

超弦理論の数値シミュレーションが 描く宇宙誕生の様子 ～9次元空間から3次元空間への相転移～

スーパーコンピュータが明かす宇宙と物質の起源

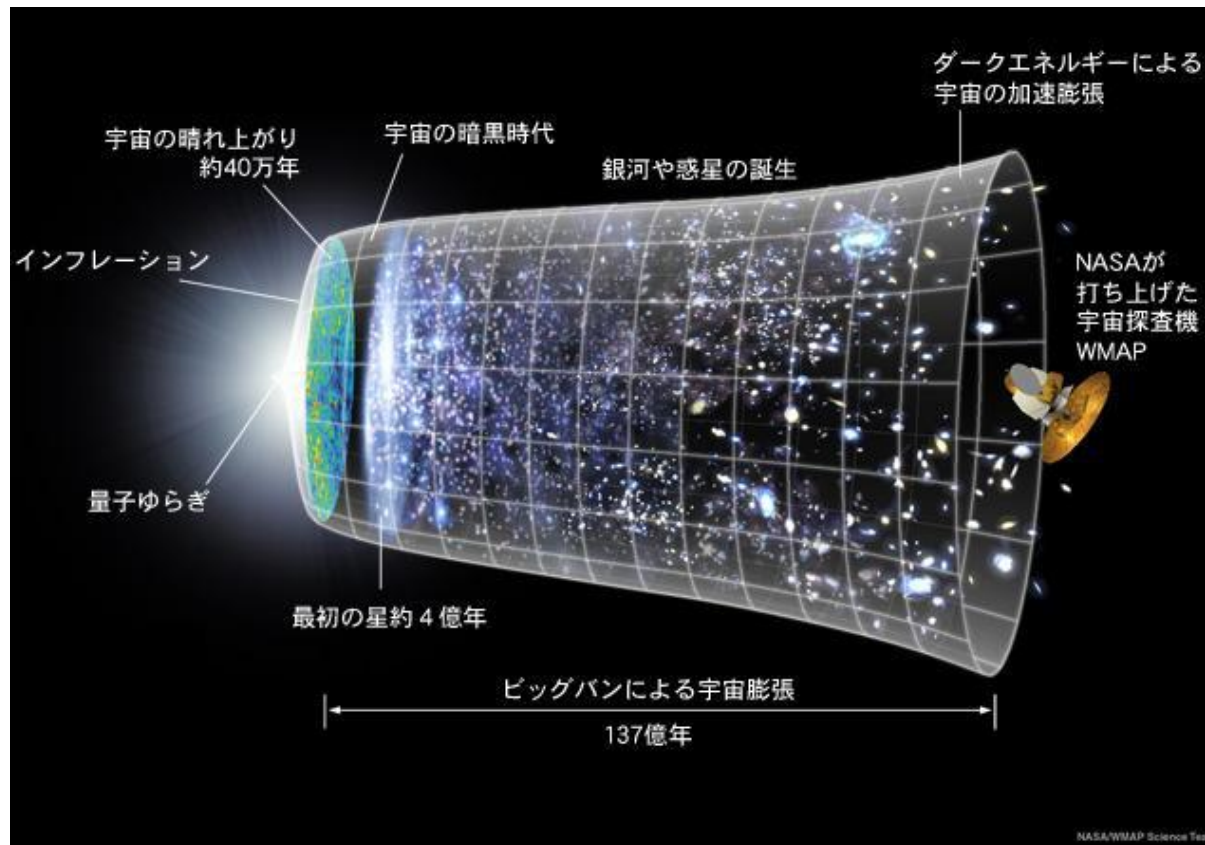
7月28日(土)

朝日カルチャーセンター

高エネルギー加速器研究機構

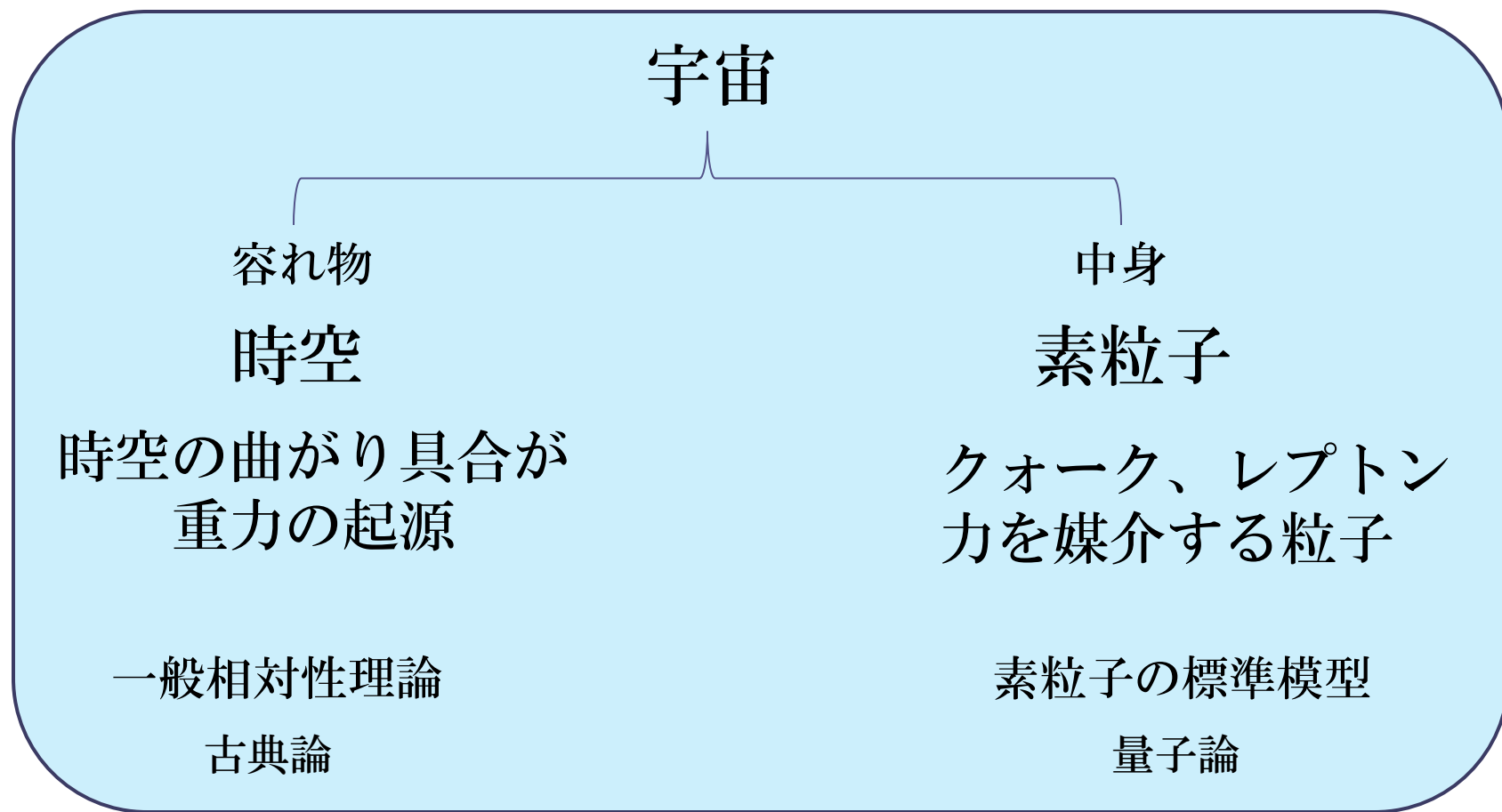
西村 淳

現代の宇宙像



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

宇宙の成り立ち



時空と素粒子の全体を正しく量子論的に記述するのが超弦理論

宇宙に関する多くの謎

- 宇宙はどのようにして始まったのか？
- 宇宙はどうして膨張しているのか？
- 宇宙は何故 $(3 + 1)$ 次元なのか？
- 宇宙には何故 4 つの力が存在するのか？
- 何故 3 世代のクォーク、レプトンが存在するのか？
- 何故ヒグス粒子が存在するのか？
- 暗黒物質、暗黒エネルギーの正体は何か？
- 宇宙はこれからどうなっていくのか？

超弦理論はこれらすべての謎を解明できる？！

宇宙に関する多くの謎

この講演で説明すること

- 宇宙はどのようにして始まったのか？
- 宇宙はどうして膨張しているのか？
- 宇宙は何故 $(3 + 1)$ 次元なのか？
- 宇宙には何故 4 つの力が存在するのか？
- 何故 3 世代のクォーク、レプトンが存在するのか？
- 何故ヒグス粒子が存在するのか？
- 暗黒物質、暗黒エネルギーの正体は何か？
- 宇宙はこれからどうなっていくのか？

超弦理論はこれらすべての謎を解明できる？！

宇宙に関する多くの謎

この講演で説明すること

- 宇宙はどのようにして始まったのか？
- 宇宙はどうして膨張しているのか？
- 宇宙は何故 $(3 + 1)$ 次元なのか？
- 宇宙には何故 4 つの力が存在するのか？
- 何故 3 世代のクォーク、レプトンが存在するのか？
- 何故ヒグス粒子が存在するのか？
- 暗黒物質、暗黒エネルギーの正体は何か？
- 宇宙はこれからどうなっていくのか？

近い将来、解明が期待されること

超弦理論はこれらすべての謎を解明できる？！

鍵は超弦理論の新しい研究手法

朝日新聞（2011.12.22朝刊）

宇宙もともと9次元

高エネ研などスパコンで計算

もともと宇宙は9次元の空間からなるとする「超弦理論」が説明する宇宙創成の様子が、スーパーコンピュータを使った計算で確かめられた。高エネルギー加速器研究機構（茨城県つくば市）などの研究チーム

