

重力と宇宙

- 新しい時空の量子論に向けて -

KEK/総研大 浜田賢二

第一章

一般相対論と膨張宇宙

はじめに

量子力学(1901年～)

- プランク(量子仮説)
- アインシュタイン(光電効果)
- ボーア(対応原理)
- シュレディンガー(波動力学)
- ハイゼンベルグ(不確定性原理)

特殊相対性理論(1905年)

- アインシュタイン

一般相対性理論(1915年)

- アインシュタイン

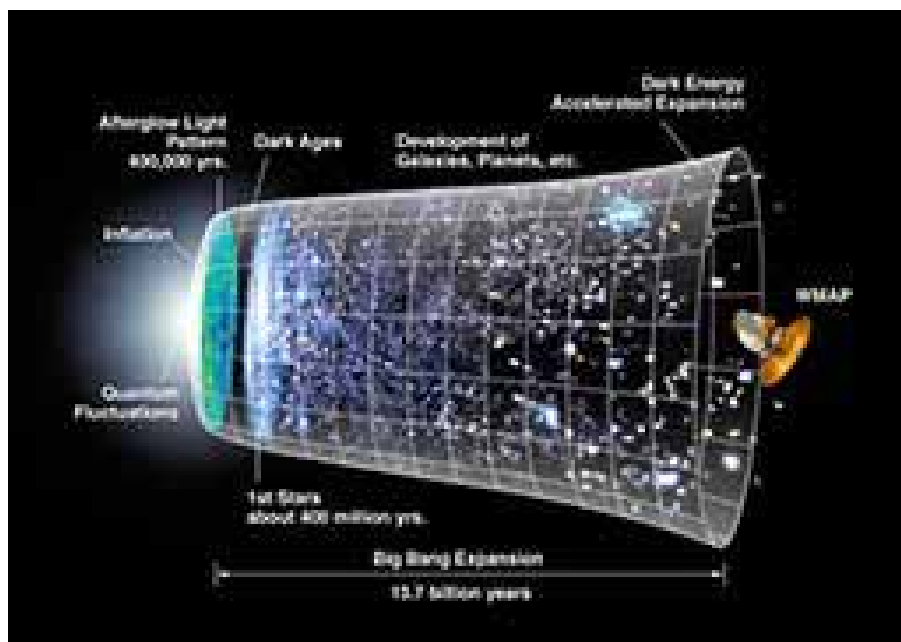
場の理論・素粒子論 (1935年～)

- 湯川(中間子論)
- 朝永(くり込み理論)
- シュウィンガー(同上)
- ファインマン(同上)

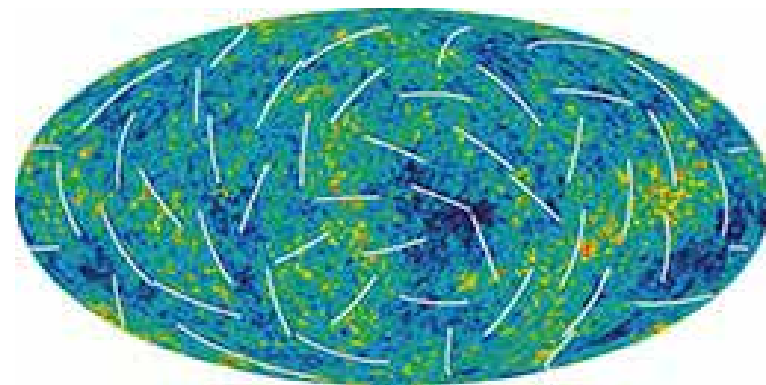
量子重力

今年(2024年)は朝永生誕100周年
来年(2025年)は湯川生誕100周年

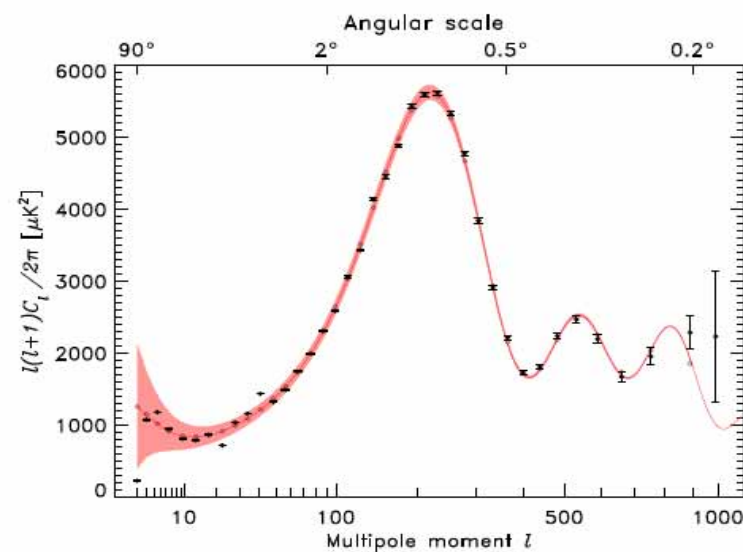
誕生から現在までの宇宙の歴史



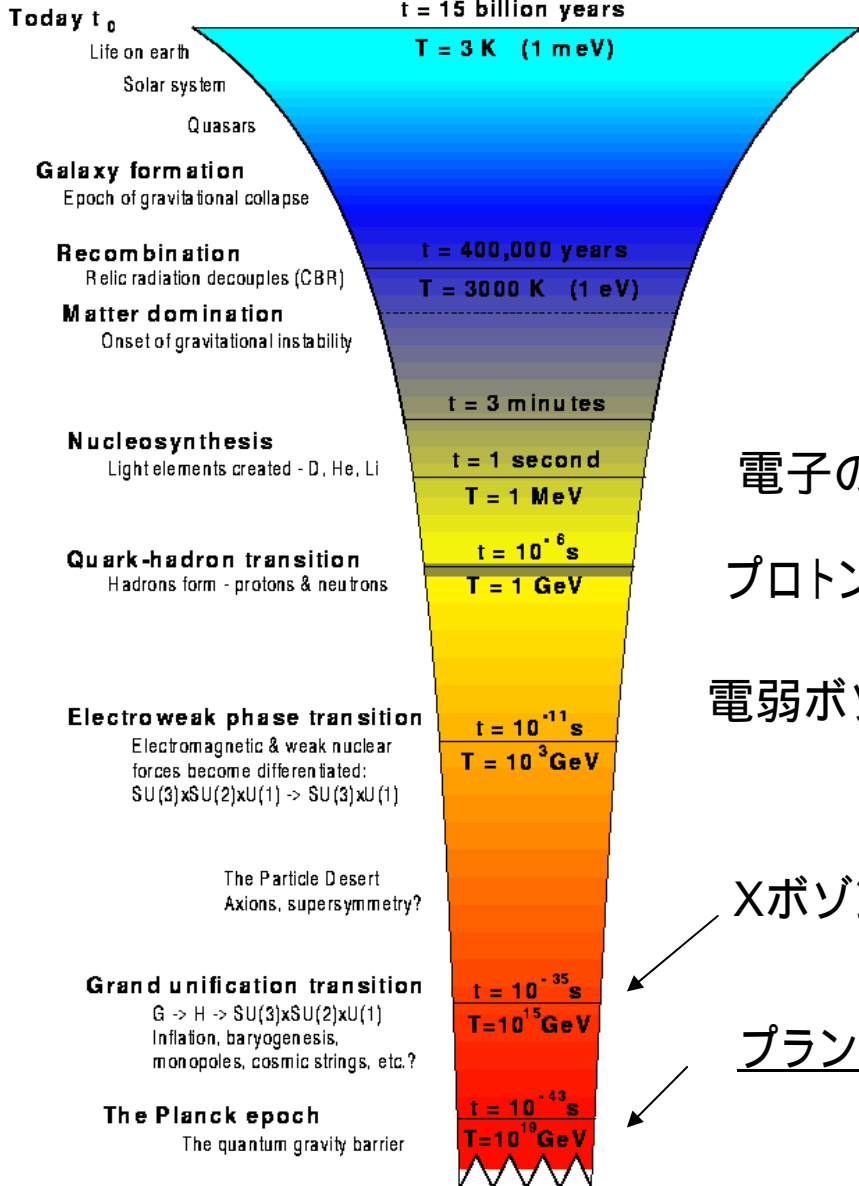
WMAP人工衛星が観測したスペクトラムの中に誕生から現在までの宇宙の歴史が刻まれている。



WMAP



宇宙の歴史の中のスケール



$$\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$$

(メガ)

$$\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$$

(ギガ)

電子の質量 $m_e = 0.5 \text{ MeV}$ (量子電磁力学)

プロトンの質量 $m_P = 1 \text{ GeV}$ (量子色力学)

電弱ボゾン質量 $m_W = 80 \text{ GeV}$ (電弱理論)

Xボゾン質量 $m_X = 10^{16} \text{ GeV}$ (大統一理論)

プランク質量 $M_P = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 10^{19} \text{ GeV}$

