

Inflation

# 天文学概論

## 第11回 超新星・宇宙論(1)

担当：黒川 宏之

# スケジュール 2

11/22 天体観測 (大宮)

11/29 超新星・宇宙論 (1) (黒川)

12/6 超新星・宇宙論 (2) (黒川)

12/13 初期宇宙と構造形成 (1) (林)

12/20 初期宇宙と構造形成 (2) (林)

1/10 全体のまとめ (大宮)

# レポート課題 (黒川担当分)

「星と惑星の形成」(第5回) または

「宇宙誕生から現在までの歴史」(第11回)

のどちらかについて

他人が読んででもわかりやすいように要点をまとめよ。

文章の他に、イラスト・図などを用いてもよい。

(A4レポート用紙1枚以内)

**提出先：レポートボックス**

**提出期限：12/13(水) 17時**

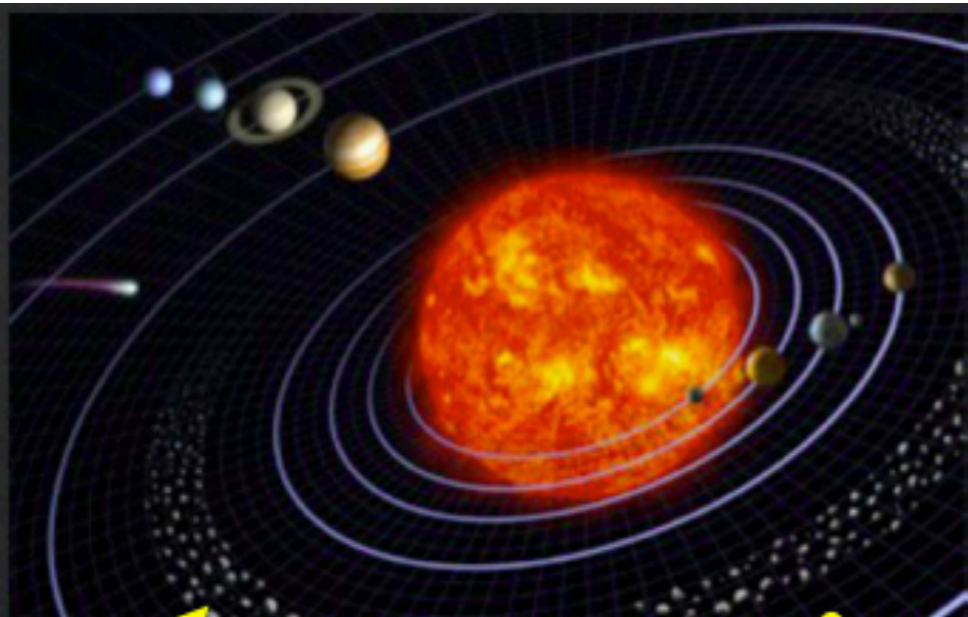
# 宇宙論とは

宇宙の誕生とその進化を  
一般相対性理論や素粒子物理学などの物理学を使って  
理解する学問

Inflation

- ビッグバン元素合成
- 宇宙背景放射
- 大規模構造形成
- インフレーション理論 etc.

# 宇宙空間的広がり (宇宙の階層構造)



恒星(惑星系)



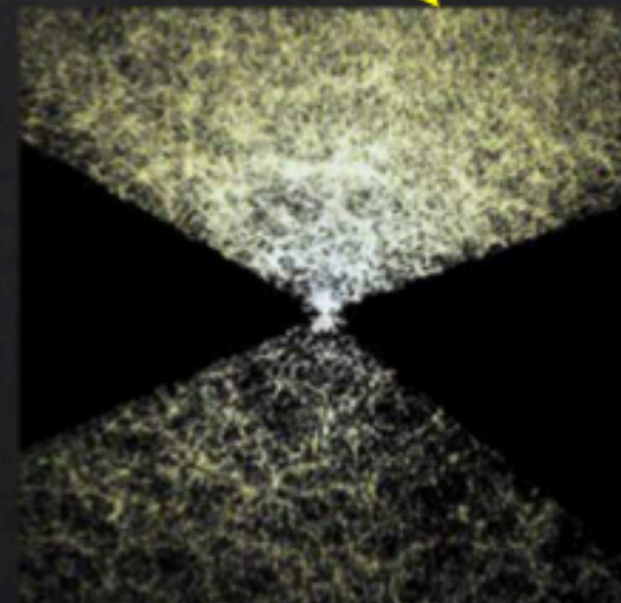
銀河群・銀河団



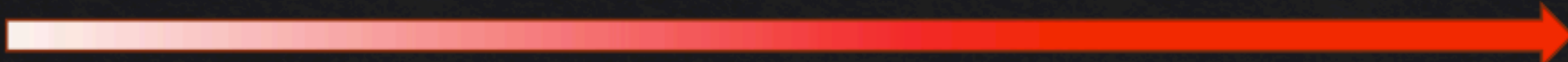
惑星



銀河



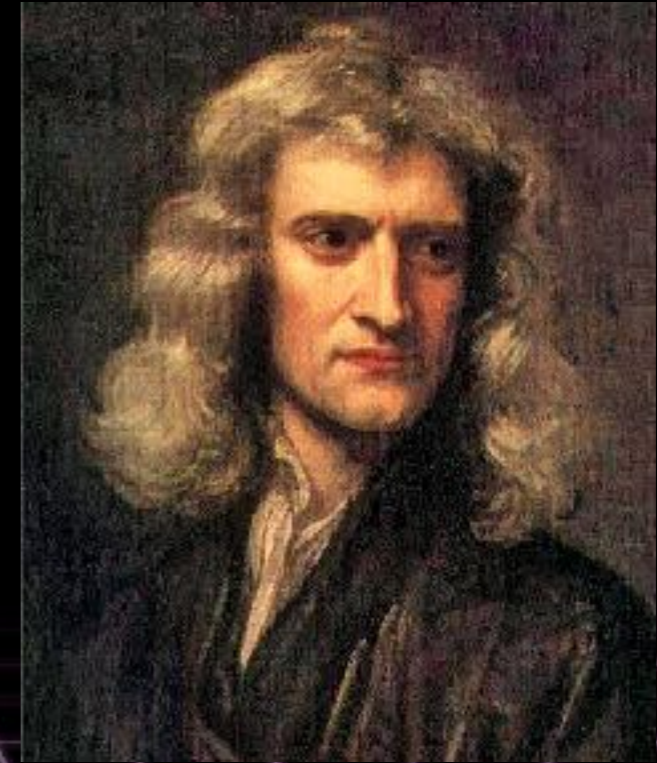
宇宙の大規模構造



# ニュートンの宇宙

## 絶対空間と絶対時間

- ・ 空間と時間は物理現象と無関係に存在する、物理現象の舞台に過ぎない
- ・ 空間は不変不動
- ・ 時間は一定の速さで進む

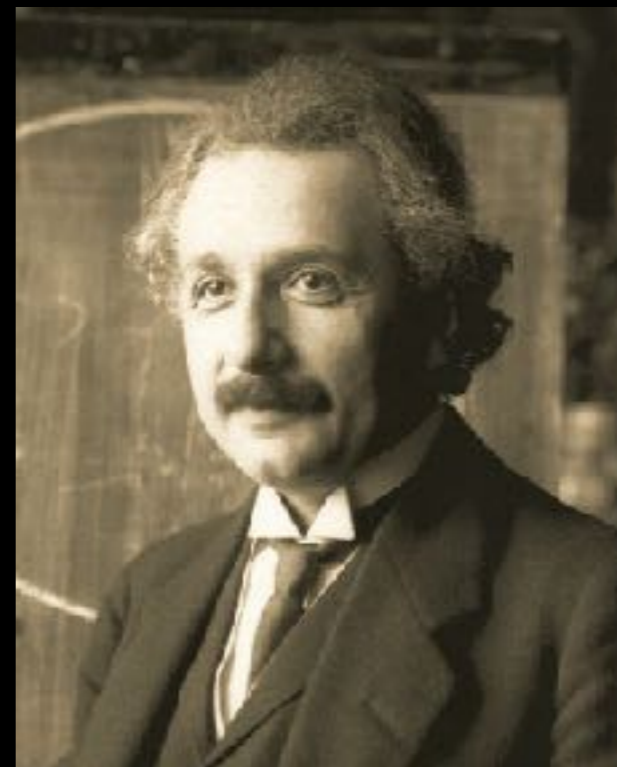


アイザック・ニュートン  
(1642-1727)

