

# 超弦理論で解き明かす宇宙誕生の謎

静岡大学理学部物理学科  
土屋麻人

サイエンスカフェ in 静岡 2012年5月24日



はじめに

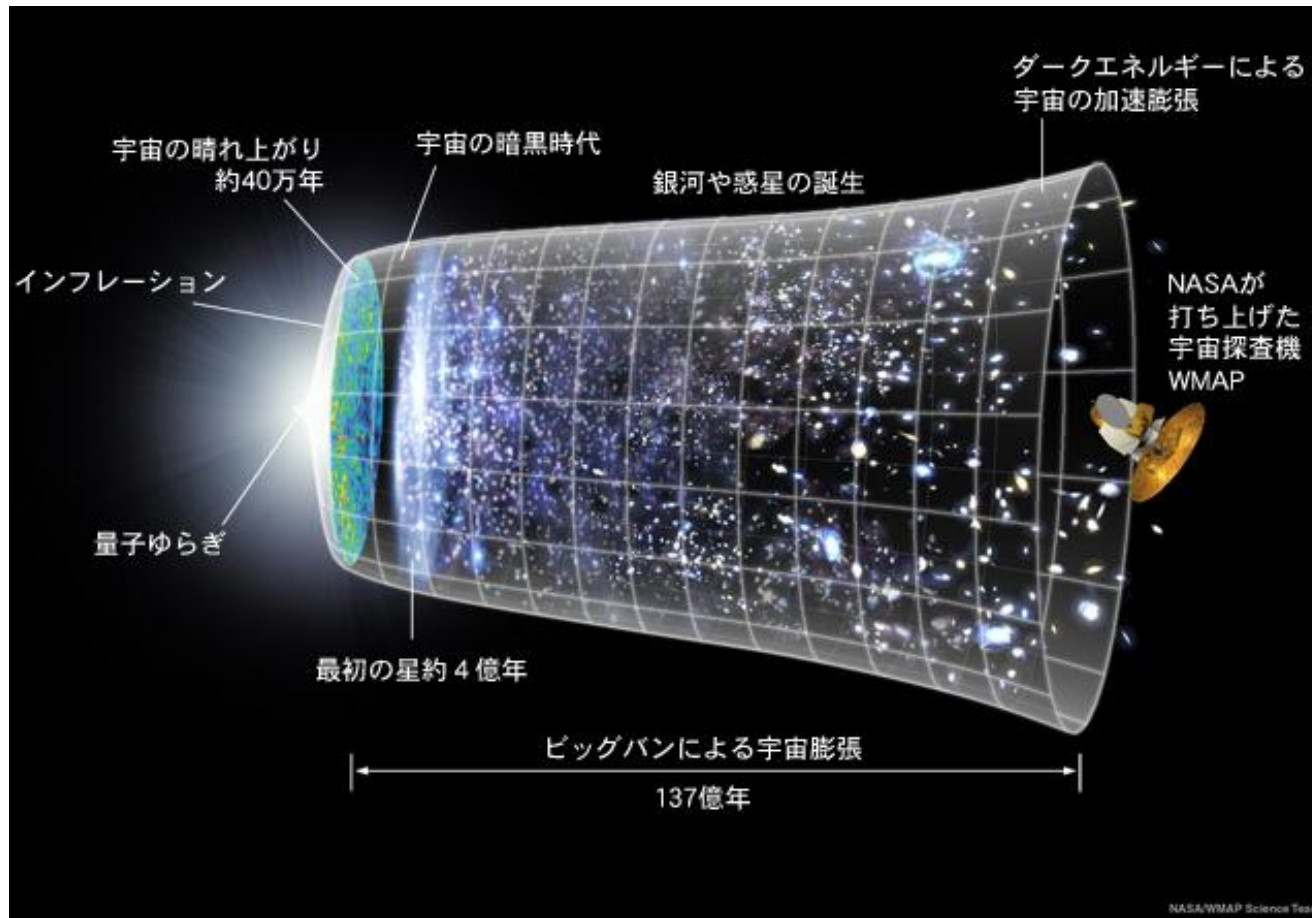
# 素朴な疑問

- 宇宙は永遠不変か？  
始まりがあって終わりがあるのか？
- 始まりがあるとしたら、どのように始まったのか？
- 私たちはなぜ3次元の空間に住んでいるのか？  
私たちは空間の中を前後、左右、上下に動けるが．．．  
例えば、上下がなかったら ➡ 2次元の空間  
他に動ける方向があつたら ➡ 4次元以上の空間

# 超弦理論

- このような疑問に物理学の観点から答えようと、  
超弦理論 (超ひも理論) の研究をしています
- 超弦理論  
素粒子物理学の最先端理論  
ものの最小単位を「弦(ひも)」とする理論  
量子重力を含む究極の統一理論と期待されている
- 宇宙(大きい)を研究するのに、なぜ素粒子(小さい)  
なのか  
宇宙は熱い小さな火の玉から始まったから  
—— ビッグバン

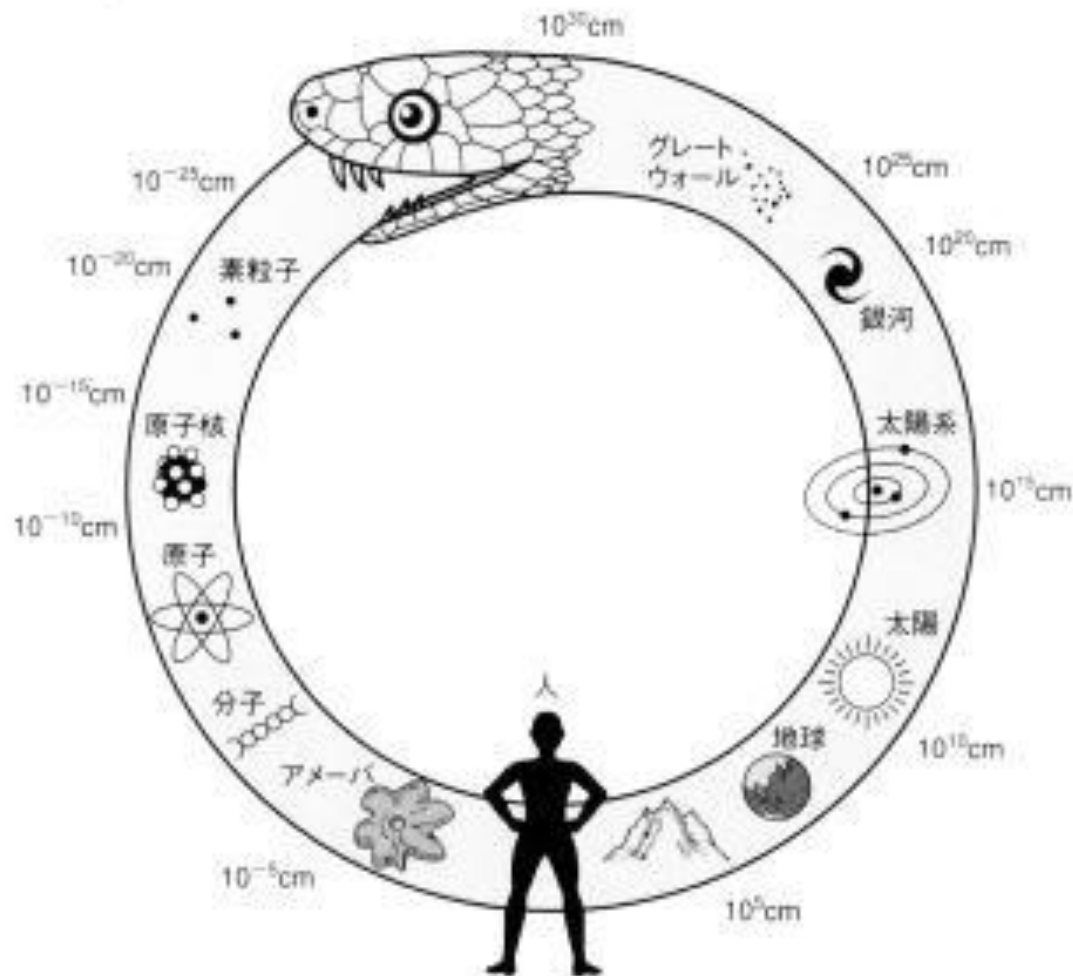
# ビッグバン宇宙論



最近の宇宙観測により明らかにされた宇宙の歴史（イメージ図）

画像提供：NASA / WMAP Science Team

# 宇宙と素粒子



東京大学総合研究博物館ニュースより

## ウロボロスの蛇

グラシウによる

観測できる宇宙  $10^{29} \text{ cm}$

弦  $10^{-32} \text{ cm}$

大きな・小さな数の表し方

百万  $1000000 = 10^6$

百万分の一  $\frac{1}{1000000} = 10^{-6}$

# 今日のお話

1. はじめに
2. 素粒子入門
3. 現代の宇宙像
4. 超弦理論： 量子重力を含む統一理論
5. 行列を用いた超弦理論の新しい定式化
6. 最新の研究成果

Kim-Nishimura-Tsuchiya

Physical Review Letters **108**, 011601 (2012)

7. まとめと展望



# 素粒子入門



# 物質の階層構造

コップ1杯(160ml)の水  
=水分子  $\text{H}_2\text{O}$   $6 \times 10^{24}$ 個

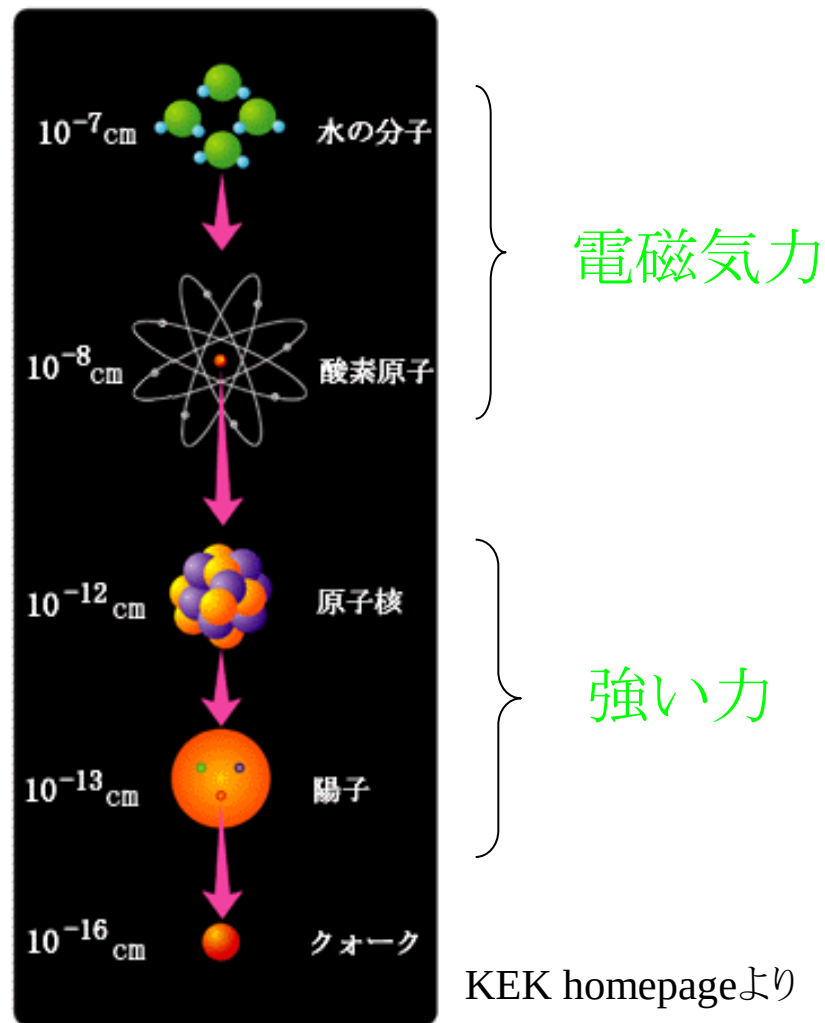
水分子=水素原子2個+酸素原子1個

酸素原子=原子核+電子8個

酸素の原子核=陽子8個+中性子8個

陽子=uクォーク2個+dクォーク1個

電子、クォーク 現在“素”



