

# 最先端物理学が描く宇宙

## Frontiers of Physics & Cosmology

第13回 2025/12/15

### 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

大 手に見えぬで。



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

真貝の武庫川講義ページtop



## 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，**2025年12月28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．



## 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そうに"7"ど、  
がんばります!!

レポートに追われる生活を楽しみます。

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
- 提出〆切は, **2026年1月30日 (金) 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.

ふたご座流星群が見える12/14は誕生日なので見たいです☆☆

ふたご座流星群みたいなの思った。

12/14～12/15のふたご座流星群みてやろうと思います!!





# 前回のミニッツペーパーから

アインシュタインは友人パイプに向かって尋ねた。  
「月は君が眺めている間だけ実在している、などということを、  
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。



先日、月の存在の話で納得できなかったが、「 $E=mc^2$ 」のバイトのミスのお話を聞いて、  
腑に落ちた。バレたから起るから、 $E=mc^2$ も同然である。  
身近に宇宙を紐解く鍵が、 $E=mc^2$ の両方にある。  
宇宙の全ての謎が解明されたから死は $E=mc^2$ である。  
知らずには死ぬのも、 $E=mc^2$ が成り立つと、どうにか長生きして $E=mc^2$ と  
受業が通るにつれ考えを改めよう。

「月が眺めている間だけ存在するか」という言葉に思わず「確かに」と言ってしまう。  
存在しないと言わなければならないが、あまり納得できません。  
(しかしパラレルワールドは理解でき、複雑が待っている。)

論理的な考えは難しいですが、月の存在の話は、バイトでミスしても誰も気づいて  
なかったらよかったことにならな〜と思いつながら聞いてました。



# 前回のミニッツペーパーから

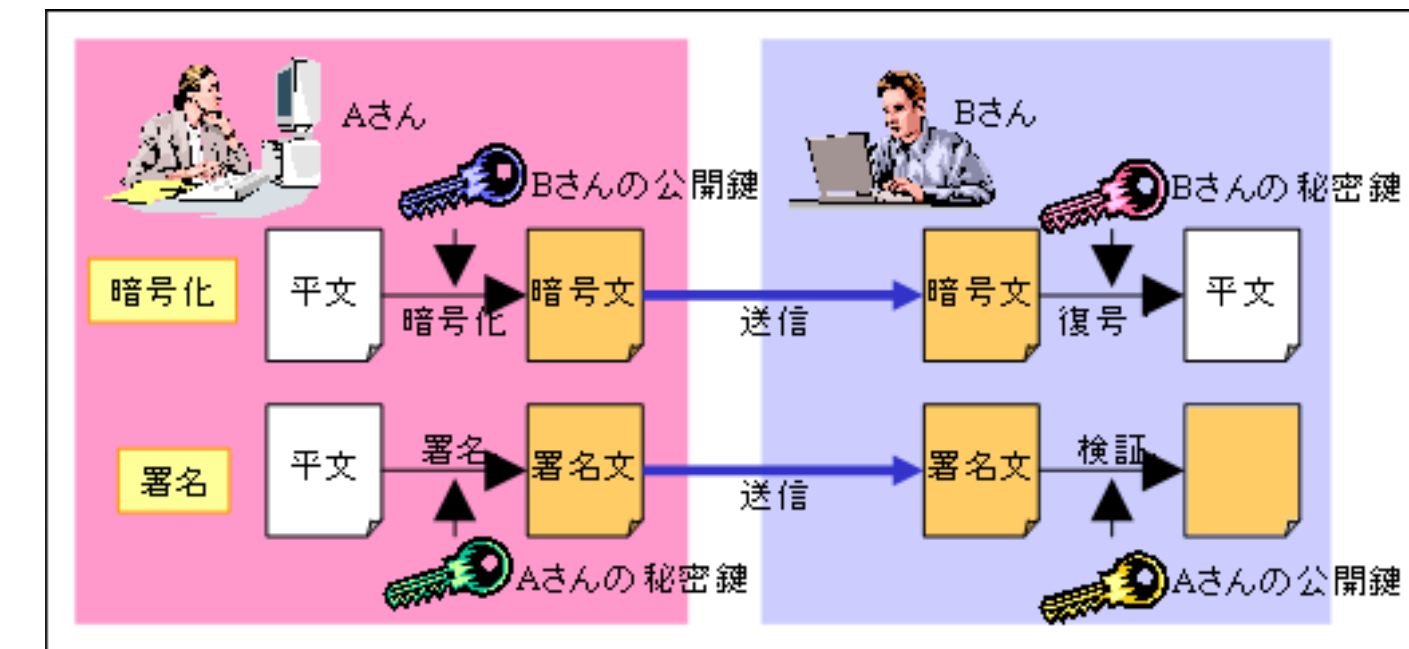
量子コンピュータで情報の暗号化が破れるのを  
怖れていた。何もかも発展すると  
人間の危機を感じます。

新しい暗号技術が、おそらく開発  
されることでしょう。

【身近な技術】

## 量子コンピュータ(3)

インターネット上の暗号が破られる？



<https://www.ipa.go.jp/security/pki/022.html>

1230186684530117755130494958384962720772853569595334792197  
3224521517264005072636575187452021997864693899564749427740  
6384592519255732630345373154826850791702612214291346167042  
9214311602221240479274737794080665351419597459856902143413

=

3347807169895689878604416984821269081770479498371376856891  
2431388982883793878002287614711652531743087737814467999489

×

3674604366679959042824463379962795263227915816434308764267  
6032283815739666511279233373417143396810270092798736308917

232桁

素数

素数

素因数分解がすぐに  
解けたら暗号が破られる

<http://www.s.osakafu-u.ac.jp/default/3491.html>

先生は星景写真を撮ったことがありますか？

山を背景に撮ったことがあります。  
山の形が影で真っ暗で、星だけが写っている写真になりました。  
探し出せませんでした...



# 前回のミニッツペーパーから

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いですね。

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



Abhay Ashtekar

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



# 前回のミニッツペーパーから

宇宙論はやっぱりおもしろい

宇宙と人間の密接な関係が面白い。

ビッグバンについて詳しく知ることができて良かったです。

宇宙の成り立ちについて、これからもっと学んみたいと思った。

宇宙の全体は見えないと講義で聞き、研究者は見えないものに対して研究を続けて、実際に確認できないのは、辛くはないのかと思いました。

EHTの本間くん曰く、

「見えていない星を見ることが天文学者の仕事だ。見えている星には興味はない」

宇宙が広がっても 物理法則が変わるか、新しい原子ができるのかはわからないですか？

物理法則は変わらないと信じているのが物理学者です

・自分たちの宇宙が膨張したのではなく、宇宙の外側の何かに引き寄せられて  
いる可能性はないのか、疑問に感じた。  
・「宇宙には中心がなく、どちらを向いても同じ」であるにも関わらず、  
宇宙図は球体ではなく、円錐であることに疑問を感じた。

今日の講義で触れます

5. 宇宙論 》 5.2 ビッグバン標準宇宙論 》 5.2.6

教科書 p168

## 宇宙図

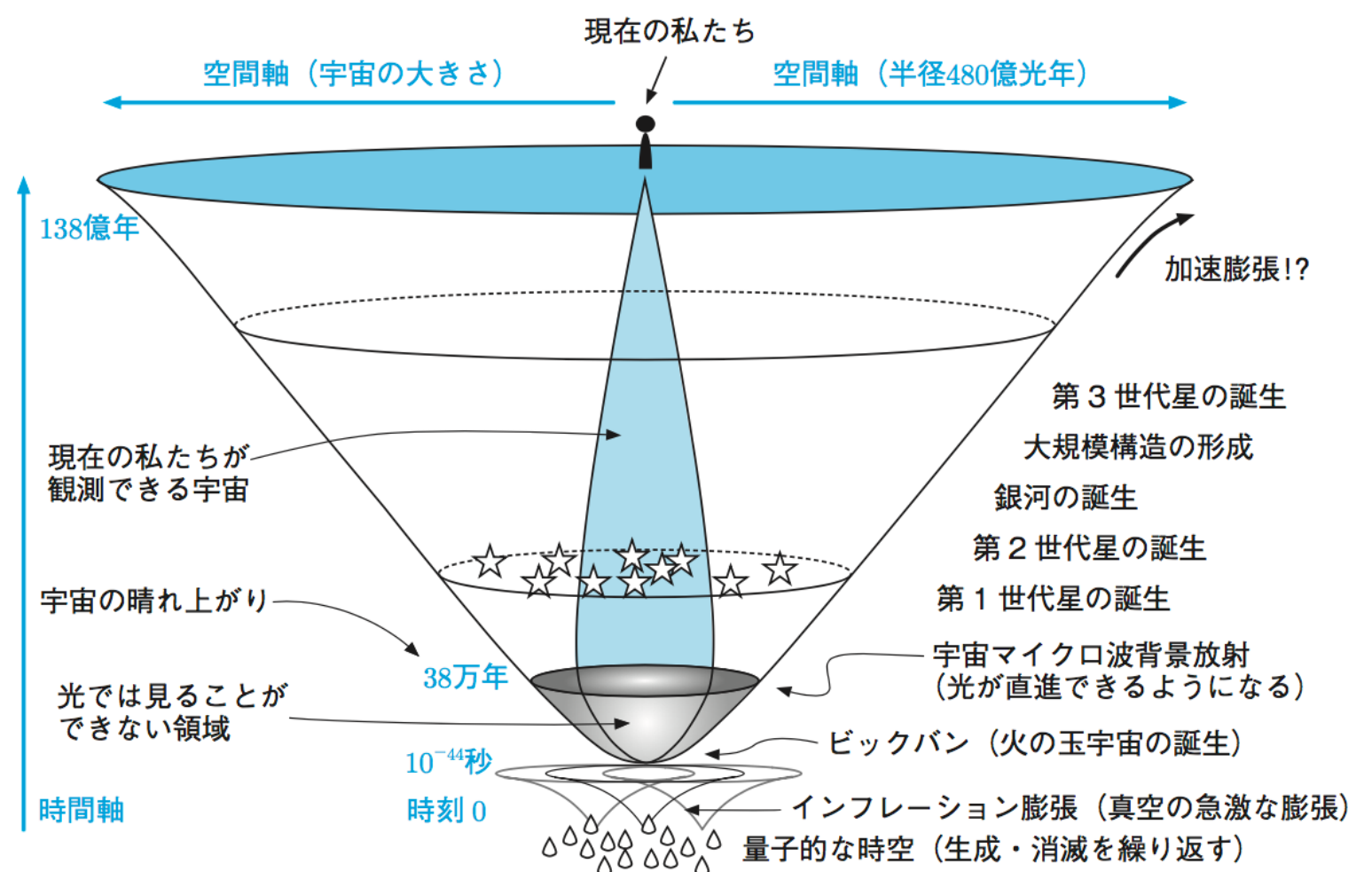


図 5.18 ビッグバン宇宙モデルの概略図。時間の進み方を上向き、空間の広がり方を横軸にして示す。現在の私たちは図の上の中央部分にいる。宇宙誕生直後にはインフレーションと呼ばれる急膨張を起こす。インフレーション後に高温高密度の火の玉宇宙が出現する。38 万年後に光が直進できるようになる。電磁波では、この時点以降の観測が可能になる。最近では、宇宙は加速膨張をしていることが明らかになった。宇宙が広がる様子が示されているが、実際に私たちが見られる宇宙は、中央の涙のしずくの部分に限られる。



# 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。

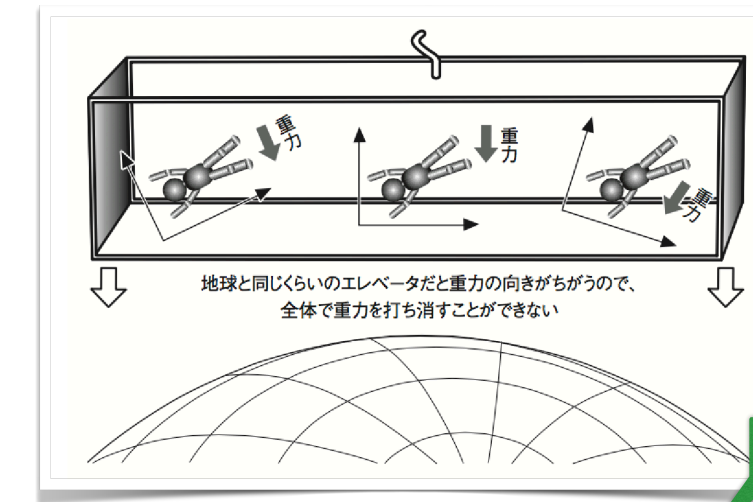
宇宙項の導入 (宇宙膨張をアインシュタインは信じなかったこと)

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

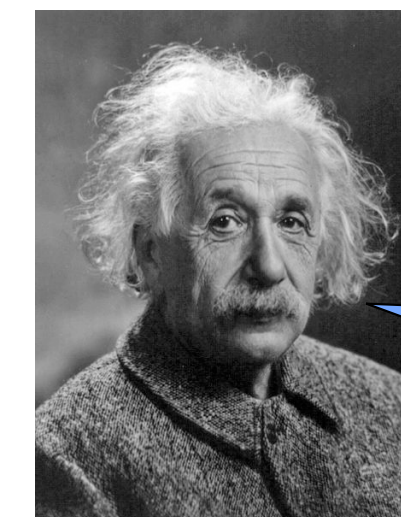
=重力は、大域的には消去できない。

=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)



東京ディズニー・シーにあるアトラクションで、「タワー・オブ・テラー」という、エレベーターに乗り、リフト型に落下する乗り物があるので、落下する際「浮力」を感じますが、等価原理と関係しているのでしょうか。

自由落下するとき、重力と慣性力がつりあって無重量状態になります。まさに、アインシュタインの気づきですね。

## 自由落下運動

THE GREATEST FALL  
BLUE FALL

ブルーフォール

驚異の107mからの垂直落下に  
チャレンジ！

垂直落下型スリルライドでは驚異の高さを誇る「ブルーフォール」。高層ビル約35F、107mの高さから落下する最高速度は

125km/h、最大加重4G、さらに"フェイント・ドロップ"という2段落としの仕掛けで、スリルたっぷり。

ここがポイント！

スリルライドが大好きな人は、最初から靴を脱いでおくのがおすすめ。足の裏からじかに風圧を感じて、より恐怖感が増すんだって。ぜひ試してみて！

# 自由落下

## ブルーフォール

### (横浜・八景島シーパラダイス)

© 数研出版



# 前回のミニッツペーパーから

先生の 生涯 最下の ひらめきは 何ですか

誰もが実現できなかったブラックホール合体のシミュレーション。  
皆の使っている式が悪い, と指摘できたことかな。

Journal of the Korean Physical Society, Vol. 54, No. 6, June 2009, pp. 2513~2528

## Formulations of the Einstein Equations for Numerical Simulations

Hisaaki SHINKAI\*

*Department of Information Systems, Faculty of Information Science and Technology,  
Osaka Institute of Technology, Kitayama 1-79-1, Hirakata, Osaka 573-0196, Japan*

(Received 24 January 2008)

We review recent efforts to re-formulate the Einstein equations for fully relativistic numerical simulations. The so-called numerical relativity is a promising research field matching with ongoing gravitational wave observations. In order to complete long-term and accurate simulations of binary compact objects, people seek a robust set of equations against the violation of constraints. Many trials have revealed that mathematically equivalent sets of evolution equations show different numerical stabilities in free evolution schemes. In this article, we overview the efforts of the community, categorizing them into three directions: (1) modifying of the standard Arnowitt-Deser-Misner (ADM) equations initiated by the Kyoto group [the so-called Baumgarte-Shapiro-Shibata-Nakamura (BSSN) equations], (2) rewriting the evolution equations in a hyperbolic form and (3) constructing an “asymptotically constrained” system. We then introduce our series of works that tries to explain these evolution behaviors in a unified way by using an eigenvalue analysis of the constraint-propagation equations. The modifications of (or adjustments to) the evolution equations change the character of constraint propagation and several particular adjustments using constraints are expected to damp the constraint-violating modes. We show several sets of adjusted ADM and BSSN equations, together with their numerical demonstrations.

PACS numbers: 04.20.-q, 04.20.Cv, 04.25.D-

Keywords: General Relativity, the Einstein equations, Numerical Simulations, Formulation of the Equation of Motion, Constrained Dynamics

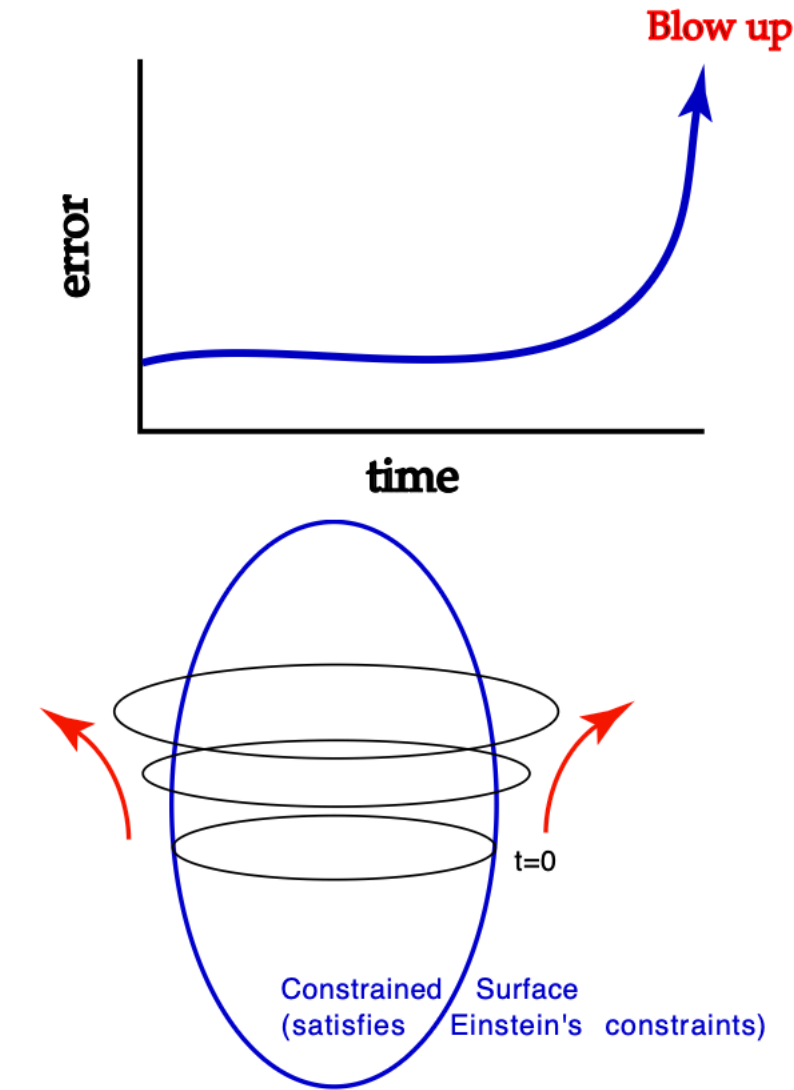


Fig. 1. Origin of the problem for numerical relativists: Numerical evolutions depart from the constraint surface.

- The evolution equations:

$$\partial_t \gamma_{ij} = -2\alpha K_{ij} + D_i \beta_j + D_j \beta_i, \quad (6)$$

$$\partial_t K_{ij} = \alpha {}^{(3)}R_{ij} + \alpha K K_{ij} - 2\alpha K_{ik} K^k{}_j - D_i D_j \alpha$$

$$+ (D_i \beta^k) K_{kj} + (D_j \beta^k) K_{ki} + \beta^k D_k K_{ij} \quad (7)$$

where  $K = K^i{}_i$  and  ${}^{(3)}R_{ij}$  and  $D_i$  denote the three-dimensional Ricci curvature and a covariant derivative on the three-surface, respectively.

- Constraint equations:

$$\mathcal{H}^{ADM} := {}^{(3)}R + K^2 - K_{ij} K^{ij} \approx 0, \quad (8)$$

$$\mathcal{M}_i^{ADM} := D_j K^j{}_i - D_i K \approx 0, \quad (9)$$

where  ${}^{(3)}R = {}^{(3)}R^i{}_i$ : these are called the Hamiltonian (or energy) and momentum constraint equations, respectively.

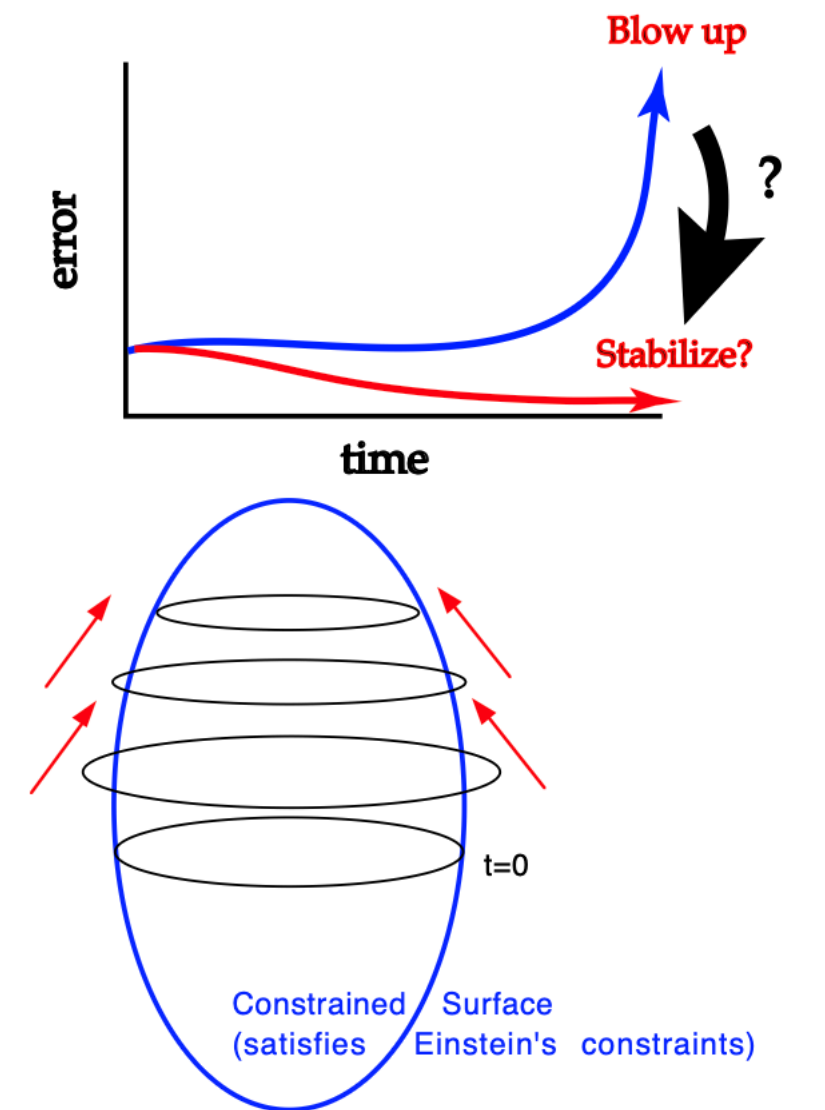


Fig. 5. Idea of an “asymptotically constrained system.”

*The adjusted ADM formulation [71]:*

Modify the evolution equations  $(\gamma_{ij}, K_{ij})$  by using constraints  $\mathcal{H}$  and  $\mathcal{M}_i$ , *i.e.*,

$$\partial_t \gamma_{ij} = (6) + P_{ij} \mathcal{H} + Q^k{}_{ij} \mathcal{M}_k + p^k{}_{ij} (\nabla_k \mathcal{H}) + q^{kl}{}_{ij} (\nabla_k \mathcal{M}_l), \quad (44)$$

$$\partial_t K_{ij} = (7) + R_{ij} \mathcal{H} + S^k{}_{ij} \mathcal{M}_k + r^k{}_{ij} (\nabla_k \mathcal{H}) + s^{kl}{}_{ij} (\nabla_k \mathcal{M}_l), \quad (45)$$

where  $P, Q, R, S$  and  $p, q, r, s$  are multipliers. According to this adjustment, the constraint propagation equations are also modified as

$$\partial_t \mathcal{H} = (10) + \text{additional terms}, \quad (46)$$

$$\partial_t \mathcal{M}_i = (11) + \text{additional terms}. \quad (47)$$

We show two examples of adjustments here. Several others are shown in Table 3 of Ref. [71].