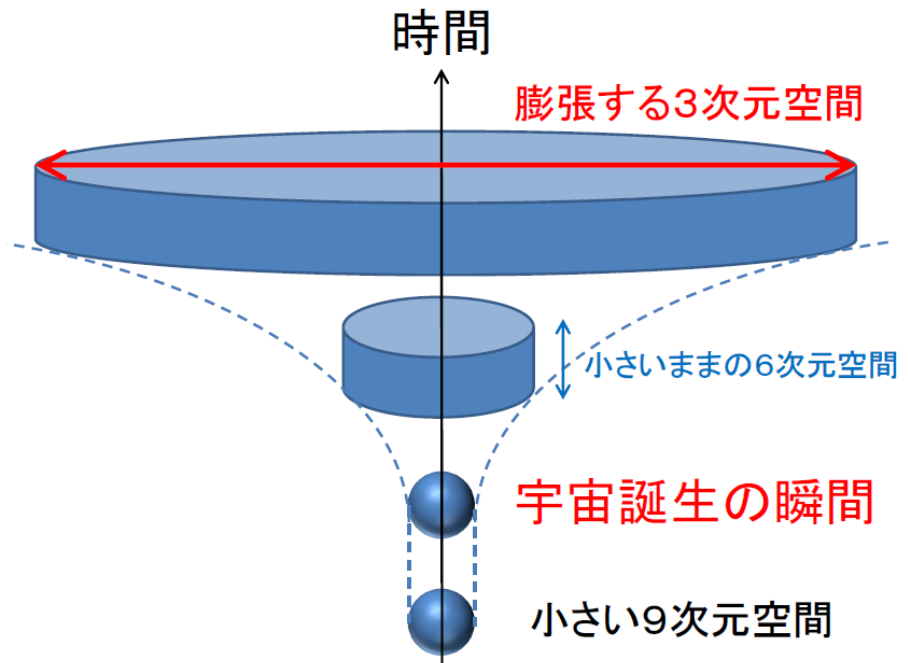
が米専門誌「フィジカル・レビュー・レターズ」（電子版）に近く論文を発表する。

すべての素粒子を「弦」（ひも）で表す超弦理論は、宇宙は9次元の空間と1次元の時間からなると説明、究極の物理理論と呼ばれている。今回の成果は、現在の3次元の空間が生まれた理由を説明できるとい

高エネ研の西村淳准教授と静岡大の土屋麻人准教授らは、空間と時間を示すモデルを、スパコンで計算すると、宇宙の誕生直後、9次元の空間のうち、3次元の空間だけが急速に膨張し始めた。残りの6次元は小さく閉じられ、見えなくなった。

西村准教授は「約40年前に生まれた超弦理論で、実際にこの宇宙の成り立ちを説明できることを示せた。」

今後、スパコンを使った計算で、（質量の起源とされる）ビッグス粒子の謎にも迫れる可能性がある」と話している。（石倉徹也）



目次

1. はじめに
2. 重力と時空
3. 素粒子の標準模型
4. 超弦理論とは
5. 宇宙誕生の様子
6. おわりに

2. 重力と時空

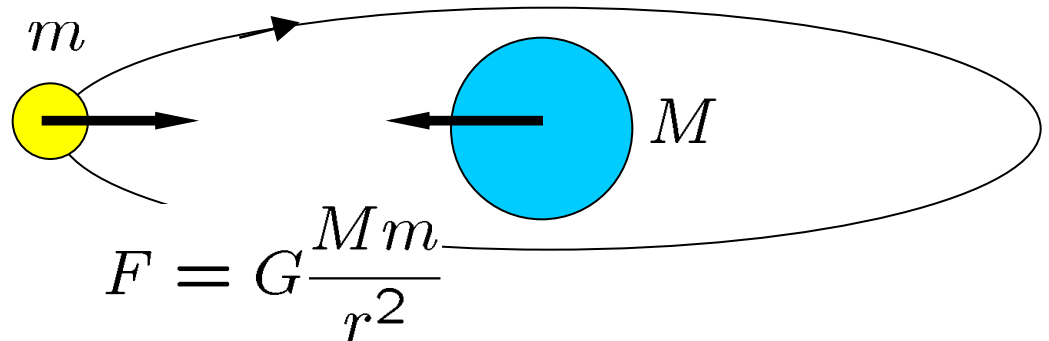
そもそも重力とは

- 17世紀 ニュートン



$$F = mg$$

重力 = 万有引力の法則

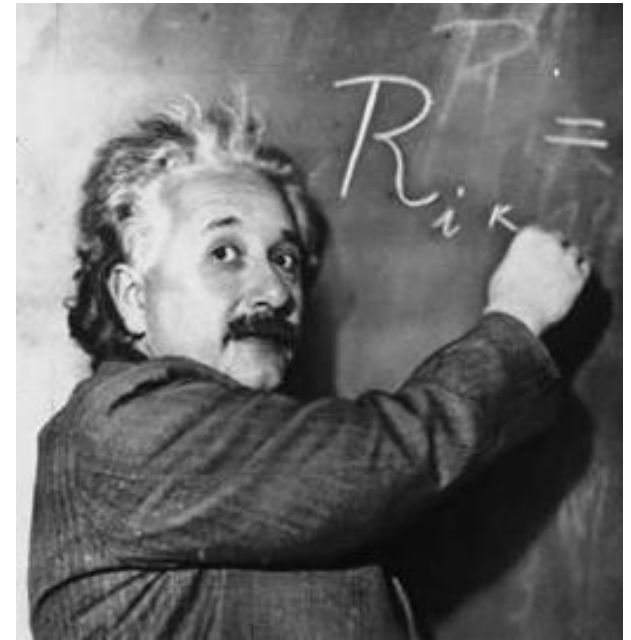
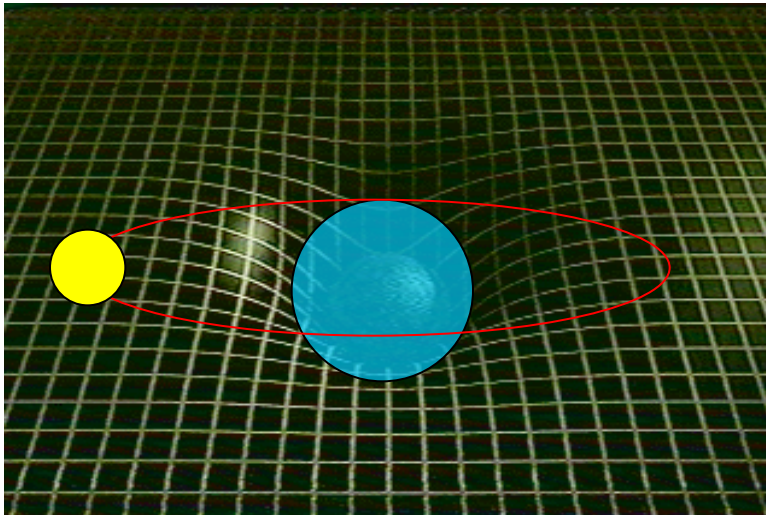


1914～1915 アインシュタイン 一般相対性理論

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = T_{\mu\nu}$$

時空のゆがみ

物質（エネルギー）



物質は、静止していても

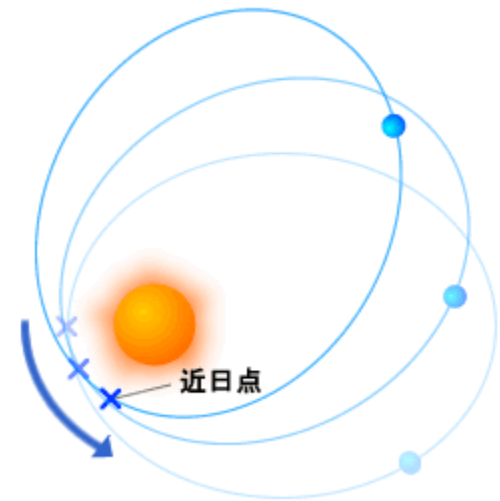
$$E = mc^2$$

というエネルギーを持つ。

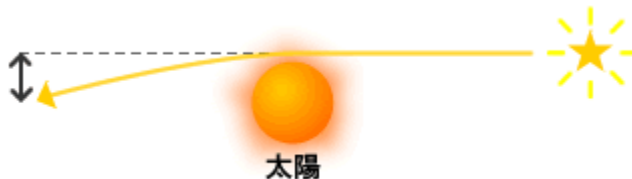
時空のゆがみを検証する

- 水星の近日点移動

ニュートンによれば楕円軌道のはずが...