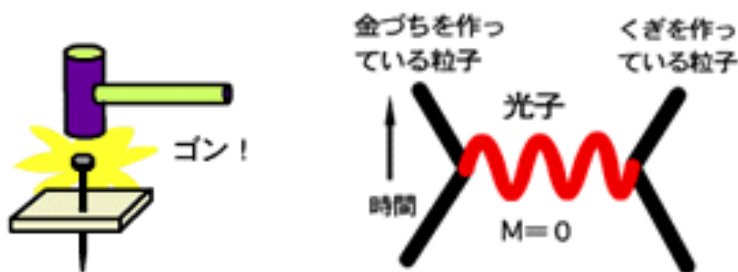
# 4つの力

- 強い力      原子核やクォークを結びつける力
- 電磁気力      電気と磁気
- 弱い力      ベータ崩壊などを起こさせる力
- 重力      ニュートンの万有引力  
→ アインシュタインの一般相対性理論  
重力の古典論  
量子論ではない

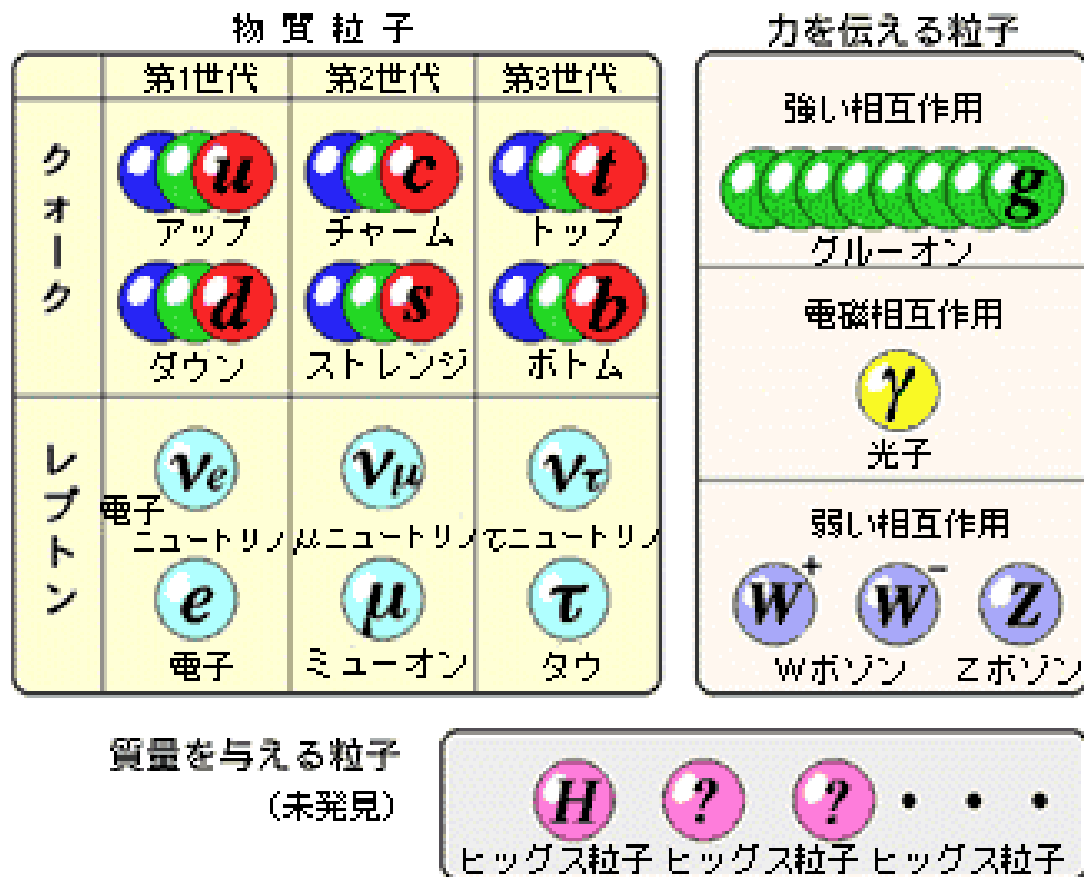
# 力を伝える粒子

- 力は粒子を交換することによって伝わる。

電磁気力 — 光子の交換



# 現在の素粒子



小林・益川理論  
クォークが6種類(以上)  
あることを予言

現在LHCで探索中

図1 現在の素粒子像「標準模型」の世界

# 素粒子理論の基礎

## □ 特殊相対性理論 (アインシュタイン)

高速(光の伝播速度と同じくらい)の世界を記述

光の伝播速度  $c$ =毎秒30万km

エネルギーと質量の等価性  $E=mc^2$

## □ 量子論

ミクロの世界を記述する

粒子と波動の2重性  $\lambda = \frac{h}{p}$   $h$ : プランク定数

高エネルギー  $\longleftrightarrow$  近距離

例) 電磁波と光子、電子も粒子であり波でもある

不確定性原理  $\Delta x \Delta p \geq \hbar \longleftrightarrow \hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar$

# 場の量子論

- 素粒子の理論は特殊相対性理論と量子論の両方の要請をみたさなければならない。 ミクロ、高エネルギー(高速)、粒子の崩壊

- 場の量子論

特殊相対性理論の要請を満たした量子論の形式

素粒子——— 大きさのない点

- 強い力                      量子色力学

電磁気力                  量子電気力学

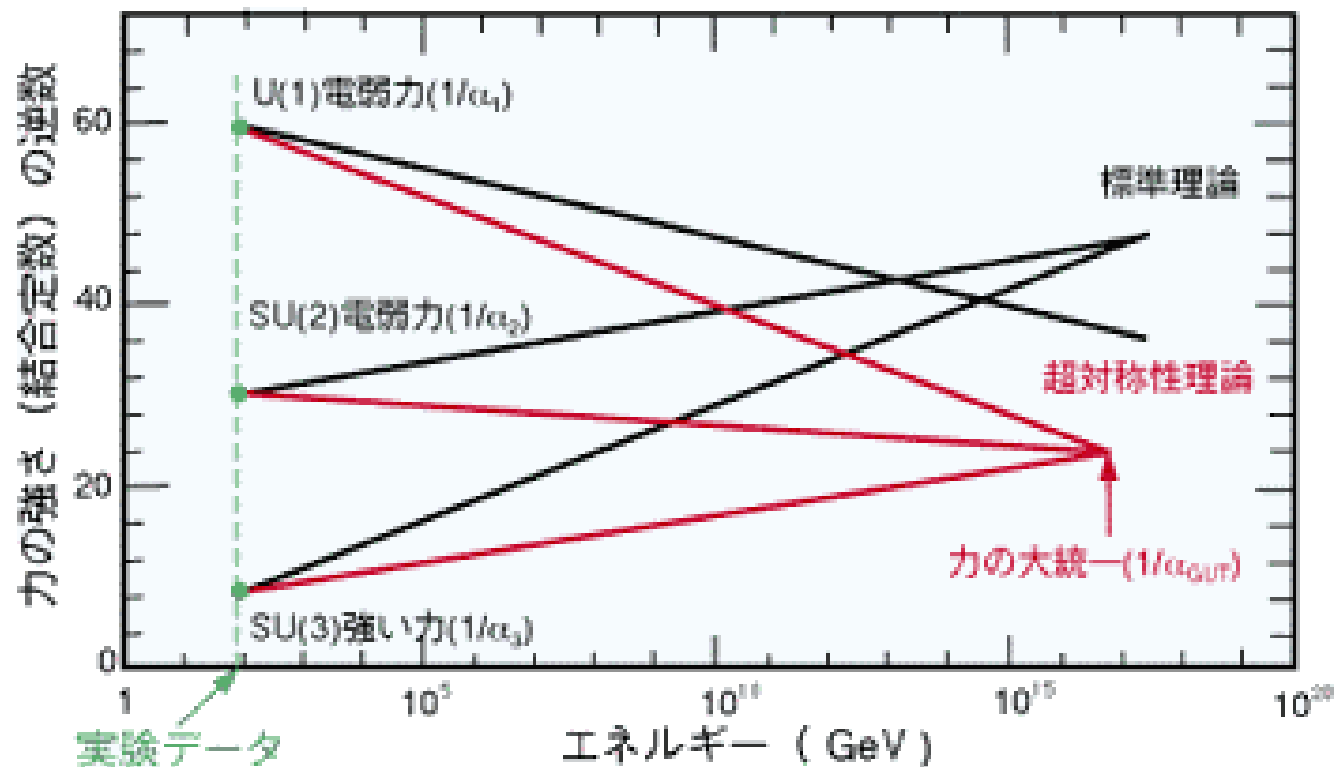
弱い力



電弱統一理論

(ワインバーグ・サラム理論)