ニュートン定数 G の値が他の相互作用に比べて非常に小さい。

膨張宇宙と一般相対論

• ニュートン力学

ある定常な空間の中の質量をもった物体の間に働く引力

⇒ **膨張宇宙の概念は生まれない。**

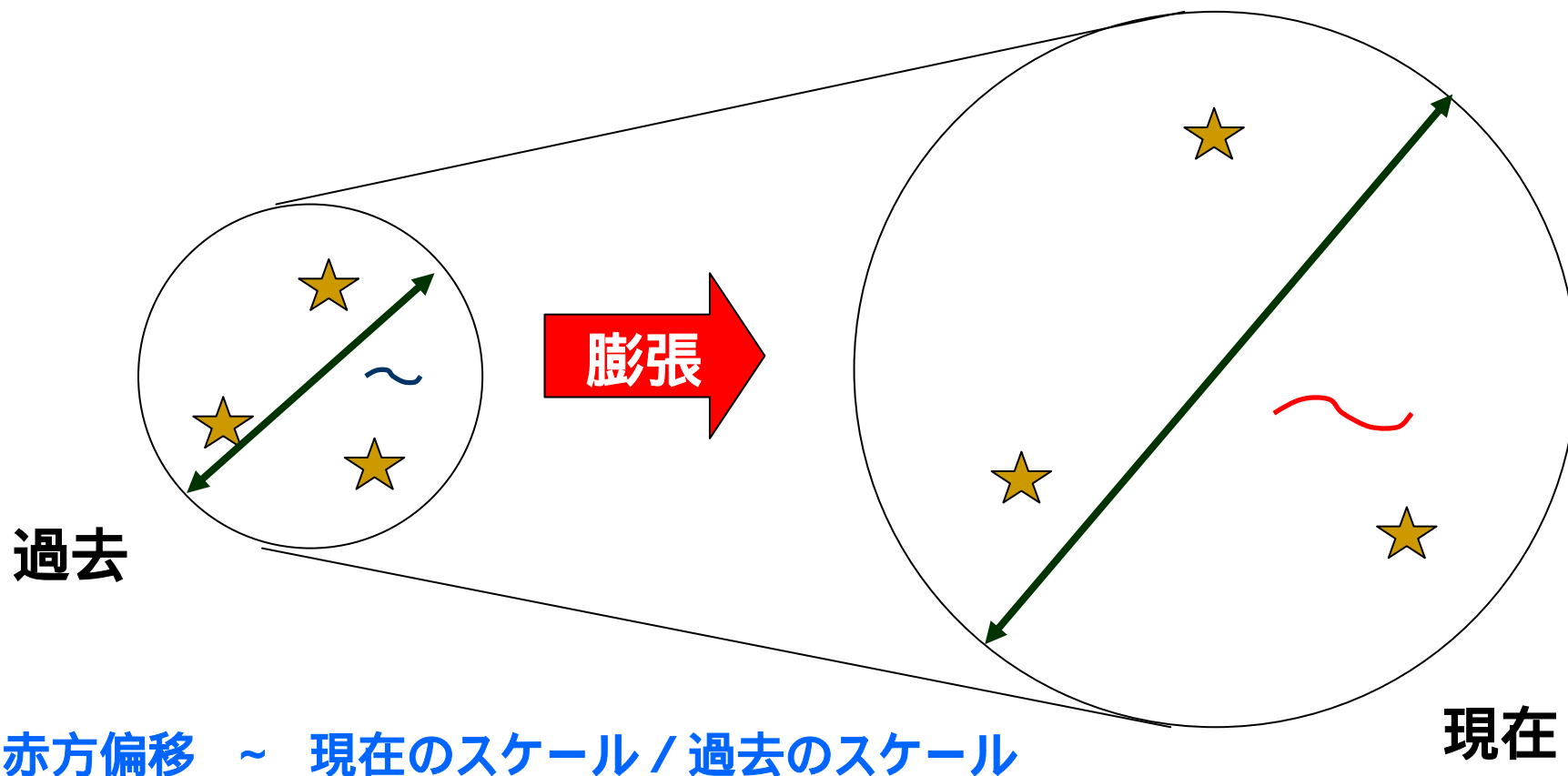
• アインシュタイン重力 (局所的にニュートン力学を含む)

空間そのものが変化する。宇宙全体を議論できる。

アインシュタイン方程式:
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = 8\pi GT_{\mu\nu}$$

空間のスケールが膨張する解がある。

宇宙全体のスケールが大きくなる

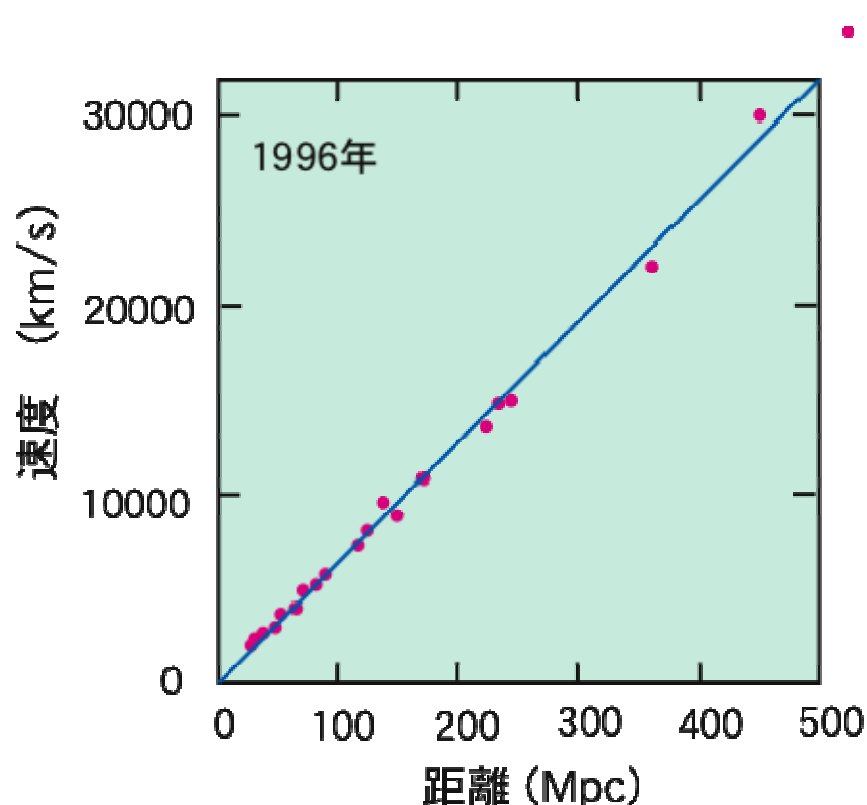


空間上の星、銀河はお互いに引き合うにもかかわらず、その力に打ち勝って宇宙は膨張している。

膨張宇宙の証拠

1929年 ハッブル

遠くの銀河は銀河までの距離に比例した速度で遠ざかっている



$$v = H_0 \times d$$

速度 距離

現在のハッブル定数

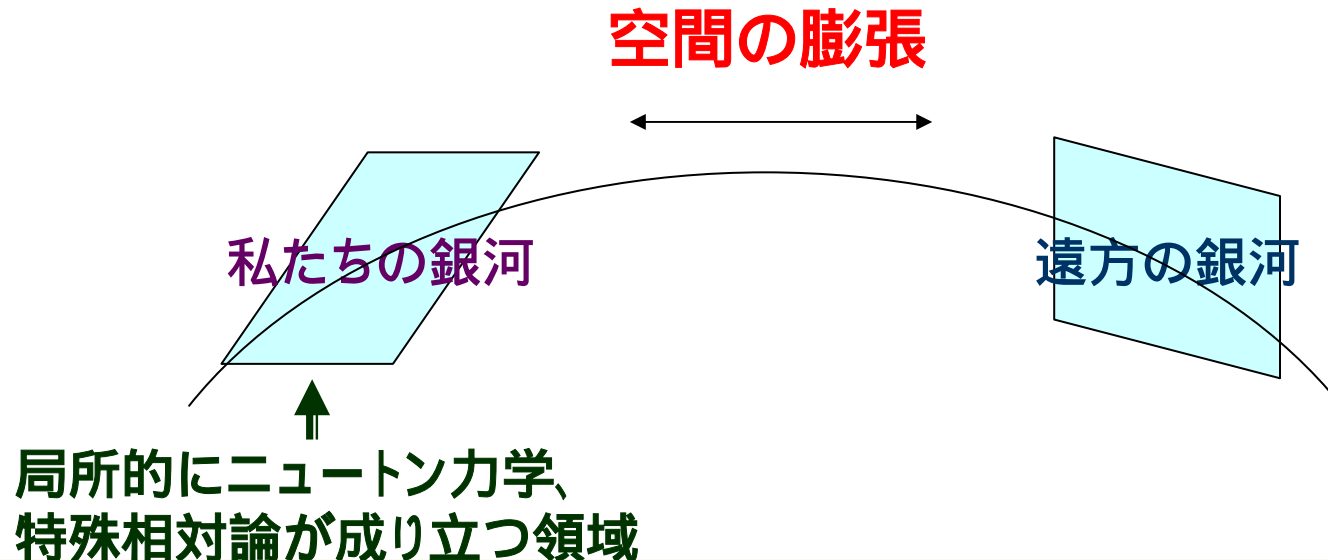
$$H_0 = 72 \text{ km/sec/Mpc}$$

Mpc = 326万光年、 銀河 ~ 20万光年

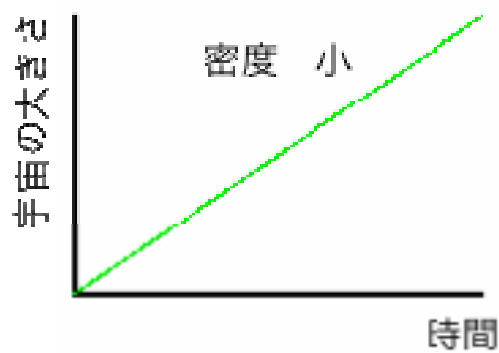
宇宙の大きさ

後退速度が光速 ($v = c$) になる距離

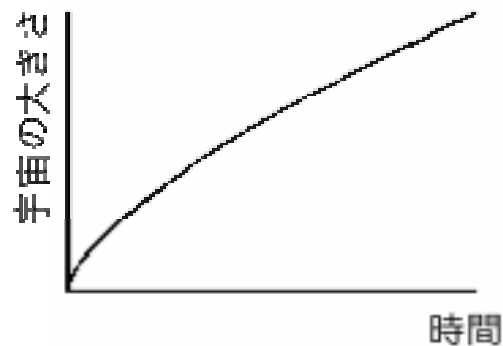
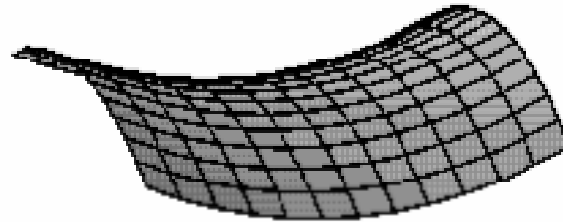
$$\begin{aligned} d_H &= \frac{c}{H_0} && \text{ハッブル距離} \\ &= 4100 \text{ Mpc} && \text{(現在見えている宇宙の大きさ)} \end{aligned}$$



