

茨城大学公開講座 素粒子物理学入門

— 基本的な考え方から超弦理論まで —

- 超弦理論の発展

2006年6月25日 13:00-15:00

東 武大 (高エネルギー加速器研究機構(KEK))

azumat@post.kek.jp

<http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~azuma/index.html>

目次

1. 標準模型の物理 p4
2. 重力について p8
3. 超弦理論について p17
4. まとめ p43

超弦理論の発展



マンガ超ひも理論 —我々は4次元の
膜に住んでいる— ISBN: 4062691957
川合光、高橋繁行



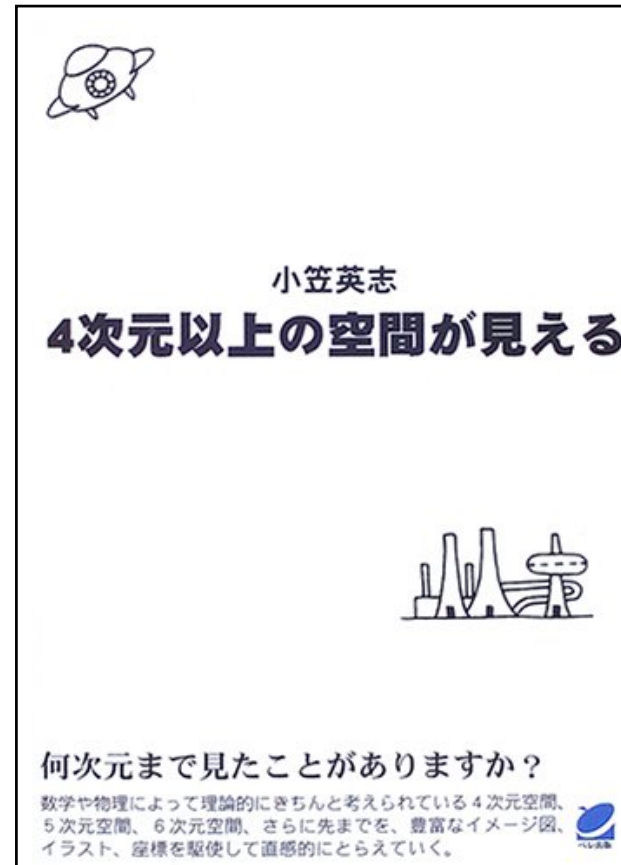
はじめての“超ひも理論”
ISBN: 4061498134
川合光、高橋繁行

Dブレイン



次元の秘密
ISBN: 4875932626 竹内薫

高次元時空



4次元以上の空間が見える
ISBN: 4860641183 小笠英志

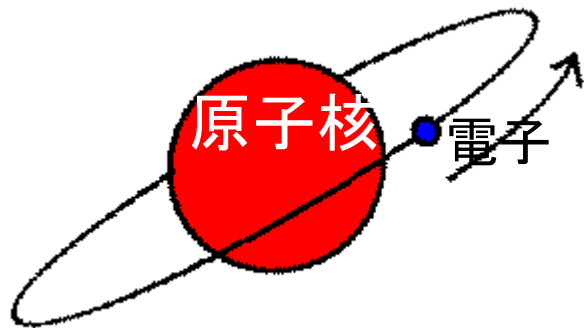
§ 1-標準模型の物理

素粒子論 ⇒ 物質と力を微視的に理解する学問

紀元前からの問い: 物質は何から出来ているか?

ギリシア時代⇒『4元素論』 →

19世紀: 原子が物質を構成



空気

火

土

水

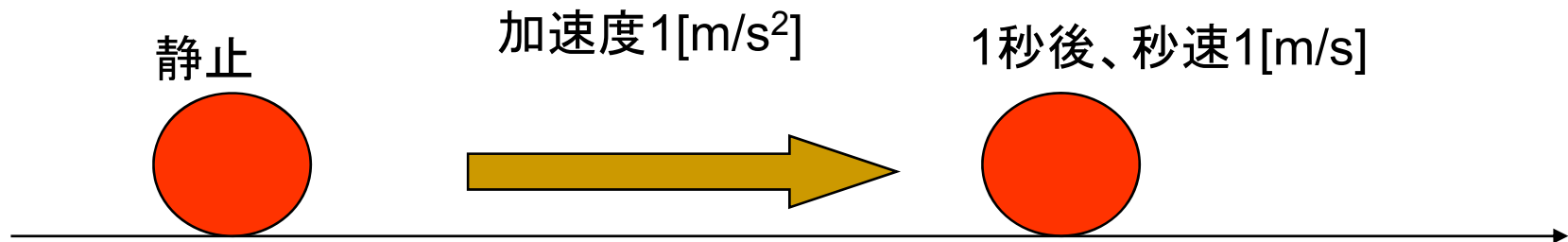
特殊相対論 ⇒ 光速に近い速さの運動

- 光速度不変の原理 ⇒ 光の速度は一定
 $c = (\text{光の速度}) = 3.0 \times 10^8 [\text{m/s}]$
- 4次元時空 ⇒ 時間と空間の絡み合った「時空」は4次元
- 質量エネルギー ⇒ 光速に近づくと加速しにくい
質量エネルギー : $E[\text{J}] = mc^2[\text{J}]$

エネルギーの単位について

ニュートンの運動方程式： $F=ma$

$F[\text{N}]$ =力、 $m[\text{kg}]$ =質量、 $a[\text{m/s}^2]$ =加速度

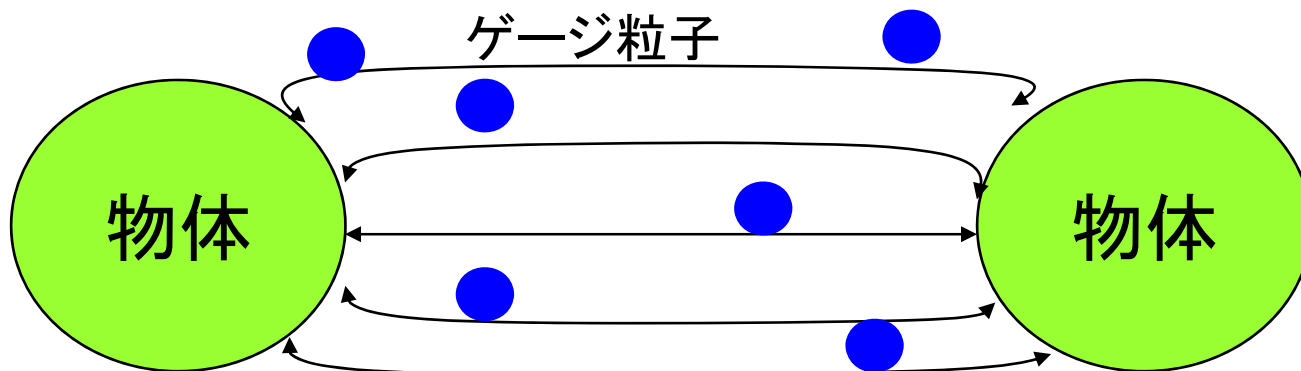


- $1[\text{N}] \Rightarrow 1\text{kg}$ の物体に $1[\text{m/s}^2]$ の加速度を与える力
- $1[\text{J}] \Rightarrow$ 物体が $1[\text{m}]$ 走る間、 $1[\text{N}]$ の力をかけて得られる
=0.24[cal] エネルギー