# 力の統一



KEK homepageより

大統一のスケール

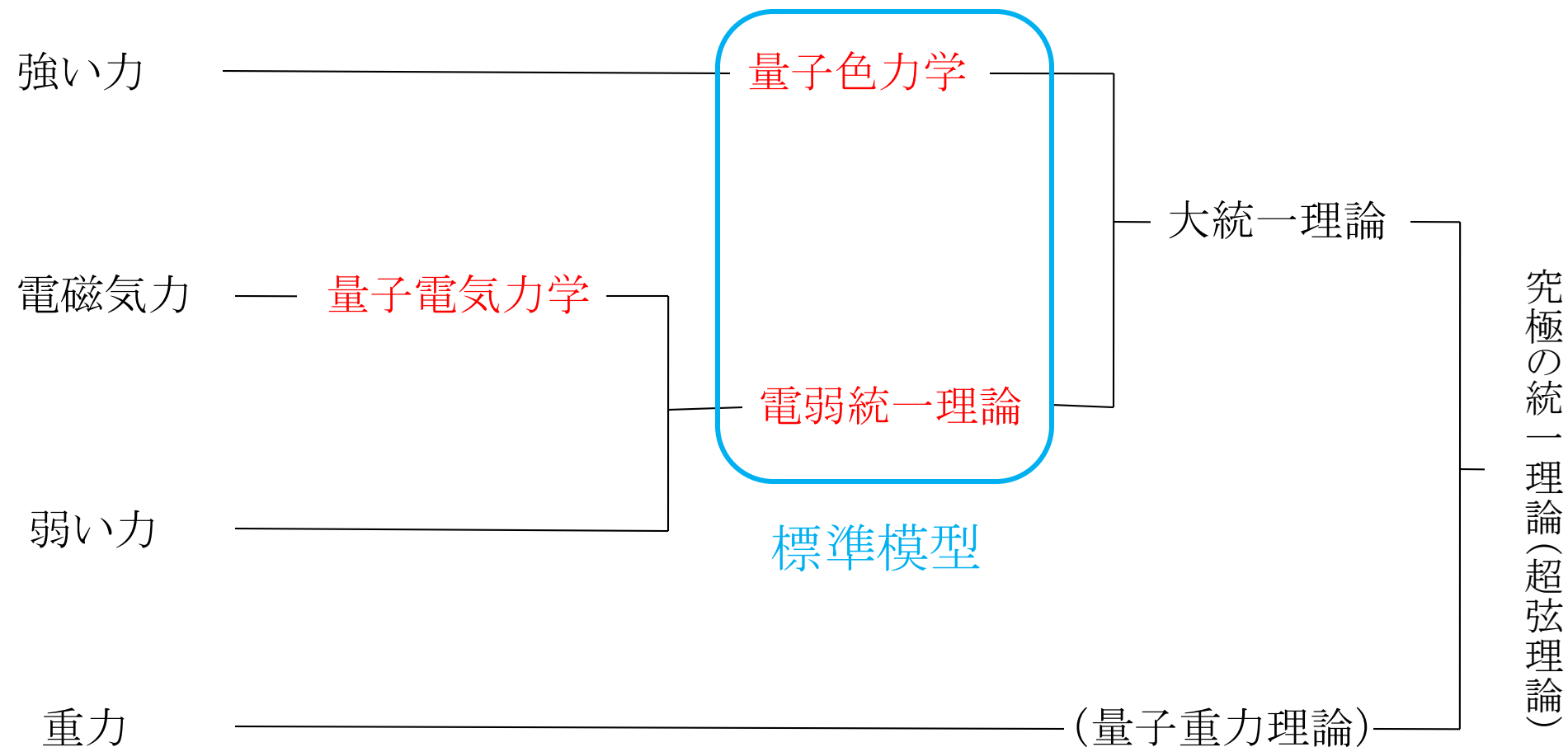
$10^{-30\sim 31}\text{cm}$

現在実験で到達している  
スケール  $10^{-16}\text{cm}$

重力の量子効果が  
重要になるスケール

$10^{-33}\text{cm}$  (後述)

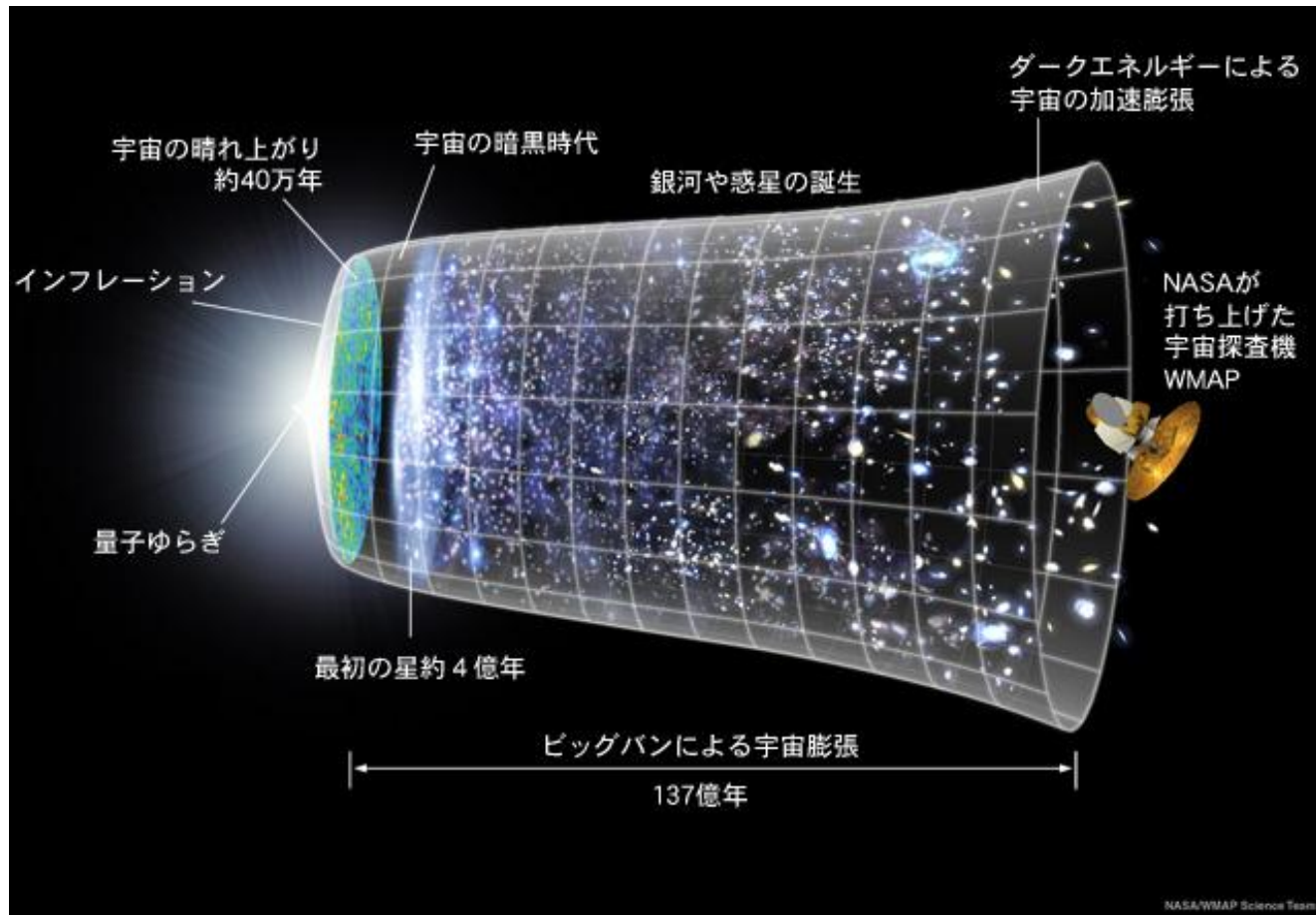
# 現在の素粒子理論と統一への道





# 現代の宇宙像

# 現代の宇宙像： ビッグバン理論



137億年前  
小さな火の玉  
から始まる

最近の宇宙観測により明らかにされた宇宙の歴史（イメージ図）

画像提供： NASA / WMAP Science Team

# 標準ビッグバン宇宙モデルの証拠

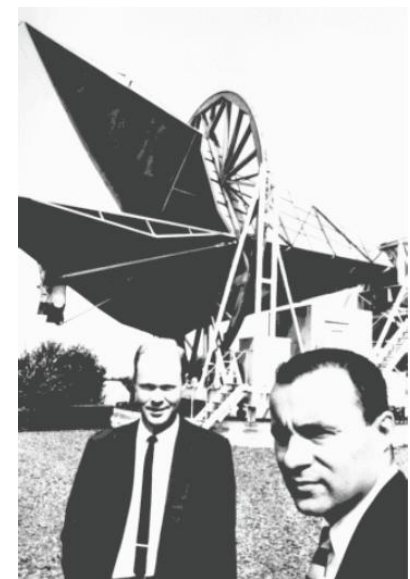
- 宇宙膨張の発見 (Hubble 1929)
- 宇宙初期における元素合成 (Alpher-Bethe-Gamov 1948)
- 宇宙背景輻射の発見 (Penzias-Wilson 1965)