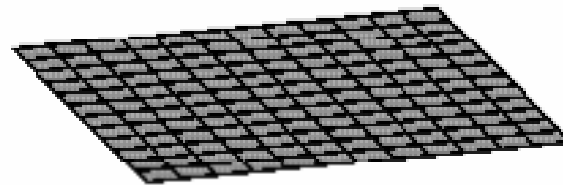
1922年 フリードマン宇宙モデル



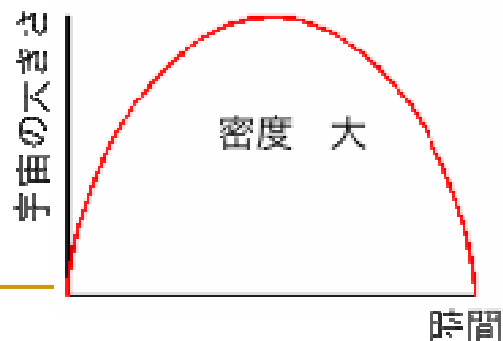
開いた宇宙



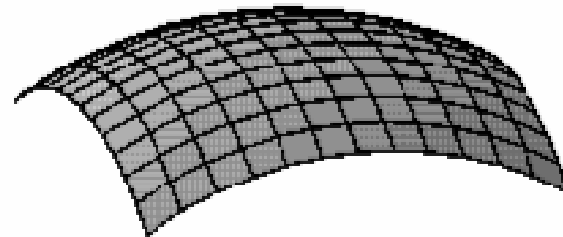
平坦な宇宙



現在の観測は平坦な宇宙を支持している。



閉じた宇宙



膨張宇宙が意味すること

膨張 => 過去に遡れば空間は圧縮されていた。

断熱(宇宙はそれ自体閉じた世界)
=> 圧縮すれば温度が上がる。



アインシュタイン方程式が破綻するエネルギースケール

$$E = M_{\text{P}} c^2 \simeq 10^{18} \text{ GeV}$$

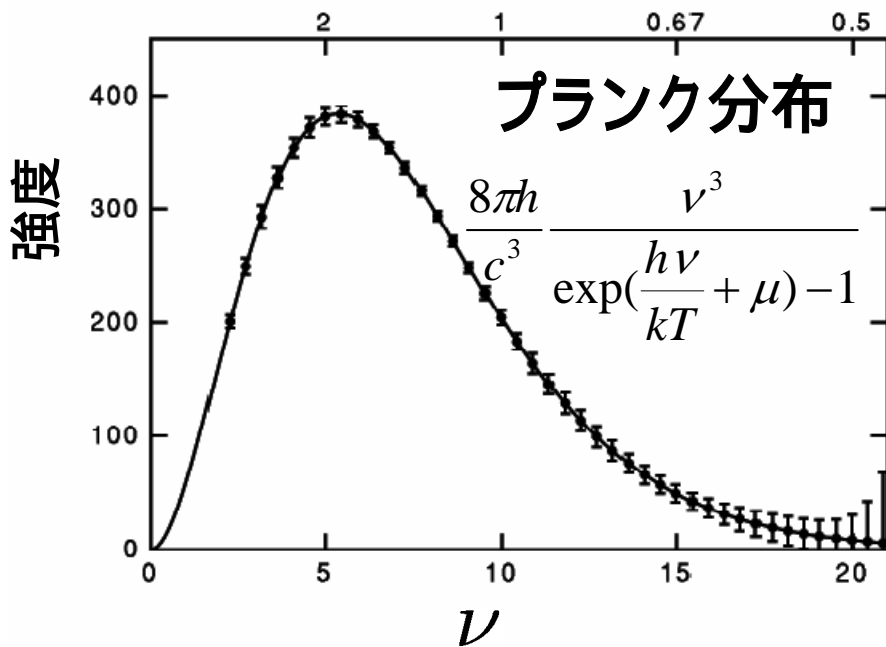
$$\simeq 10^{30} \text{ K}$$

プランクの
エネルギースケール

宇宙が高温であったことの証拠

1965年 ペンジャス・ウィルソンによる3K 宇宙背景放射の発見

$$T = 2.728 \pm 0.001 K$$



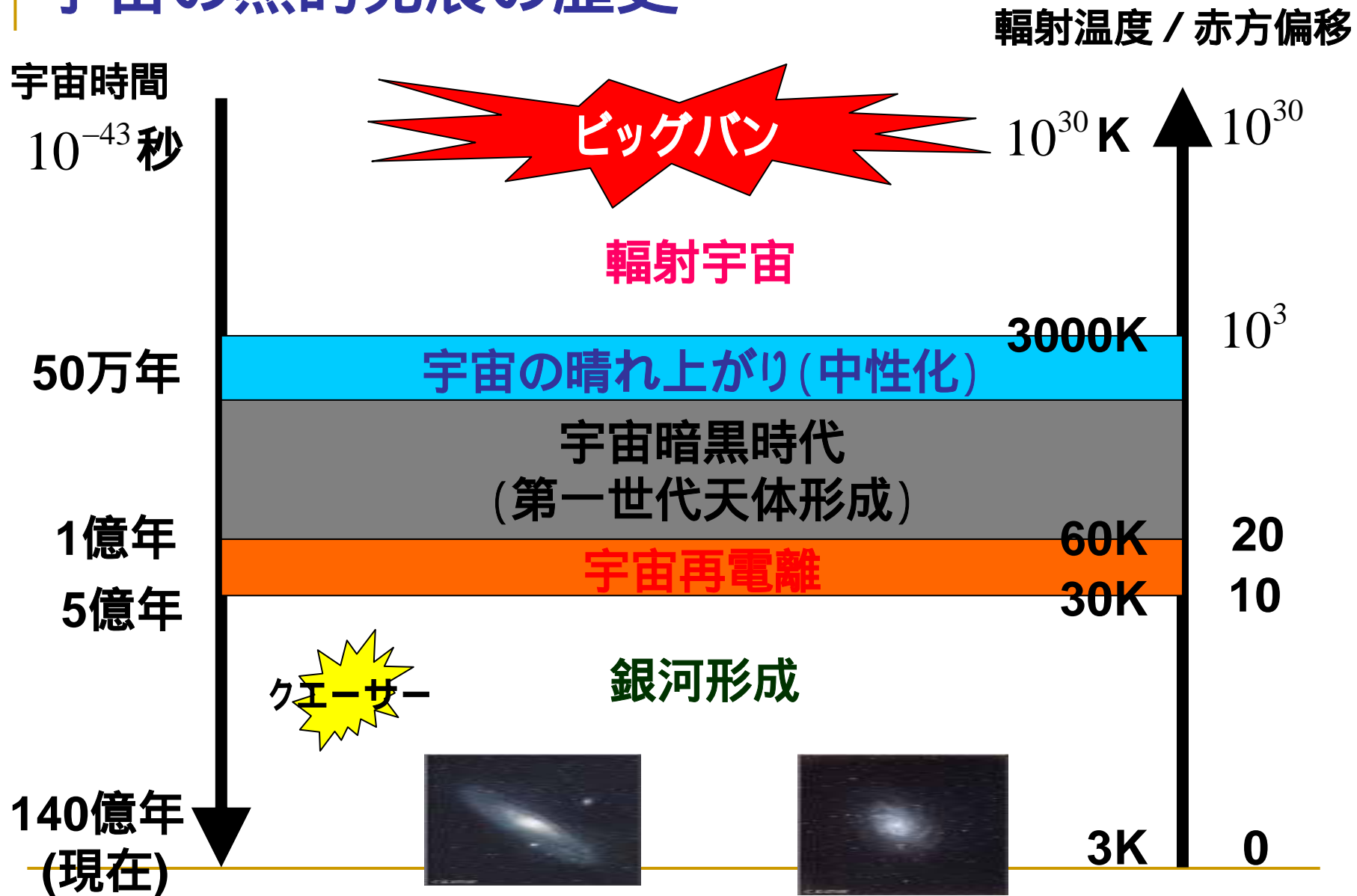
初期宇宙の高温状態
→短い波長の光で満ちている



宇宙の膨張で波長が
引き伸ばされる(赤方偏移)

現在も長波長の光が宇宙
を満たしている

宇宙の熱的發展の歴史



原始ゆらぎ

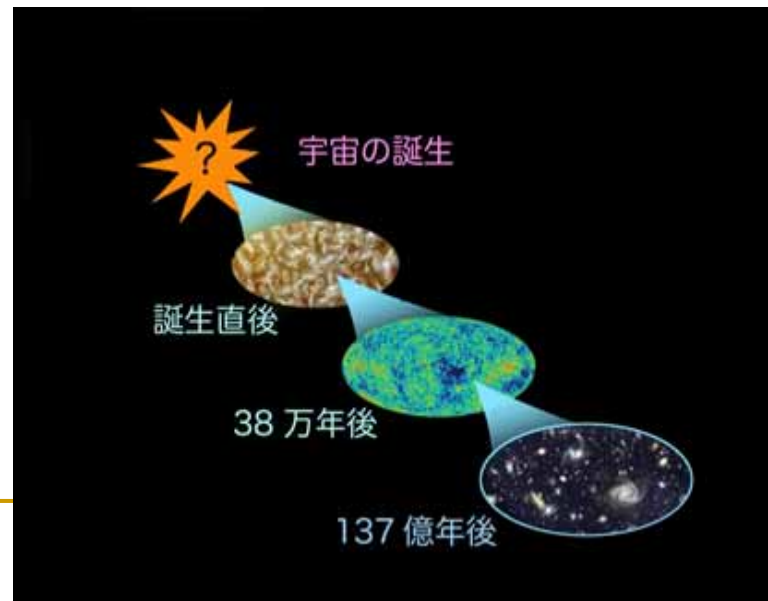
現在の宇宙は極めて一様・等方である

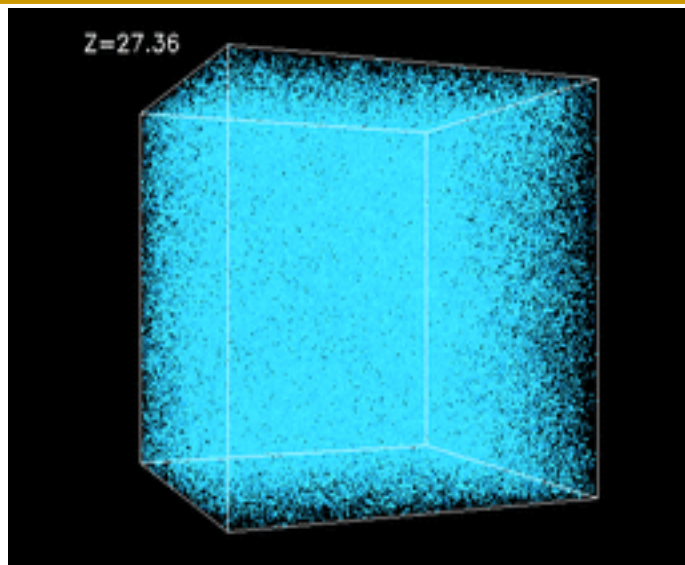
しかし、完全に一様・等方であるなら太陽や銀河、銀河団などの大きな構造は生成されない