# 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

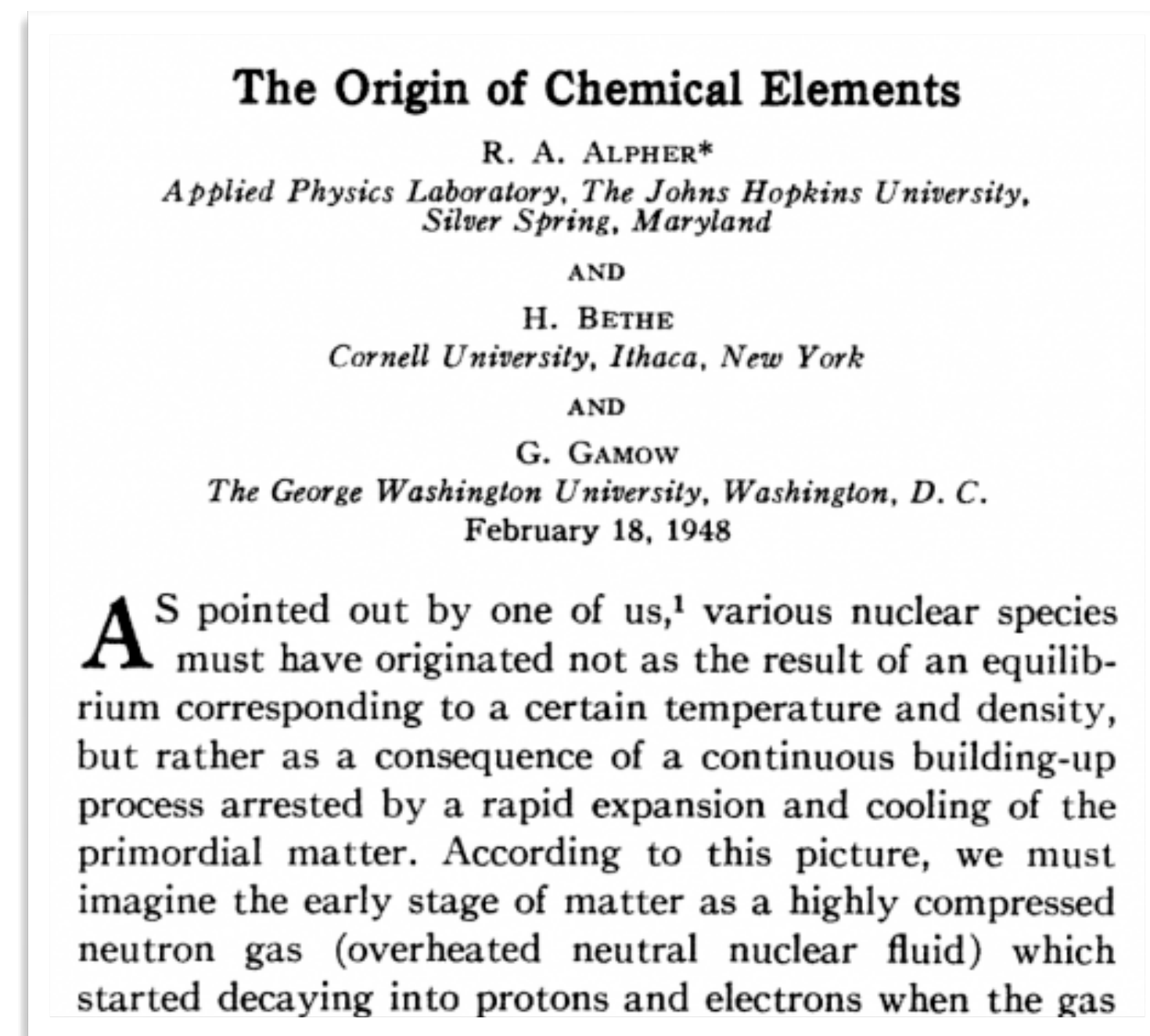


ガモフ

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」



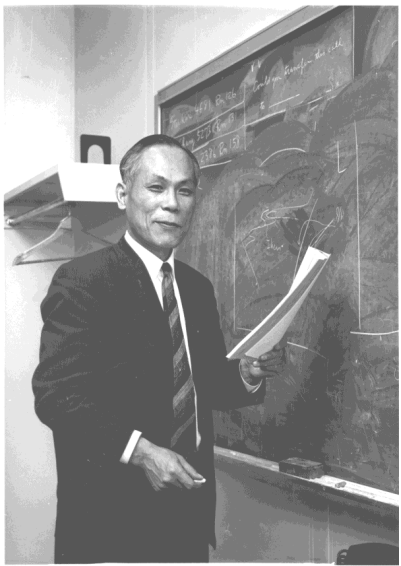
Physical Review, 1948/4/1

# 前回のミニッツペーパーから

林忠四郎の宇宙進化論の話をもっと聞いてみたいと思った

5. 宇宙論 》 5.2 ビッグバン標準宇宙論 教科書 p159

## 林忠四郎 (1920-2010)



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

ビッグバン理論 =  $\alpha\beta\gamma$ -Hayashi の理論  
『元素合成ははじめの3分間で終了』

### 星の進化

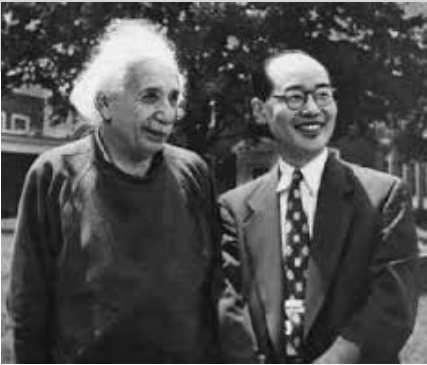
恒星が主系列星となる前に, 温度がほぼ一定のまま収縮する時期があることを明らかにした(林フェイズ, 林トラック).  
恒星に対する最大半径の制約(林の限界線).

### 太陽系形成モデル

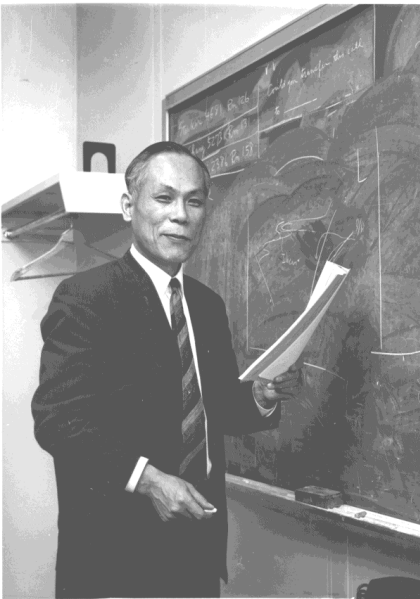
恒星・惑星系の全形成過程をモデル化した(京都モデル, 標準モデル)

【話題】 日本の宇宙物理学は林忠四郎から始まった

湯川秀樹 (1907-1981)



林忠四郎 (1920-2010)



佐藤文隆, 佐藤勝彦, 中村卓史, 前田恵一, 佐々木節. . . .



真貝

講師

真貝 寿明 (しんかい ひさあき) 氏  
大阪工業大学 情報科学部 情報システム学科 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。主な研究分野は一般相対性理論・宇宙論。研究者としては湯川秀樹博士の曾孫弟子にあたる。最近の研究は、高次元ワームホール、修正重力理論のダイナミクスなど。  
平成27年度は、西宮市宮水学園マスター講座「日常は物理で満ちている」を担当した。一般向けでは、ボランティア団体『てんもんぶ』の組織員として、天体観望会やプラネタリウム解説などを行っている。





## 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

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

「宇宙に始まりも終わりもない」

宇宙膨張をしていても新たに物質が  
生成していれば大丈夫



ホイル



# 前回のミニッツペーパーから

「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

~~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

火の玉宇宙論(ビッグバン宇宙論) vs 定常宇宙論ですが、私はビッグバン宇宙論派で  
宇宙に始まりがあると思います。定常宇宙論はあまり納得できません。

今回も物理学者どうしの論争が激しいなと思っていたが聞いてみると  
宇宙が高温の火の玉だったころの名残が今でも電波として  
宇宙全体から届いているのだと凄いなと思いました。

ガモフの火の玉宇宙論は、非常に興味深い考案だと思った。

以前宇宙誕生についての一つの説に、宇宙膨張には限界があり、それに達したとき、  
一度急収縮して(この部分の記憶は曖昧です)更に別のビッグバンを起こして新たに  
別の宇宙が誕生するというものがあるということ思い出しました。

ビッグ・バンの命名が「宇宙バ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

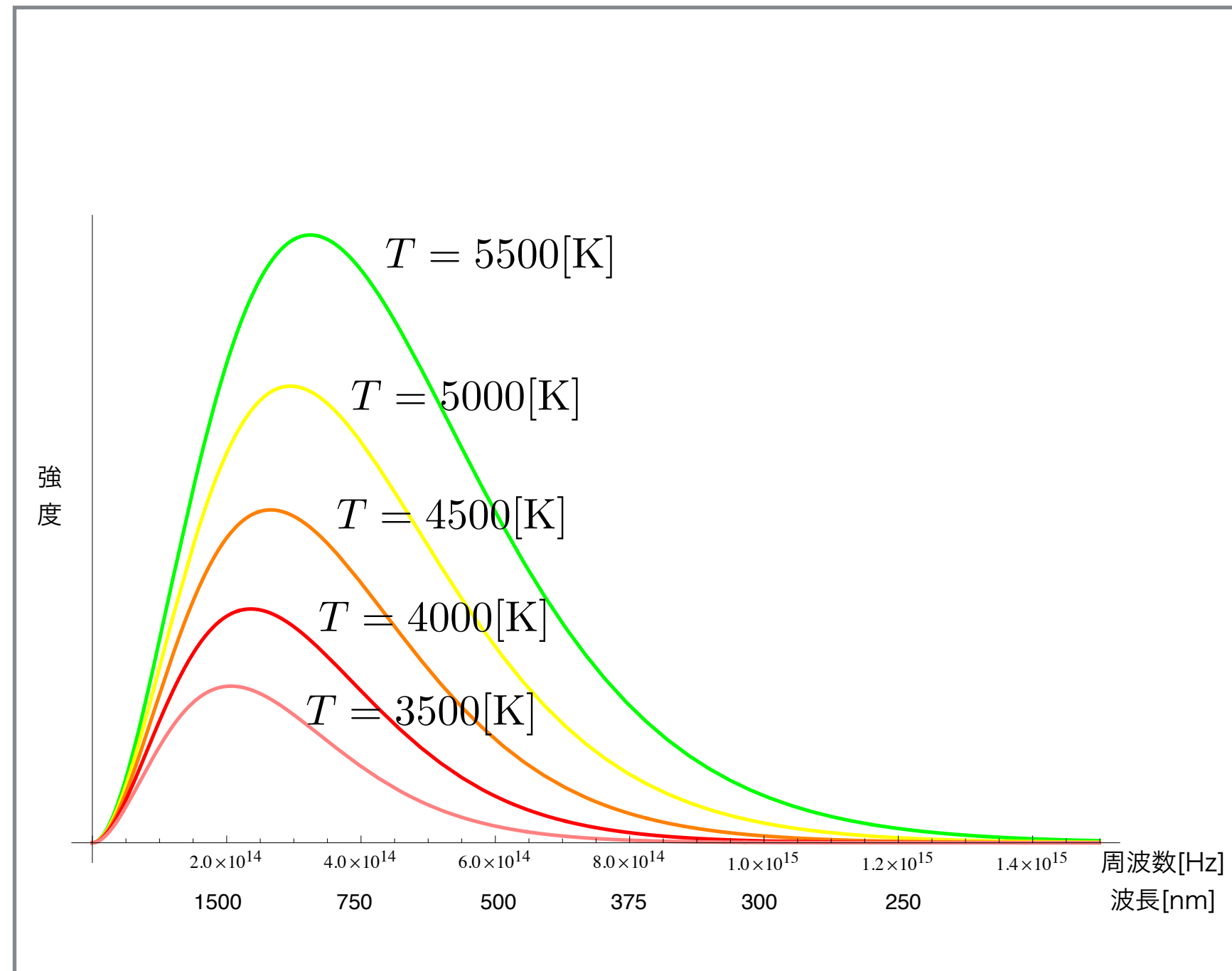
表 5.1 ビッグバン宇宙モデルと定常宇宙モデルの比較.

	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 ( $-268^{\circ} \sim -266^{\circ}$ )位

# 宇宙マイクロ波背景輻射の発見

Discovery of CMB

技術が飛躍すると宇宙についての知識・理解が  
ひたひたまで広がる。72。



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

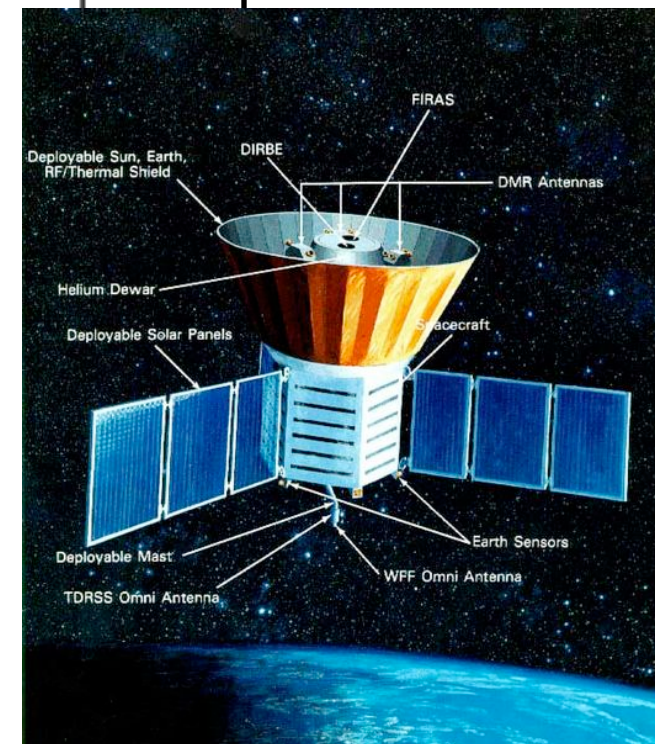
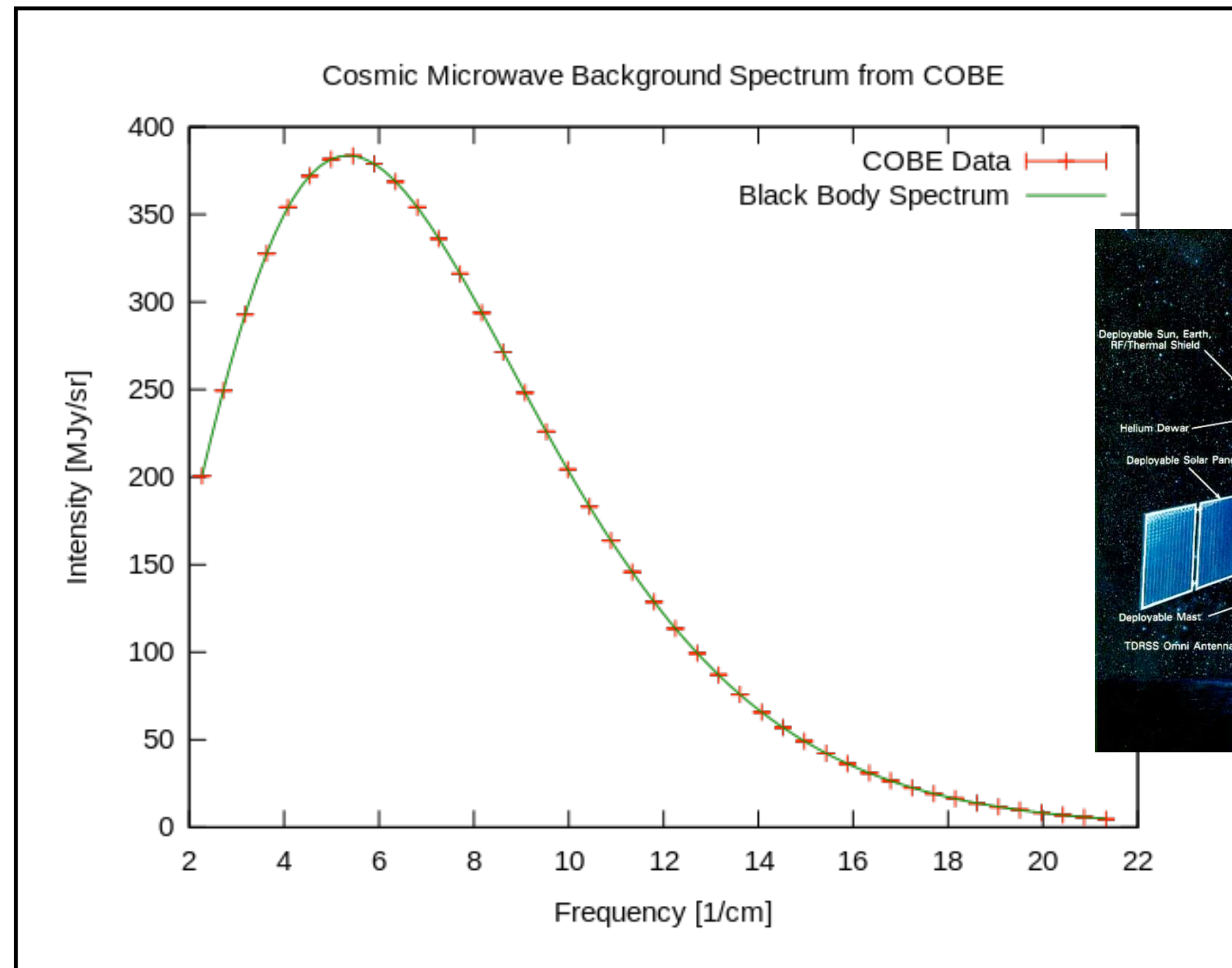
宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. **その時の温度** (約**3000K**) が放射されて残っているはず.

宇宙膨張で温度下がって ~~5~7K~~ **3.5K** ( $-268^{\circ} \sim -266^{\circ}$ ) 位



# 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

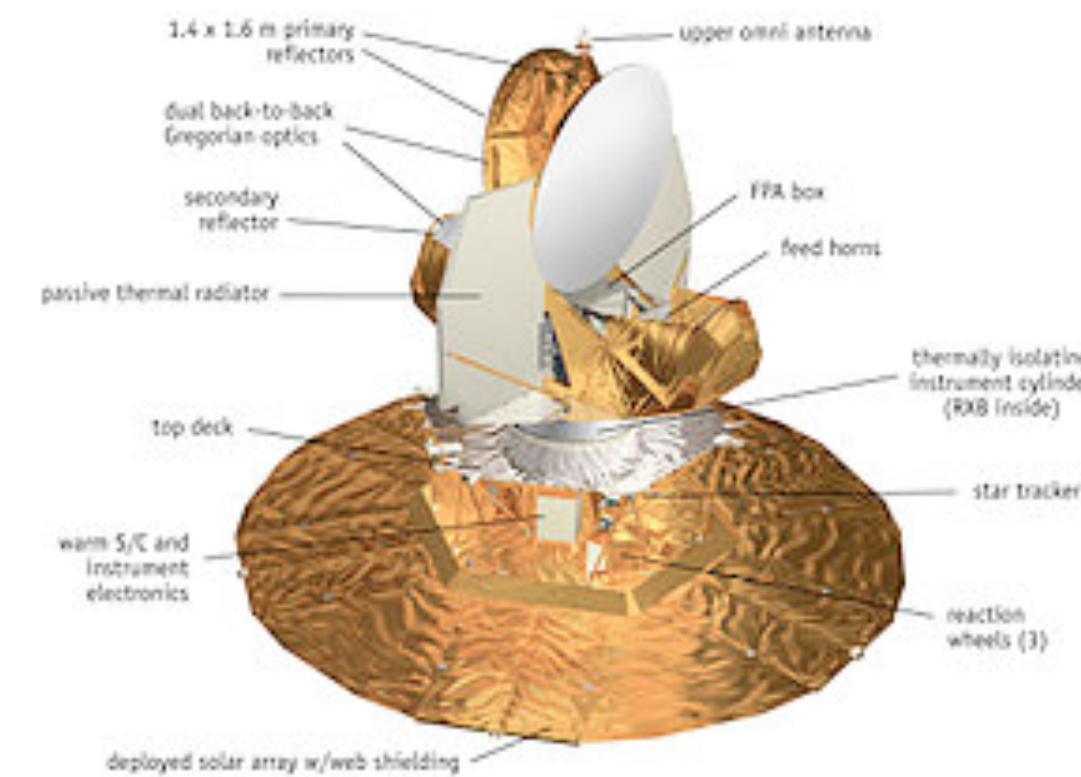
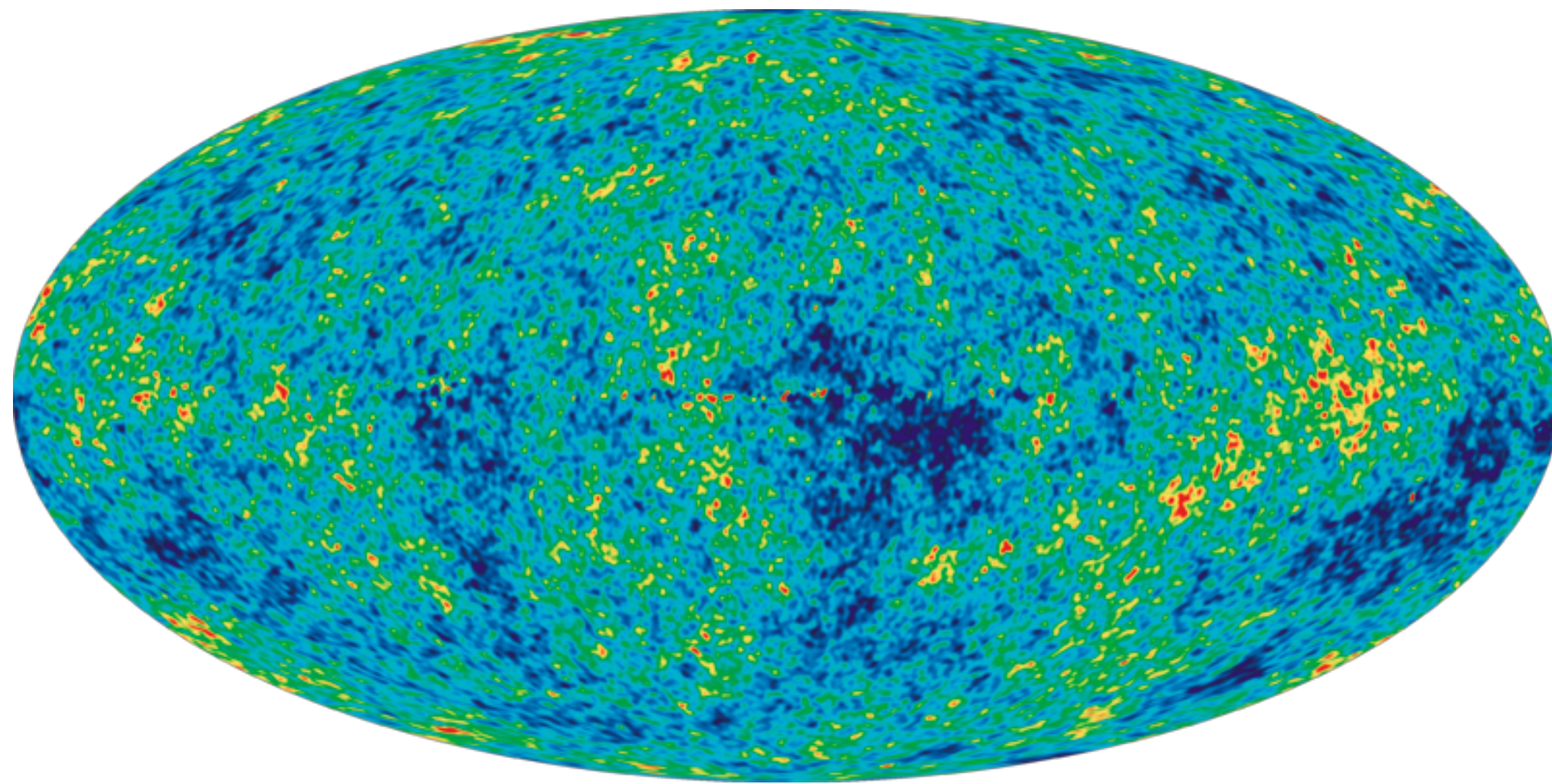
宇宙誕生後, 30万年ほど経つと, 光がさえぎられずに直進できるようになる. **その時の温度**(約**3000K**)が放射されて残っているはず.