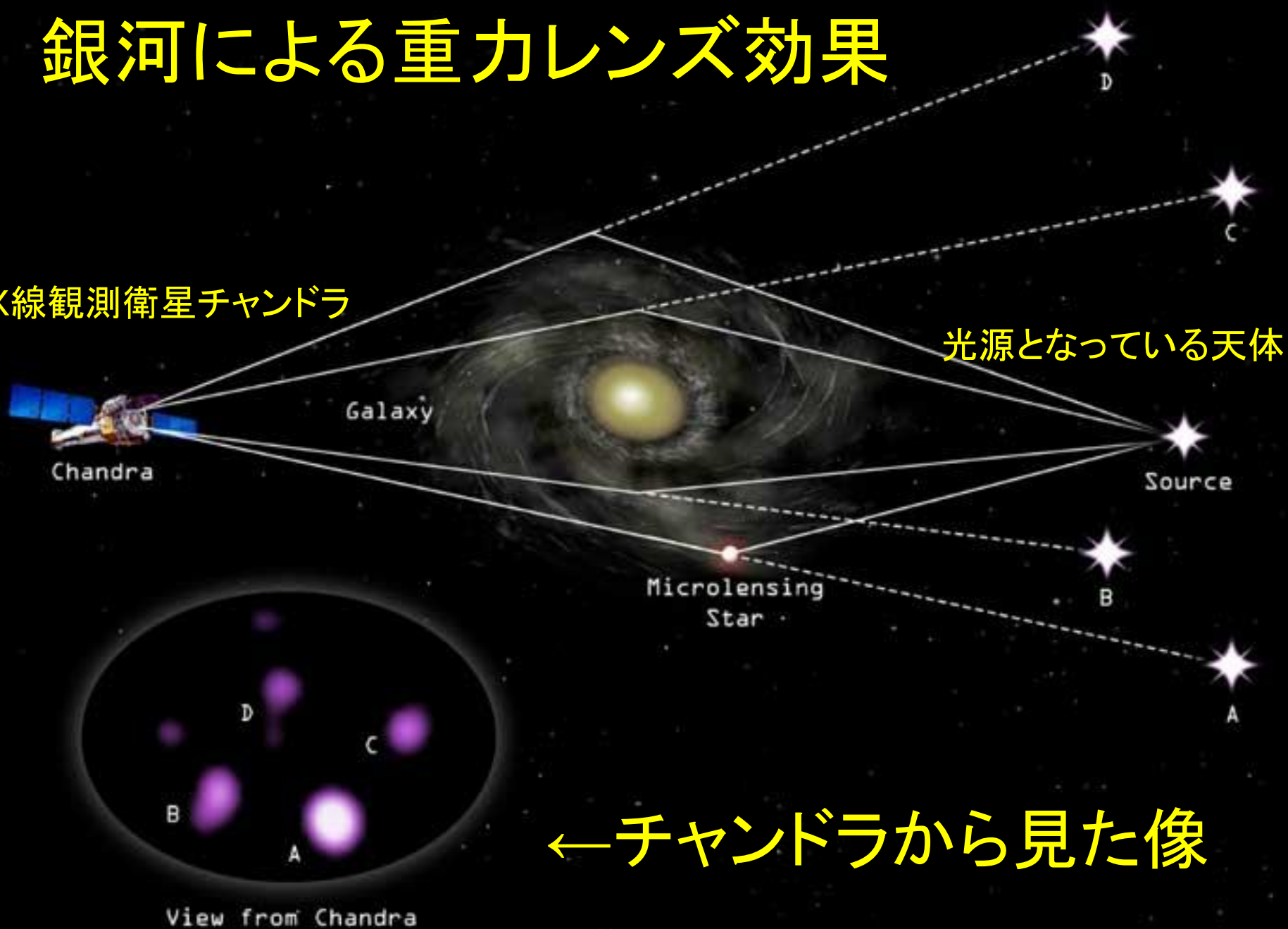


- 重力レンズ効果



銀河による重力レンズ効果

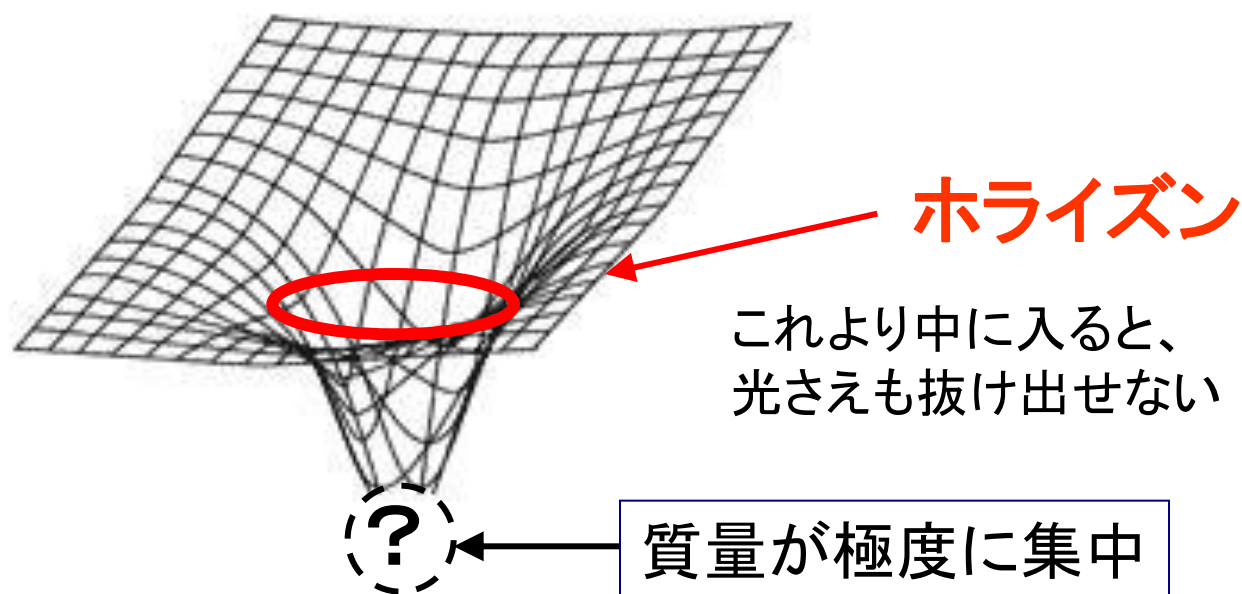
X線観測衛星チャンドラ



←チャンドラから見た像

アインシュタイン方程式の解 (1)

～ブラックホール～



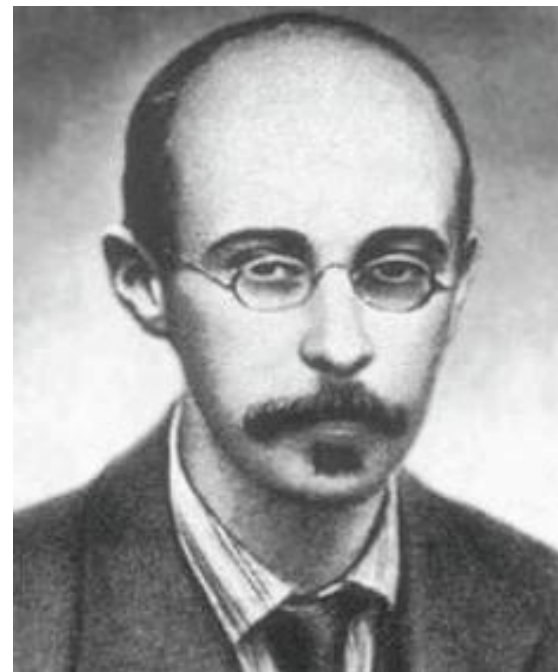
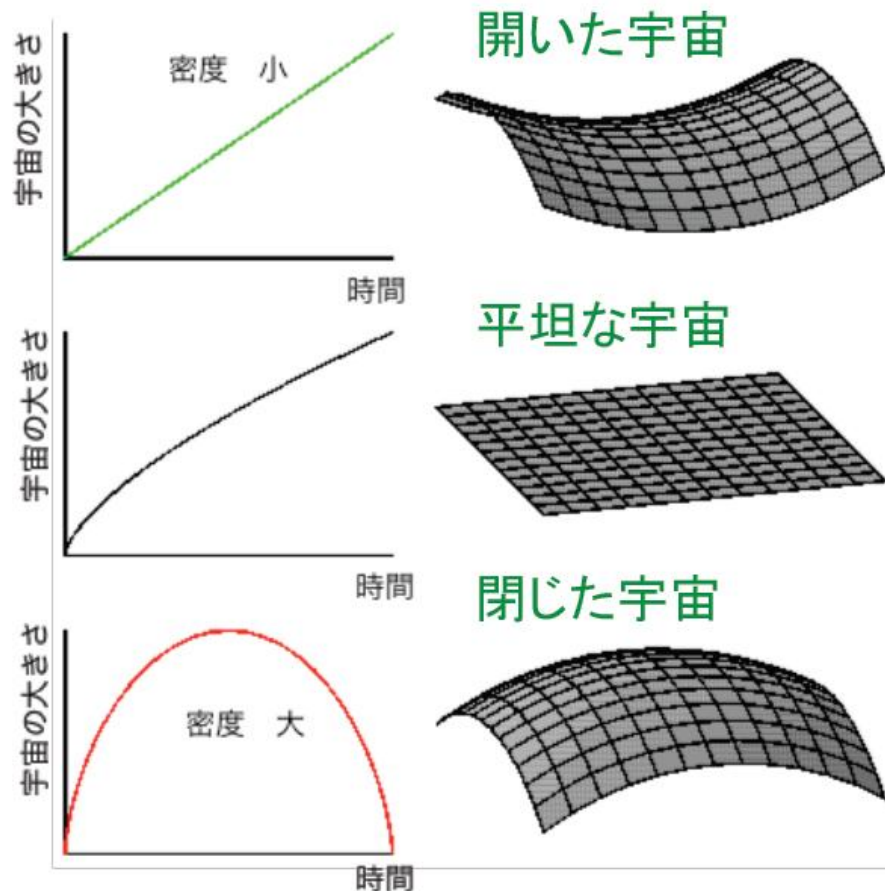
シュヴァルツシルト
(1915年)

- 太陽の20倍以上の質量を持った星が重力崩壊することにより生成
- 銀河中心部分に巨大ブラックホールが存在すると考えられている。

アインシュタイン方程式の解 (2)

