超ひも理論

究極の自然法則が見つかった？

2004年11月7日

於　京都大学

川合　光

自然法則の発展のしかた

- 基本法則を探る
  基本的なもの，基本的な力

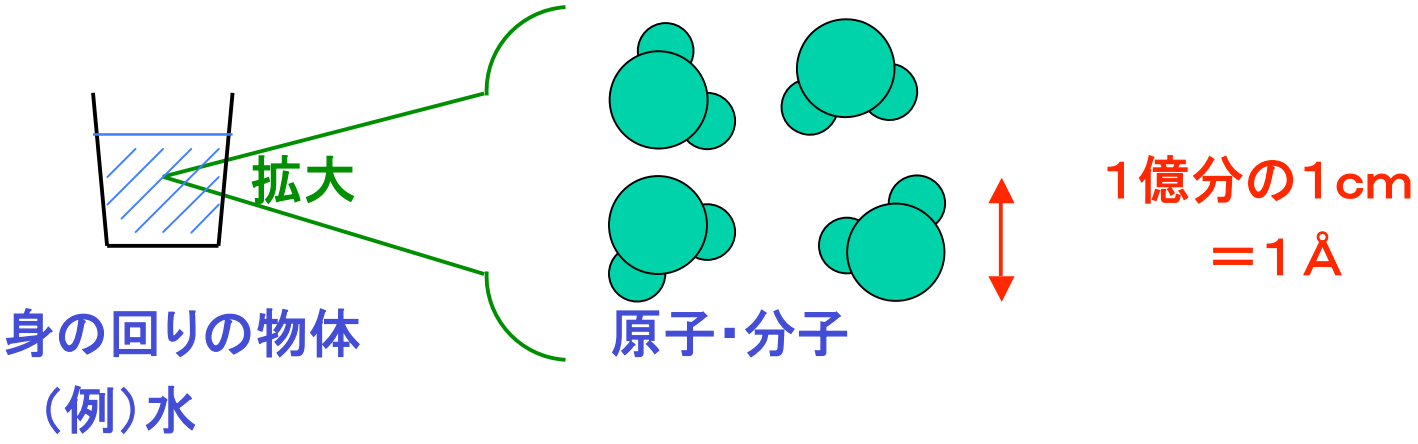
- 複雑なものの性質を探る
  個々のものの性質
    原子･分子，生命，材料科学，天体，宇宙
  統一的な性質
    熱力学，生命？，･･･