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 $137 \pm 1$ 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~~

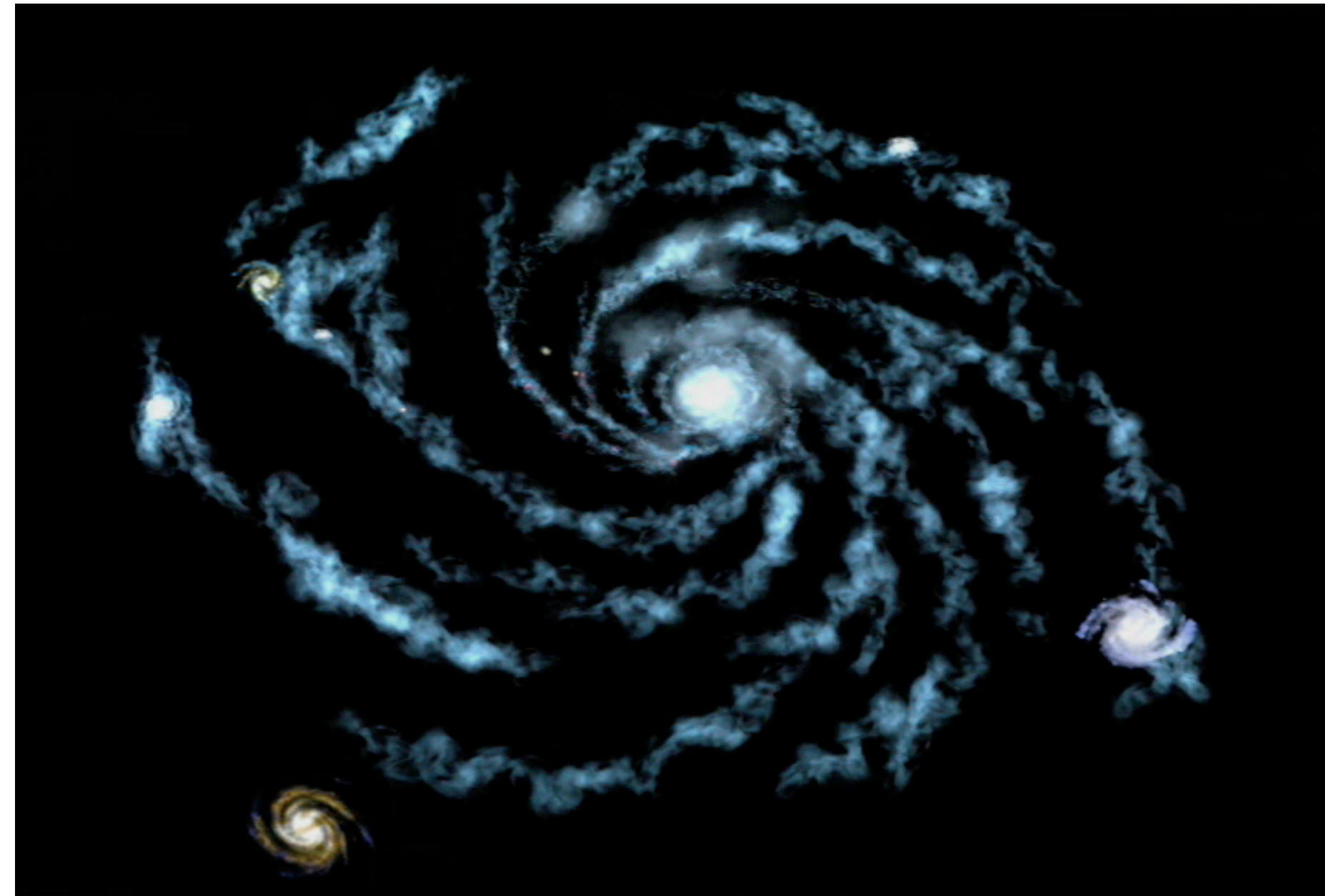
~~2.73 K~~

**2.725K**

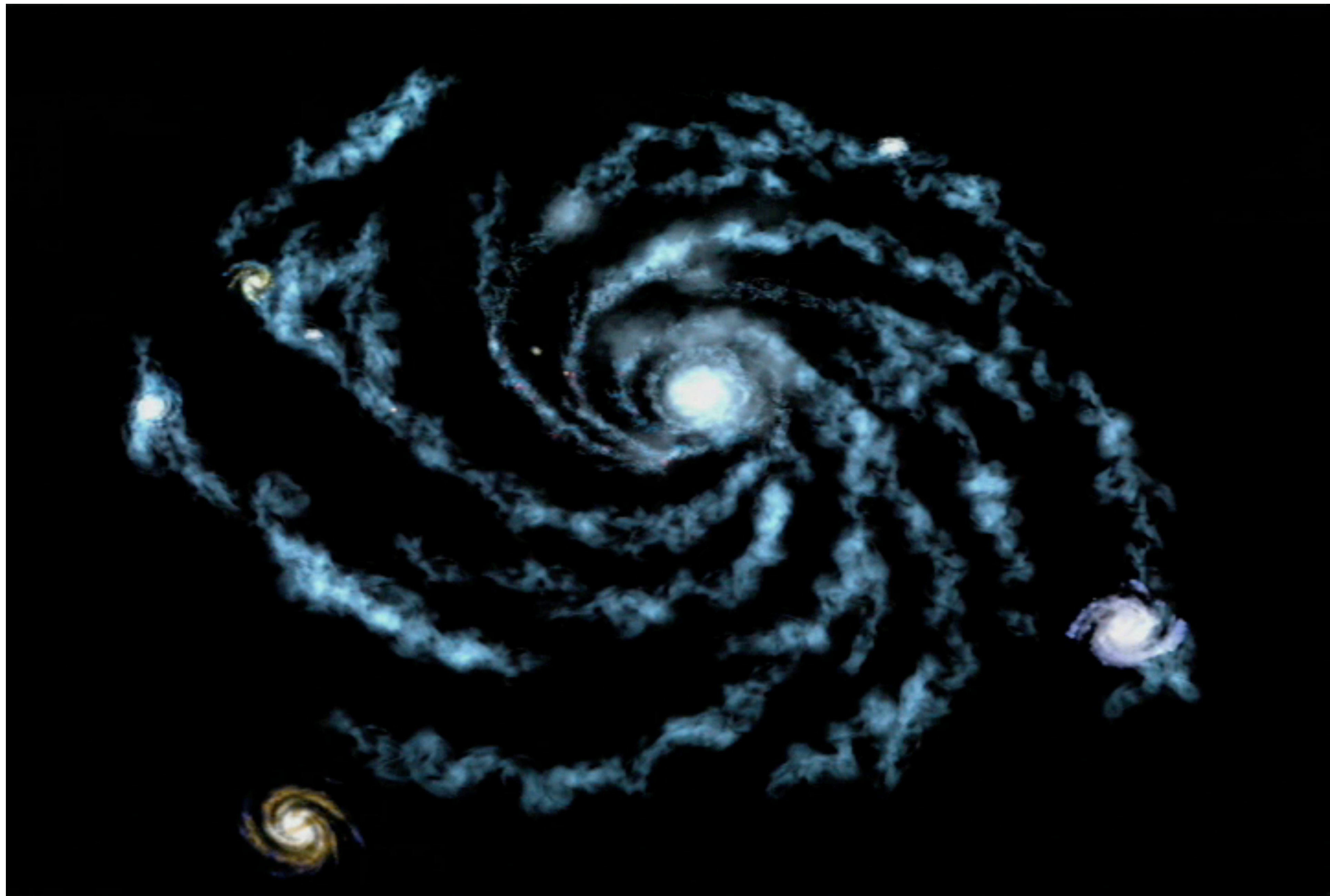


# WMAP衛星によるCMBの測定

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**





# CMBの測定

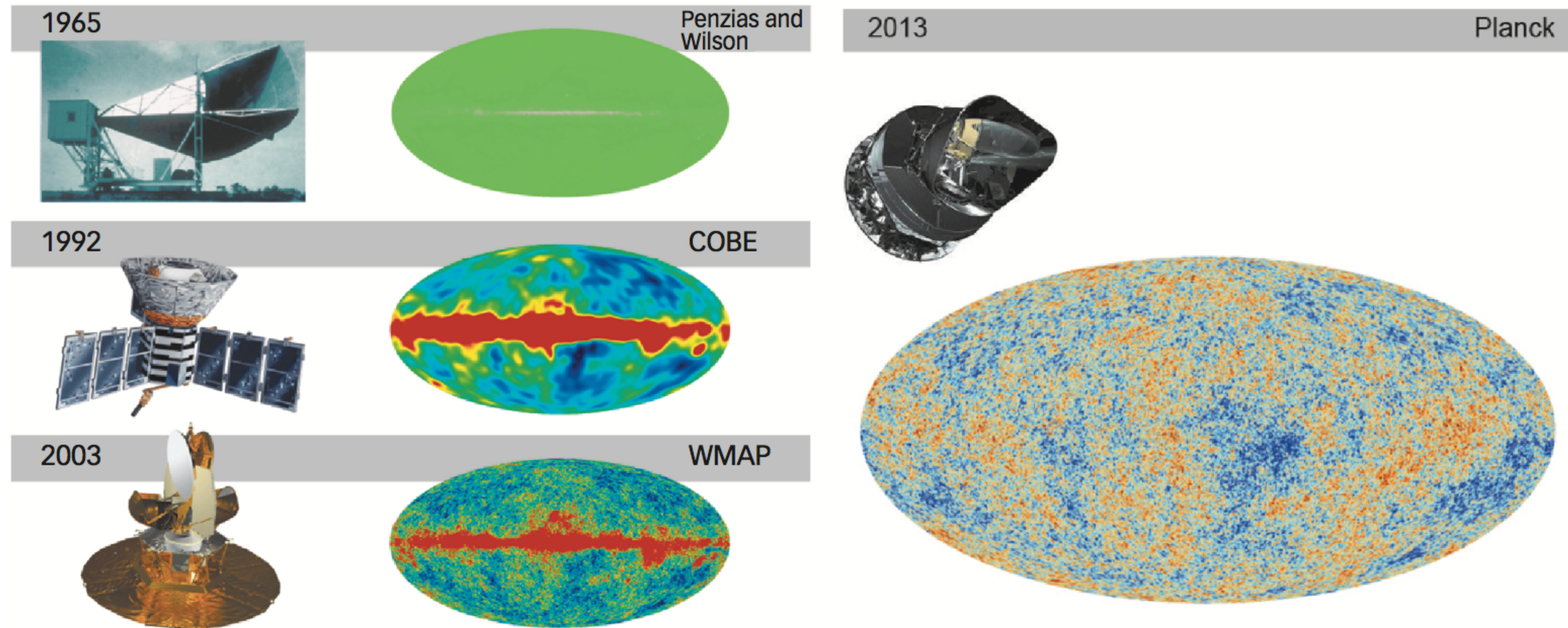


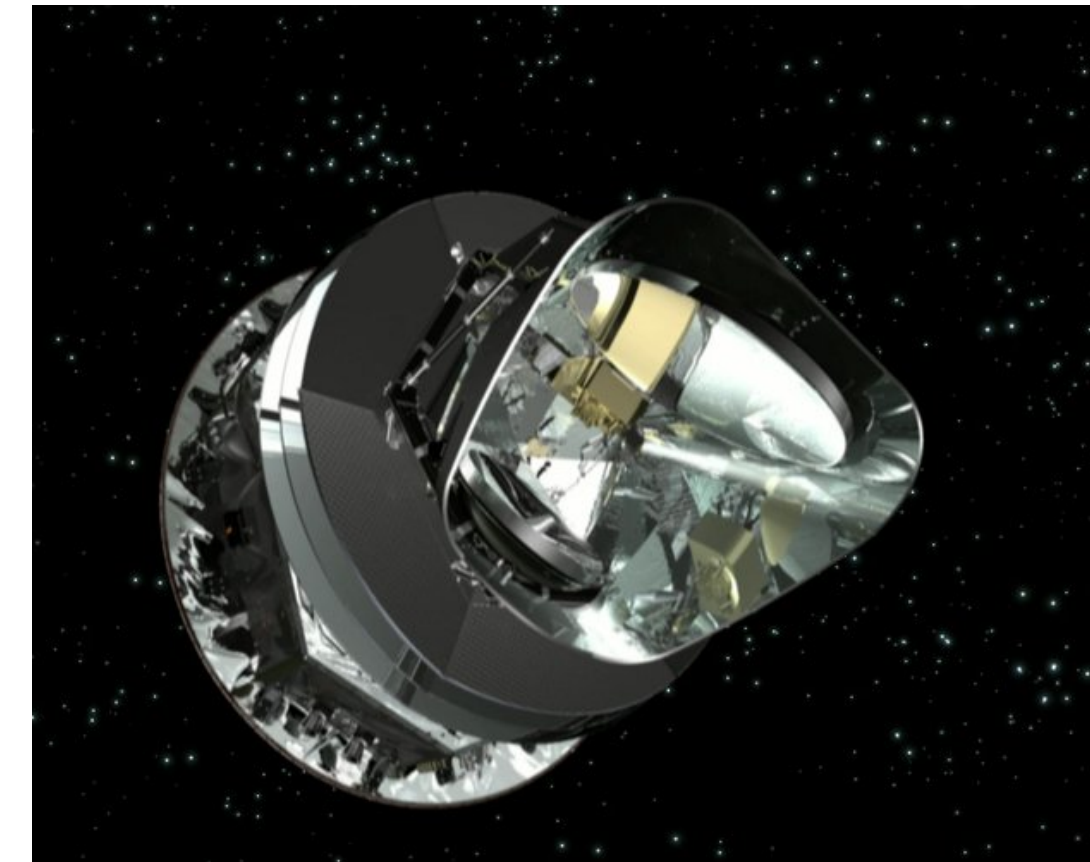
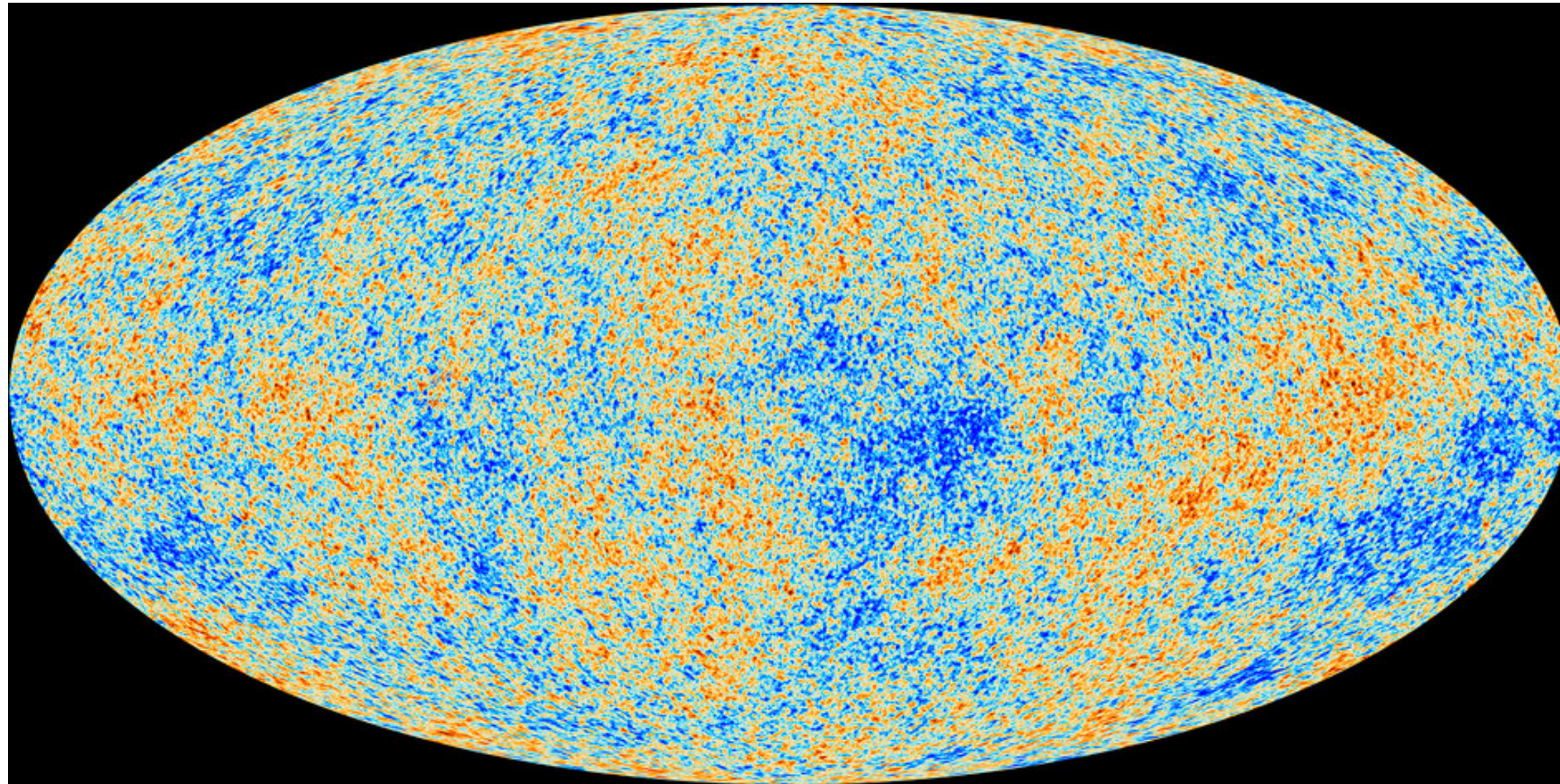
図 5.38 (本文 186 ページ)

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**

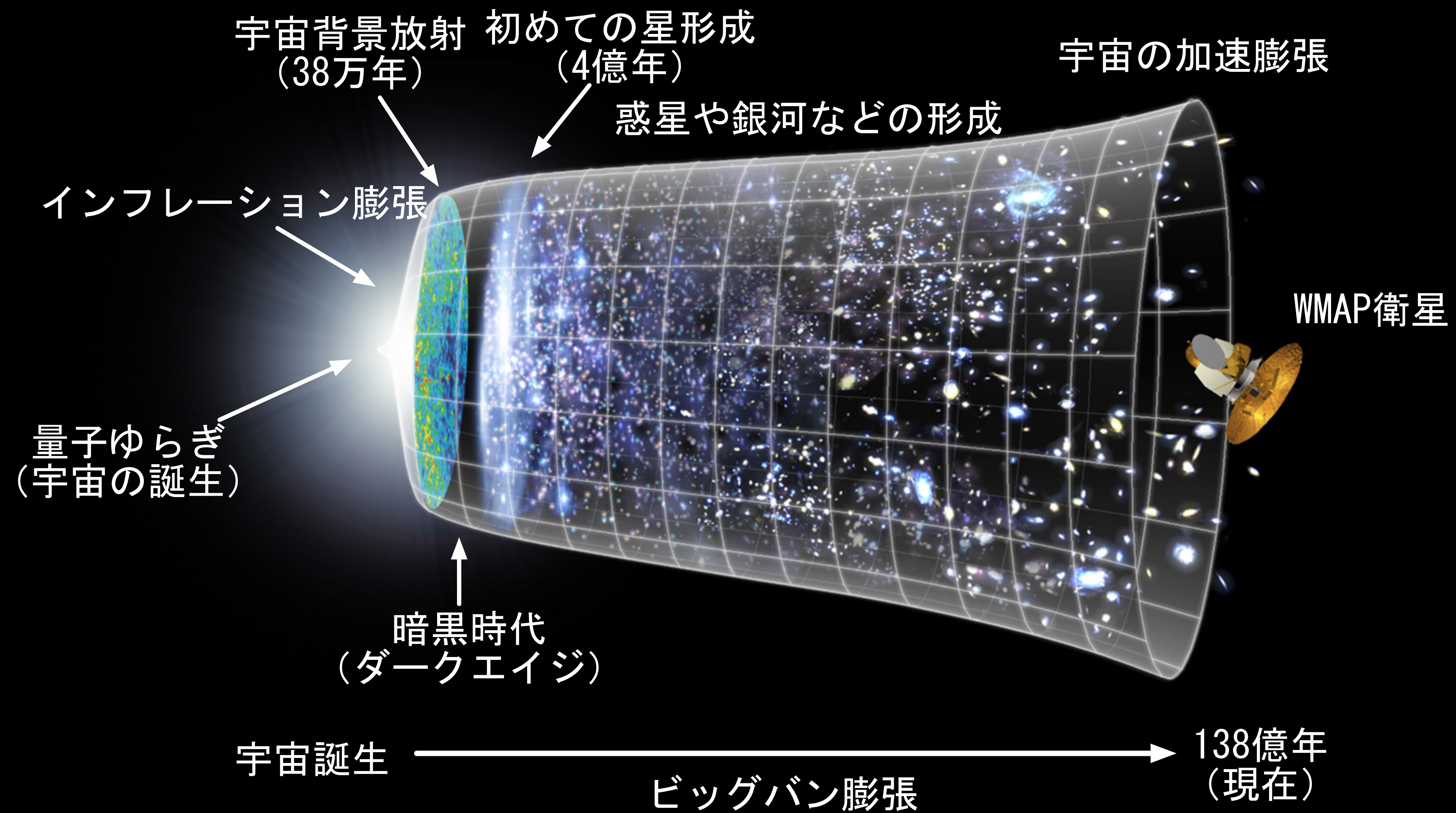
宇宙の年齢は $138 \pm 0.5$ 億年, と報告

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

**$2.72548 \pm 0.00057$  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

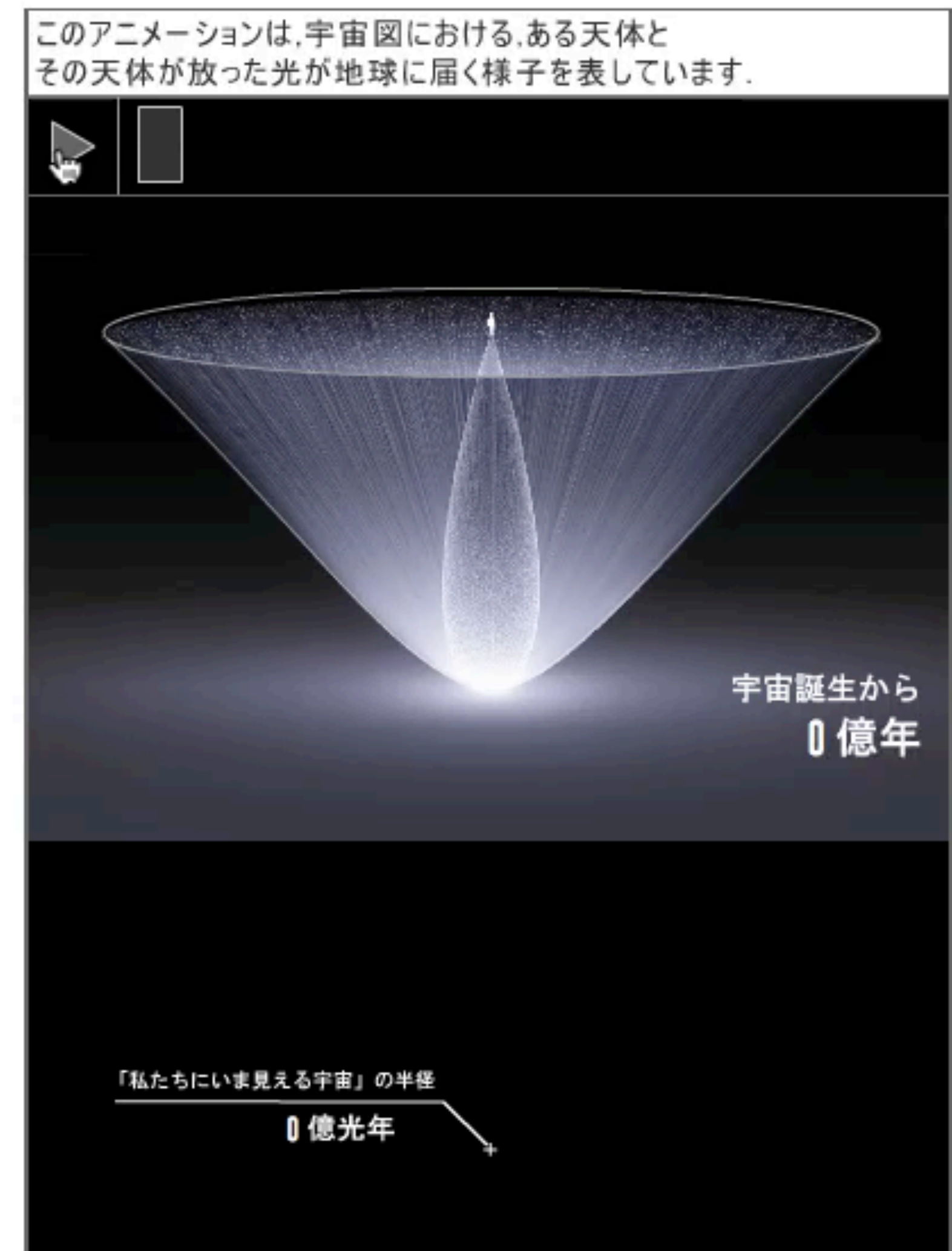
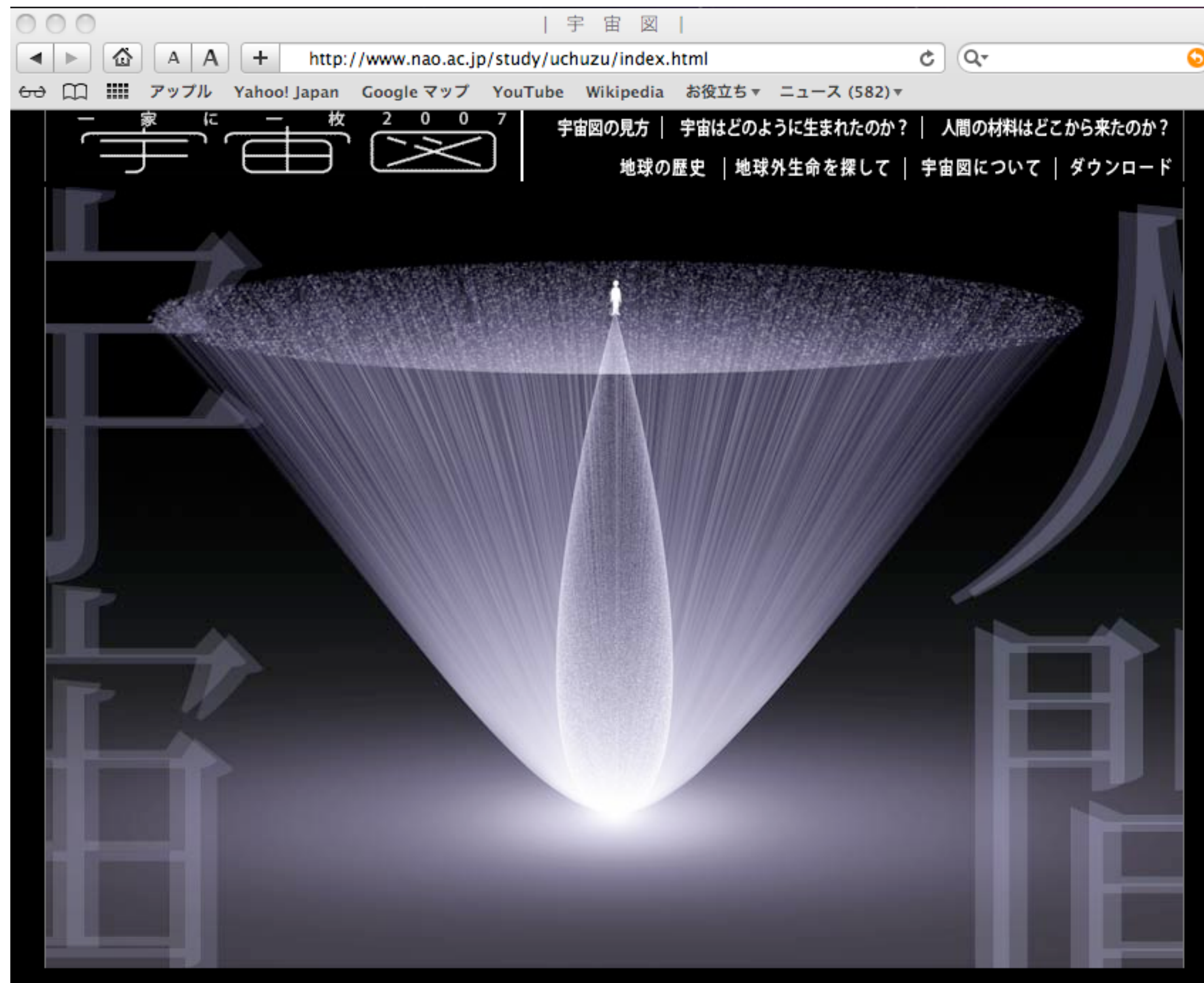
加速膨張の原因？