自然界の4つの相互作用

重力、弱い力、強い力、電磁力

重力以外 ⇒ 標準模型で記述



- クォーク [フェルミオン] ⇒ 3世代構造
物質の最小構成要素
- ゲージ粒子 [ボゾン] ⇒ 力を媒介

§ 2-重力について

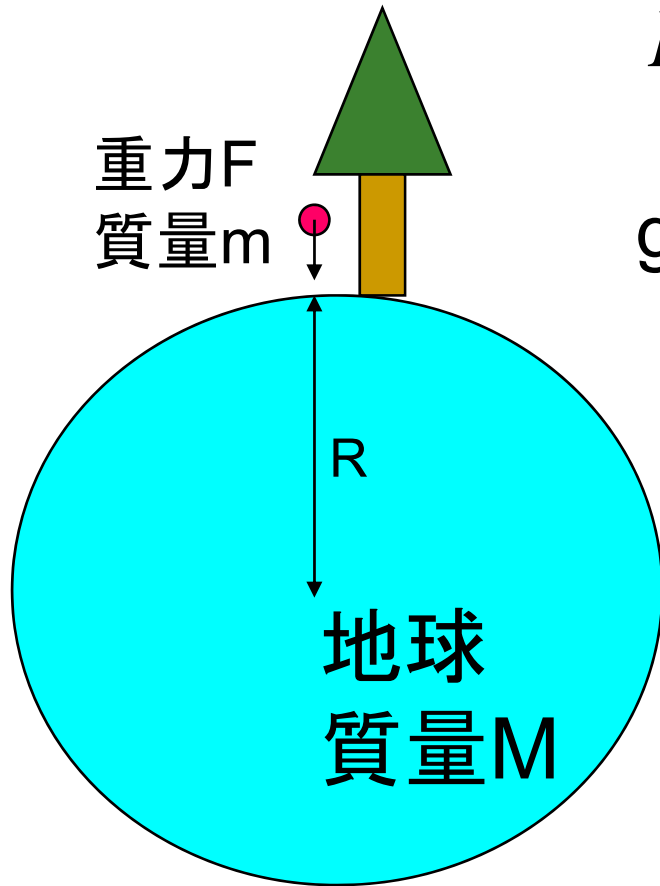
17世紀: ニュートンによる万有引力の発見



「ぐんまフラワーパーク」にある
ニュートンの林檎の木の写真

物体(林檎)と地球の間に、万有引力が働く。

万有引力 \Rightarrow 距離の2乗に反比例



$$F = \frac{GmM}{R^2} \quad \bullet G=(\text{万有引力定数})$$

$g=[\text{地球上の重力加速度}]$

$$F = mg$$

$$g = \frac{GM}{R^2} = 9.8[m/s^2]$$

[参考] 地球以外の重力定数の値

重力の強さ ⇒ 地球上とは異なる

	地球	月	火星	金星
半径 (地球比)	1	0.27	0.53	0.95
質量 (地球比)	1	0.01	0.11	0.82
重力加速度 g [m/s ²]	9.80	1.63	3.69	8.87



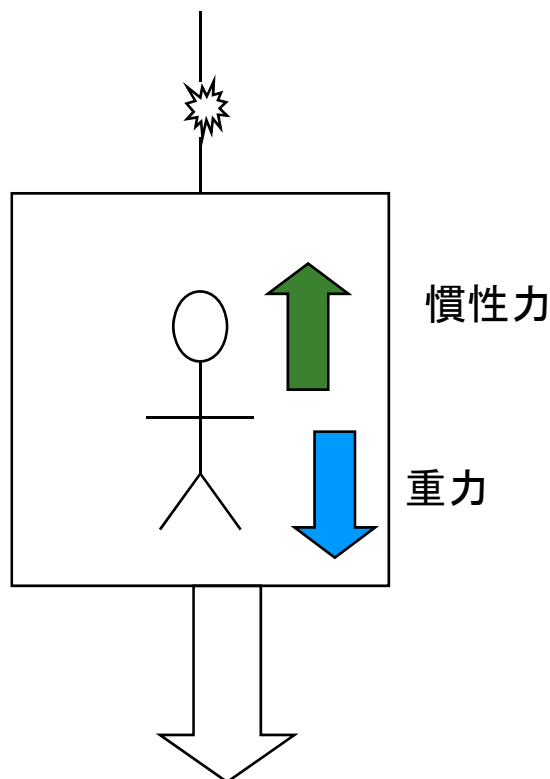
余市宇宙記念館のサイトより引用
「月と火星の重力を体験」

1916年：一般相対論

アインシュタインの「生涯最高のアイディア」

(glücklichste Gedanke meines Lebens)

【落下する箱の中では、重力は消える。】



慣性力と重力は打ち消しあう

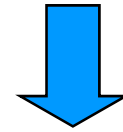
【等価原理】

慣性力と重力は等価

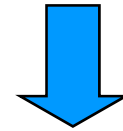
等価原理 ⇒ 重力によって光が曲がる



ロケットが加速
⇒ 光の軌道が曲がる



もし、重力と慣性力が等価なら

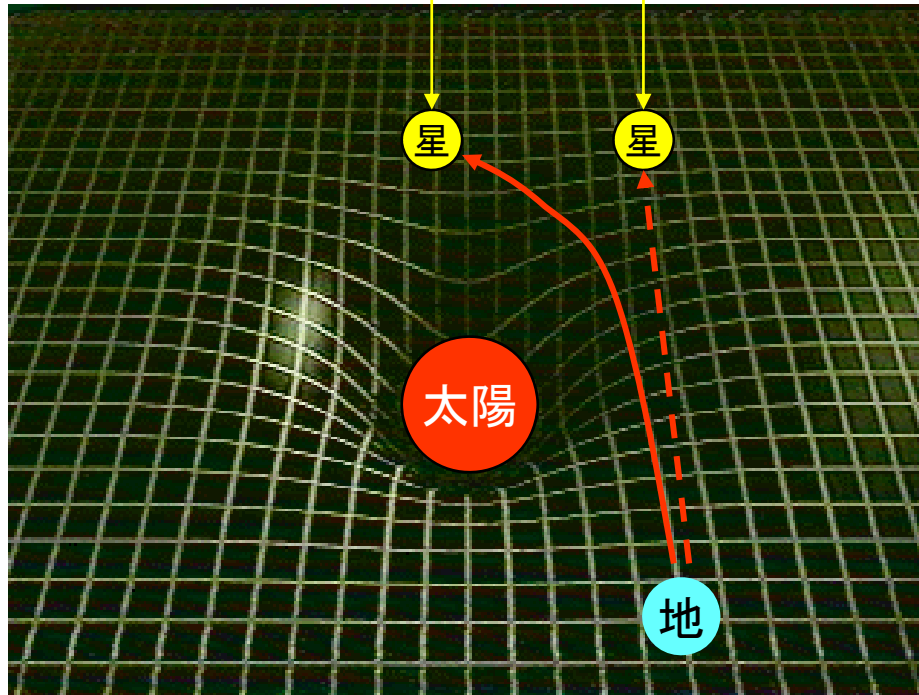


重力が光を曲げる！

1919年：アーサー・エディントンの実験

実際の位置

見かけの位置

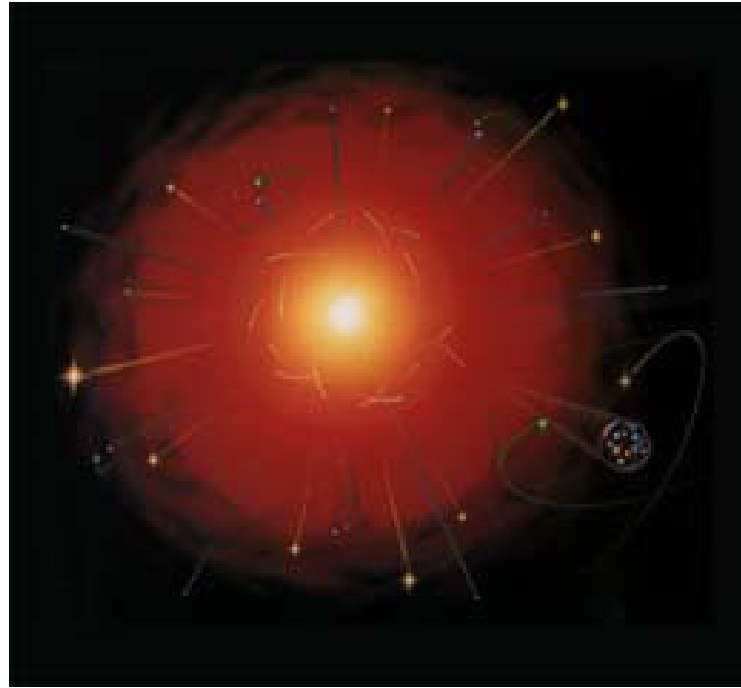


<http://homepage2.nifty.com/einstein/einstein.html> より引用

重力が光を曲げることを実証

重力は「空間の歪み」が引き起こす力

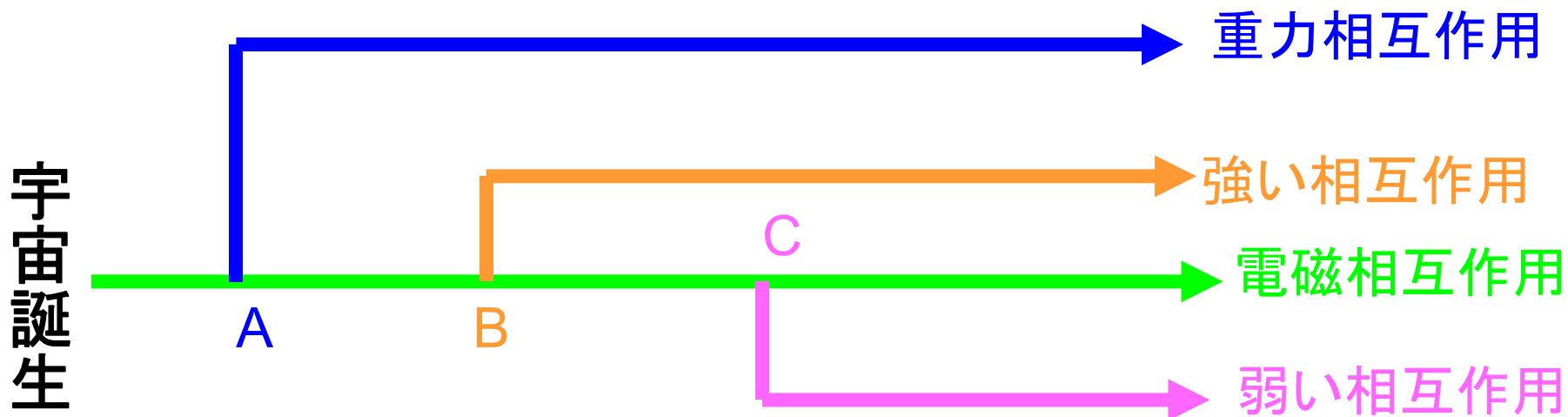
1948年: ガモフによるビッグバン宇宙論



<http://www.kek.jp/kids/class/cosmos/bigbang.html>より引用

- 宇宙の始まり⇒ビッグバン(約137億年前の高温高密度の大爆発)
- 宇宙の終わり⇒ビッグクランチ(宇宙の収縮)

