空間に温度ゆらぎがあれば、時空の振動方向もゆがむ。〔右〕宇宙背景放射の観測結果に予想される『Eモード』（上）と『Bモード』（下）。

宇宙最前線
～137億年の謎～
宇宙科学の現在



大学共同利用機関法人
自然科学研究機構 機構長

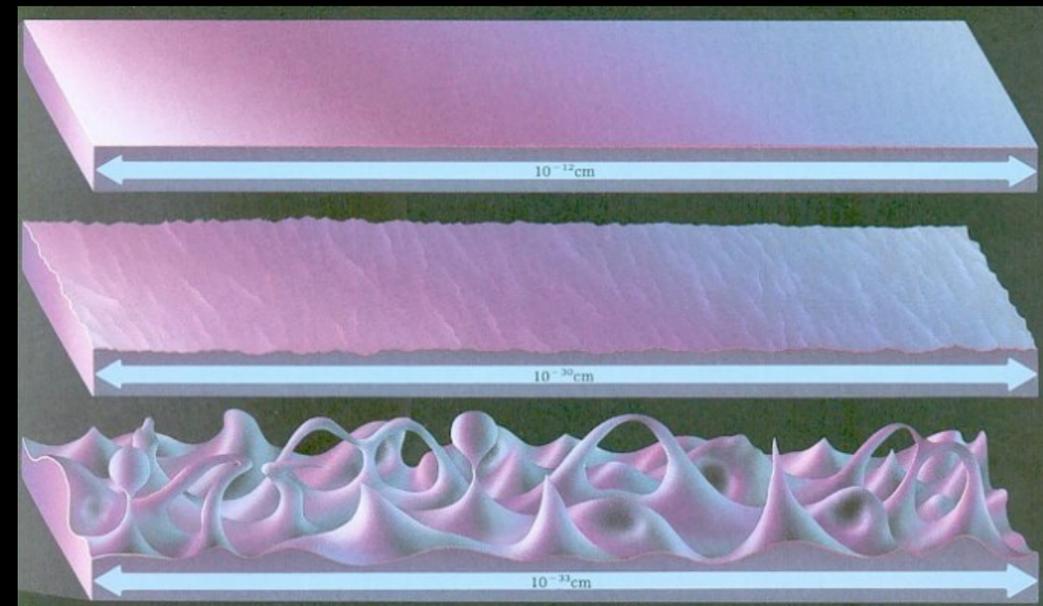
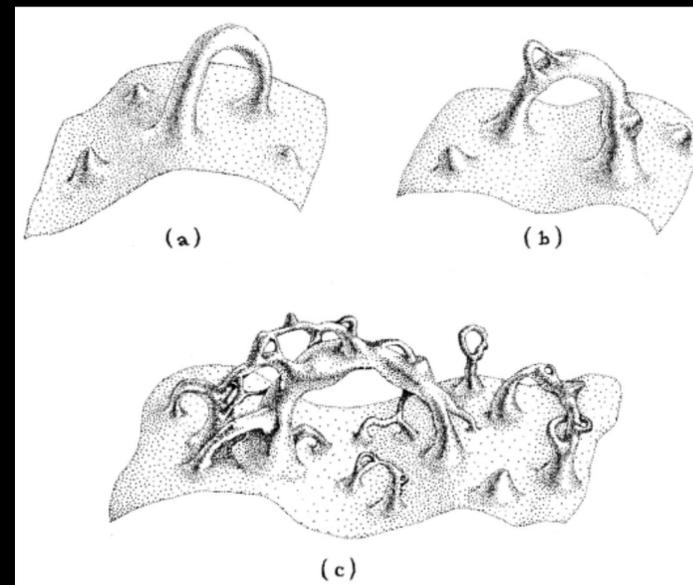
佐藤 勝彦



宇宙最前線～137億年の謎～ 宇宙科学の現在 (2'00")