Hubble



Gamov

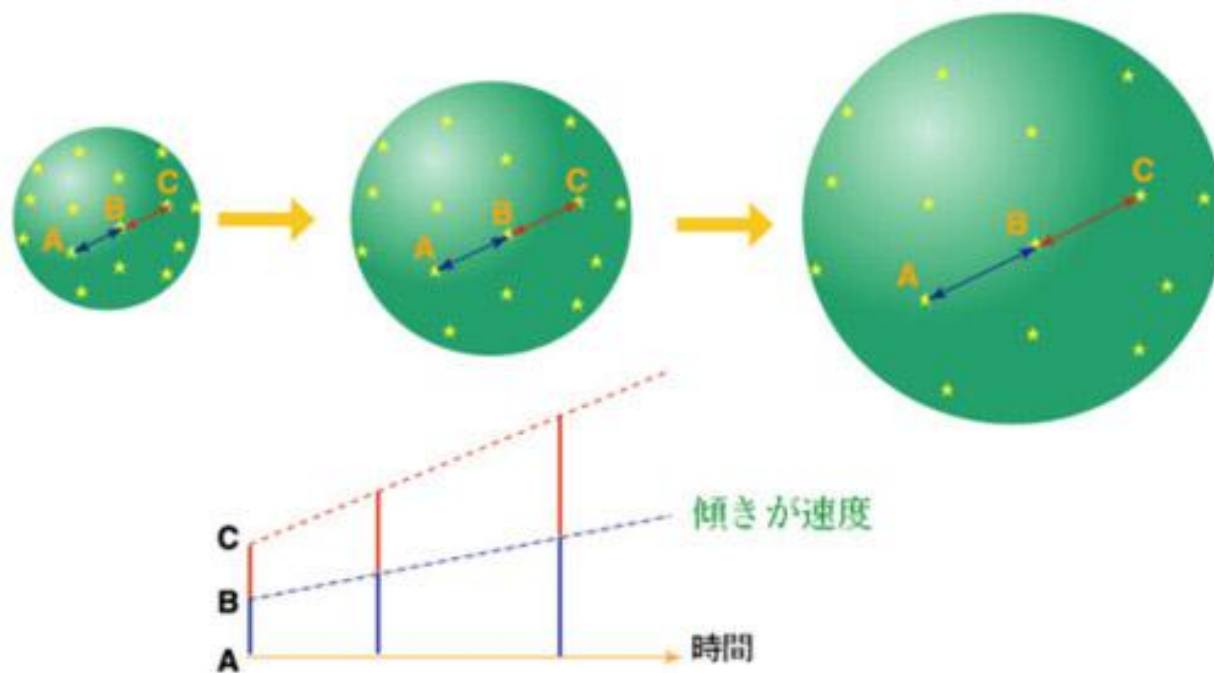


Penzias, Wilson

# 宇宙膨張

# Hubbleの発見

## 2次元宇宙の例



銀河の後退速度は銀河までの  
距離に比例する

# 宇宙は熱かった

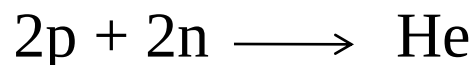
宇宙膨張 → 過去は高温高密度



〔 原子や原子核は素粒子に分解される  
力も統一される

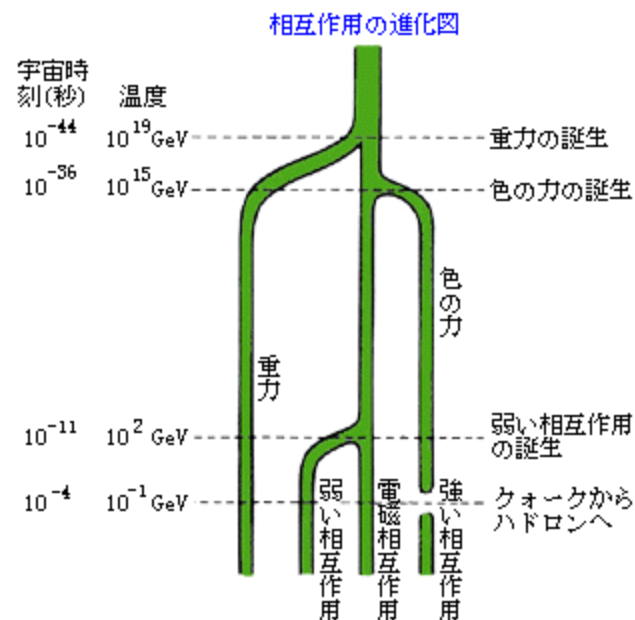
→ 素粒子と宇宙の出会い

宇宙初期における元素合成



元素の存在比の説明

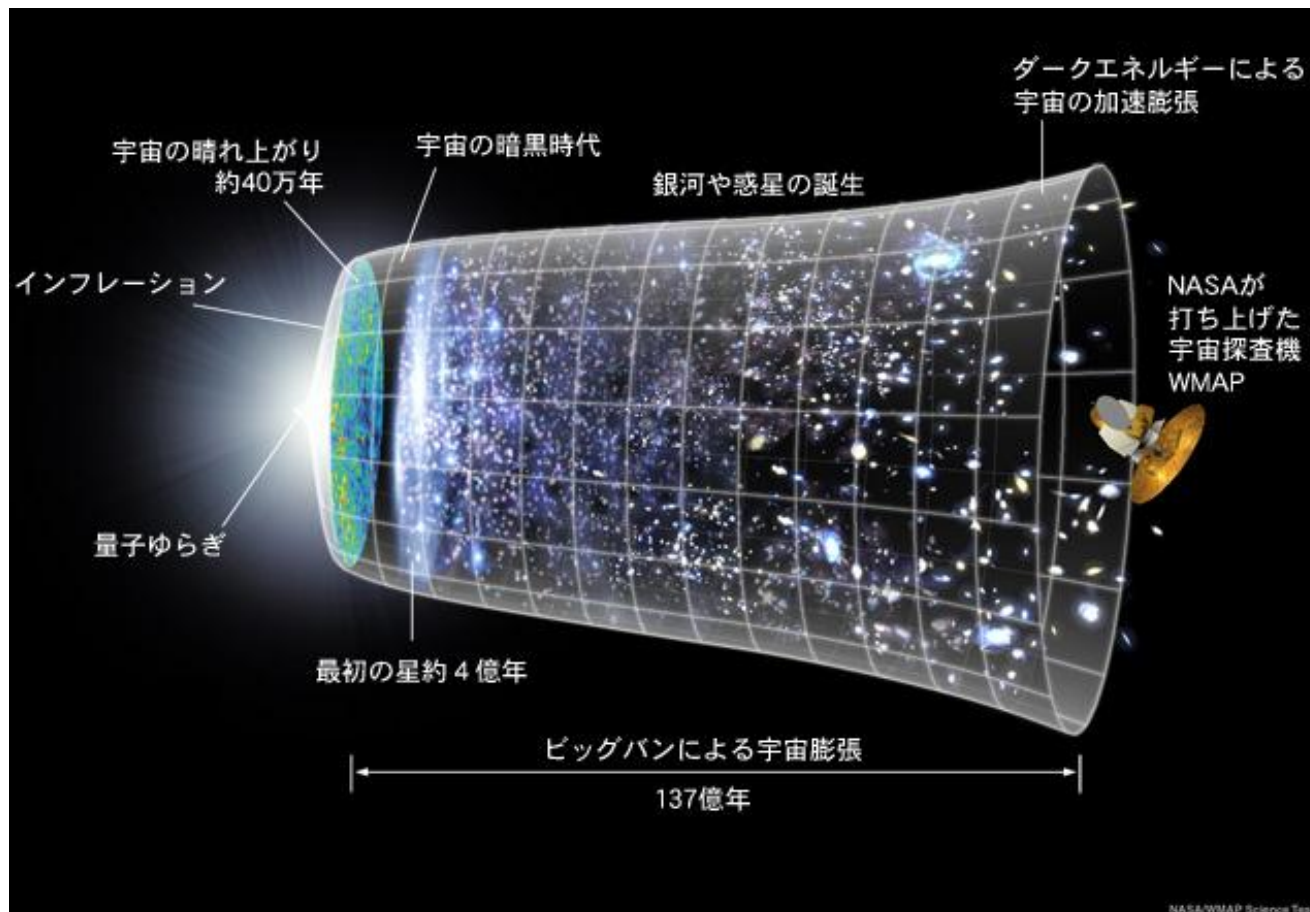
水素73%    ヘリウム24%    その他3%



KEKホームページより

# 宇宙背景輻射

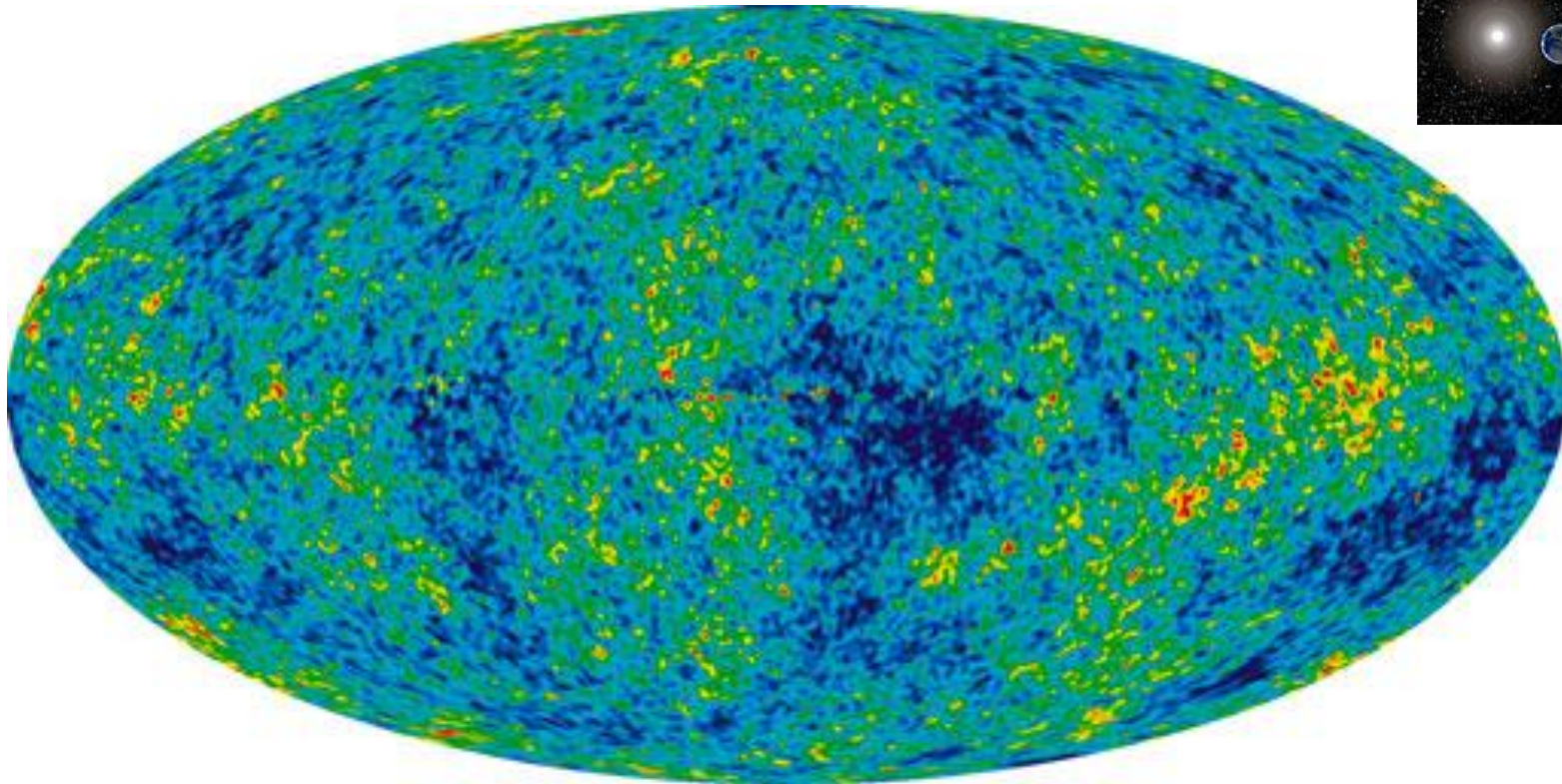
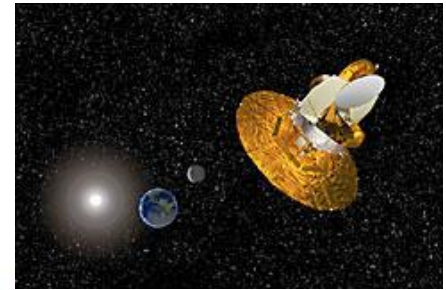
ビッグバンの残り火  
誕生から約40万年後の宇宙を見ている