宇宙初期では、力は元々一つだった

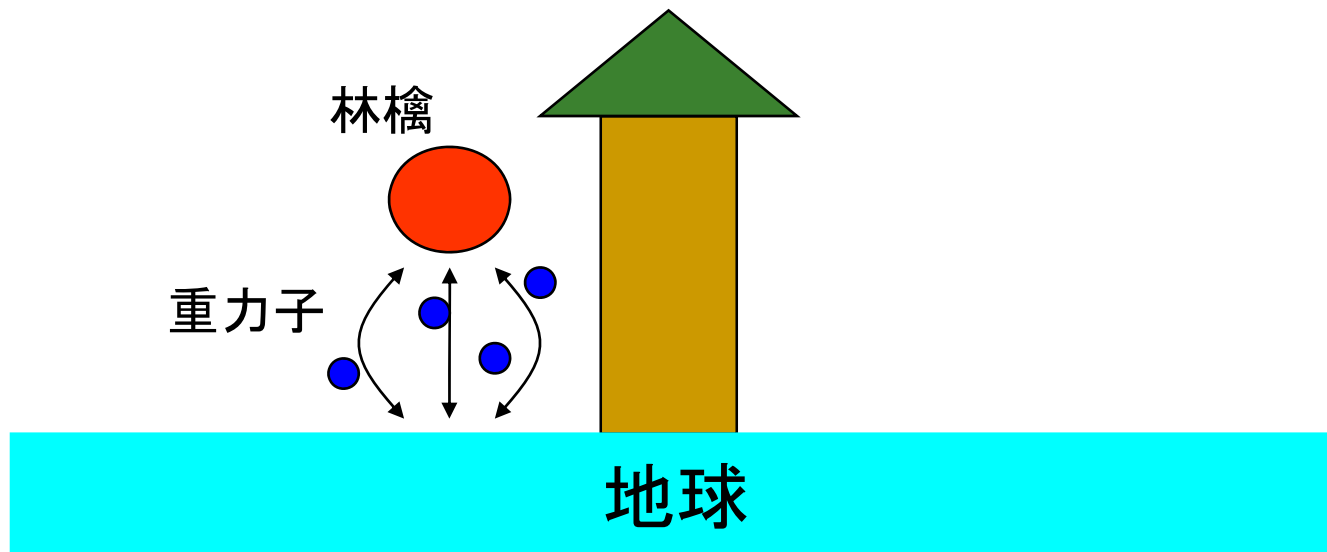


	A	B	C
年齢(秒)	10^{-43}	10^{-36}	10^{-11}
大きさ(m)	10^{-35}	10^{-30}	10^{10}
温度(K)	10^{32}	10^{28}	10^{15}

宇宙誕生の謎 ⇒ 重力を含んだ統一理論

重力の統一理論を構築する試み

重力相互作用 \Rightarrow 重力子の交換



重力の点粒子による記述 \Rightarrow 無限大の発散

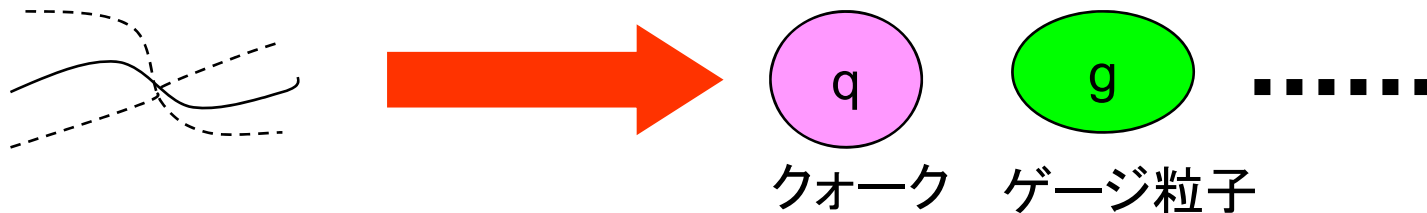
§ 3-超弦理論について

超弦理論: 4つの相互作用を統一的に記述

標準模型: *広がりを持たない点粒子*

超弦理論: *1次元の紐*

粒子 ⇒ 超弦の振動
(音階 ⇒ バイオリンなどの弦の振動)