<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？

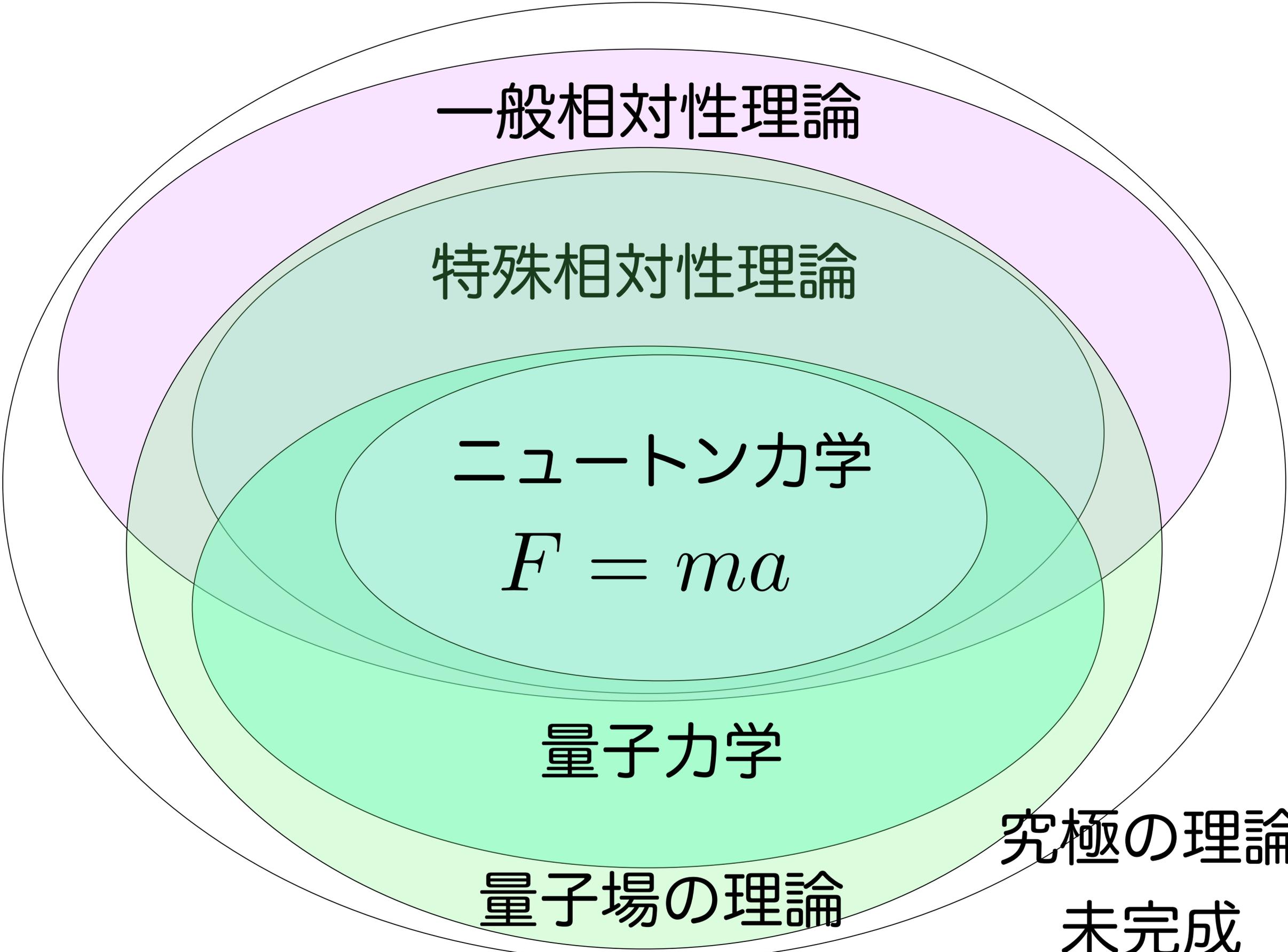


混沌とした量子時空の世界？ or else?

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”



- **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

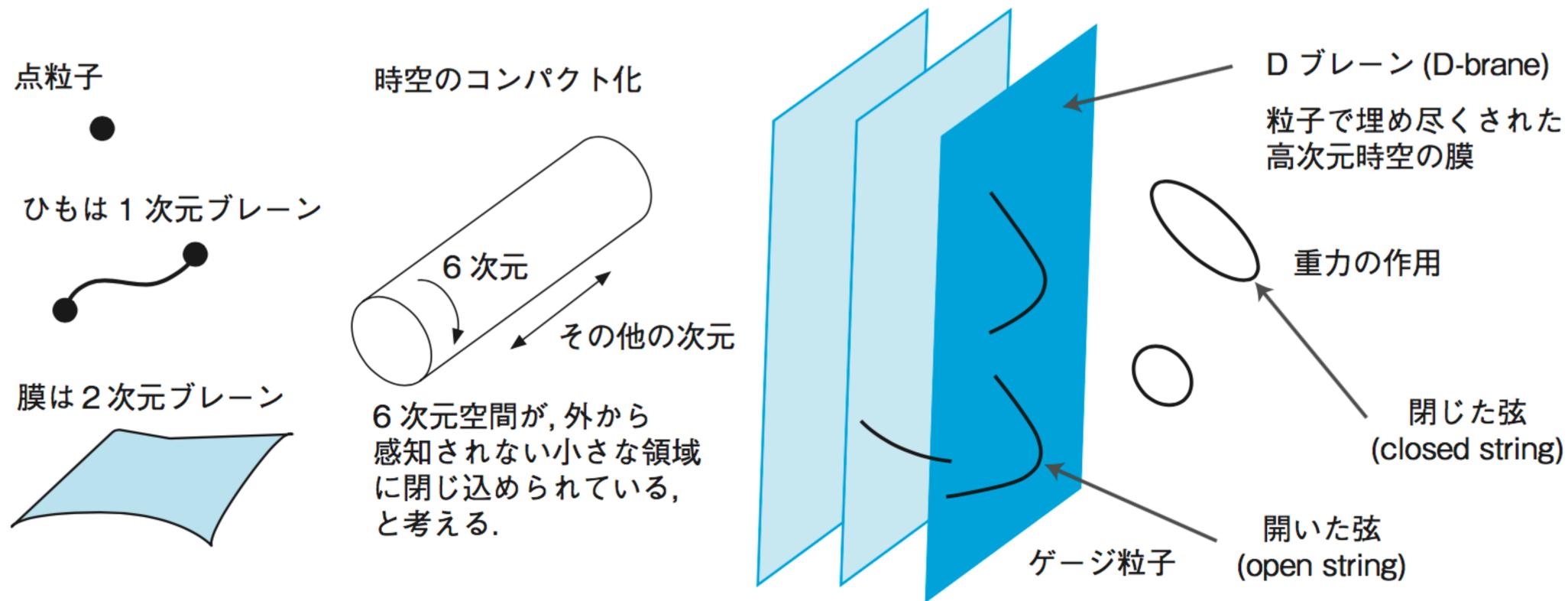


図 5.30 超弦理論に登場するさまざまな概念。弦（ひも）は、さまざまな振動モードを持ち得るが、その振動モードの違いが、素粒子の種類を表している、と考える理論である。数学的には 10 次元空間で弦を考えることが一番無理なく粒子を表現できる。現実の時空は 4 次元時空なので、余分な 6 次元空間は見えないように小さく閉じ込められている、と考える。1995 年以降、弦（粒子）が多数重ね合った D ブレーン (D-brane) と呼ばれる高次元の膜が、超弦理論の要素としてモデル化された。



ホーキング, 膜宇宙論を語る 《2007年, 東京大学》 (5) start on click 2'00”

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

膜宇宙論 (Brane-world cosmology)