すべての宇宙構造は原始ゆらぎが成長して創られた

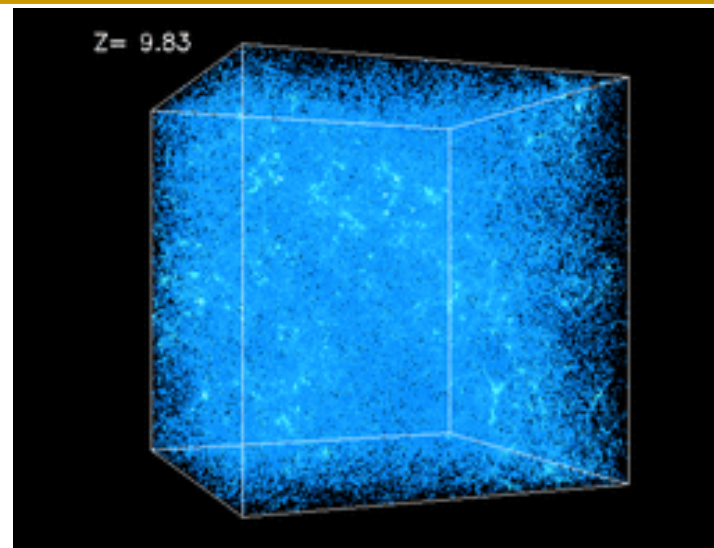
現在のゆらぎの大きさ

- 宇宙背景放射
温度ゆらぎ: $\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5}$
- 銀河分布のゆらぎ $\sim \frac{1}{10}$

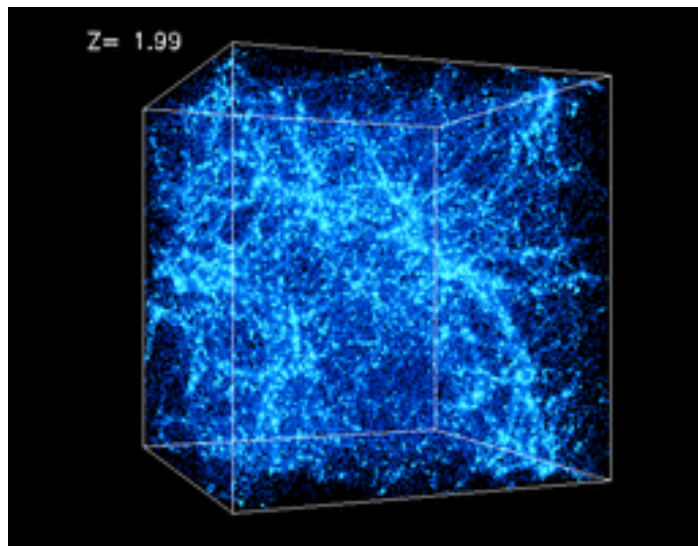




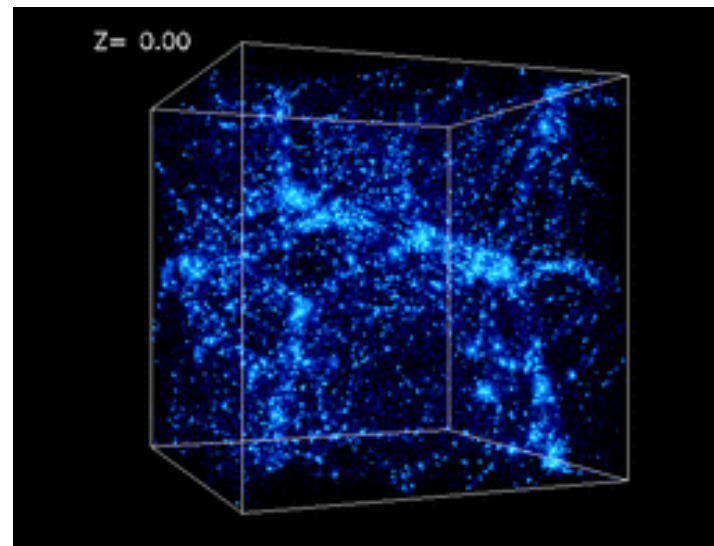
1億2000万年後



4億9000万年後



12億年後



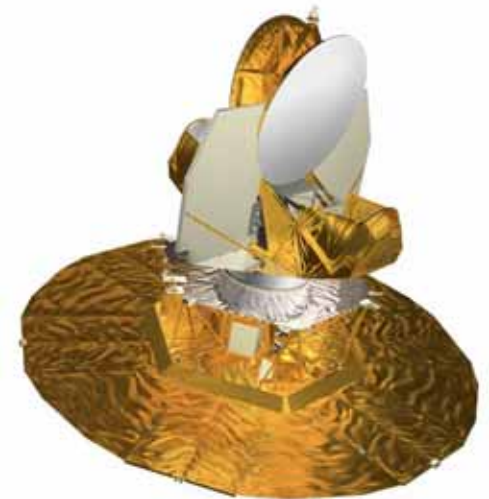
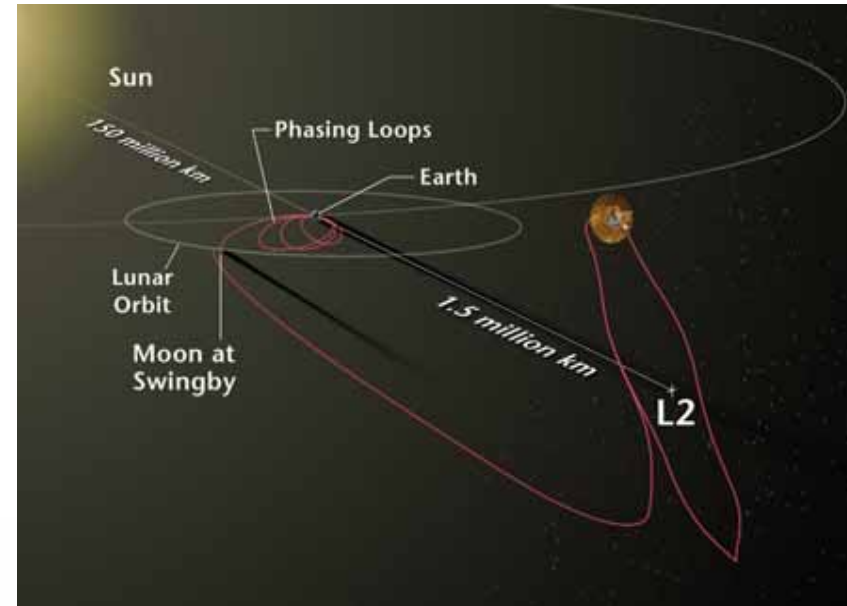
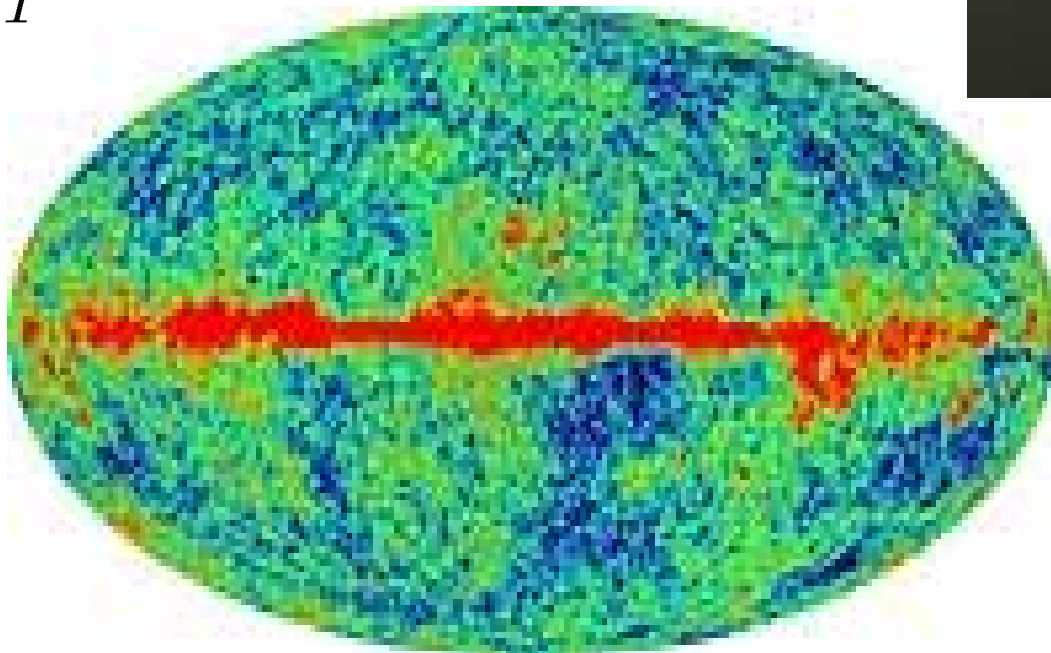
137億年後

宇宙背景放射温度ゆらぎの観測

Wilkinson Microwave Anisotropies Probe (WMAP)