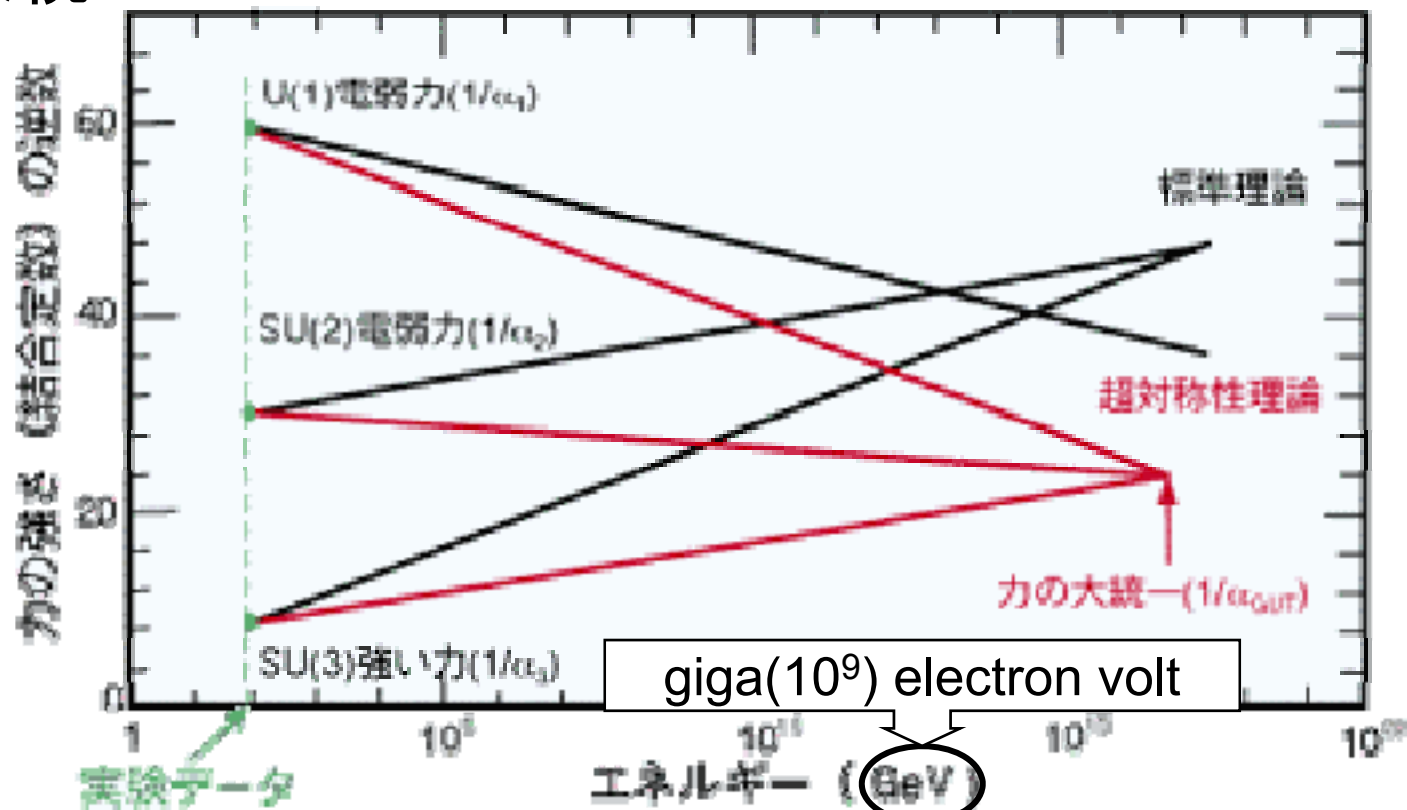


超弦理論の「超」⇒超対称性

超対称性



力の大統一



<http://www.kek.jp/kids/class/particle/> より引用

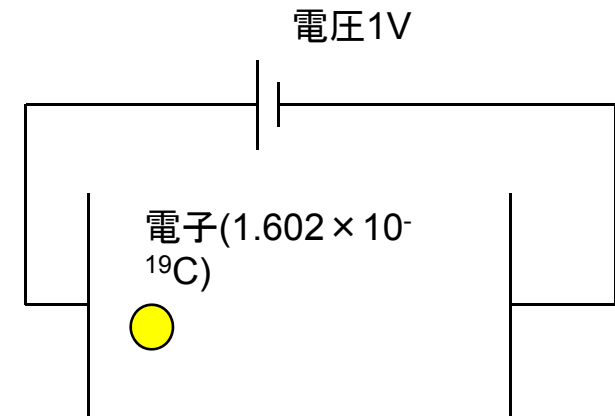
超対称性標準模型 ⇒ 強い、弱い、電磁相互作用を統一

超対称パートナー ⇒ 未発見 ⇒ 次世代加速器に期待

LHC : スイスにある周長27kmの巨大加速器。最高のエネルギー 1.4×10^4 GeV

エネルギーの単位

1eV(electron volt) = 1.602×10^{-19} [J]
電子に1Vの電圧をかけて得られる
エネルギー

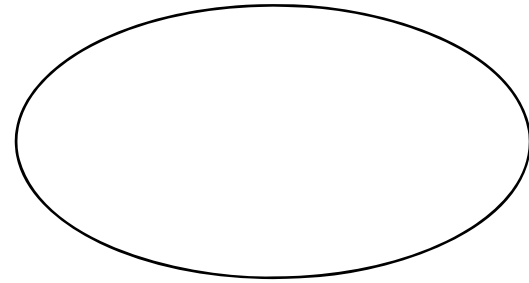
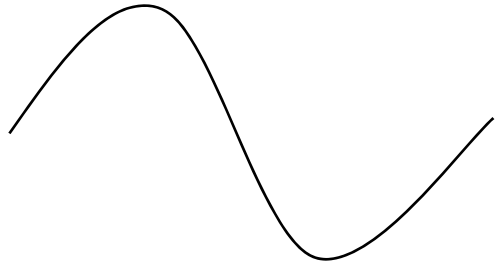


電子の質量: $5.11 \times 10^5 \text{eV} = 9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$ とは？

アインシュタインの質量公式: $E=mc^2$

(c =(光の速度)= $3.0 \times 10^8 \text{m/s}$)

$$\text{換算公式 : } 1\text{eV} = 1.78 \times 10^{-36} \text{kg}$$



開弦 ⇒ 重力子以外の
ゲージ粒子など

- 光子 [電磁相互作用]
- グルーオン[強い相互作用]
- W,Zボゾン[弱い相互作用]

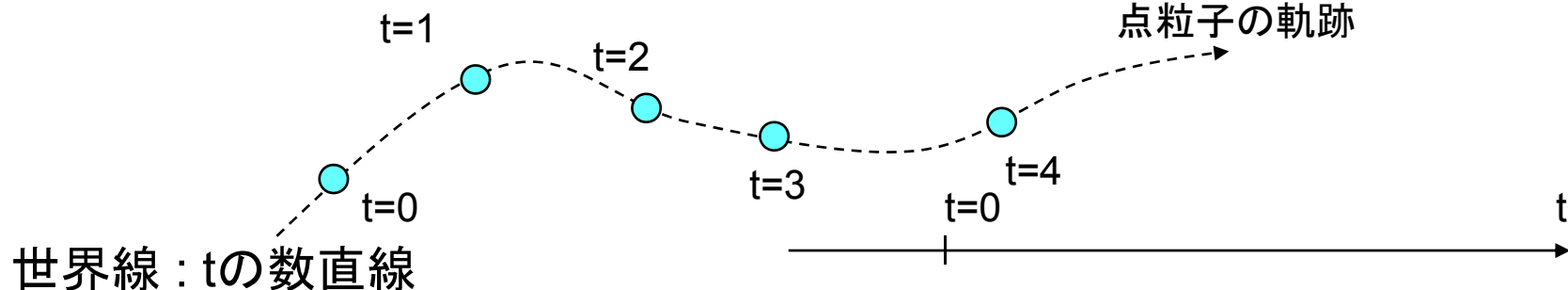
閉弦 ⇒ 重力子など

超弦理論 ⇒ 4種類全ての相互作用

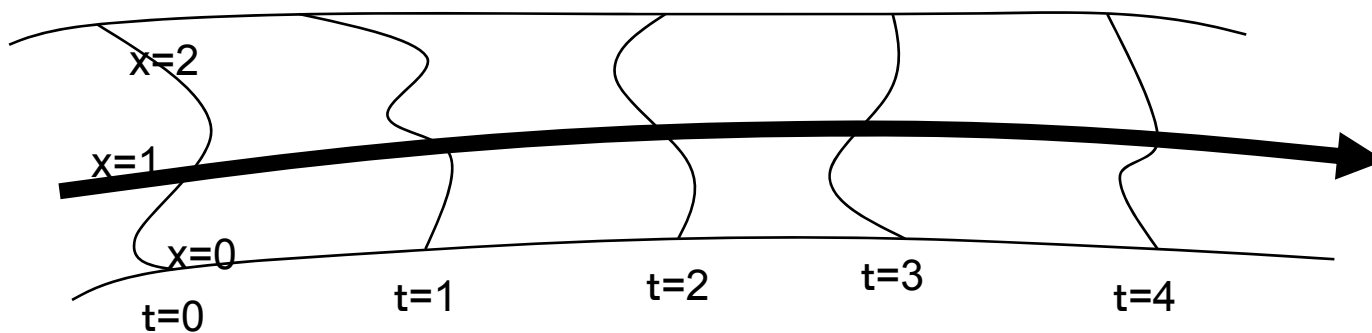
弦理論の世界面 \Rightarrow 弦が運動する2次元面

点粒子 \Rightarrow 4次元時空の粒子

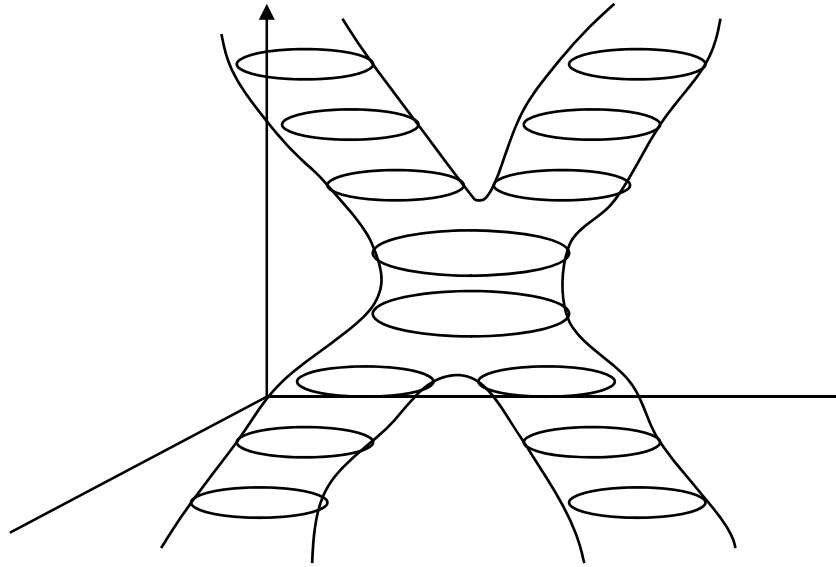
時間 \downarrow
空間 \downarrow
 $(x_0(t), x_1(t), x_2(t), x_3(t))$



1次元的な弦 \Rightarrow t と x の2つの方向が必要

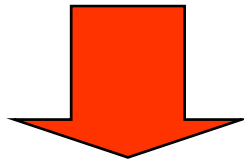


t と x の掃く領域 \Rightarrow 世界面をなす



2つの閉弦 \Rightarrow 1つにくっつく \Rightarrow 再び2つに分離

弦の反応過程 \Rightarrow 滑らか



重力エネルギーの発散が無い

日常的な弦との比較

	バイオリン	ストリング
長さ	32.5cm	10^{-35} m
1mあたりの質量	0.7g	10^{24} kg
振動の速さ	290m/s	3×10^8 m/s
振動エネルギー	10^{-3} J	10^8 J

← 地球の重さ
← 光の速さ

(バイオリンは、A440「ラ」の音階の数値)

弦の振動エネルギー 10^8J

$10^8\text{J}=10^{18}\text{GeV} \gg$ (通常の素粒子の質量)

$10^{18}\text{GeV} \Rightarrow$ (重力相互作用) \div (他の相互作用)