私たちは高次元中の4次元時空にtrapされている。
小さなスケールでは高次元かもしれない。

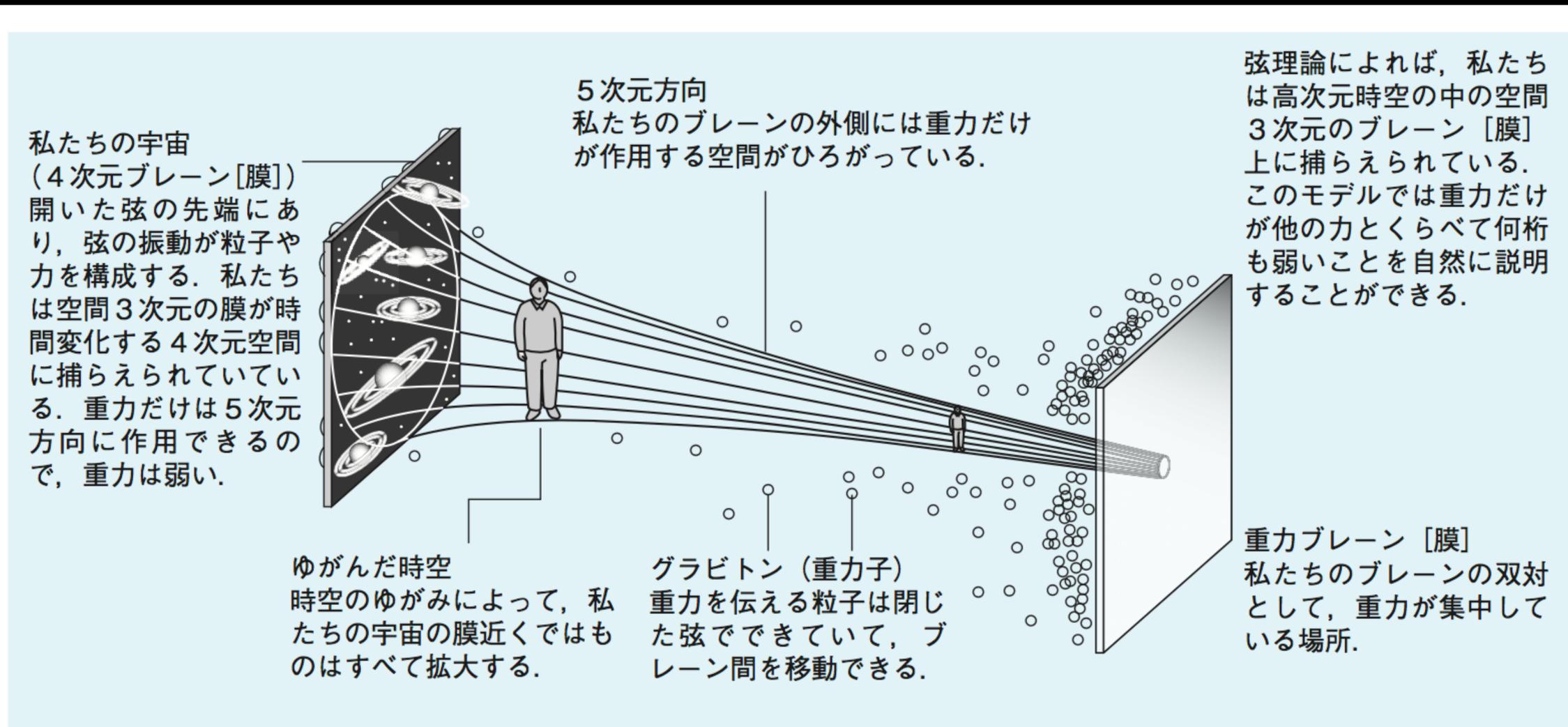
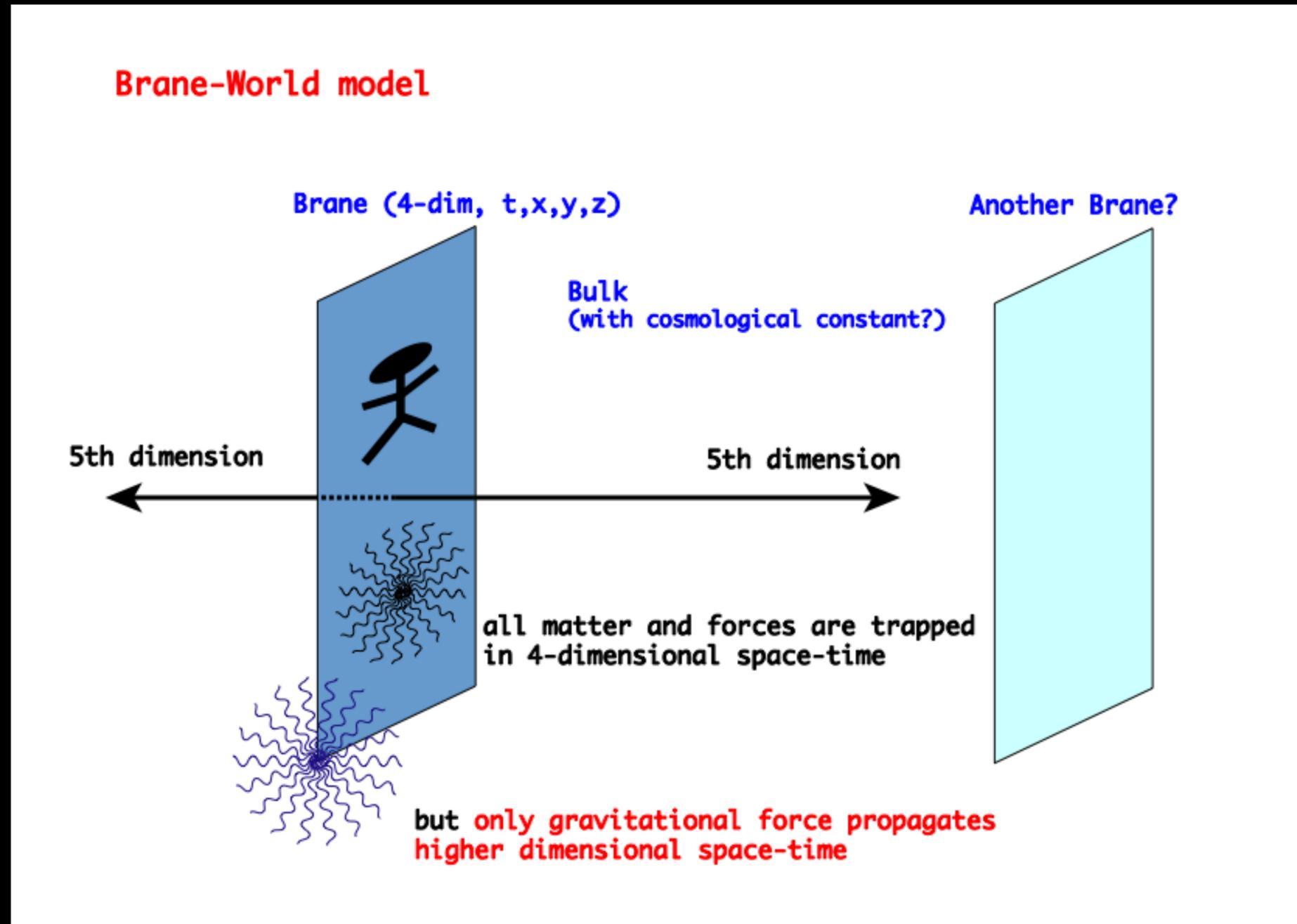


図 5.31 ランドールとサンドラムが提案したブレーンワールド・モデルの1つ。(膜宇宙モデル, 1999)

L. Randall & R. Sundrum (1999)

膜宇宙論 (Brane-world cosmology)