温度ゆらぎ: $T = T_0 + \delta T$

$$\frac{\delta T}{T} \sim 10^{-5} \quad \parallel \quad 2.728\text{K}$$



http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html

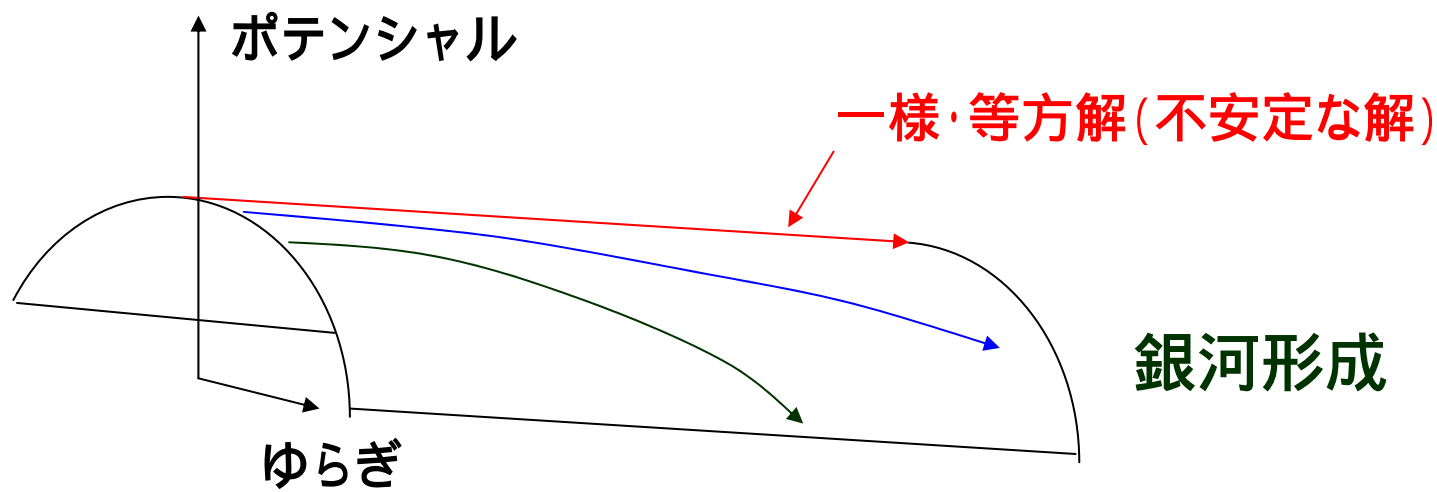
WMAP satellite

なぜ宇宙は一様・等方なのか？

アインシュタイン方程式の膨張宇宙解は不安定

初期ゆらぎが大きければすぐに宇宙は破綻する。

= > 初期のゆらぎが非常に小さい。



解の不安定性

第二章

インフレーション

素朴な疑問

- **なぜ宇宙は膨張しているのか？**

アインシュタイン重力はニュートン力学と同様、物質間に引力を及ぼす。

物質が引き合っているにもかかわらず、なぜその力に逆らって膨張するのか？ => **斥力が必要！**

- **なぜ初期のゆらぎは小さいのか？**

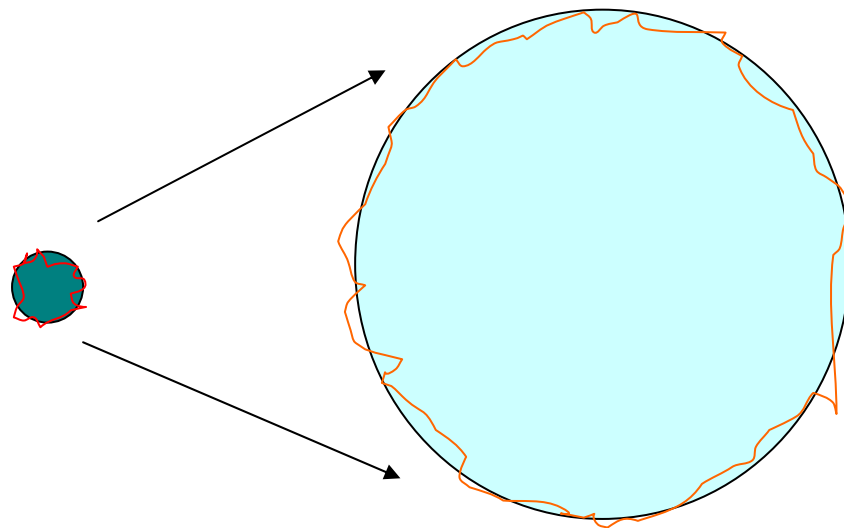
宇宙が現在まで安定であるためには、初期のゆらぎは極めて小さくなければならない。

一方、宇宙初期は高エネルギー反応の坩堝でゆらぎが小さかったとは思えない。=> **メカニズムが必要！**

インフレーション(急膨張)

