

# What is cosmology telling us about fundamental physics?



向山信治

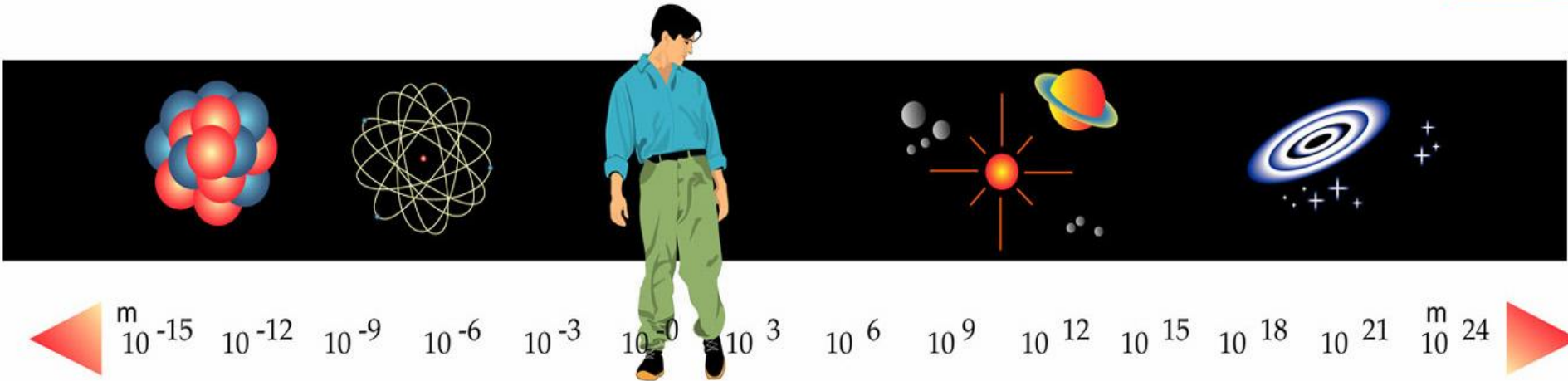
(東京大学 数物連携宇宙研究機構)

ICEPPシンポジウム@白馬

# 内容

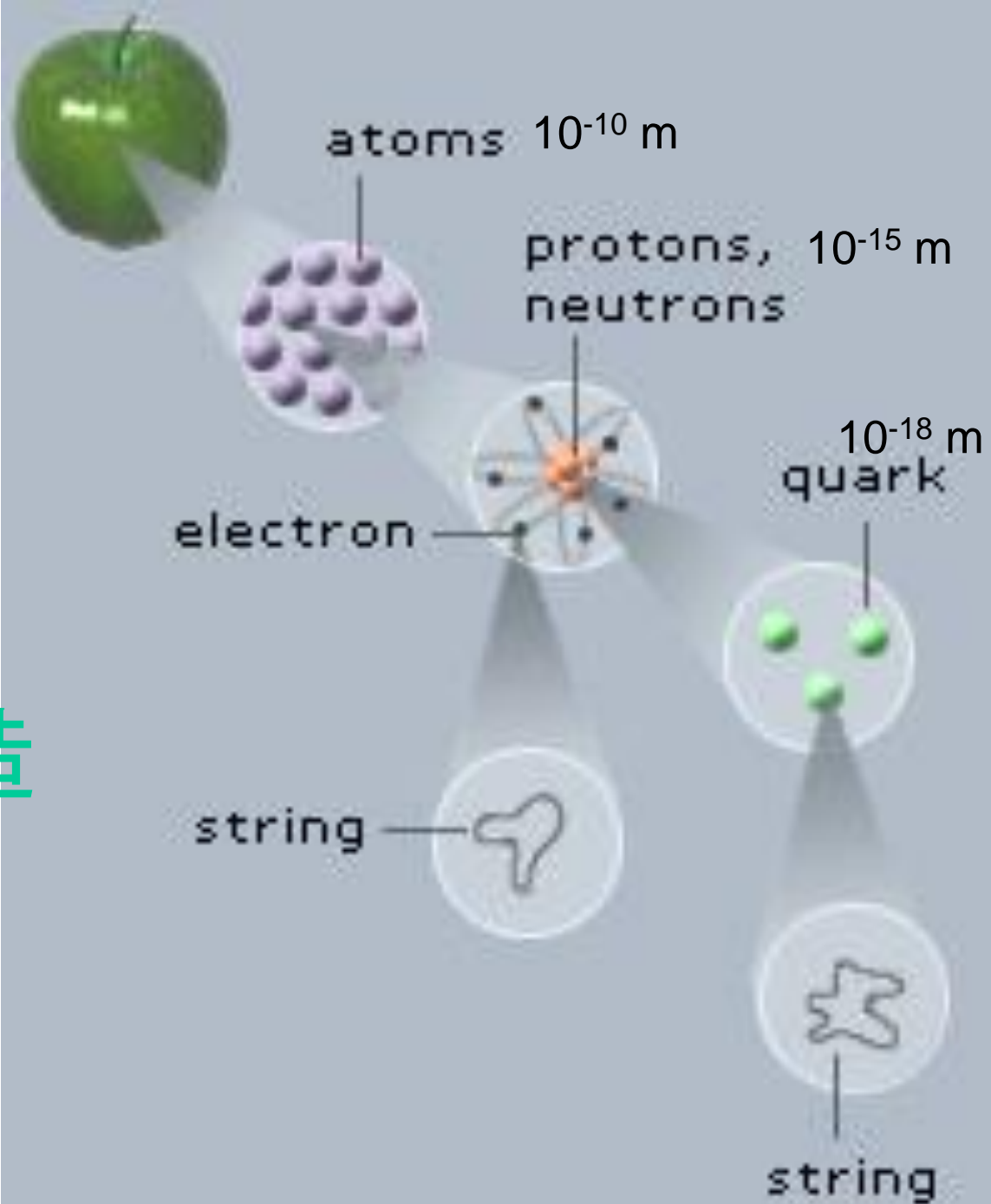
1. 標準宇宙論
2. インフレーション理論
3. 宇宙の三大謎
4. 余剰次元と宇宙
5. 弦理論的宇宙論
6. Horava-Lifshitz宇宙論
7. まとめ

# 物理学の最前線は



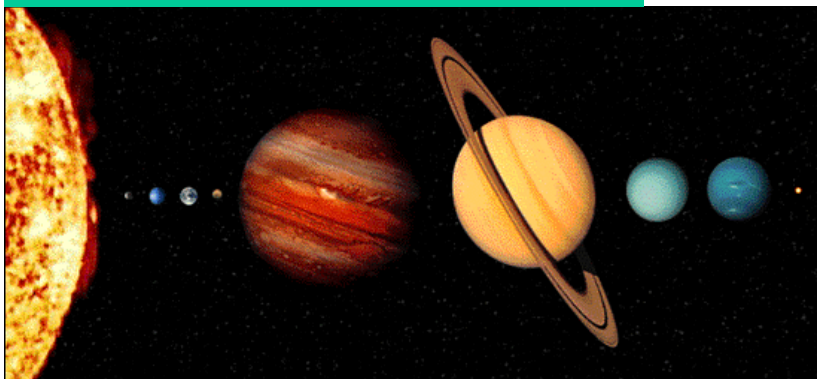
様々なスケールに存在する

ミクロな  
世界へ  
向かう  
階層構造



# 宇宙の階層構造

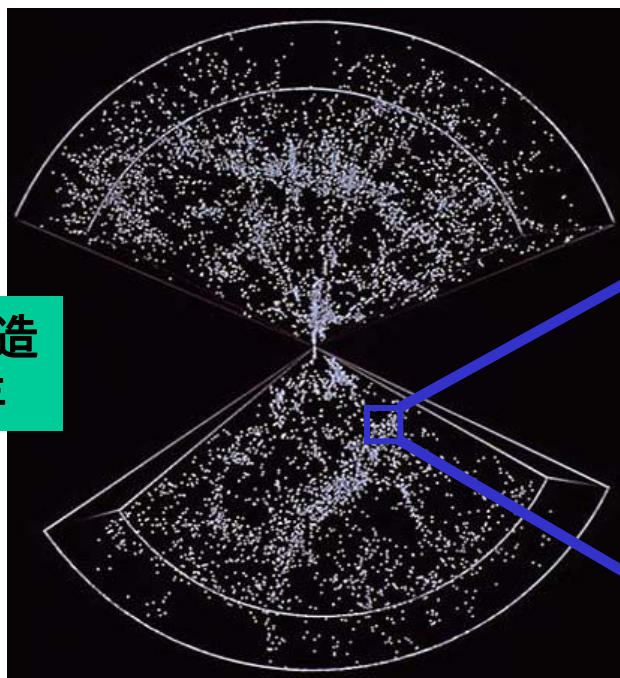
太陽系  $10^{15}$ cm



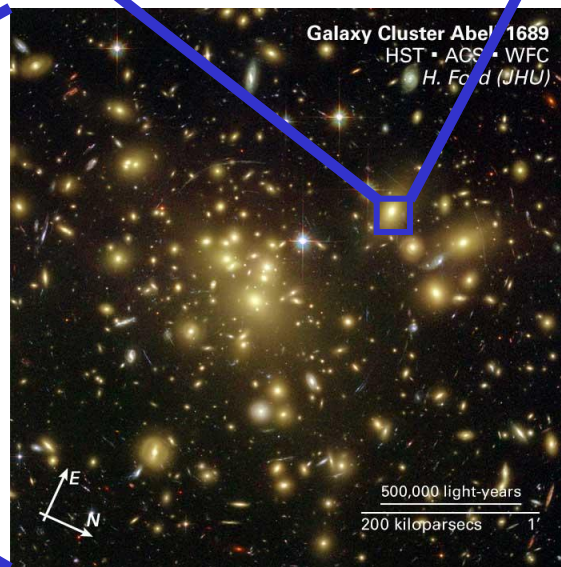
(1光年 $\sim 10^{18}$  cm)



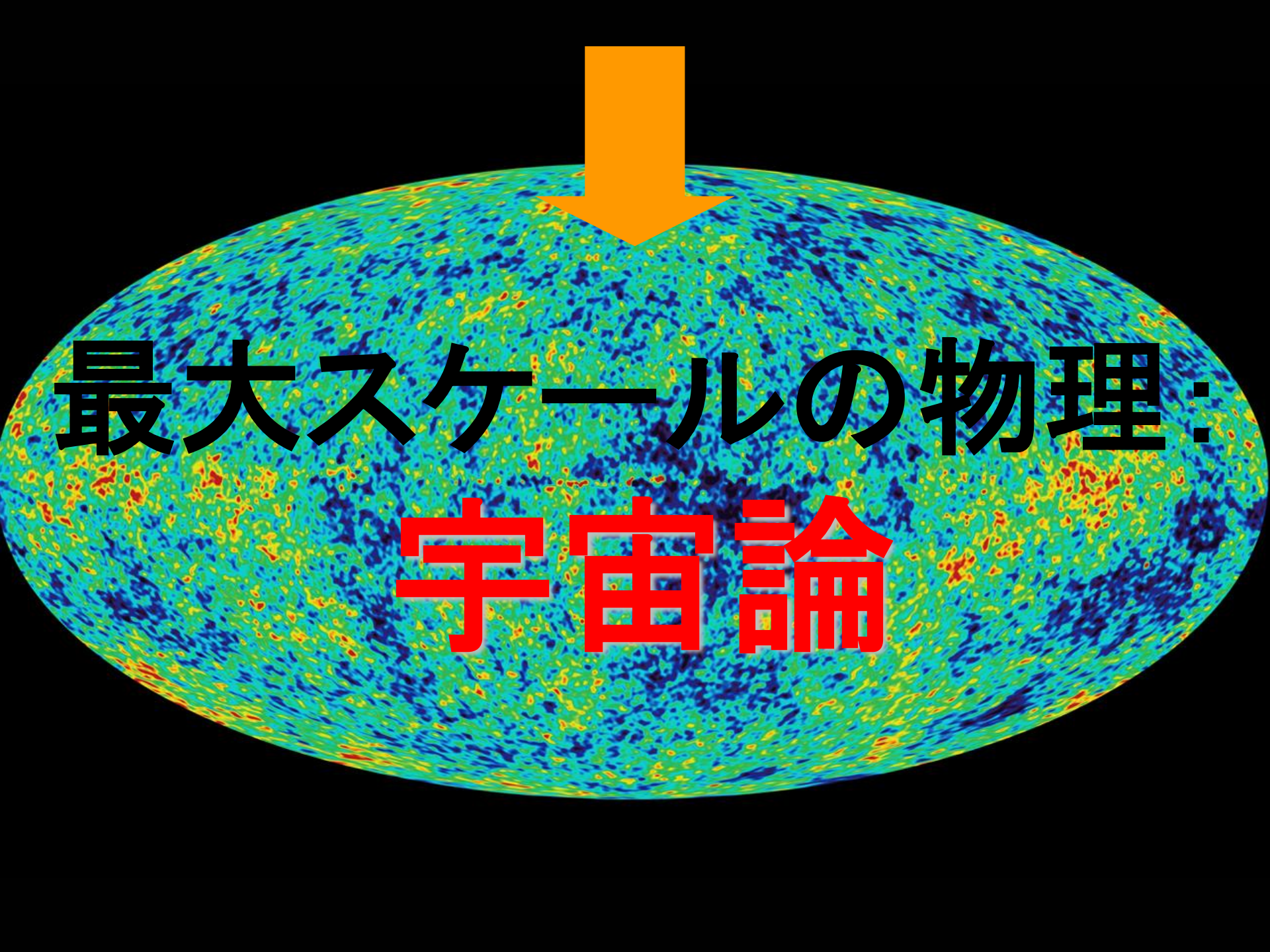
銀河  
10万光年



大規模構造  
1億光年



銀河団  
100万光年



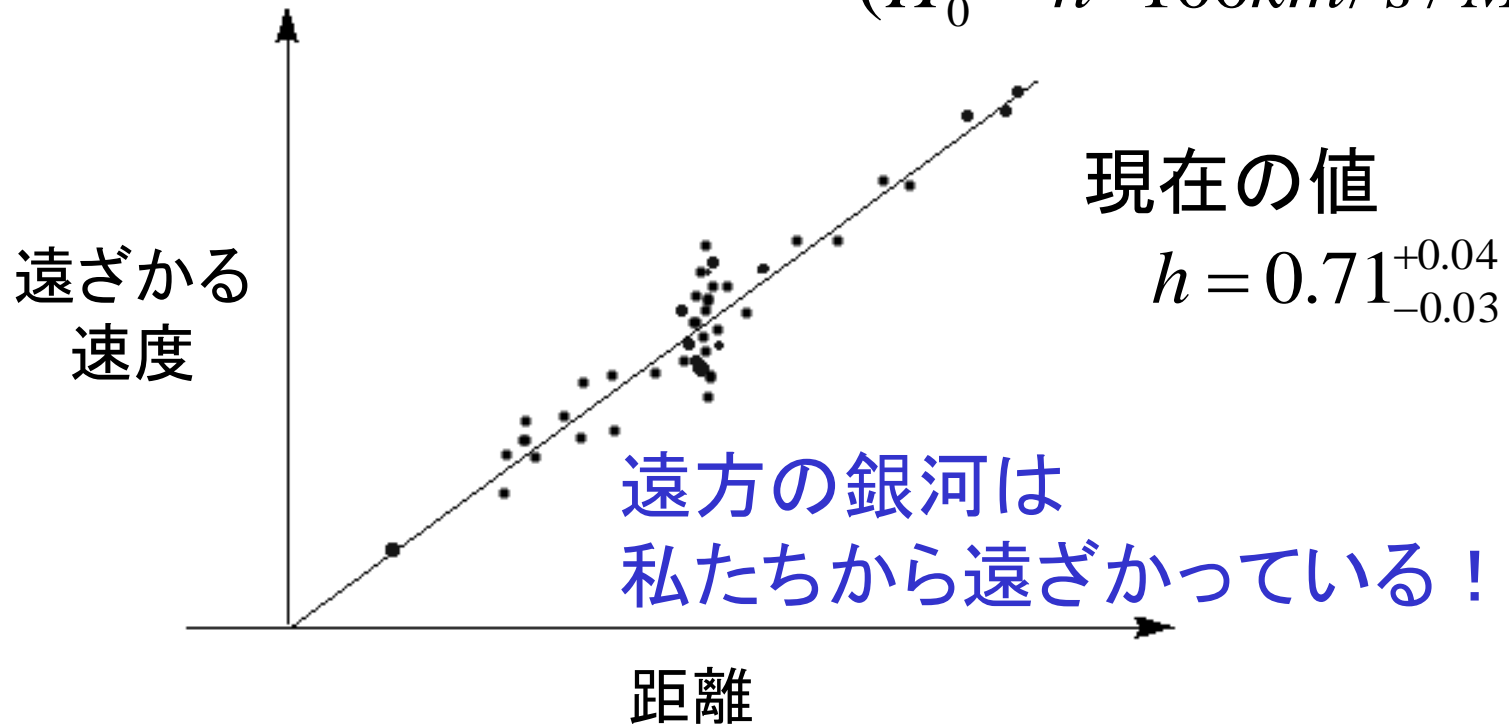
最大スケールの物理:

宇宙論

# ハッブルの法則 (1929): 宇宙論の基礎

$$V = H_0 r$$

$H_0$ : ハッブル定数  
( $H_0 = h * 100 \text{ km/s/Mpc}$ )



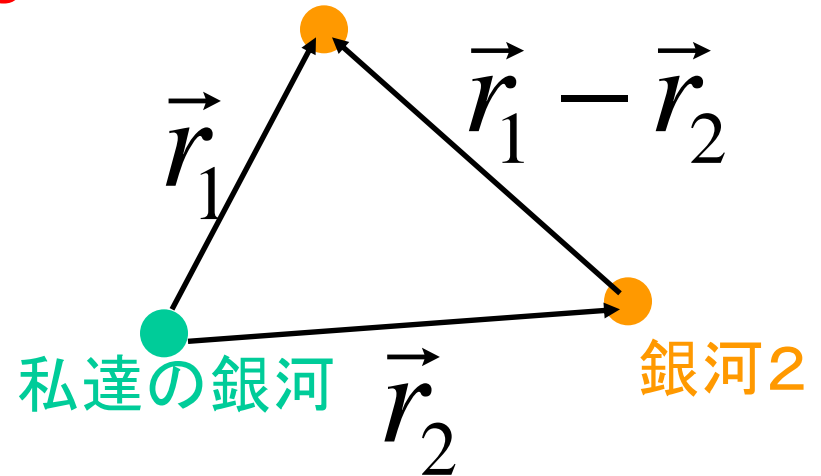
➡ 宇宙は膨張している!

私たちが特別の場所にいないと、こんなことはあり得ないような様な気もする、...