私たちは高次元中の4次元時空にtrapされている。
小さなスケールでは高次元かもしれない。



膜宇宙論 の由来

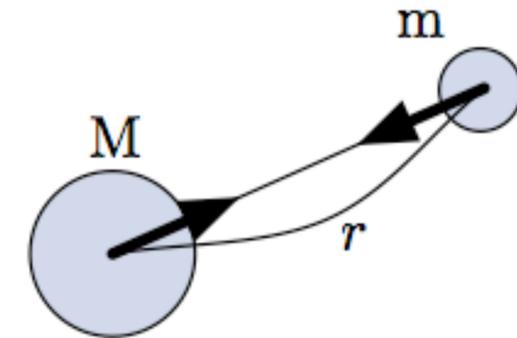
万有引力の法則は、小スケール(0.1mm以下)では、まだ確認されていない。

◆ Advanced 万有引力の法則

質量 m と M の質点が r だけ離れて置かれているとき、両質点にはたらく力 F は、大きさが

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \quad (2.2)$$

でつねに引力である。 G は定数であり、万有引力定数と呼ぶ。



もしかしたら、破れているかもしれない。

空間3次元 (4次元時空) なら

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

$$U = -G \frac{Mm}{r}$$

空間4次元 (5次元時空) なら

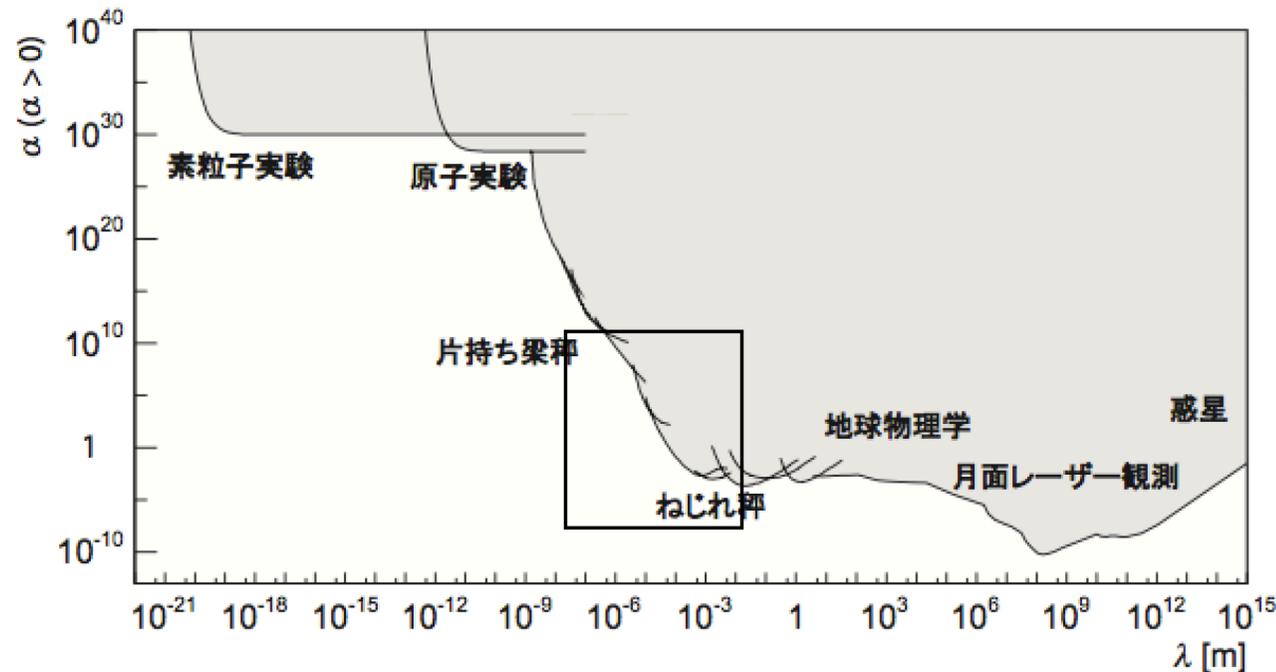
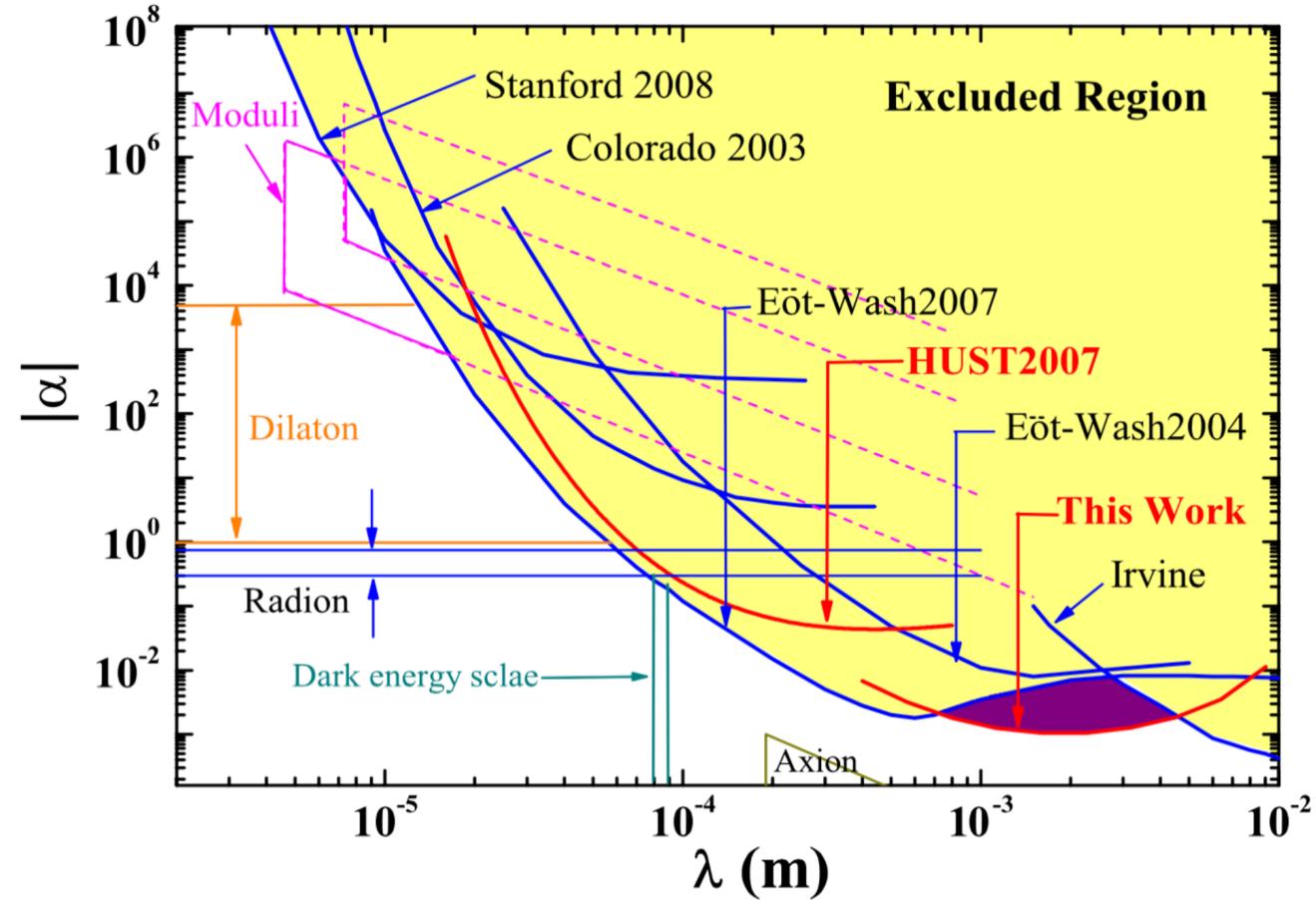
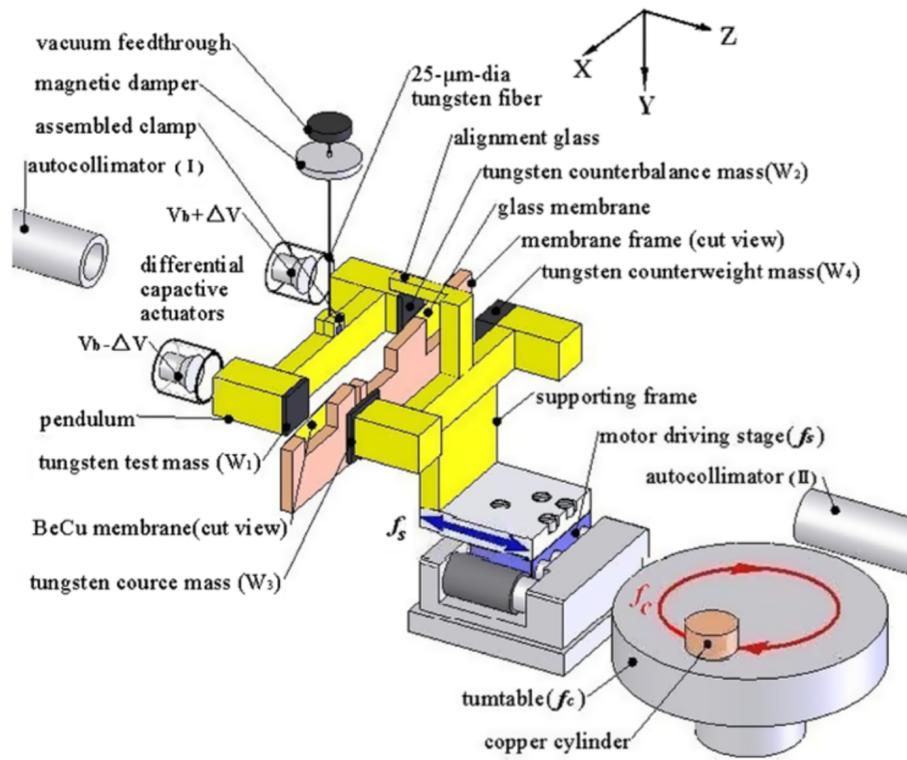
$$F = G \frac{Mm}{r^3}$$