# 宇宙背景輻射（WMAPの観測結果）

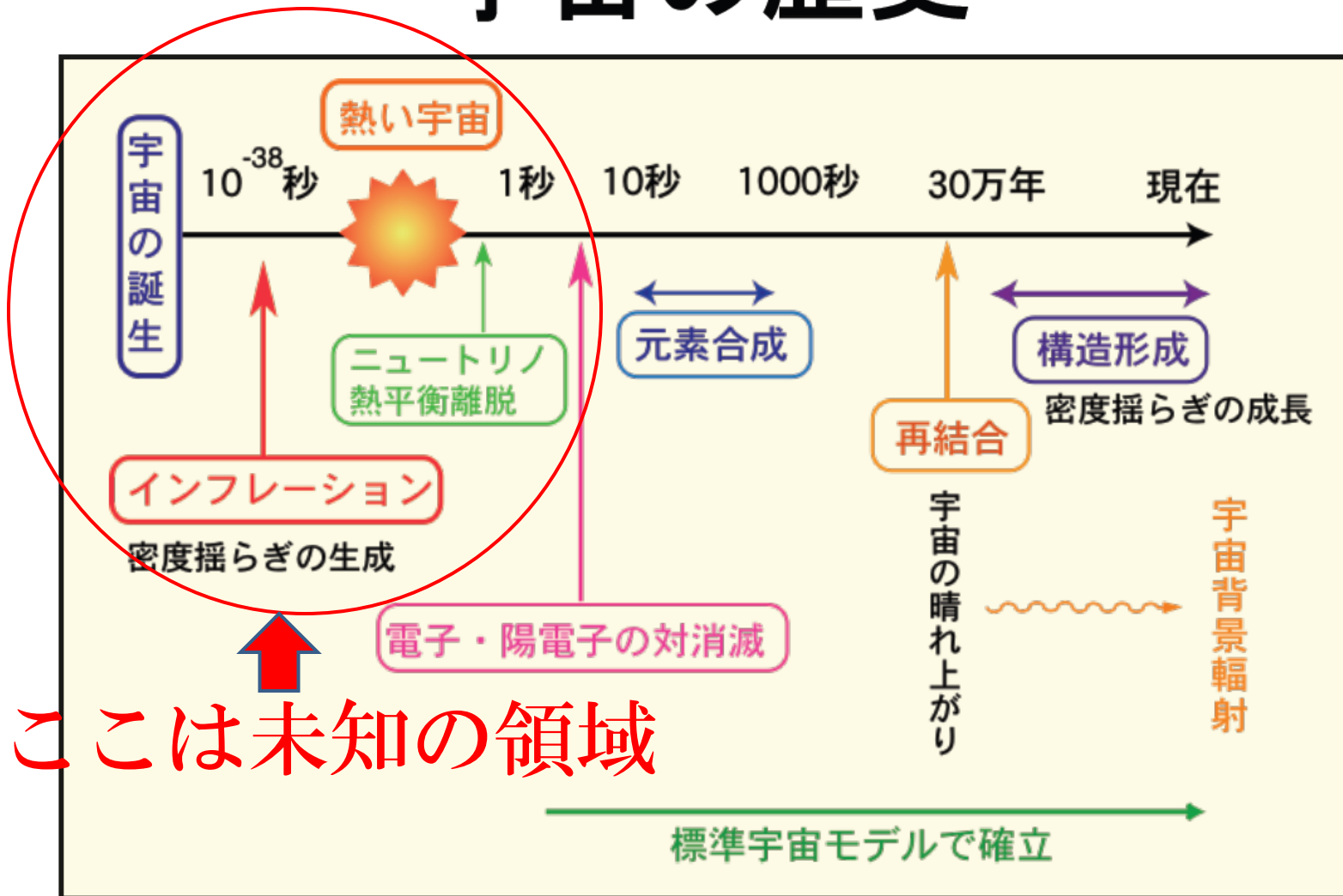
温度ゆらぎの全天マップ



温度のずれ0.00003K程度

NASA WMAPのホームページより

# 宇宙の歴史

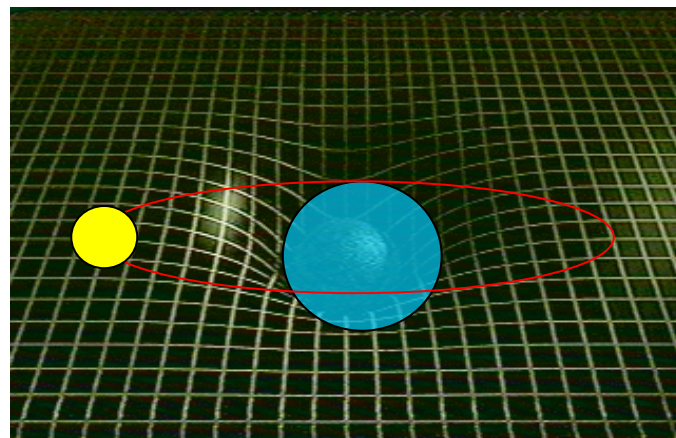
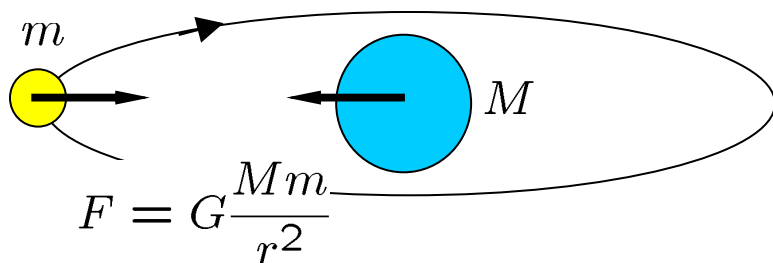




# 一般相対性理論

## 重力の古典論

重力を時空のゆがみとして記述



## アインシュタイン方程式

$$\underbrace{R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R}_{\text{時空のゆがみ}} = \underbrace{\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}}_{\text{物質 (エネルギー)}}$$

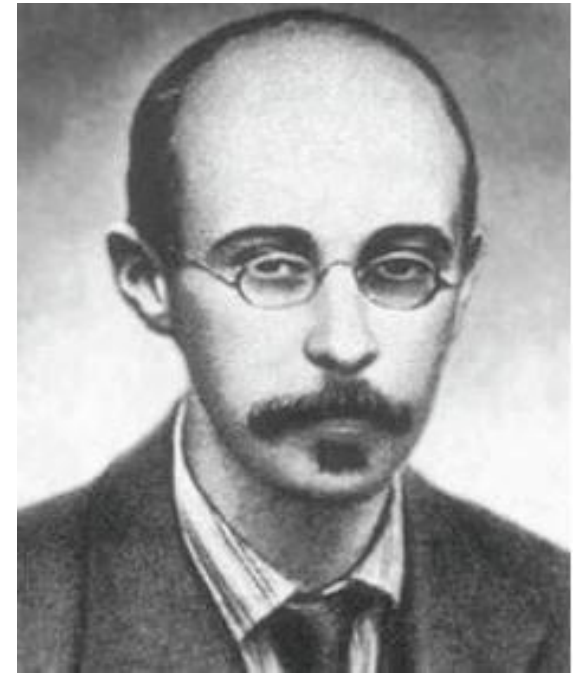
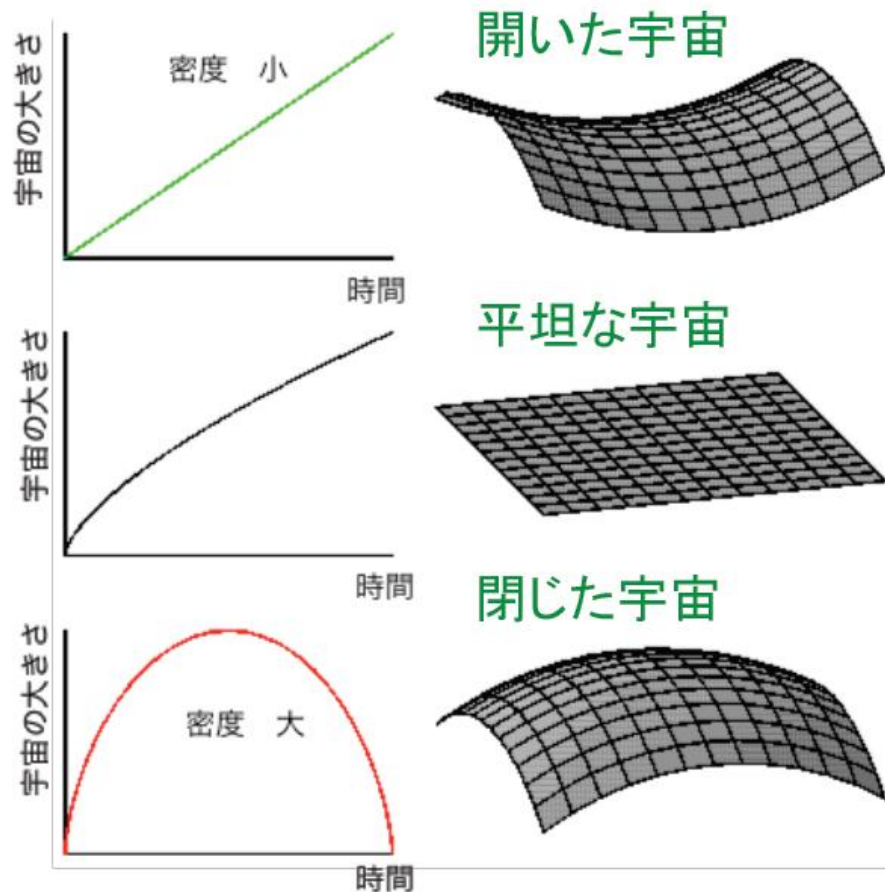
時空はもはや入れ物  
ではない

時空のゆがみ

物質 (エネルギー)