実際は、そんなことはない！ 銀河1

$$\vec{v}_1 = H_0 \vec{r}_1$$

$$\vec{v}_2 = H_0 \vec{r}_2$$



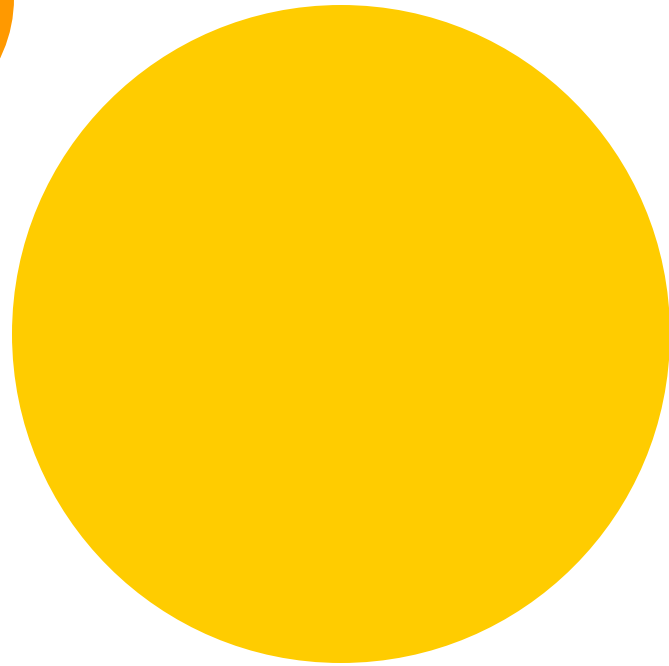
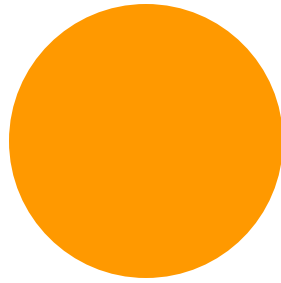
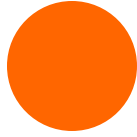
$$\vec{v}_1 - \vec{v}_2 = H_0 (\vec{r}_1 - \vec{r}_2)$$

仮に銀河2(または1)に住んでいたとしても、同じハッブルの法則になる！

→ “宇宙原理”



ビッグバン！



その後、膨張して薄まっていった、、、

少しでも数式を使って説明しましょう

# 宇宙の発展方程式

ニュートン力学で宇宙論:

宇宙を、一様なガスのかたまりだと考えよう

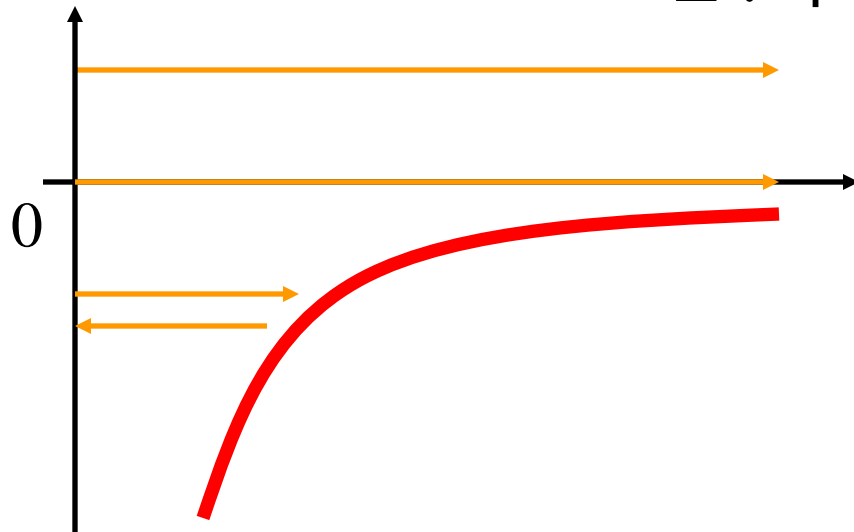
エネルギー保存則

$$\frac{1}{2} \dot{r}^2 - \frac{G_N M}{r} = E$$

r: 半径

M: 全質量

E: 単位質量あたりエネルギー



$E > 0$  : 膨張し続ける

$E = 0$  : 膨張し続ける

$E < 0$  : 膨張後、収縮

## ニュートン力学でのエネルギー保存則

$$\frac{1}{2} \dot{r}^2 - \frac{G_N M}{r} = E$$



$$\rho_{gas} = \frac{M}{4\pi r^3 / 3} : \text{ガスの密度}$$

$$\left(\frac{\dot{r}}{r}\right)^2 - \frac{2E}{r^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{gas}$$

## 一般相対論でのエネルギー保存則

(ハミルトニアン拘束条件)

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ} + \frac{\Lambda}{3}$$

宇宙項と呼ばれる  
新しい項

フリードマン方程式

$a$  : スケール因子 (宇宙の大きさ)

$\rho_{univ}$  : **宇宙のエネルギー密度**

# フリードマン方程式

← アインシュタイン方程式

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ} + \frac{\Lambda}{3}$$

幾何学

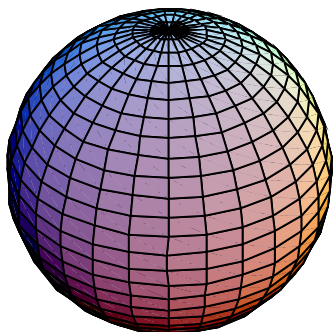
← 物質

+ 宇宙項

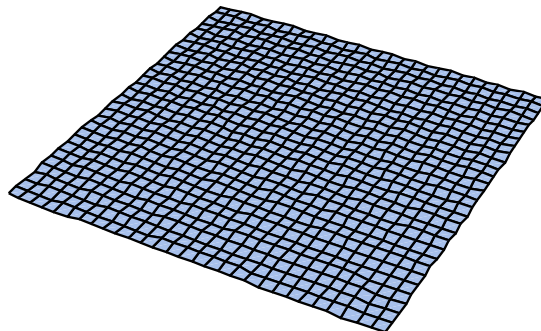
重力

## 一般相対性理論の構造

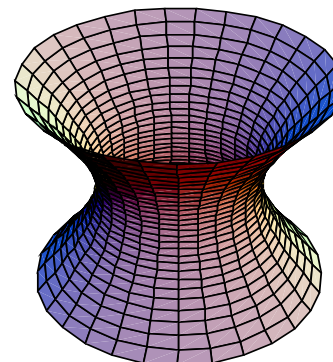
K: 3次元空間の曲率 = 定数



K > 0: 閉じた空間



K = 0: 平坦な空間



K < 0: 開いた

# 空間の幾何学と宇宙膨張

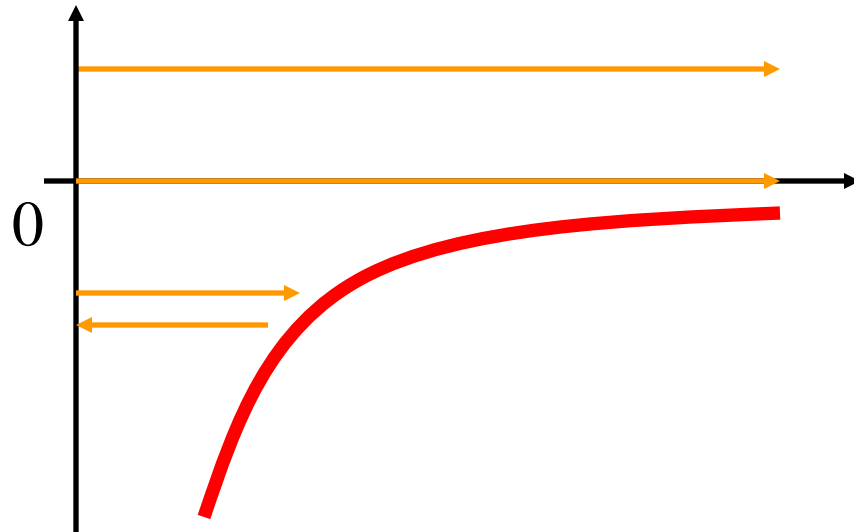
フリードマン方程式 ( $\Lambda=0$ )

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ}$$



$$\frac{1}{2} \dot{a}^2 + U(a) = -\frac{K}{2}$$

$$U(a) = -\frac{a^2}{2} \times \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ}$$



$K < 0$  : 膨張し続ける

$K = 0$  : 膨張し続ける

$K > 0$  : 膨張後、収縮

# フリードマン方程式

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ} + \frac{\Lambda}{3}$$

ニュートン力学にはなかった項

## $\Lambda$ : 宇宙項

- **時間にも位置にも依存しないエネルギー密度と同等。** ( $\rho_{univ}$  も  $\Lambda$  も、フリードマン方程式の右辺に出てくる。)
- **宇宙の膨張を加速させる！**  
フリードマン方程式で  $K=\rho_{univ}=0$  としたものの

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} \quad \longrightarrow \quad a \propto e^{Ht}, H = \sqrt{\Lambda/3}$$

# ここまでの小まとめ

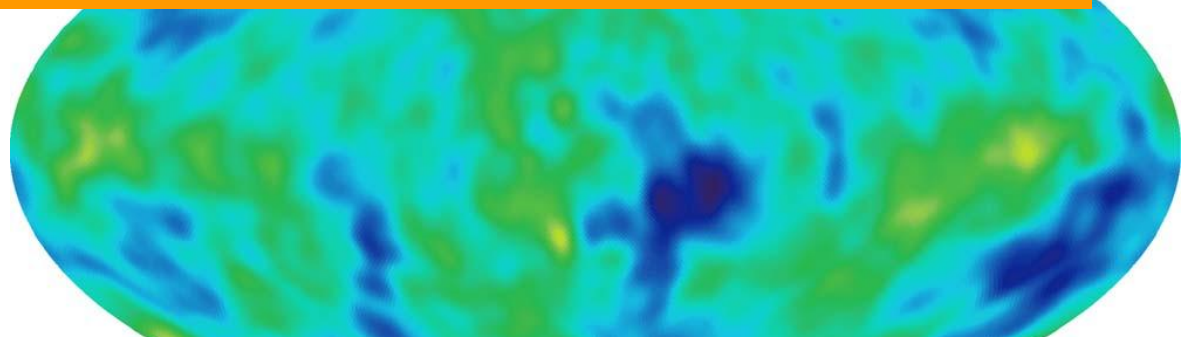
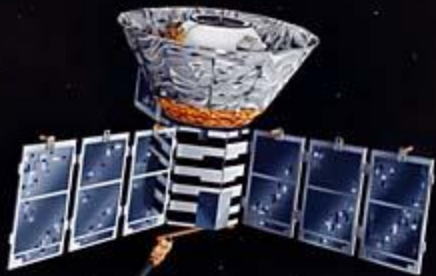
- 宇宙論は、最大スケールの物理
- 宇宙は膨張している(ハッブルの法則)
- 宇宙はフリードマン方程式に従って発展

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ} + \frac{\Lambda}{3}$$

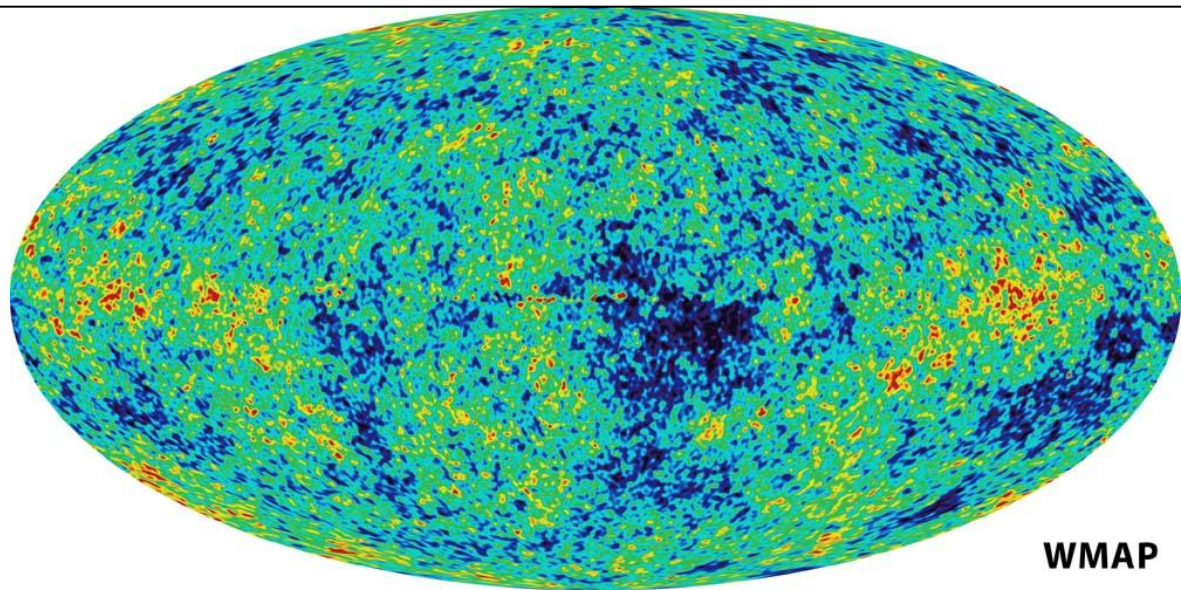
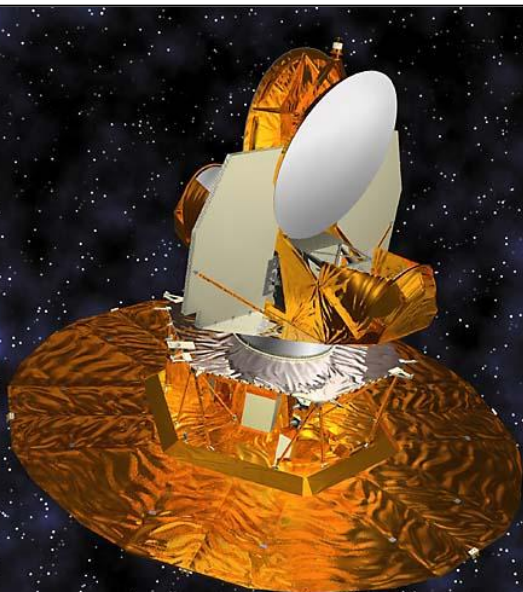
ここで、ちょっと空を見上げてみましょう

# 宇宙マイクロ波背景放射 (CMB)

**= 宇宙の音の化石**



10万分の1 = 1mm/100m のさざ波





# 宇宙マイクロ波背景放射の意味すること

ほとんど等方

$$T=2.725\text{K}$$

温度Tは空間的に一定

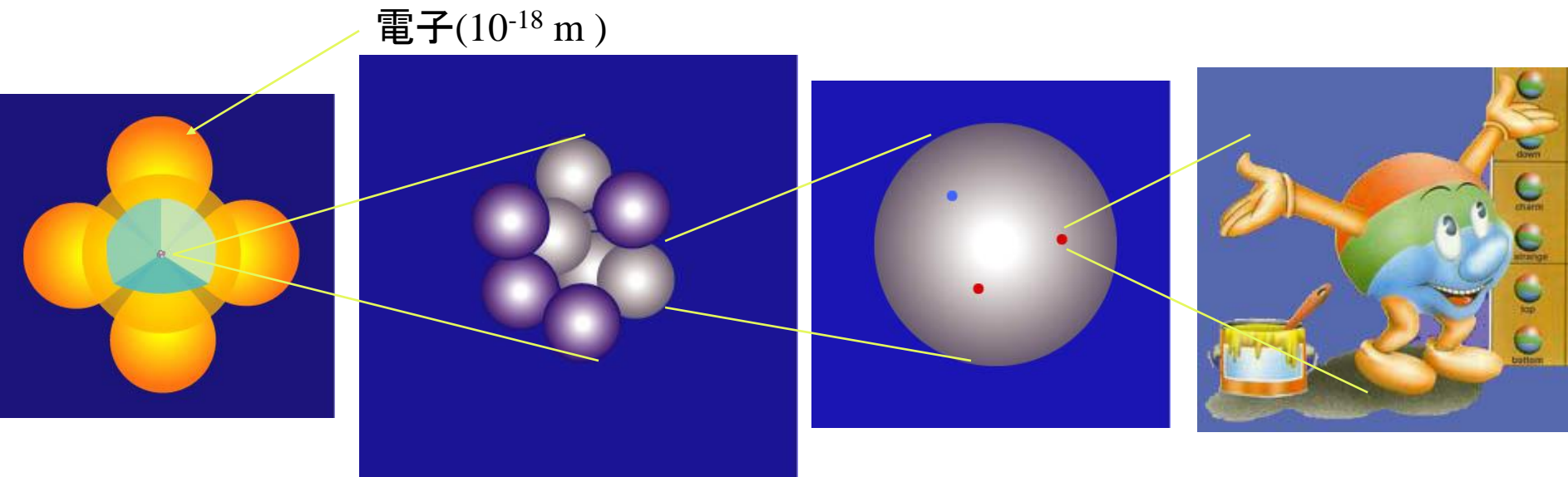
しかし、時間的には一定ではない！

$$T \propto (\text{波長})^{-1} \propto a^{-1}$$

$a$  : スケール因子 (宇宙の大きさ)

宇宙が小さかった過去には、  
温度Tはとても高かった！

過去(=遠く)の宇宙を探るには、  
より高エネルギー、より小さな構造が重要になる！



原子  
 $10^{-10}$  m

原子核  
 $10^{-14}$  m

核子  
 $10^{-15}$  m

クォーク  
 $10^{-18}$  m

低温

温度

高温

現在  
&  
未来

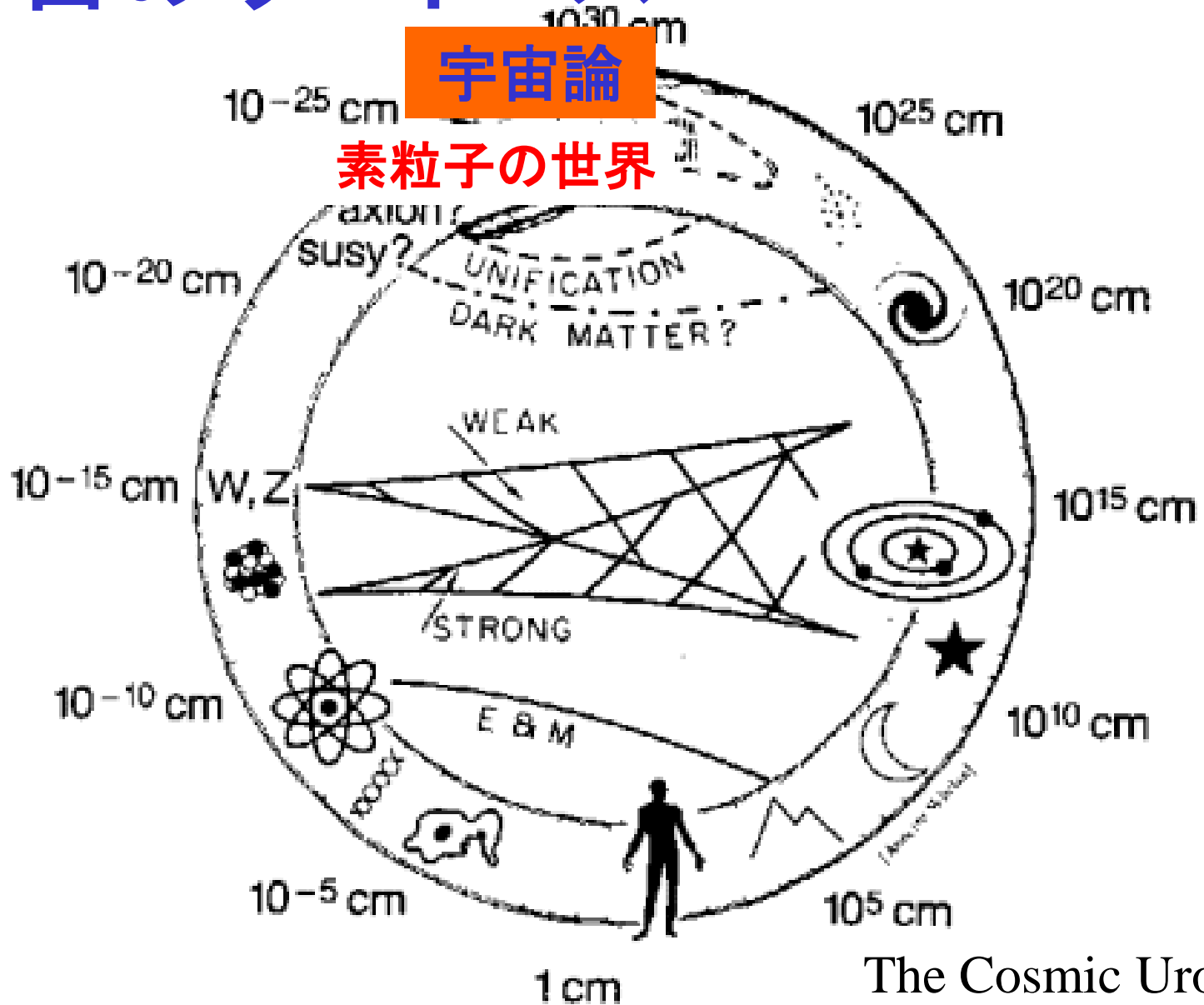
時間

過去

# 宇宙のウロボロス

宇宙論

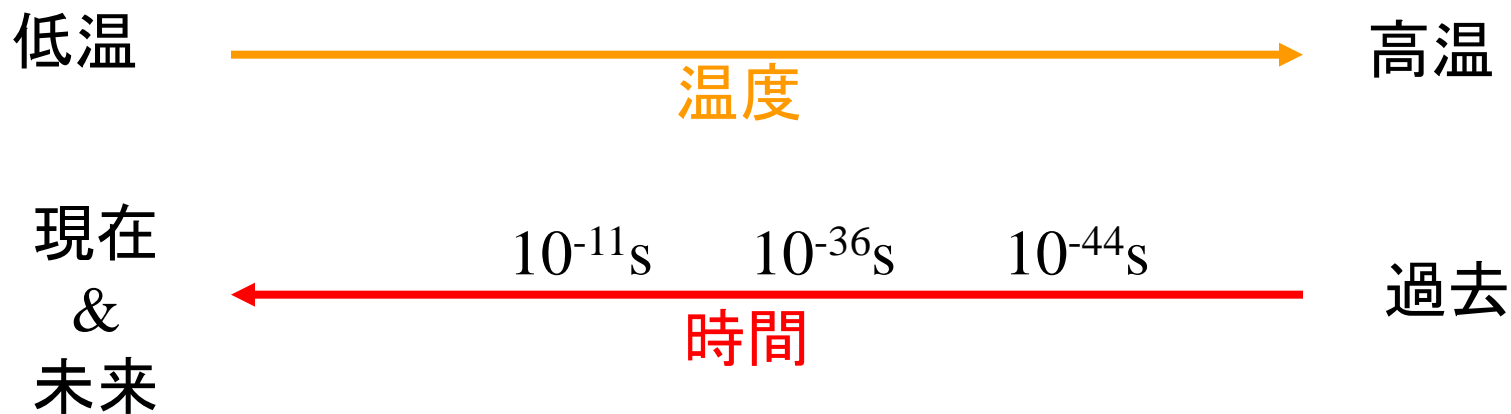
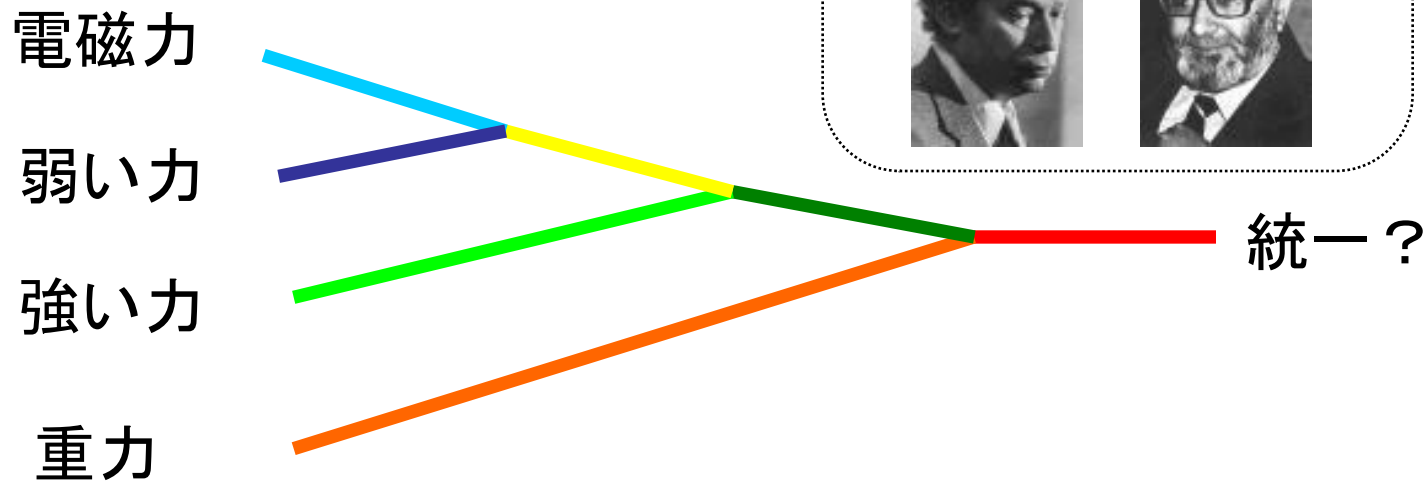
素粒子の世界