なぜ宇宙は現在も良い近似で一様・等方的なのか？
=>なぜ初期のゆらぎが小さいのか？

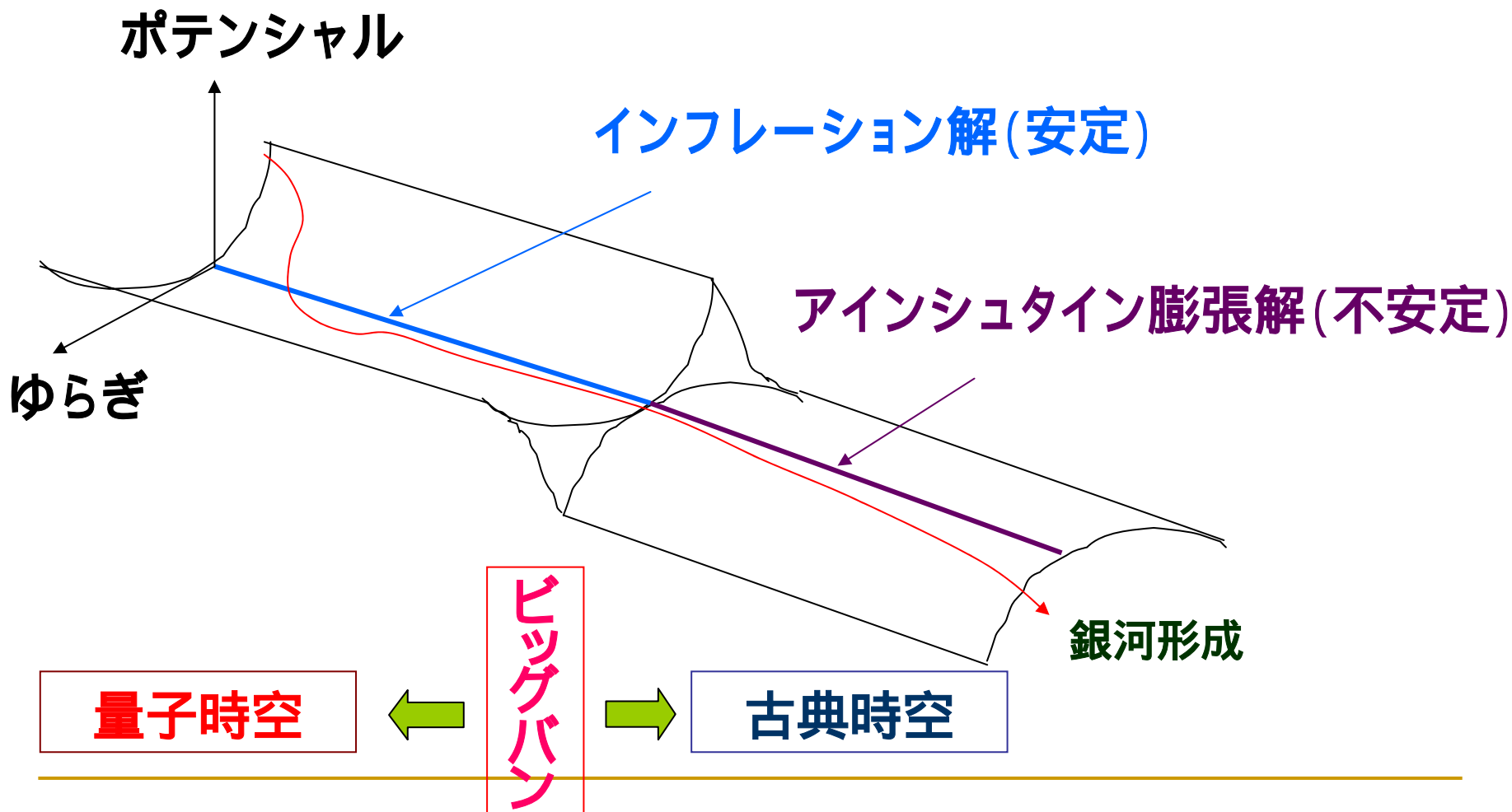
急激に膨張することで相対的にゆらぎを小さくする。



インフレーションを引き起こす力は何？

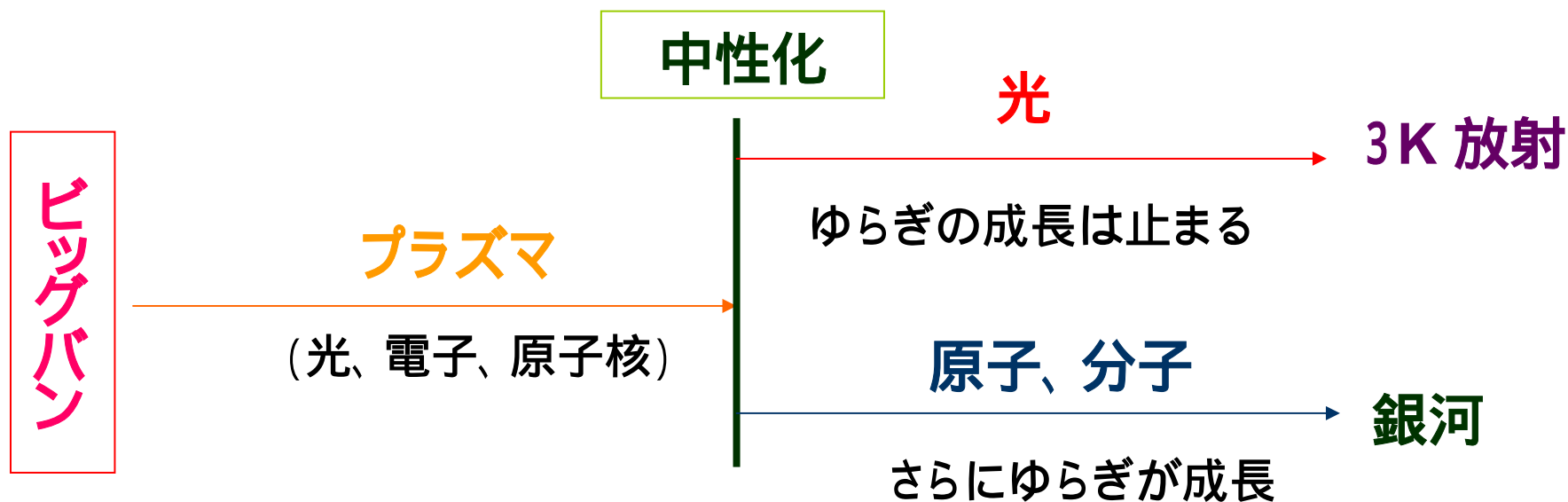
安定性とゆらぎ

インフレーションの時期にゆらぎが小さくなる。

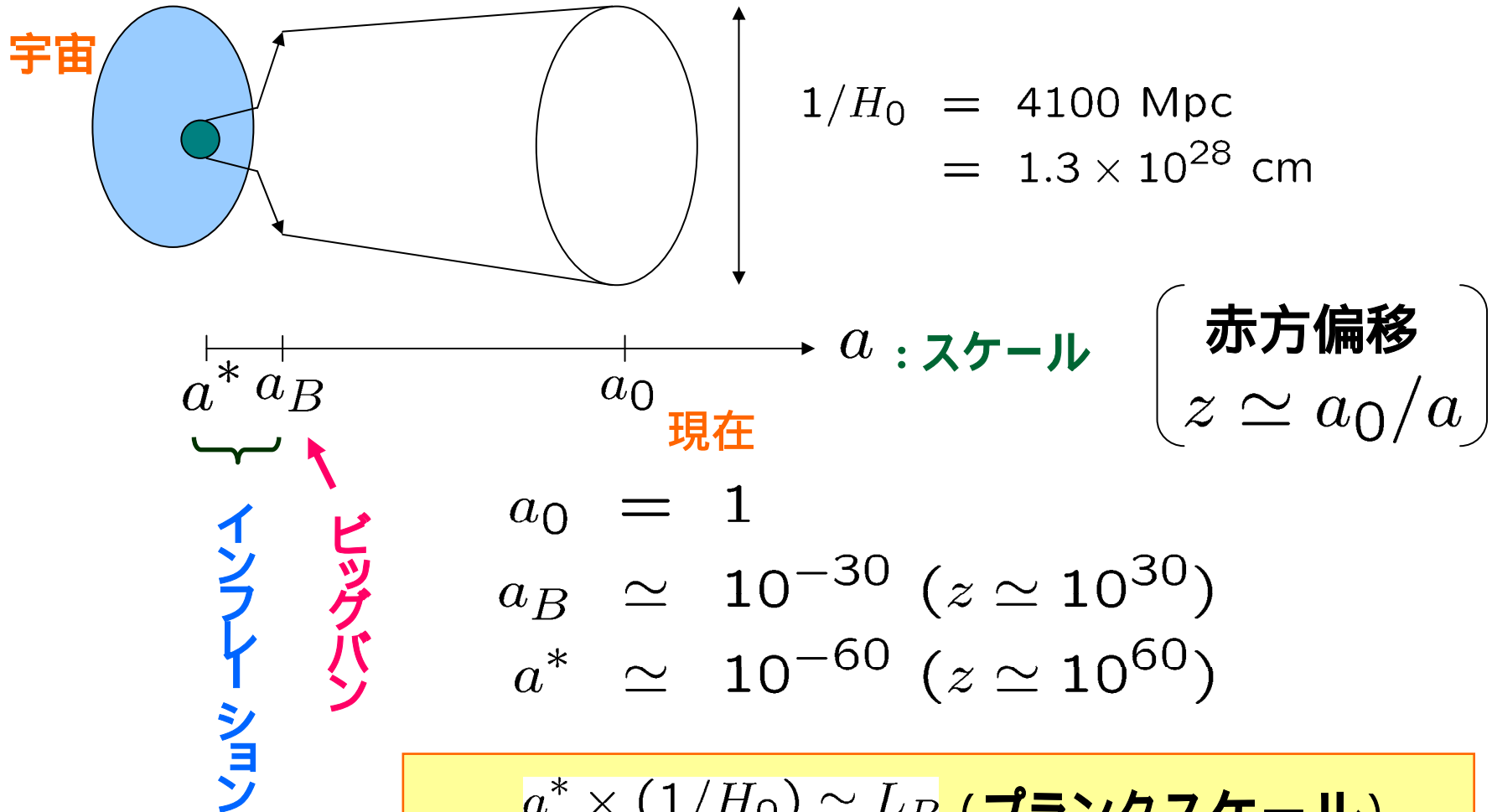


新しいエネルギースケールの観測

アインシュタイン方程式がビッグバンまで正しいとすると
私たちは宇宙背景放射の観測から相転移直後の様子を見ることが出来る。



インフレーションを引き起こす力は何か？



$$a^* \times (1/H_0) \simeq L_P \text{ (プランクスケール)}$$

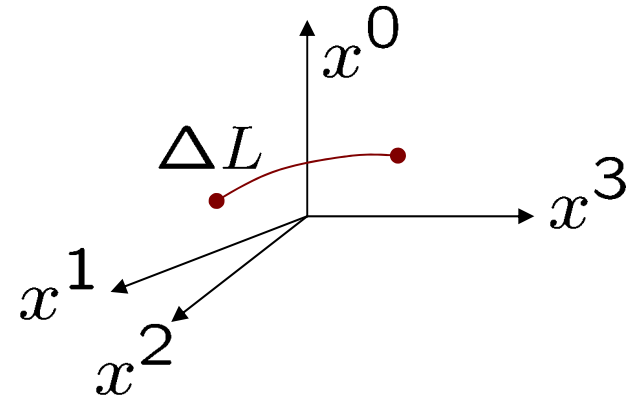
量子重力が寄与する領域

第三章

時空の量子論

量子時空

計量テンソル: $g_{\mu\nu}$



空間内の距離を定義する $\Delta L = \sqrt{g_{\mu\nu} \Delta x^\mu \Delta x^\nu}$

- ニュートン力学、特殊相対論 $\Rightarrow g_{\mu\nu}$ は定数
- 一般相対性理論 $\Rightarrow g_{\mu\nu}$ は力学変数(時間的、空間的に変化)
- **量子時空** $\Rightarrow g_{\mu\nu}$ が量子的にゆらぐ
 \Rightarrow 距離の概念が失われる (背景時空独立性)!

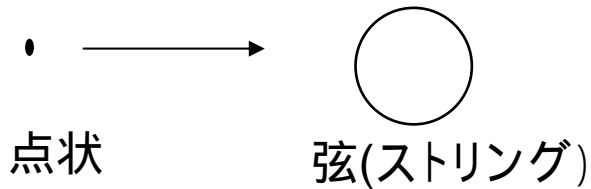
量子重力理論の候補

1. スーパースtring
2. ループ量子重力
3. コンフォーマル量子重力(背景時空独立な量子重力)

アインシュタイン重力の発散の問題を解決したい。

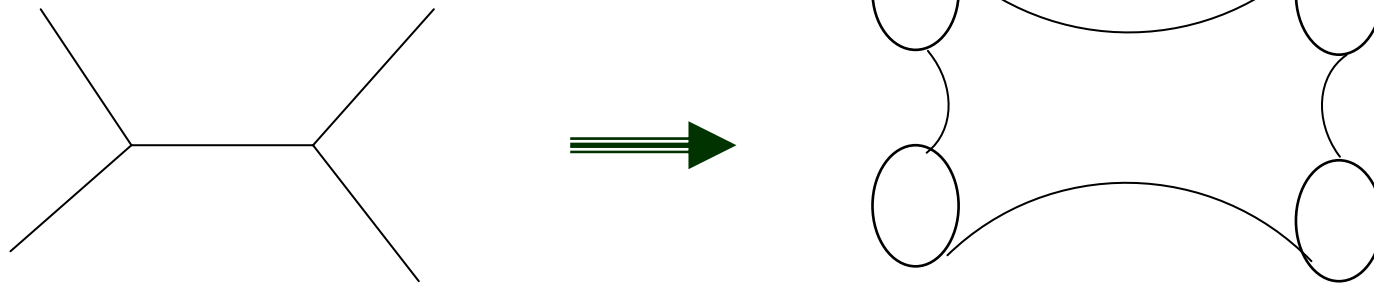
1. スーパースtring

粒子描像の変更 :



弦の振動モードの一つとして
重力子が存在する

相互作用



良い点 / 問題点

- 発散がない = くり込みの必要がない。
=> ダイナミクスがない。
- 時空が10次元 = 余分な6次元のコンパクト化
=> 余分な次元から色々な粒子が出てくる。
「すべての理論」(Theory of Everything)
- 背景時空に依存した定式化

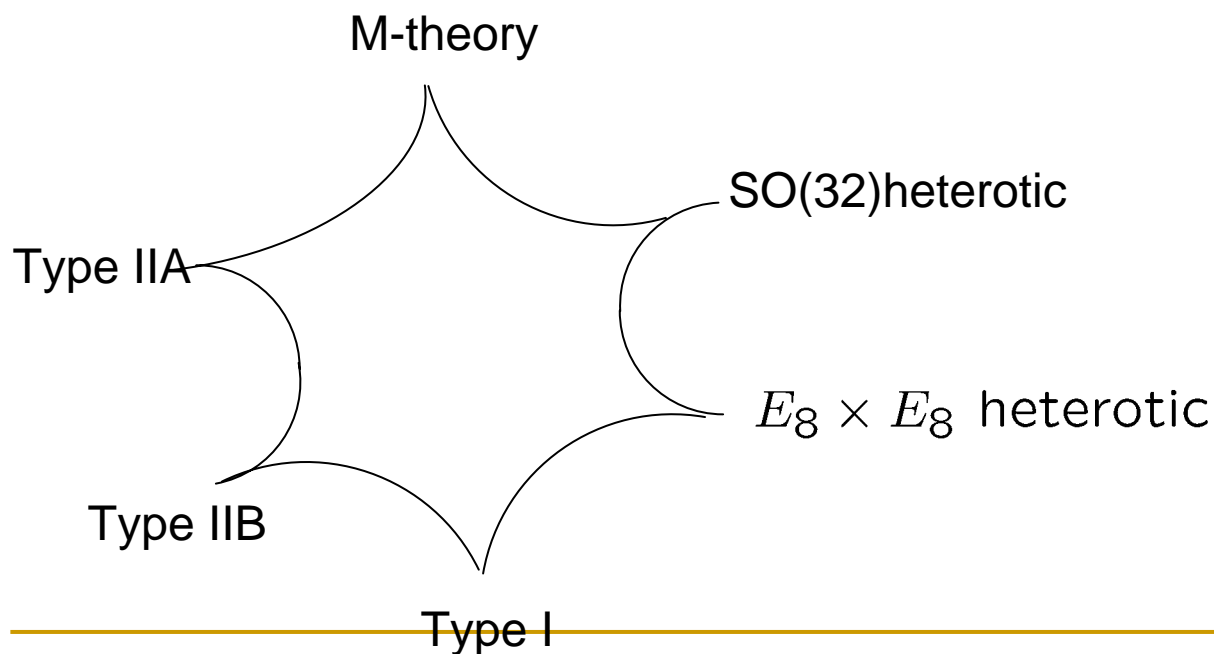
ストリング理論の最近の発展

双対性 (非摂動的関係)