# アインシュタイン方程式の解としての膨張宇宙

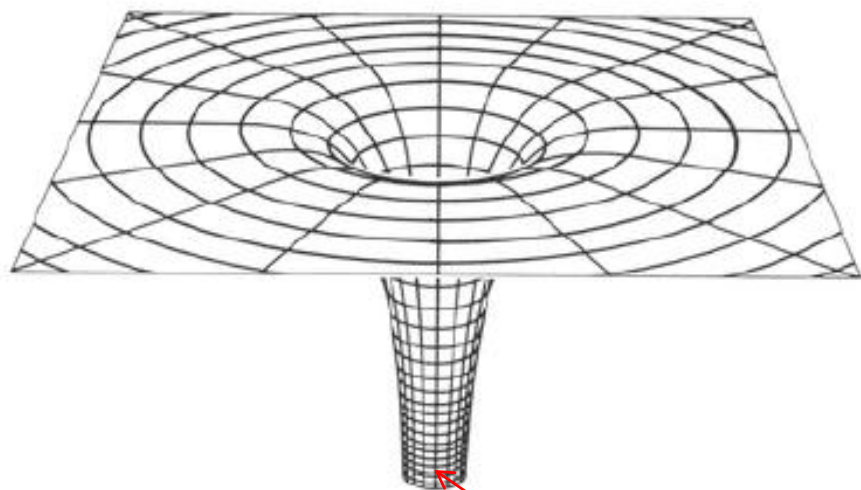
## Friedmann解 一様等方性を仮定



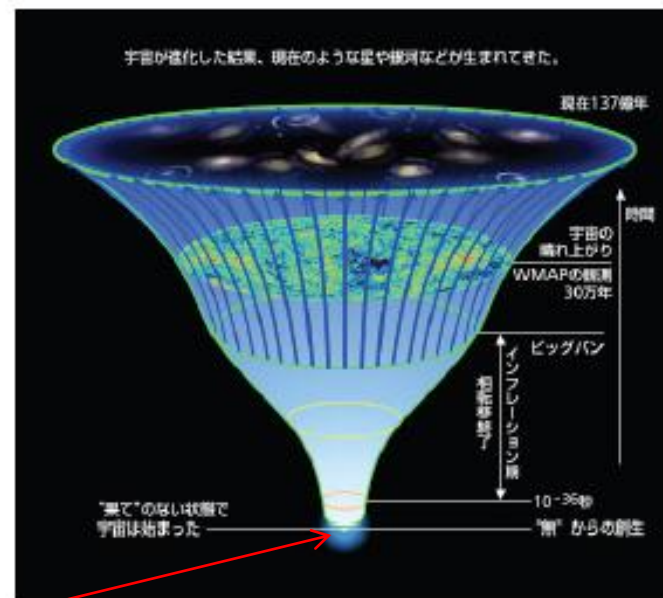
Friedmann

# 特異点（時空のゆがみが発散）

## ブラックホール



## ビッグバン



**特異点（曲率半径がゼロ）**

一般相対性理論が破綻

（重力の量子効果が無視できなくなるため）

# 重力の量子効果が重要になるスケール

## 3つの基本物理定数

|     |              |         |
|-----|--------------|---------|
| $h$ | (プランク定数)     | 量子力学    |
| $c$ | (光速)         | 相対性理論   |
| $G$ | (ニュートンの重力定数) | 万有引力の法則 |

長さ、時間、質量の単位を組み合わせて書けている。

**プランク長さ**  $L_{\text{pl}} = \left( \frac{\hbar G}{c^3} \right)^{1/2} \sim 10^{-33} \text{cm}$

時空の曲率半径がプランク長さくらいになってきたら、重力の古典論（一般相対性理論）は使えない。



重力の量子論(超弦理論)

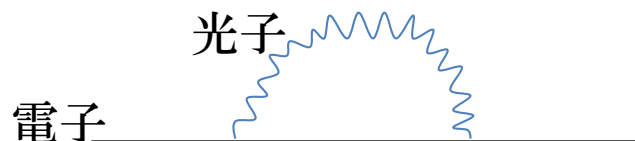
# 超弦理論：量子重力を含む統一理論

# 何故「弦」なのか？

重力以外の3つの力（電磁気力、強い力、弱い力）の場合

場の量子論

素粒子を大きさのない“点”として記述

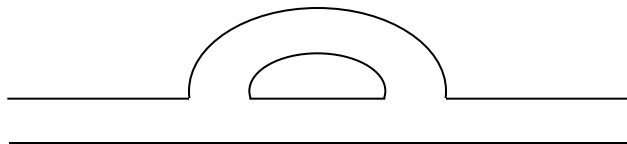


計算過程で生じる発散の問題

繰り込み理論（朝永振一郎ら）で処理

重力の場合

発散の度合いがひどく、「繰り込み」で処理しきれない



点ではなく拡がりをもった弦（ひも）  
を考えれば、有限になる



超弦理論

# 超弦理論

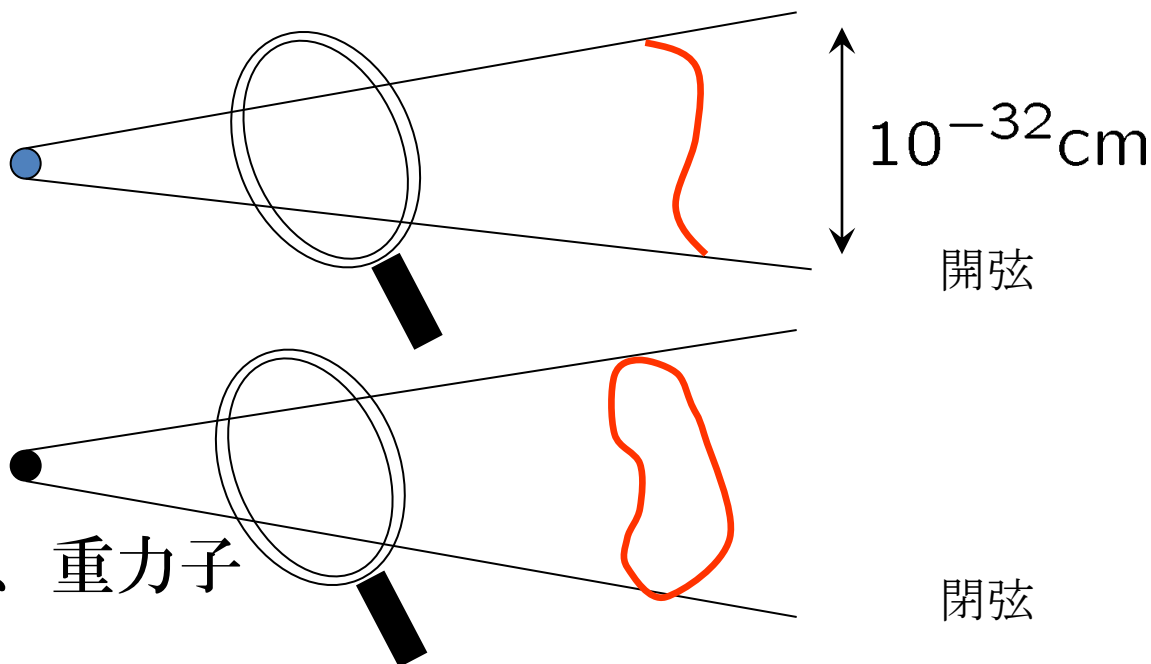
1974 Sherk-Schwarz, Yoneya

1984 Green-Schwarz

弦の振動の仕方で様々な粒子を表す

光子  
グルオン  
 $W^\pm$ ,  $Z$   
クォーク  
など

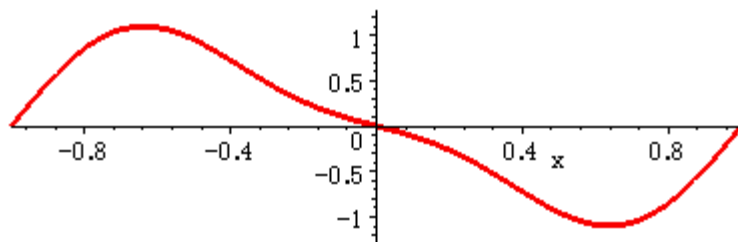
特に、重力子



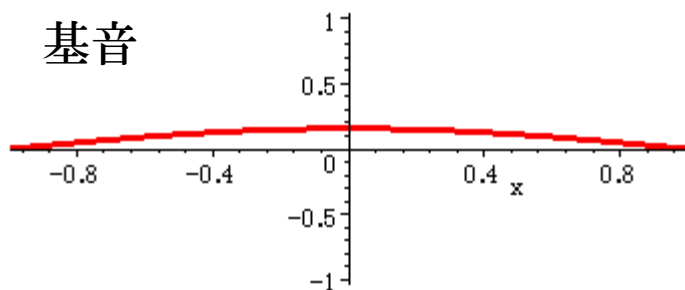
重力を含めて、4つの力を統一的に記述

究極の統一理論

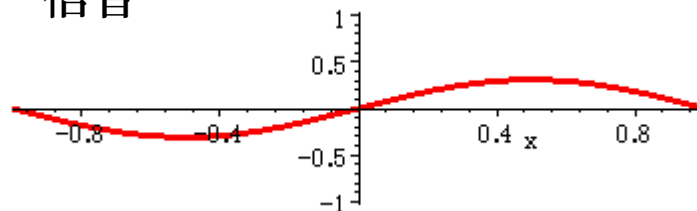
# 弦の振動の例



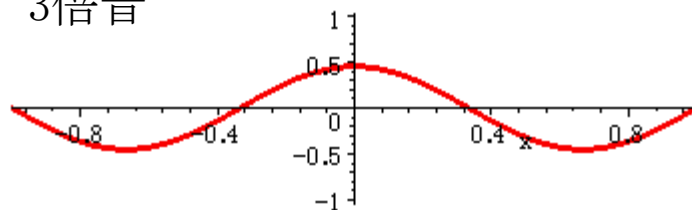
基音



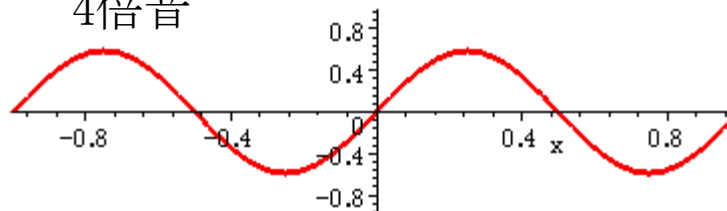
倍音



3倍音



4倍音



異なる  
粒子



# 従来の超弦理論の研究方法

1985～

弦の相互作用が弱い場合にのみ適用可能

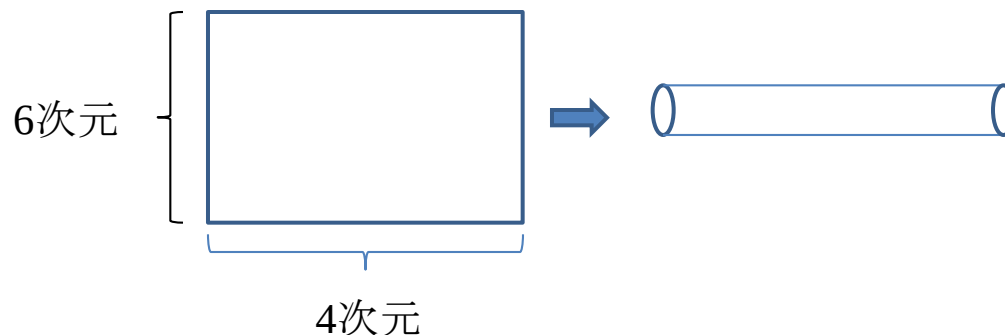
**10次元時空** : 現実世界（4次元）と矛盾

時間1 + 空間9

前後、左右、上下以外に6方向

時間1 + 空間3

⇒ 6次元分、手で丸める (**コンパクト化**)