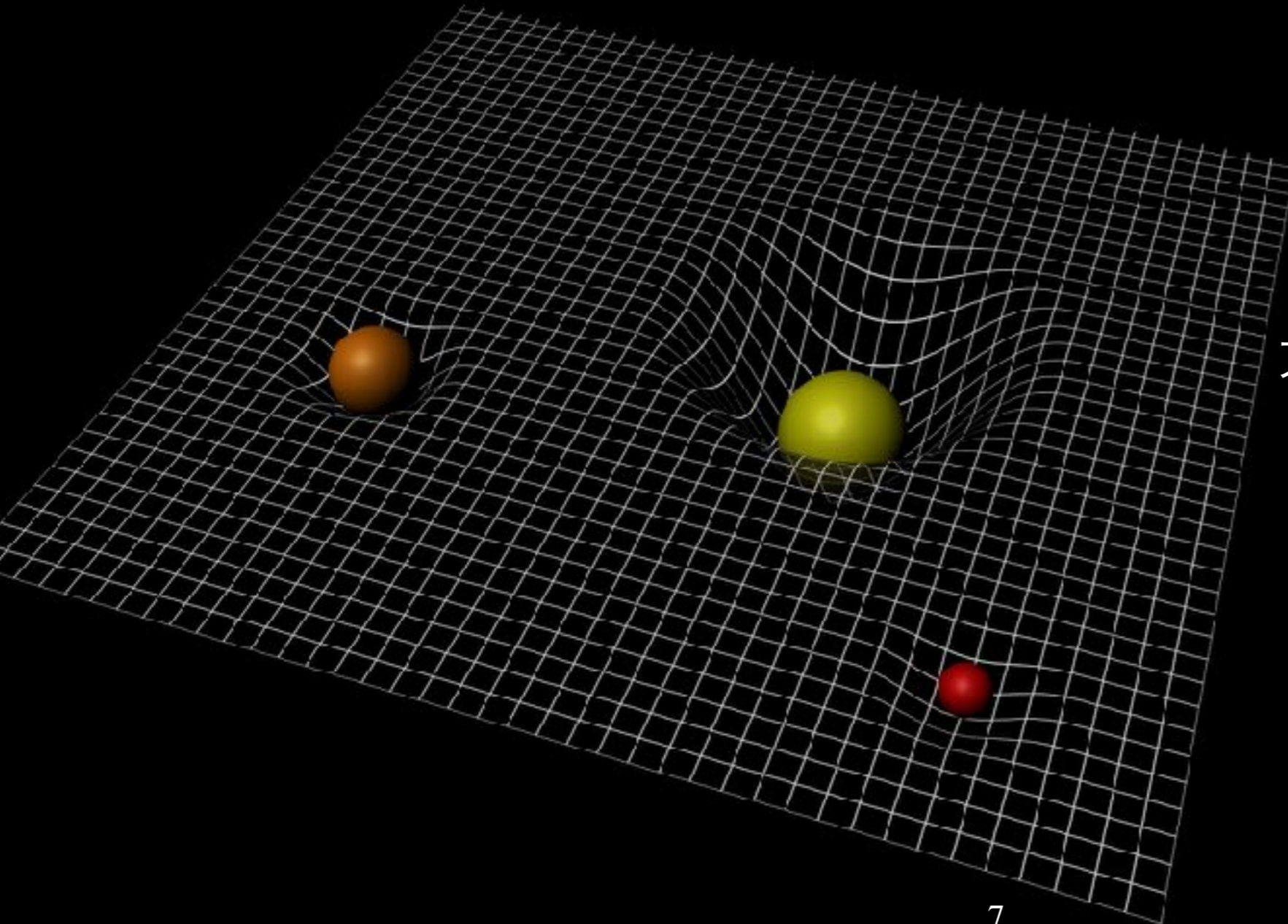
# アインシュタインの宇宙

## 一般相対性理論

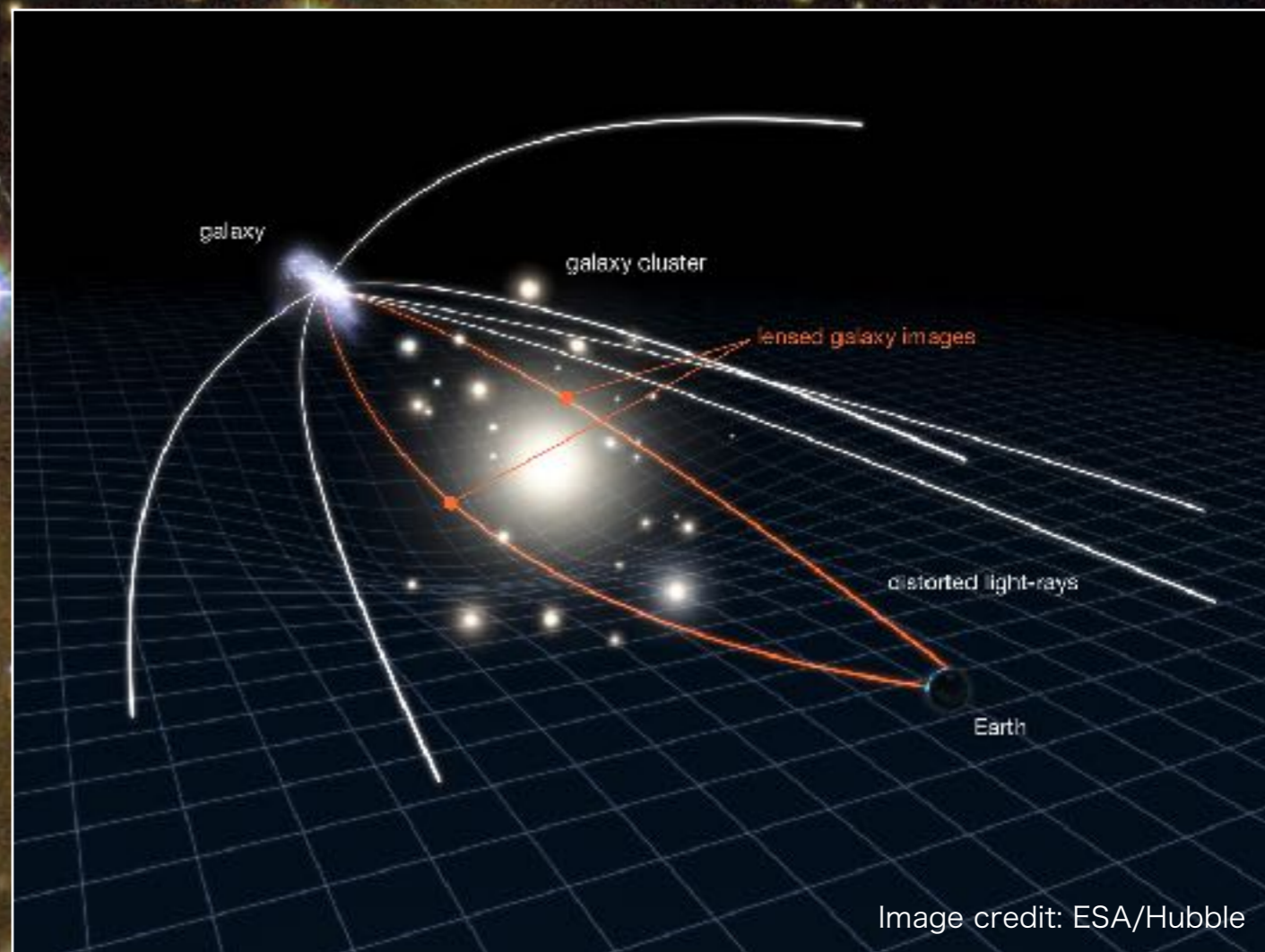
- ・ 時間と空間という舞台が、その上に乗せられる物質によって変形してしまう



アルベルト・アインシュタイン  
(1879-1955)

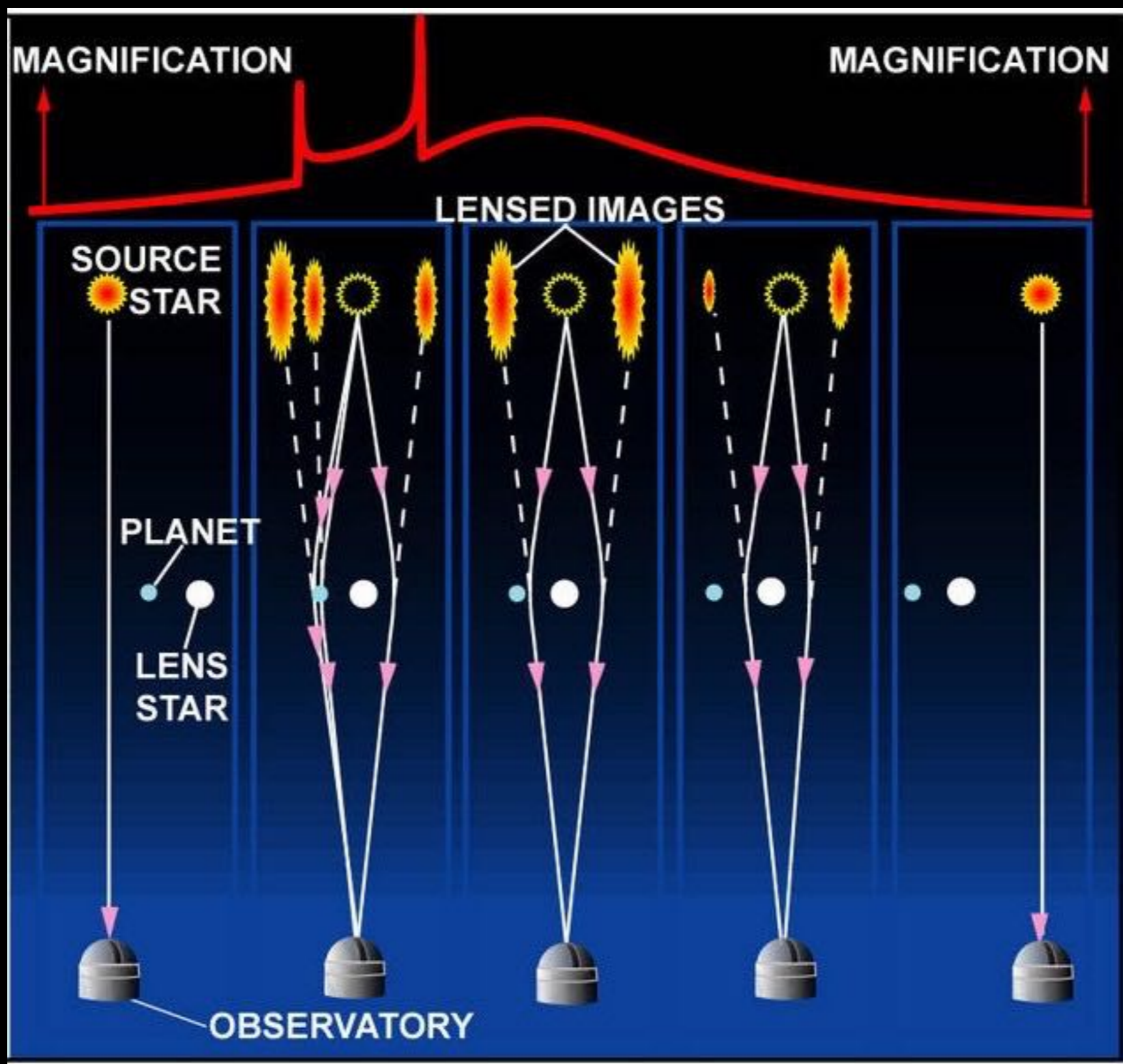


# アインシュタインの宇宙





# 重力マイクロレンズ法による系外惑星検出



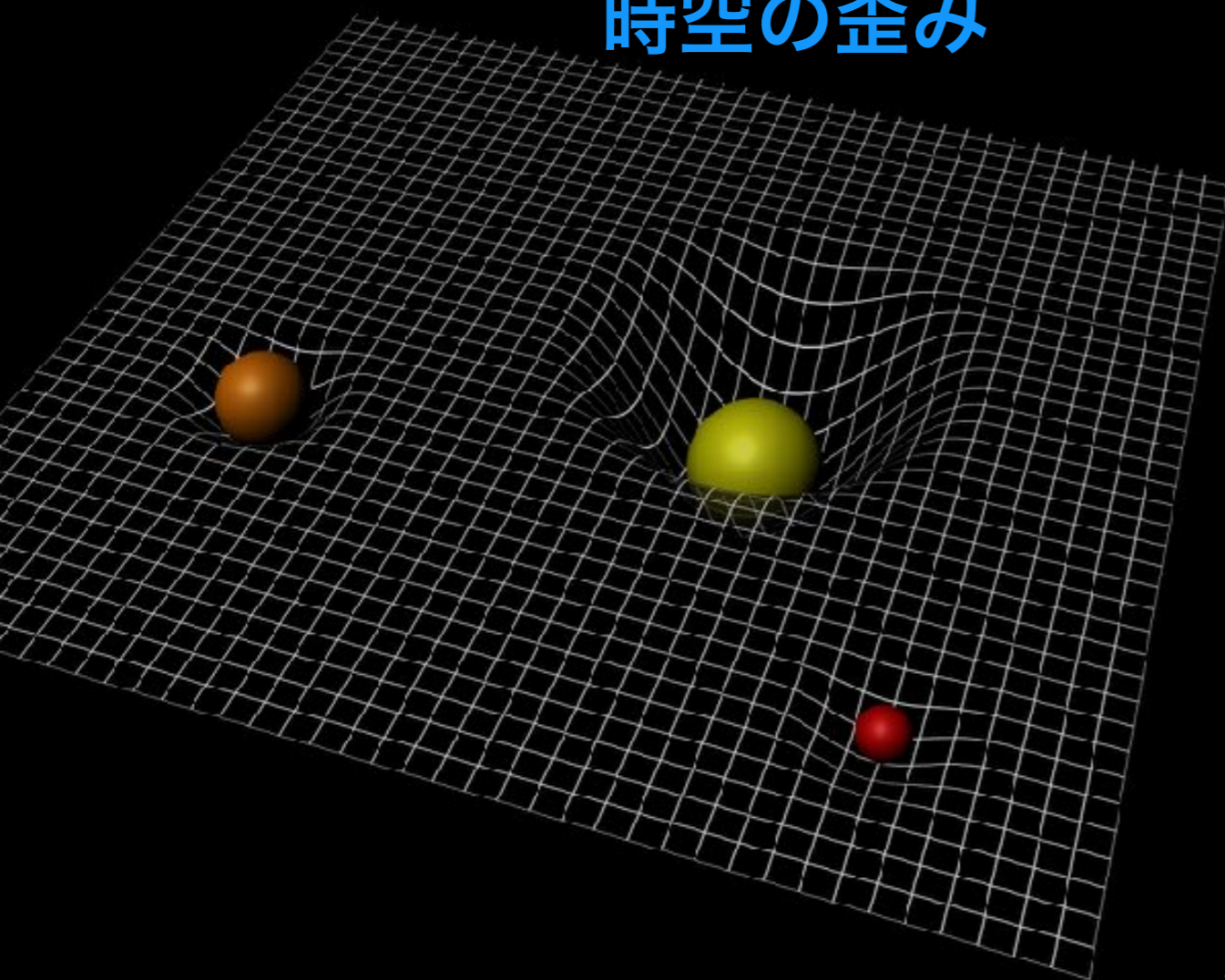
# 宇宙論のはじまり

アインシュタイン方程式 (一般相対性理論から導かれる)

$$R_{ij} - \frac{1}{2}g_{ij}R = \frac{8\pi G}{c^4}T_{ij}$$

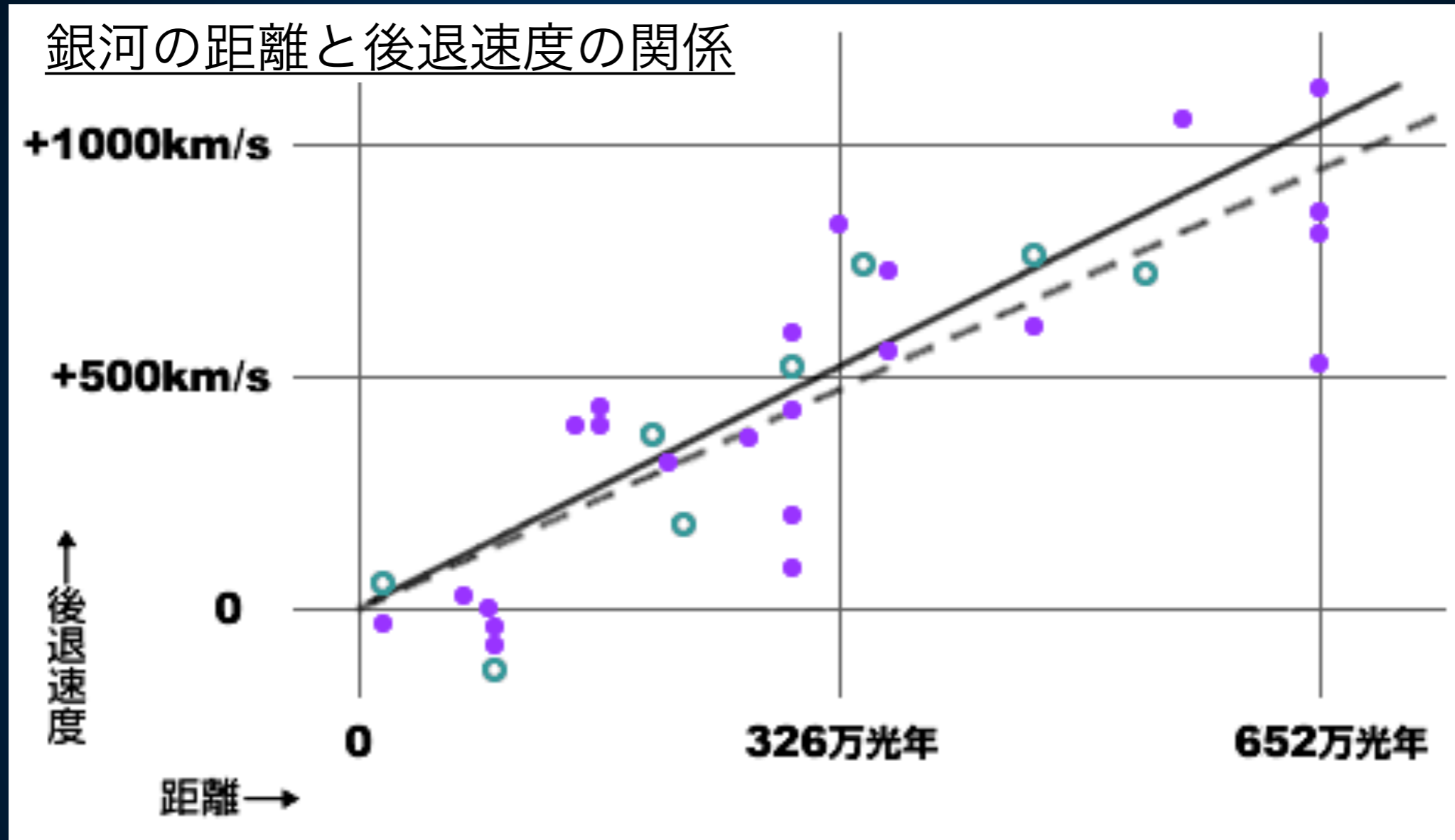
時空の歪み

物質の分布



- ・ アインシュタイン方程式に従うと、宇宙は膨張したり収縮したりする
- ・ アインシュタインは静的な宇宙をつくるため、宇宙項(斥力)を仮定
- ・ 宇宙項は空っぽの空間どうしが互いに押し合う力