1つのストリング理論の
ある極限



他のストリング理論の
別の極限

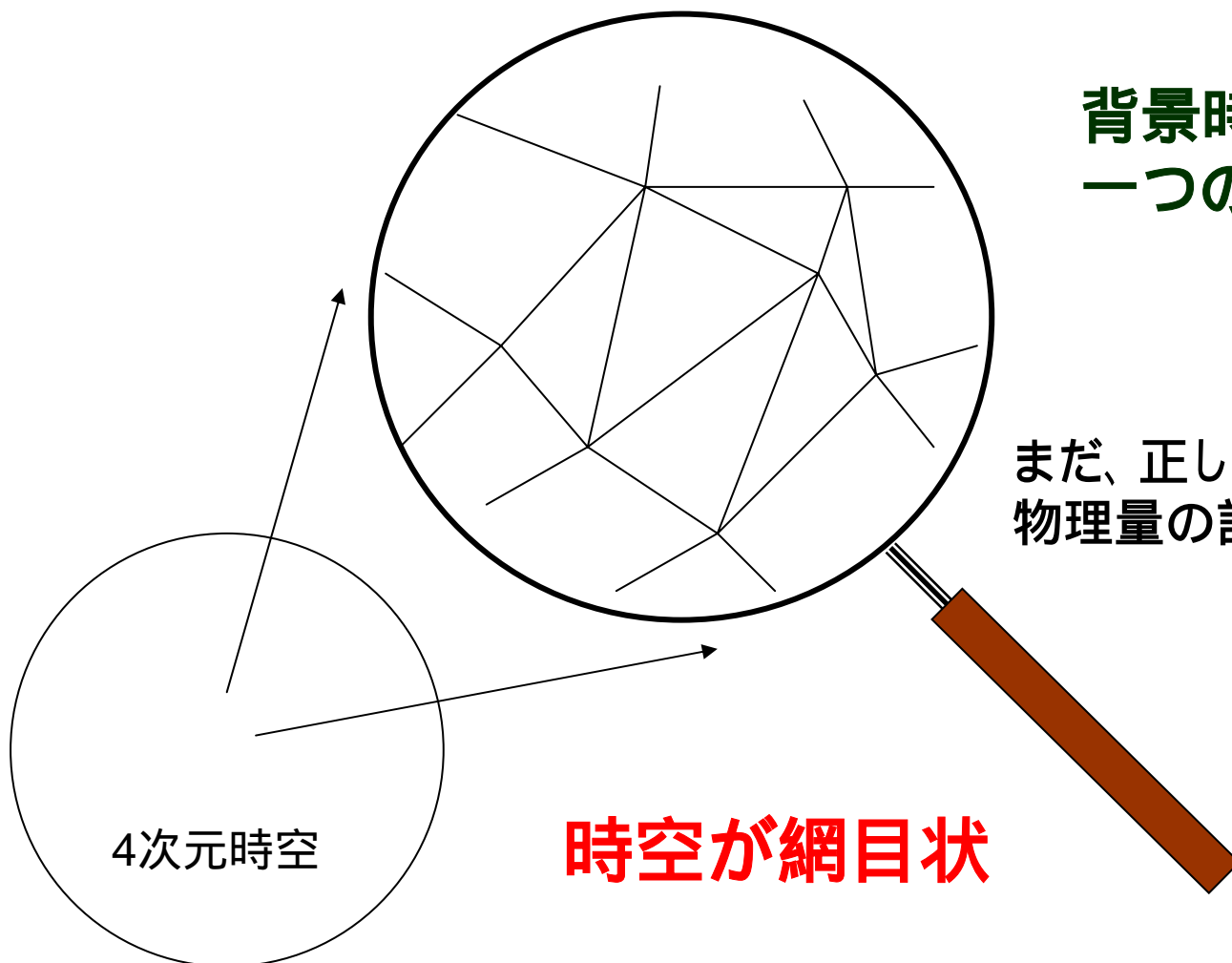


コンパクト化の問題
背景時空独立性の問題

2. ループ量子重力

背景時空独立性を実現する
一つの考え方

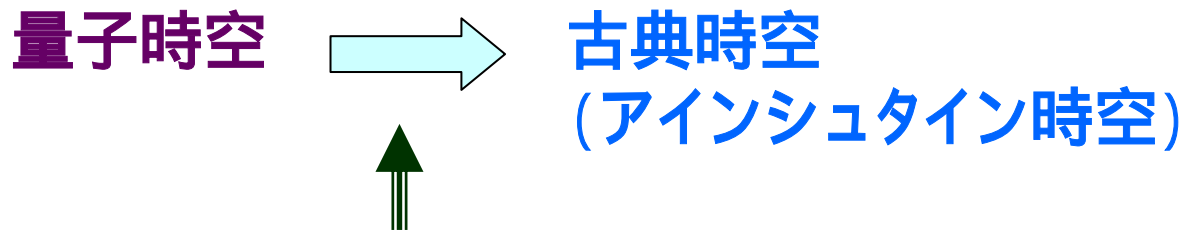
まだ、正しく定式化されていない。
物理量の計算がほとんど出来ない。



3. 新しい時空の量子論 (コンフォーマル量子重力)

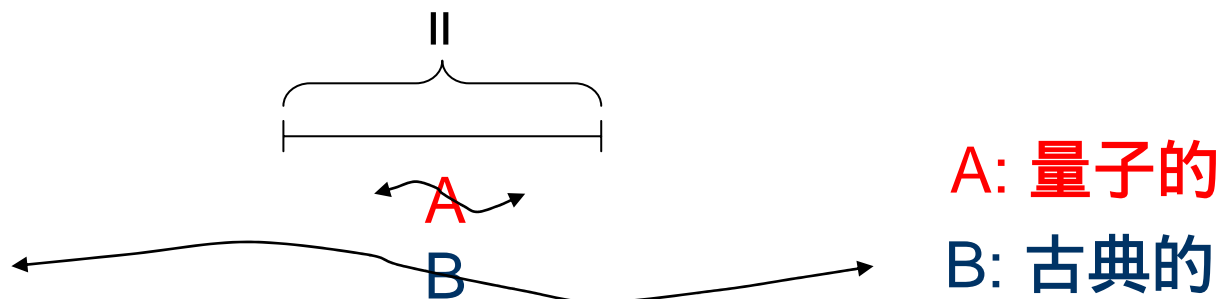
時空の相転移

- くり込み可能
- ユニタリ性の厳密証明がまだない。



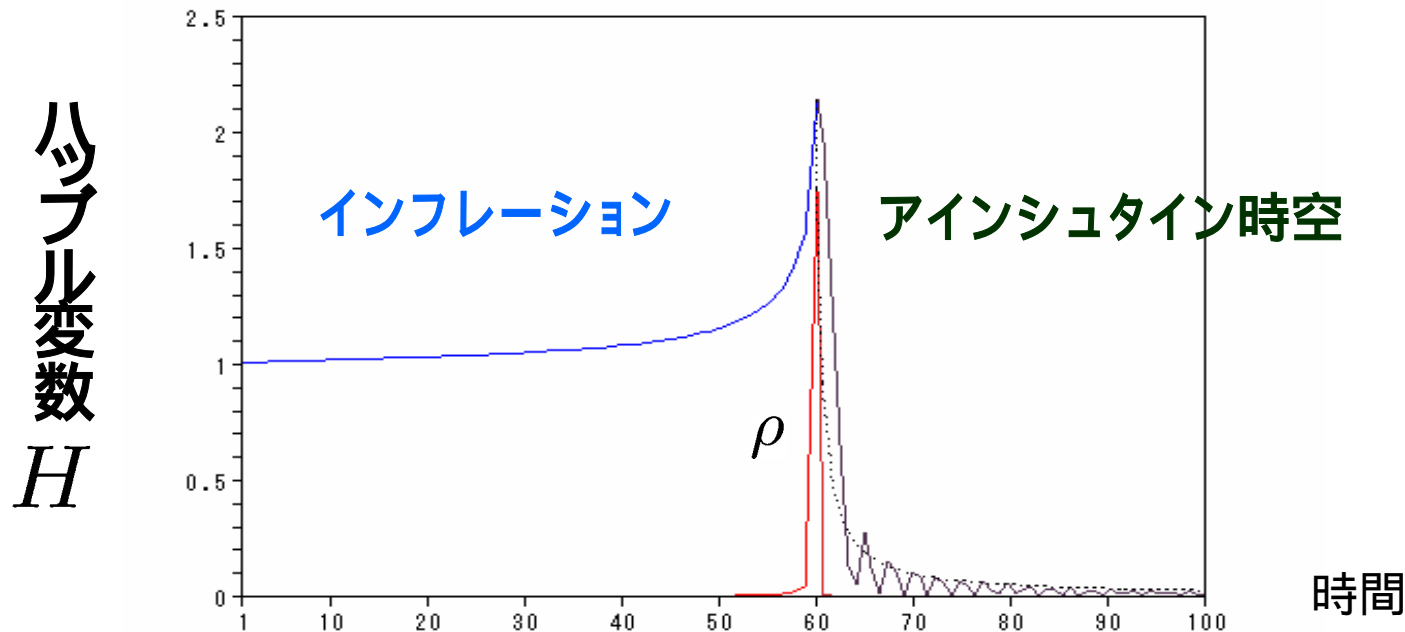
新しいエネルギースケール $\Lambda_{\text{QG}} (\ll M_{\text{P}})$

相関距離 $\xi = 1/\Lambda_{\text{QG}} \simeq 10^{-30} \text{ cm}$



相転移点での変化

重力のエネルギー $g_{\mu\nu}$ \longrightarrow 物質のエネルギー ρ



ビッグバン

$$H \propto 1/\tau$$

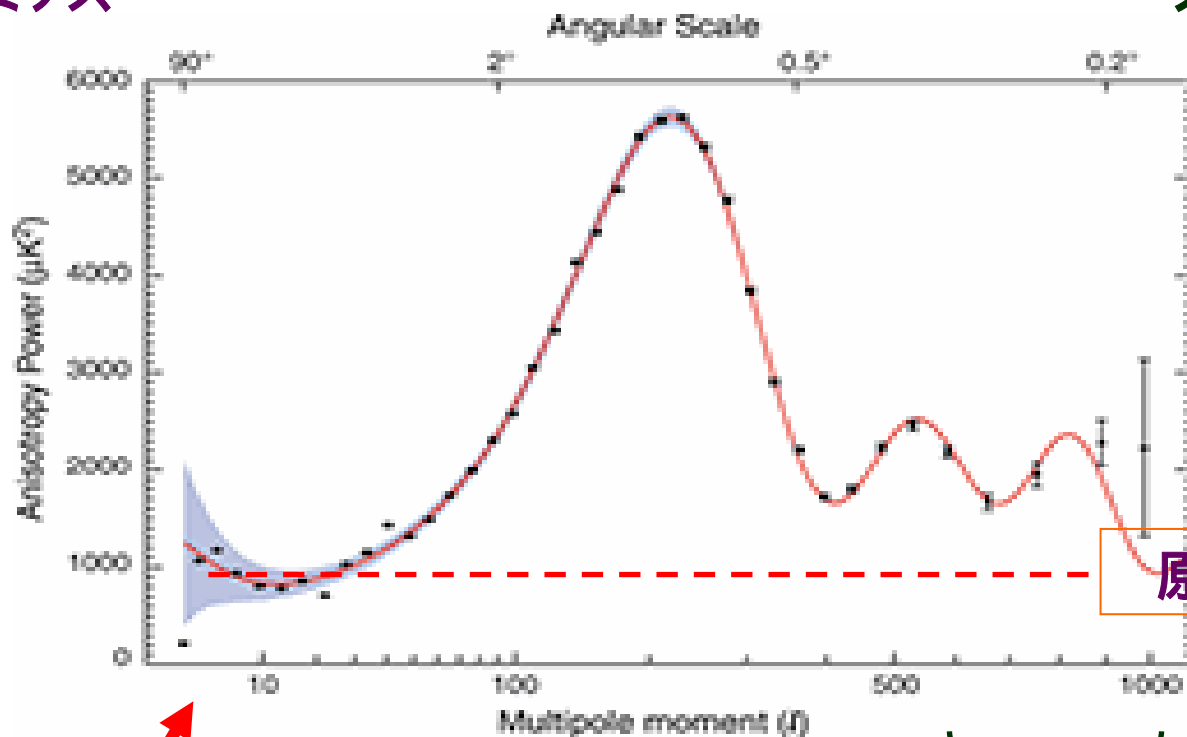
(現在のハッブル値 = H_0)