弦の長さ: $l_p = 10^{-35} \text{ m}$ [プランク長]

加速器実験による、超弦理論の実証は困難

(冥王星の軌道よりも大きい加速器)

LHC : 最高のエネルギー $1.4 \times 10^4\text{GeV}$

数学的整合性を拠り所に研究

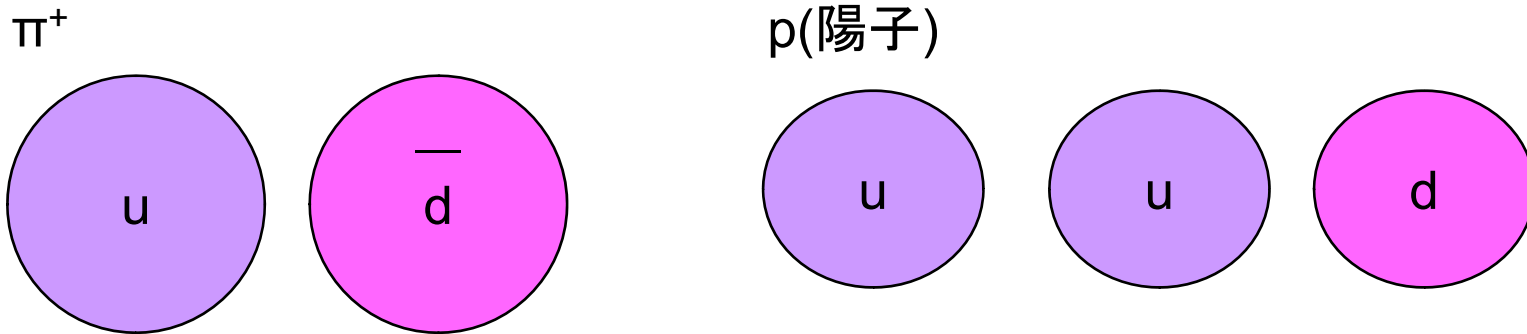
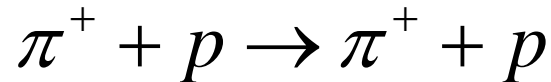
実験に基づかない

1. ハドロンのモデルとしての弦理論 (1960年代後半)

長さ 10^{-15}m の弦 (現代の超弦は 10^{-35}m)

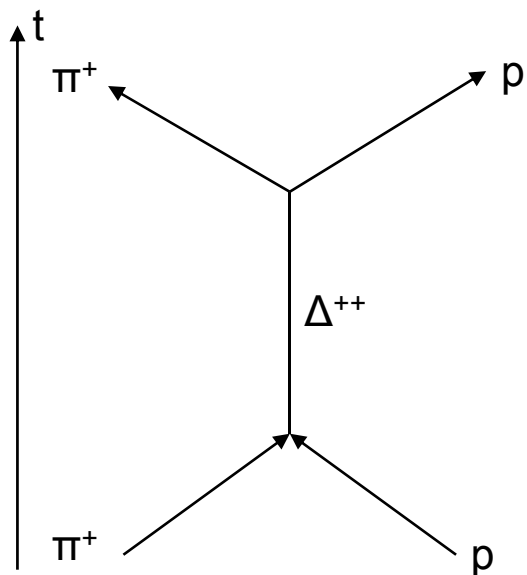
(ハドロン \Rightarrow 強い相互作用をする粒子)

π^+ 中間子と、 p (陽子)を加速器で衝突



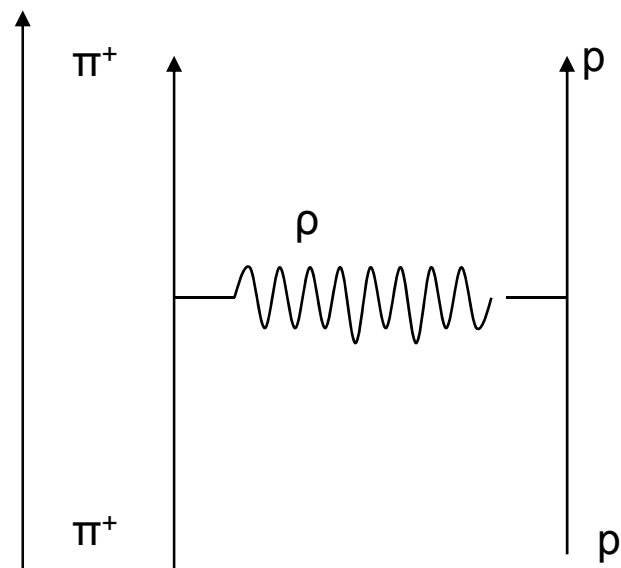
\bar{d} は d の反粒子(電荷の正負が逆の粒子)

2種類の反応過程:



s-チャネル

$$\Delta^{++} = u+u+u$$

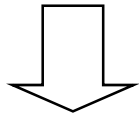


t-チャネル

$$\rho = (u\bar{u} - d\bar{d}) / \sqrt{2}$$

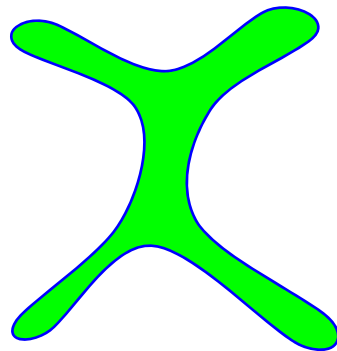
$\pi^+ + p \rightarrow \pi^+ + p$ 反応における物理量の計算

理論計算 \neq 実験値

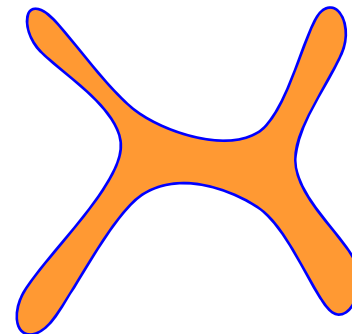


s、t-チャネルを二重に足しあげ
両者は「双対」

弦理論で双対性を説明



s-チャネル



t-チャネル

当時の弦理論の「問題点」

邪魔な粒子を取り除けない



弦理論は一旦挫折



この粒子は、実は『重力子』だった

2. 超弦理論による重力の統一(1980年代)

1984年 (J.シュワルツ等)