# 膨張する宇宙



<https://www.kahaku.go.jp/exhibitions/vm/resource/tenmon/space/theory/theory01.html>

ハッブルの法則：銀河の後退速度が距離に比例

# 一様に膨張する宇宙

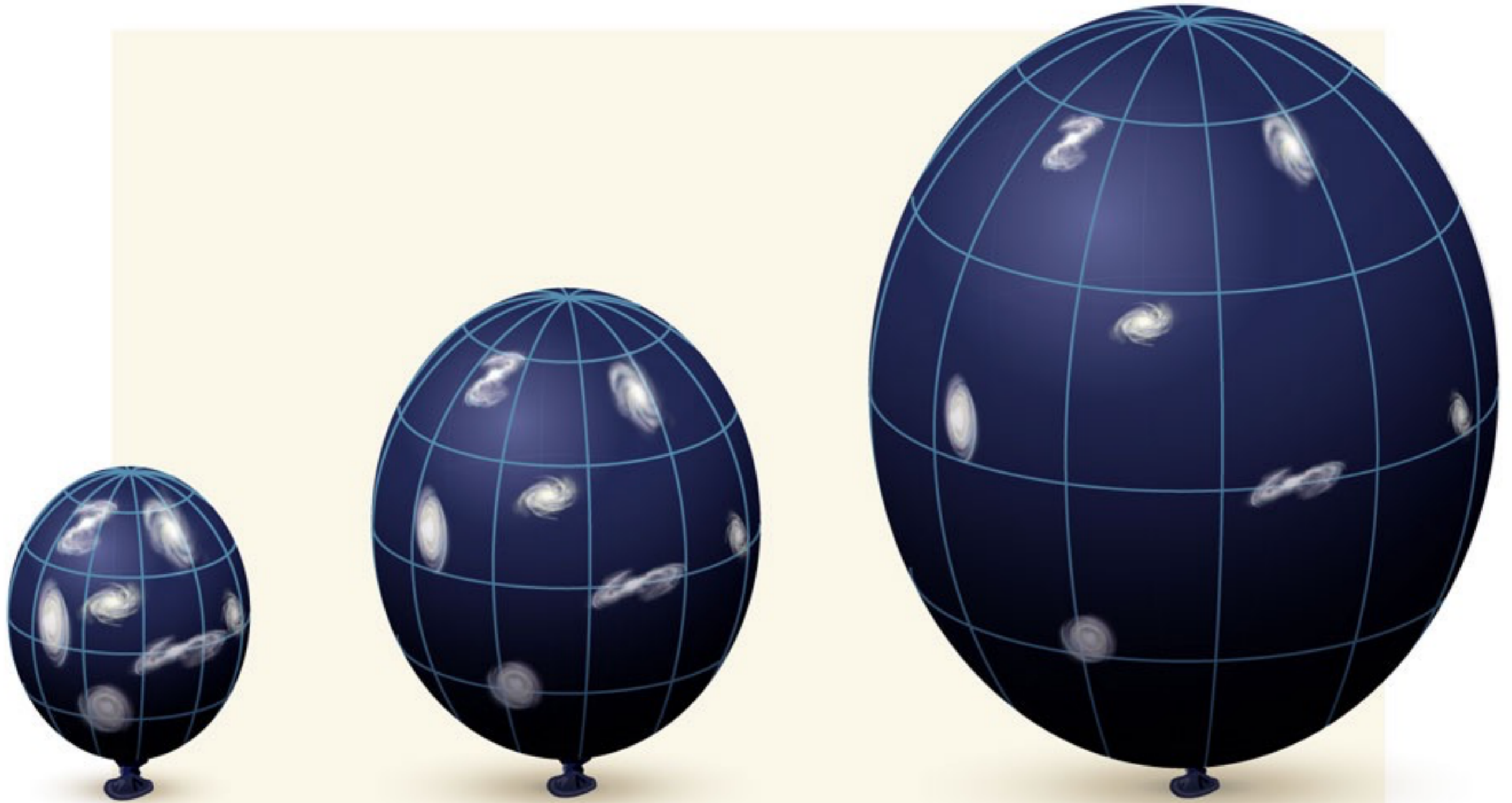
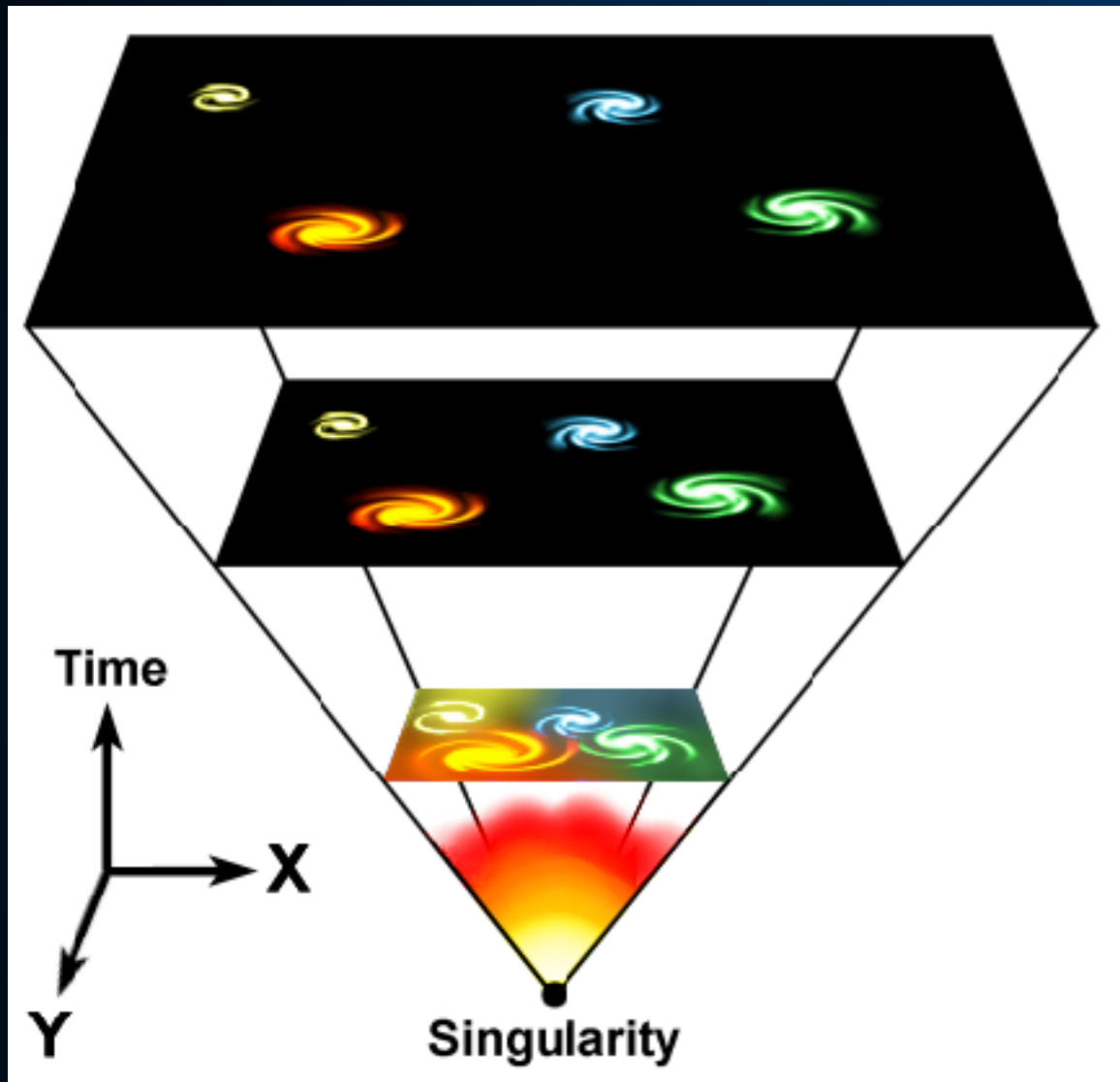


Image credit: Eugenio Bianchi, Carlo Rovelli & Rocky Kolb

# ビッグバン理論



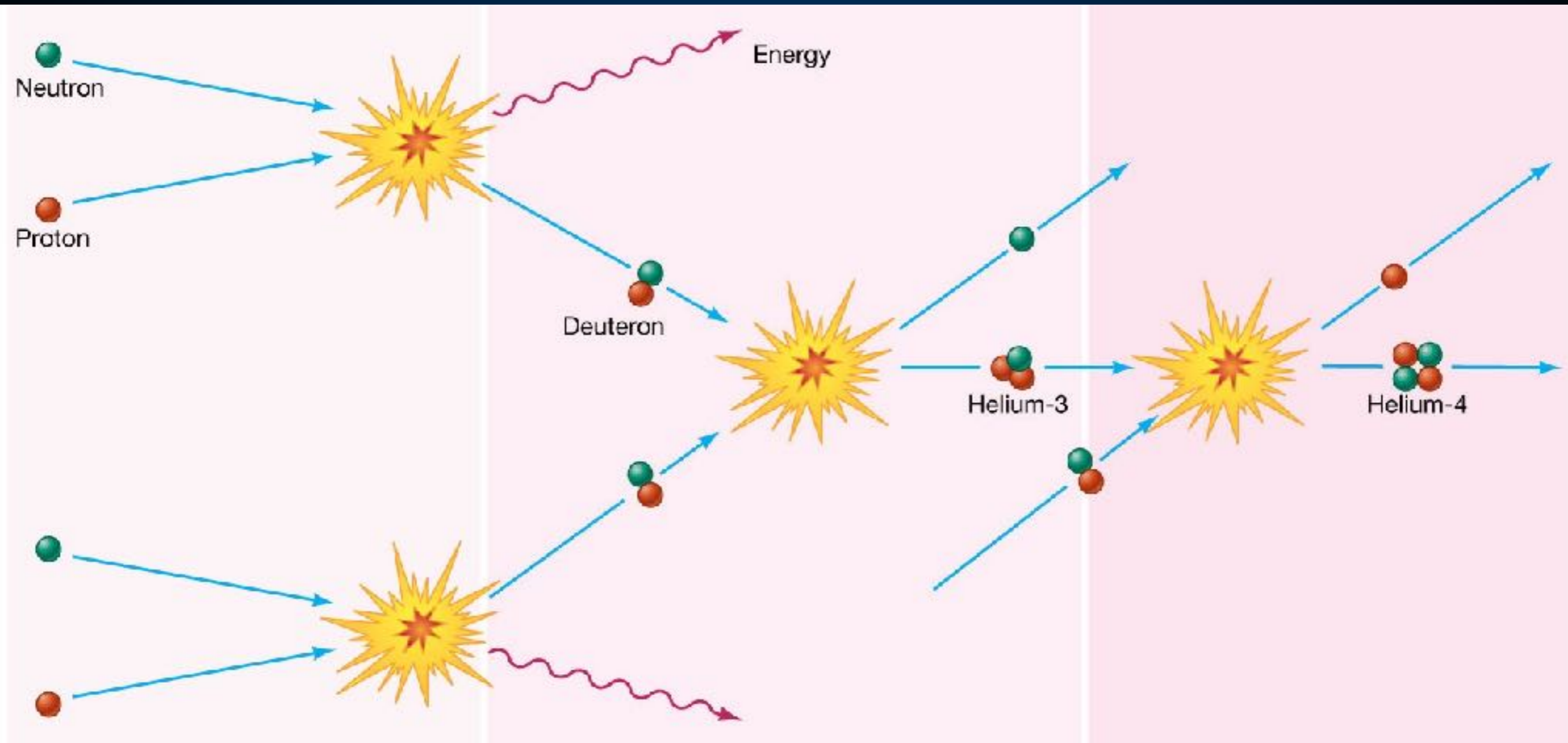
Wikipediaより



ジョージ・ガモフ  
(1904-1968)