ダークエイジ問題

初代の星はどうやってできた？

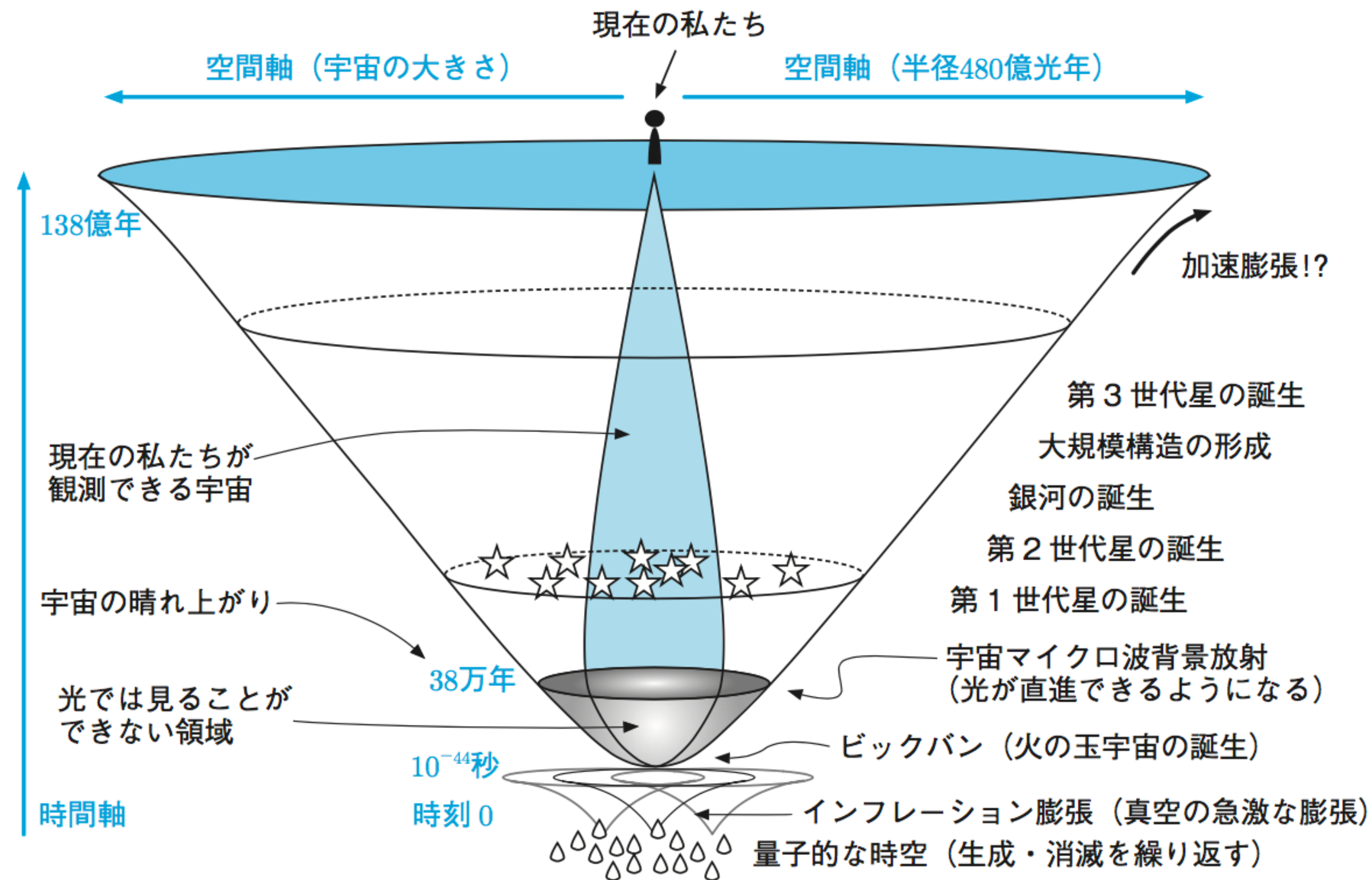


# 「一家に一枚 宇宙図」の見方



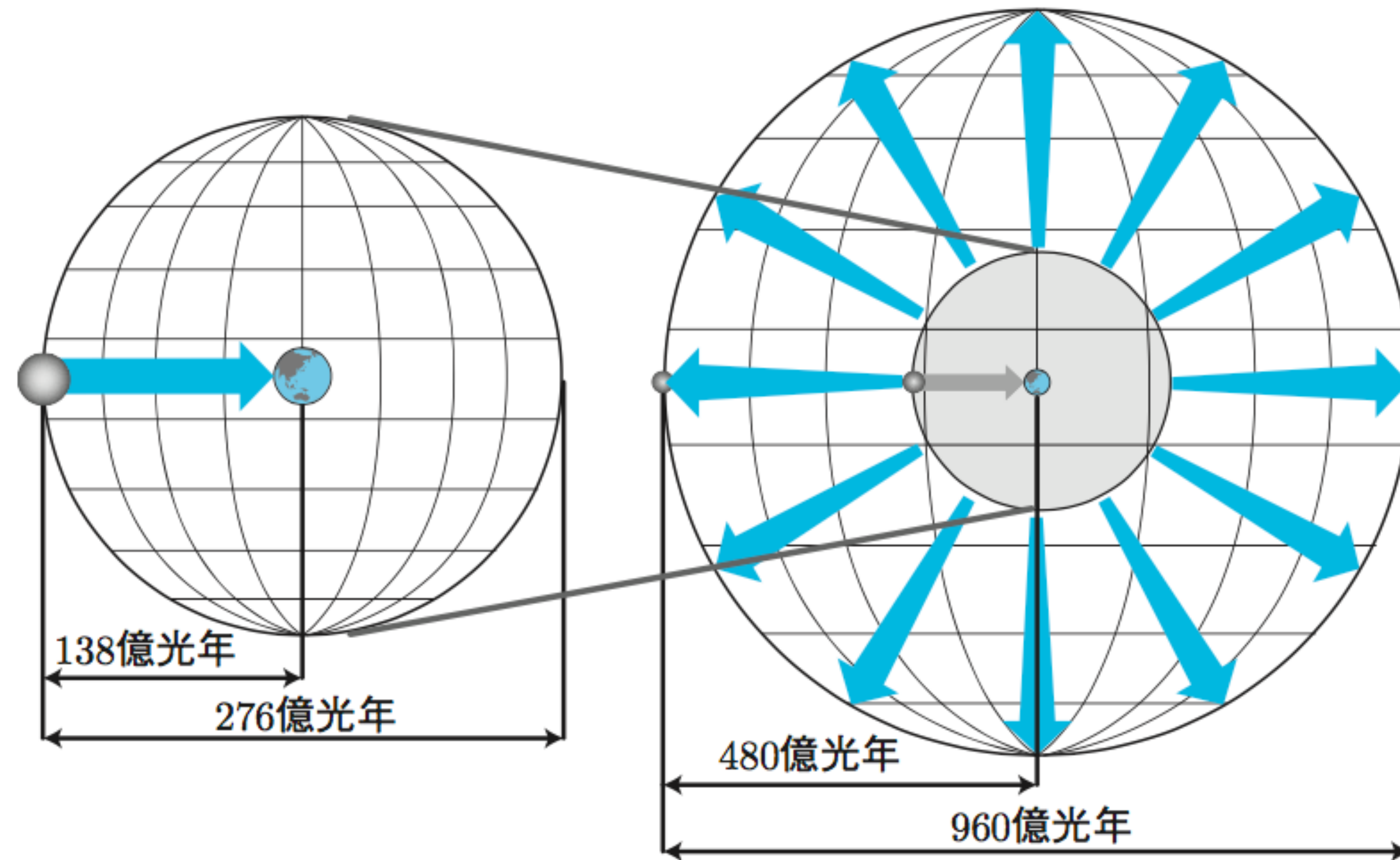


# 宇宙図



**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ので，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。



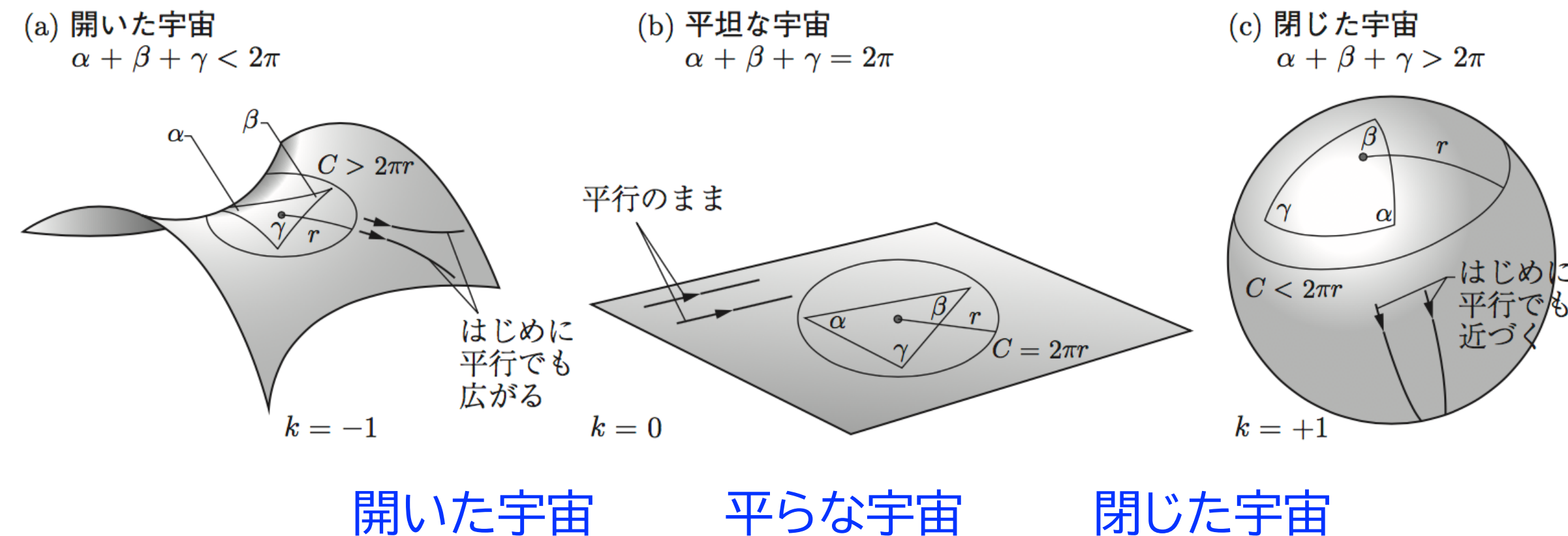
# ビッグバン宇宙モデルの問題点

- (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)

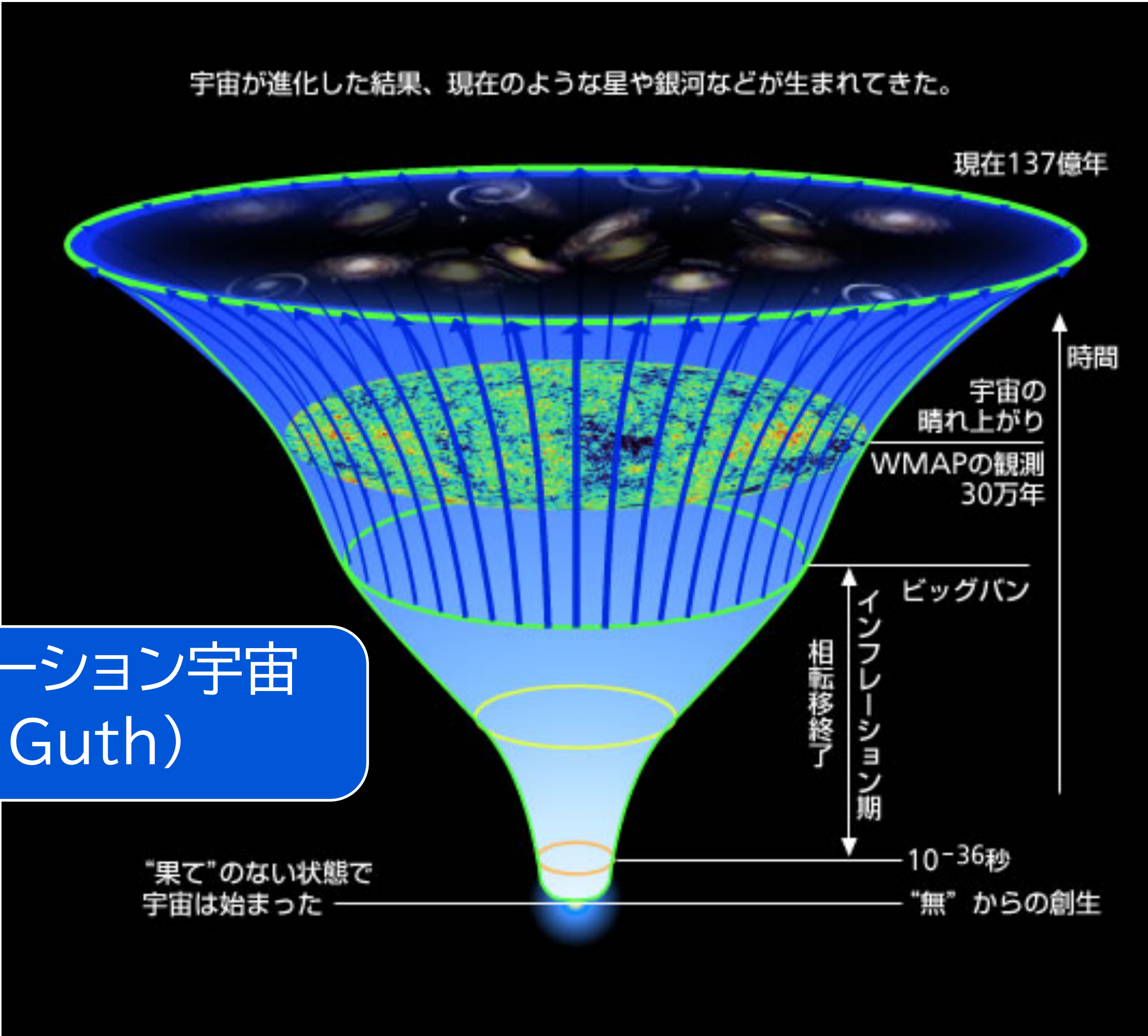
宇宙の初期に急激な膨張があった, と考える



初期の宇宙は  
指数関数的膨張  
(佐藤勝彦)

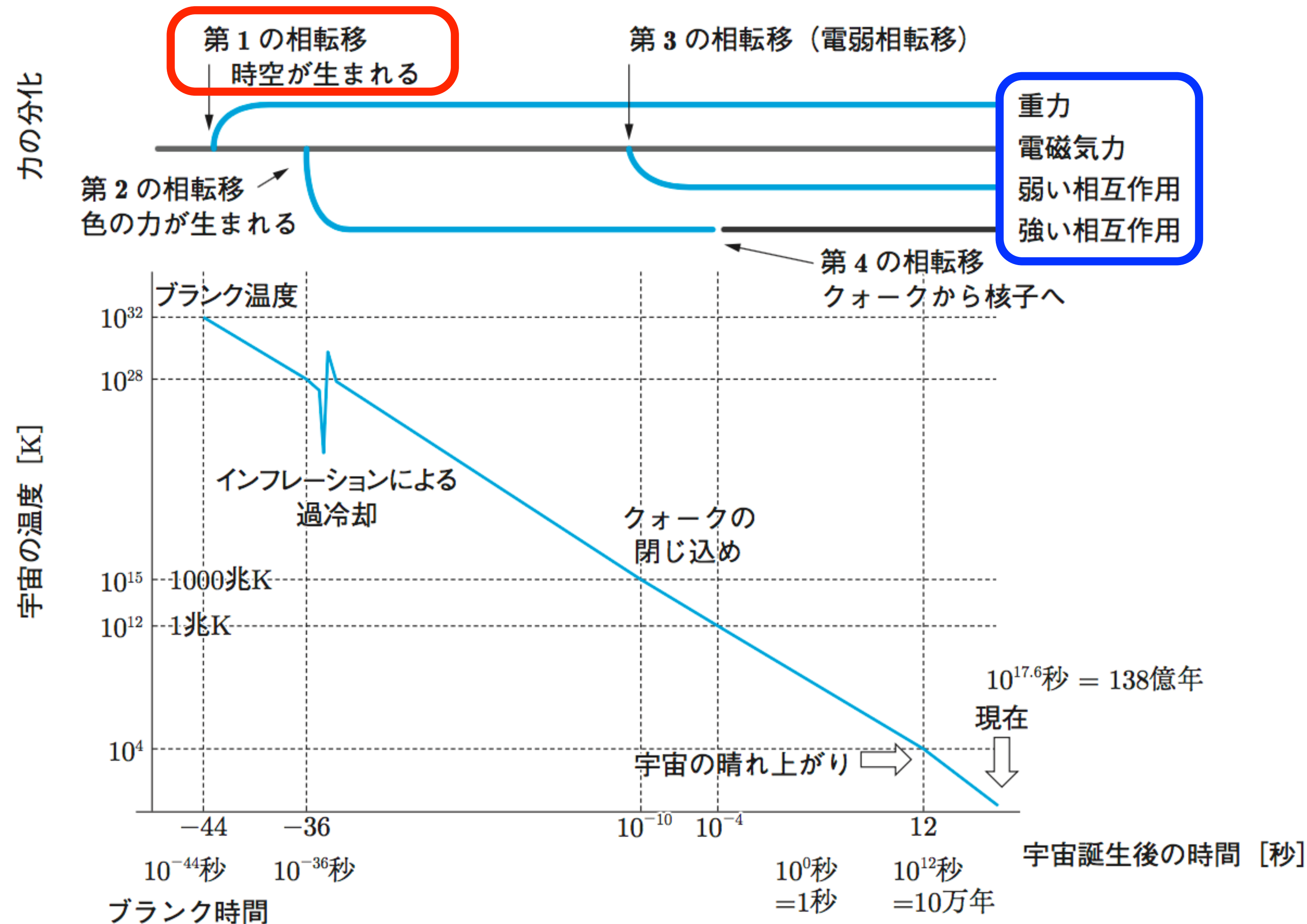


インフレーション宇宙  
(A. Guth)





# 宇宙初期の力の相転移



重力

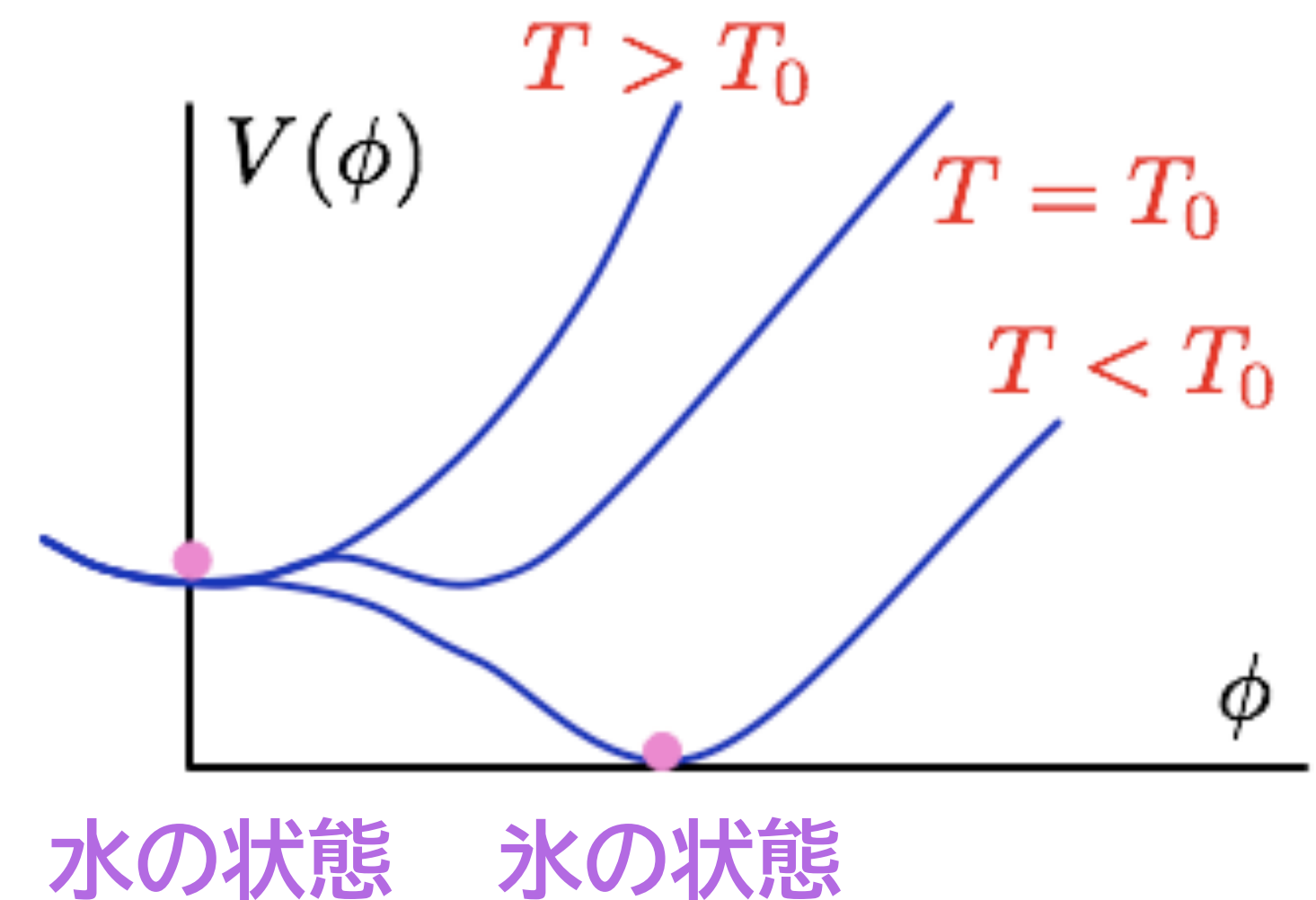
電磁気力

強い力

弱い力

(原子核内の陽子と中性子をつなぐ力)

(ニュートリノをつなぐ力)

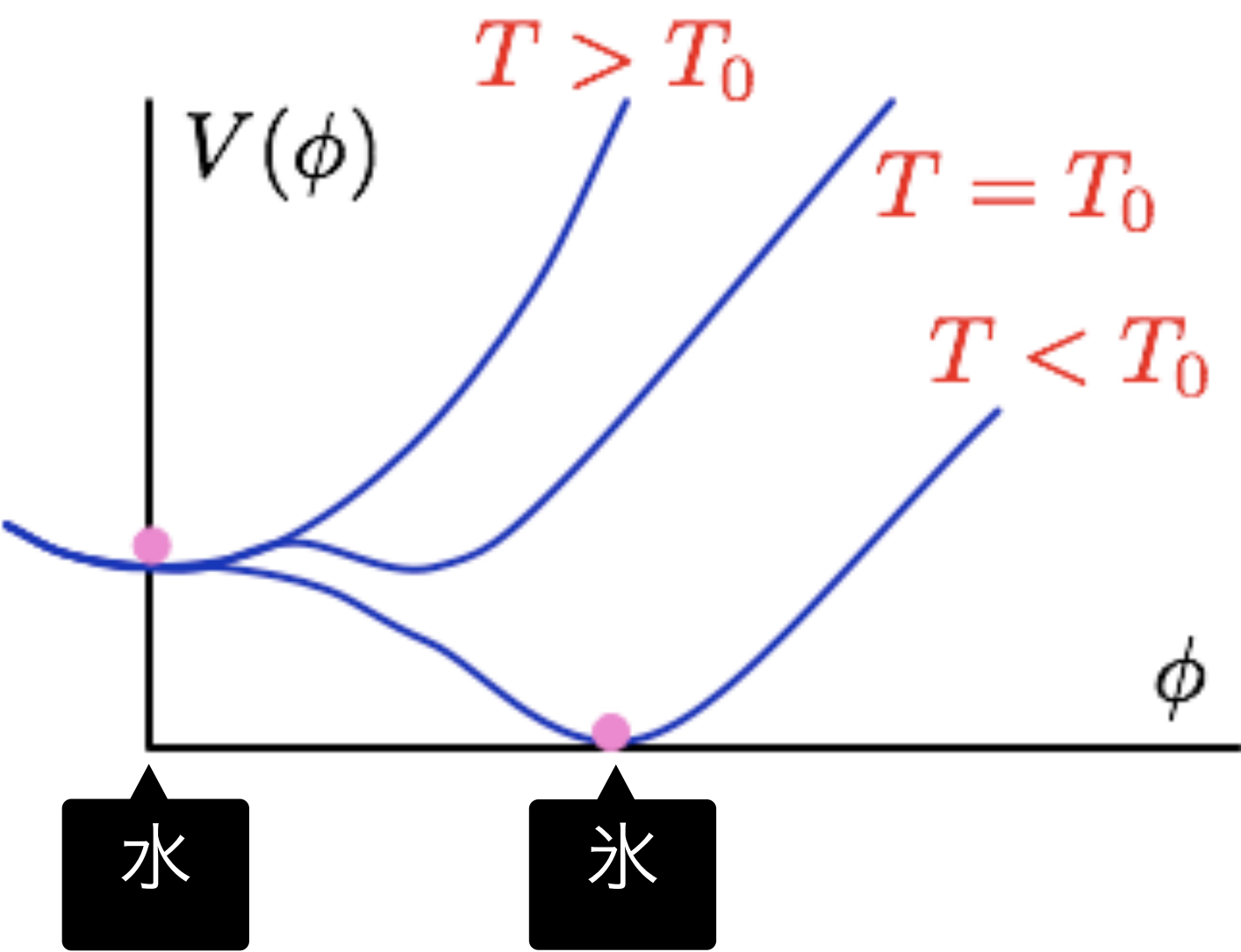


相転移

= 物質の状態が変化すること  
例) 温度が下がると, 水→氷

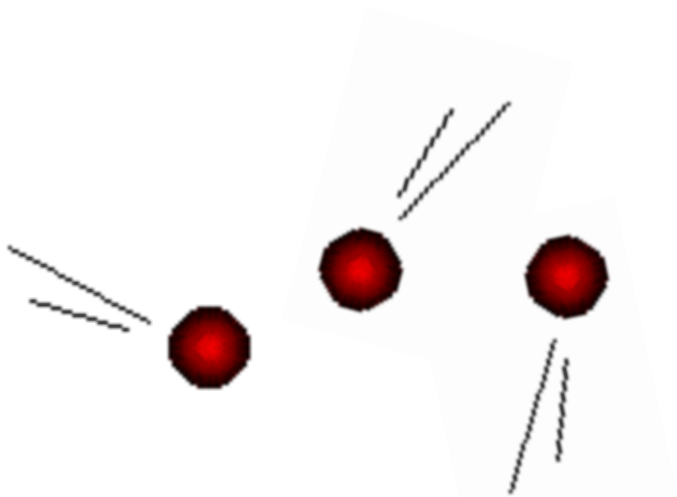


固体から液体へ=**相転移現象**  
phase transition

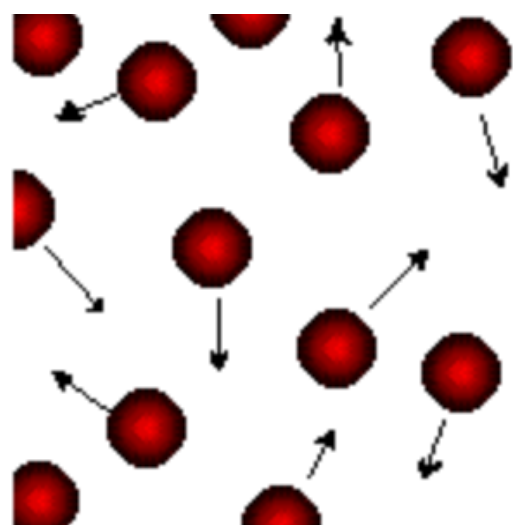


横軸  $\phi$  は、状態を表す変数  
縦軸  $V(\phi)$  は、エネルギー。  
(下へ行くほど安定な坂道)