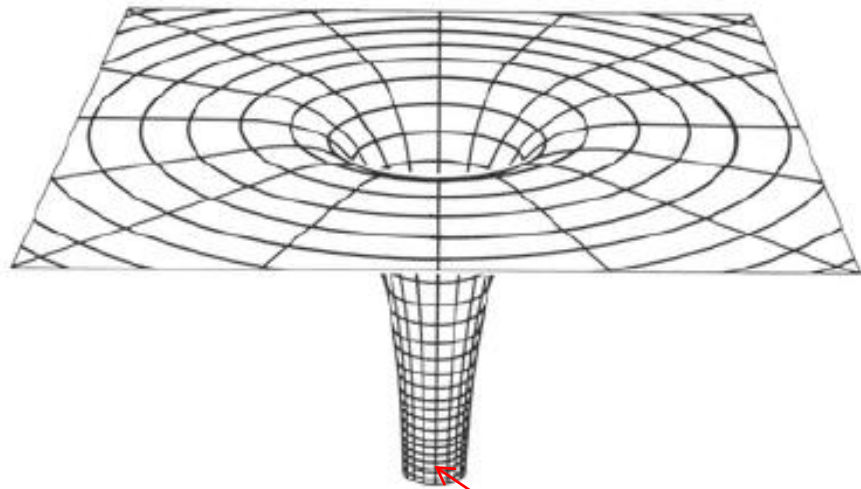
～膨張宇宙～

フリードマン解 一様等方性を仮定

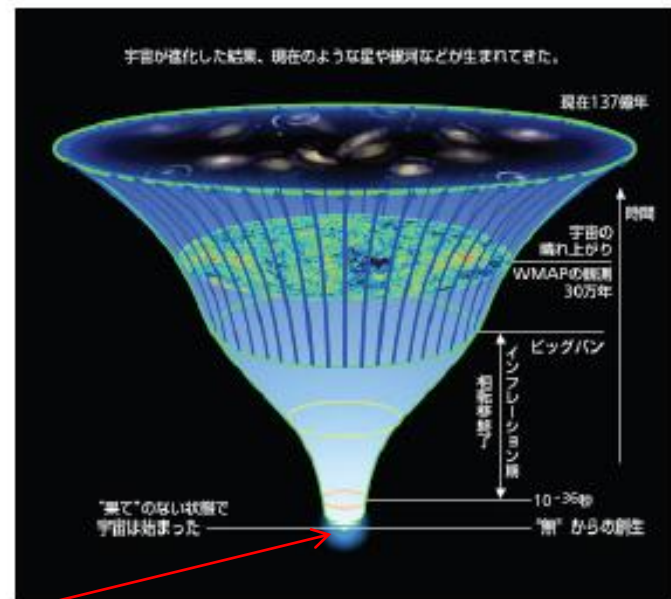


特異点（時空のゆがみが発散する点）

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 $L_P = \left(\frac{\hbar G}{c^3} \right)^{1/2} \sim 10^{-33} \text{cm}$

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。



重力の量子論が必要

3. 素粒子の標準模型

素粒子の標準模型

物質の基本粒子

3世代のクォークとレプトン

例) 陽子はuud、中性子はudd
のように、3つのクォークから成る。

基本的な力は3種類 (重力は無視)
力を伝える素粒子が存在

さらに、素粒子に質量を与える機構
のために、ヒッグス粒子が必要。

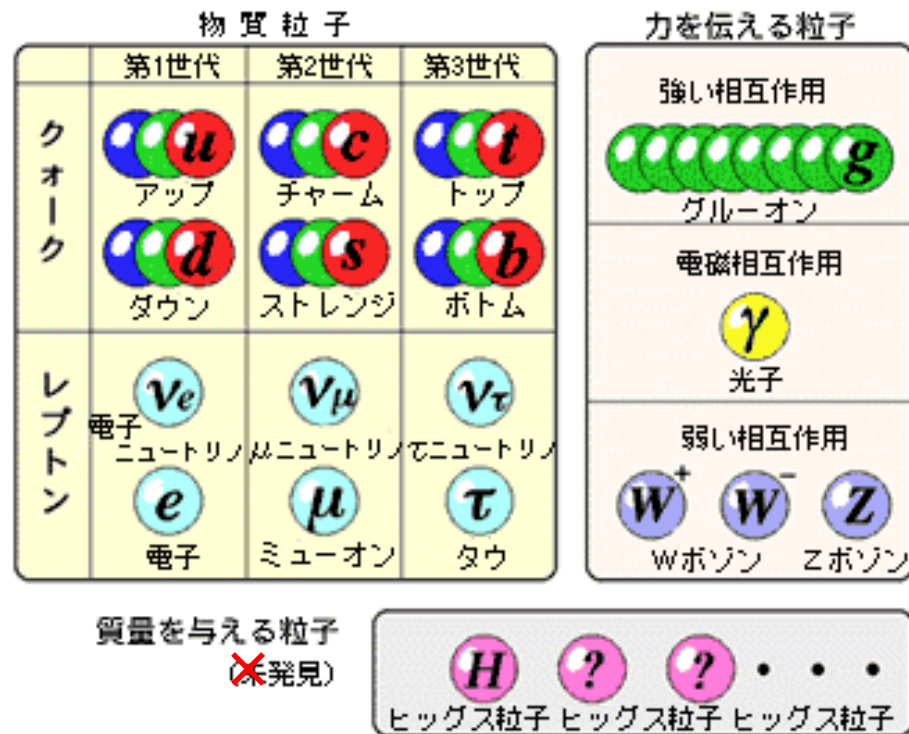


図1 現在の素粒子像「標準模型」の世界

2012年7月4日にヒッグス粒子と考えられる新粒子が発見された。

2012年は素粒子物理学にとって歴史的な年

Large Hadron Collider →
(ジュネーブの郊外)

質量125.3GeVの新粒子発見(7/4, CERN発表)



年(平成24年)7月5日 木曜日

1892年3月11日第3種郵便物認可

ヒッグス粒子が発見

万物の重さの源

国際チーム発表

今回の成果では、東大や筑波大など日本の16研究機関が参加する「ATLAS」と、欧米を中心とした「CMS」という二つの研究チームの実験成果。ともに、2008年に稼働を開始したCERNの巨大加速器「LHC」を使って探索実験を続けていた。

ヒッグス粒子は、加速器で光速近くまで加速した陽子と陽子を衝突させることで人為的に作り出すことができる。だが、瞬時に別の粒子や光に変わり、直接観測できない。そこで、変身後の粒子や光を検出器でとらえ、データを統計的に解析することでヒッグス粒子の存在確率を割り出す。データ量が増えるほど確率は高まる。

CERNのロルフ・ホイヤー所長は、ヒッグス粒子とみられる粒子の発見について、「歴史的瞬間だが、これからの様々な発見のための始まりに過ぎない」という見解を発表した。

CERNの発表会場には、約四十年前にヒッグス粒子の存在を予測した英エディンバラ大学のピーター・ヒッグス名誉教授(83)も招かれ、拍手で祝福された。(田中誠士)

ヒッグス粒子は、1977億年前の「ビッグバン」によって宇宙が誕生した直後に、光速で飛び回る素粒子に対して水あめのように作用して、動きにくくしたと考えられている。この「動きにくさ」こそ、質量を持ったことを意味する。

▼3面―研究者数千人が参加
ヒッグス粒子は、1977億年前の「ビッグバン」によって宇宙が誕生した直後に、光速で飛び回る素粒子に対して水あめのように作用して、動きにくくしたと考えられている。この「動きにくさ」こそ、質量を持ったことを意味する。

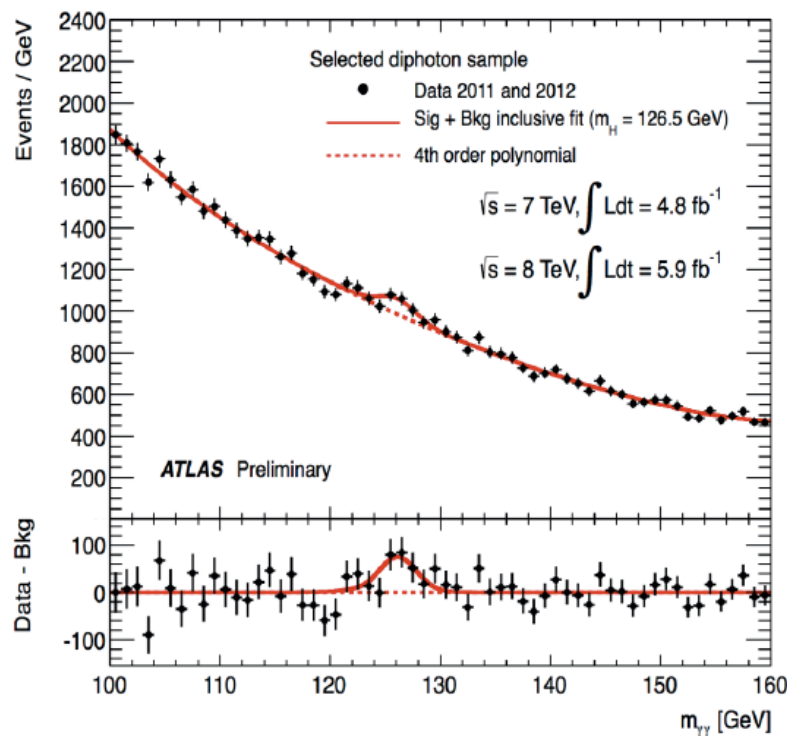
万物に質量(重さ)を与えると考えられてきた「ヒッグス粒子」とみられる新粒子を発見したと、スイス・ジュネーブ近郊にある欧州合同原子核研究機関(CERN)が4日、発表した。素粒子物理学の基礎となる「標準理論」の中で唯一見つかっていなかった素粒子だ。物質が質量を獲得し、宇宙がいかにして現在の姿に至ったかを解明する意味がある。

ヒッグス粒子は、1977億年前の「ビッグバン」によって宇宙が誕生した直後に、光速で飛び回る素粒子に対して水あめのように作用して、動きにくくしたと考えられている。この「動きにくさ」こそ、質量を持ったことを意味する。