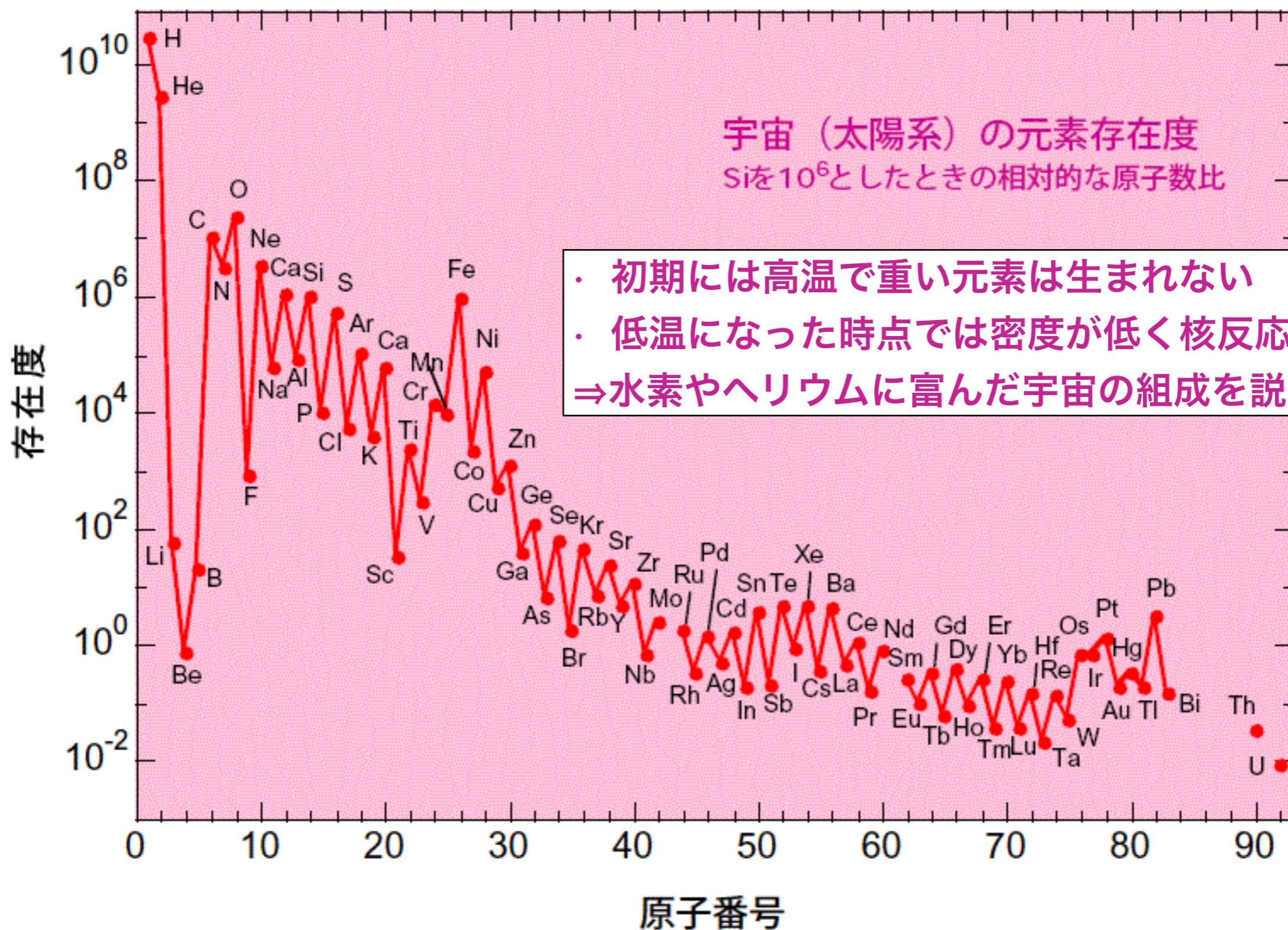
- ・ 膨張する宇宙は時間を遡ると高温高密度の火の玉になる  
⇒ ビッグバン理論の確立
- ・ 宇宙は高温高密度の火の玉で誕生
- ・ 急速な膨張によって温度低下
- ・ 最初の数分間で軽い元素が形成

# ビッグバン元素合成



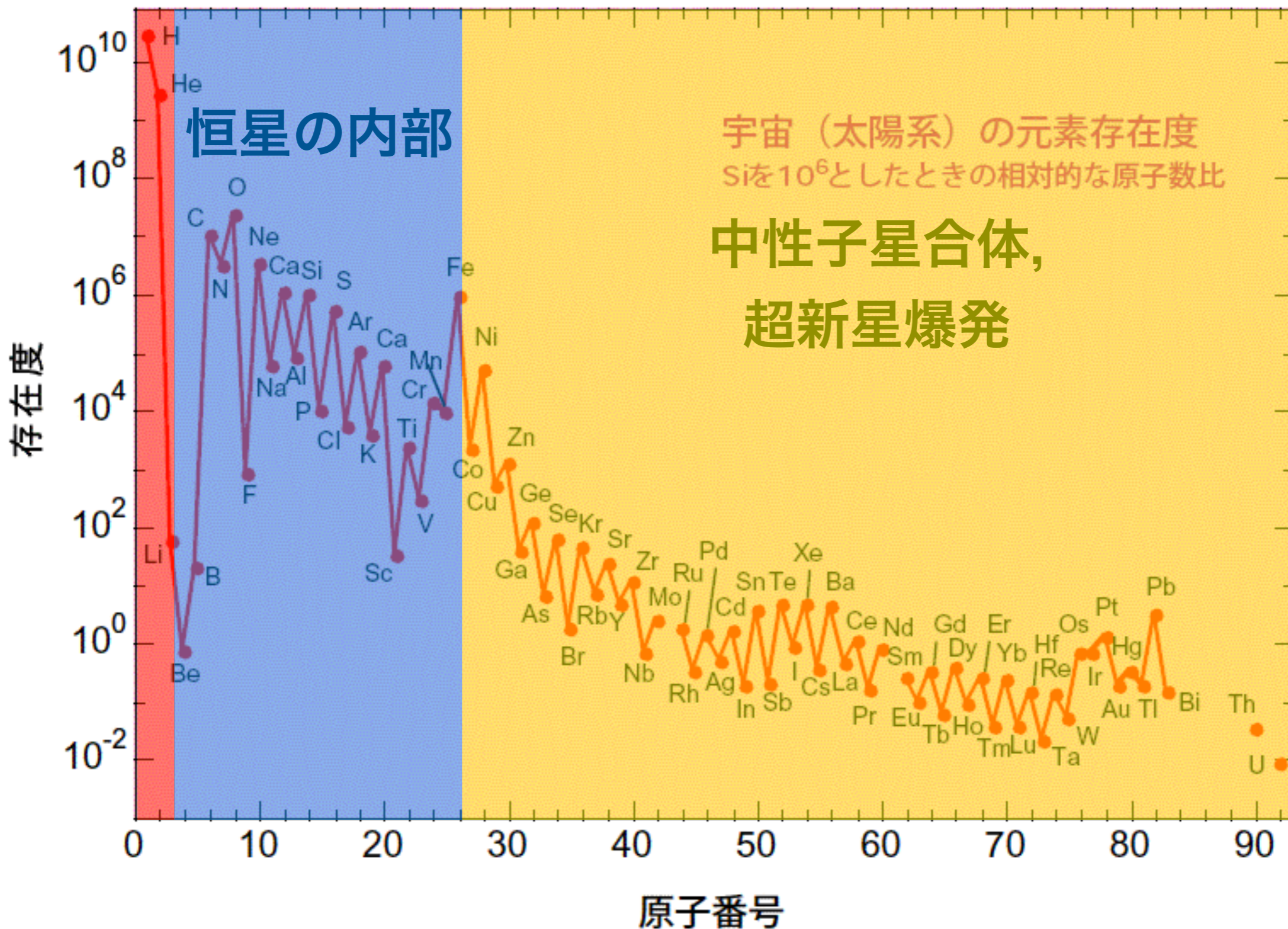
- ・ 0.01秒後：陽子・中性子・電子・光 に満ちた宇宙
- ・ 数分後：陽子と中性子が結合し、He・Li 原子核形成
- ・ 膨張にともない、核反応は起こりにくくなる