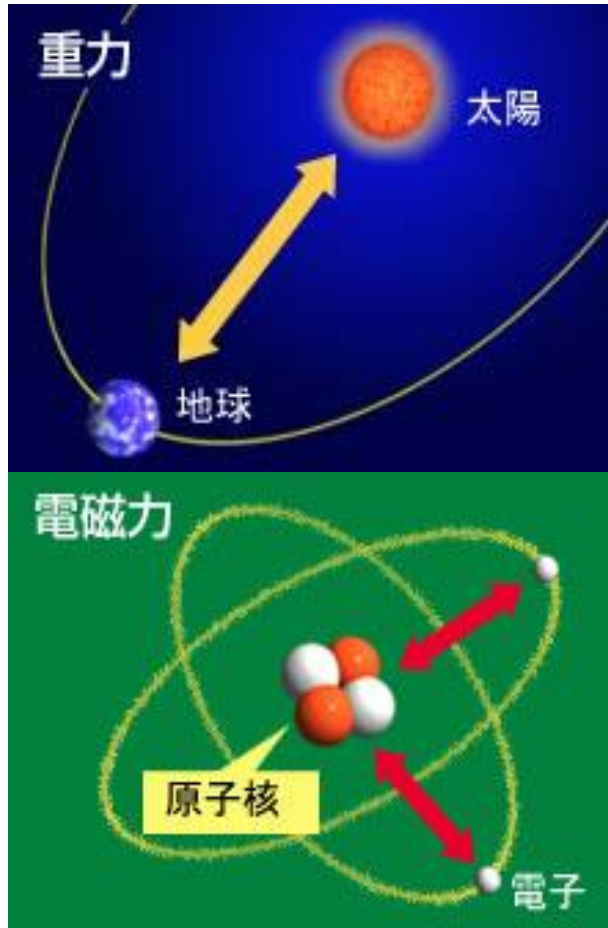
The Cosmic Uroboros  
by Sheldon Glashow

# 4つの力の統一

電弱理論  
(Winberg-Salam)



# アインシュタインの夢

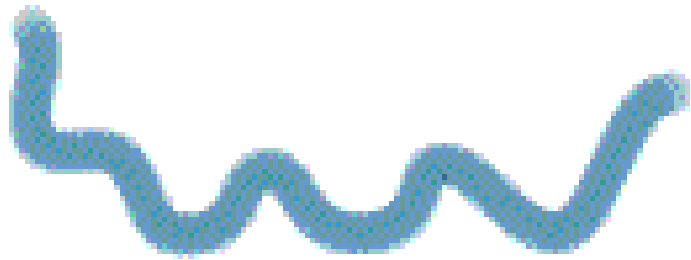


## 重力と電磁力の統一

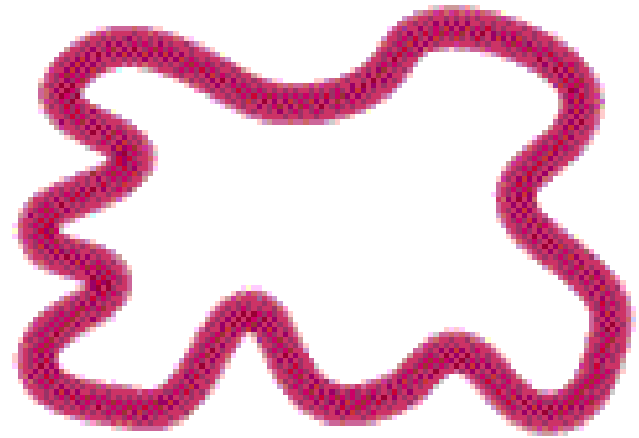
[spaceinfo.jaxa.jp/note/note\\_j.html](http://spaceinfo.jaxa.jp/note/note_j.html)

# 超弦理論：究極の統一理論？

開いた弦



閉じた弦

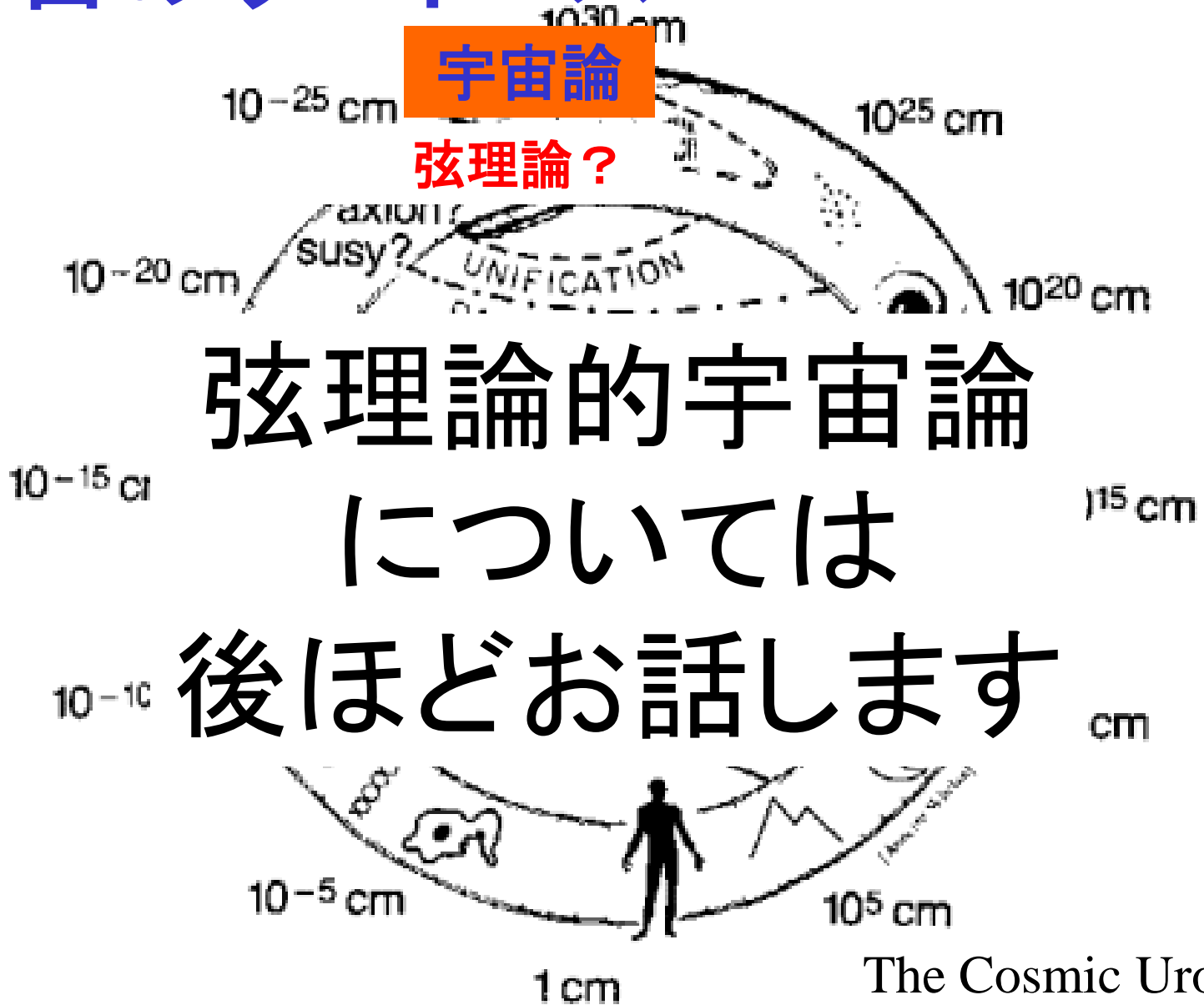


たった2種類で宇宙の全てを記述！

# 宇宙のウロボロス

宇宙論

弦理論？



弦理論的宇宙論  
については  
後ほどお話します

The Cosmic Uroboros  
by Sheldon Glashow

# もう少し現在に近いところを考えましょう

- 宇宙初期は**温度が非常に高かった**ので、  
全てばらばらだったはず  
(原子、原子核、クォーク、、、)
- ばらばらの状態から、  
**現在の宇宙の物質構成が  
どのように作られたのか？**  
(元素合成、バリオン生成)



# ビッグバン元素合成 ( $T \sim \text{MeV}$ )

- 宇宙膨張： **フリードマン方程式**  
with  $\rho_{\text{univ}} = \rho_{\text{SM}} \ \& \ \Lambda=0$
- 物理過程： 原子核物理、反応率
- 初期条件：  $\eta = \text{バリオン数} \div \text{光子数比率}$  で決まる
  1. 高温 ( $T \gg \text{MeV}$ ) では、**熱平衡**が成立
  2. **バリオン数保存** (電弱相転移後なので)
  3. **光子数は温度  $T$  で決まる**



軽元素の量は  $\eta$  だけで決まり、  
結果は観測と良く合う！

# 標準宇宙論の成功

- 膨張宇宙：ハッブルの法則
- 宇宙背景輻射
- ビッグバン元素合成

幸か不幸か、  
標準宇宙論は完全ではない

# 標準宇宙論の問題

➤ 宇宙が一様で等方なのはなぜか？

宇宙の晴れ上がり時の宇宙の地平線の大きさ  
(宇宙背景放射が放たれた時)

<< 宇宙のスナップショットの大きさ  
(last scattering surface)

$3.8 \times 10^5$  光年

$1.4 \times 10^{10}$  光年

宇宙背景放射 = スナップショット

(光年 =  $10^{18}$  cm)

## ▶ 平坦性問題

フリードマン方程式

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ}$$

$$\rho_{univ} \ni \left\{ \begin{array}{l} \text{非相対論的物質} \\ + \\ \text{輻射} \\ + \\ \vdots \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \propto a^{-3} \leftarrow (\text{体積})^{-1} \\ \propto a^{-4} \leftarrow (\text{波長})^{-1} \\ \quad \times (\text{体積})^{-1} \end{array}$$

➡ 時間が経つと、 $K/a^2$ の方が $\rho_{univ}$ よりも大きくなる。  
これは観測と完全に矛盾。

➡  $K/a^2$ の初期値は、非常に小さくなくてはならない

# 他にも問題が、、、

- 宇宙が一様で等方なのは何故か？
- 平坦性問題
- 宇宙の豊かな構造(非一様性)は、何から生じたのか？
- 位相欠陥をどうやって消すか？



標準宇宙論を超えるアイデアが必要！

# インフレーション

佐藤勝彦, A.Guth, A.Linde

スカラー場 $\phi$ のポテンシャル $V(\phi)$   
 $\phi$ がゆっくり転がる場合

$$\rho_\phi \approx V(\phi) \approx \text{const.}$$

宇宙項 $\Lambda$ のように振舞う！

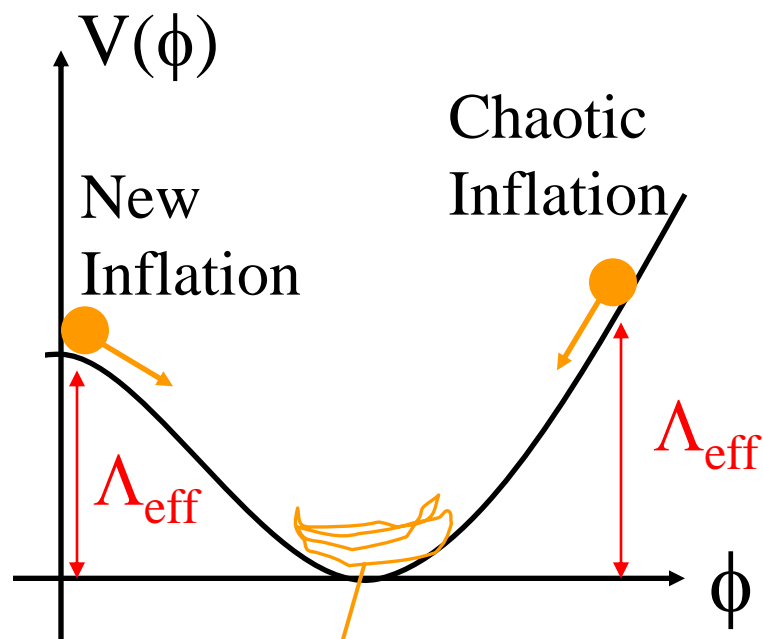
➡ 指数関数的膨張！

$\Lambda$ ：宇宙項

- 時間的にも空間的にも一定のエネルギー密度と同等
- 宇宙膨張を加速させる！

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 = \frac{\Lambda}{3} \quad \longrightarrow \quad a \propto e^{Ht}$$

$(H = \sqrt{\Lambda/3})$



再加熱：スカラー場の振動エネルギーから輻射エネルギーへ

# ゆっくり転がる条件

- Slow-roll parameter

$$\varepsilon = \frac{M_{Pl}^2}{2} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 \quad \eta = M_{Pl}^2 \frac{V''}{V}$$

- Slow-roll condition

$$\left[ \begin{array}{l} \ddot{\phi} + 3H\dot{\phi} + V'(\phi) = 0 \\ 3M_{Pl}^2 H^2 = \frac{1}{2} \dot{\phi}^2 + V(\phi) \\ H \equiv \dot{a}/a \end{array} \right. \xrightarrow[\substack{\varepsilon \ll 1 \\ |\eta| \ll 1}]{\text{green arrow}} \left[ \begin{array}{l} 3H\dot{\phi} \simeq -V'(\phi) \\ 3M_{Pl}^2 H^2 \simeq V(\phi) \end{array} \right.$$

- Consistency

$$\frac{\dot{H}}{H^2} \simeq \frac{V'\dot{\phi}}{2HV} \simeq -\frac{V'V'}{6H^2V} \simeq -\frac{M_{Pl}^2}{6} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 = -\frac{\varepsilon}{3}$$

$$\frac{\ddot{\phi}}{3H\dot{\phi}} \simeq -\frac{V''}{9H^2} \simeq -\frac{M_{Pl}^2 V''}{3V} = -\frac{\eta}{3} \quad \frac{\dot{\phi}^2}{2V} \simeq \frac{1}{2V} \left( -\frac{V'}{3H} \right)^2 \simeq \frac{M_{Pl}^2}{6} \left( \frac{V'}{V} \right)^2 = \frac{\varepsilon}{3}$$

# インフレーションは様々な問題を解決！

## ✓ 一様等方性の問題を解決！

指数関数的膨張により、因果律が十分及ぶマイクロな領域が、大きな宇宙になる。

## ✓ 平坦性問題を解決！

曲率項は指数関数的に減少するので、再加熱によって生じた輻射エネルギー密度に比べて非常に小さくできる。

## ✓ 位相欠陥も指数関数的に減少

## ✓ $\phi$ の量子揺らぎが宇宙の構造の種になる



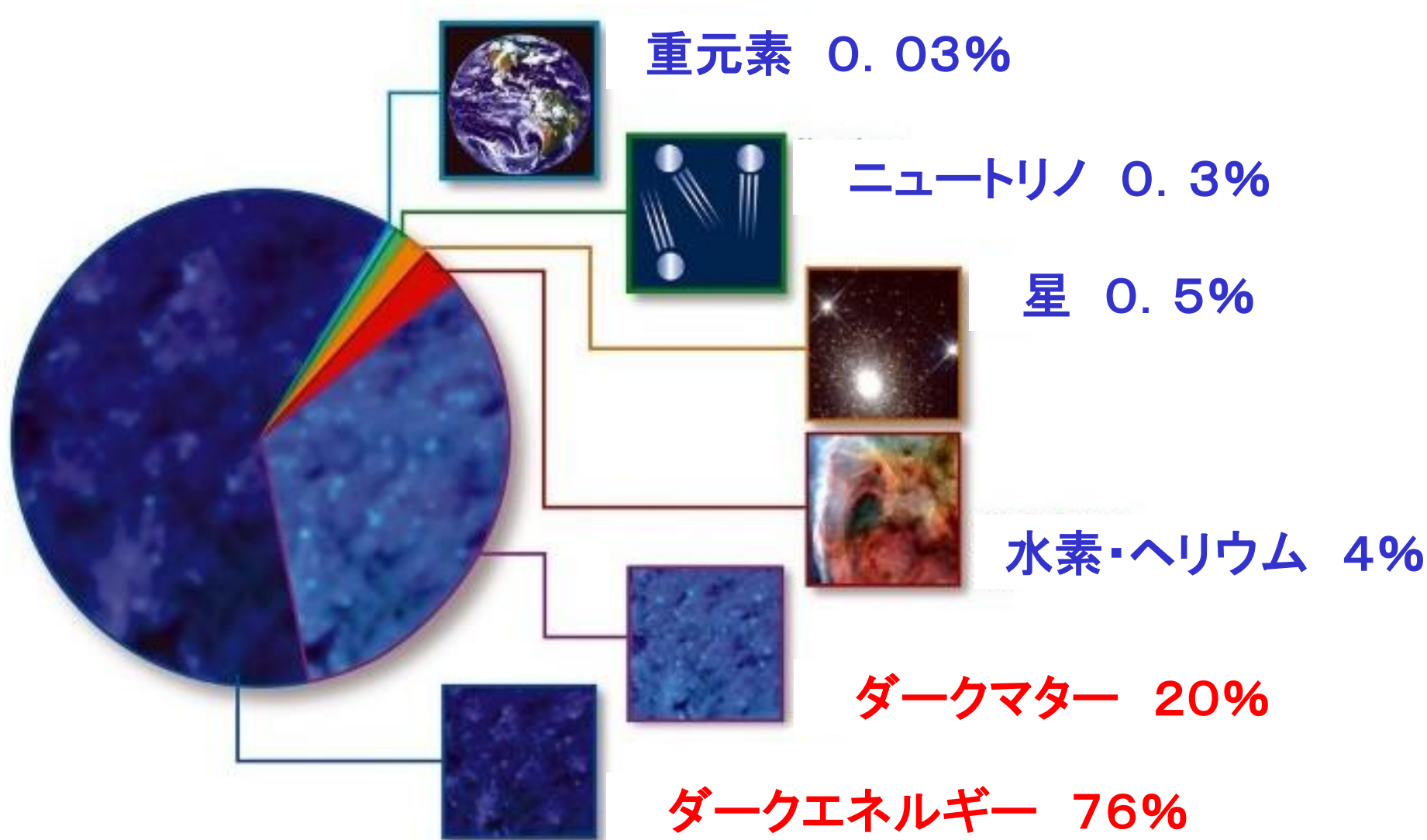
# でも、まだまだ大きな問題が。。。。

- インフレーションの起源
- ダークマターとダークエネルギー
- 宇宙項問題
- 余剰次元の宇宙論的効果
- 宇宙(空間)と時間の始まり
- ...