検出器 陽子 粒子 光 光速に近い速さ

ビッグバン直後
光速で移動
ヒッグス粒子で満ちるとヒッグス粒子
抵抗 質量が発生
ヒッグス粒子はすぐに壊れるため、粒子や光の組み合わせから探す

LHCに設置されている検出装置「ATLAS」=CERN、アトラス実験グループ提供



素粒子レベルで重力を見るには？

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

細かいスケールを見るには、高いエネルギーが必要。

$$E = \frac{\hbar c}{L_P} = \frac{197 \text{MeV} \cdot \text{fm}}{10^{-33} \text{cm}} \sim 10^{19} \text{GeV}$$

プランクスケールのエネルギー

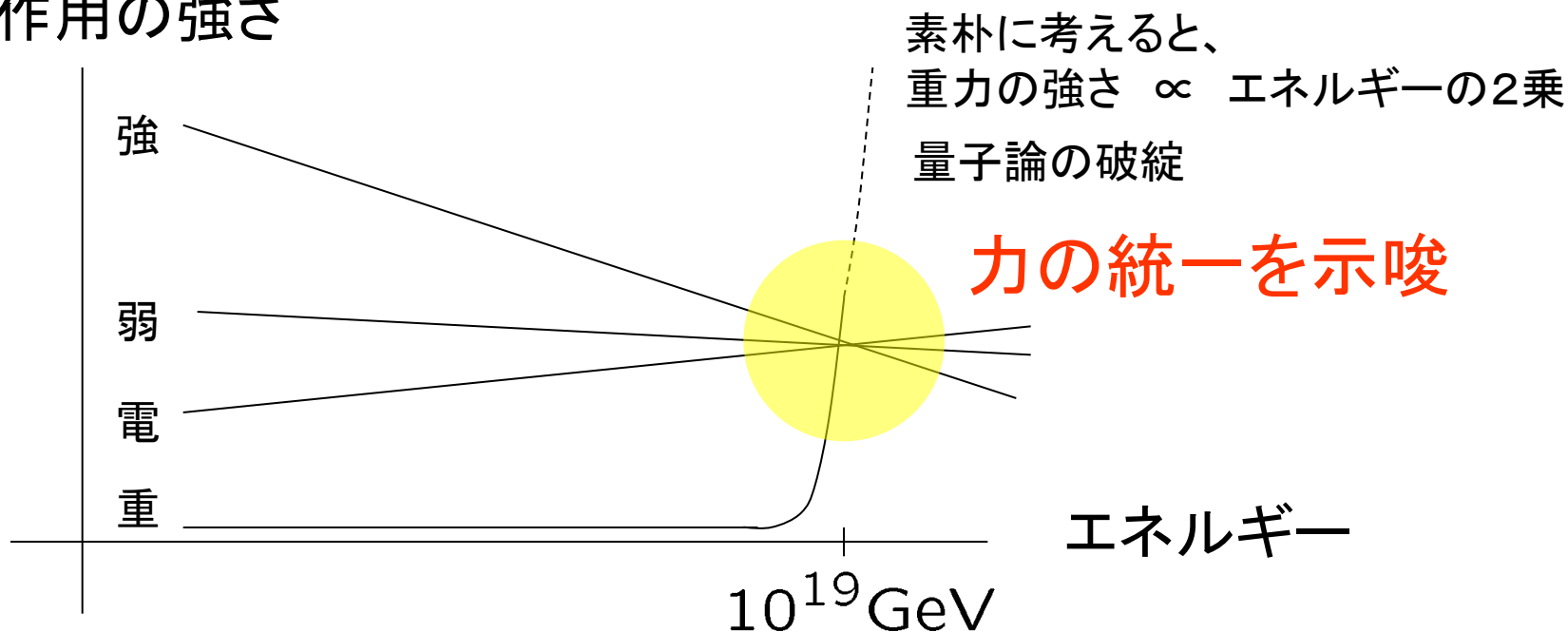
高エネルギー加速器実験で調べているのは、数百GeVのエネルギースケール。

重力の強さ $\propto$ エネルギーの2乗

$$F_{\text{Newton}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad E = m c^2$$
$$F_{\text{Coulomb}} = \alpha \frac{q_1 q_2}{r^2}$$