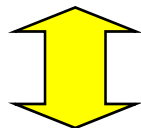
- 超弦理論 ⇒ 閉弦(重力子)
- 物理量の発散が無い

超弦理論 ⇒ 重力を含めた統一理論の候補

時空の次元

超弦理論 ⇒ 10次元

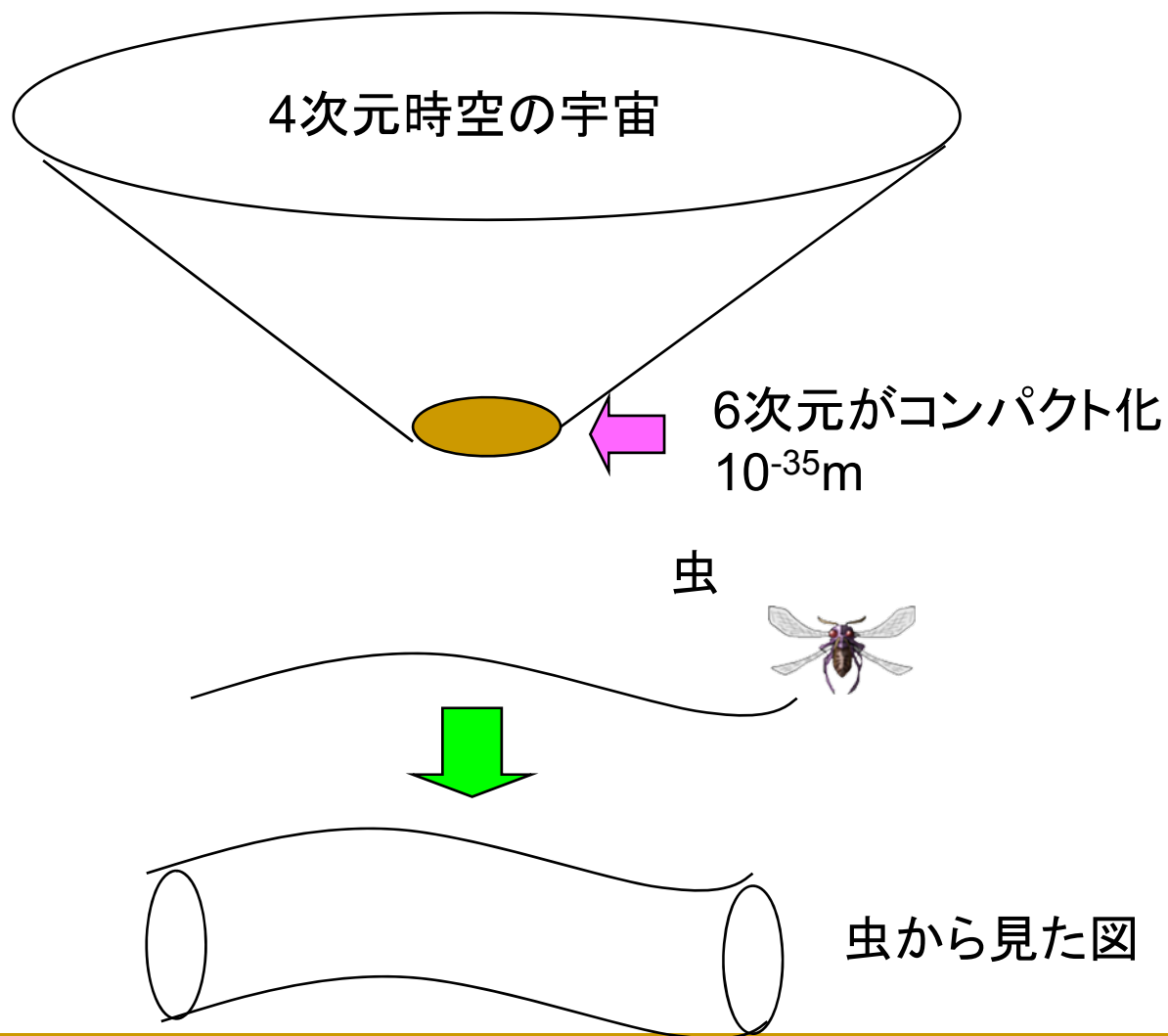
数学的整合性



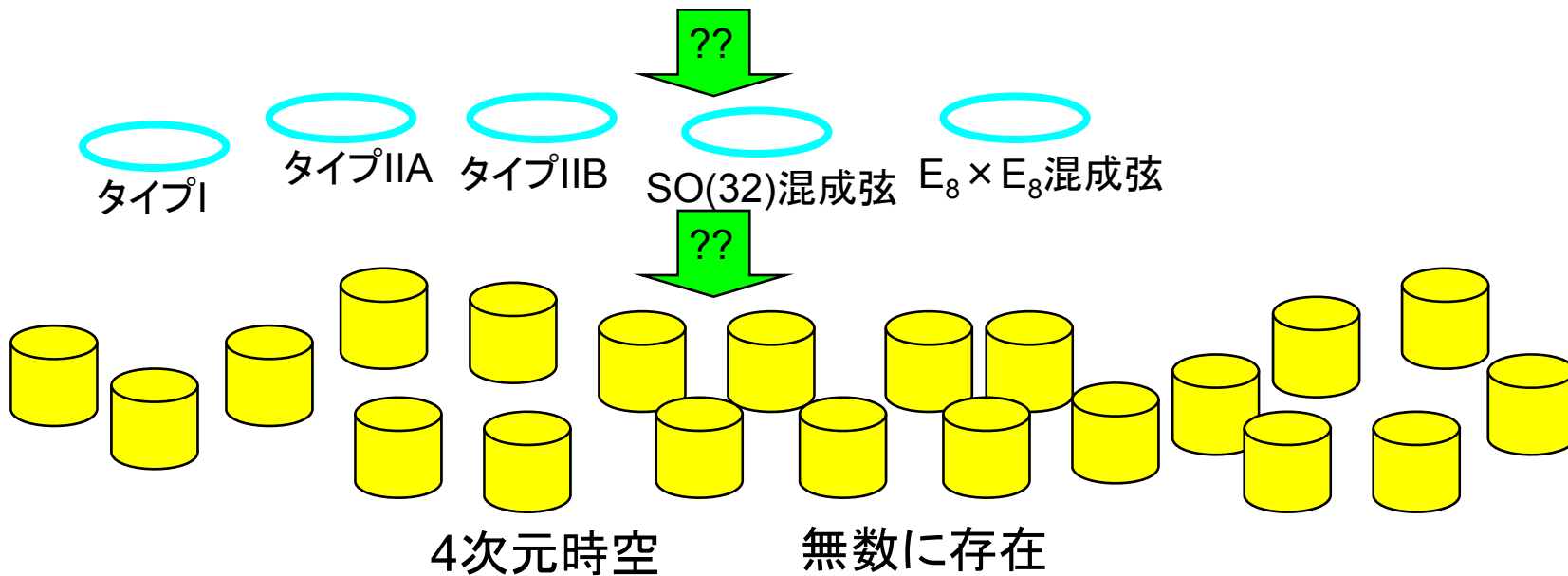
標準模型 ⇒ 4次元

観測事実

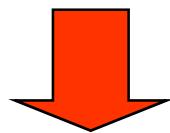
時空が4次元 ⇒ 残りの6次元がコンパクト化



10次元の超弦理論



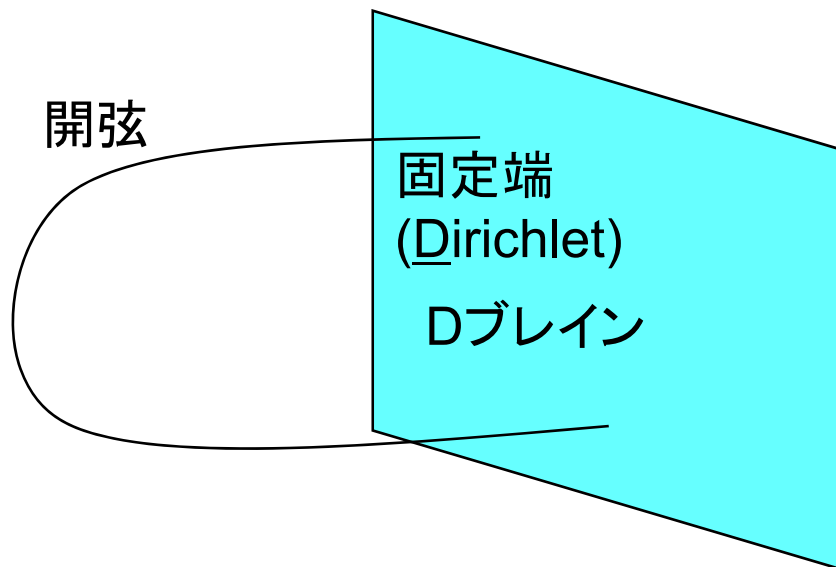
どれが本当の時空なのか分からない



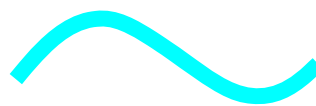
より基本的な定式化が必要

3. Dブレーンの発見

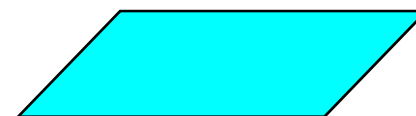
1995年：J.ポルチンスキー



D0ブレーン(点)

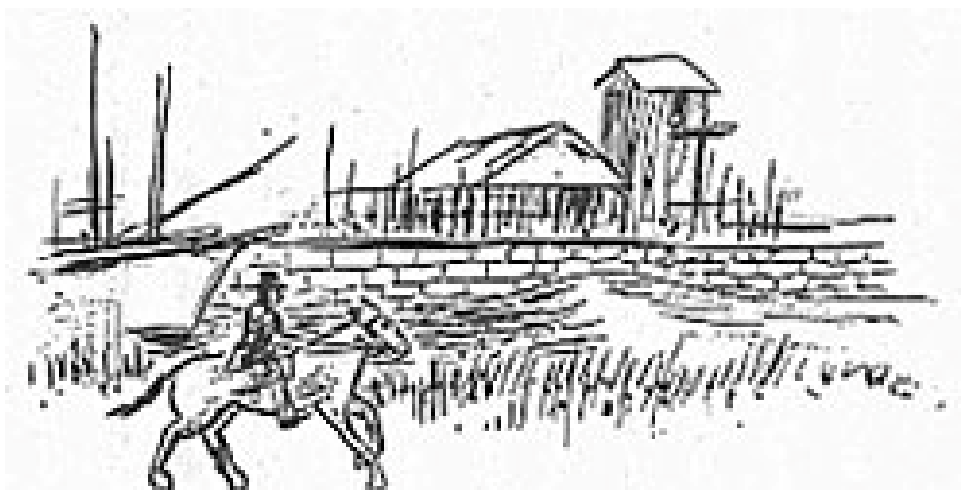


D1ブレーン(紐)



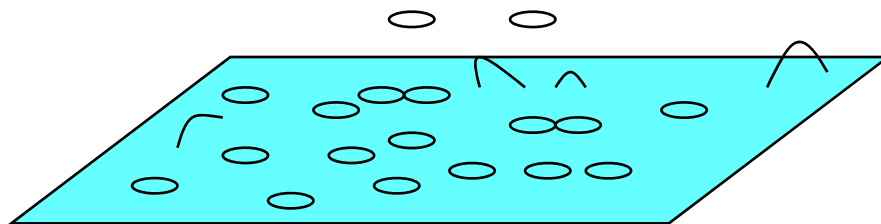
D2ブレーン
(膜=membrane)