宇宙論は幸運な時期にある

問題＝新しい物理への鍵＝最前線

# 宇宙の構成 **なんと95%は未知!**



# ダークマター(暗黒物質)

## 理論予言

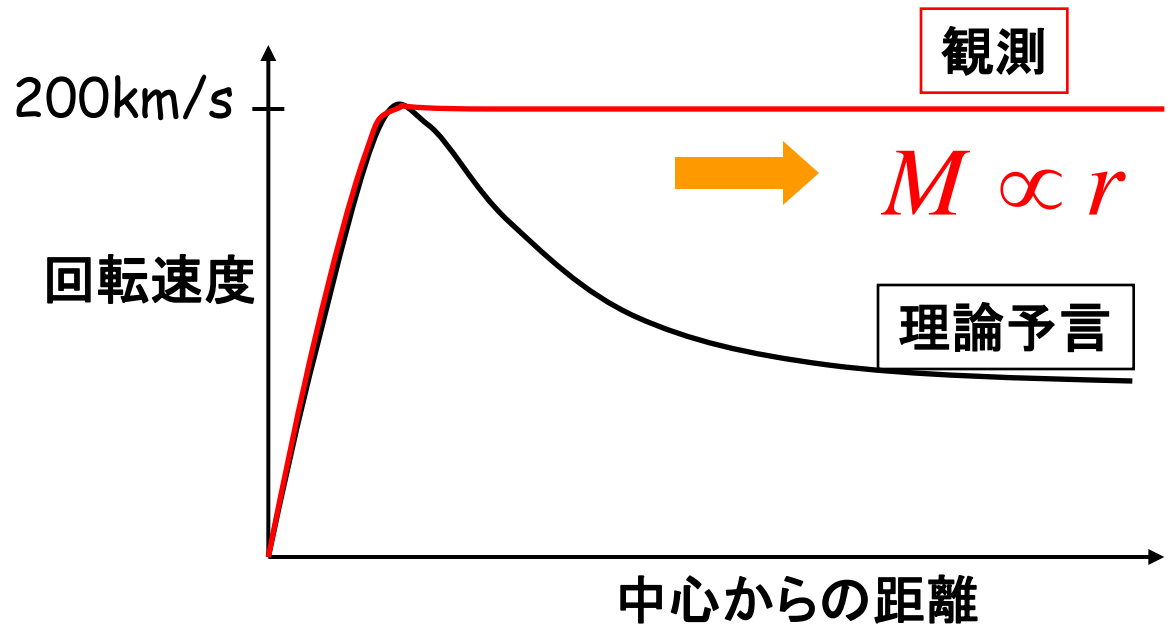
重力 = 遠心力

$$\frac{G_N M}{r^2} = \frac{v^2}{r}$$



$$v = \sqrt{G_N M / r}$$

$$M = v^2 r / G_N$$

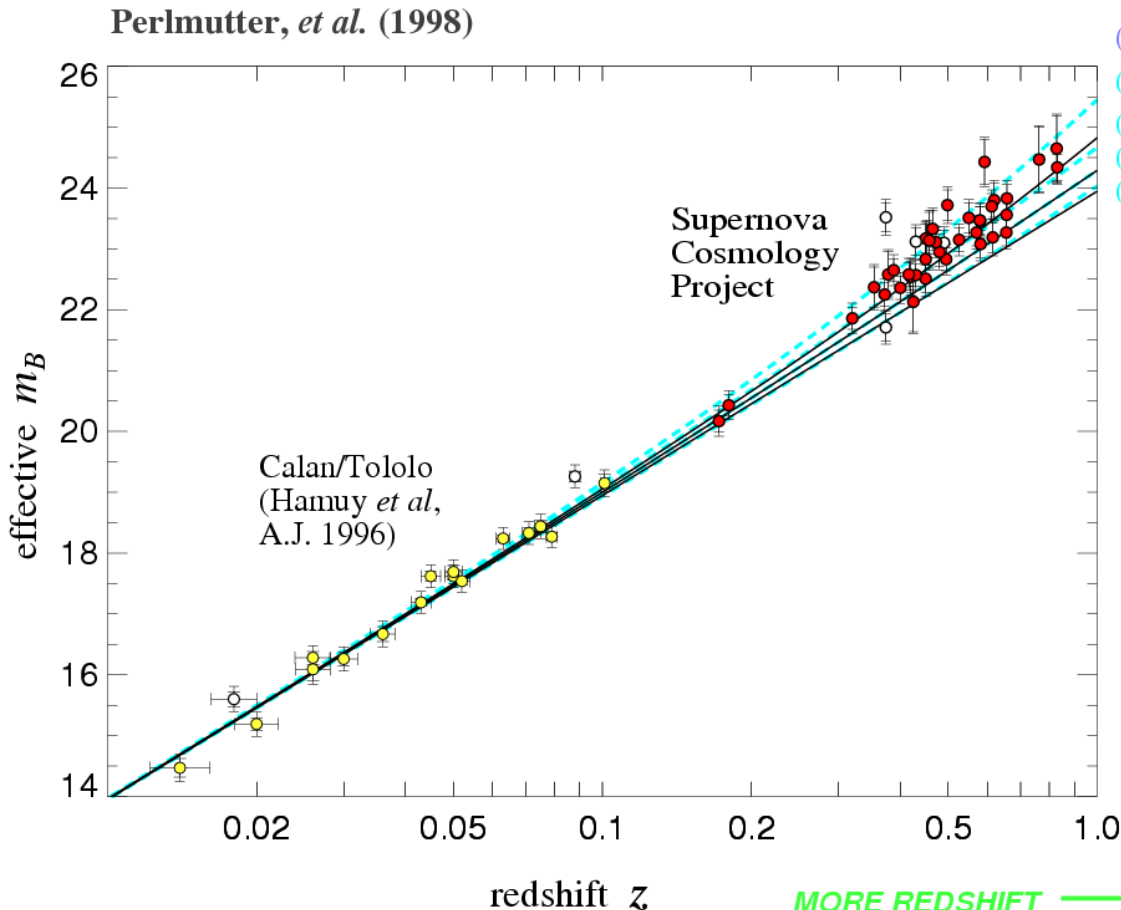


# ダークエネルギー（暗黒エネルギー）

- 一般相対論では、 $\rho + 3P$ が引力を生む。
- $\rho + 3P < 0$  ならば、万有斥力！
- 宇宙項が代表格
  
- 宇宙の約76%を占めている
- しかし、その正体は分かっていない。

# 超新星 = 宇宙の灯台

↑  
FAINTER  
(Farther)  
(Further back in time)



$(\Omega_M, \Omega_\Lambda) =$

(0, 1)

(0.5, 0.5) (0, 0)

(1, 0) (1, 0)

(1.5, -0.5) (2, 0)

Flat

$\Lambda = 0$

核燃焼を終えた  
重い星の最期の  
大爆発  
太陽の100億倍も  
の明るさ



<http://supernova.lbl.gov/>

→ MORE REDSHIFT  
(More total expansion of universe  
since the supernova explosion)

# まだまだ大きな問題が。。。

- インフレーションの起源
- ダークマターとダークエネルギー
- 宇宙項問題
- 余剰次元の宇宙論的効果
- 宇宙(空間)と時間の始まり
- ...

宇宙論は幸運な時期にある

問題＝新しい物理への鍵＝最前線

# 宇宙項問題

フリードマン方程式 ← アインシュタイン方程式

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \frac{K}{a^2} = \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ} + \Lambda$$

$$\rho_{univ} \ni \begin{cases} \text{非相対論的物質} & \propto a^{-3} \\ \text{輻射} & \propto a^{-4} \\ \vdots & \end{cases} \quad K \begin{cases} > 0 & \text{(closed)} \\ < 0 & \text{(open)} \\ = 0 & \text{(flat)} \end{cases}$$



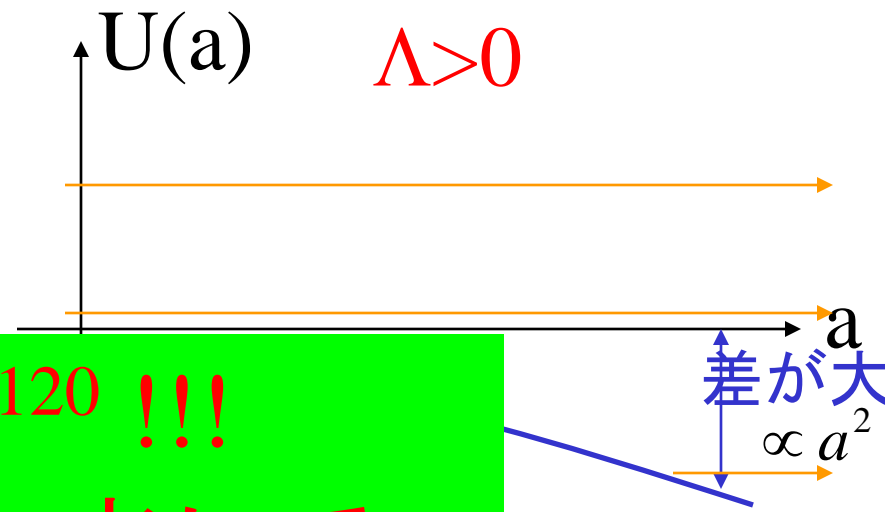
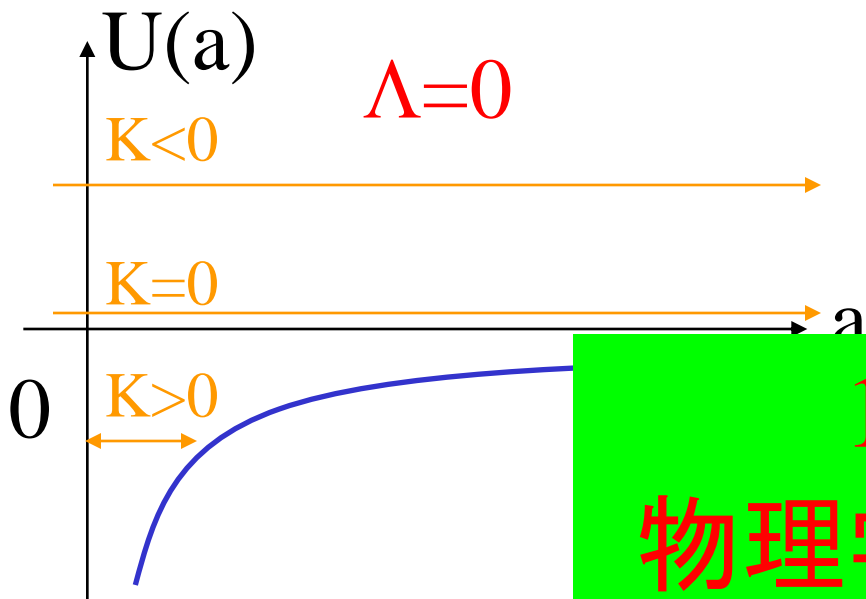
$$\frac{1}{2} \dot{a}^2 + U(a) = -\frac{K}{2}$$

1次元非相対論的粒子

ポテンシャル  $U(a)$

全エネルギー  $-K/2$

$$U(a) = -\frac{a^2}{2} \times \left( \frac{8\pi G_N}{3} \rho_{univ} + \Lambda \right)$$



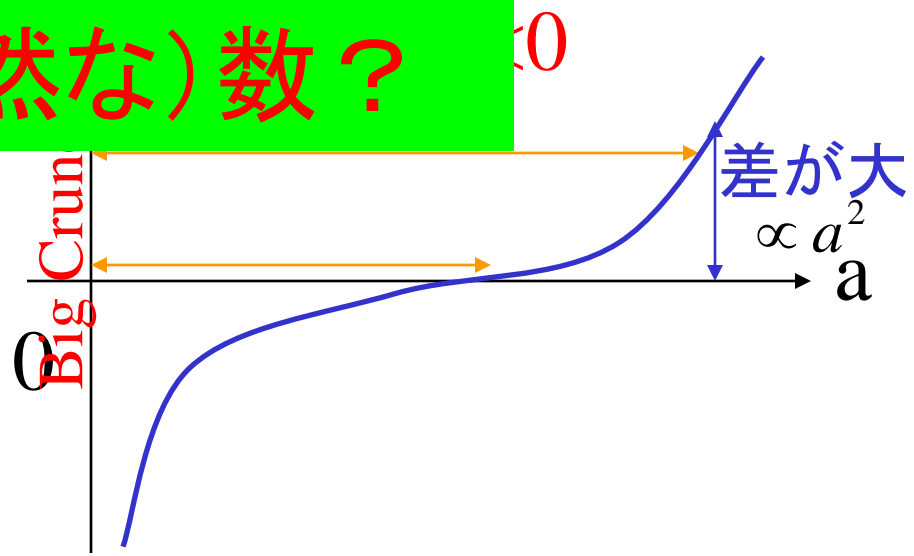
$10^{-120} !!!$   
 物理学において、  
 最も小さな  
 (不自然な)数？

$\Lambda$ が少しでも値を  
 後で非常に大きな差を生じる



観測からの制限は非常に  
 強い

$\Lambda_{obs} \approx 10^{-120} \Lambda_{Pl}$





# 実は2つ問題が。。。。

1. 昔からの問題:

**“何故故小さいのか？”**

宇宙項は量子補正に対して不安定

---

2. 新しい問題:

**“何故今か？”**

宇宙項(あるいはダークエネルギー)は、  
何故か分からないが**ちょうど今**、他の成分  
と同じオーダーになっている

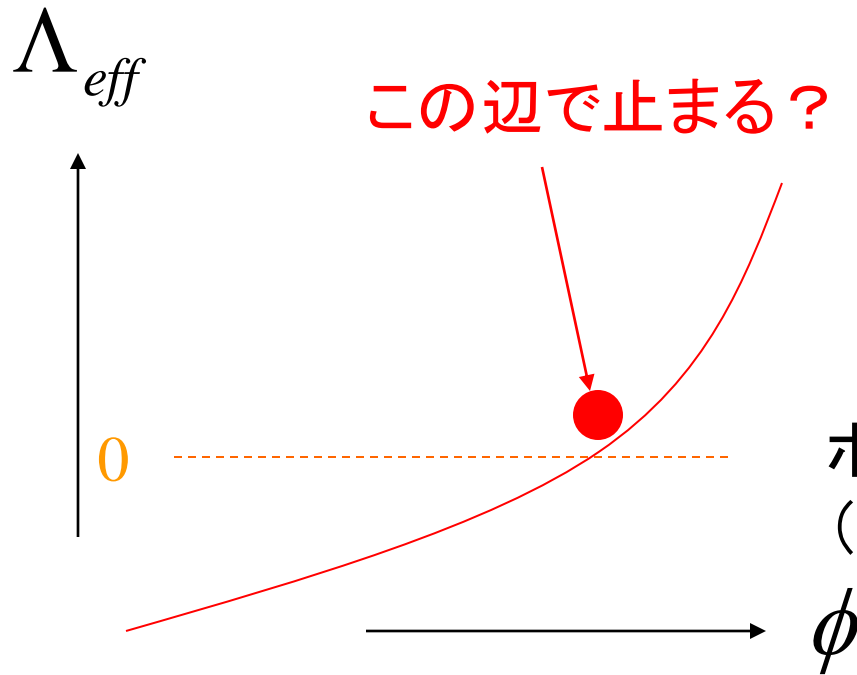
理論物理学における最難問の一つ

# どうやって解くか？

- まずは“何故小さいのか？”を説明すべきだろう  
(宇宙項が大きすぎると、そもそも第2の問題を議論できない)
- 過去のアプローチ：  
ポテンシャルの極小値で宇宙項がゼロと仮定、またはその理由を考える — しかし、これでは量子補正に対して不安定  
or  
人間原理に頼る？ (Weinberg, landscape)

# 私とRandall氏のアイデア

Mukohyama&Randall 2003



仮定

$$\Lambda_{\min} < 0$$

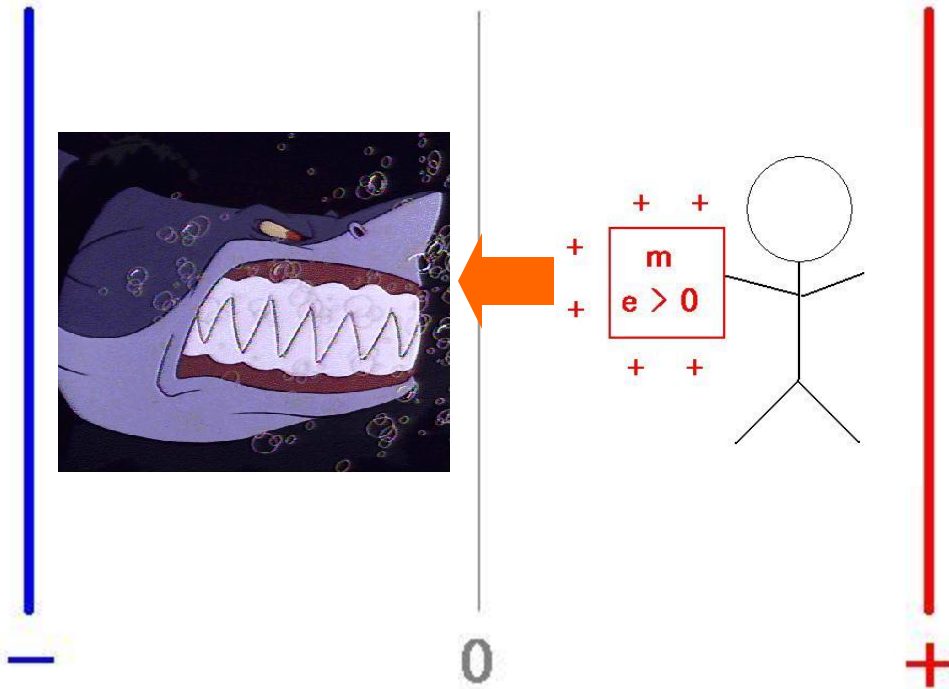
ポテンシャルの微調整はしない  
(量子補正に対して不安定だから)

当然、普通のスカラー場では止まらない  
でも、宇宙項問題を真剣に解こうとすると、もしかすると、こういうスカラー場が必要なかもしれない

# ポテンシャル

- ポテンシャルの微調整はしない
- テイラー展開:  $\Lambda_{\text{eff}} = \Lambda_0 + c(\phi - \phi_0) + \dots$
- $\phi_0$ と $c$ をずらして $\Lambda_0=0$ とできる
- $\phi = 0$ で止めたいが、 $\phi$ は転がりたがる
- 運動項を変えるしかない

# Analogue



境界の直前で  
止めるには？

- 箱の質量をコントロールできるとしたらどうだろう？
- 境界の直前で質量を無限大にできれば止まるだろう  
(ただし電荷は変えない)

$$L = \frac{1}{2} m(t) \dot{x}^2 - V(x)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{p} = -V'(x) \quad \longrightarrow \quad p \text{ は有限} \\ \dot{x} = \frac{p}{m} \quad \longrightarrow \quad m \text{ が発散すると } x \text{ は止まる!} \end{array} \right.$$

しかも

$$L_{kin} = \frac{1}{2} m \dot{x}^2 = \frac{p^2}{2m} \quad \text{は、} m \text{ が発散すると } 0 \text{ になる}$$

More singular  $m$   $\longrightarrow$  More regular  $L_{kin}$

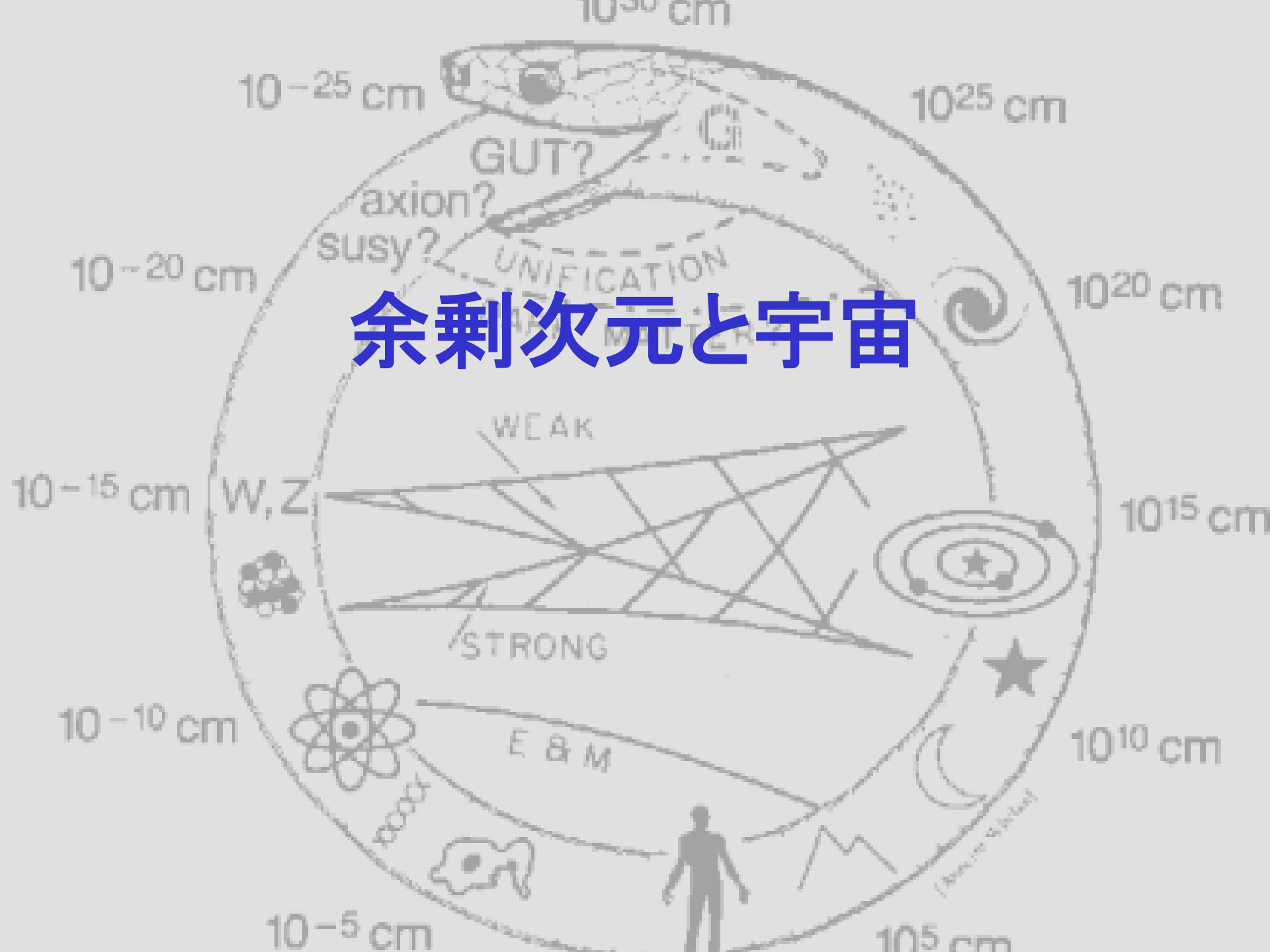
もちろん、現実の箱にはこのようなことは起こらない。  
しかし、スカラー場に対してであれば、観測や実験と矛盾しない限り、可能性として考える価値はあるだろう。  
(宇宙項問題は、それだけ難問であるとも言える)

# 宇宙の三大謎

- インフレーションの起源
- 宇宙項問題 & ダークエネルギー
- ダークマター

これらの謎は、新しい物理へ導く鍵となるだろう  
あらゆる手段を用いて謎に挑戦しよう！

# 余剰次元と宇宙





# 統一理論(の候補): 超弦理論

## 嬉しい事

- 異なる粒子＝弦の異なる振動モード: より少ない基本構成要素から複雑な世界を説明できる可能性。
- 重力を含む統一理論になっている可能性。
- 量子補正をきちんと取り扱える。(少なくとも摂動的に。一部、非摂動効果も。)

# 超弦理論・M理論

## ちょっとびっくりする事

- **時空次元が10または11。**
- でも、余分な6次元または7次元を、低エネルギーで見えなくする事が可能。

M理論:

5つの超弦理論を統一すると考えられている“想像上の理論”