$$U = -G_5 \frac{Mm}{r^2}$$

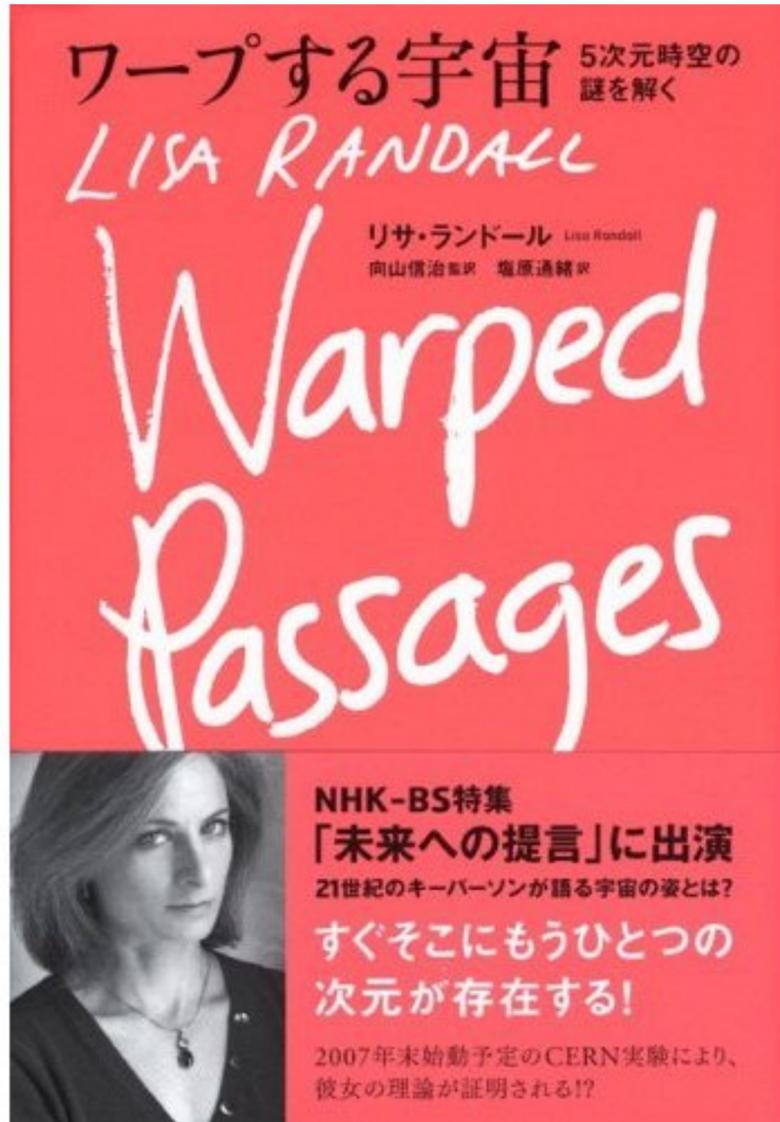
$$U = -G \frac{Mm}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$