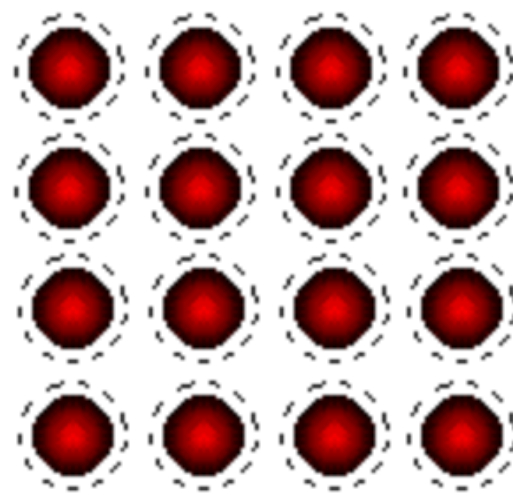
気体（気相）



液体（液相）



固体（固体相）

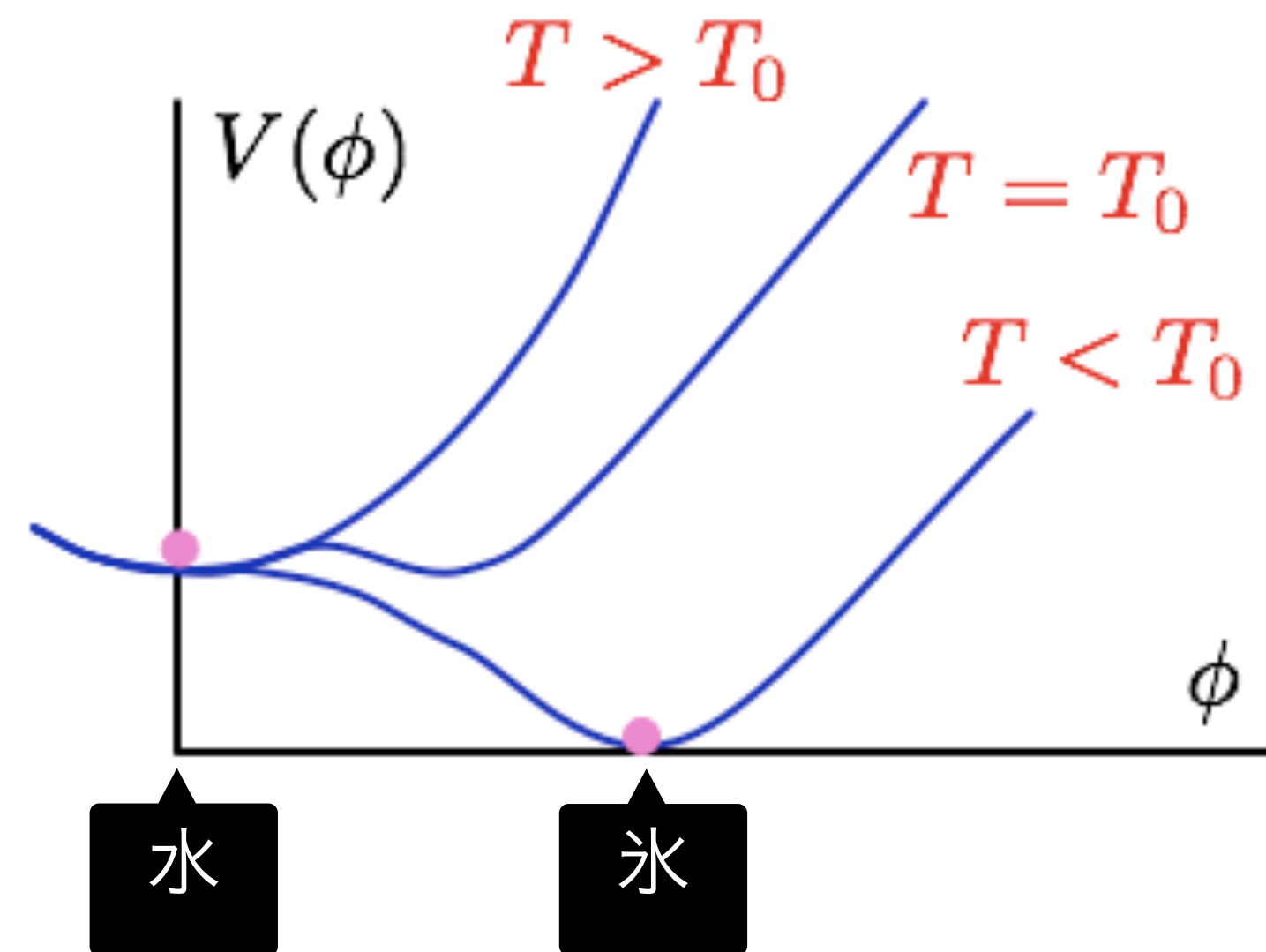




# 相転移は同時に一様に生じるわけではない

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  $\phi$  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)



## 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  $-5^{\circ}\text{C}$  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)

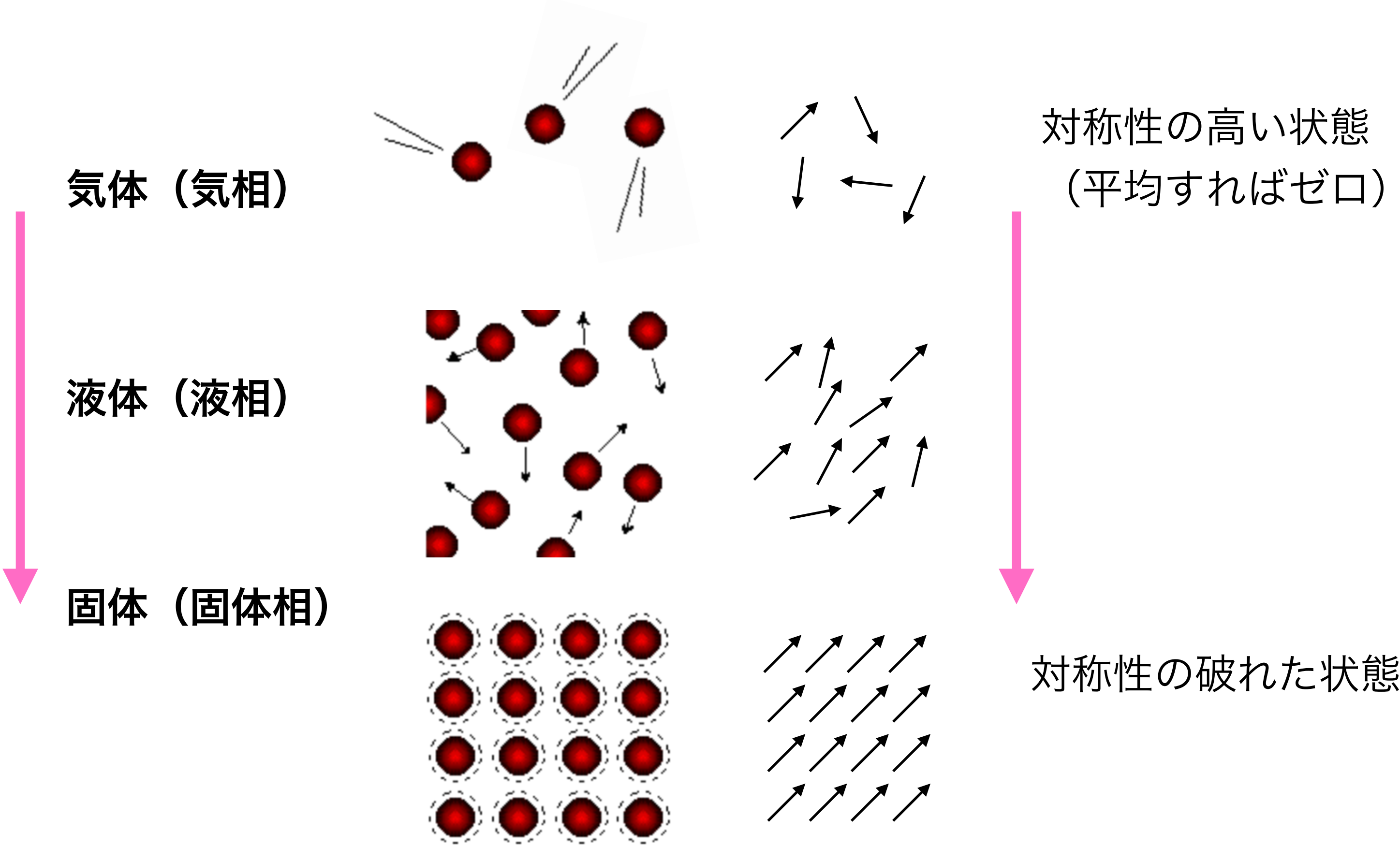
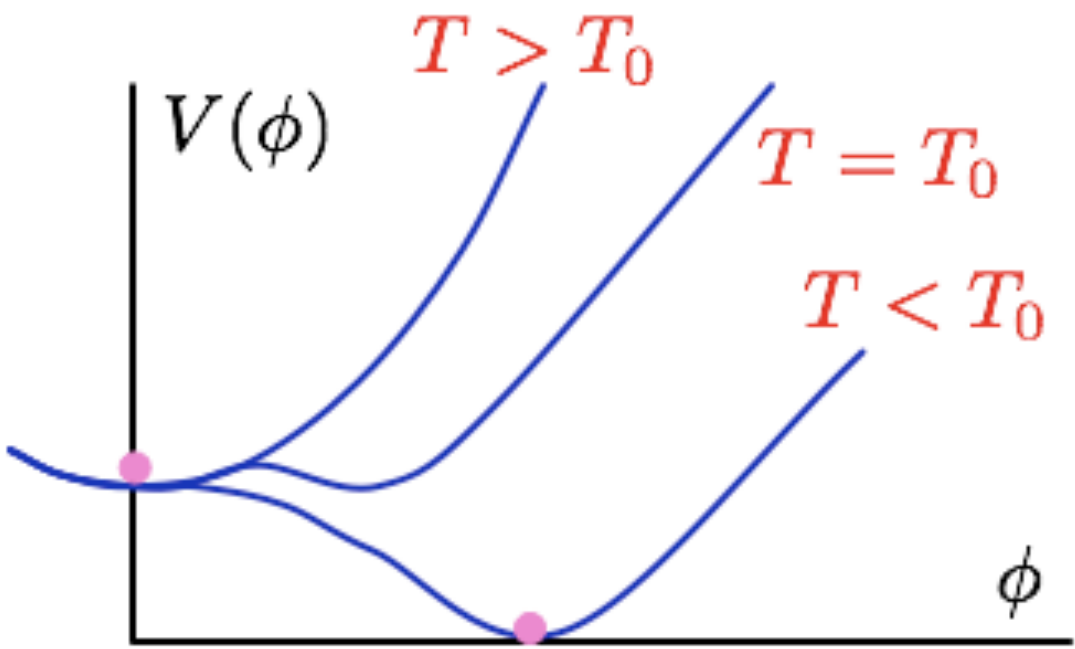
前日の雪が霧氷となって木に残っていました。  
昼過ぎにはなくなっていました。







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

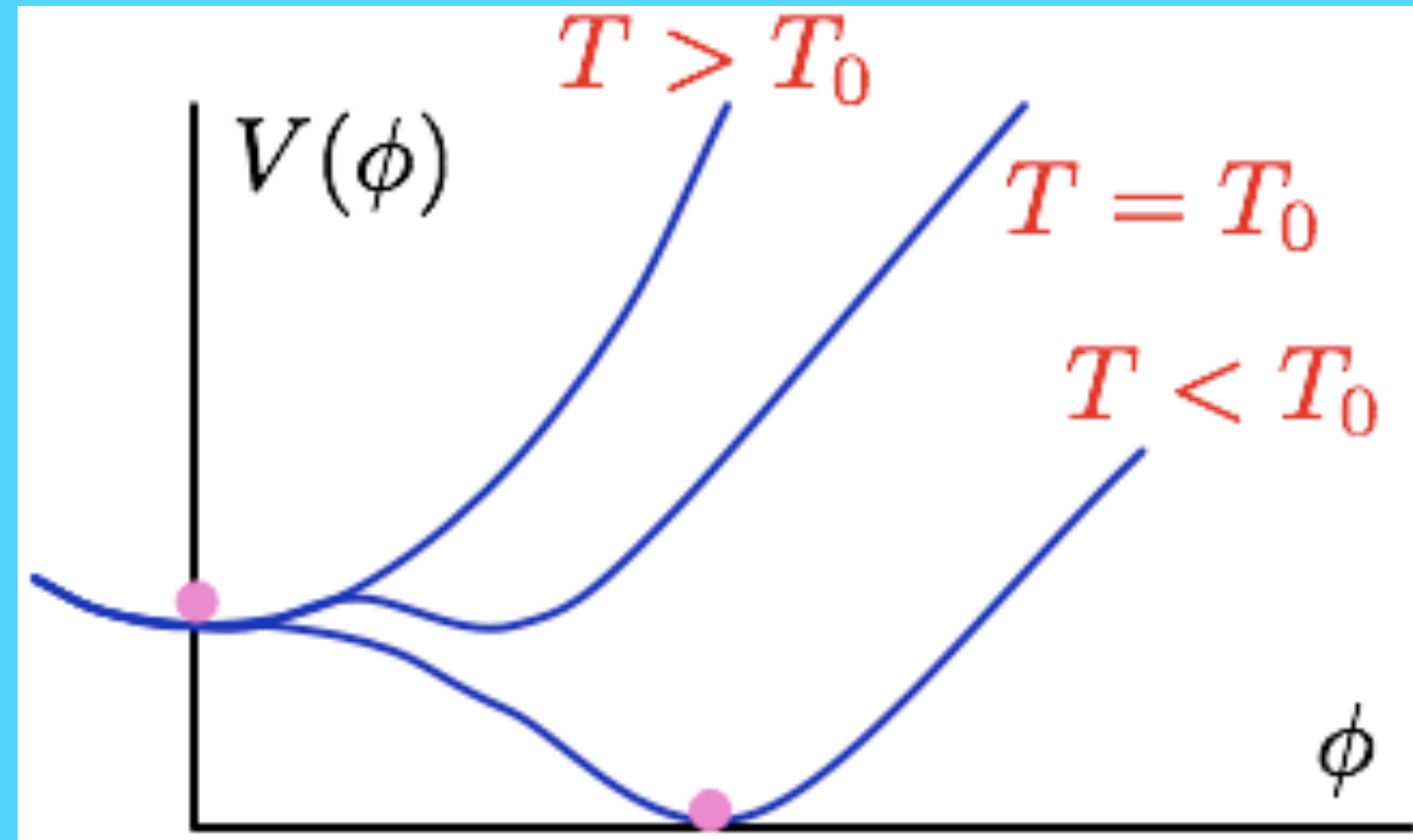
（2008）

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

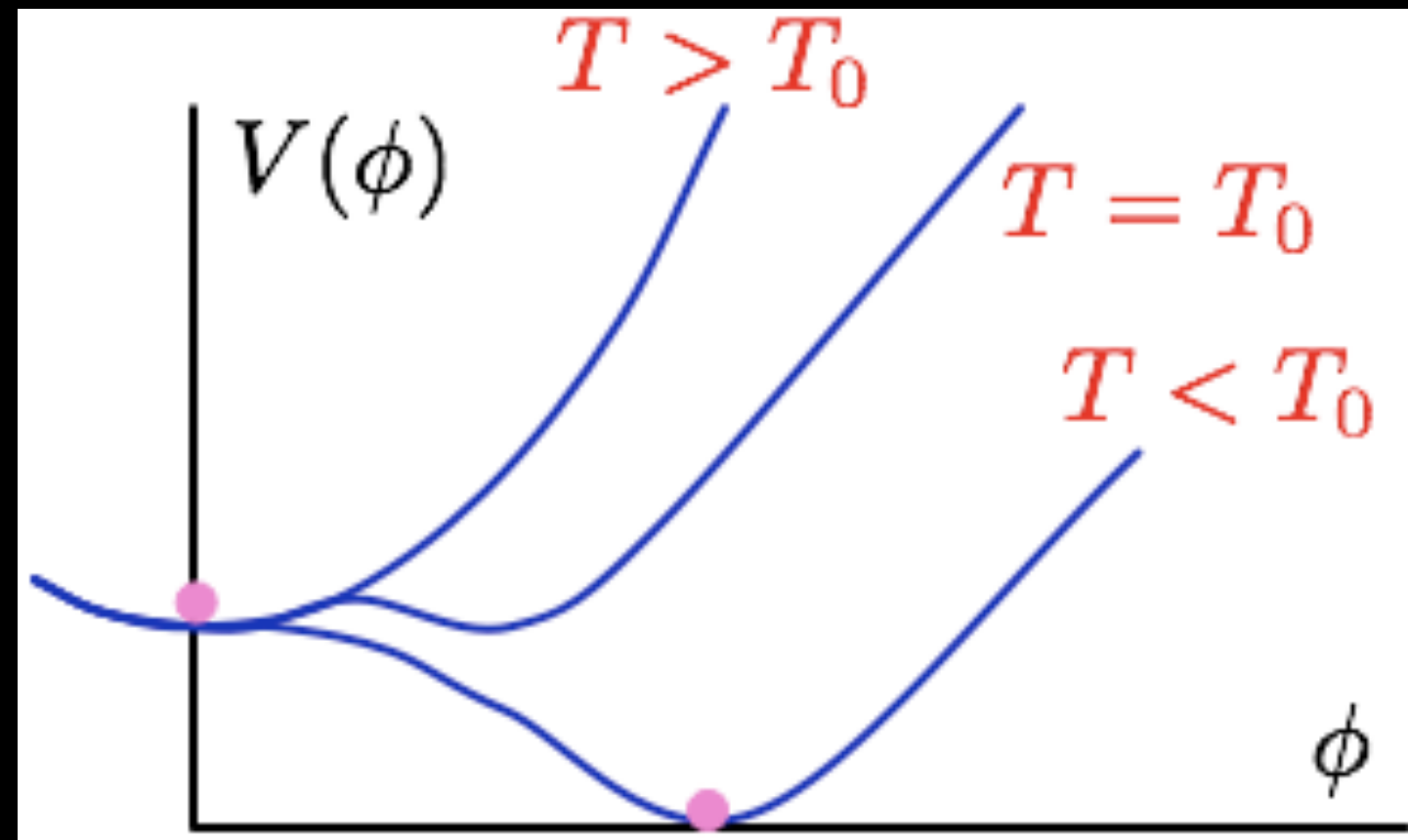


偽真空 真の真空

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

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

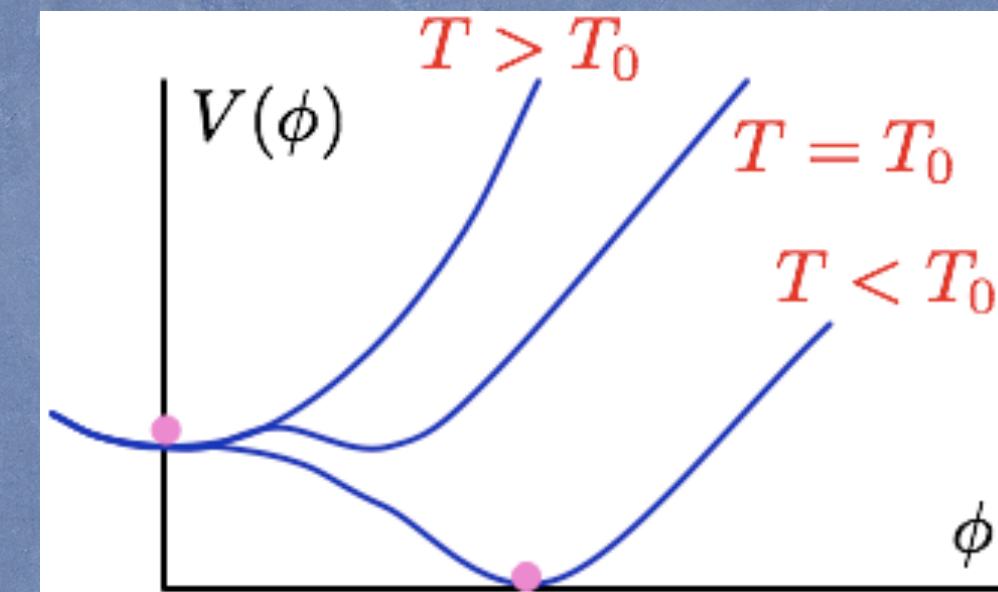
インフレーションを引き起こす場

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

(original model)

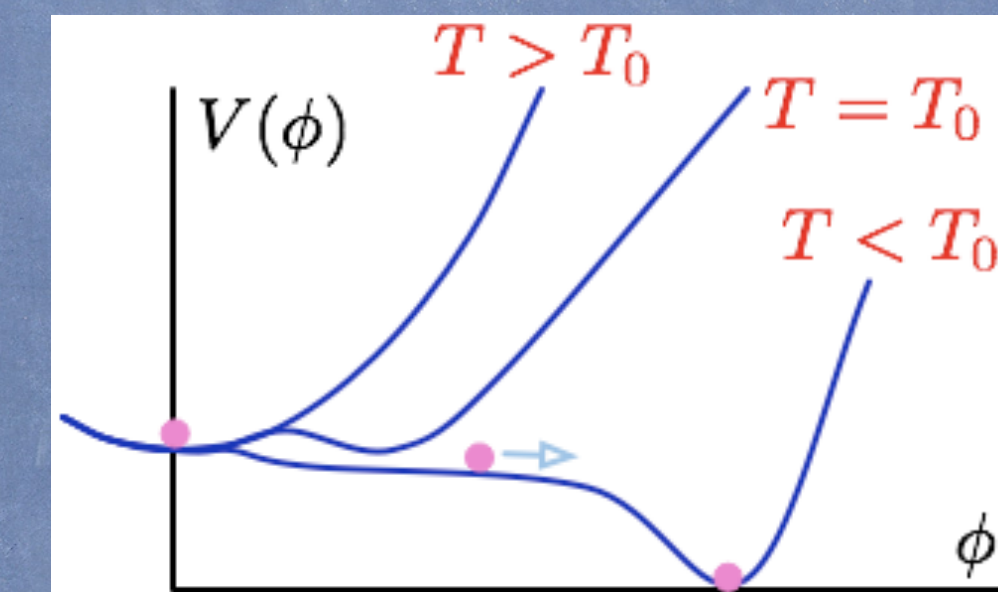
old inflation

Guth 81, Sato 81



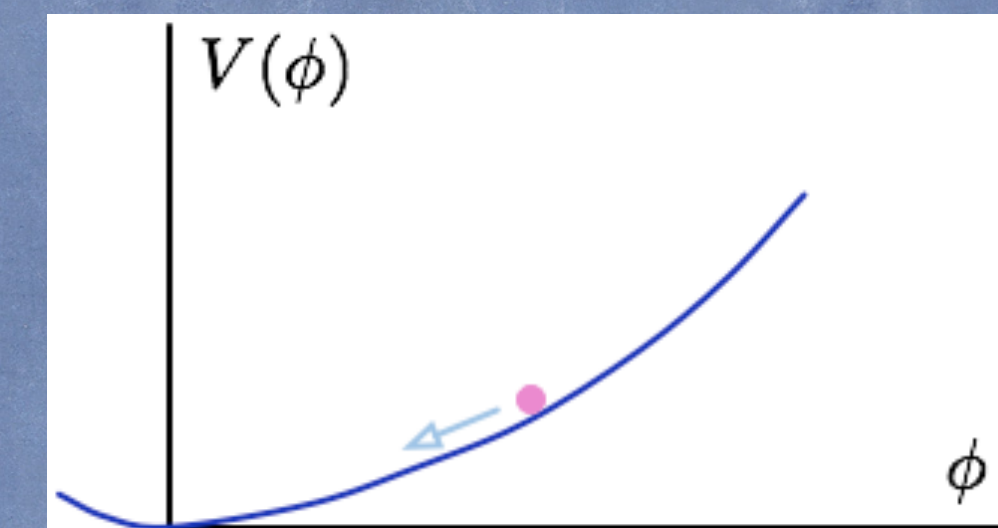
new inflation

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  
R<sup>2</sup>-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）