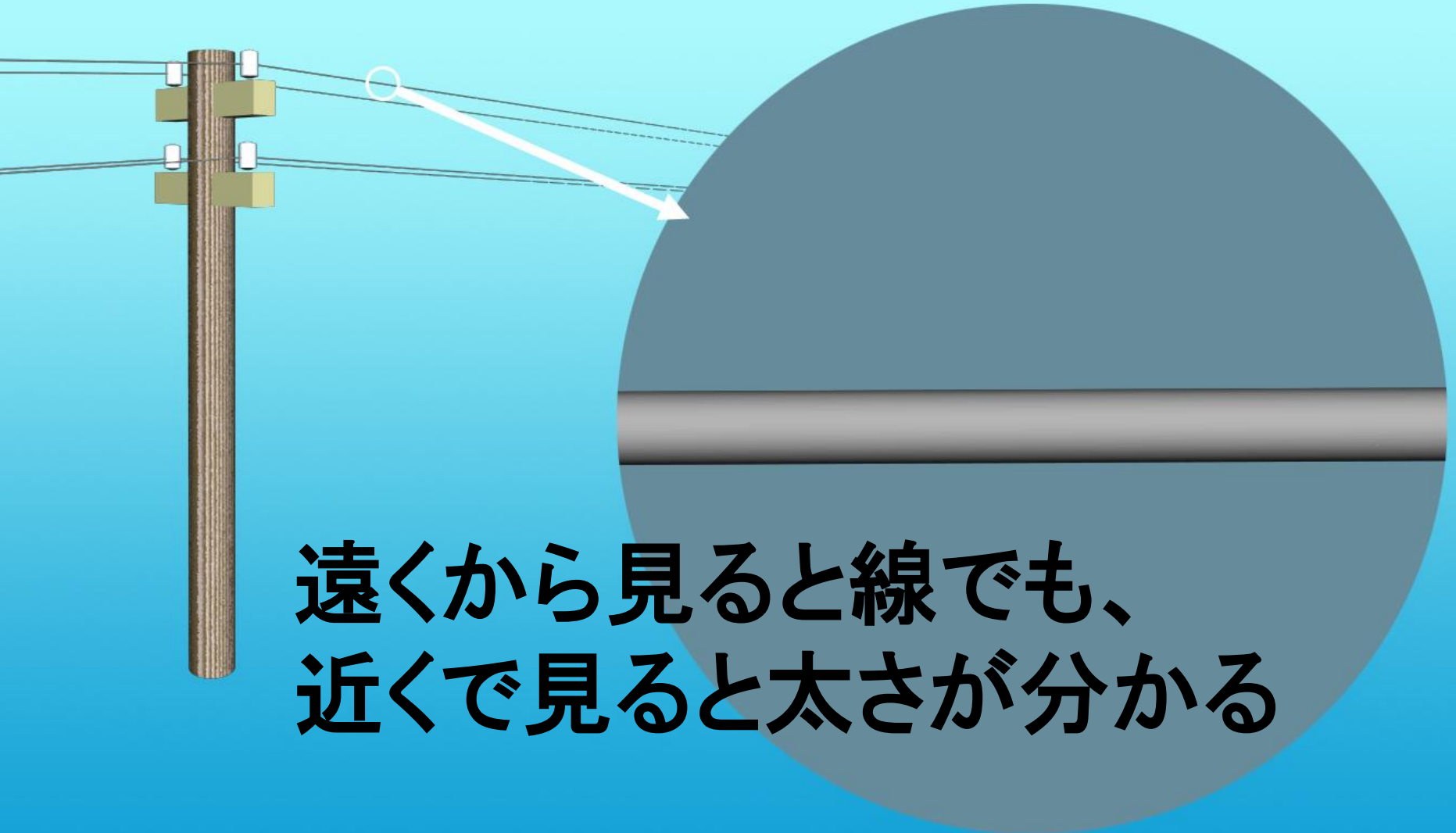
時空次元は11

IIA型

ヘテロE型

ヘテロO型

# コンパクト化

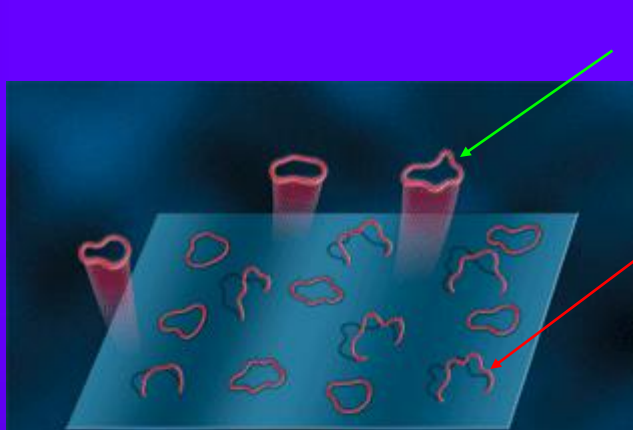


遠くから見ると線でも、  
近くで見ると太さが分かる

# コンパクト化

4次元時空の各点各点に、  
小さな6次元空間が  
付いているのかもしれない

# ブレーン上の世界(宇宙)



重力

物質

物質はブレーン上に張り付いている



余剰次元方向

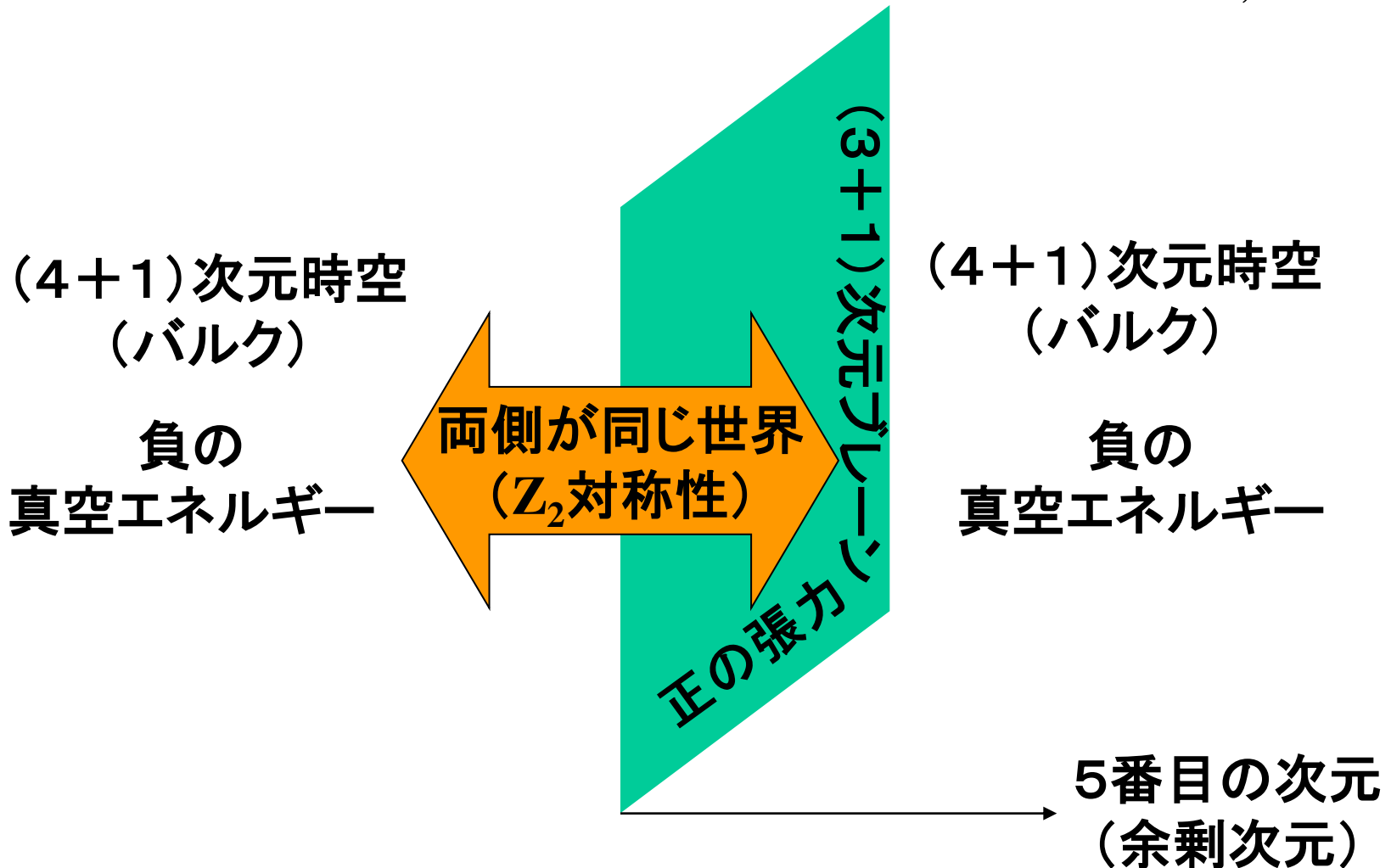
我々の3次元宇宙は高次元空間を運動するブレーン

超弦理論・M理論から予想される自然な宇宙像

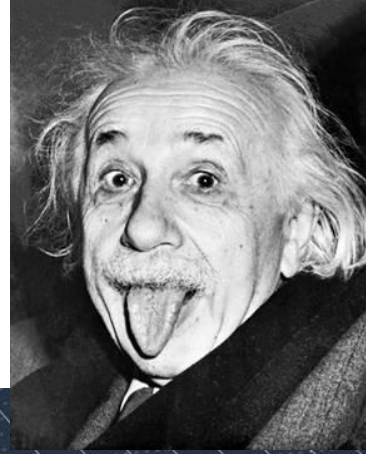


# Randall-Sundrumシナリオ(RS2)

(Randall and Sundrum, 1999)



# 時空は曲がる

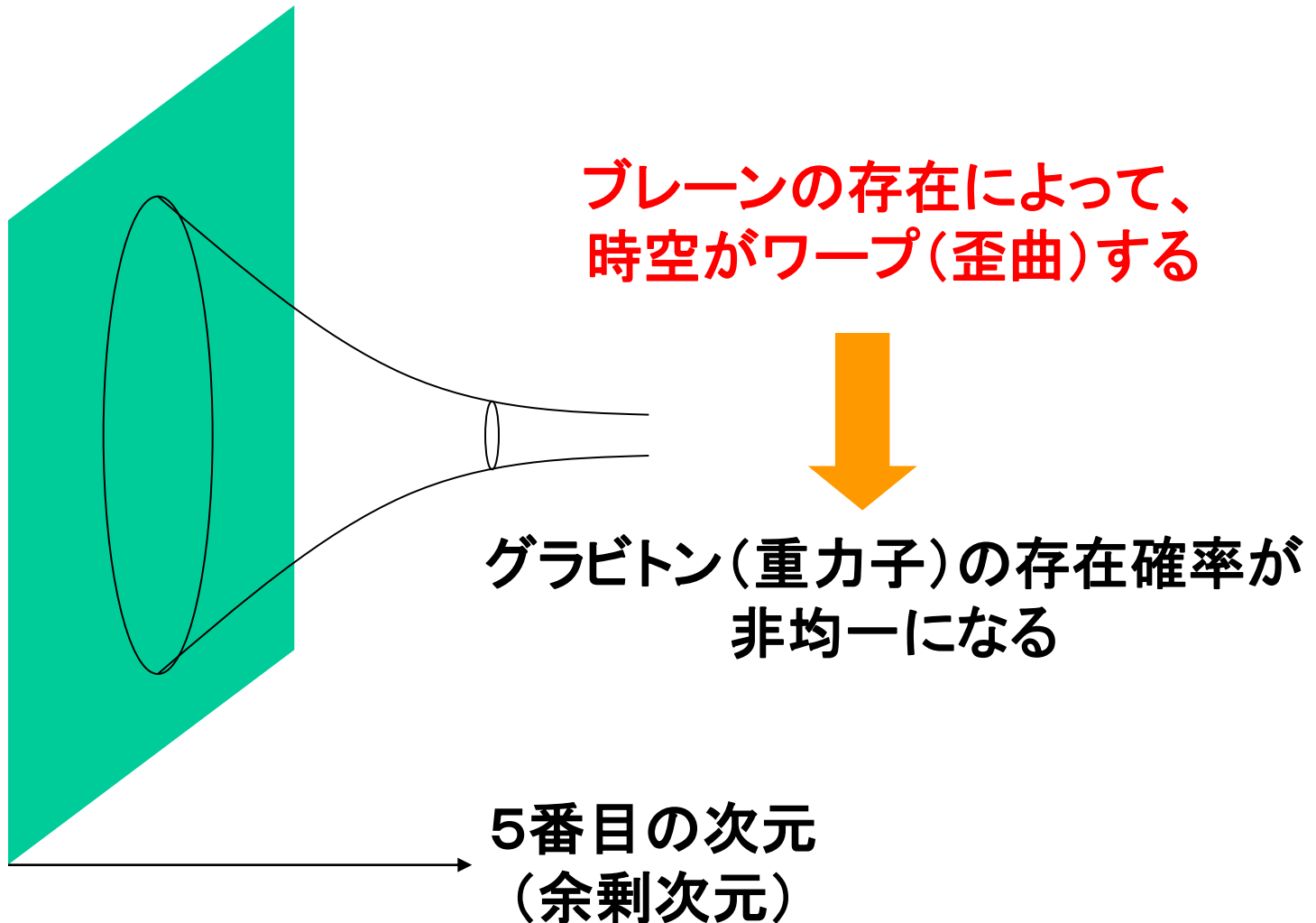


物質やエネルギーは、時空を曲げる

ブレーンも時空を曲げる！

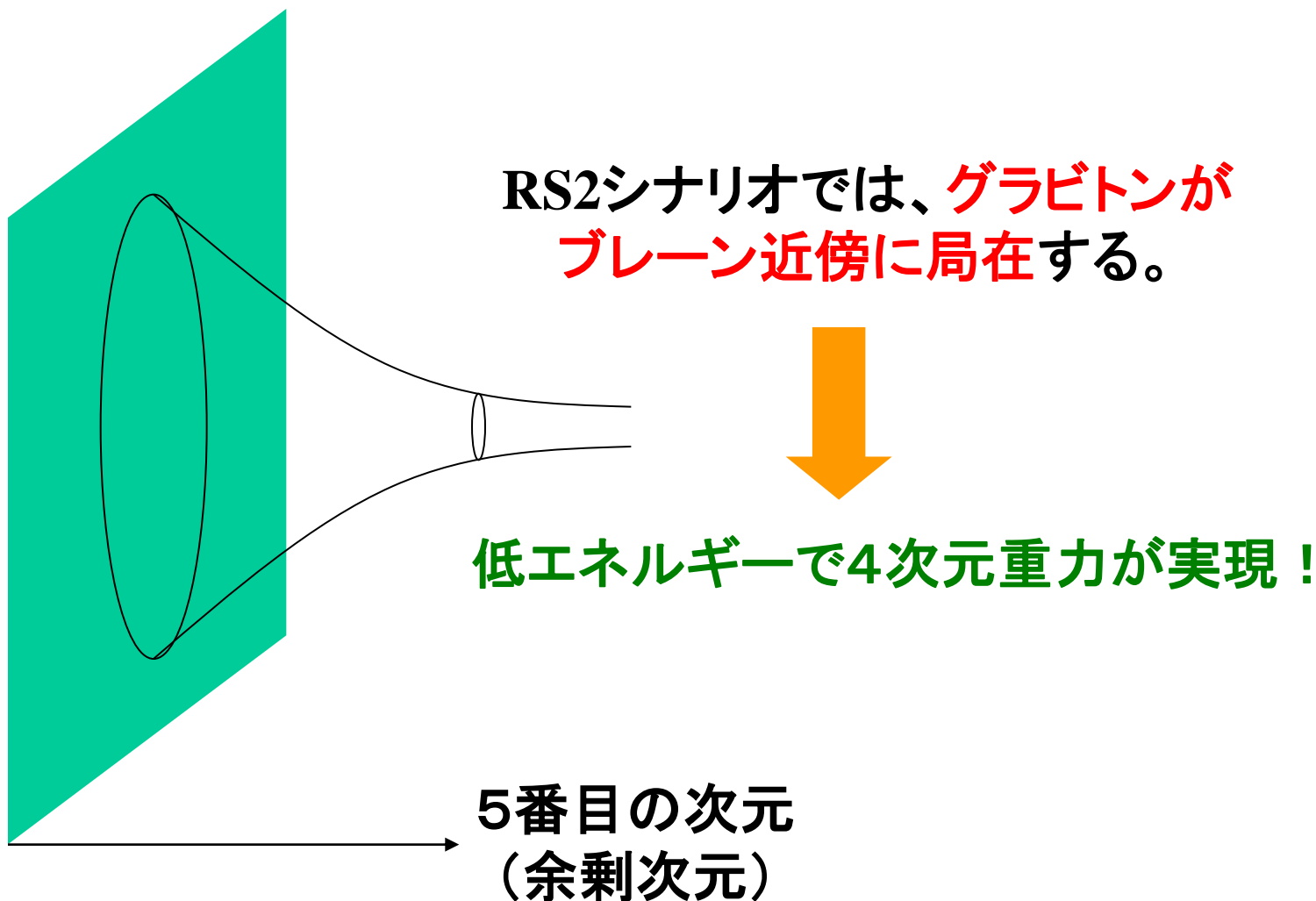


# ワープ(歪曲)した余剰次元





# Localized Gravity



# ブレーン宇宙の厳密解

- RandallとSundrumは宇宙膨張を取り入れていなかった。
- そこで私は、**ブレーン上の計量がFRW時空**となる状況を考えた。
- **一般の厳密解**を発見し、余剰次元の存在による効果を具体的な項として書き下す事に成功した。
- この効果を**dark radiation**と名付けた。今では標準的な用語となっている。

# 実際の解

## Randall-Sundrumの解 (宇宙膨張なし)

時間 縦 横 高さ 5番目の次元

$$ds_5^2 = e^{-|kw|} (-dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2) + dw^2$$

ワープ因子

## 私の求めた解 (宇宙膨張あり)

$$ds_5^2 = -\frac{\psi^2(t, w)}{\varphi(t, w)} dt^2 + \varphi(t, w) a^2(t) (dx^2 + dy^2 + dz^2) + dw^2$$

$$\psi = \cosh(kw) + 2k^{-2} (H^2 + \partial_t H) (\cosh(kw) - 1) - \frac{1 + 2k^{-2} (2H^2 + \partial_t H)}{\sqrt{1 + 4k^{-2} H^2 + Ca^{-4}}} \sinh |kw|$$

$$\varphi = \cosh(kw) + 2k^{-2} H^2 (\cosh(kw) - 1) - \sqrt{1 + 4k^{-2} H^2 + Ca^{-4}} \sinh |kw|$$

$$H = \partial_t a / a$$

どちらの解でも、ブレーンの位置は  $w=0$ 。

# ブレーン上の一様等方宇宙の発展

通常フリードマン方程式

$$H^2 = \frac{8\pi G_N}{3} \rho$$

$$H = \frac{\partial_t a}{a}$$

$\rho$ : エネルギー密度

前述の厳密解から得られる発展方程式

$$H^2 = \frac{8\pi G_N}{3} \rho + \frac{Ck^2}{4a^4} + O(\rho^2)$$



## Dark Radiation

- 重力的には輻射のように振舞う
- 起源は余剰次元

超弦理論



Dブレーンの発見



ブレーンワールド宇宙

暗黒輻射、新しい宇宙創生像、ブラックホール生成、ダークエネルギーの起源、ホログラフィー……

究極理論



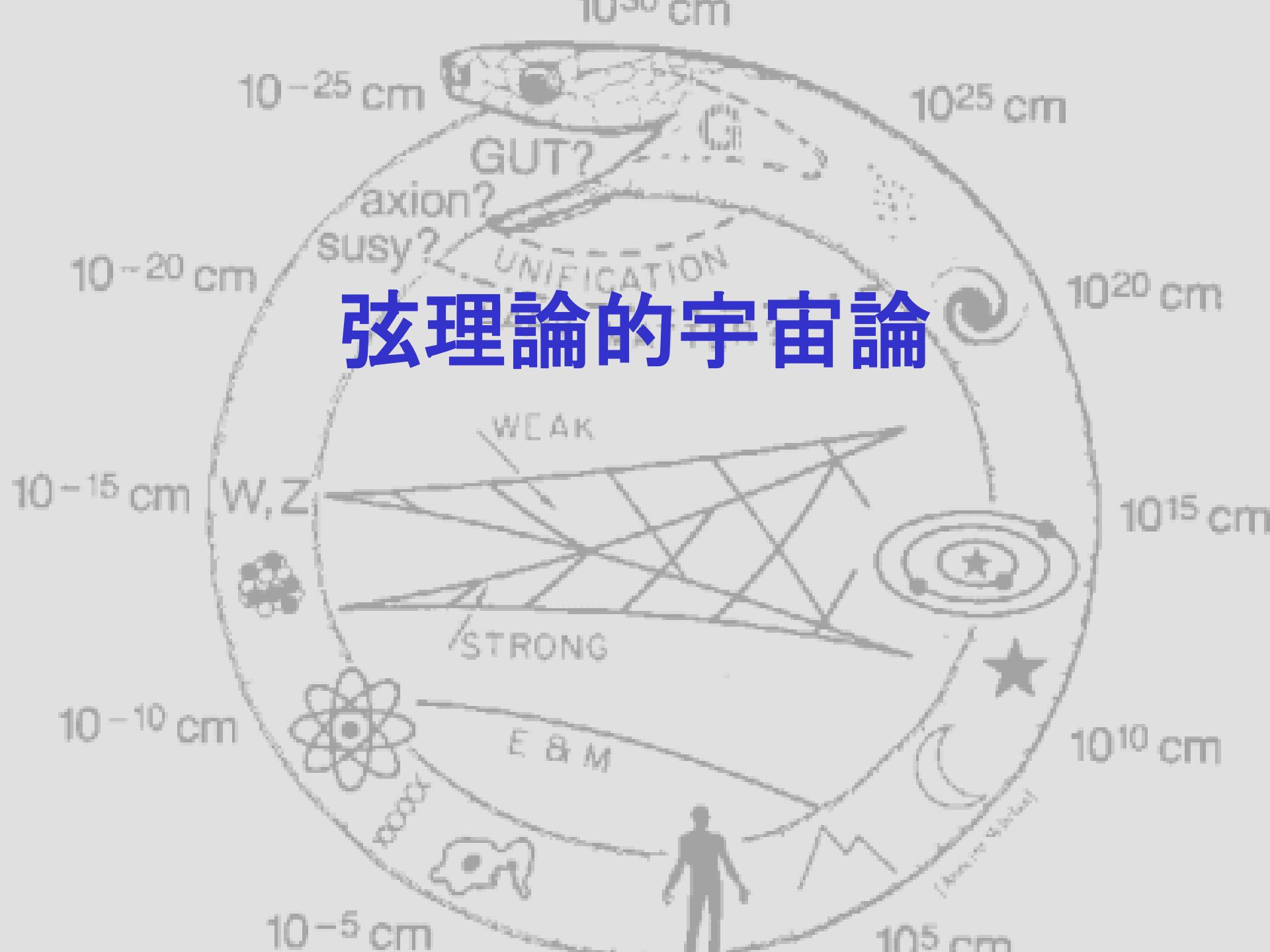
宇宙論

2003年以降の発展

超弦理論の枠内で、加速膨張宇宙の解が発見された(KKLT)。

6次元空間中で動くDブレーンが、インフレーションを引き起こすかもしれない！

# 弦理論的宇宙論



# 宇宙の歴史

宇宙マイクロ波  
背景放射

インフレーション

Quantum  
Fluctuations

Dark Ages

1st Stars  
about 400 million yrs.