様々な丸め方



違う物理を予言

4次元でなくてもよい

「我々の宇宙は、実現しうる無数の宇宙の一つにすぎない」  
(**ランドスケープ**) という考え方も出現

# 行列を用いた超弦理論の新しい定式化

# 行列

2行2列の行列

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 3 & 2 \\ 2 & 4 \end{pmatrix}$$

$$AB = \begin{pmatrix} 1 \times 3 + 2 \times 2 & 1 \times 2 + 2 \times 4 \\ 2 \times 3 + 1 \times 2 & 2 \times 2 + 1 \times 4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 7 & 10 \\ 8 & 8 \end{pmatrix}$$

$$BA = \begin{pmatrix} 7 & 8 \\ 10 & 8 \end{pmatrix}$$

行列の積は一般には非可換  $AB \neq BA$  cf.)  $\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar$

3行3列の行列

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 2 & 2 & 3 \\ 5 & 3 & 4 \end{pmatrix}$$

N行N列の行列  
も考えられる

# IIB行列模型（IKKT模型）

石橋、川合、北澤、土屋（1996年）

弦の相互作用が強い場合にも通用する新しい方法

$N$ 行 $N$ 列の行列の各成分が基本的自由度

行列のサイズ $N$ を大きくする極限をとる

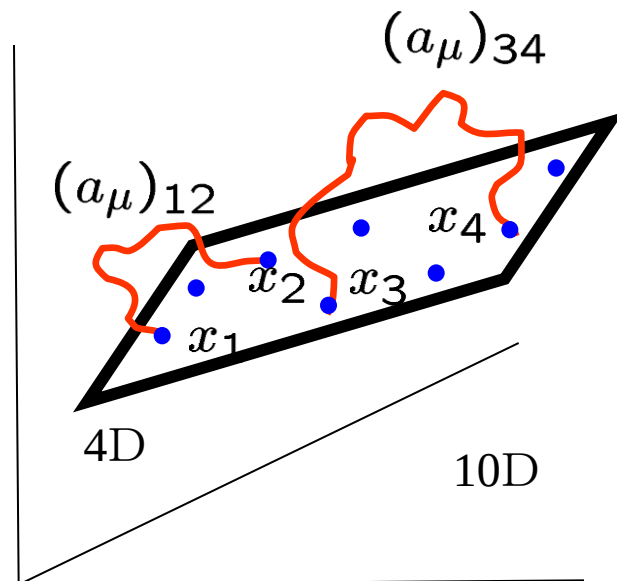
この極限で弦の描像が現れる

# IIB行列模型における時空像

10個のN行N列行列  $A_\mu$  ( $\mu = 1, 2, \dots, 10$ )

$N = 8$  の例

$$A_\mu = \begin{pmatrix} (x_1)_\mu & (a_\mu)_{12} & (a_\mu)_{13} & (a_\mu)_{14} & (a_\mu)_{15} & (a_\mu)_{16} & (a_\mu)_{17} & (a_\mu)_{18} \\ (a_\mu)_{21} & (x_2)_\mu & (a_\mu)_{23} & (a_\mu)_{24} & (a_\mu)_{25} & (a_\mu)_{26} & (a_\mu)_{27} & (a_\mu)_{28} \\ (a_\mu)_{31} & (a_\mu)_{32} & (x_3)_\mu & (a_\mu)_{34} & (a_\mu)_{35} & (a_\mu)_{36} & (a_\mu)_{37} & (a_\mu)_{38} \\ (a_\mu)_{41} & (a_\mu)_{42} & (a_\mu)_{43} & (x_4)_\mu & (a_\mu)_{45} & (a_\mu)_{46} & (a_\mu)_{47} & (a_\mu)_{48} \\ (a_\mu)_{51} & (a_\mu)_{52} & (a_\mu)_{53} & (a_\mu)_{54} & (x_5)_\mu & (a_\mu)_{56} & (a_\mu)_{57} & (a_\mu)_{58} \\ (a_\mu)_{61} & (a_\mu)_{62} & (a_\mu)_{63} & (a_\mu)_{64} & (a_\mu)_{65} & (x_6)_\mu & (a_\mu)_{67} & (a_\mu)_{68} \\ (a_\mu)_{71} & (a_\mu)_{72} & (a_\mu)_{73} & (a_\mu)_{74} & (a_\mu)_{75} & (a_\mu)_{76} & (x_7)_\mu & (a_\mu)_{78} \\ (a_\mu)_{81} & (a_\mu)_{82} & (a_\mu)_{83} & (a_\mu)_{84} & (a_\mu)_{85} & (a_\mu)_{86} & (a_\mu)_{87} & (x_8)_\mu \end{pmatrix}$$



我々の住む4次元の時空が現れるか？

これまでの研究: 虚時間の理論  $t = i\tau$

(時間と空間を対等に扱うための操作)

場の量子論では良いが、重力理論では本当に良いか不明。  
結果を見る限り、我々の住む時空は出てこない。

# 最新の研究成果

Kim-Nishimura-Tsuchiya

Physical Review Letters **108**, 011601 (2012)

# IIB行列模型における時間の扱い方に着目

今回の研究：実時間の理論

時間  $A_0$

空間

$A_i \quad (i = 1, 2, \dots, 9)$

行列

宇宙論への応用が初めて可能に！

9個の行列  $A_i \quad (i = 1, 2, \dots, 9)$  を回転する対称性

( $A_0$  を含めると $(9+1)$ 次元のローレンツ対称性)