万有引力の法則は、どこまで正しいか？

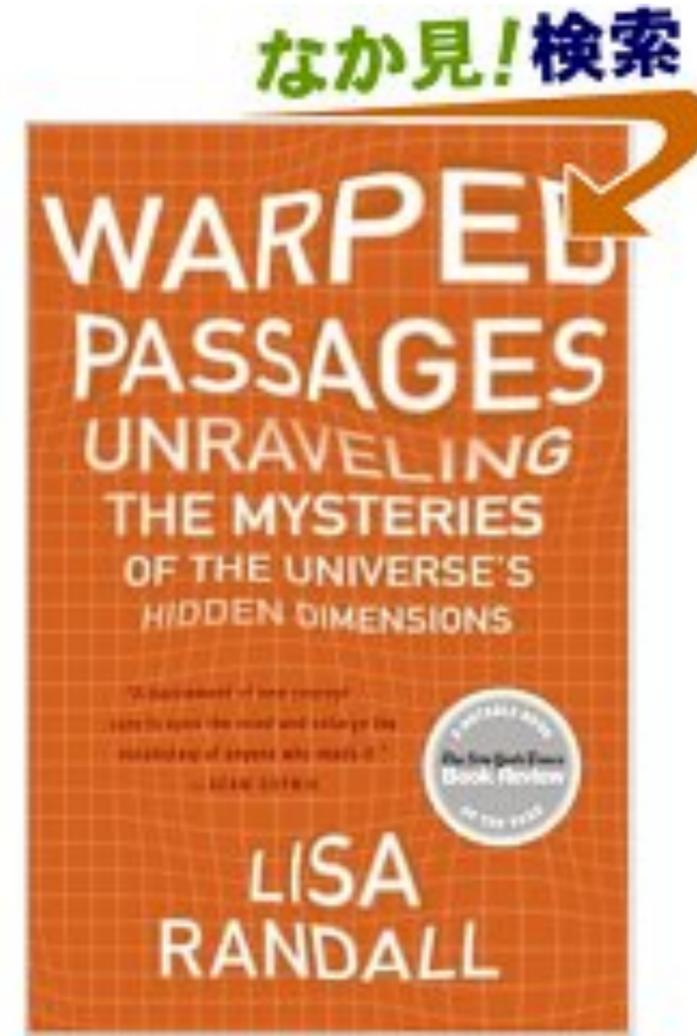
PRL 108, 081101 (2012) PHYSICAL REVIEW LETTERS



$$U = -G \frac{Mm}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda})$$



ル、真貝寿明、白水徹也、トビー・ワイズマンなど。
 *フアン・ガルシア・ベルド、アンドリュー・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
 ン・ホーキング、ゲリー・T・ホロウィッツ、ネマニャ・カロパー、ロバート・C・マイヤーズ、ハーヴェイ・S・リオ



*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.



ホーキング, 膜宇宙論を語る 《2007年, 東京大学》 (2) start on click 3'05”

<https://www.youtube.com/watch?v=ckq5xMVddvU>

NHK BS 異次元への招待 (2007/8)



<https://www.dailymotion.com/video/x29h83c>

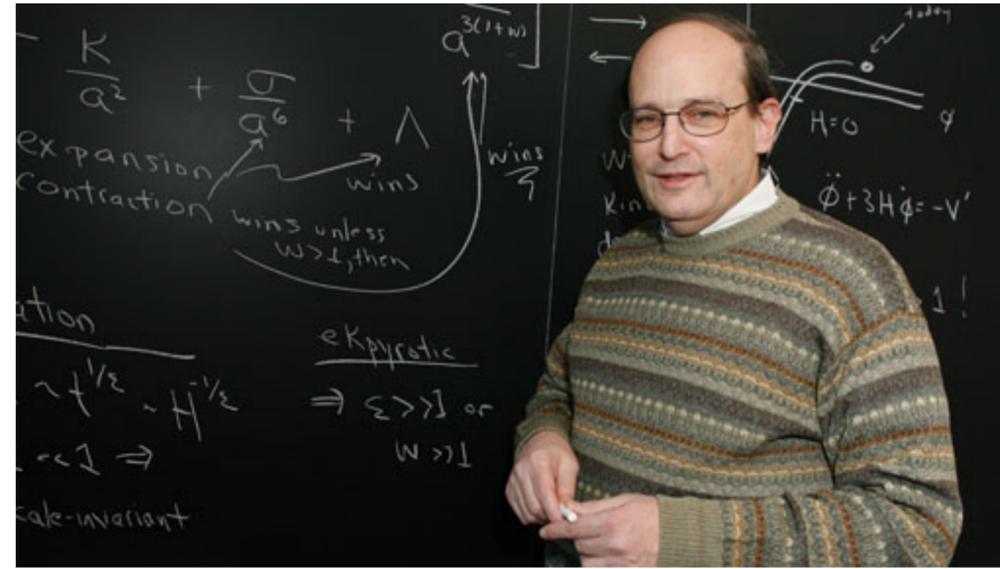
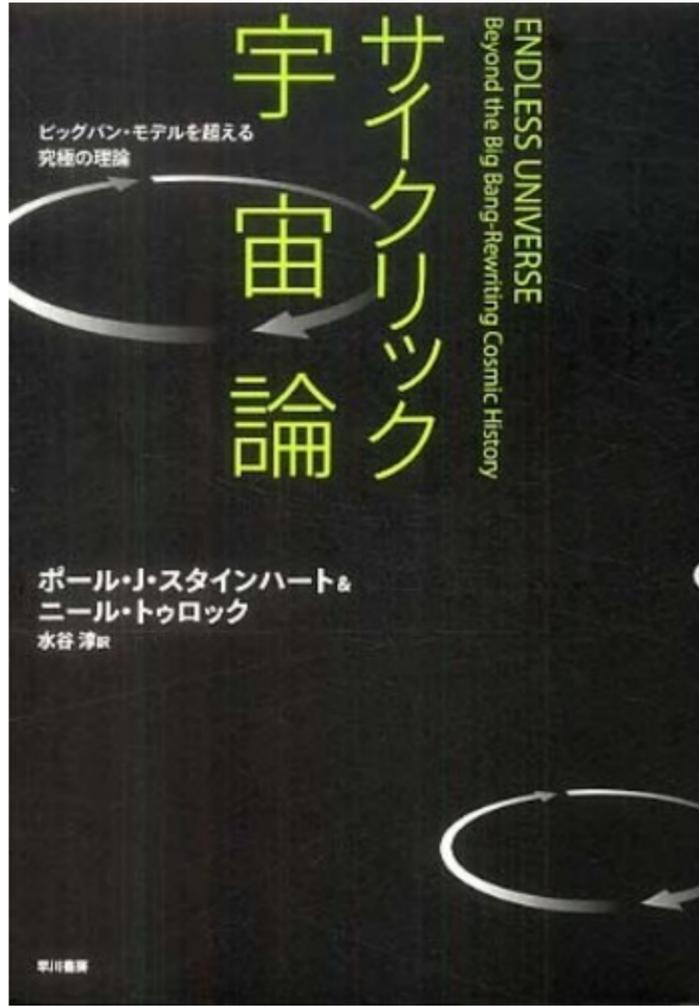
on click 1'45"