Development of  
Galaxies, Planets, etc.

Dark Energy  
Accelerated Expansion

ダークエネルギー

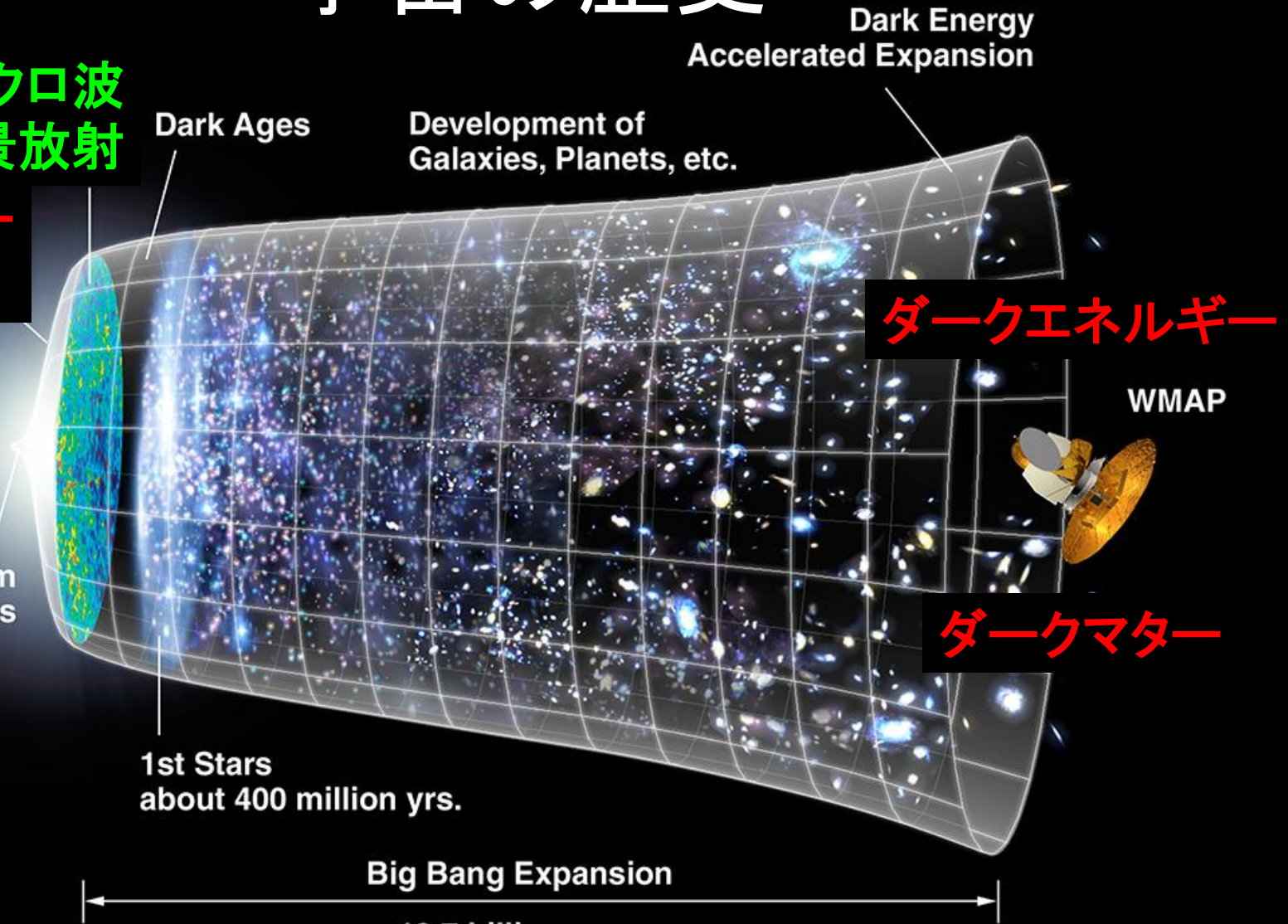
ダークマター

WMAP

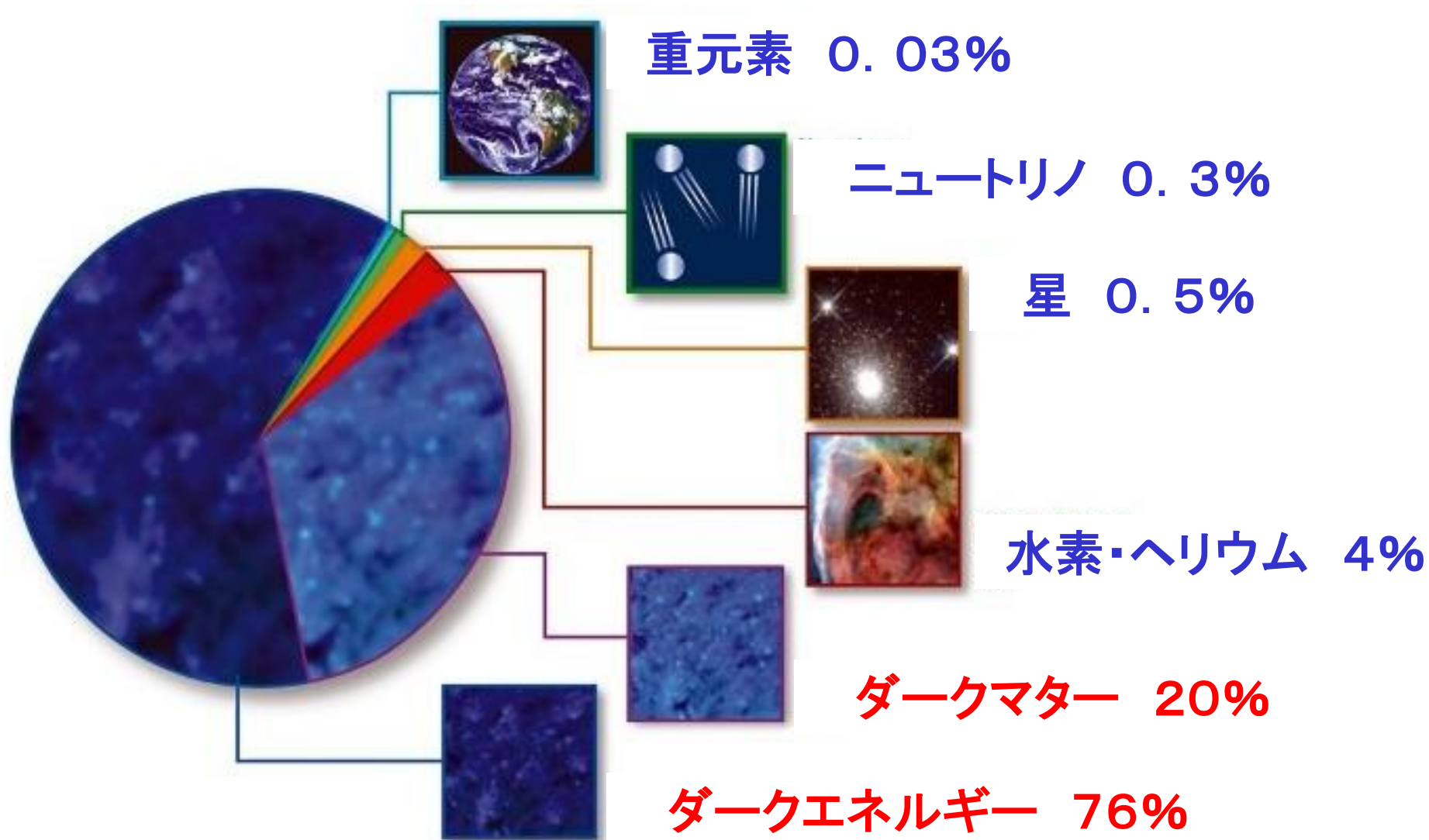
Big Bang Expansion

13.7 billion years

<http://map.gsfc.nasa.gov/>

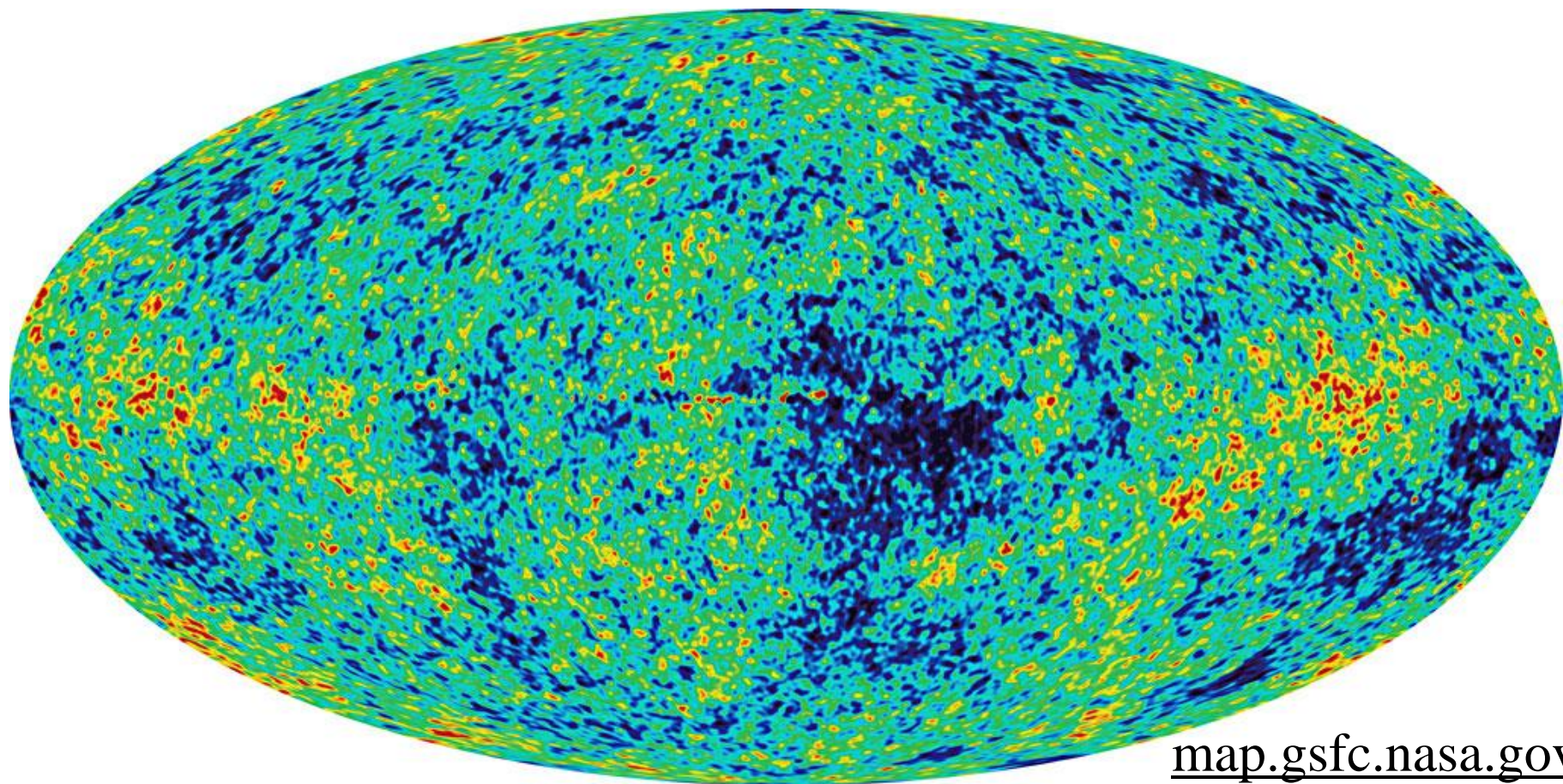


# 宇宙の構成 **なんと95%は未知!**





**宇宙背景輻射 = 宇宙の音の化石**



**10万分の1 = 1mm/100m のさざ波**

# インフレーション: “宇宙の音”の演奏者



# 宇宙の歴史

宇宙マイクロ波  
背景放射

インフレーション

Quantum  
Fluctuations

Dark Ages

1st Stars  
about 400 million yrs.

Development of  
Galaxies, Planets, etc.

Dark Energy  
Accelerated Expansion

ダークエネルギー

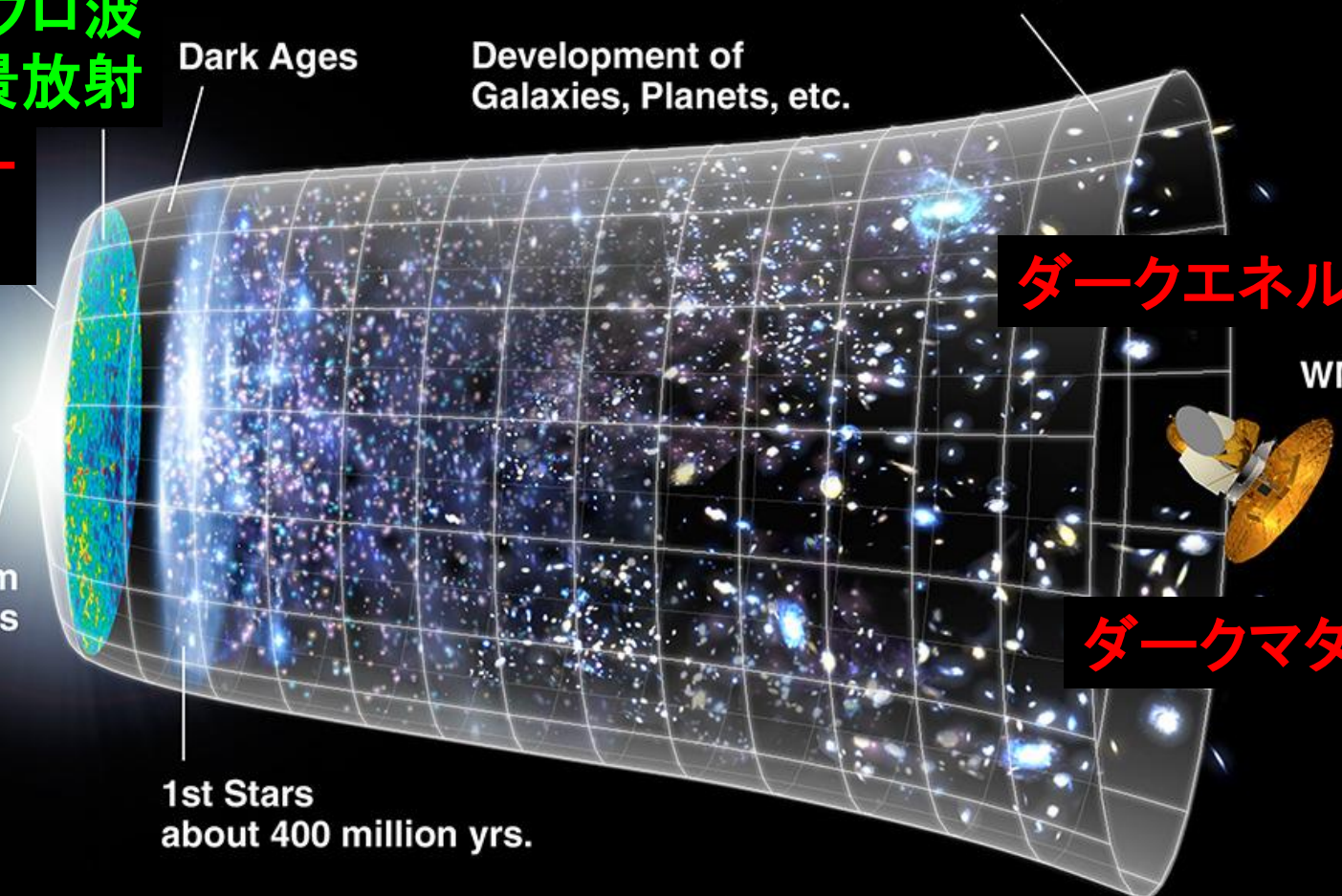
ダークマター

WMAP

Big Bang Expansion

13.7 billion years

<http://map.gsfc.nasa.gov/>



# 現在の宇宙論における3つの大きな謎

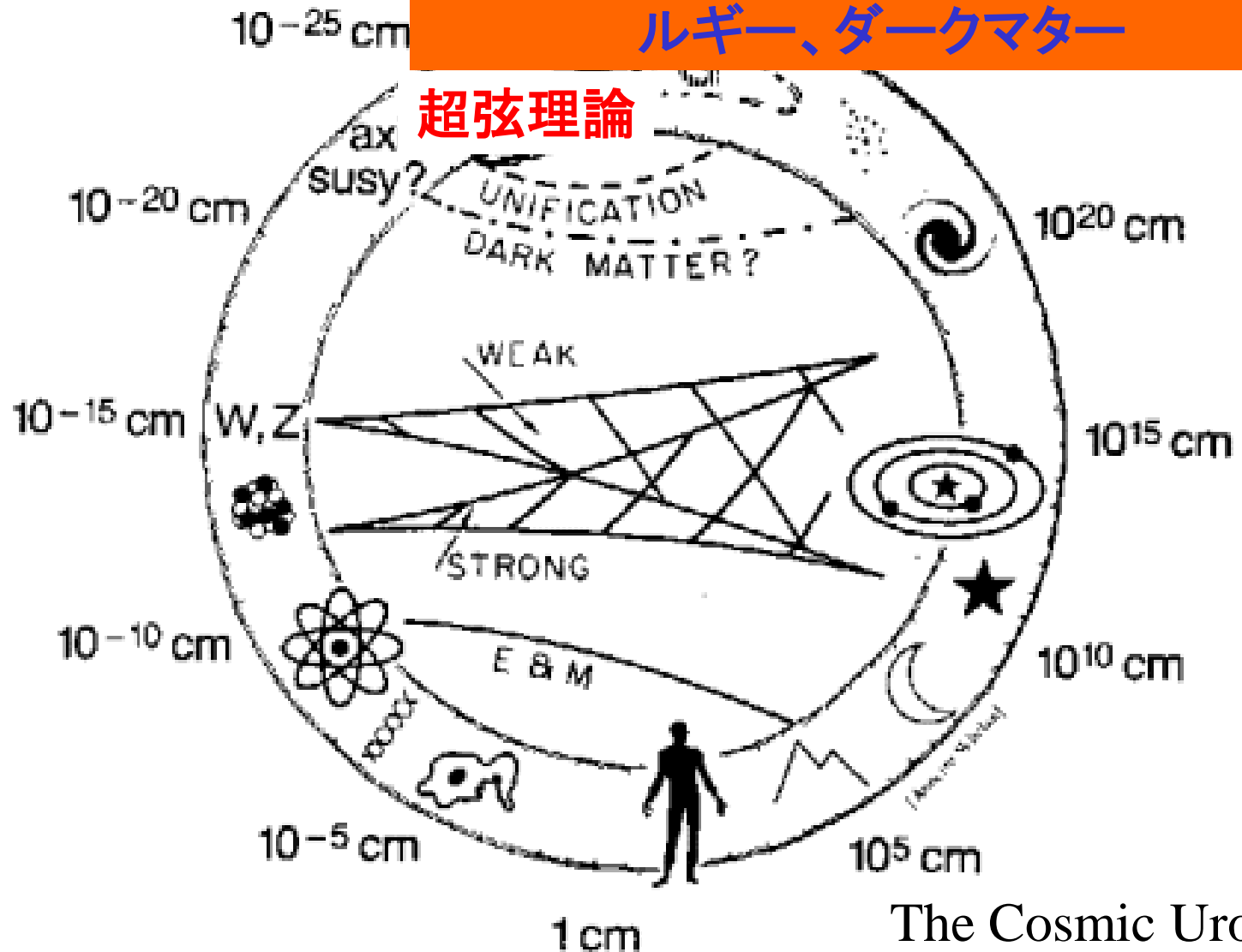
- 初期宇宙  
インフレーション
- 現在の宇宙  
ダークエネルギー & ダークマター