# 宇宙の元素存在度



# 宇宙の元素存在度

ビッグバン



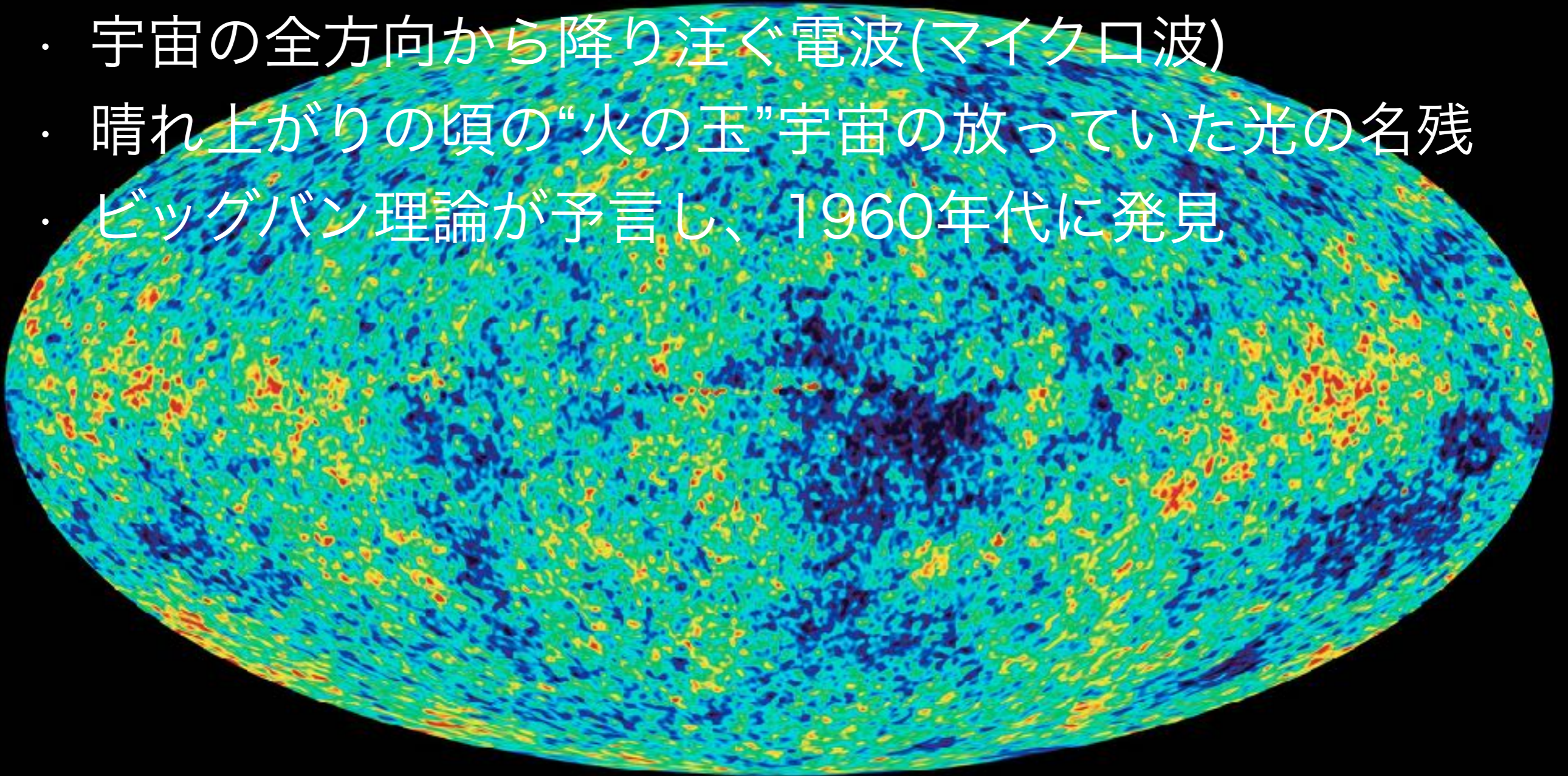


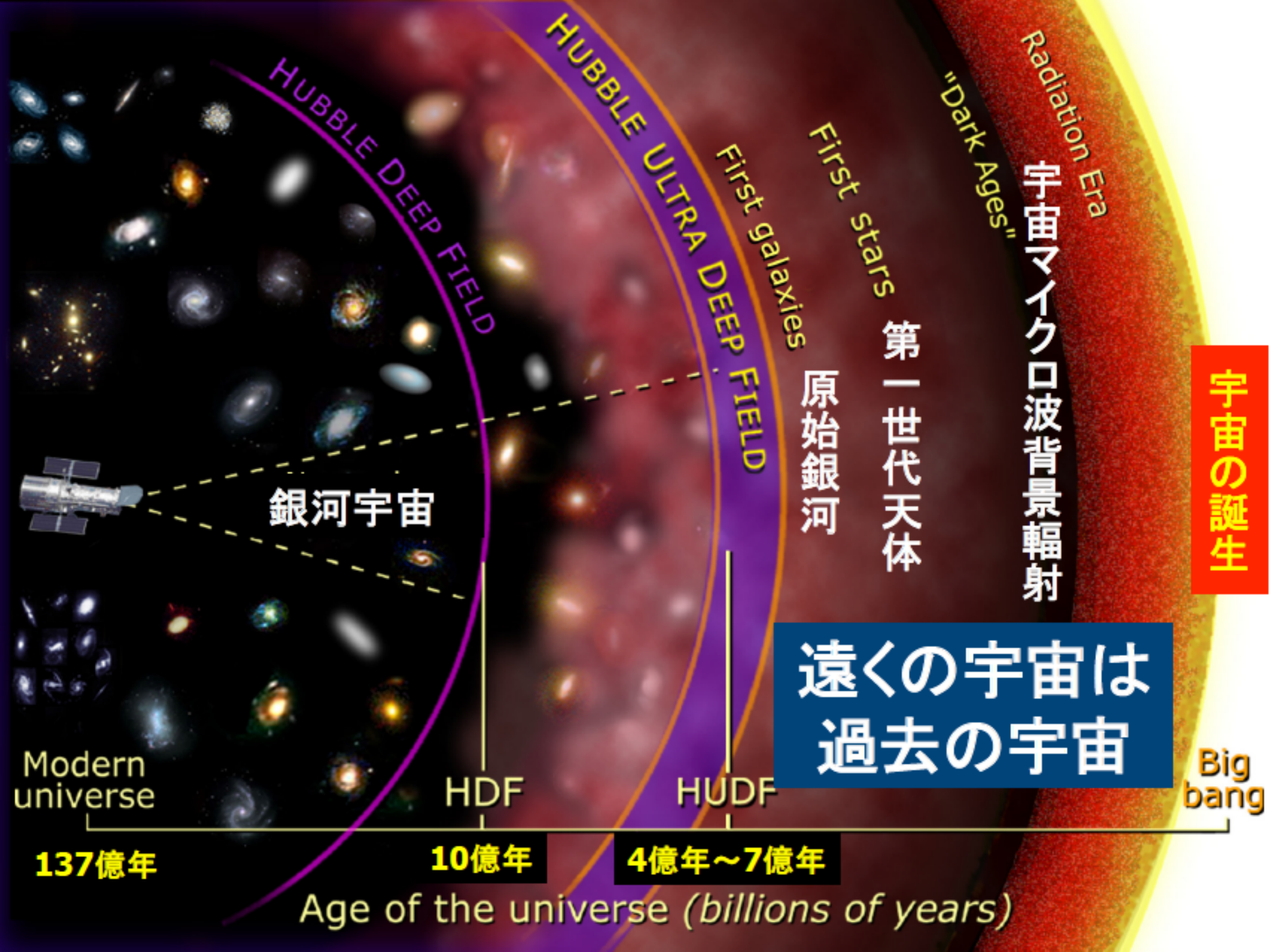
# 宇宙の晴れ上がり

- ・ 電離した物質で満ちた宇宙では、電子が光を散乱  
⇒ 眩しい雲の中のような環境
- ・ 宇宙誕生後約40万年後、電子が原子核に捉えられる  
⇒ 光が直進できるようになる“宇宙の晴れ上がり”

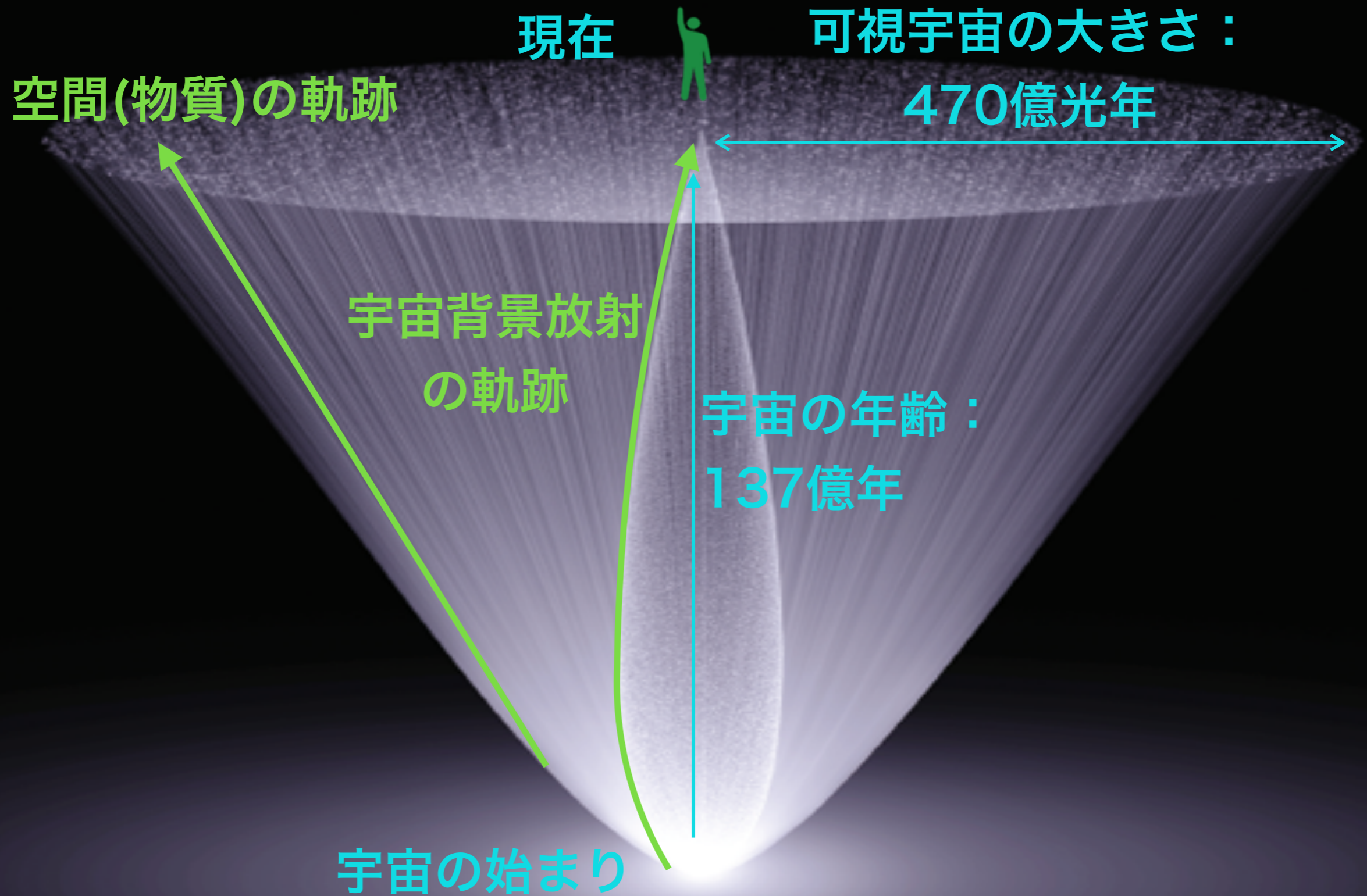
# 宇宙背景放射

- ・ 宇宙の全方向から降り注ぐ電波(マイクロ波)
- ・ 晴れ上がりの頃の“火の玉”宇宙の放っていた光の名残
- ・ ビッグバン理論が予言し、1960年代に発見

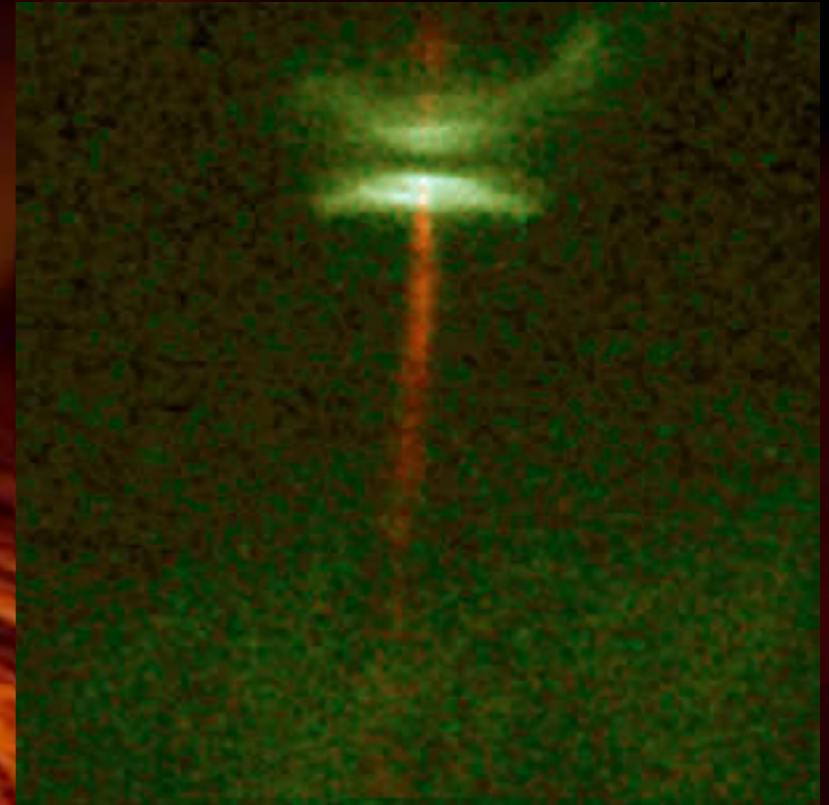




# 可視宇宙の広がり



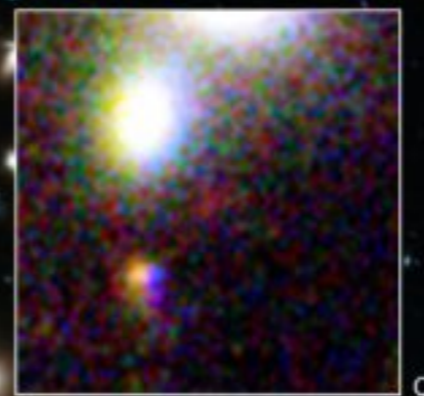
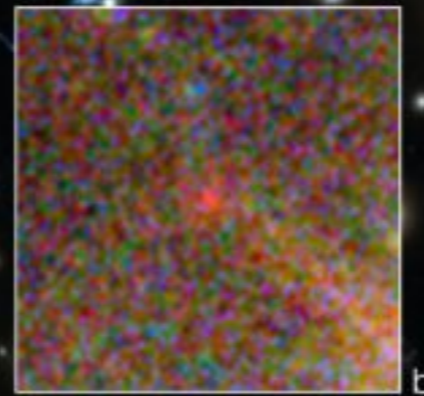
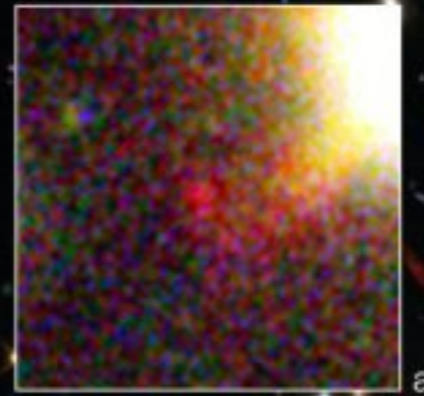
# 初代星の形成