プランクスケールの理論は何か？

相互作用の強さ



プランクスケールで、重力を含めて力を統一的に記述するような、新しい理論が現れると考えられる。

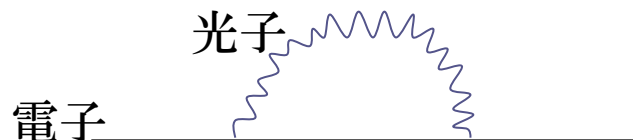
その有力な候補が、超弦理論

4. 超弦理論とは

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

素粒子を大きさのない“点”として記述

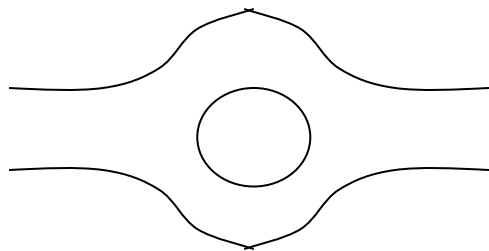


計算過程で生じる発散の問題
繰り込み理論（朝永振一郎ら）で処理

重力の場合

素朴に考えると、
重力の強さ $\propto$ エネルギーの2乗

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

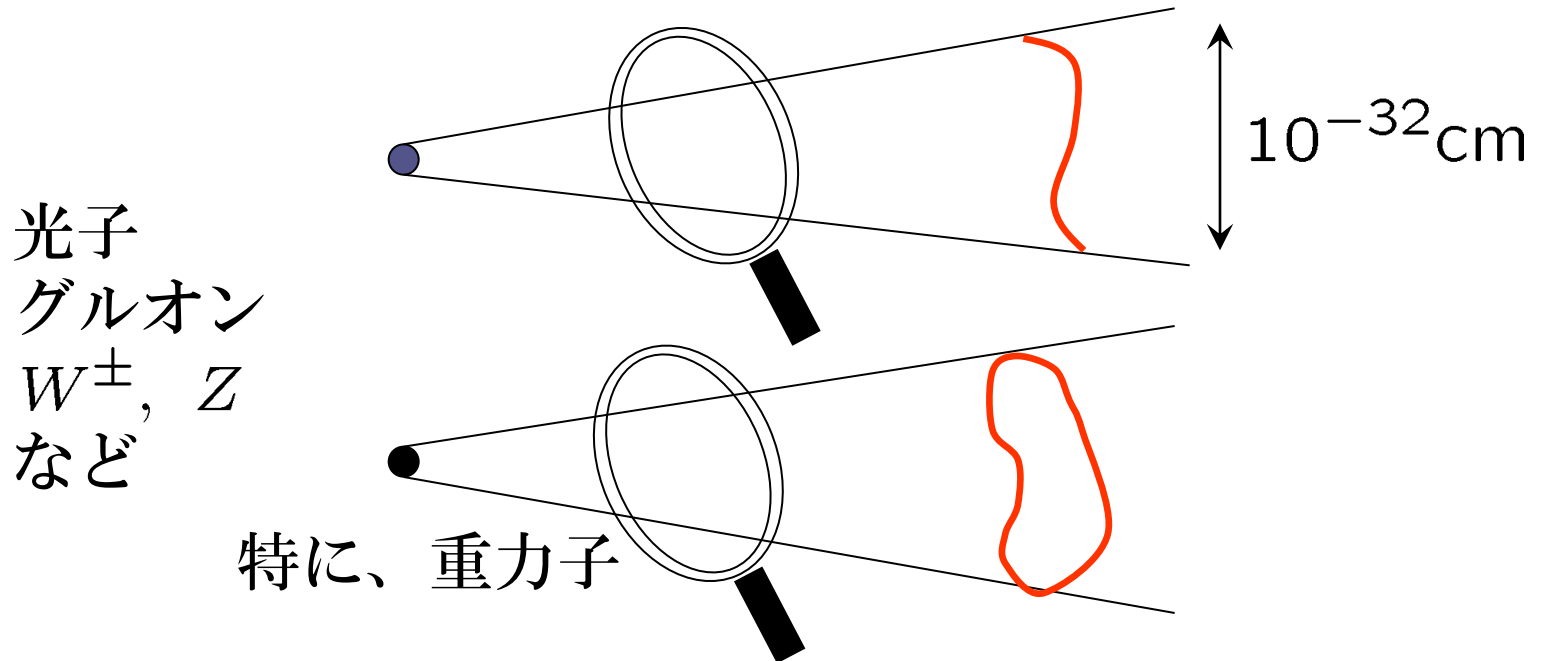
（安定な理論を作るために、超対称性を導入）

超弦理論

1974 Sherk-Schwarz, Yoneya

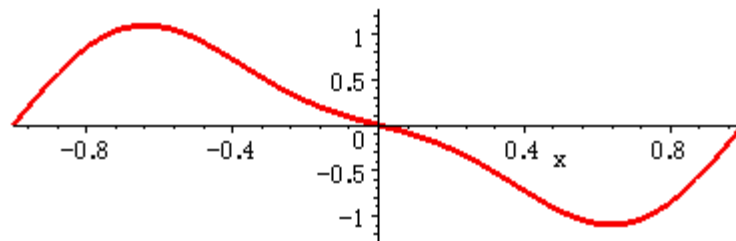
1984 Green-Schwarz

弦の振動の仕方で様々な粒子を表す

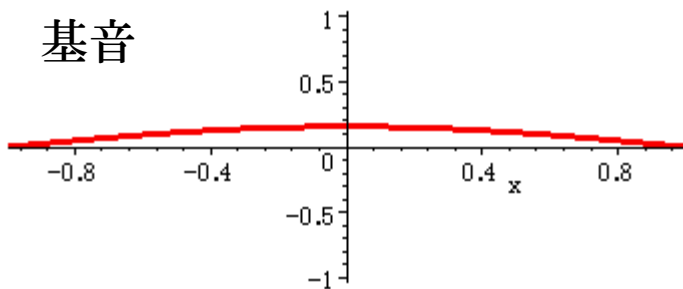


重力を含めて、4つの力を統一的に記述

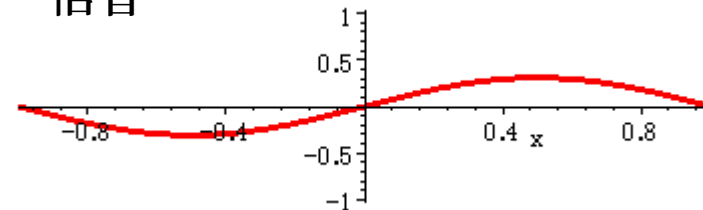
弦の振動の例



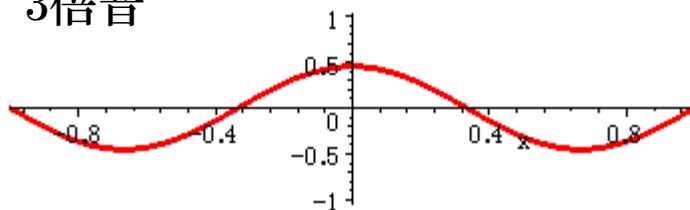
基音



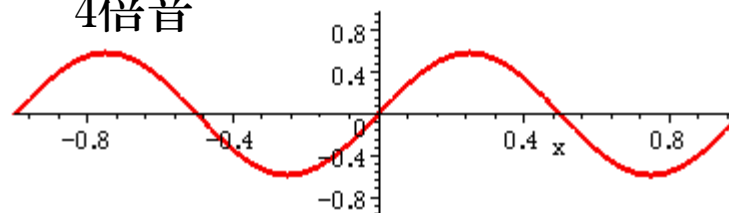
倍音



3倍音



4倍音



異なる
粒子

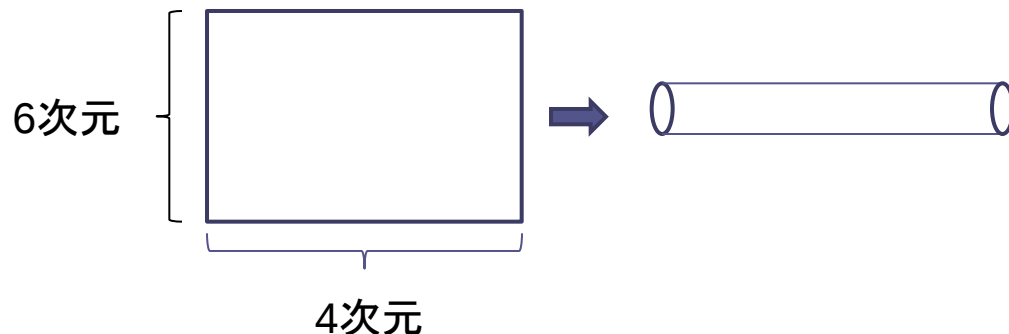
従来の超弦理論の研究手法

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

⇒ 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

「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

5. 宇宙誕生の様子

Ref.) Sang-Woo Kim, Jun Nishimura, and Asato Tsuchiya,
Physical Review Letters 108, 011601 (2012)

弦の相互作用が強い場合にも通用する 新しい方法

I K K T 行列模型 (1996年12月)

行列の各要素が**基本的な自由度**。

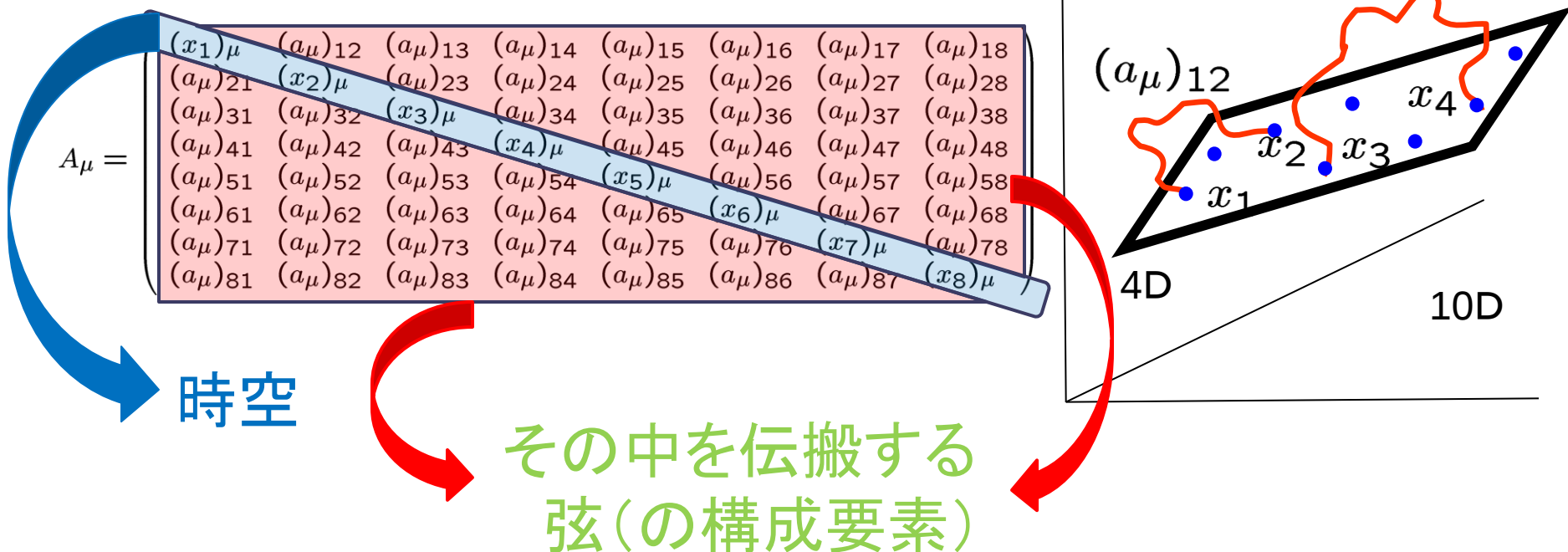
弦の描像は、行列のサイズを無限大にした極限で現れる。



IKKT行列模型における時空像

10個の $N \times N$ 行列 A_μ ($\mu = 0, 1, \dots, 9$)

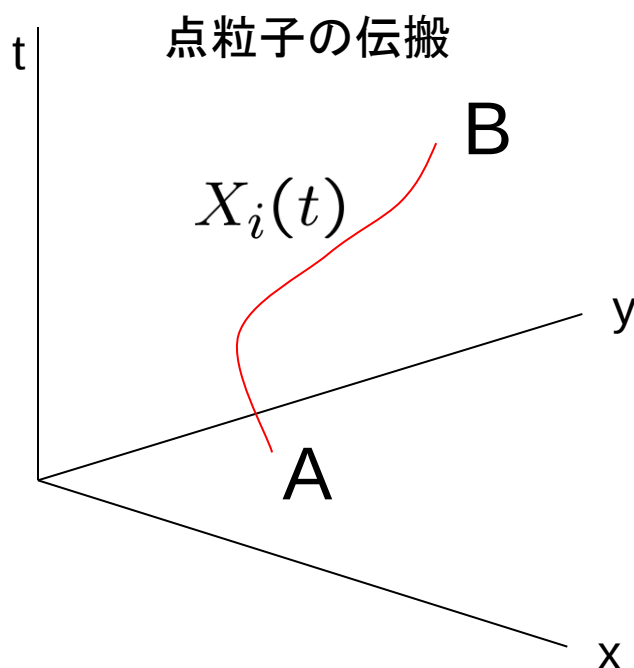
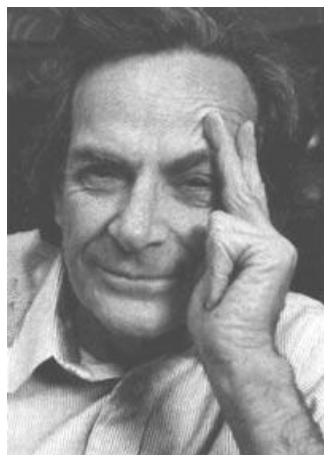
$N = 8$ の例



我々の住む4次元の時空が現れるか？

ちゃんとした量子論になっている訳

ファインマンの経路積分法に基づいた考え方



$$Z = \int \mathcal{D}X_i(t) e^{iS[X]}$$

いろんな伝搬のしかた(**経路**)を重ね合わせる(**積分**)ことで、量子論的な時間発展を記述。

(**シュレーディンガー方程式**と等価)

行列模型における量子論的な時間発展の表わし方

$$Z = \int dA e^{iS[A]}$$

$$S[A] = -\frac{1}{4g^2} \text{tr}([A_\mu, A_\nu][A^\mu, A^\nu]) + \dots$$

10個の行列 A_μ ($\mu = 0, 1, \dots, 9$)
のすべての要素に関する積分

行列要素がどういう値のときの寄与が重要かを読み取る。
それが、どのような宇宙の時間発展を表しているかを解析。

スーパーコンピュータで計算を実行

行列から宇宙の時間発展を読み取る

$$A_0 = \begin{pmatrix} t_1 & & & \\ & t_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & n \\ & & & & \ddots \\ & & & & & t_{\nu+1} \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & t_{\nu+n} \\ & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & t_N \end{pmatrix}$$

平均値 t

対角成分だけがゼロじゃなくなるような表示をとる。

$$t_1 < t_2 < \cdots < t_N$$

$$A_i = \begin{pmatrix} & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & n \\ & & & & \ddots \\ & & & & & \bar{A}_i(t) \\ & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & n \\ & & & & & & & & \ddots \\ & & & & & & & & & \text{小さい値} \end{pmatrix}$$