ある(あった)ことは確かそうだが、  
その実態は何か分からない。

観測が先行するexcitingな時代

# 宇宙のウロボロス

3つの謎: インフレーション、ダークエネルギー、ダークマター

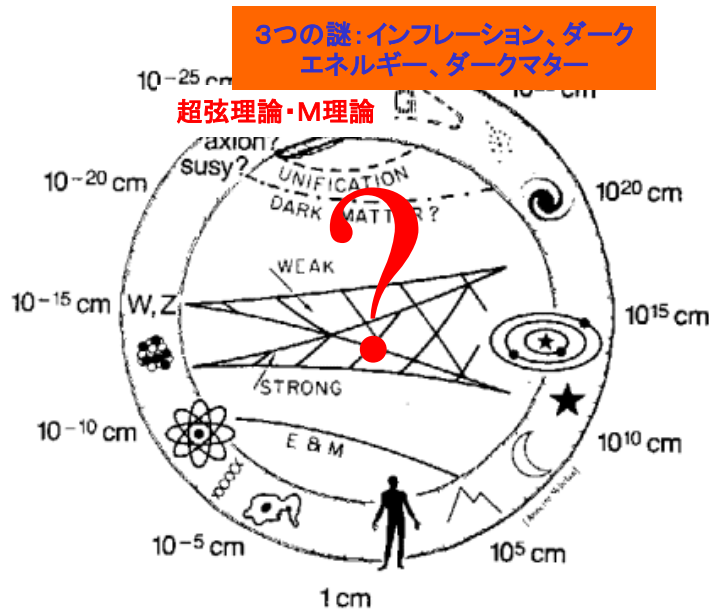


The Cosmic Uroboros  
by Sheldon Glashow

# 2002年までの超弦理論

## 困った事

- 初期宇宙のインフレーションと、現在のダークエネルギーは、**宇宙の加速膨張**が本質的。
- しかし、2002年までは、モジュライが安定化された加速膨張宇宙の解を見つけられなかった。
- No-go定理もあった。

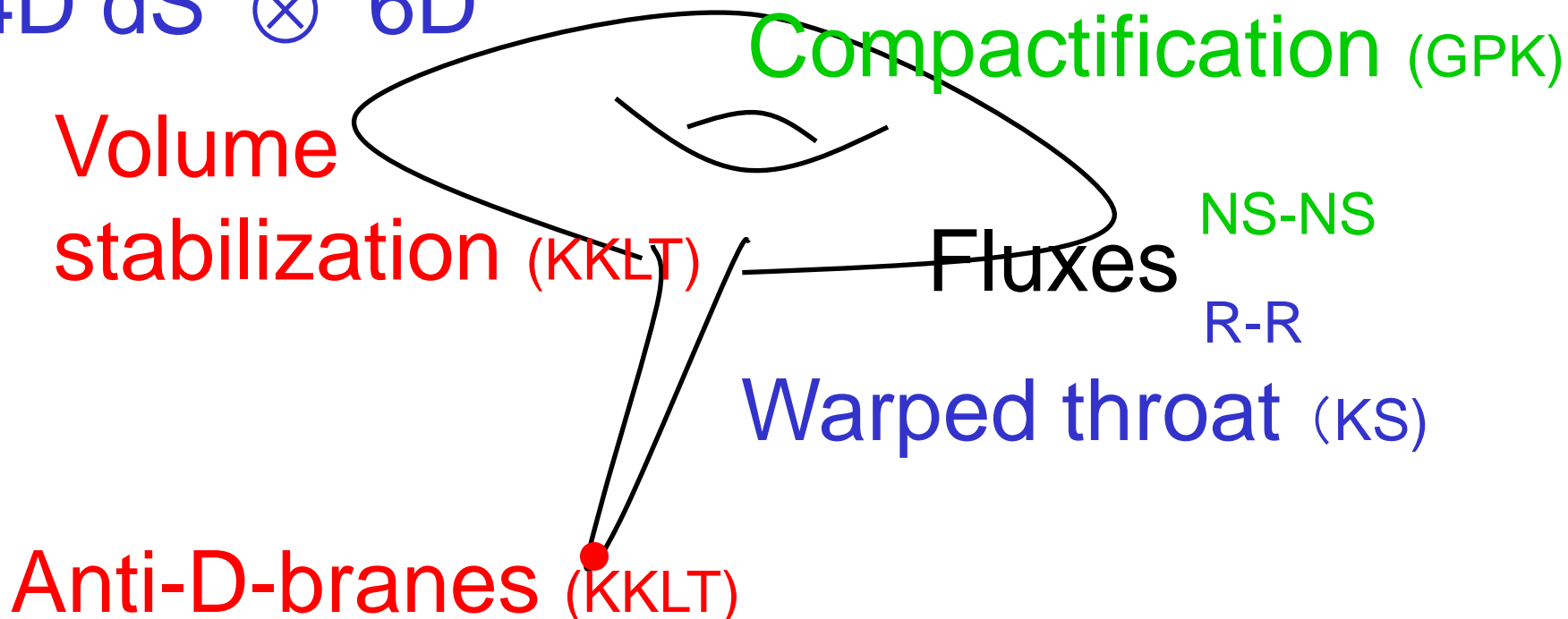


宇宙のウロボロス  
が閉じない？

# 超弦理論：最近の発展

- 2003年、ついに(モジュライが固定された) **4次元 de Sitter** 解 “**が見つかった!** Kachru, Kallosh, Linde and Trivedi (KKLT)
- 以前の no-go 定理では、非摂動効果と **ブレーン** (広がった膜のようなもの) の存在を考慮していなかった。

4D dS  $\otimes$  6D



弦理論の枠内で、宇宙論が現実的になりつつある！

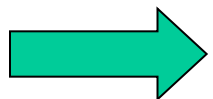
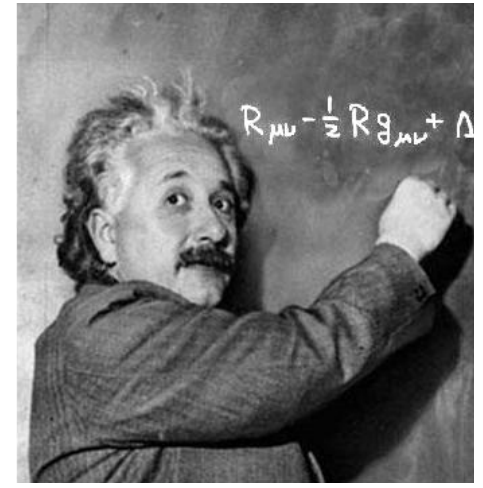
2005年：特殊相対論から100年

2006年・2007年：湯川・朝永生誕百年

2008年：南部・小林・益川ノーベル賞！

現在

2015年：一般相対論から100年



弦理論的宇宙論で、偉人たちの夢に挑む！



# 弦理論的宇宙論

- インフレーションモデルの構築と観測との比較
- ダークエネルギーとダークマター
- Warpedコンパクト化の性質
- 、 、 、

# Dブレーンと反Dブレーン

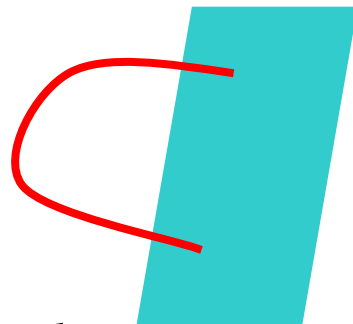
- 2種類のひも

 開いたひも  
(Neumann b.c.)

 閉じたひも  
(Periodic b.c.)

- 開いたひもは、面上にくっつくことができる

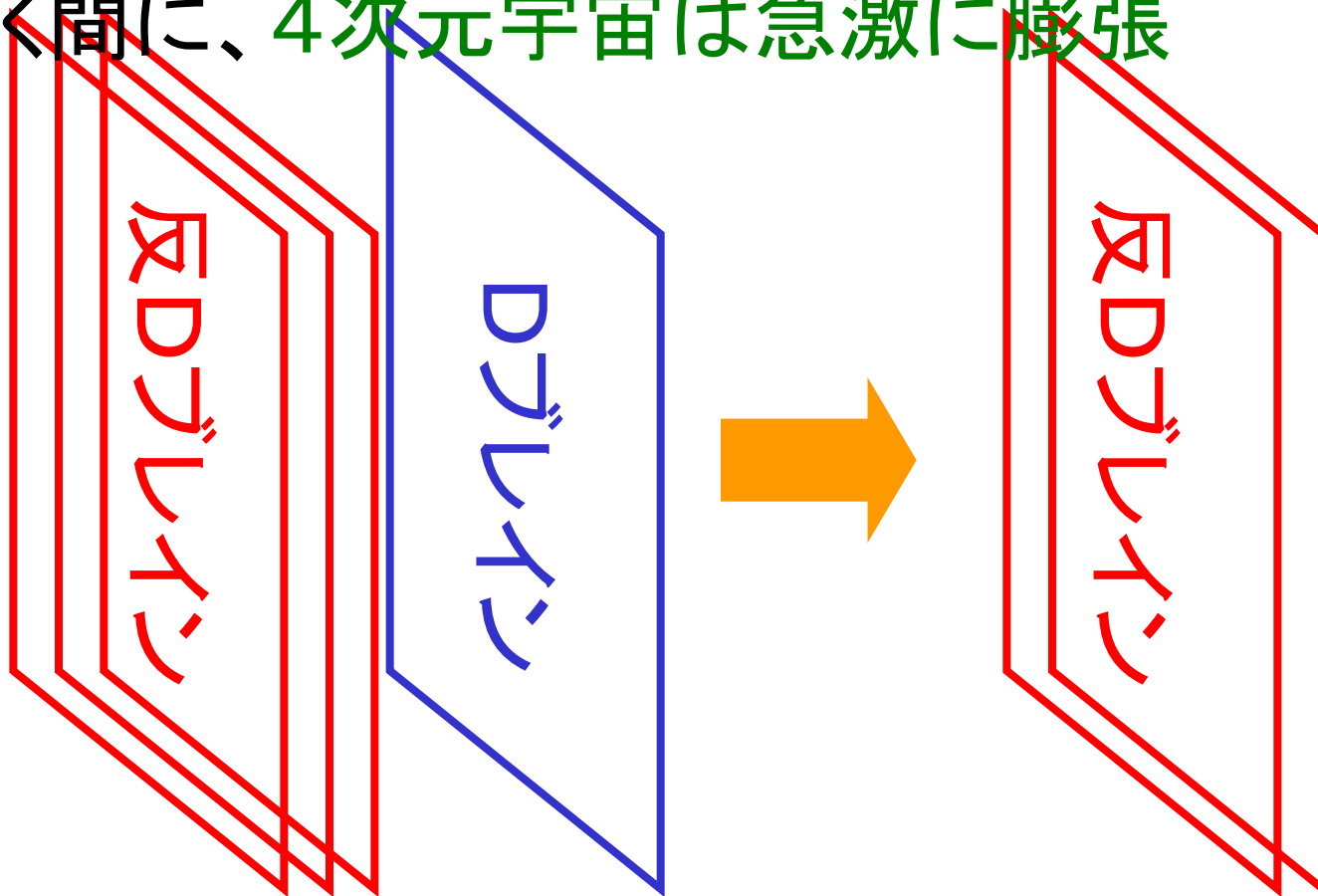
開いたひも  
(Dirichlet b.c.)



- この面がDブレーンで、 $(p+1)$ -form ポテンシャルと結合する。ここで、 $p$  は面の空間次元数。
- 反Dブレーンも開いたひもがくっつく面だが、Dブレーンとは逆符号の $(p+1)$ -form荷を持つ。

# ブレーンインフレーション (Dvali&Tye 1998)

Dブレーンと反Dブレーンの間の距離がゆっくり近づくと間に、4次元宇宙は急激に膨張



Dブレーンと反Dブレーンが対消滅してインフレーション終了、4次元宇宙の再加熱

# 弦理論的ブレーンインフレーション

- **Wrapped DBI inflation**  
arXiv:0708.4285 [hep-th]  
with T.Kobayashi and S.Kinoshita
- **DBI inflation with curvature coupling**  
arXiv:0910.1353 [astro-ph.CO]  
with D.Easson and B.Powell
- **Rapid-roll inflation**  
arXiv:0709.1952 [hep-th] with L.Kofman  
arXiv:0810.0810 [hep-th] with T.Kobayashi  
arXiv:0905.1752 [astro-ph.CO]  
with T.Kobayashi and B.Powell
- **Curvaton from brane angular motion**  
arXiv:0905.2835 [hep-th] with T.Kobayashi

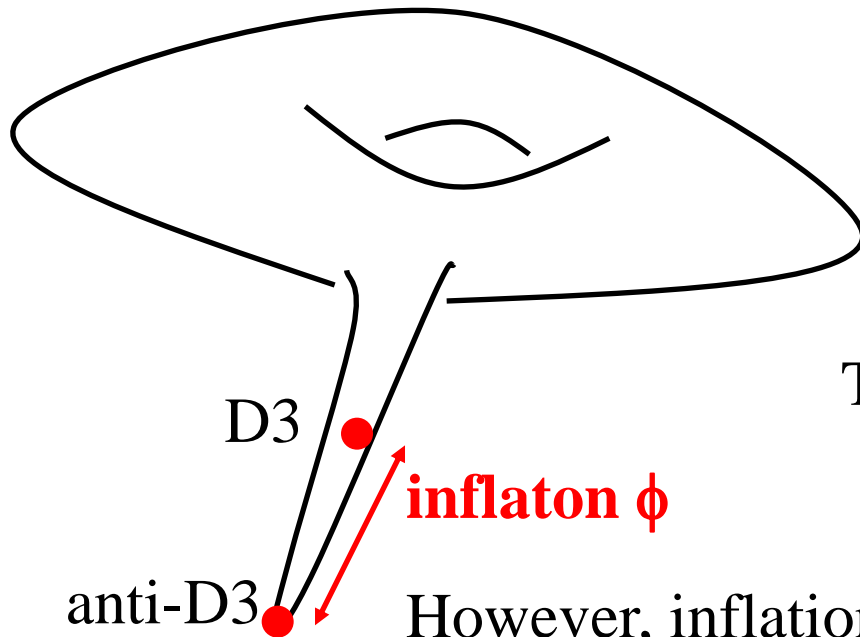
# Wrapped DBI inflation

**arXiv:0708.4285 [hep-th] with  
T.Kobayashi and S.Kinoshita**

# The KKLM model

Kachru, Kallosh, Linde, Maldacena, McAllister, and Trivedi 2003

= brane inflation (Dvali&Tye 1998) in KKL



Many fields are conformally coupled in this background.



The inflaton gets the mass

$$m_{\phi}^2 = 2H^2$$

However, inflation with almost scale-invariant spectrum of perturbations requires  $m_{\phi}^2 \sim 10^{-2} H^2$

This can be achieved by considering extra  $\phi$ -dependence and fine-tuning it.

# KKLMMT fine-tuning

- $m_\phi^2 = 2H^2$  would stop inflation.
- This is based on dynamics of a scalar with canonical kinetic term  $-\partial^\mu\phi\partial_\mu\phi/2$ .
- However, the brane position is described by **nonlinear DBI kinetic action**.
- We should take it into account!  
[Silberstein&Tong 2003]

# DBI inflation: model description

- Mobile D3-brane with relativistic speed
- Action

$$S = \int d^4 \xi \sqrt{-g^{(4)}} \left[ \boxed{-T(\phi) \sqrt{1 + \partial^\mu \phi \partial_\mu \phi / T(\phi)}} + T(\phi) - V(\phi) \right]$$

**DBI part**

$$d\phi = T_3^{1/2} d\rho$$
$$T(\phi) = T_3^{1/2} h^4 \quad \rho : \text{radial position of the brane}$$

- Energy density & Pressure

$$\rho = T(\phi)(\gamma - 1) + V(\phi)$$

$$p = T(\phi)(1 - \gamma^{-1}) - V(\phi)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \dot{\phi}^2 / T(\phi)}}$$



# DBI inflation: good things

- A kind of k-inflation with general sound speed:  
**a new model of stringy inflation!**
- $\sqrt{1 - \dot{\phi}^2 / T(\phi)}$  leads to a speed limit.  
No need for slow-roll:  
**a remedy to the  $\eta$  problem (KKLMMT fine-tuning)?**
- Large non-Gaussianity:  $f_{NL} \approx \frac{1}{3}(\gamma^2 - 1)$   
**signature of stringy inflation?**

# DBI inflation: bad thing

Baumann&McAllister 2006; Lidsey&Huston 2007

- (UV) DBI inflation with large non-Gaussianity seems **inconsistent with WMAP data**.
- Can be consistent only in the limit when it **goes back to the slow-roll KKLMMT inflation**.

- The reason:

large but not too large  $|f_{\text{NL}}|$  (say,  $20 < |f_{\text{NL}}| < 300$ )

→ large  $r$  → large  $\Delta\phi/M_{\text{Pl}}$

i) **large  $\Delta\phi$**  → **long throat** → large  $V_6$

ii) not large  $M_{\text{Pl}}$  → not large  $V_6$  ← **confliction**

# Our attempt: wrapped DBI

Kobayashi, Mukohyama and Kinoshita 2007

- The essential reason for the inconsistency of DBI inflation with WMAP data:

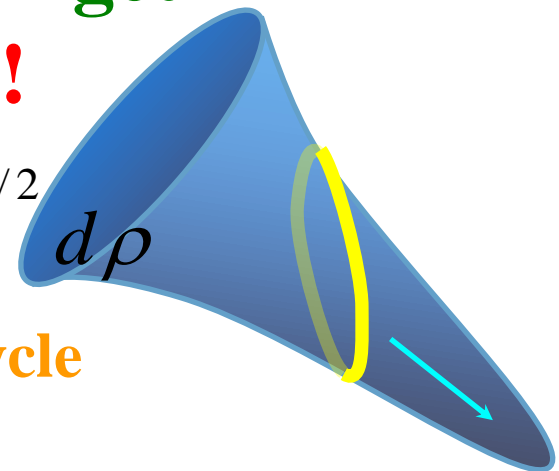
**large  $\Delta\phi$   $\rightarrow$  long throat**

- For D3, this is inevitable:  $d\phi = T_3^{1/2} d\rho$

- **For a wrapped D5 or D7, we can get larger  $\Delta\phi$  from the same throat!**

$$d\phi = T_{3+2n}^{1/2} \left\{ \int d^{2n} \xi \sqrt{\det(G_{kl} - B_{kl})} \right\}^{1/2} d\rho$$

large volume of 2- or 4-cycle




- **This significantly ameliorates the conflict!**

# More stringent bound on wrapped DBI inflation

- Wrapped DBI inflation with large non-Gaussianity still requires a long throat. (Not as long as for D3 but still long.)

long throat  large background charge

 **large Euler number of CY fourfold, exceeding the known maximal value**

$$\chi = 1820448 \quad [\text{Klemm,Lian,Roan\&Yau 1997}]$$

# Summary of wrapped DBI inflation

- Wrapping D5 or D7 over a cycle **changes the relation between the brane position and the inflaton field.**
- This significantly ameliorates the conflict between (UV) DBI inflation and WMAP data.
- However, **successful wrapped (UV) DBI inflation requires Euler number larger than the known maximal value.**

# 弦理論的宇宙論

- 超弦理論の枠内での宇宙論が現実的になってきている
- 宇宙の観測～インフレーション理論～弦理論～数学 という繋がり  
非ガウス性の観測 (Planck)～DBIインフレーション～Dブレーン～CY多様体
- 素粒子・弦理論の研究者と、宇宙論・相対論の研究者がもっと議論することが重要

# What is cosmology telling us about fundamental physics?



向山信治

(東京大学 数物連携宇宙研究機構)

ICEPPシンポジウム@白馬

# 内容

1. 標準宇宙論
2. インフレーション理論
3. 宇宙の三大謎
4. 余剰次元と宇宙
5. 弦理論的宇宙論
6. Horava-Lifshitz宇宙論
7. まとめ



# 最近の研究から： Horava-Lifshitz宇宙論





# Horava-Lifshitz cosmology

- Higher curvature terms lead to **regular bounce** (Calcagni 2009, Brandenberger 2009).
- Higher curvature terms ( $1/a^6$ ,  $1/a^4$ ) might make the **flatness problem milder** (Kiritsis&Kofinas 2009).
- The  $z=3$  scaling **solves the horizon problem** and leads to **scale-invariant cosmological perturbations** without inflation (Mukohyama 2009).
- Absence of local Hamiltonian constraint leads to **CDM as integration “constant”** (Mukohyama 2009).
- New mechanism for generation of **primordial magnetic seed field** (Maeda, Mukohyama, Shiromizu 2009).

# Power counting

$$I \supset \int dt dx^3 \dot{\phi}^2 \quad \int dt dx^3 \phi^n$$

$$\propto E^{-(1+3+ns)}$$

- **Scaling dim of  $\phi$**   
 $t \rightarrow b t$  ( $E \rightarrow b^{-1} E$ )  
 $x \rightarrow b x$   
 $\phi \rightarrow b^s \phi$   
 $1+3-2+2s = 0$   
 $s = -1$

- Renormalizability  
 $n \leq 4$
- Gravity is highly non-linear and thus non-renormalizable

# Abandon Lorentz symmetry?

$$I \supset \int dt dx^3 \dot{\phi}^2$$

$$\int dt dx^3 \phi^n$$

- Anisotropic scaling

$$t \rightarrow b^z t \quad (E \rightarrow b^{-z} E)$$

$$x \rightarrow b x$$

$$\phi \rightarrow b^s \phi$$

$$z+3-2z+2s = 0$$

$$s = -(3-z)/2$$

- $s = 0$  if  $z = 3$

$$\propto E^{-(z+3+ns)/z}$$

- For  $z = 3$ , any nonlinear interactions are renormalizable!
- Gravity becomes renormalizable!?

# Scalar with $z=3$

free part  $I_\phi = \frac{1}{2} \int dt d^3x (\dot{\phi}^2 + \phi \mathcal{O} \phi)$

FERMI, MAGIC  
→  $M > 10^{11} \text{ GeV}$   
for photon

$$\mathcal{O} = \underbrace{\frac{\Delta^3}{M^4}}_{\text{UV: } z=3} - \frac{\kappa \Delta^2}{M^2} + \underbrace{c_\phi^2 \Delta - m_\phi^2}_{\text{IR: } z=1}$$

- **UV:  $z=3$** , renormalizable nonlinear theory



RG flow

- **IR:  $z=1$** , familiar Lorentz invariant theory

Note: we need a mechanism or symmetry to make “limits of speed” of different species to be essentially the same.

c.f. Iengo, Russo, and Serone (2009)

$\delta c = 0$  is an IR fixed point but approach seems slow.