c) C. Burrows (STScI & ESA), the WFPC 2 Investigation Definition Team, and NASA

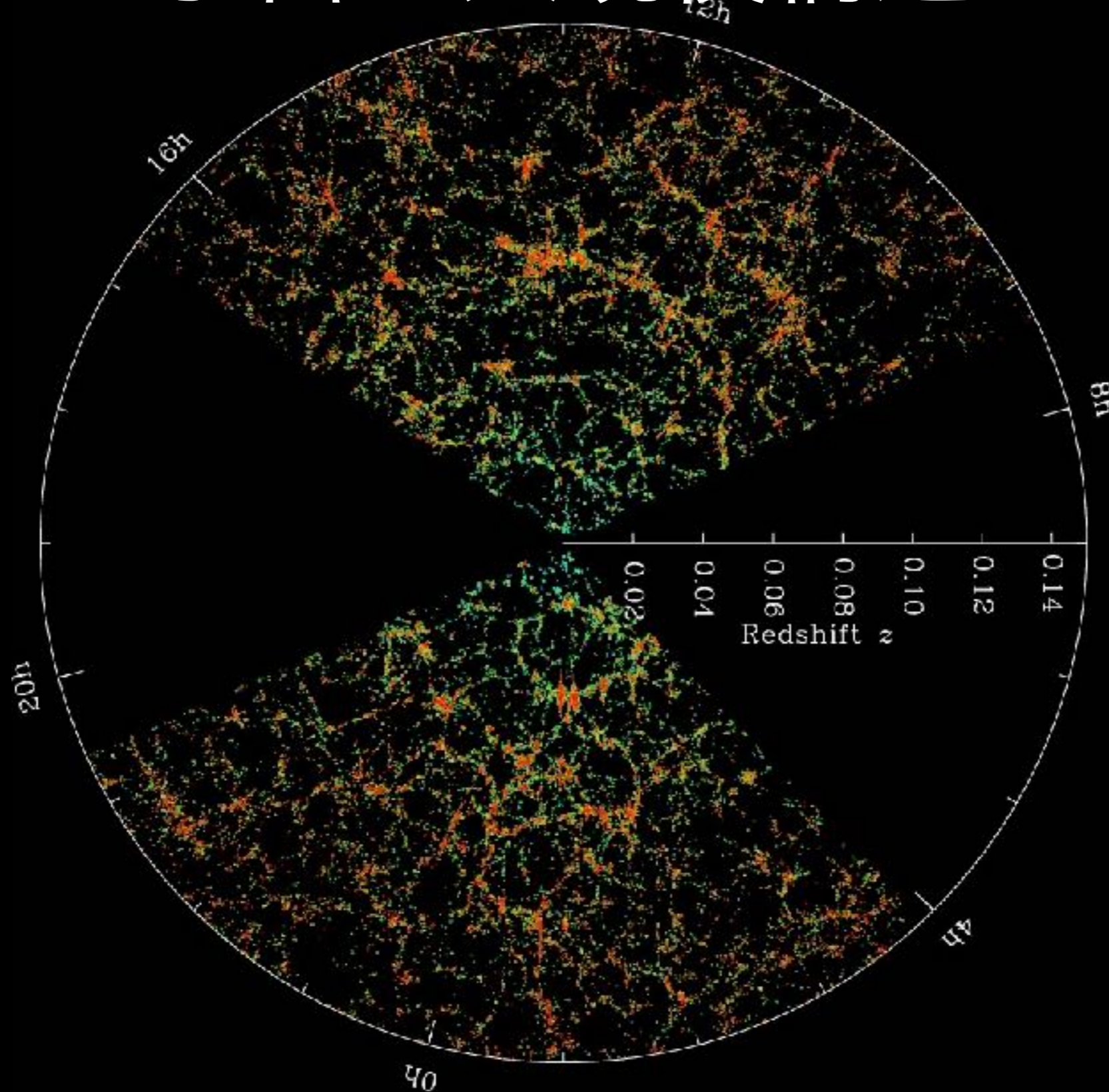
宇宙誕生から4億年後、最初の星が誕生した

# 最初の銀河の誕生



ハッブル宇宙望遠鏡が捉えた  
132億年前の銀河

# 宇宙の大規模構造



銀河の分布は一様ではなく、泡のような構造がある

スローン・デジタル・スカイサーベイ

<https://www.youtube.com/watch?v=08LB1tePDZw>



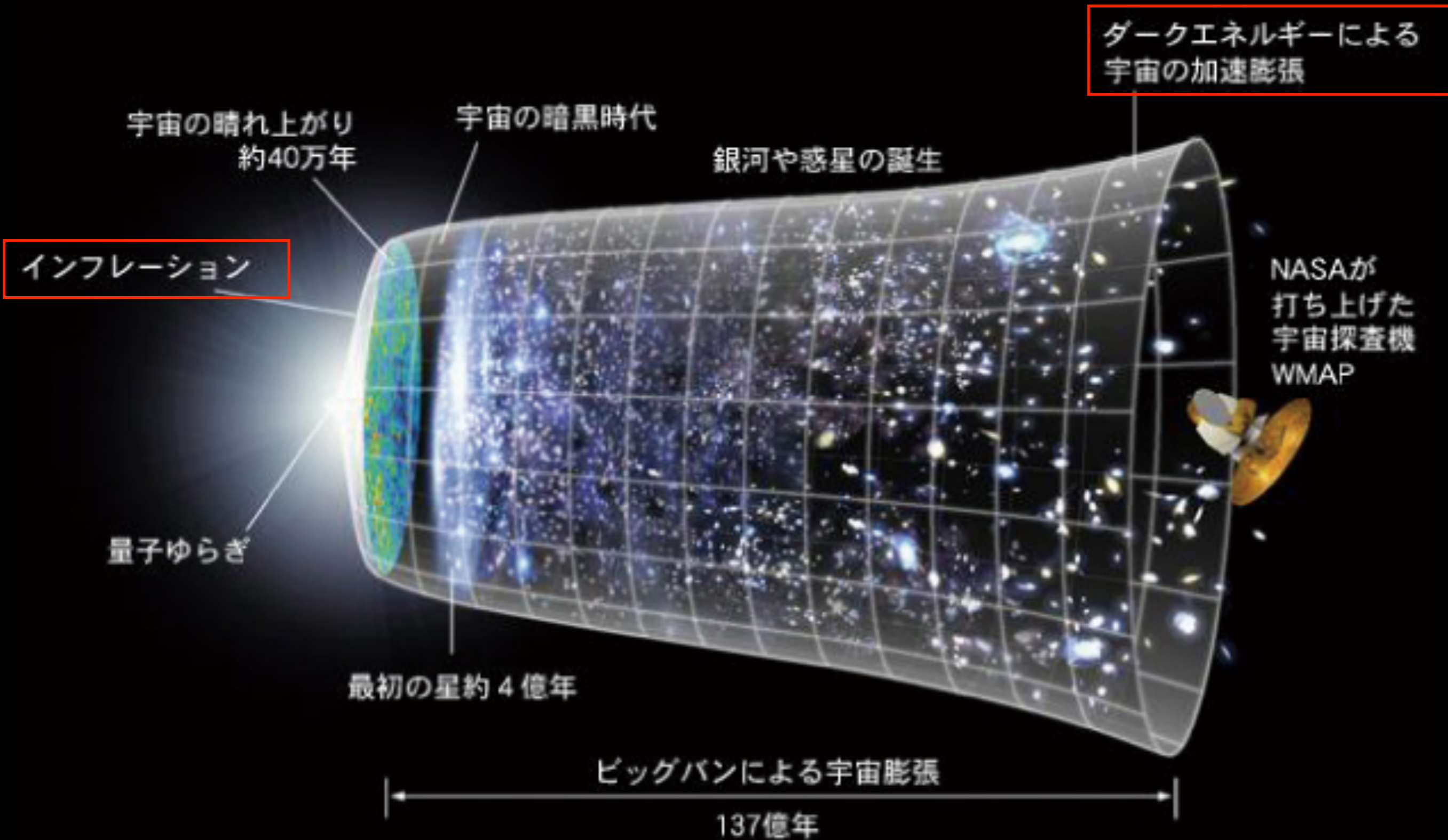
# 宇宙のゆらぎと大規模構造

4D2U

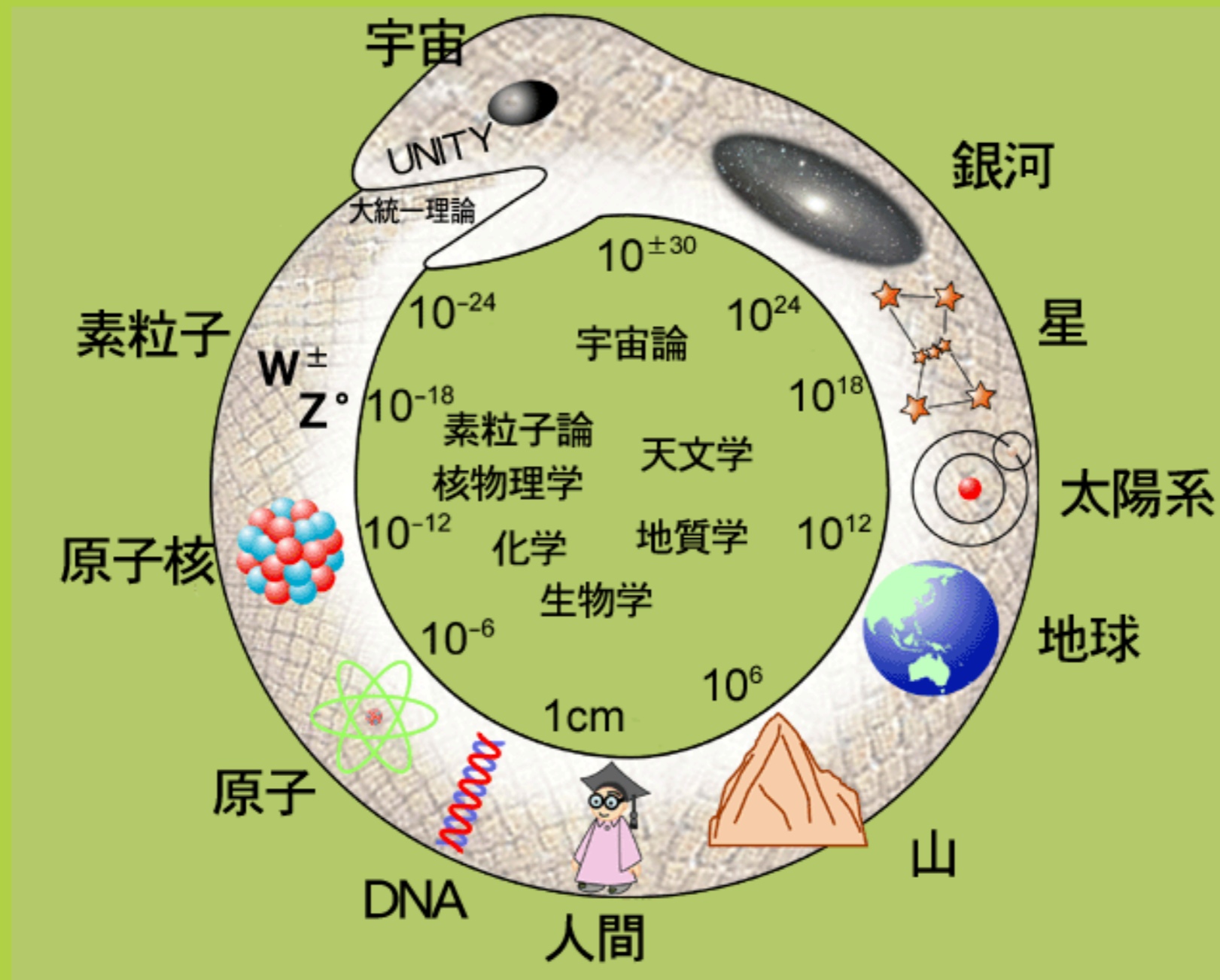
[http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/DarkMatterHalo2\\_v2.html](http://4d2u.nao.ac.jp/t/var/download/DarkMatterHalo2_v2.html)