小さい値

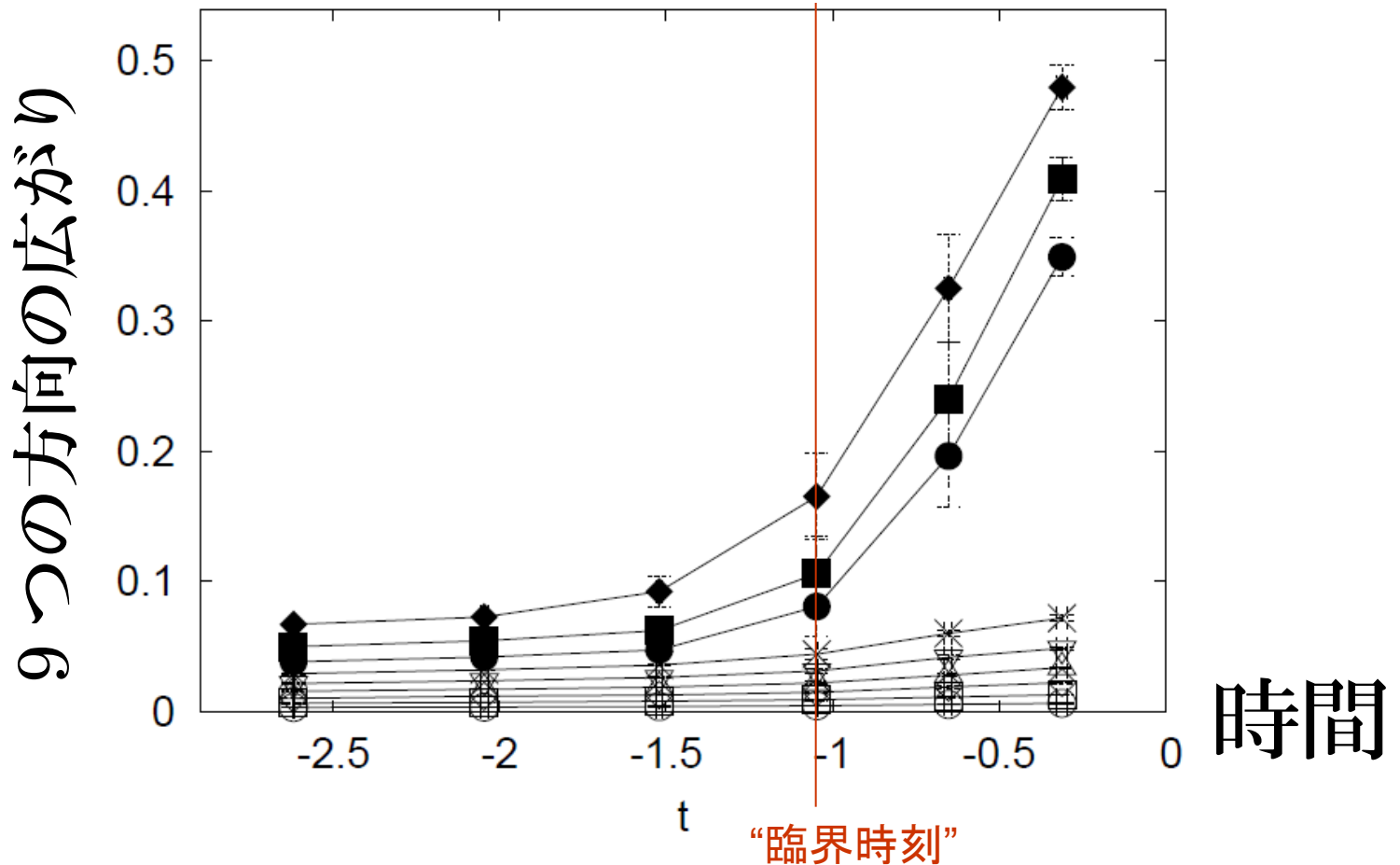
時刻 t における
宇宙の状態を表す

$$i = 1, \dots, 9$$

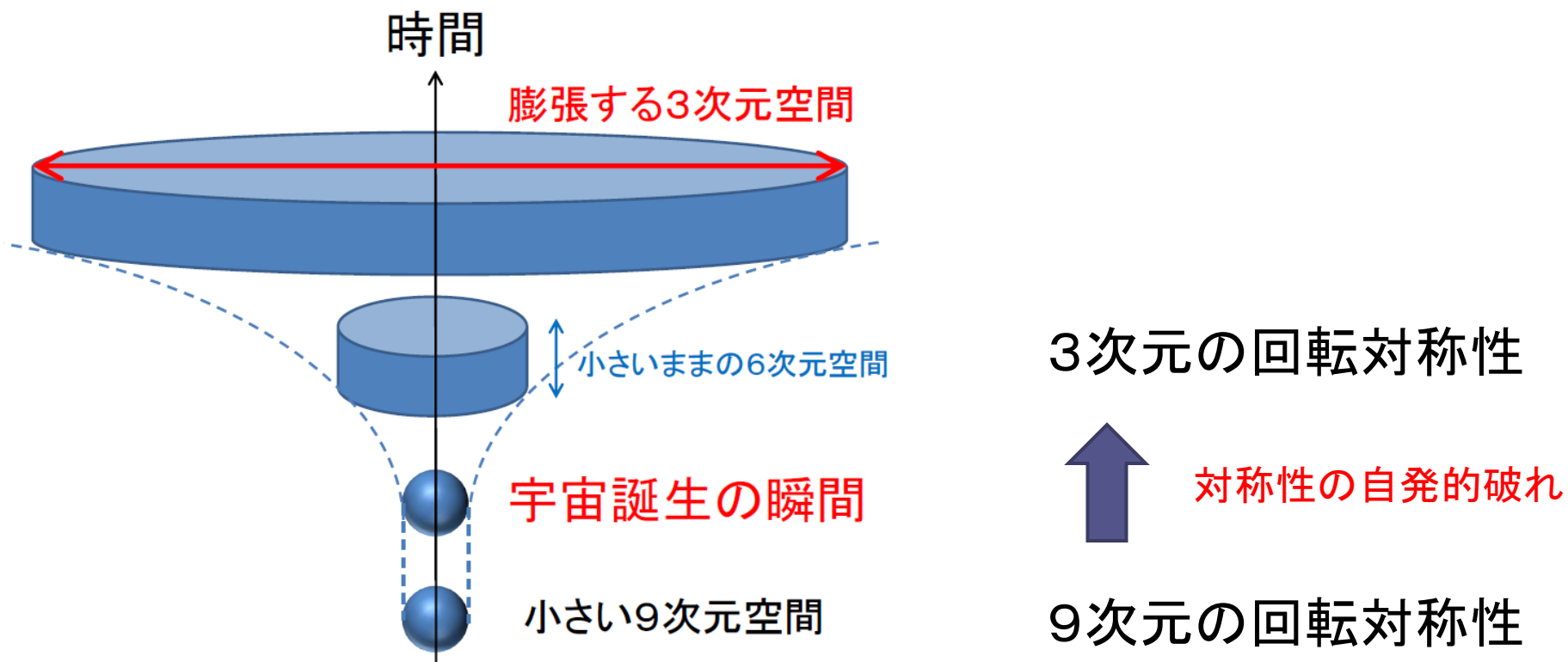
9次元の空間に対応

3次元膨張宇宙の出現

3方向の広がりだけが急速に増大

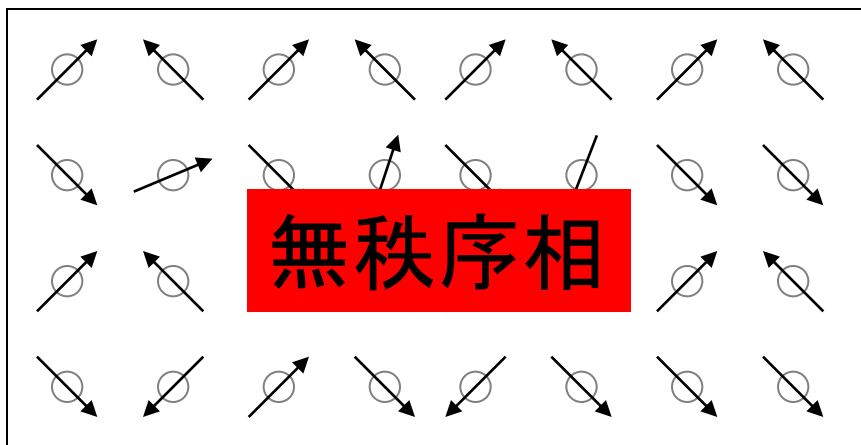


超弦理論の数値シミュレーション が描く宇宙誕生の様子

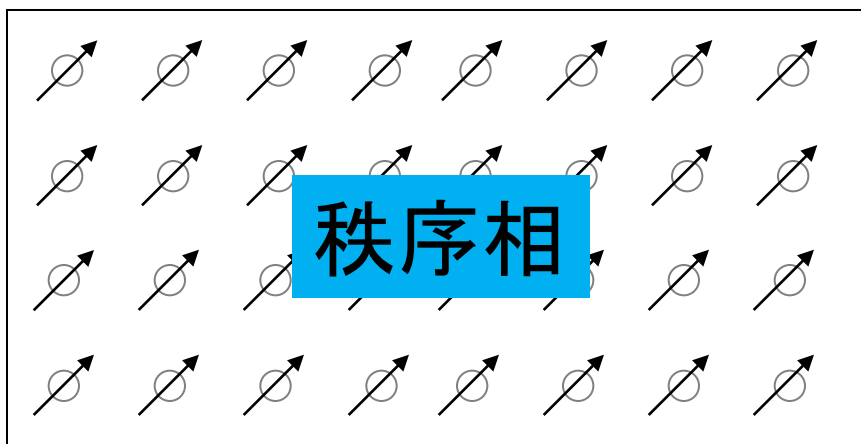


「回転対称性の自発的破れ」が、 $(3+1)$ 次元宇宙の起源。

物理学における「対称性の自発的破れ」 の例～強磁性体～



相転移



原子一つずつが小さな磁石

高温では熱的ゆらぎが大きく、
ランダムな方向を向いている。



自発的対称性の破れ

温度がある値(臨界温度)より
下がると、となり同士の向きがそろう。
全体として磁石になる。

どの向きにそろうかは、偶然で決まる。

素粒子理論に初めて持ち込んだのは、南部陽一郎さん

クォークの理論における質量の謎を解明

(2008年ノーベル物理学賞受賞)