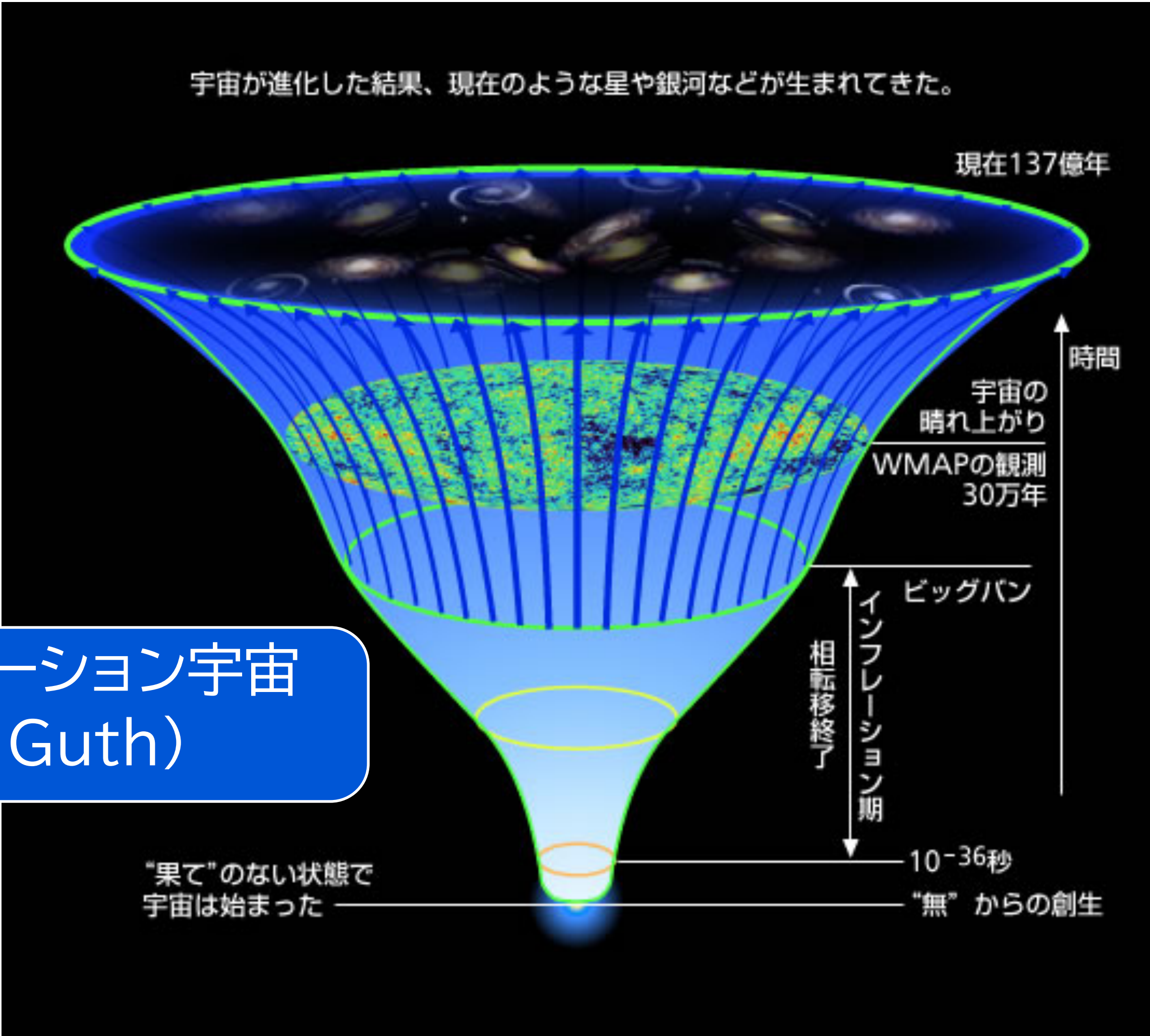
宇宙の初期に急激な膨張があった, と考える



初期の宇宙は  
指数関数的膨張  
(佐藤勝彦)



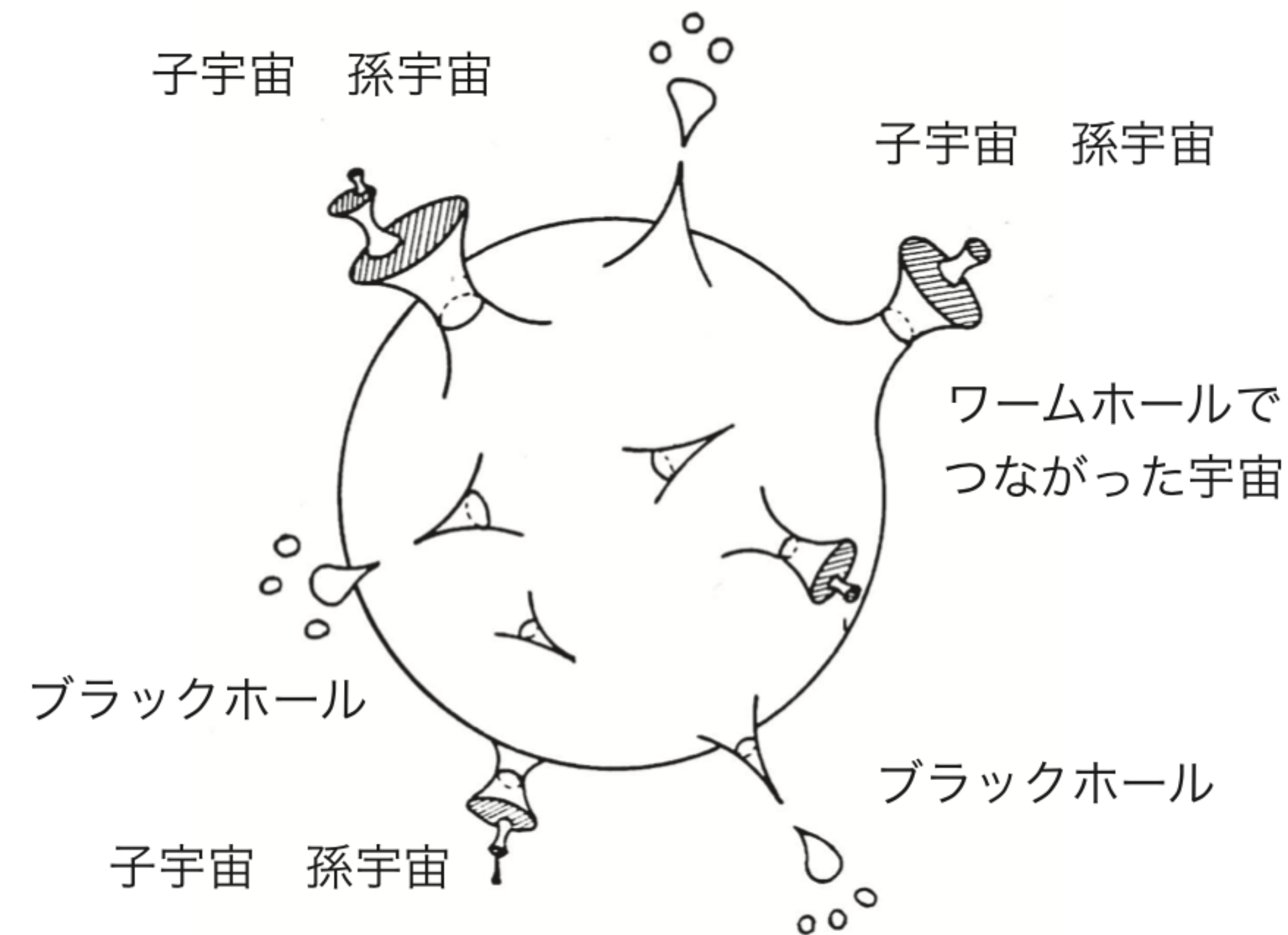
インフレーション宇宙  
(A. Guth)





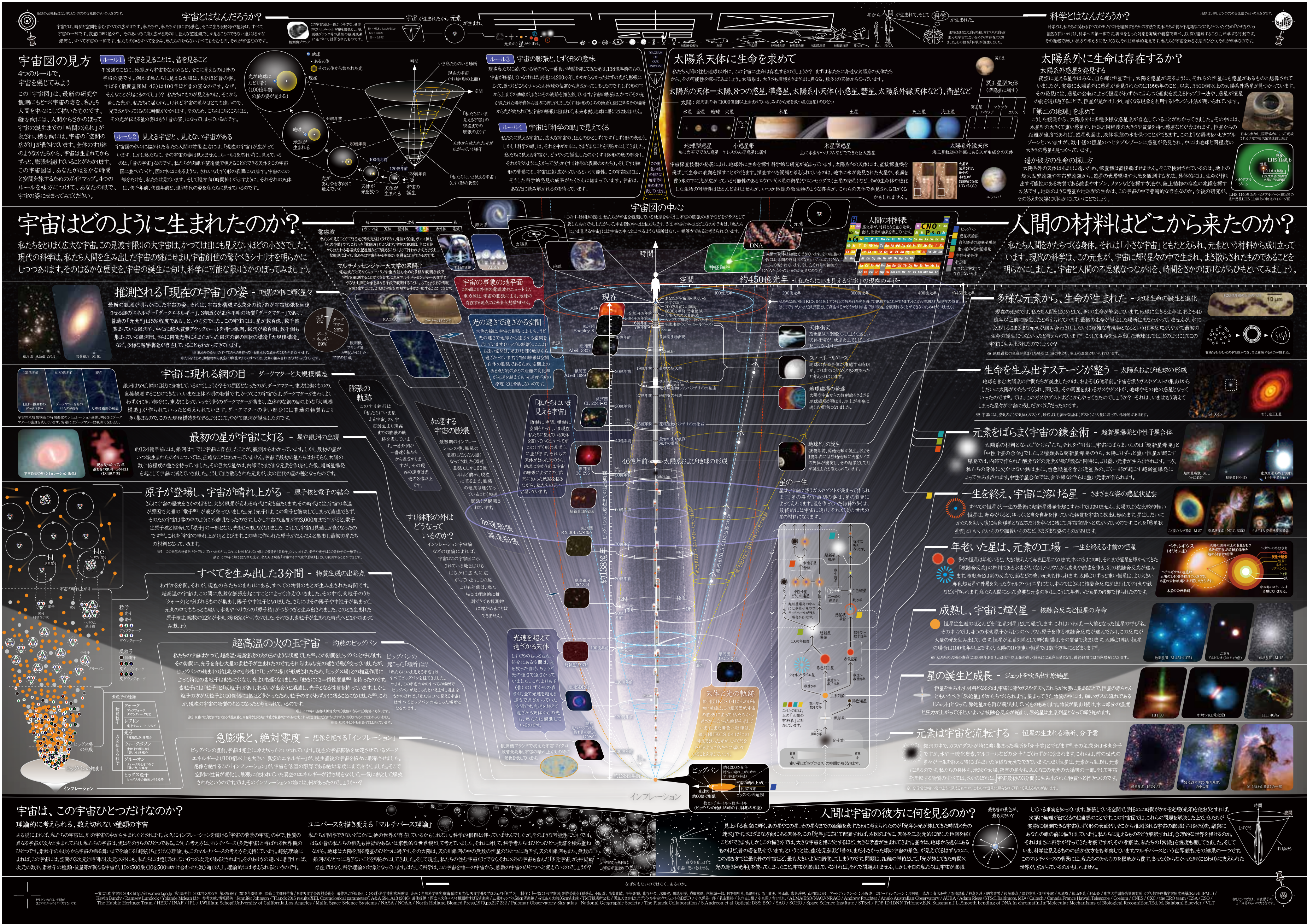
## インフレーション宇宙モデル

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.



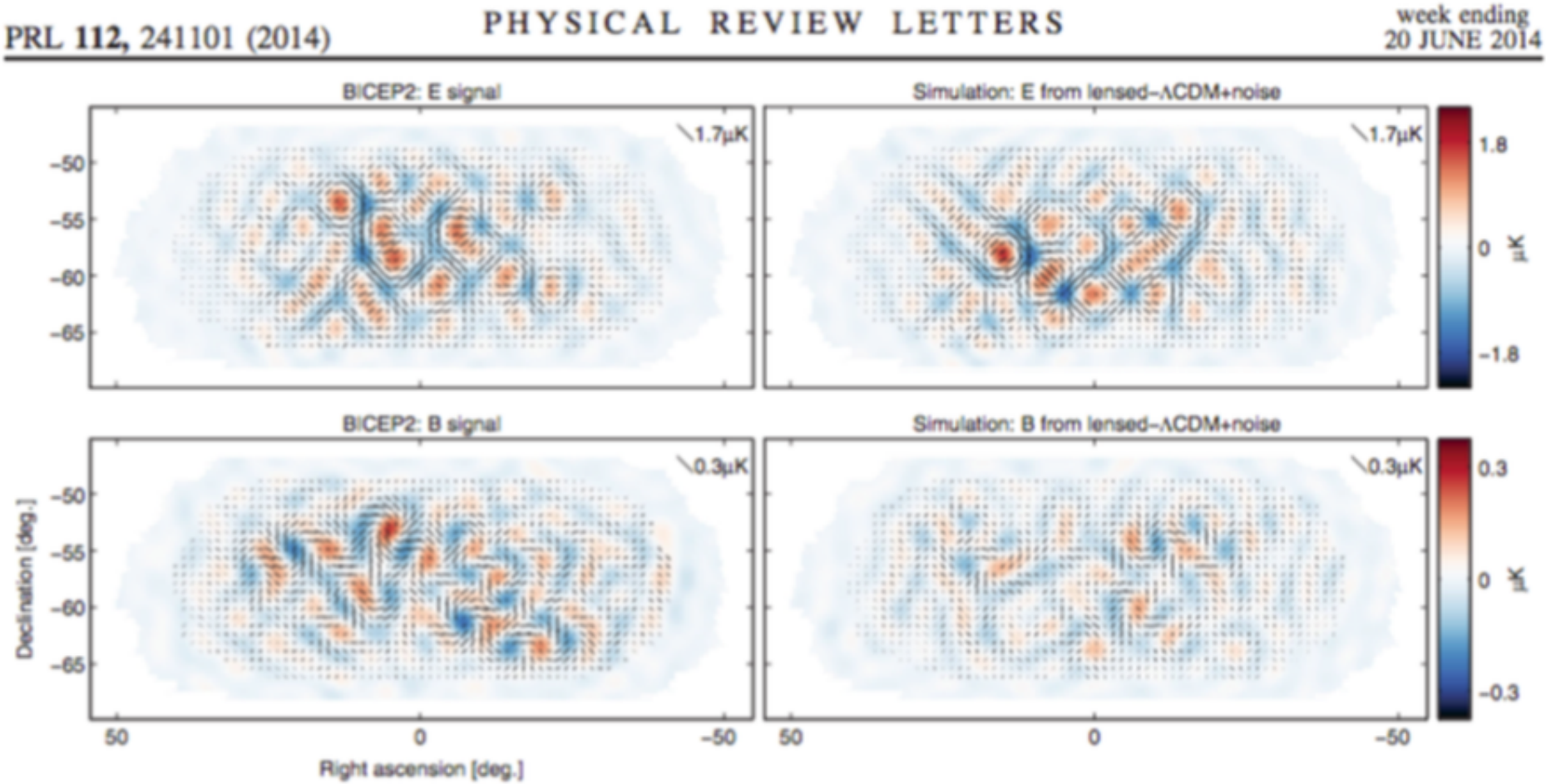
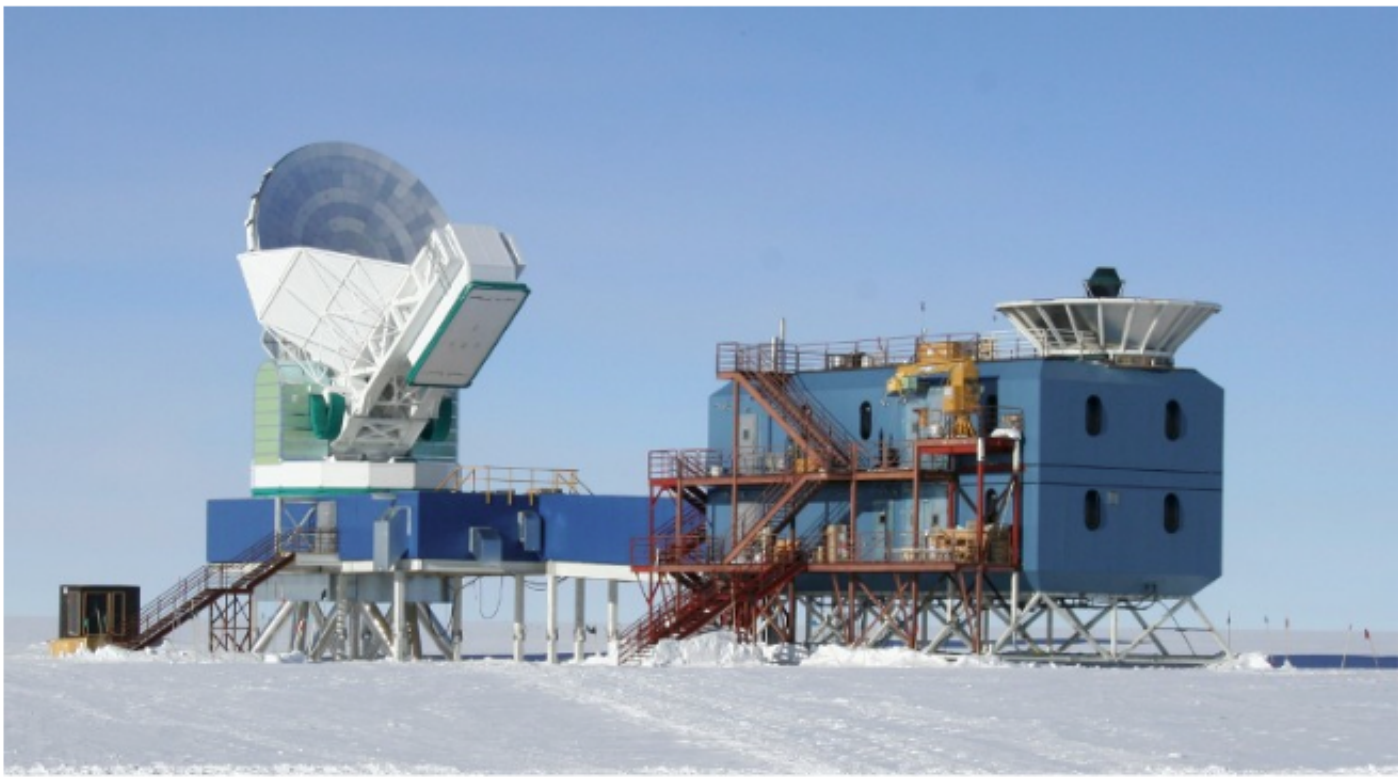


FIG. 3 (color). Left: BICEP2 apodized *E*-mode and *B*-mode maps filtered to  $50 < \ell < 120$ . Right: The equivalent maps for the first of the lensed- $\Lambda$ CDM + noise simulations. The color scale displays the *E*-mode scalar and *B*-mode pseudoscalar patterns while the lines display the equivalent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

\*<sup>11</sup> 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「宇宙背景輻射の観測によって，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<sup>\*11</sup>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．

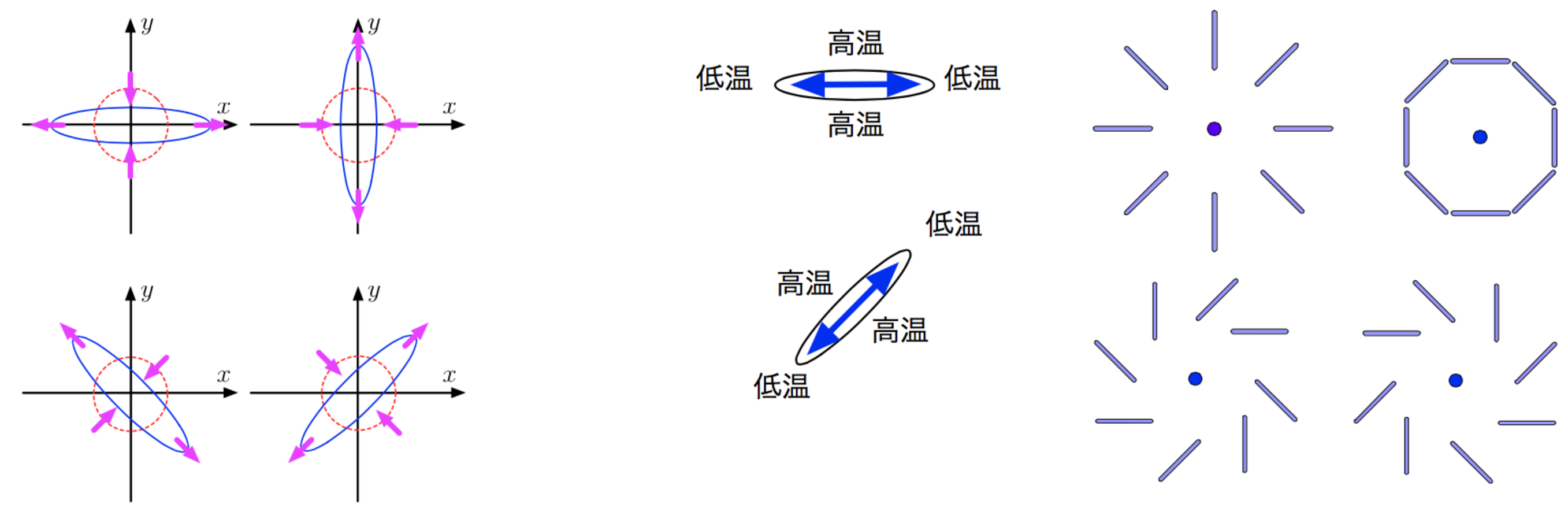


図 5.14: 〔左〕重力波の振動モード．紙面に垂直に波が進んでいるときに，空間を歪ませる方向が 2 つ存在する．〔中〕空間に温度ゆらぎがあれば，時空の振動方向もゆがむ．〔右〕宇宙背景輻射の観測結果に予想される『E モード』（上）と『B モード』（下）．