Dブレイン ⇒ 孤立波



運河の盛り上がった水の進行。 <http://www.isis.ne.jp/mnn/senya/senya0848.html>より引用

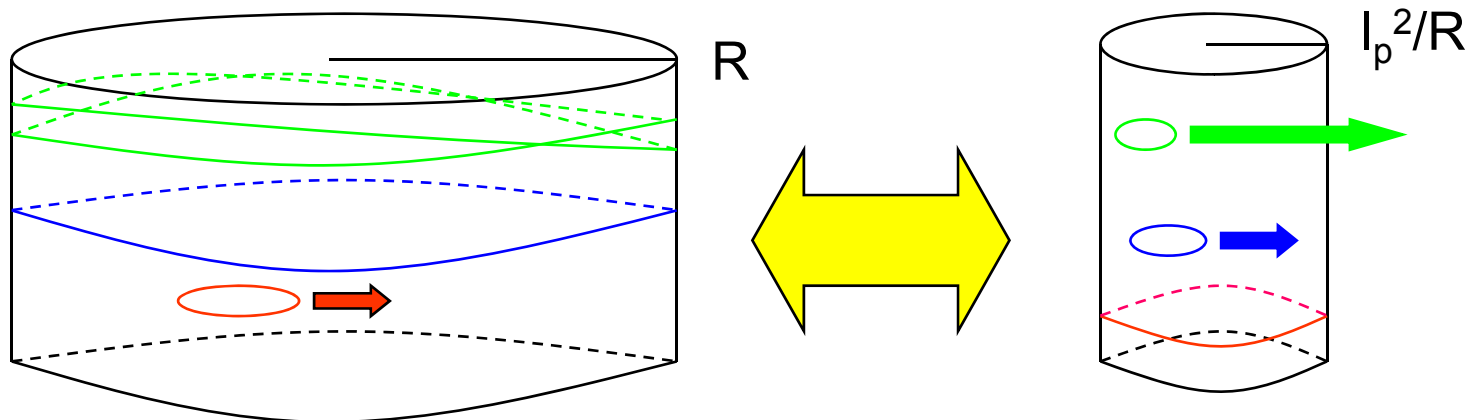
Dブレイク ⇒ エネルギーの塊



超弦理論における双対性

T-双対性

- 巻き付き数 \Leftrightarrow 速度
- 巻き付く半径 : $R \Leftrightarrow l_p^2 / R$

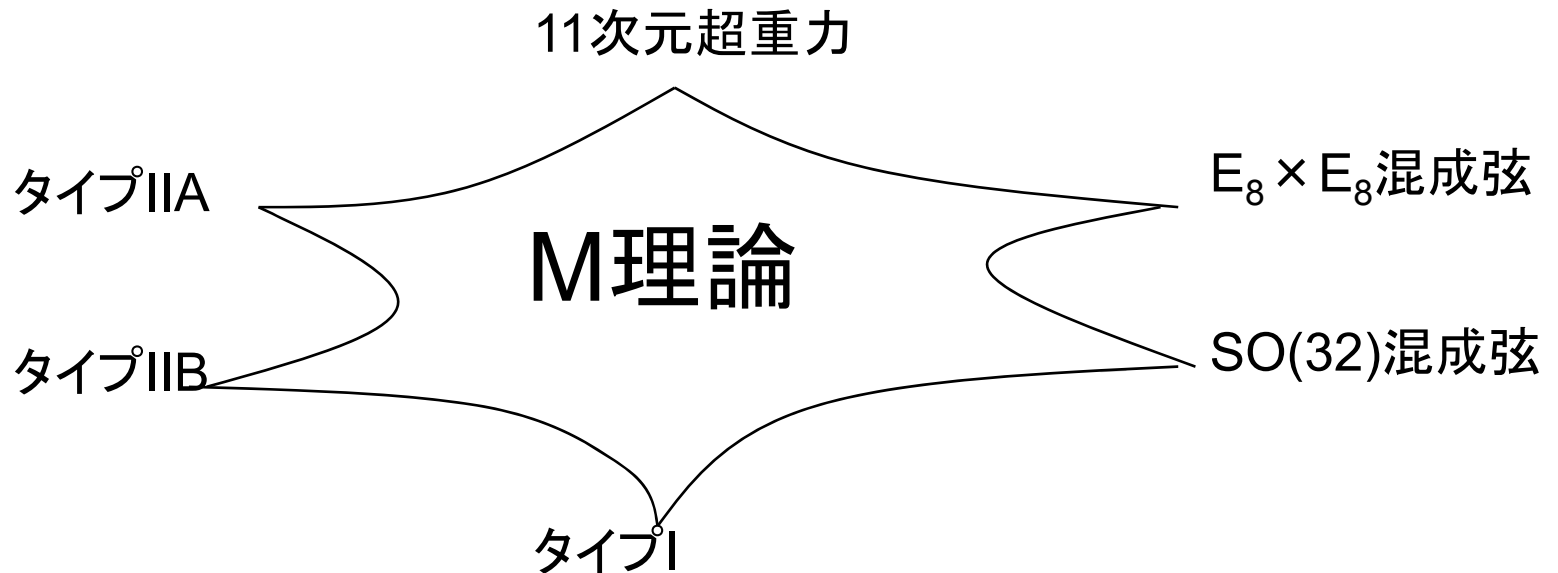


S-双対性

相互作用の強さ : 大きい \Leftrightarrow 小さい

M理論について

5種類の超弦理論 ⇒ 繋がっている



M理論の「M」とは？ ⇒ matrix? mother? mystery?

次の課題 ⇒ より基本的な定式化

4. 行列モデルによる超弦理論の定式化 (1990年代)

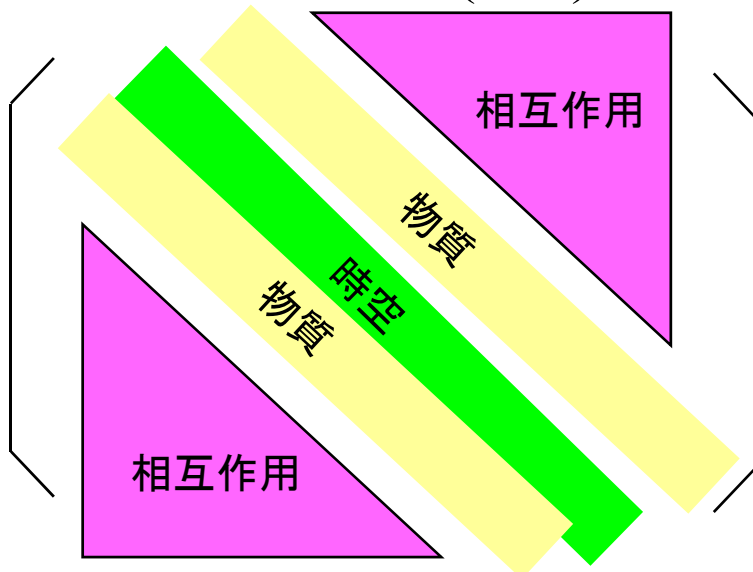
IIB行列モデル(1996年)

茨城県つくば市のKEKで生まれた
(石橋、川合、北澤、土屋)

$N \times N$ 行列 \Rightarrow 弦、時空、相互作用

N が大きい極限 \Rightarrow 超弦理論を再現

(*) 2×2 行列 : $A = \begin{pmatrix} 3 & 4 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}$



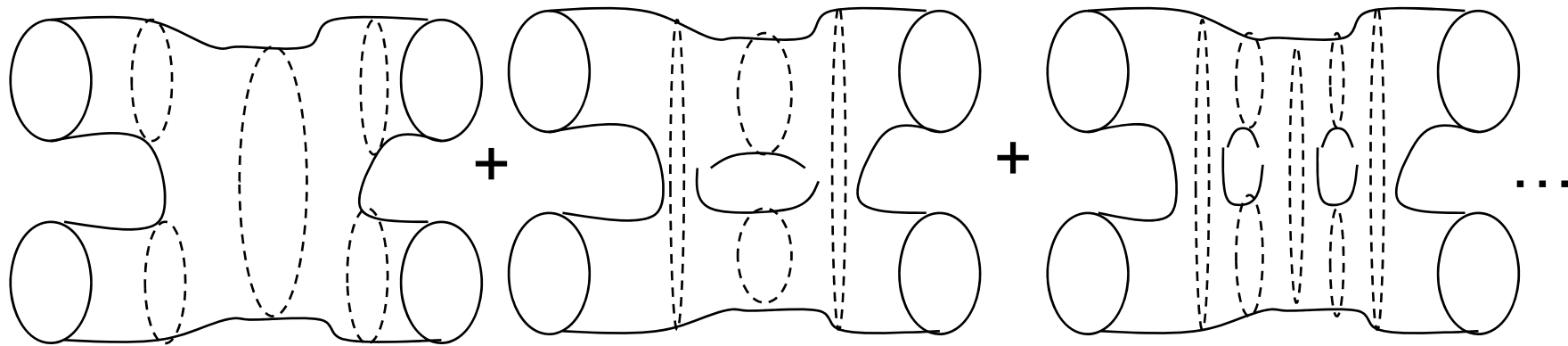
KEKの写真。 <http://pyon.x0.com/Photo/36.htm>より引用。