- u,dクォークは軽い(数MeVの質量しかない)のに、何故3つのクォークuudから成る陽子は940MeVと重いのか。(クォーク1個当たり300MeV程度という勘定。)
- 一方で、uクォークと反dクォークから成るパイ中間子は140MeVと軽いのは何故か。

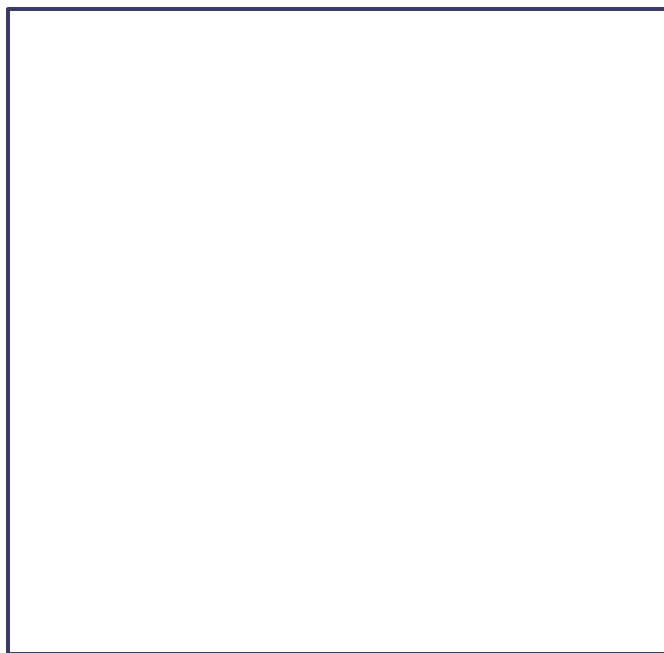
真空中にクォークと反クォークの対が凝縮して、「カイラル対称性」が自発的に破れた。



真空中をクォークが運動しにくくなって、300MeV程度の質量を獲得。
凝縮の向きが少し揺らぐような波がパイ中間子を表すと考えて、その軽さを説明。

もっと簡単な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。

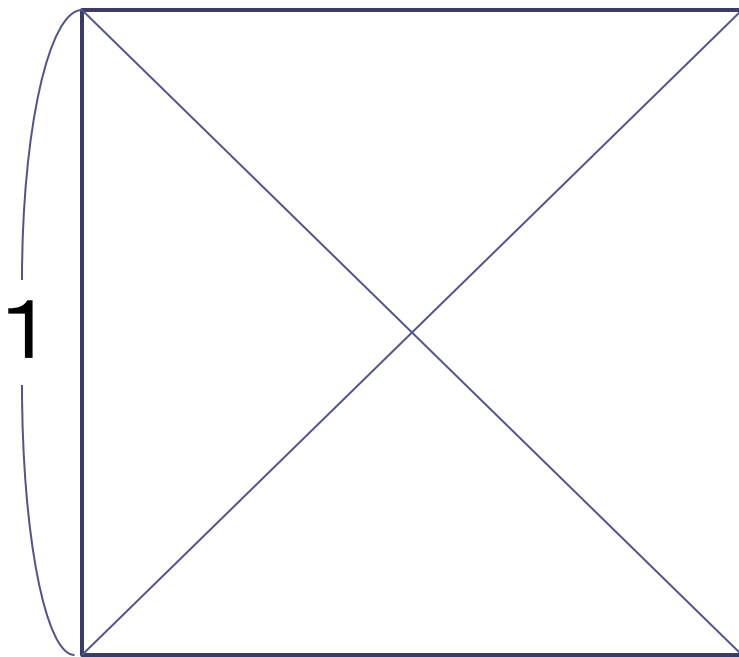


90度回転しても不変。

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。

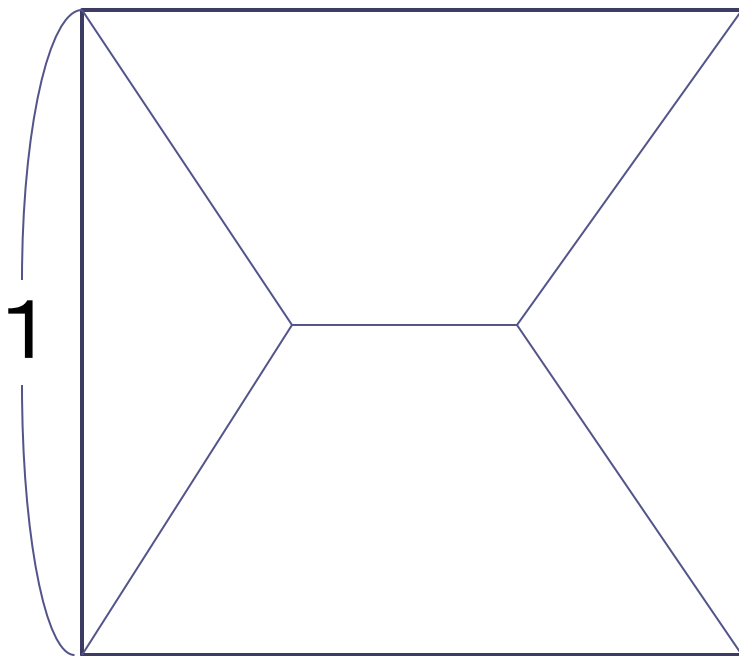
回転不変性を保っている。

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

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。

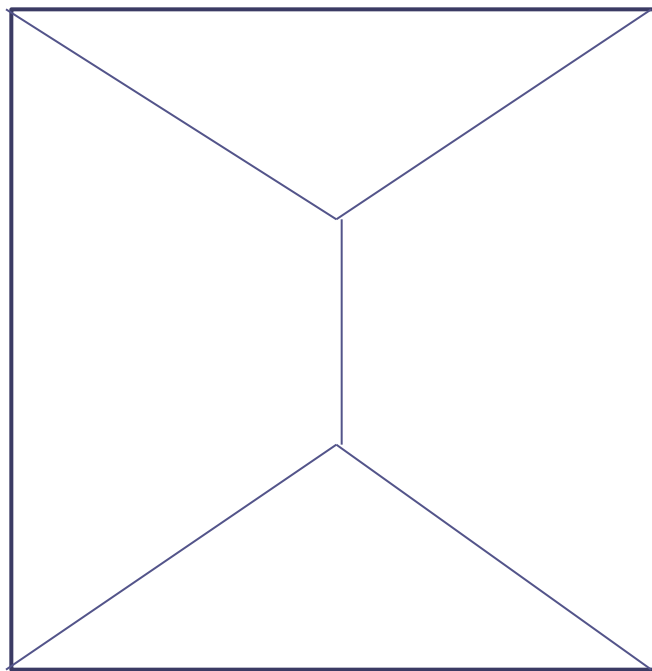
回転不変性を保っていない。

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

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！

6. おわりに

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、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

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。

今回の研究の成果

行列を用いた新しい研究手法を、宇宙論に初めて応用。
宇宙誕生の様子をスパコンで解明

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
- 行列を用いた新しい定式化の重要性を支持。
- 従来の研究方法では捉えきれない性質の解明。

2. スパコンを用いた超弦理論の新しい研究手法の確立

様々な問題に応用する可能性



今後の展望

3. 「出現する時間と空間」という新しい考え方。

c. f.) 一般相対性理論では、初めから時空という概念がある

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？

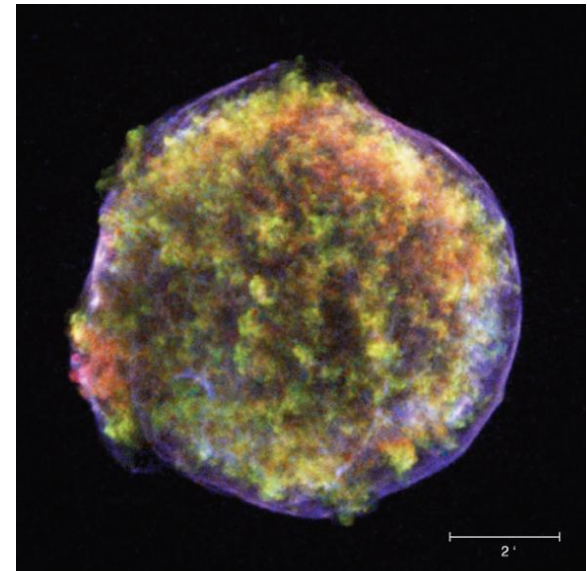
今後の展望（Ⅱ）

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。
超弦理論から現れる他の粒子が、その正体では？
- **ヒッグス粒子**
素粒子に**質量を与える機構**のために導入。
50年近くの年月を経て、ついに発見か。(**125.3GeV**)
しかし、量子重力のスケール (**プランクスケール 10^{19}GeV**)
と比べて何故そんなに軽いのか？ （階層性問題）

超弦理論に基づいて、これらの謎を解明できるか？