NHK BS 異次元への招待 (2007/8)

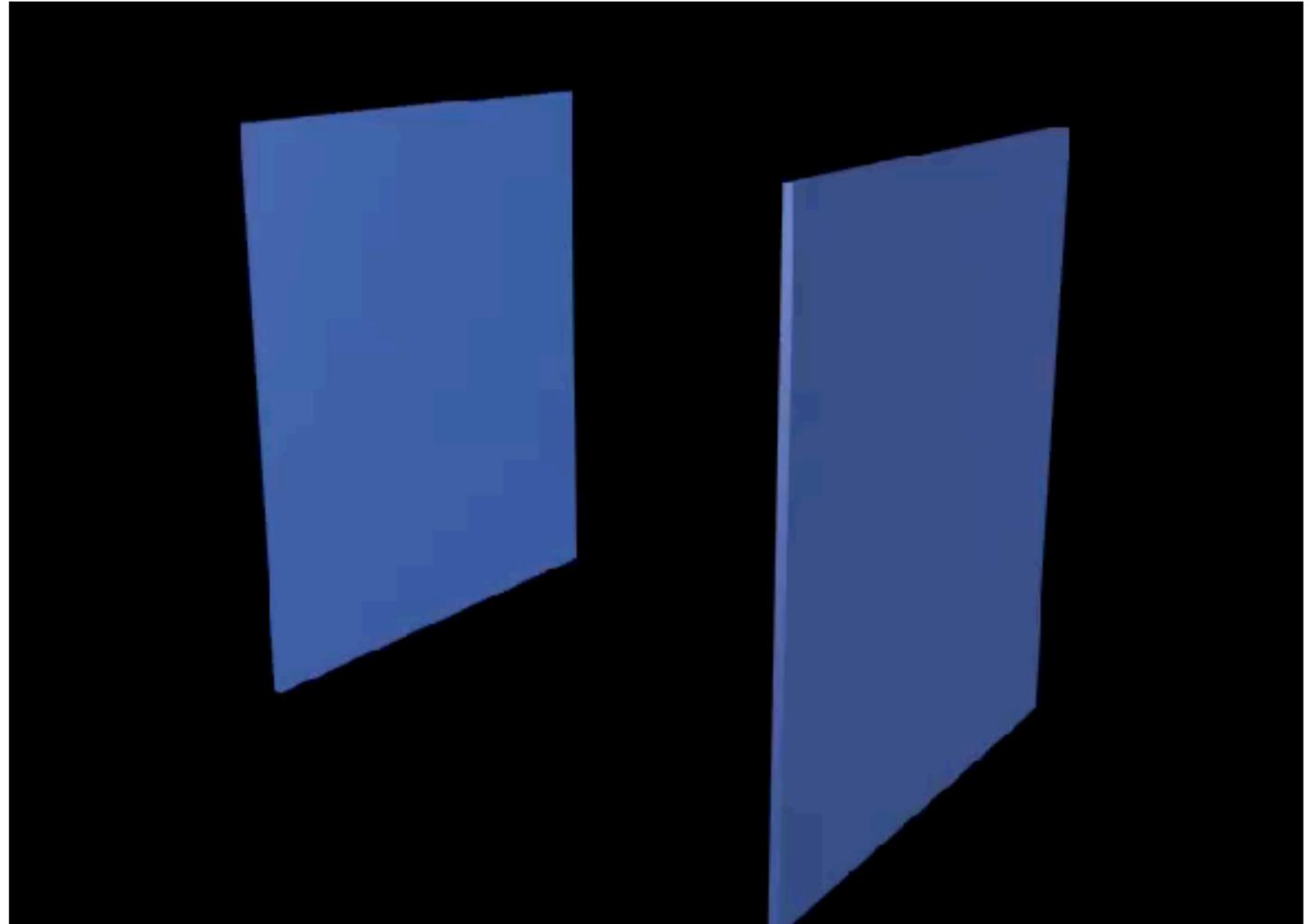


<https://www.dailymotion.com/video/x29h83c>

on click 3'