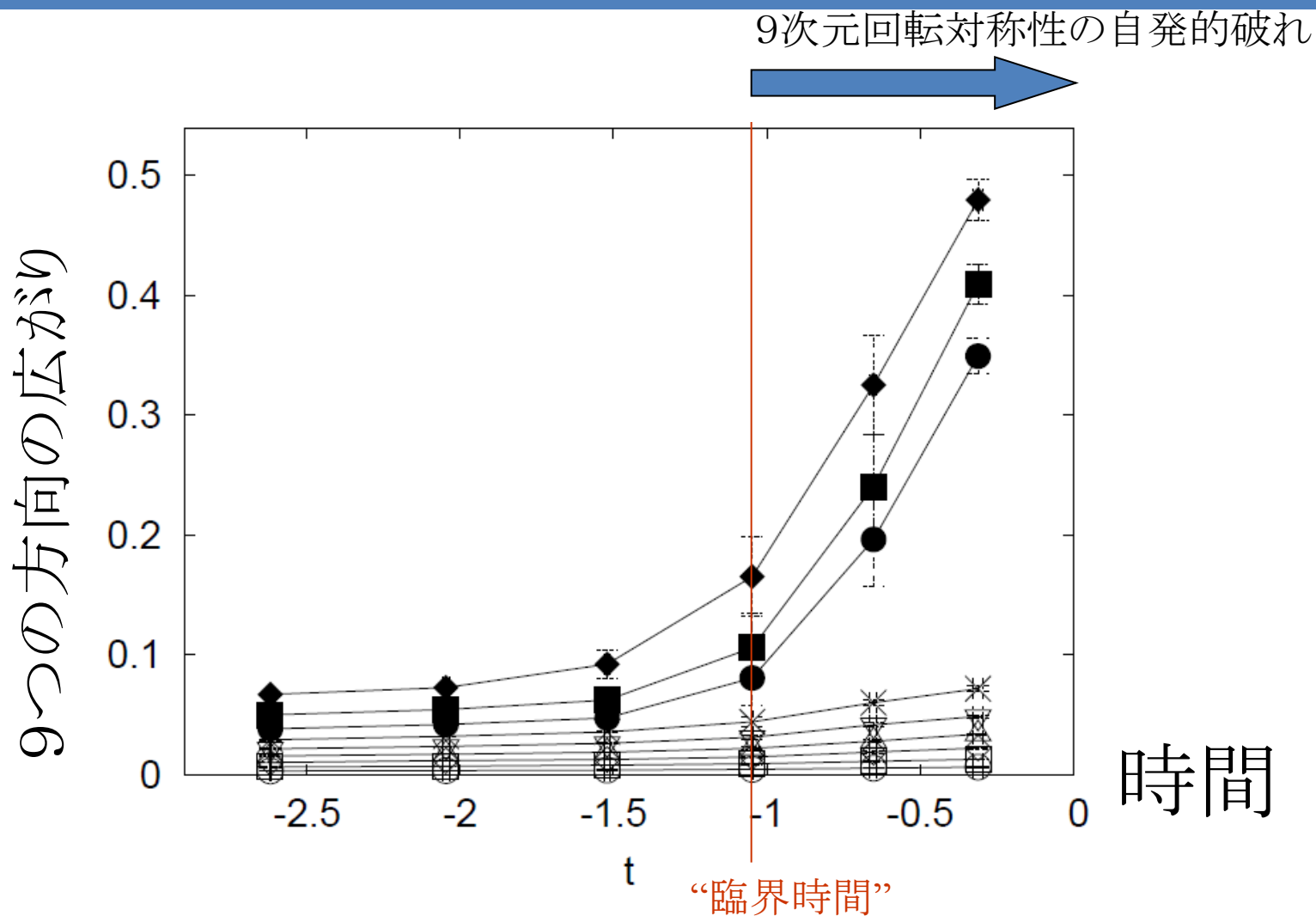
これまでの研究：虚時間の理論

$$t = i\tau$$

$$A_0 = iA_{10}$$

10個の行列  $A_\mu \quad (\mu = 1, 2, \dots, 10)$  を回転する対称性

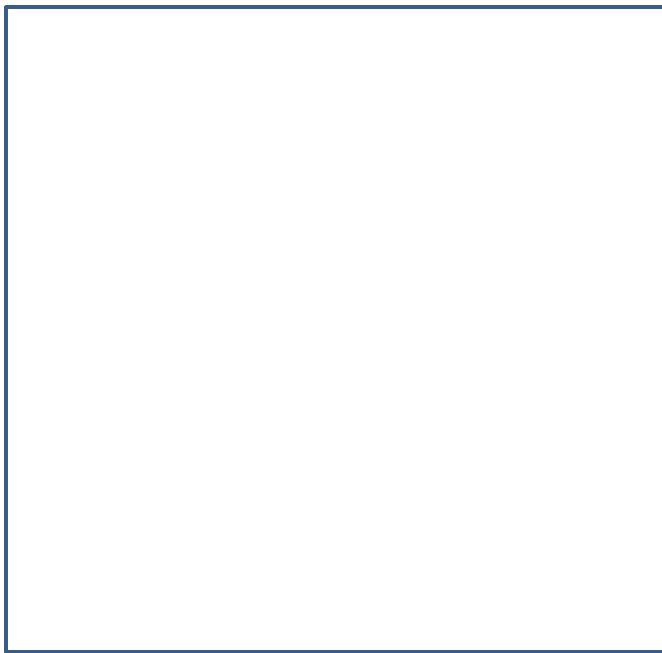
# 3次元膨張宇宙の出現





# 回転対称性の自発的破れの例

正方形の4つの頂点を結ぶ道を、  
全長が最短になるように引きなさい。

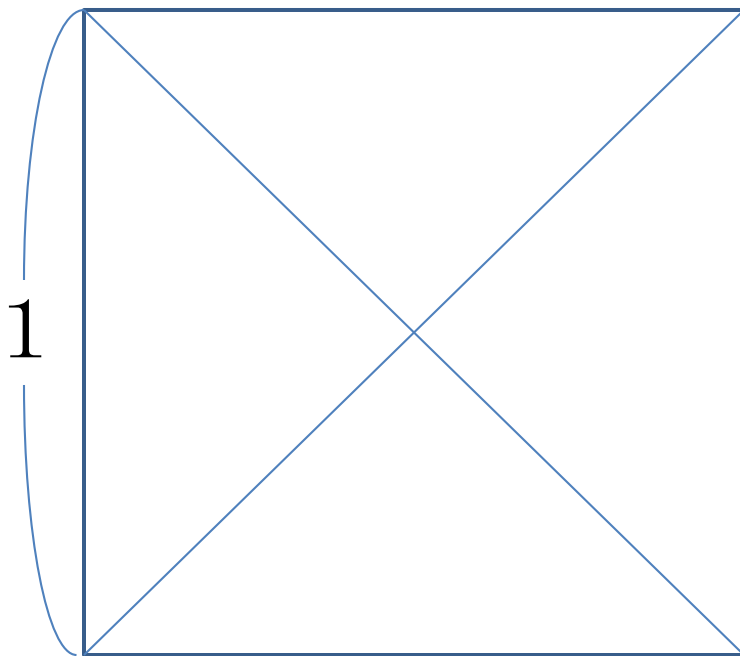


90度回転しても不変。

この問題は、回転対称性を  
持っている。

# 回転対称性の自発的破れの例

正方形の4つの頂点を結ぶ道を、  
全長が最短になるように引きなさい。



90度回転しても不変。

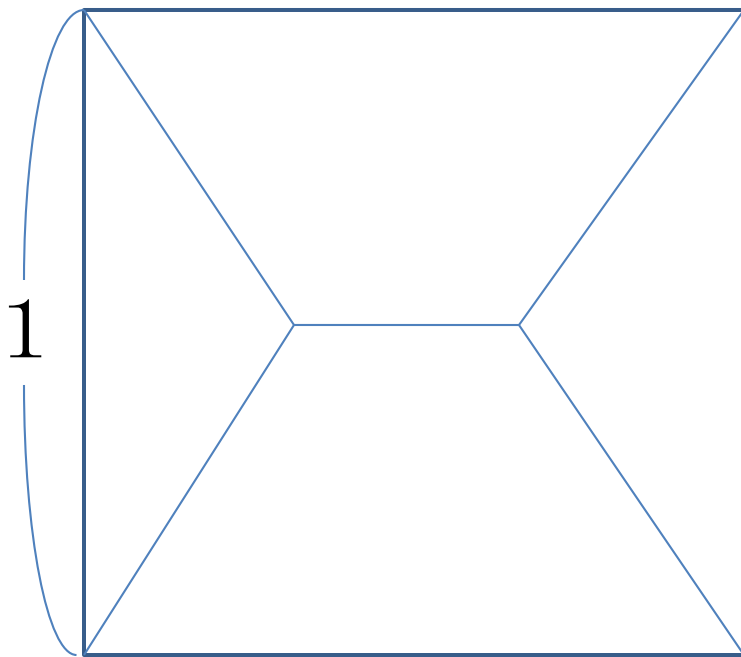
回転不変性を保っている。

$$\begin{aligned}\ell &= 2\sqrt{2} \\ &\sim 2.828\end{aligned}$$

不正解！

# 回転対称性の自発的破れの例

正方形の4つの頂点を結ぶ道を、  
全長が最短になるように引きなさい。



90度回転すると  
別の図形になる。

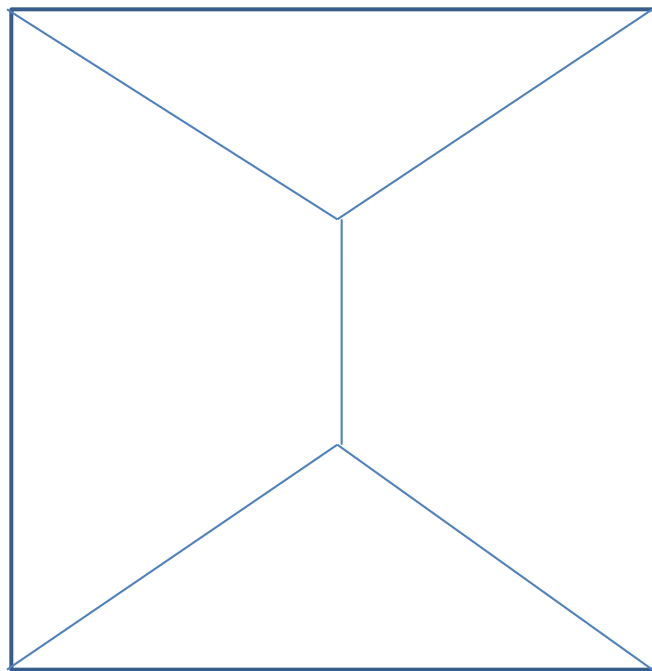
回転不変性を保っていない。

$$\begin{aligned} \ell &= 1 + \sqrt{3} \\ &\sim 2.732 \end{aligned}$$

正解！

# 回転対称性の自発的破れの例

正方形の4つの頂点を結ぶ道を、  
全長が最短になるように引きなさい。



さっきの解を  
90度回転したもの。

これも正解！

c.f.) 南部陽一郎 質量の起源の解明で2008年ノーベル物理学賞受賞  
量子色力学におけるカイラル対称性の自発的破れ

# 初期宇宙における回転対称性の自発的破れの機構

時間と空間が行列で現わされている。

時間  $A_0$

空間  $A_i \quad (i = 1, 2, \dots, 9)$

積が非可換

c.f.) 量子力学における座標と運動量のようなもの  
「ハイゼンベルグの不確定性関係」

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar \quad \longleftrightarrow \quad \hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar$$

➡ 時空自体が不確定性を持っている。

そのような効果が、3次元方向だけを膨張させる性質を持つことが明らかになった。

# まとめと展望

# まとめ

## 超弦理論：究極の素粒子理論

- 重力の量子論  
(一般相対性理論を、素粒子のスケールまで拡張)
- 素粒子の統一理論
  - 4つの力を媒介する粒子  
(電磁気力、弱い力、強い力、重力)
  - 物質粒子 (レプトンとクォーク)弦の振動状態として統一的に記述

時空の次元や膨張の仕方、またその時空上にどういう素粒子が現れるか、ということが、理論的に予言可能

# まとめ (つづき)

Sherk-Schwarz, 米谷(1974)による提唱から約40年

- 従来の研究方法: 弦の相互作用が弱いときにのみ適用可能。  
4次元時空を得る無数の方法(4になる必然性もなし)  
現れる粒子の種類や性質も様々。(ランドスケープ)
- 新しい研究手法: 弦の相互作用が強いときにも適用可能。  
行列が基本的な自由度。  
これまでの研究は、虚時間の理論に限定。

## 今回の研究の成果

行列を用いた新しい研究手法を、実時間の理論に適用。  
宇宙誕生の様子を解明

時空の量子効果により、9次元の回転対称性が自発的に破れて、  
3次元空間が膨張し始める





# 研究の意義

## 1. 時空次元の謎に対する新しい理解

超弦理論が実際に我々の宇宙を記述している証拠

## 2. 超弦理論の新しい研究手法の確立 (スパコンの利用)

様々な問題に応用する可能性  今後の展望

後の時刻の宇宙を見るためには大きなサイズの行列を扱えるようにする必要がある

## 3. 新しい時空の概念: 出現する時間と空間

Cf.) 一般相対性理論

時空: 「入れもの」  「運動するもの(力学の対象)」

# 今後の展望（Ⅰ）

## インフレーション

宇宙誕生後のごく短時間に起こったと考えられている急速な加速膨張

1981年、佐藤勝彦、Alan Guthにより、独立に提唱。

ビッグバン宇宙論における様々な問題点を自然に解決

宇宙背景輻射の詳細な性質を説明できる



佐藤勝彦



Alan Guth

インフレーションが起きる機構を解明できるか？

# 今後の展望(Ⅱ)

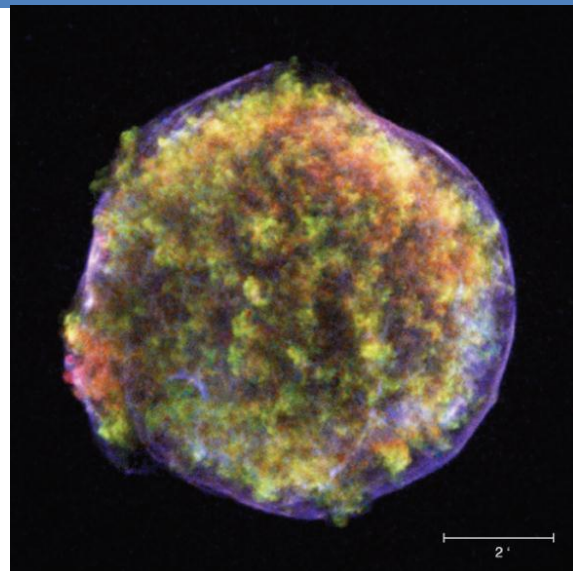
## 現代の宇宙の加速膨張

Ia型超新星爆発の観測

2011年ノーベル物理学賞受賞

宇宙背景輻射の精密な測定  
(WMAP)

など



➡ 暗黒エネルギーの存在が明らかに

膨張しても薄まらない、謎のエネルギー

しかも、宇宙の全エネルギーの70%以上を占める

超弦理論の持つ、量子重力効果により説明可能か？

# 今後の展望(Ⅲ)

## 素粒子理論に残された謎

- 暗黒物質 (dark matter)

宇宙観測により、強く示唆。

素粒子の標準模型の中には良い候補なし。

超対称性粒子、余剰次元方向の励起モードなどの予測。

- ヒッグス粒子

素粒子の標準模型における唯一の未発見の粒子。

素粒子に質量を与える機構のために導入。

重力を含む素粒子理論の観点からは不自然な点あり。

実験および理論の両面からの解明が必要。

超弦理論に基づいて、これらの謎を解明できるか？