WMAPパワースペクトラム

宇宙が中性化するまでのゆらぎの発展の歴史

ビッグバン付近
のダイナミクス

中性化付近の
ダイナミクス



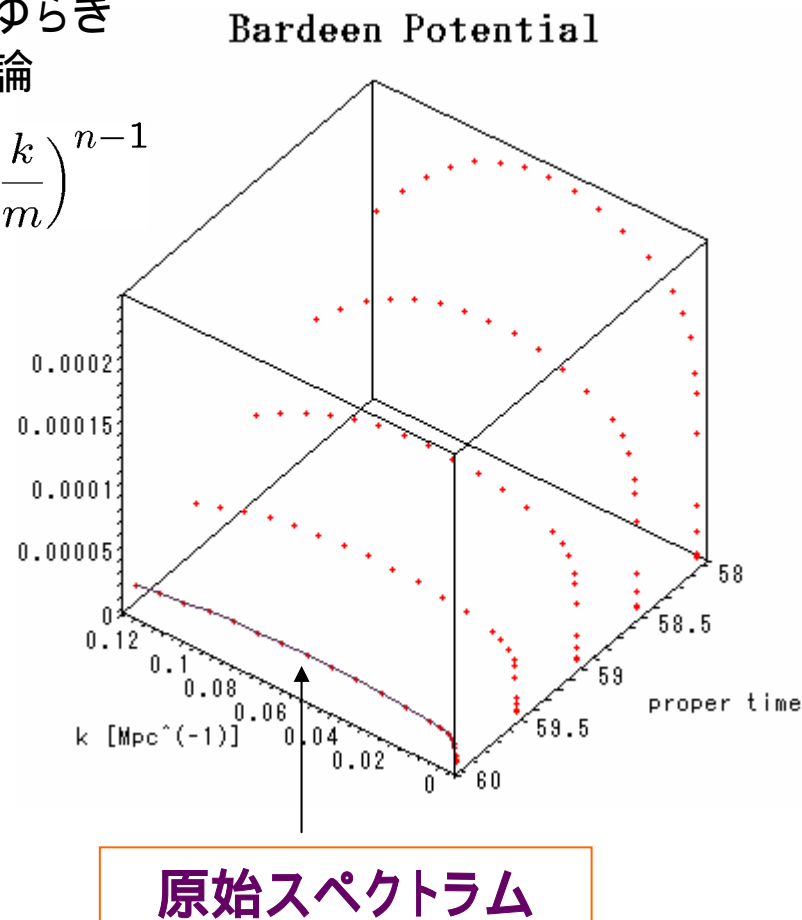
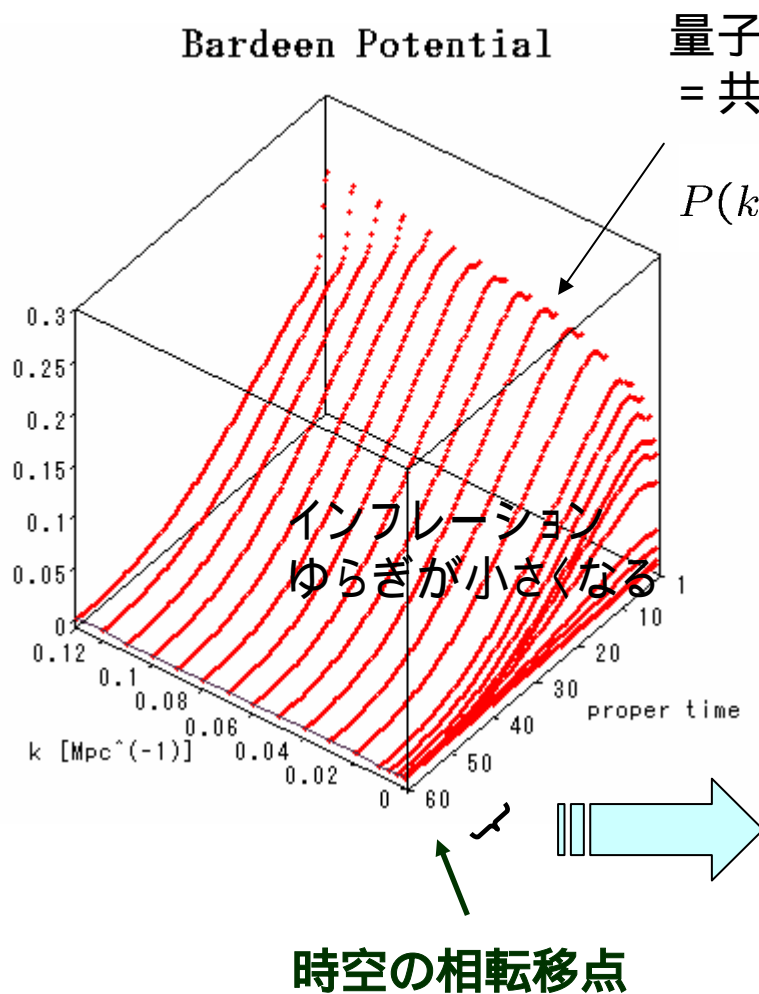
原始スペクトラム

重力の量子効果が
現在まで残っている。

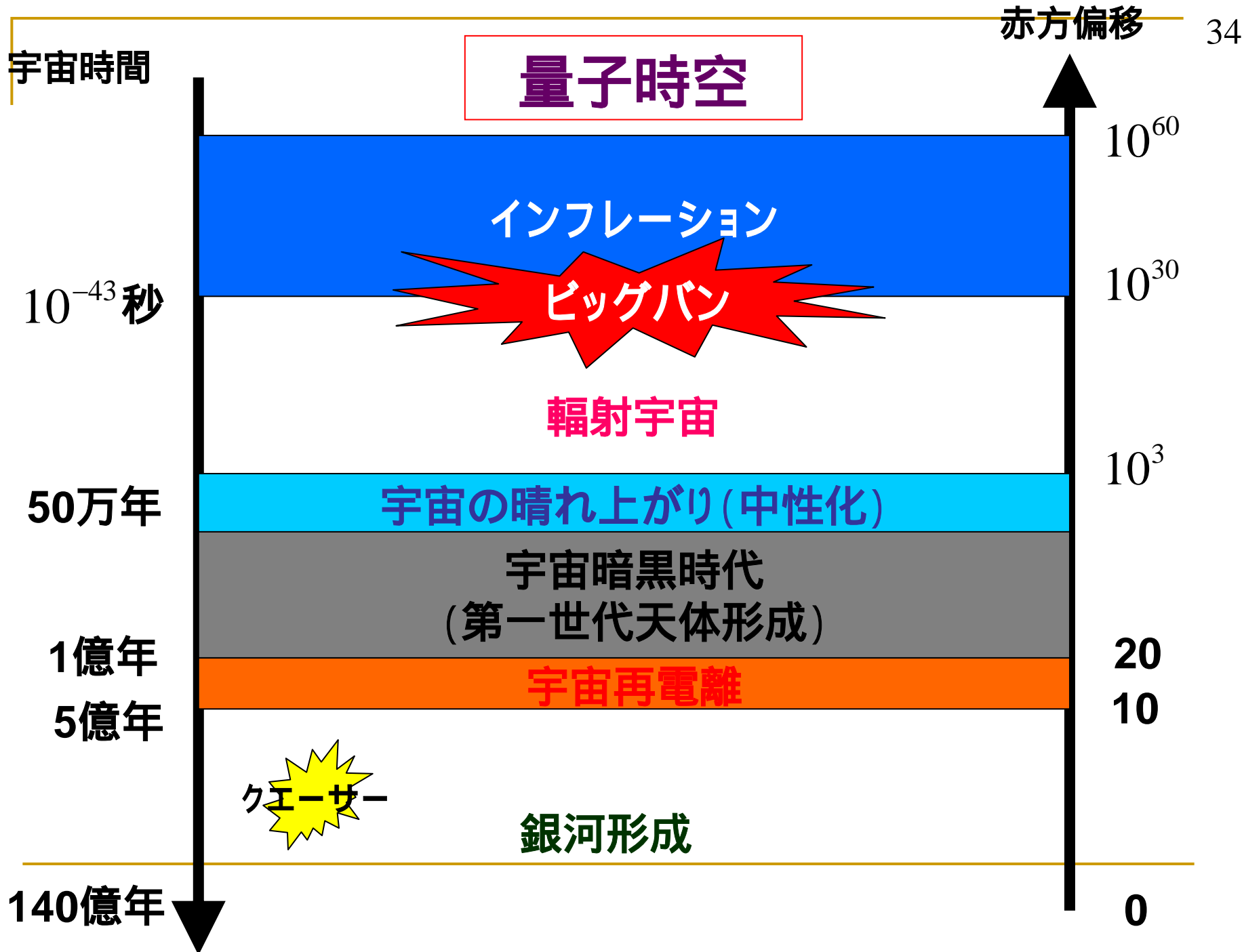
プラズマ振動

中性化のプロセス

背景時空独立な量子重力のスペクトラム



= > 宇宙の発展の歴史の中で変形されて
現在観測されるスペクトラムに成る。



おわり

私たちはいま重力の量子効果を見ている