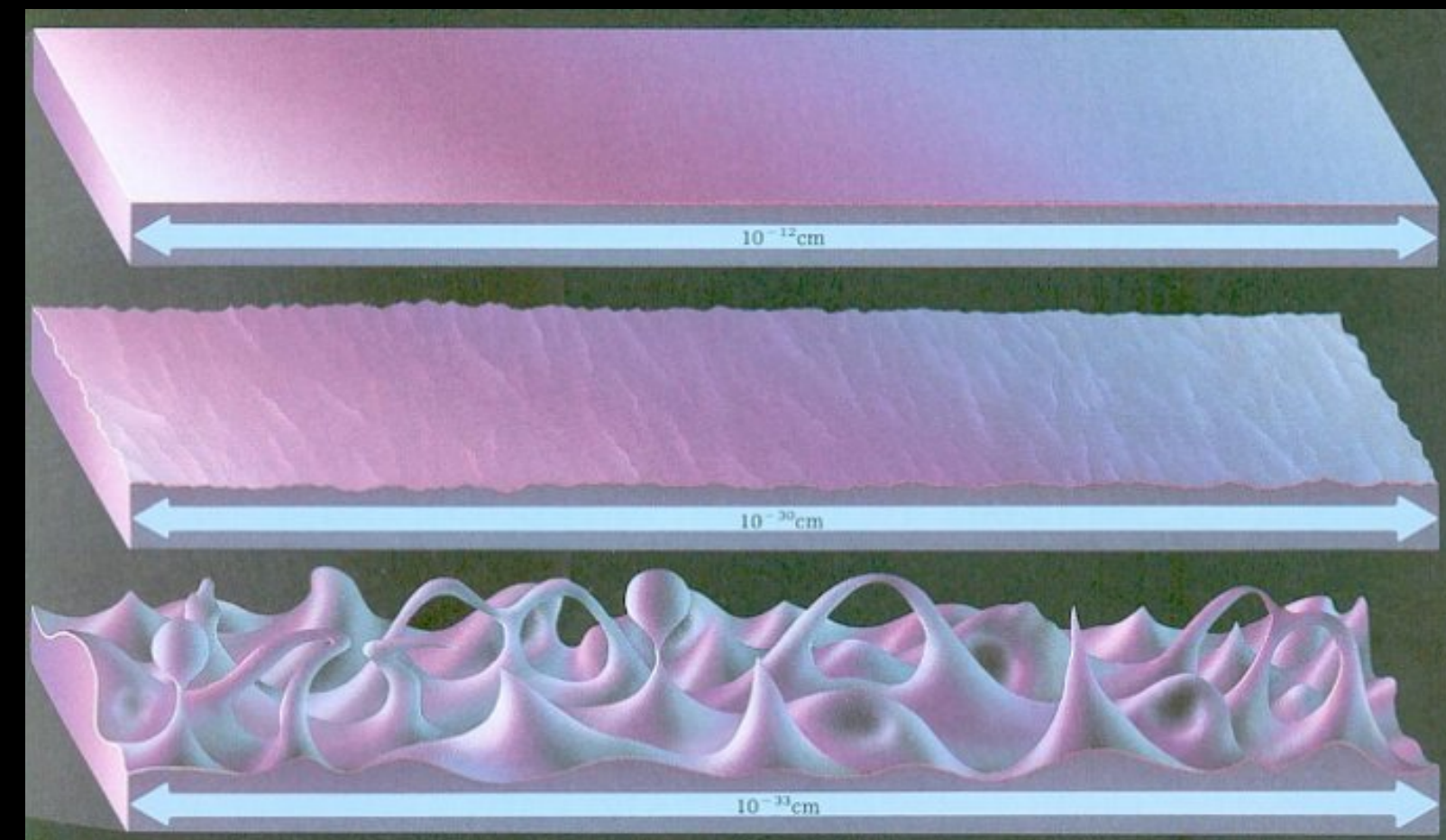
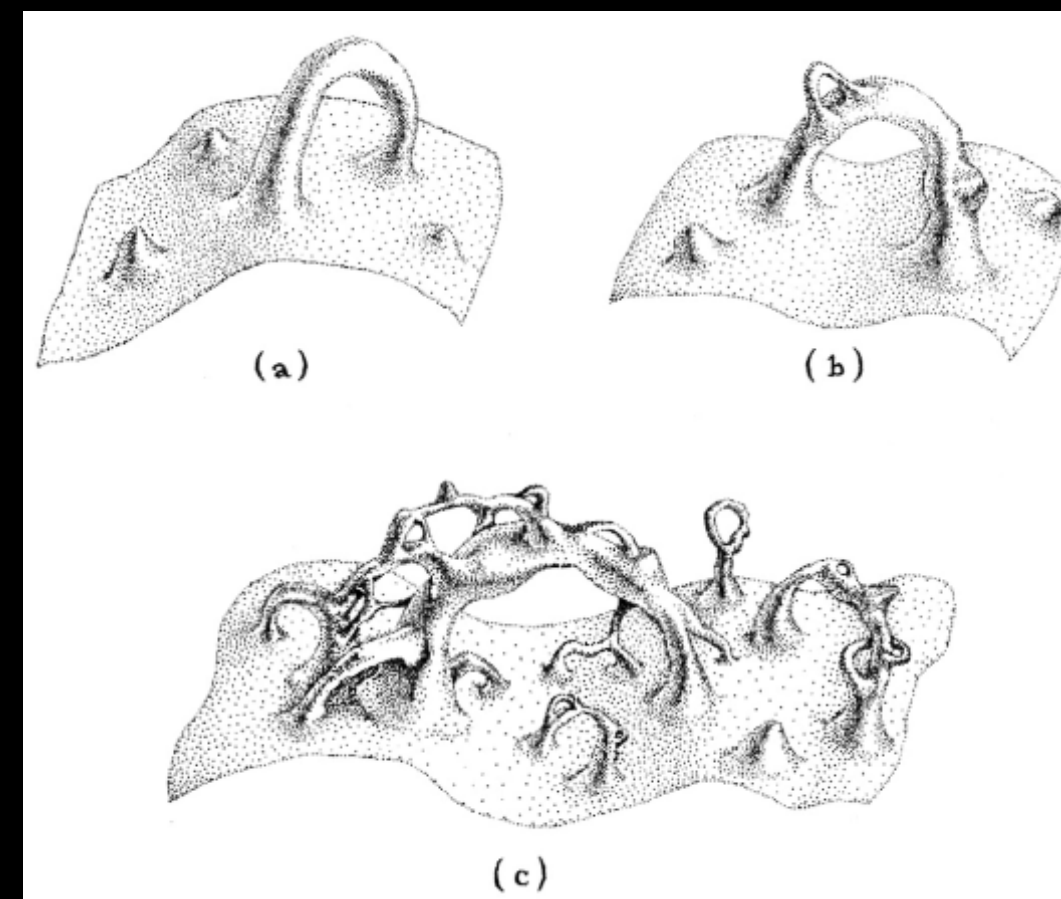


宇宙最前線～137億年の謎～ 宇宙科学の現在（2' 00"）

<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？

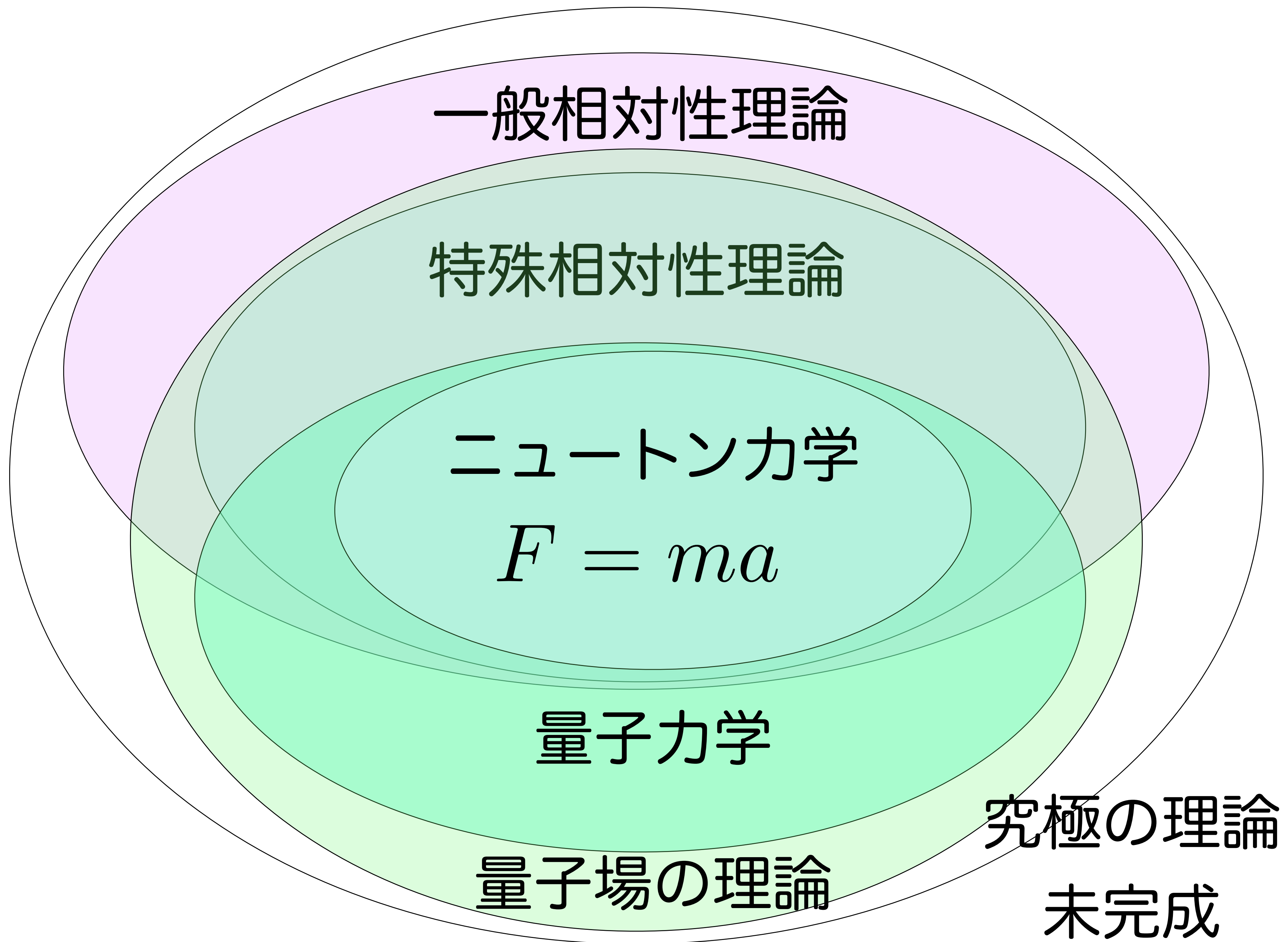


## 無境界仮説による宇宙のはじまりの解釈



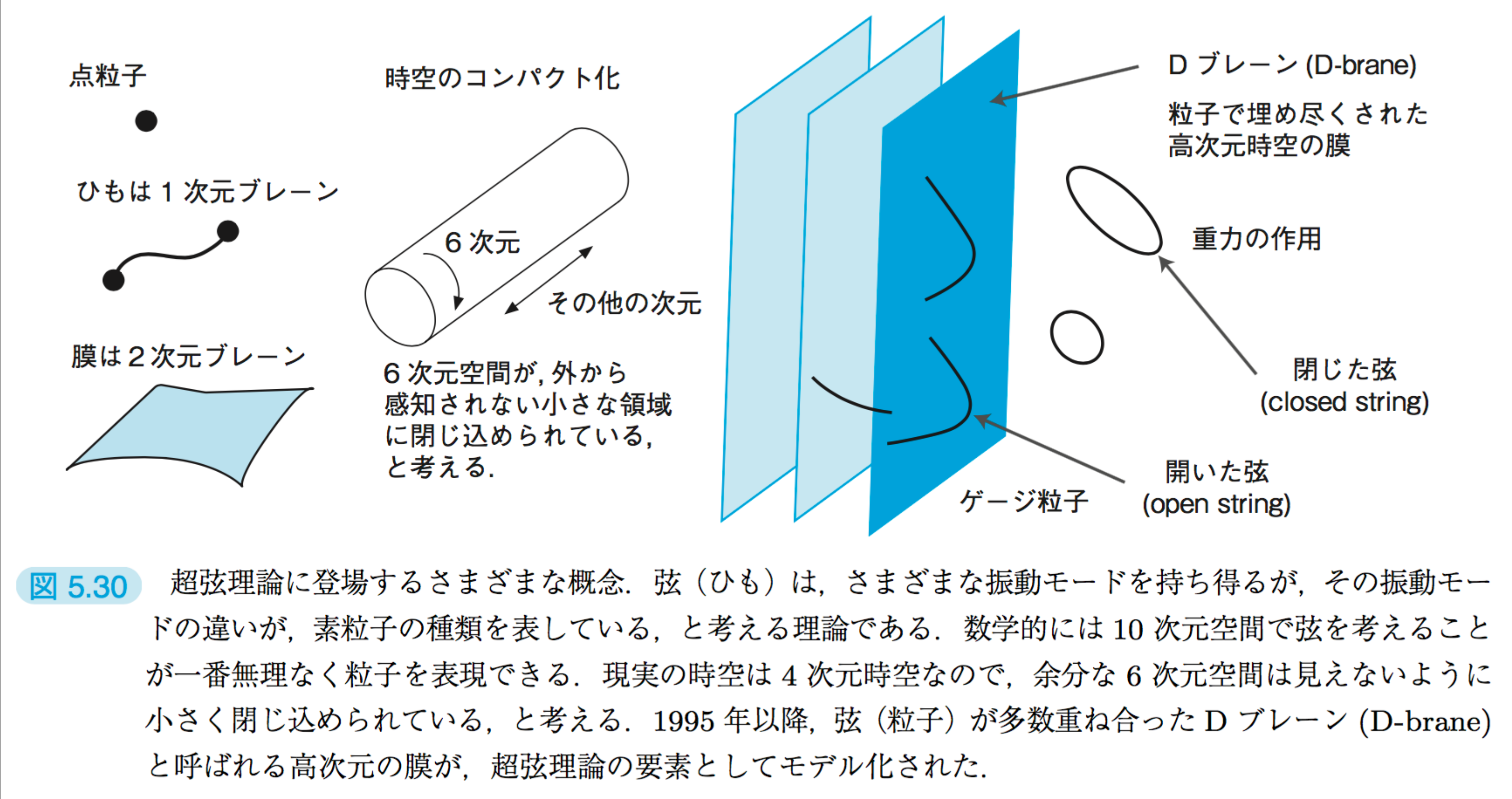
ホーキング、膜宇宙論を語る《2007年、東京大学》 (3) start on click 1'09”







- **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







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。

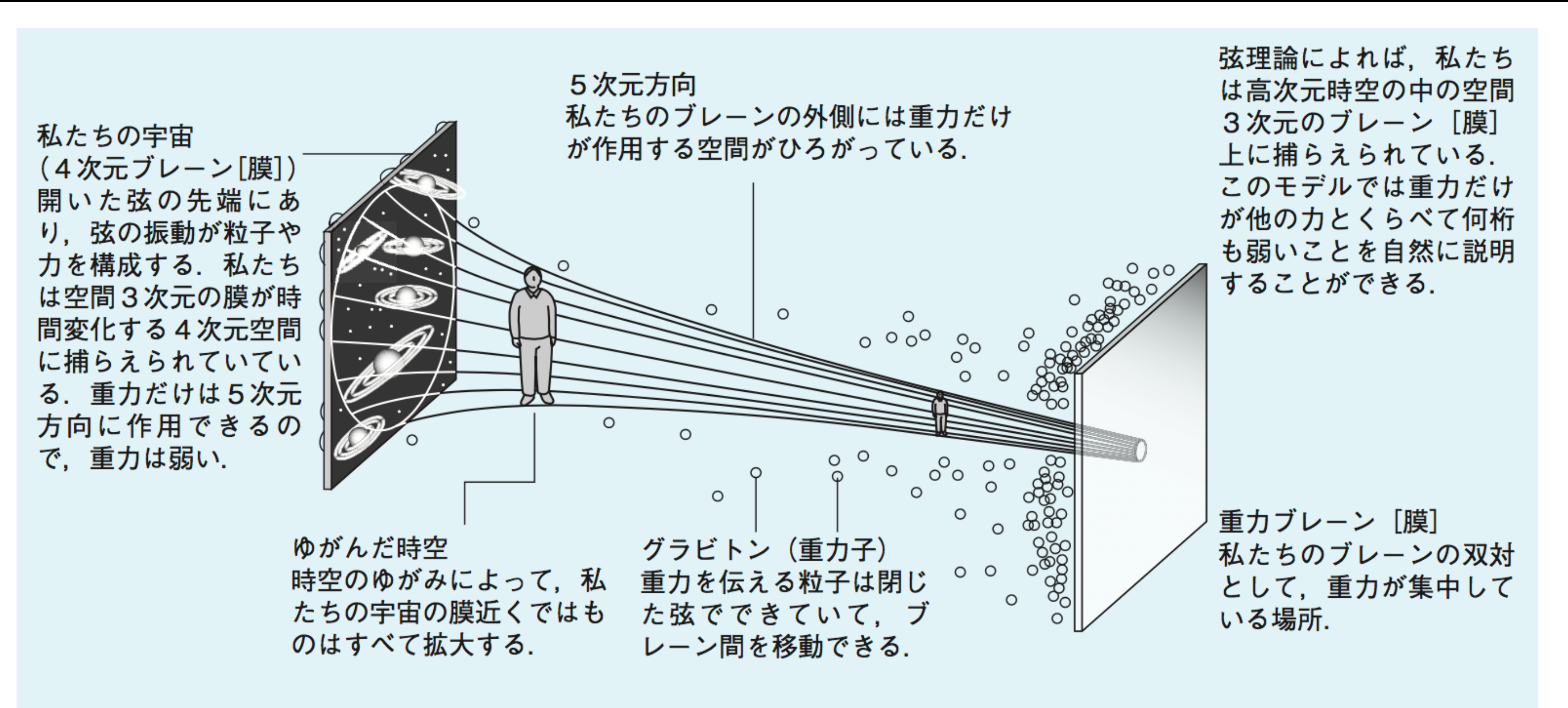


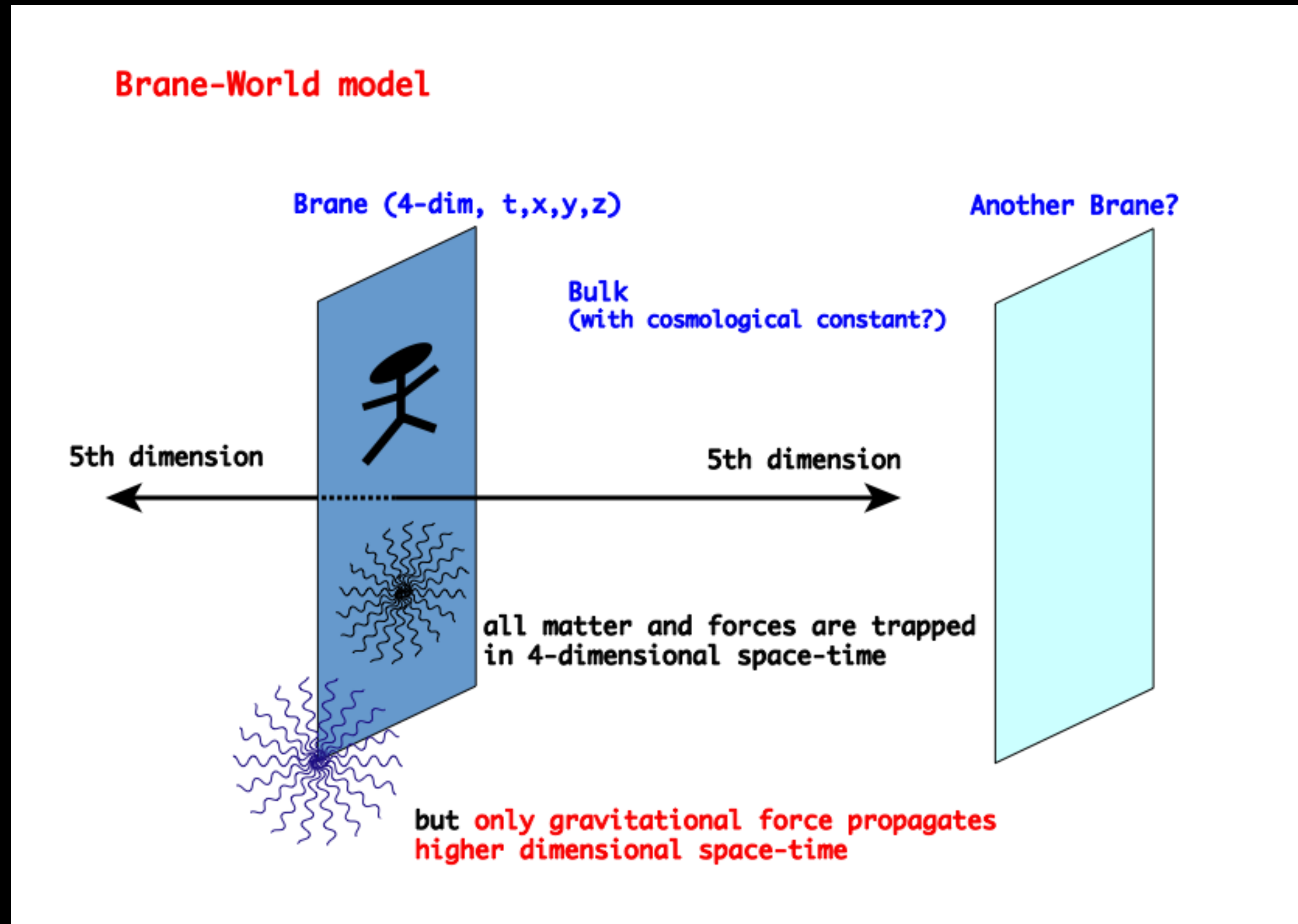
図 5.31 ランドールとサンドラムが提案したブレーンワールド・モデルの1つ。(膜宇宙モデル, 1999)