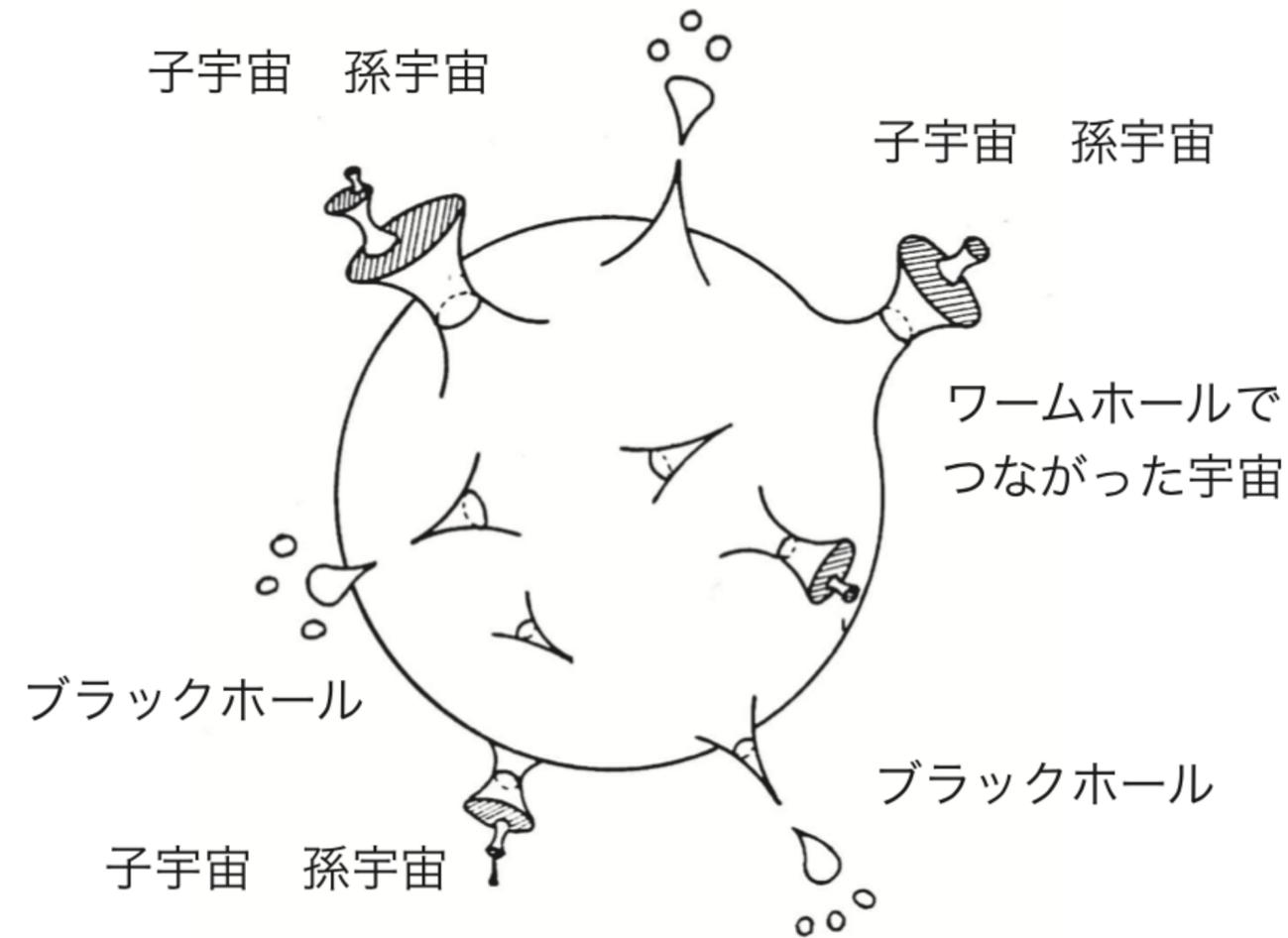


膜宇宙の交差によってビッグバンが生じた



インフレーション宇宙モデル

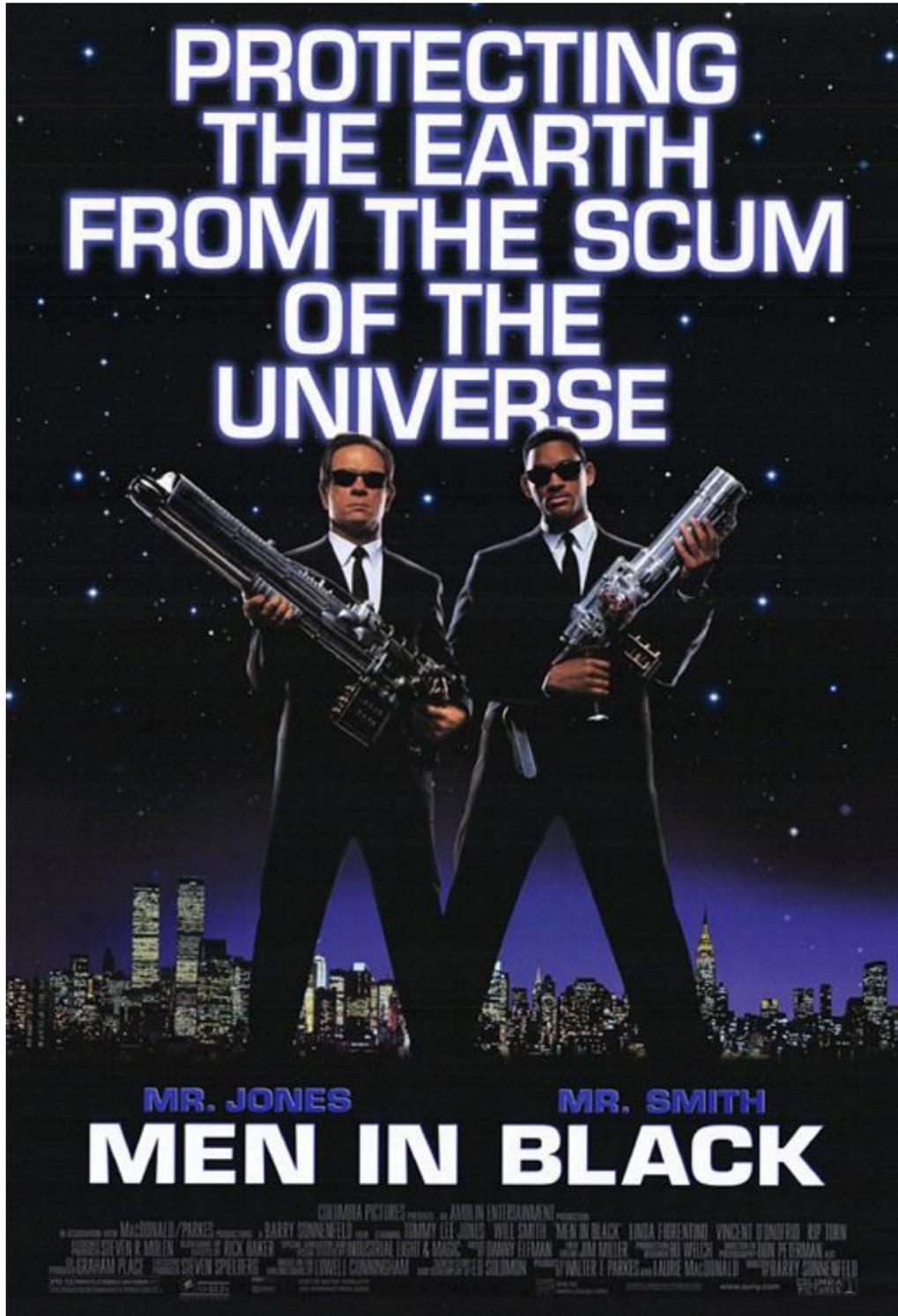
宇宙は我々の宇宙だけではなく



~~universe~~
multiverse

Men in Black (1997)

Tommy Lee Jones, Will Smith



【13-1】インフレーション宇宙モデルは、標準ビッグバン宇宙モデルの何を解決したのか？(2つ以上).

【13-2】「宇宙は1つではない。」証拠はないし、観測できる可能性もない。
しかし、科学者が、そう信じる理由は？

【13-3】通信欄。(感想・講義で取り上げて欲しい疑問・要望・連絡事項など、何かあれば)