**超弦理論のより基本的な
定式化の候補**

物質、時空の生成

1990年代前半:

時空が1次元以下の弦理論 \Rightarrow 行列模型で記述

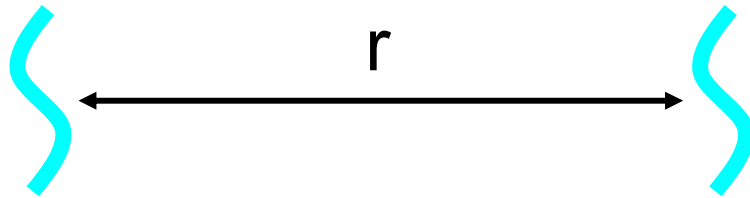


行列模型 \Rightarrow より基本的な定式化？

IIB行列模型の特徴

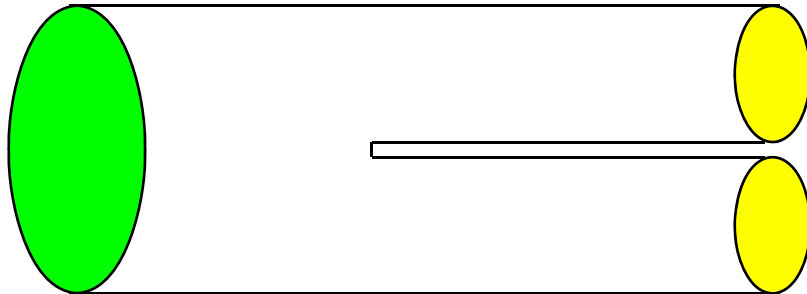
超対称性の構造 \Rightarrow 重力子の存在

D1ブレーン間の相互作用

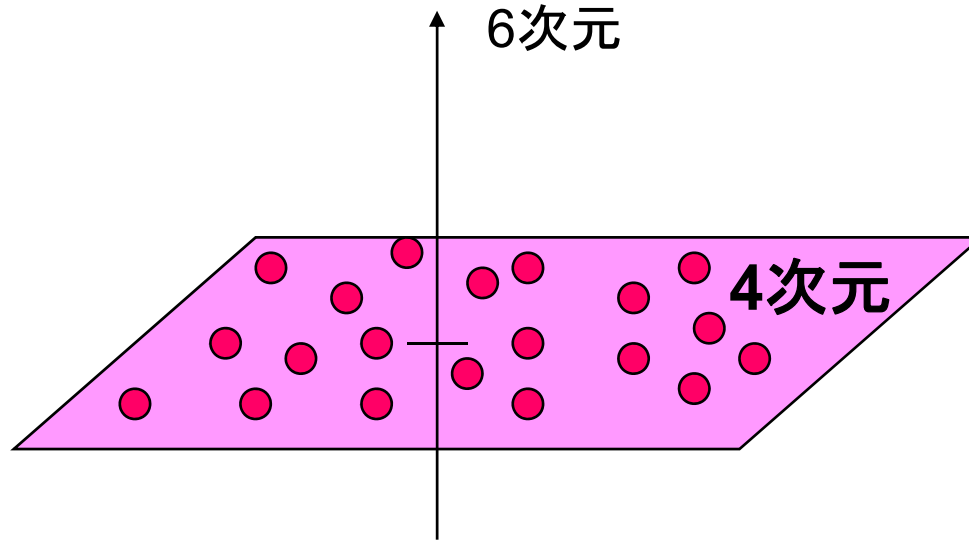


$1 / r^6$ に比例 \Rightarrow 超弦理論の結果を再現

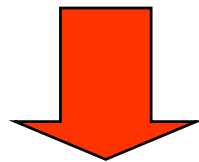
弦の相互作用を再現



行列模型 \Rightarrow 何故4次元時空？



時空の分布 \Rightarrow 4次元に潰れる？



4次元時空が出る状況証拠

現在進行中の行列模型の研究

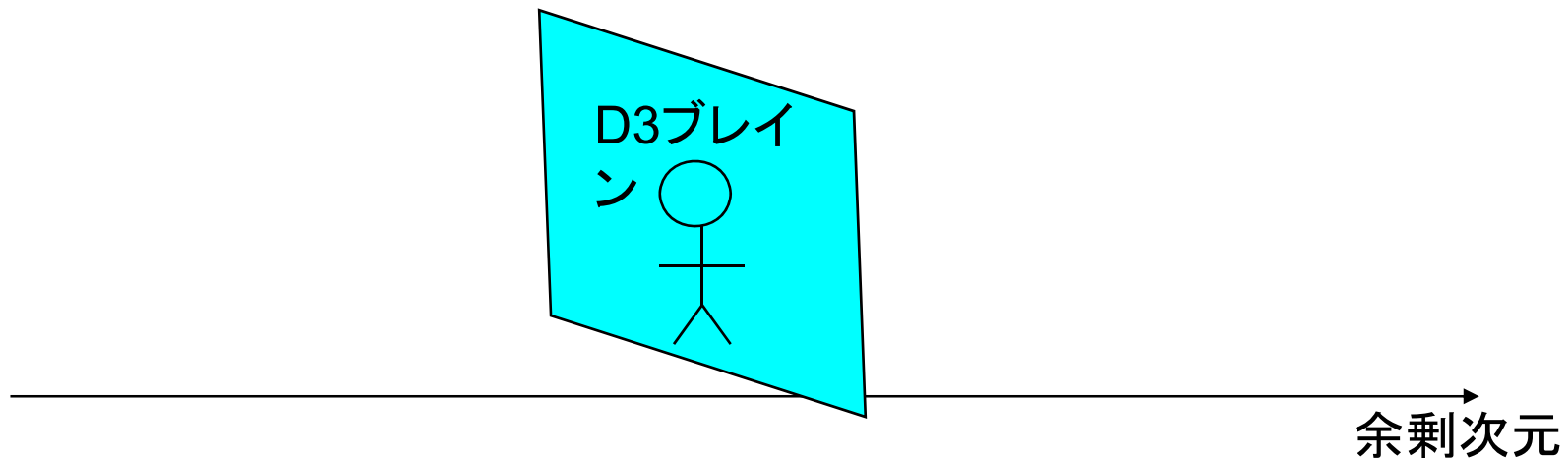
- 行列模型 ⇒ 自然界の相互作用の対称性
曲がった時空 [重力]
ゲージ粒子の対称性
- 行列模型 ⇒ 4次元時空



KEK内部で数値シミュレーションに用いているクラスターマシンシステム

5. ブレインワールドシナリオ —我々は4次元の膜に住んでいる—

4次元時空 ⇒ **高次元時空中のD3ブレイン**



階層性問題の解決案

- 100 GeV : 電磁力 + 弱い力
- 10^{18} GeV : 重力 + (その他3つの力)

この格差を自然に説明出来るか？ ⇒ 余剰次元の体積

§ 4-まとめ

これまでの重力理論・弦理論の発展の年表

- 17世紀：ニュートンによる万有引力の発見
- 1916年：アインシュタインによる一般相対論の提唱
- 1919年：エディントンによる重力が光を曲げる効果の実験的検証
- 1948年：ガモフによるビッグバン宇宙論
- 1960年代後半：強い相互作用の理論としての弦理論

- 1980年代前半：超弦理論による重力の統一
- 1990年代後半：Dブレーン、行列模型

$$S = \frac{1}{g^2} Tr(\frac{1}{4} [A_\mu, A_\nu]^2 + \frac{1}{2} \bar{\psi} \Gamma^\mu [A_\mu, \psi])$$
 石橋延幸、川合光、北澤良久、土屋麻人

$$T = \frac{1}{2} : jj :$$
 菅原寛孝
 (前KEK機構長)

$$\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$
 小林誠
 (前KEK素
 核研所長)
 益川敏英

"Grand cosmos & Elementary domain" (池邊教氏)。KEKの年次報告の表紙より抜粋。KEK4号館の壁のレリーフ。

今後の課題

4つの相互作用を統一出来るか？

宇宙の始まりと終わりの謎を解けるか？

ビッグバン

ビッグクランチ

超弦理論 ⇒

4次元時空、クォークの3世代、素粒子の質量、
その他諸々の物理量...