137億年の歴史の中で、銀河の集団構造が形成

# ビッグバン宇宙の歴史

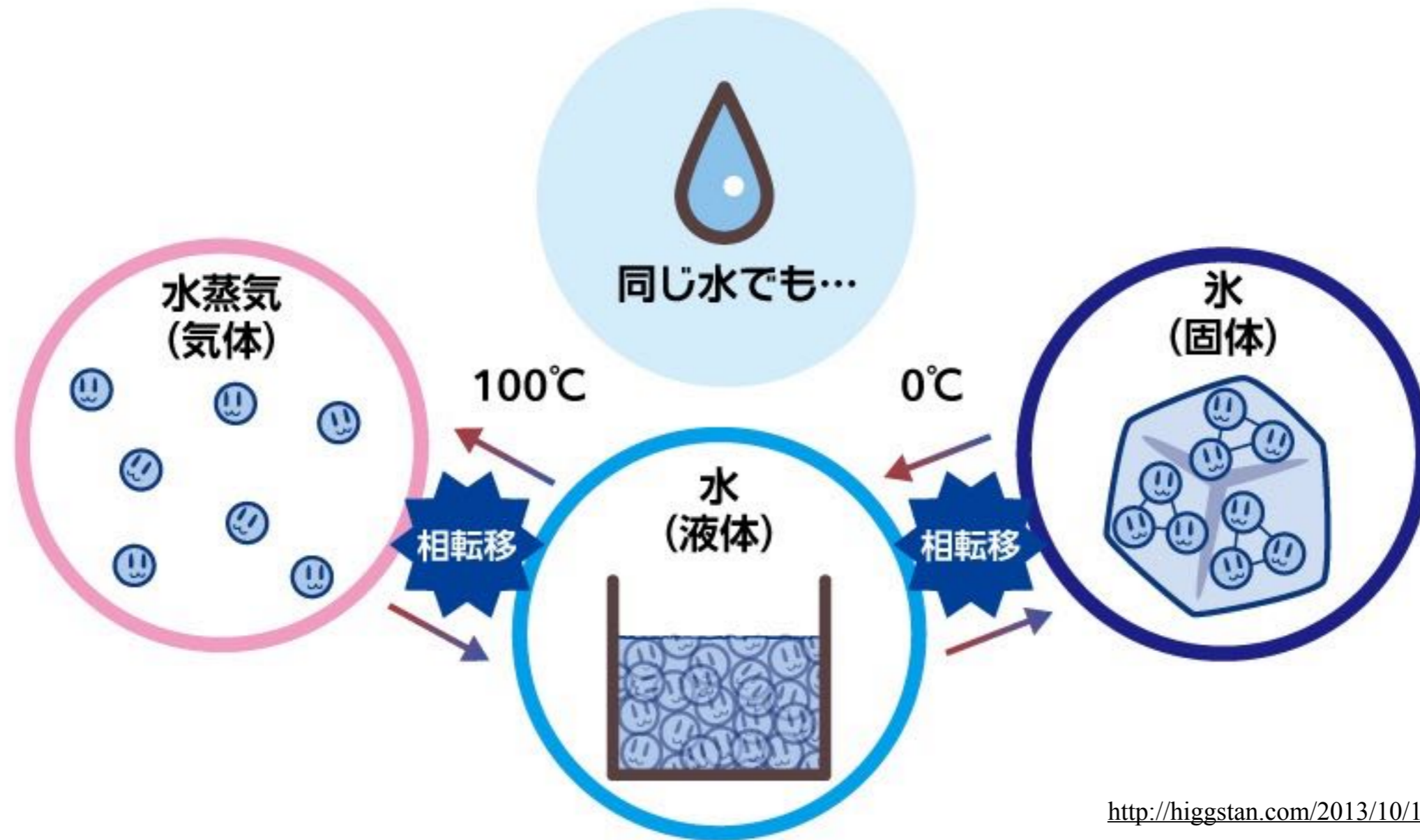


# ビッグバンの前には何があったのか



- ・ 誕生直後の宇宙を記述するものは素粒子物理学
- ・ 真のはじまりは密度無限大の特異点？

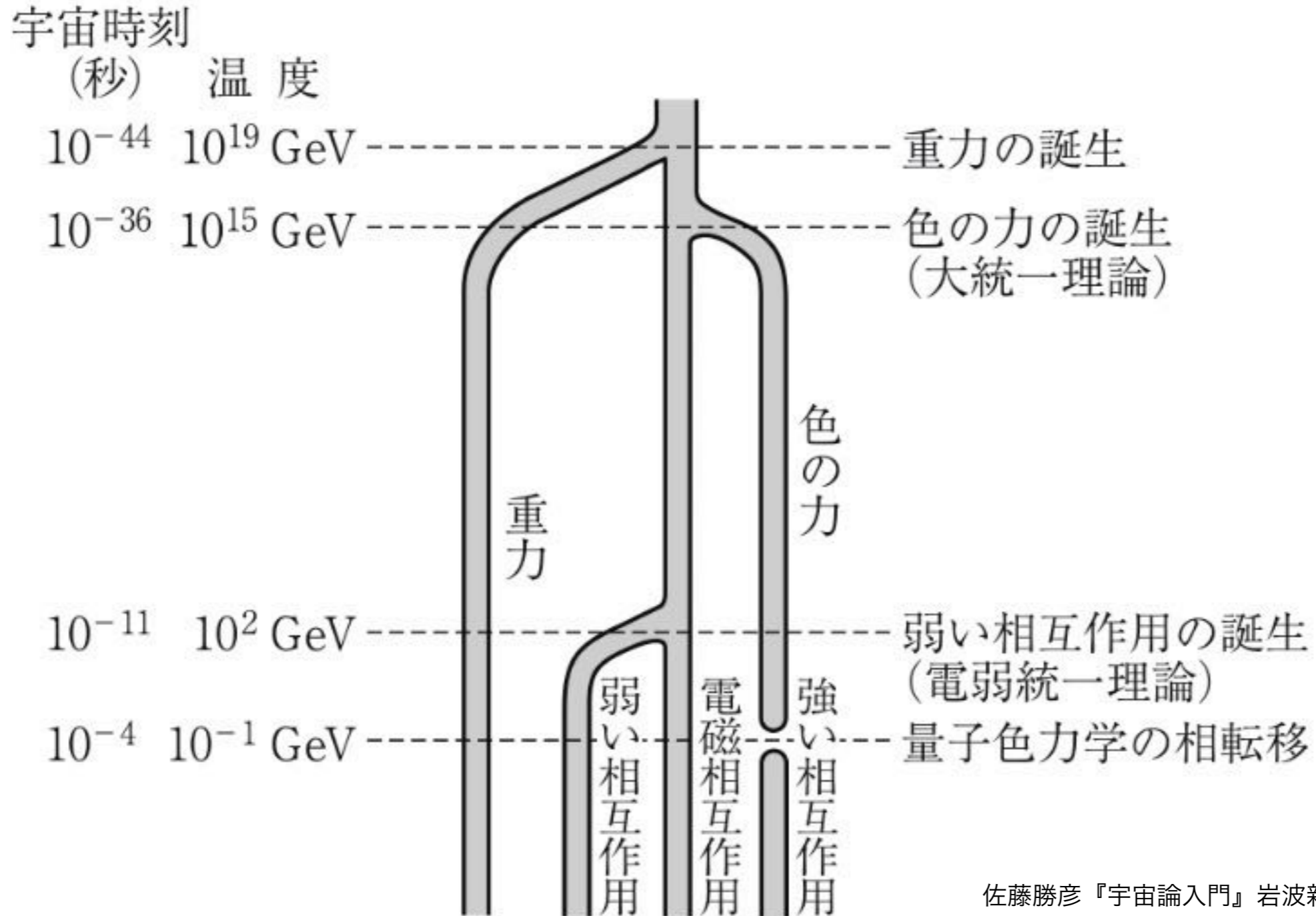
# 物質の相転移



<http://higgstan.com/2013/10/16/437> より転載

**相転移**：温度などの変化によって、物質の性質が大きく変化すること  
多くの場合、相転移に伴って発熱・吸熱がある

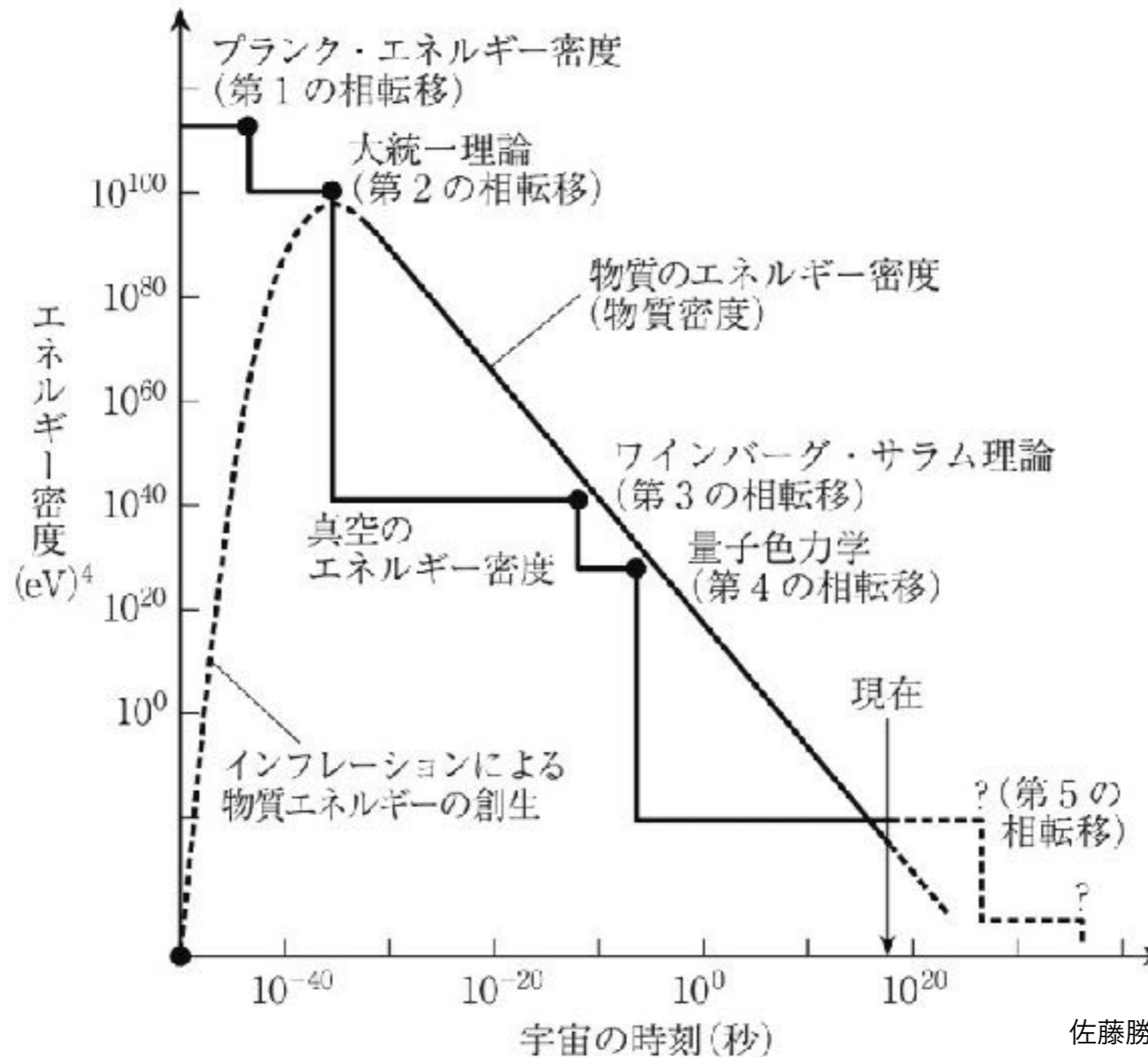
# 真空の相転移



佐藤勝彦『宇宙論入門』岩波新書より

宇宙初期の真空の相転移によって4つの力が分離

# 真空のエネルギーに満ちた初期宇宙



佐藤勝彦『宇宙論入門』岩波新書より

- ・ 相転移前の宇宙は巨大な**真空のエネルギー(斥力)**をもっていた
- ・ 相転移後、真空のエネルギーは熱に変換される ⇒ 火の玉宇宙へ

# インフレーション(指数関数的膨張)

宇宙が進化した結果、現在のような星や銀河などが生まれてきた。

現在137億年

時間 ↑

真空のエネルギーが宇宙の斥力：宇宙項の復活

宇宙の晴れ上がり

WMAPの観測30万年

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

時空の歪み

物質の分布

宇宙項

ビッグバン

相転移終了

インフレーション期

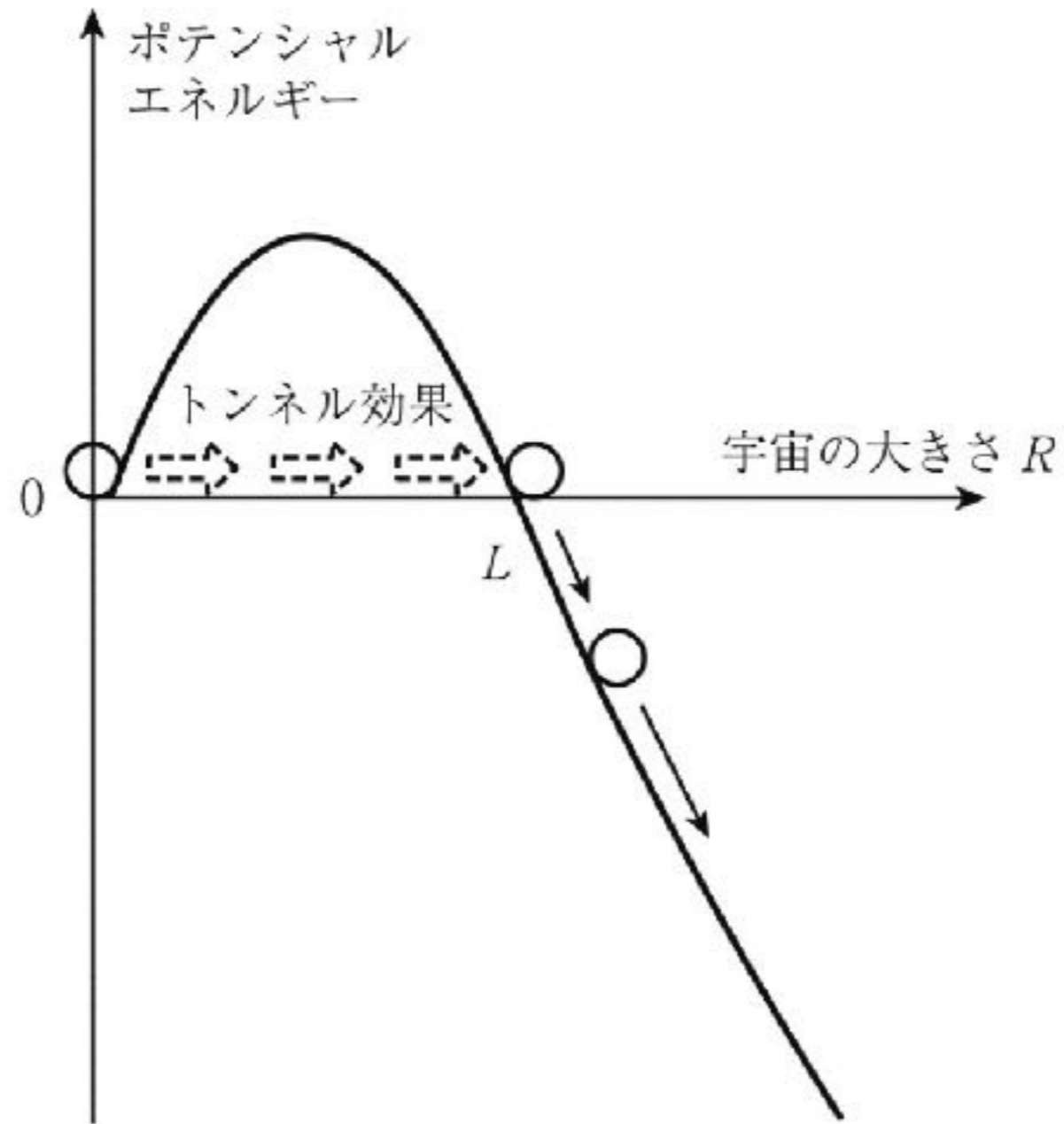
10<sup>-36</sup> 秒

“果て”のない状態で宇宙は始まった

“無”からの創生

<http://cbr.kek.jp/outreach/how/about.html>

# はじまりのはじまり：量子宇宙論



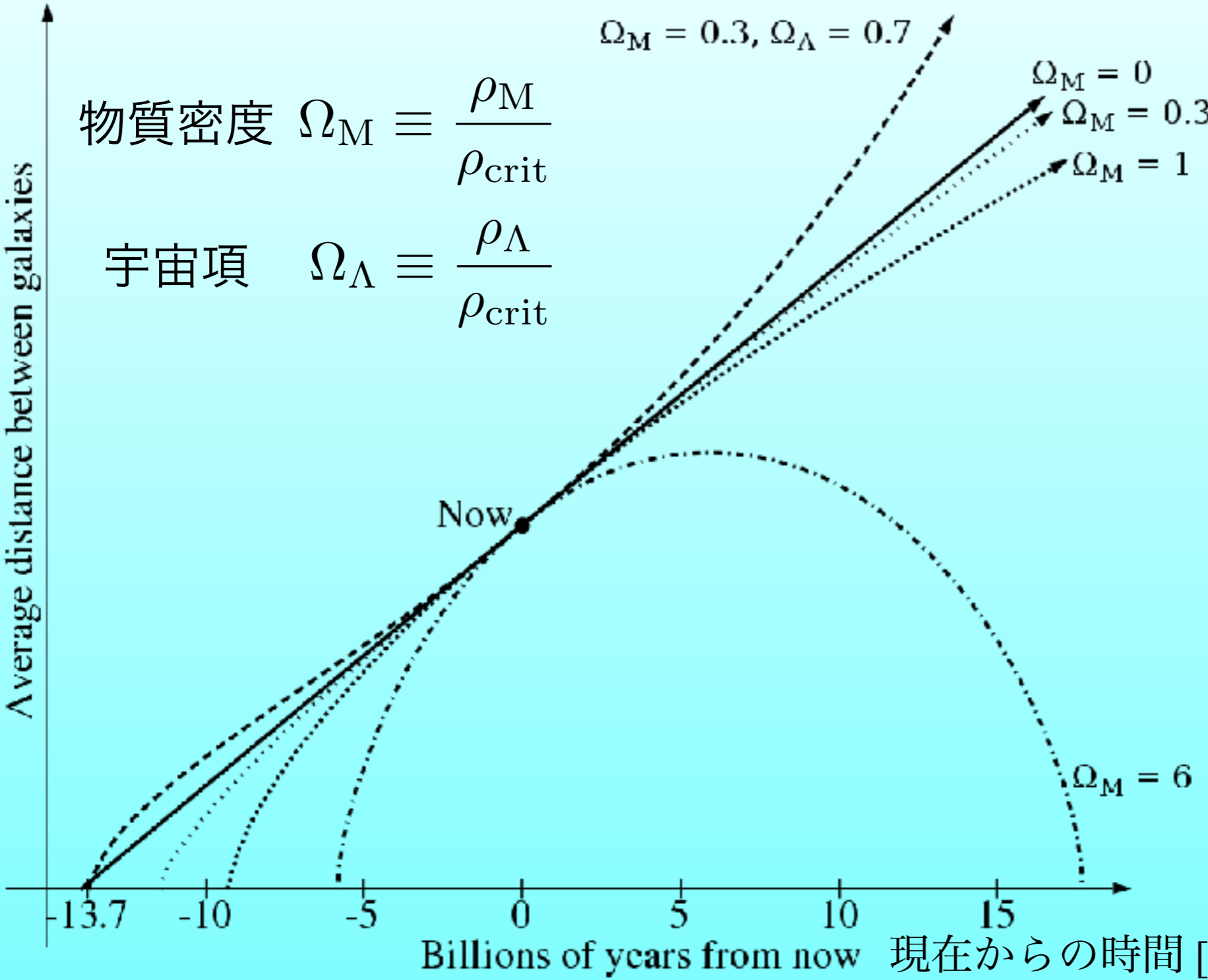
佐藤勝彦『宇宙論入門』岩波新書より

量子論的なトンネル効果により、宇宙は無から誕生した



# 宇宙の未来：アインシュタイン方程式の解

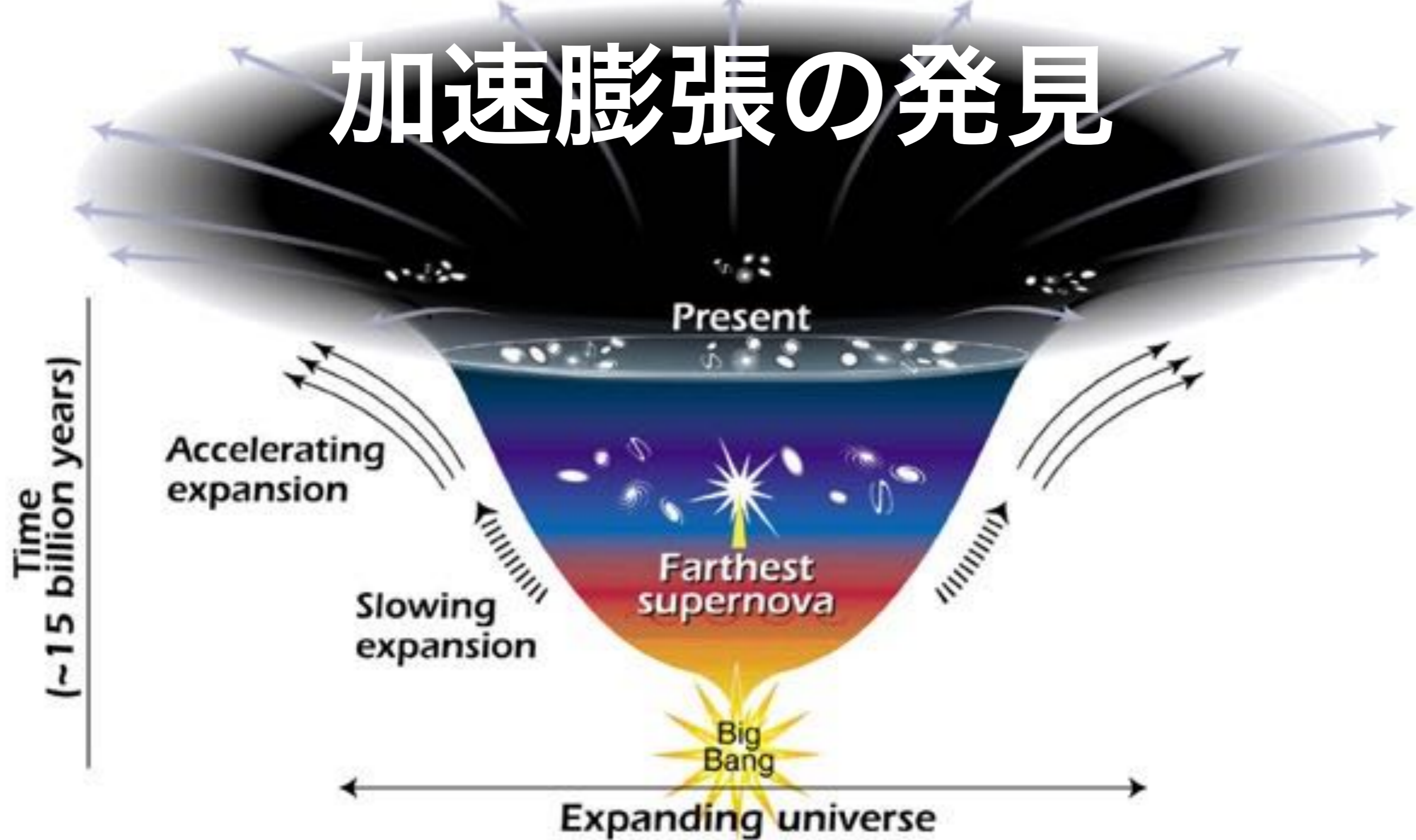
銀河間の平均距離 (宇宙の大きさに対応)



- 宇宙項なし
1. 収縮に転じる
  2. 減速膨張
  3. 等速膨張
- 宇宙項あり
4. 加速膨張