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

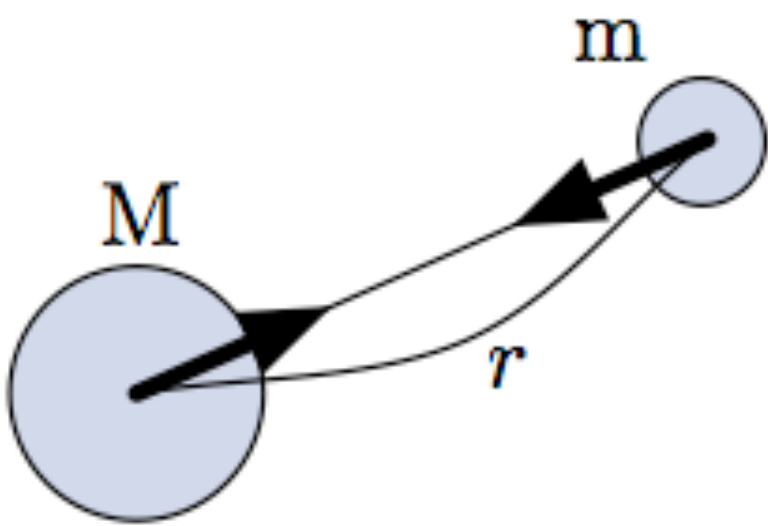
万有引力の法則は、小スケール(0.1mm以下)では、まだ確認されていない。

◆ **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

$$F = G \frac{Mm}{r^2} \tag{2.2}$$

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      空間4次元（5次元時空）なら

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

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

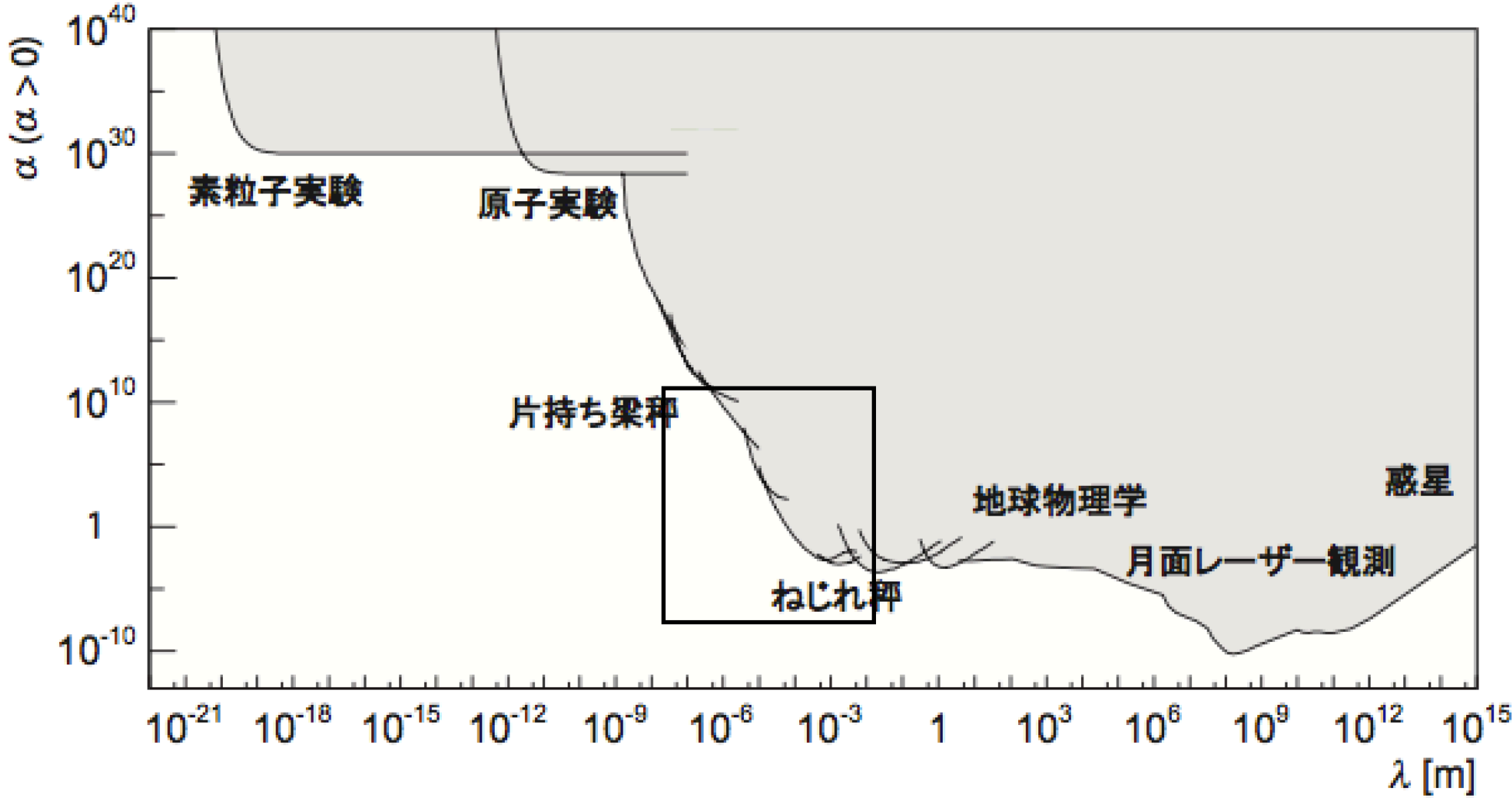
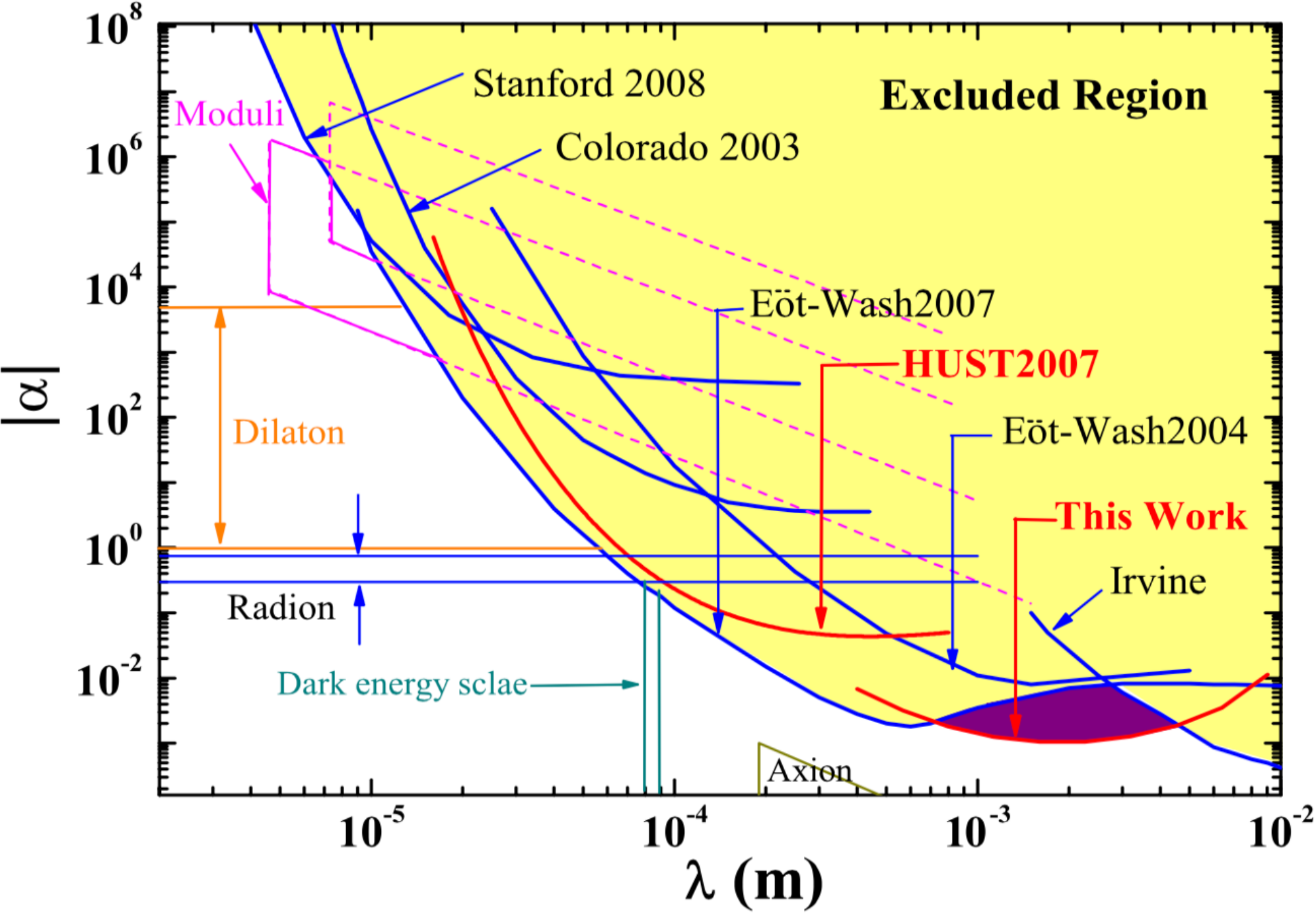
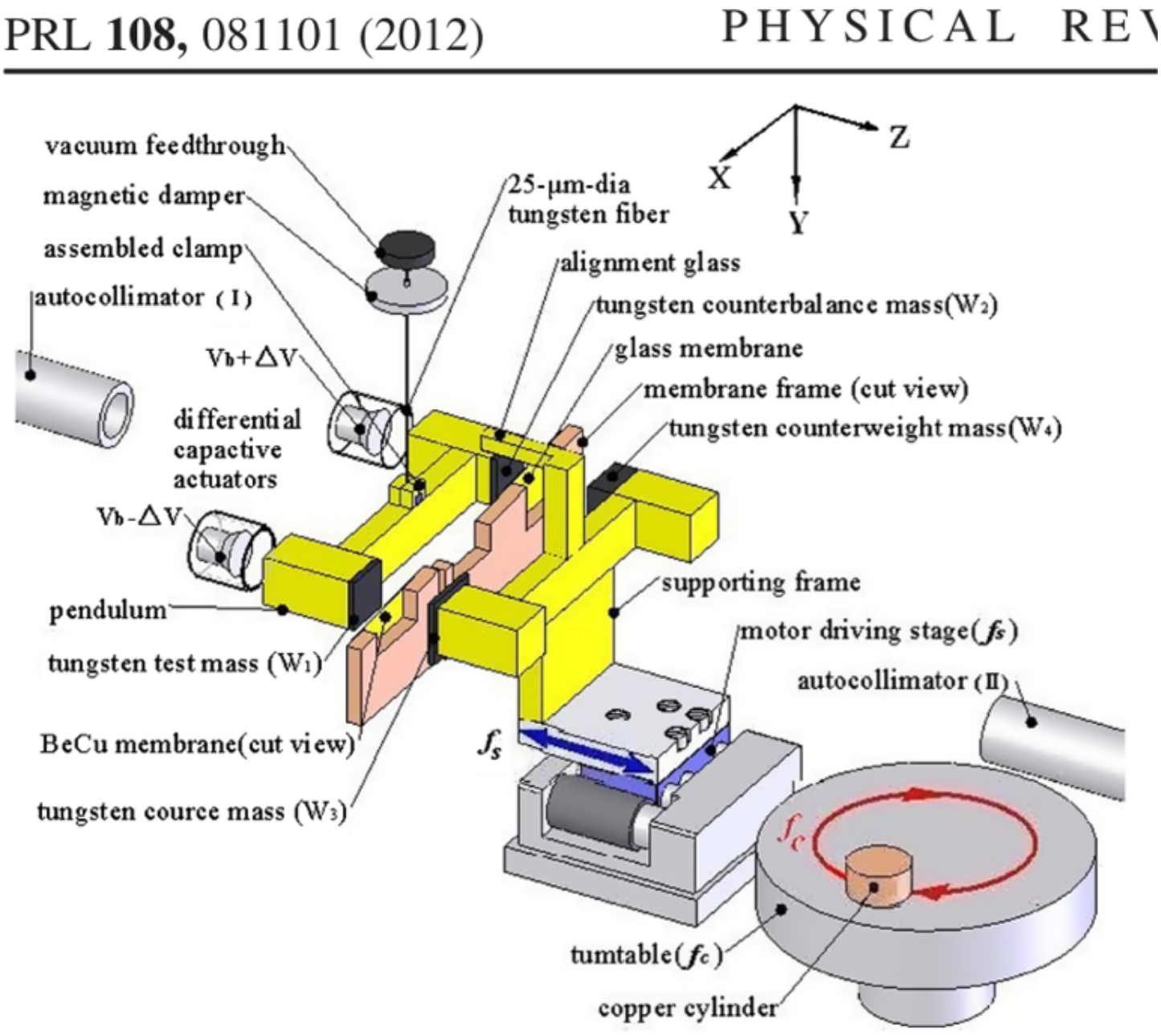
$$U = -G \frac{Mm}{r}$$

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

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

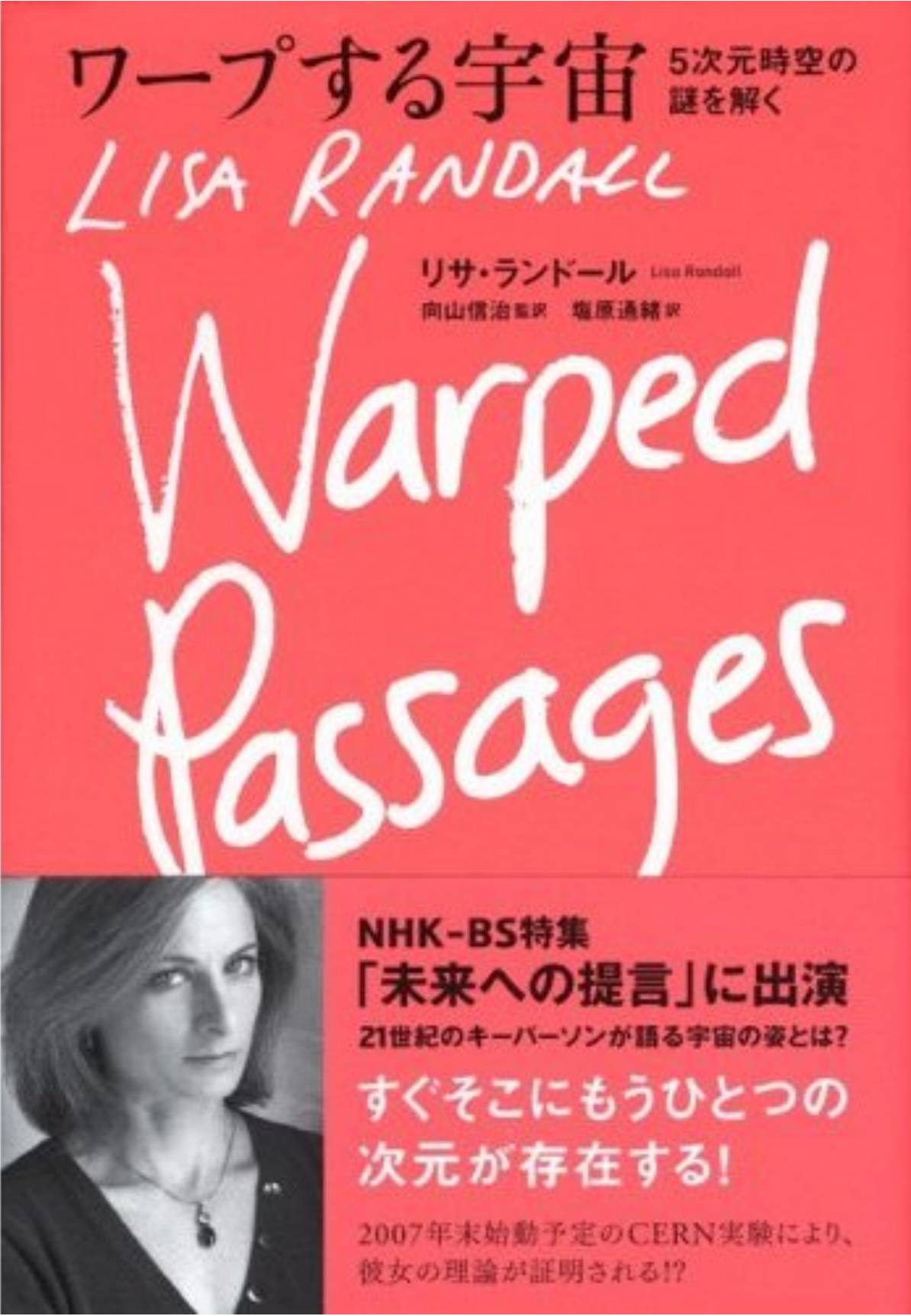


# 万有引力の法則は、どこまで正しいか？

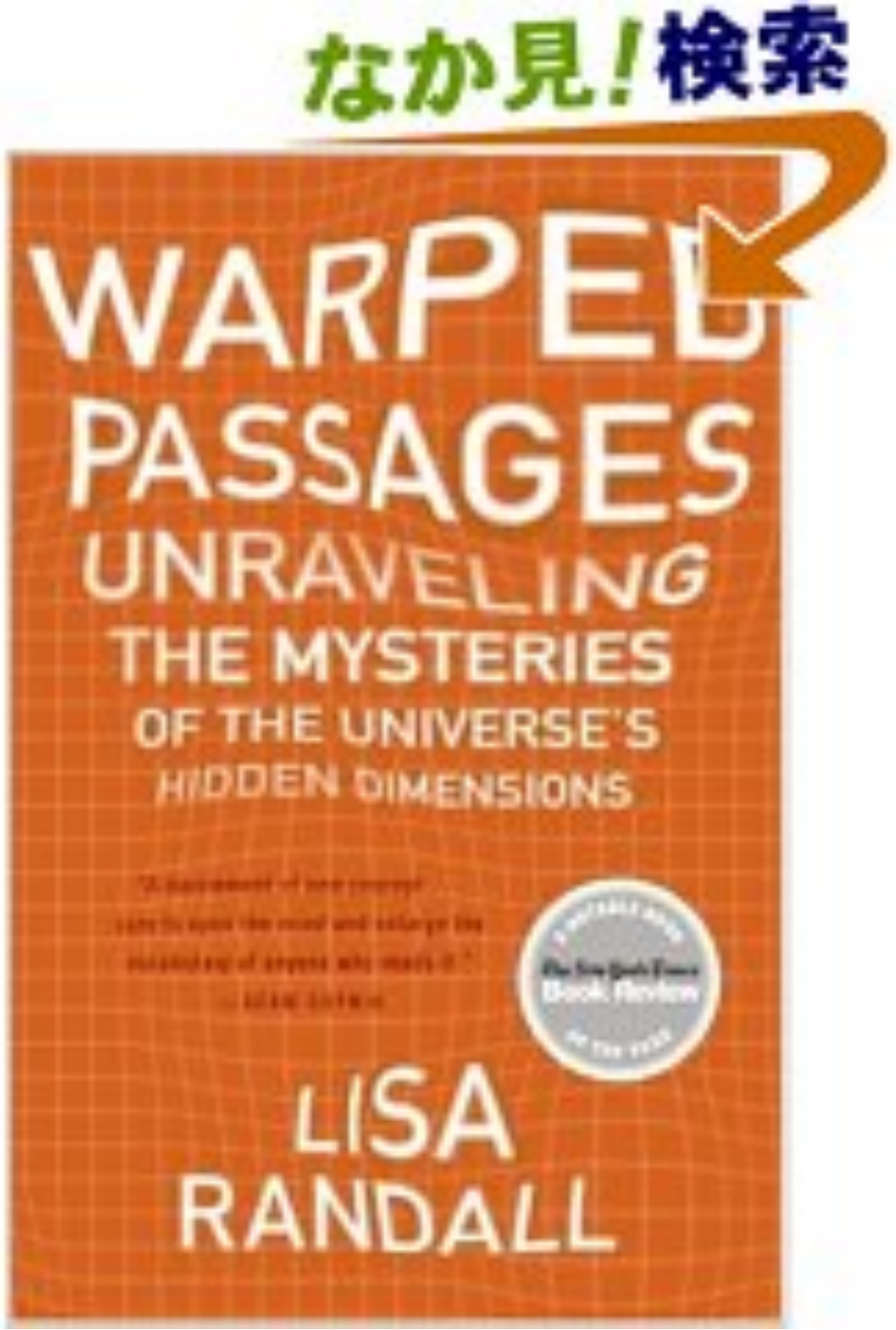


$$U = -G \frac{Mm}{r} (1 + \boxed{\alpha} e^{-r/\lambda})$$





\*フアン・ガルシア・ベリド、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・リオール、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.





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"



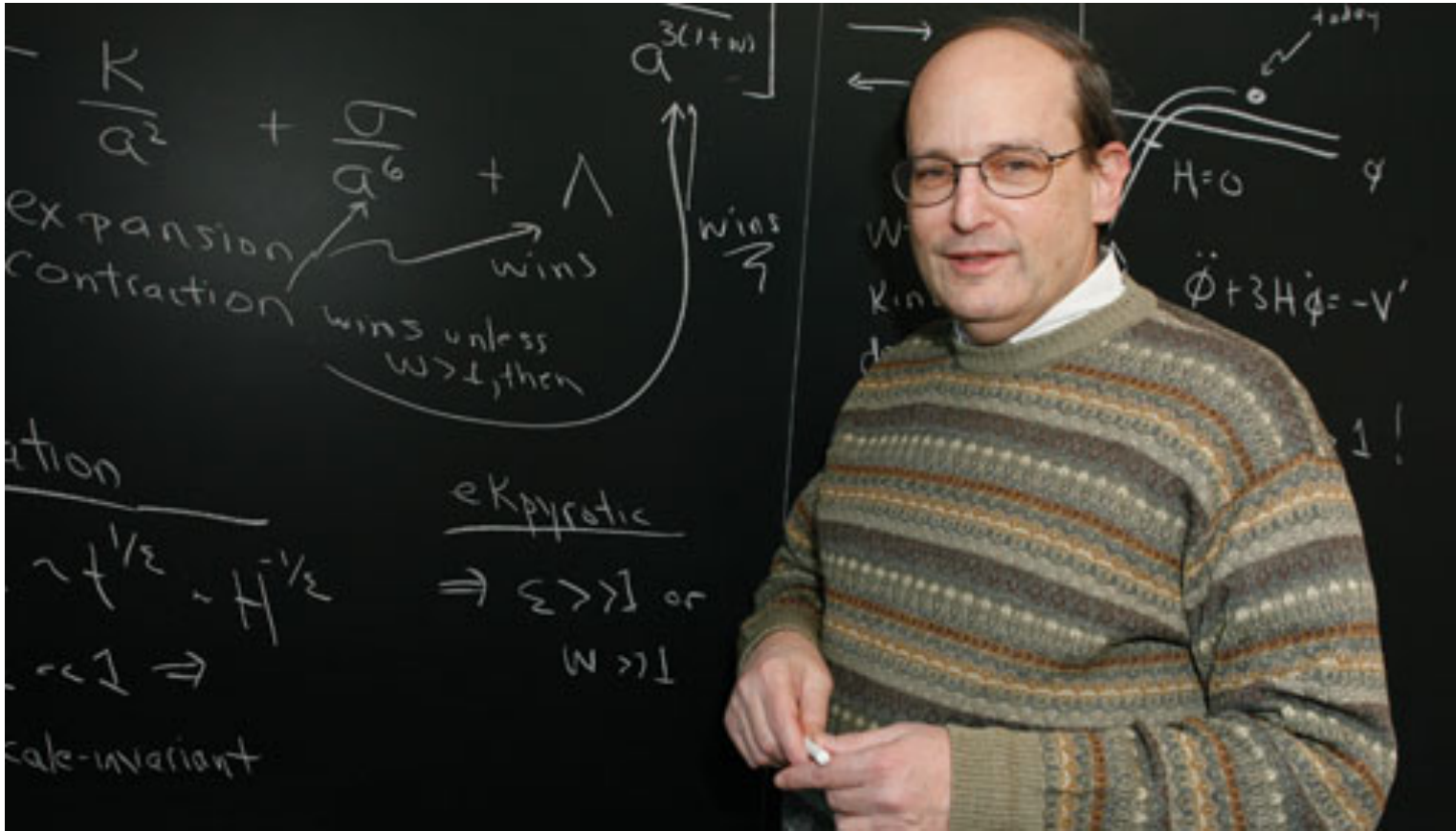
## NHK BS 異次元への招待 (2007/8)



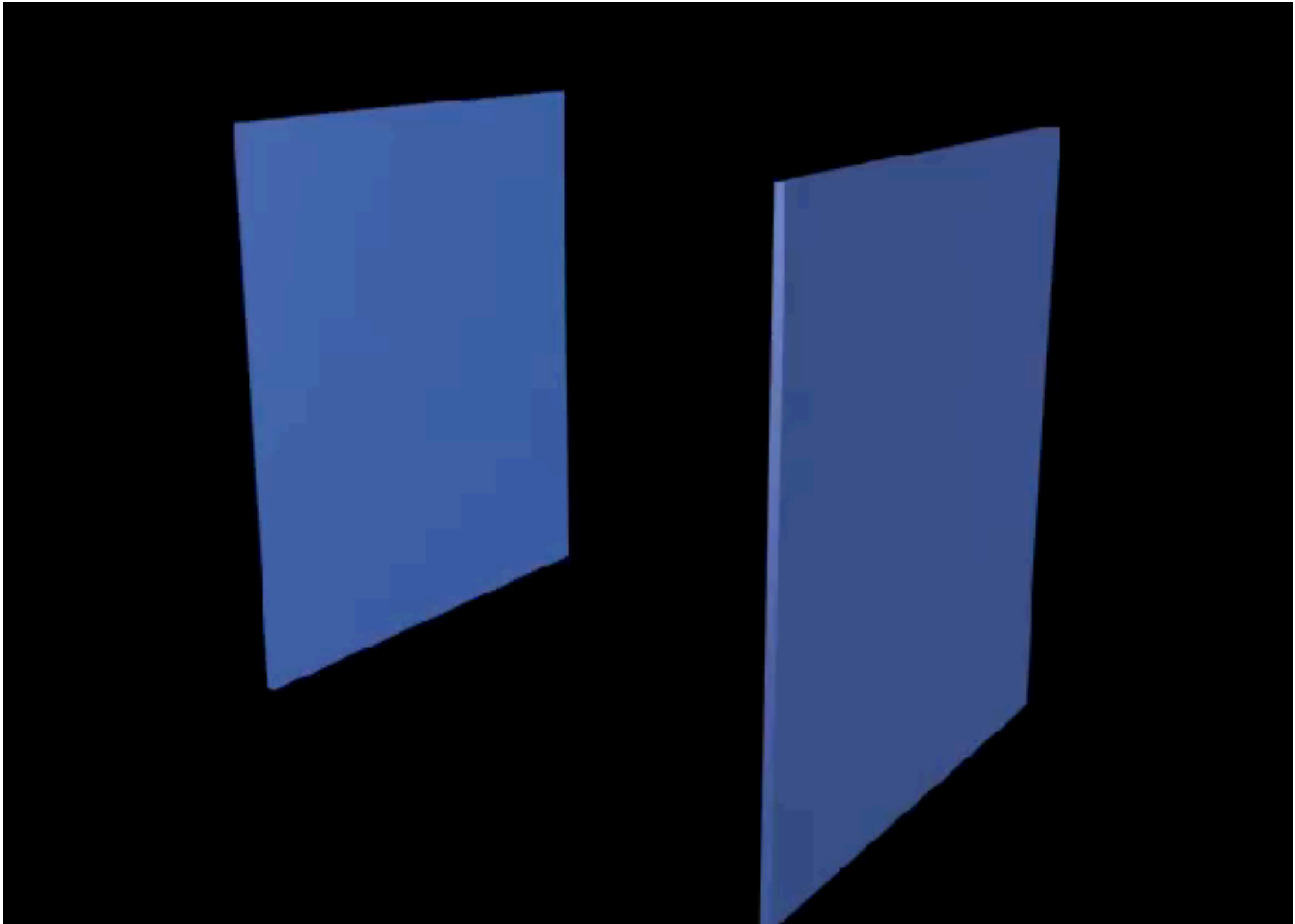
<https://www.dailymotion.com/video/x29h83c>

on click 3'





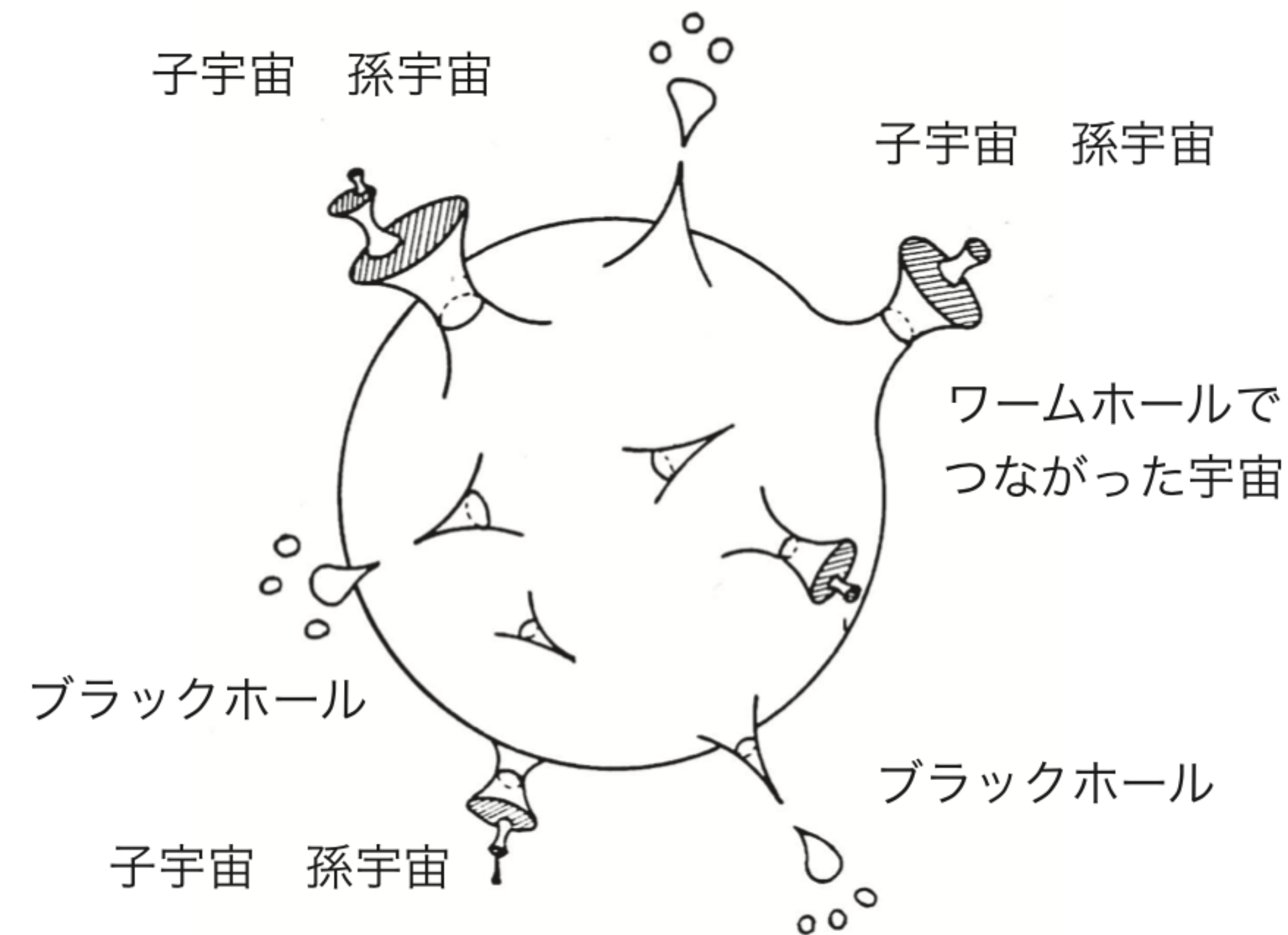
膜宇宙の交差によってビッグバンが生じた





## 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



PROTECTING  
THE EARTH  
FROM THE SCUM  
OF THE  
UNIVERSE



MR. JONES MR. SMITH  
**MEN IN BLACK**

## 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)