# Scale-invariant cosmological perturbations from Horava- Lifshitz gravity without inflation

arXiv:0904.2190 [hep-th]

c.f. Basic mechanism is common for “Primordial magnetic field from non-inflationary cosmic expansion in Horava-Lifshitz gravity”, arXiv:0909.2149 [astro-th.CO] with S.Maeda and T.Shiromizu.

# Usual story with $z=1$

- $\omega^2 \gg H^2$  : oscillate

$\omega^2 \ll H^2$  : freeze

oscillation  $\rightarrow$  freeze-out iff  $d(H^2/\omega^2)/t > 0$

$\omega^2 = k^2/a^2$  leads to  $d^2a/dt^2 > 0$

Generation of super-horizon fluctuations requires accelerated expansion, i.e. inflation.

- Scaling law

$t \rightarrow b t$  ( $E \rightarrow b^{-1} E$ )

$x \rightarrow b x$

$\phi \rightarrow b^{-1} \phi$



$$\delta\phi \propto E \sim H$$

Scale-invariance requires almost const.  $H$ , i.e. inflation.



$\ln L$

# Horizon problem ( $z=1$ )

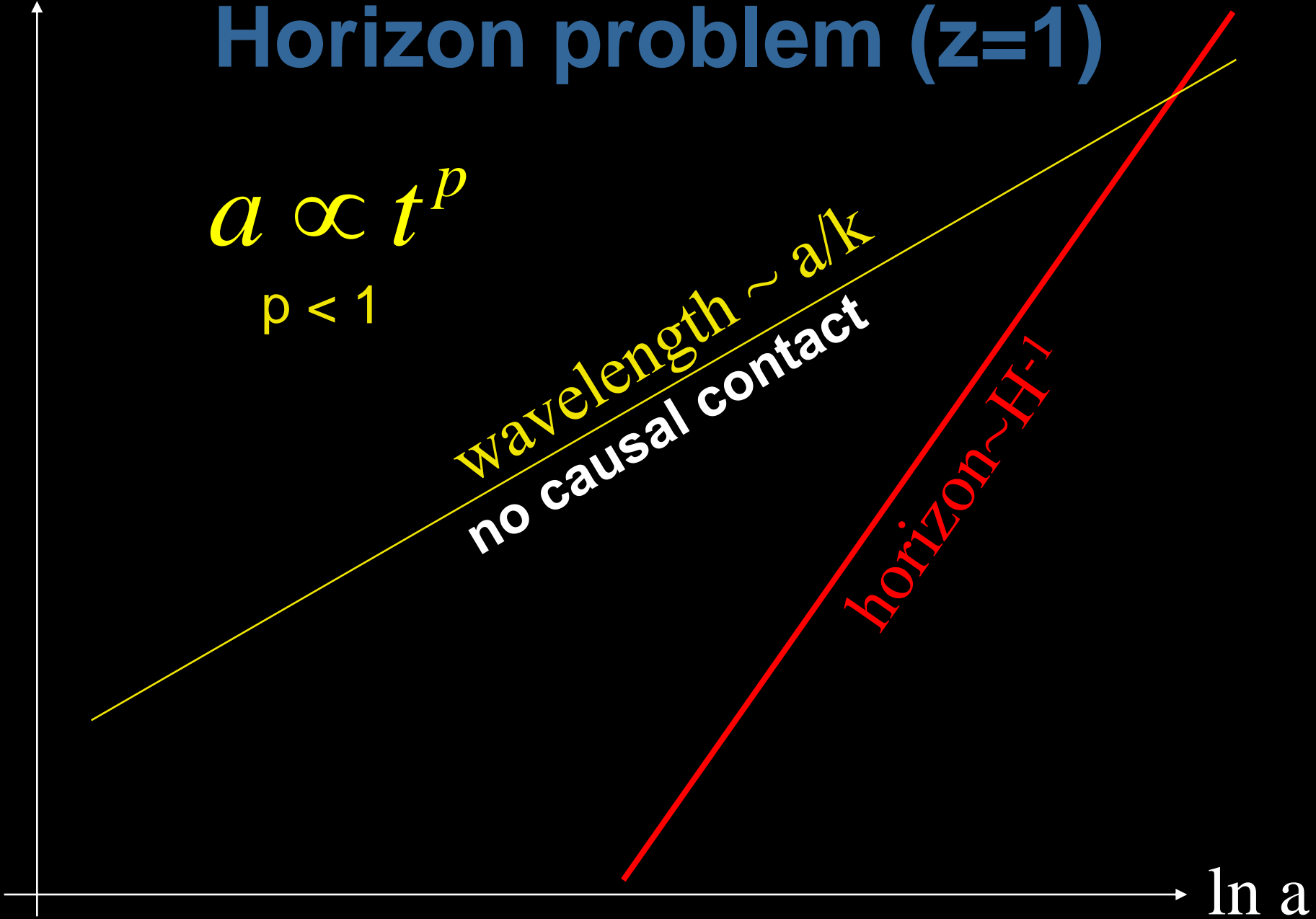
$$a \propto t^p$$

$$p < 1$$

wavelength  $\sim a/k$   
no causal contact

horizon  $\sim H^{-1}$

$\ln a$



# Inflation solves horizon problem

$\ln L$

wavelength  $\sim a/k$

horizon  $\sim H^{-1}$

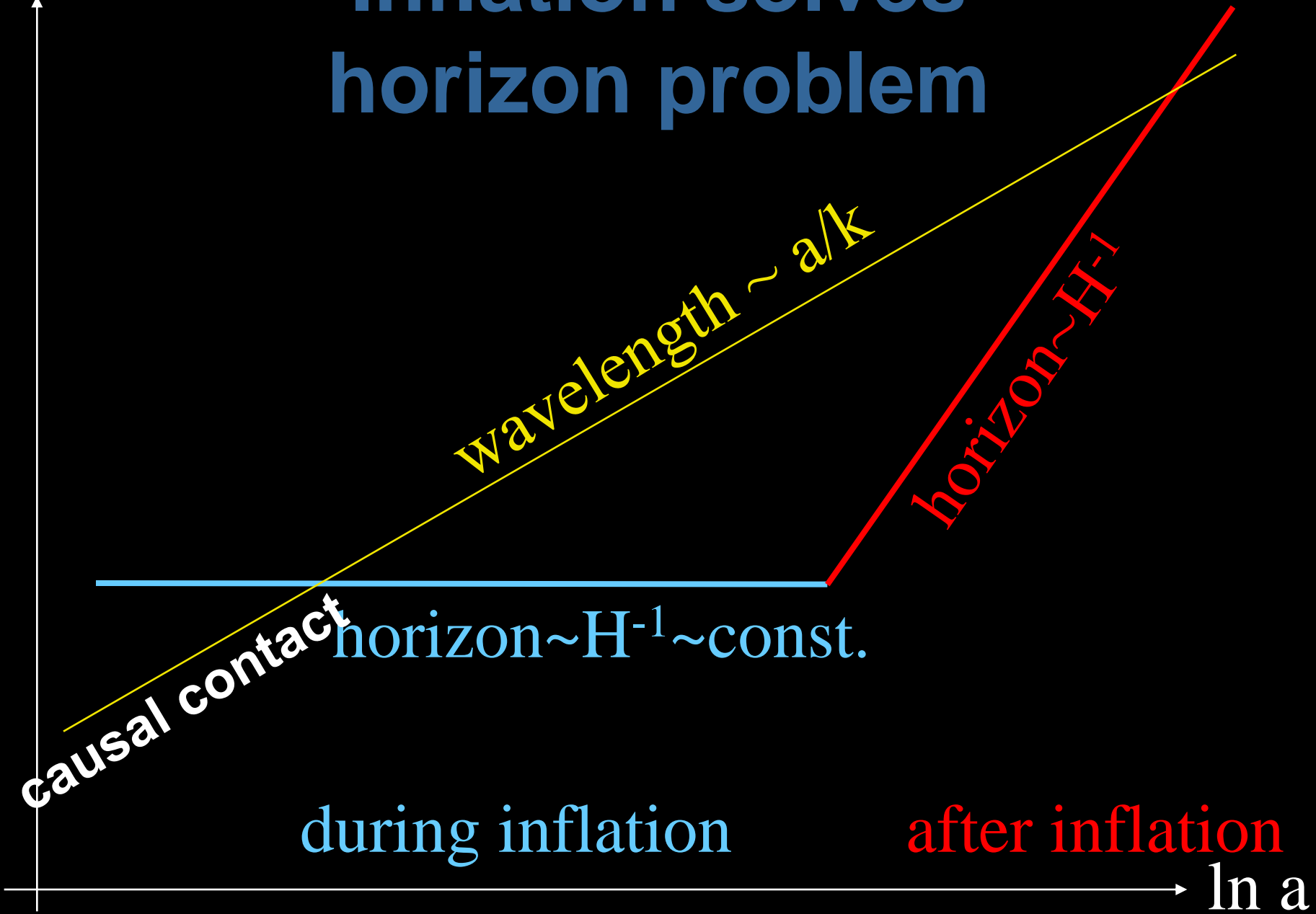
horizon  $\sim H^{-1} \sim \text{const.}$

causal contact

during inflation

after inflation

$\ln a$



# UV fixed point with $z=3$

- oscillation  $\rightarrow$  freeze-out iff  $d(H^2/\omega^2)/t > 0$   
 $\omega^2 = M^{-4}k^6/a^6$  leads to  $d^2(a^3)/dt^2 > 0$

OK for  $a \sim t^p$  with  $p > 1/3$

- Scaling law

$$t \rightarrow b^3 t \quad (E \rightarrow b^{-3}E)$$

$$x \rightarrow b x$$

$$\phi \rightarrow b^0 \phi$$



$$\delta\phi \propto E^0 \sim H^0$$

Scale-invariant fluctuations!

$\ln L$

# The $z=3$ scaling solves horizon problem

$$a \propto t^p$$

$$1/3 < p < 1$$

wavelength  $\sim a/k$

super-horizon & scale-invariant

sound horizon  $\sim H^{-1}$

Causal contact

sound horizon  $\sim (M^2 H)^{-1/3}$

$H \gg M$

$H \ll M$

$\ln a$

**GOING BACK TO  
HORAVA'S IDEA**

# Horava-Lifshitz gravity

Horava (2009)

- Basic quantities:  
lapse  $N(t)$ , shift  $N^i(t,x)$ , 3d spatial metric  $g_{ij}(t,x)$
- ADM metric (emergent in the IR)  
 $ds^2 = -N^2 dt^2 + g_{ij} (dx^i + N^i dt)(dx^j + N^j dt)$
- Foliation-preserving diffeomorphism  
 $t \rightarrow t'(t), \quad x^i \rightarrow x'^i(t, x^j)$
- Anisotropic scaling with  $z=3$  in UV  
 $t \rightarrow b^z t, \quad x^i \rightarrow b x^i$
- Ingredients in the action

$$K_{ij} = \frac{1}{2N} \left( \partial_t g_{ij} - D_i N_j - D_j N_i \right) \quad (C_{ijkl} = 0 \text{ in 3d})$$

# UV action with $z=3$

- Kinetic terms (**2<sup>nd</sup> time derivative**)

$$\int N dt \sqrt{g} d^3 x \left( K_{ij} K^{ij} - \lambda K^2 \right)$$

c.f.  $\lambda = 1$  for GR

- **$z=3$**  potential terms (**6<sup>th</sup> spatial derivative**)

$$\int N dt \sqrt{g} d^3 x \left[ \begin{array}{ccc} D_i R_{jk} D^i R^{jk} & D_i R D^i R & \\ R_i^j R_j^k R_k^i & R R_i^j R_j^i & R^3 \end{array} \right]$$

c.f.  $D_i R_{jk} D^j R^{ki}$  is written in terms of other terms

# Relevant deformations (with parity)

- z=2 potential terms (**4<sup>th</sup> spatial derivative**)

$$\int N dt \sqrt{g} d^3 x \left[ R_i^j R_j^i \quad R^2 \right]$$

- z=1 potential term (**2<sup>nd</sup> spatial derivative**)

$$\int N dt \sqrt{g} d^3 x \left[ R \right]$$

- z=0 potential term (**no derivative**)

$$\int N dt \sqrt{g} d^3 x \left[ 1 \right]$$



# IR action with $z=1$

- **UV:  $z=3$**  , power-counting renormalizability  
    ↓ RG flow
- **IR:  $z=1$**  , seems to recover GR iff  $\lambda \rightarrow 1$

$$\frac{1}{16\pi G_N} \int N dt \sqrt{g} d^3 x \left( \overbrace{K_{ij} K^{ij} - \lambda K^2}^{\text{kinetic term}} + \underbrace{R - 2\Lambda}_{\text{IR potential}} \right)$$

note:

Renormalizability has not been proved.  
RG flow has not yet been investigated.

# Projectability condition

- Infinitesimal tr.  $\delta t = f(t)$ ,  $\delta x^i = \zeta^i(t, x^j)$   
$$\delta g_{ij} = \partial_i \zeta^k g_{jk} + \partial_j \zeta^k g_{ik} + \zeta^k \partial_k g_{ij} + f \dot{g}_{ij}$$
  
$$\delta N_i = \partial_i \zeta^j N_j + \zeta^j \partial_j N_i + \dot{\zeta}^j g_{ij} + \dot{f} N_i + f \dot{N}_i$$
  
$$\delta N = \zeta^i \partial_i N + \dot{f} N + f \dot{N}$$
- Space-independent  $N$  cannot be transformed to space-dependent  $N$ .
- $N$  is gauge d.o.f. associated with the space-independent time reparametrization.
- It is natural to restrict  $N$  to be space-independent.
- Consequently, Hamiltonian constraint is an equation integrated over a whole space.

# Note

- Imposing local Hamiltonian constraint would result in theoretical inconsistencies and phenomenological obstacles.
- “Strong coupling in Horava gravity”  
by C.Charmousis, et.al., arXiv:0905.2579
- “A trouble with Horava-Lifshitz gravity”  
by M.Li and Y.Pang, arXiv:0905.2751
- “A dynamical inconsistency of Horava gravity”  
by M.Henneaux, et.al., arXiv:0912.0399
- Those problems disappear once we notice that there is no local Hamiltonian constraint.  
(c.f. section 5 of arXiv:0905.3563)

# Dark matter as integration constant in Horava-Lifshitz gravity

[arXiv:0905.3563](https://arxiv.org/abs/0905.3563) [hep-th]

See also [arXiv:0906.5069](https://arxiv.org/abs/0906.5069) [hep-th]

Caustic avoidance in Horava-Lifshitz gravity

# Structure of GR

- 4D diffeomorphism  $\rightarrow$   
4 constraints = 1 Hamiltonian + 3 momentum  
*@ each time @ each point*
- Constraints are preserved by dynamical equations.
- We can solve dynamical equations, provided that constraints are satisfied at initial time.

# FRW spacetime in GR

- $ds^2 = - dt^2 + a^2(t) (dx^2 + dy^2 + dz^2)$
- Approximates overall behavior of our patch of the universe inside the Hubble horizon.
- Hamiltonian constraint  $3 \frac{\dot{a}^2}{a^2} = 8\pi G_N \sum_{i=1}^n \rho_i$   
→ Friedmann eq
- E.o.m. of matter  $\dot{\rho}_i + 3 \frac{\dot{a}}{a} (\rho_i + P_i) = 0$   
→ conservation eq.
- **Dynamical eq**  $-2 \frac{\ddot{a}}{a} - \frac{\dot{a}^2}{a^2} = 8\pi G_N \sum_{i=1}^n P_i$   
**is not independent**  
but follows from the above  $n+1$  eqs.

# Structure of HL gravity

- Foliation-preserving diffeomorphism  
= 3D spatial diffeomorphism  
+ space-independent time reparametrization
- 3 local constraints + 1 global constraint  
= 3 momentum @ each time @ each point  
+ 1 Hamiltonian @ each time integrated
- Constraints are preserved by dynamical equations.
- We can solve dynamical equations, provided that constraints are satisfied at initial time.

# FRW spacetime in HL gravity

- Approximates overall behavior of our patch of the universe inside the Hubble horizon.

- **No “local” Hamiltonian constraint**

E.o.m. of matter

→ conservation eq.

$$\dot{\rho}_i + 3\frac{\dot{a}}{a}(\rho_i + P_i) = 0$$

- Dynamical eq  
can be integrated to give

$$-2\frac{\ddot{a}}{a} - \frac{\dot{a}^2}{a^2} = 8\pi G_N \sum_{i=1}^n P_i$$

**Friedmann eq with  
“dark matter as  
integration constant”**

$$3\frac{\dot{a}^2}{a^2} = 8\pi G_N \left( \sum_{i=1}^n \rho_i + \frac{C}{a^3} \right)$$



# IR limit of HL gravity

$$\frac{1}{16\pi G_N} \int N dt \sqrt{g} d^3 x \left( K_{ij} K^{ij} - \lambda K^2 + R - 2\Lambda \right)$$

- Looks like GR iff  $\lambda = 1$ . So, we assume that  $\lambda = 1$  is an IR fixed point of RG flow.

- **Global Hamiltonian constraint**

$$\int d^3 x \sqrt{g} (G_{\mu\nu}^{(4)} + \Lambda g_{\mu\nu}^{(4)} - 8\pi G_N T_{\mu\nu}) n^\mu n^\nu = 0$$

$$n_\mu dx^\mu = -N dt, \quad n^\mu \partial_\mu = \frac{1}{N} (\partial_t - N^i \partial_i)$$

- **Momentum constraint & dynamical eq**

$$(G_{i\mu}^{(4)} + \Lambda g_{i\mu}^{(4)} - 8\pi G_N T_{i\mu}) n^\mu = 0$$

$$G_{ij}^{(4)} + \Lambda g_{ij}^{(4)} - 8\pi G_N T_{ij} = 0$$

# Dark matter as integration constant

- Def.  $T_{\mu\nu}^{HL}$   $G_{\mu\nu}^{(4)} + \Lambda g_{\mu\nu}^{(4)} = 8\pi G_N (T_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}^{HL})$
- General solution to the momentum constraint and dynamical eq.

$$T_{\mu\nu}^{HL} = \rho^{HL} n_\mu n_\nu \quad n^\mu \nabla_\mu n_\nu = 0$$

- Global Hamiltonian constraint

$$\int d^3x \sqrt{g} \rho^{HL} = 0$$

$\rho^{HL}$  can be positive everywhere in our patch of the universe inside the horizon.

- Bianchi identity  $\rightarrow$  (non-)conservation eq

$$\partial_\perp \rho^{HL} + K \rho^{HL} = n^\nu \nabla^\mu T_{\mu\nu}$$

# Dark matter as integration constant

- Def.  $T_{\mu\nu}^{HL}$   $G_{\mu\nu}^{(4)} + \Lambda g_{\mu\nu}^{(4)} = 8\pi G_N (T_{\mu\nu} + T_{\mu\nu}^{HL})$
- General solution to the momentum constraint and dynamical eq.

**GR is NOT recovered**

- Global Hamiltonian constraint

**but GR+CDM is!**

$\rho^{HL}$  can be positive everywhere in our patch of the universe inside the horizon.

- Bianchi identity  $\rightarrow$  (non-)conservation eq

$$\partial_{\perp} \rho^{HL} + K \rho^{HL} = n^{\nu} \nabla^{\mu} T_{\mu\nu}$$

# Micro to Macro

- Overall behavior of smooth  $T^{\text{HL}}_{\mu\nu} = \rho^{\text{HL}} n_\mu n_\nu$  is like **pressureless dust**.
- **Microscopic lumps of  $\rho^{\text{HL}}$  can collide and bounce.** (cf. early universe bounce [Calcagni 2009, Brandenberger 2009]) If asymptotically free, would-be caustics does not gravitate too much.
- Group of microscopic lumps with collisions and bounces  $\rightarrow$  When coarse-grained, can it mimic a cluster of particles with velocity dispersion?
- **Dispersion relation of matter fields defined in the rest frame of “dark matter”**  
 $\rightarrow$  Any astrophysical implications?

# Summary of Horava-Lifshitz cosmology

- Horava-Lifshitz gravity is power-counting renormalizable and expected to be renormalizable and unitary. New candidate for quantum gravity!
- The  $z=3$  scaling **solves horizon problem** and leads to **scale-invariant cosmological perturbations** for  $a \sim t^p$  with  $p > 1/3$ .
- The lack of local Hamiltonian constraint may explain **“dark matter” without dark matter**. GR is NOT recovered: constraint algebra is smaller than GR since **the time slicing and the “dark matter” rest frame are synchronized in the theory level**.

# まとめ

- 宇宙論は、最大スケールの物理
- 標準宇宙論の成功
  - 膨張宇宙（ハッブルの法則）
  - 宇宙背景輻射
  - ビッグバン元素合成
- 標準宇宙論の問題
  - 地平線問題
  - 平坦性問題
  - 位相欠陥
  - 宇宙の構造の起源

- インフレーション理論
  - スカラー場のポテンシャル
  - 指数関数的な加速膨張
  - 前述の問題を一挙に解決
- 宇宙の三大謎
  - インフレーションの起源
  - 宇宙項問題 & ダークエネルギー
  - ダークマター
- 余剰次元と宇宙
  - 弦理論は余剰次元の存在を予言
  - コンパクト化 & ブレインワールド
  - 宇宙の観測で余剰次元が“見える”か？

- 弦理論的宇宙論
  - 2003年のブレークスルー(KKLT)
  - 弦理論で宇宙の三大謎に挑戦！
  - ブレーンの動きがインフレーションの起源？
  - 宇宙論～弦理論～数学の繋がり
  - (インフレーション～Dブレーン～CY多様体)
- 最近の研究から: Horava-Lifshitz宇宙論
  - 全く新しい量子重力理論
  - 地平線問題を解決
  - ダークマターは不必要かも



# 最後に

- 新しい物理理論 → 新しい宇宙像
- 宇宙の90%以上は未知！  
観測の先行するexcitingな時代
- 宇宙の謎 → 新しい物理への鍵
- あらゆる手段を使って謎へ挑戦！