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/dc/Friedmann\\_universes.svg/1000px-Friedmann\\_universes.svg.png](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/dc/Friedmann_universes.svg/1000px-Friedmann_universes.svg.png)

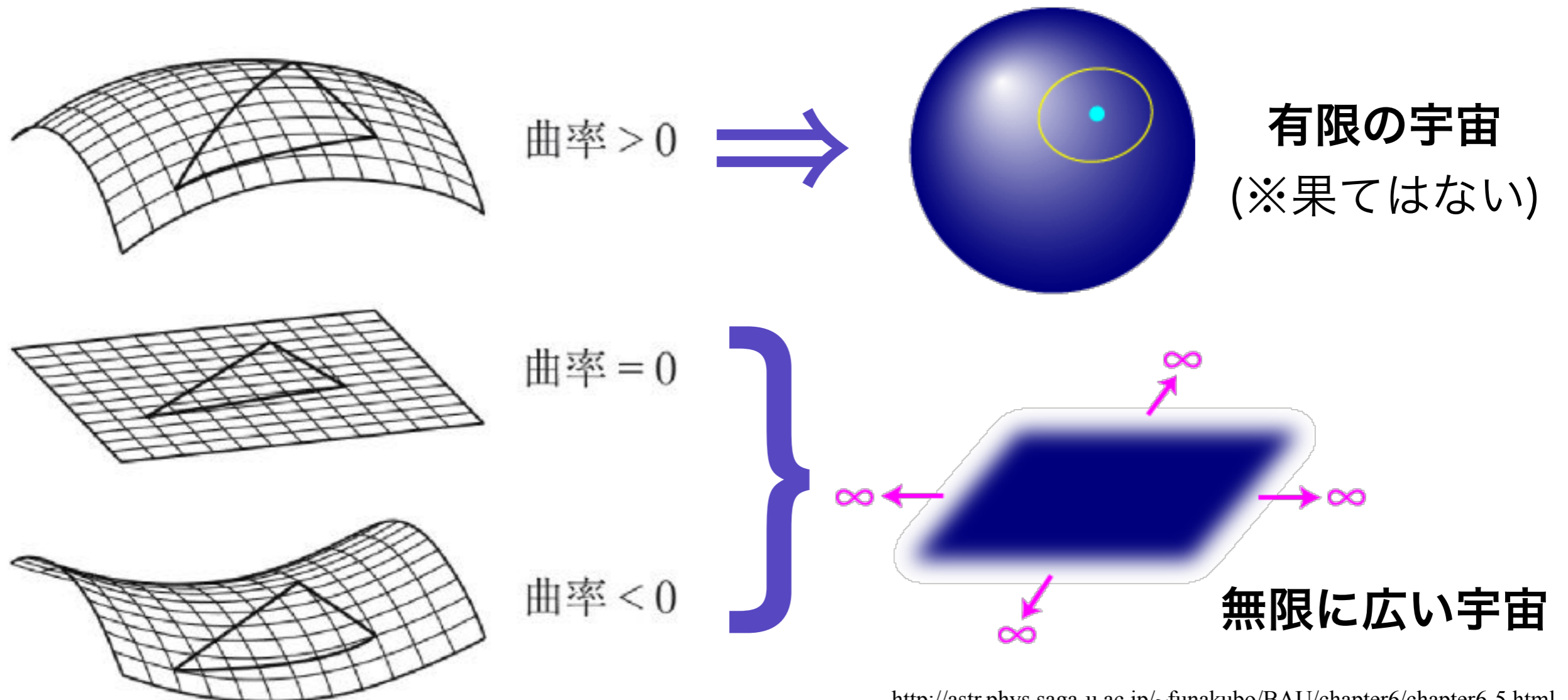
# 加速膨張の発見



- ・ 現在の宇宙は加速膨張していることが観測的に解明された
- ・ 加速膨張している理由や、将来どうなるかは未知

# 可視宇宙の外側は？

宇宙のエネルギー密度に応じて、宇宙は異なる曲率を取りうる



現実の宇宙は 曲率=0 に限りなく近いことが  
観測によるエネルギー密度の見積りからわかっている

# まとめ

## 宇宙の誕生とその進化

### 量子宇宙

- ・ トンネル効果による無からの誕生

### インフレーション

- ・ 真空のエネルギーによる指数関数的膨張
- ・ 真空の相転移による4つの力の分離と加熱

### ビッグバン

- ・ ~数分後 最初の元素合成
- ・ ~約40万年後 宇宙の晴れ上がり
- ・ ~約4億年後 初代星の形成、銀河形成
- ・ ~現在まで 大規模構造の形成
- ・ 現在の宇宙は加速膨張している

ダークエネルギーによる  
宇宙の加速膨張

NASAが  
打ち上げた  
宇宙探査機  
WMAP

# 参考文献

- ・ 宇宙論入門—誕生から未来へ (佐藤勝彦, 岩波新書)
- ・ シリーズ現代の天文学 宇宙論 I・II (日本評論社)

# スケジュール 2

11/22 天体観測 (大宮)

11/29 超新星・宇宙論 (1) (黒川)

12/6 超新星・宇宙論 (2) (黒川)

12/13 初期宇宙と構造形成 (1) (林)

12/20 初期宇宙と構造形成 (2) (林)

1/10 全体のまとめ (大宮)

# レポート課題 (黒川担当分)

「星と惑星の形成」(第5回) または

「宇宙誕生から現在までの歴史」(第11回)

のどちらかについて

他人が読んでもわかりやすいように要点をまとめよ。

文章の他に、イラスト・図などを用いてもよい。

(A4レポート用紙1枚以内)

**提出先：レポートボックス**

**提出期限：12/13(水) 17時**