お互いに補い合いながら発展してきた
    基本法則　⇔　複雑なものの性質

この話
    基本法則の理解がどこまで進んでいるか

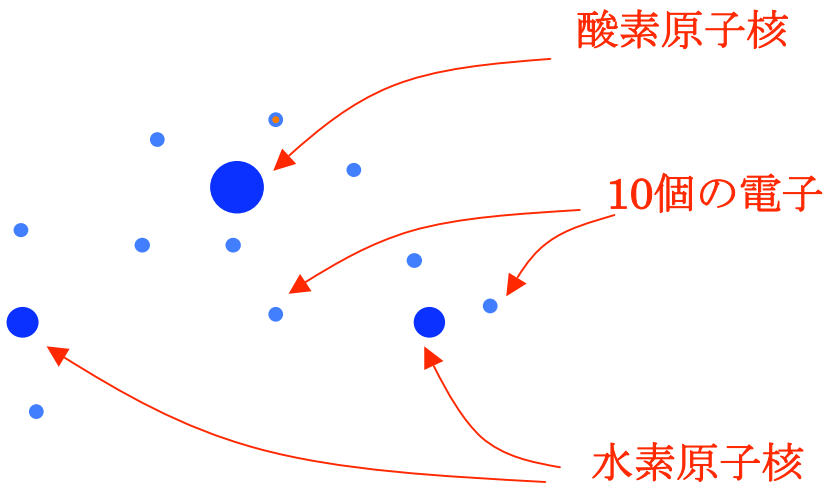
基本的な粒子と相互作用

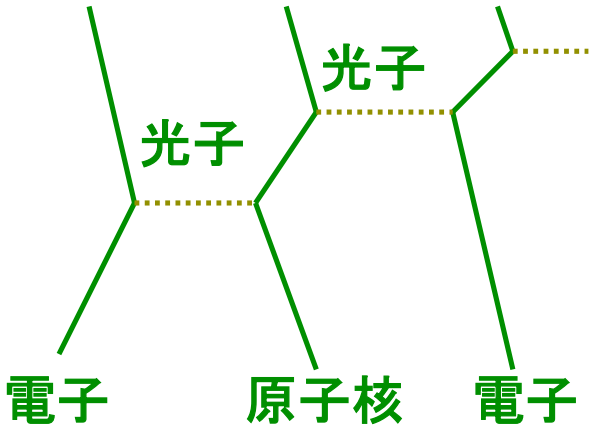
物質のより基本的な構成単位とその相互作用を調べる。



原子・分子＝原子核＋電子

電気力

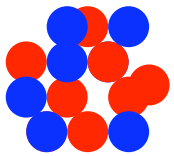




原子核を拡大してみる

原子核＝陽子＋中性子

核力

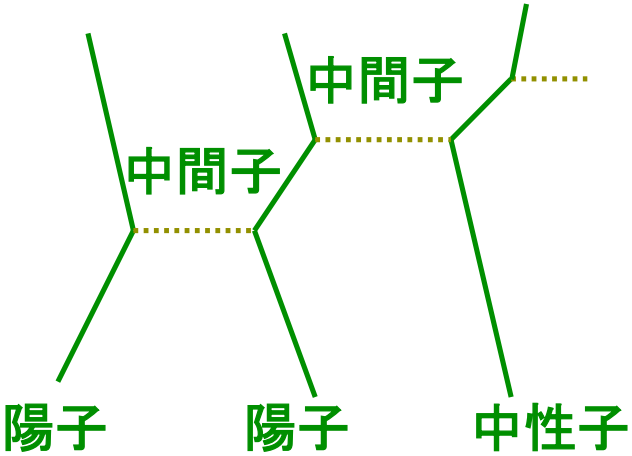


8個の陽子と8個の中性子

酸素原子核

10万分の１Å ＝ 1 fm

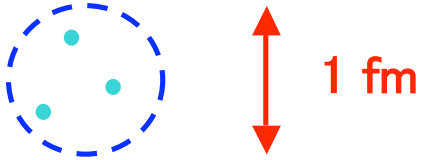
水素原子核（陽子）



陽子，中性子，中間子などをまとめてハドロンという。

ハドロンを拡大してみる

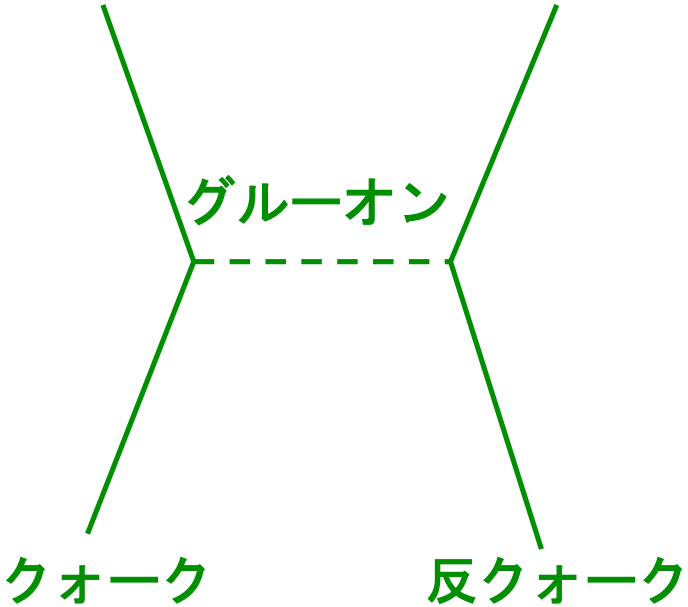
ハドロン＝ クォークや反クォークが
強い相互作用で
くっついたもの



陽子
2個のu-クォーク
1個のd-クォーク

中間子
クォークと
反クォーク

中性子
2個のd-クォーク
1個のu-クォーク



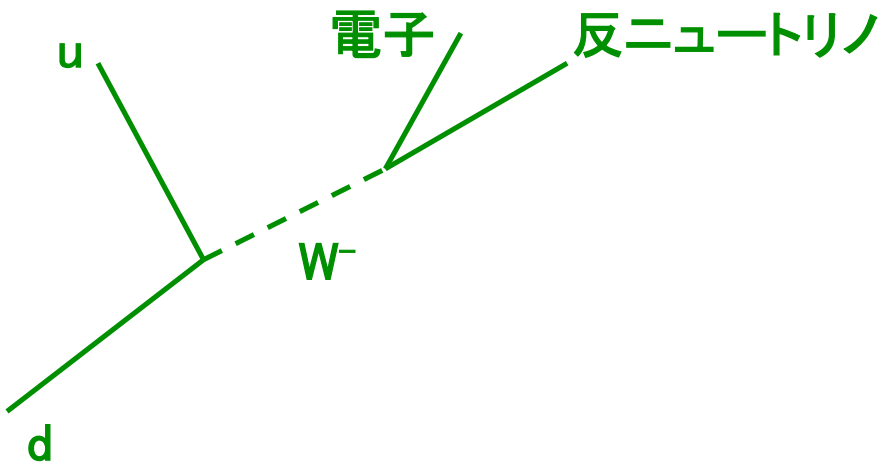
標準模型

現在、1 fm の100分の1 から 1000分の1 くらいまで細かく見えるが、
電子、クォーク、光子、グルーオンなどの拡がりは見えていない。

電磁気、強い相互作用のほかに弱い相互作用がある。

弱い相互作用の例　β崩壊

中性子　→　陽子＋電子＋反ニュートリノ



標準模型

基本的な粒子

レプトン:	電子	ミュー粒子	タウ粒子
	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ
クォーク:	d-クォーク	s-クォーク	b-クォーク
	u-クォーク	c-クォーク	t-クォーク
	↑	↑	↑
	第1世代	第2世代	第3世代

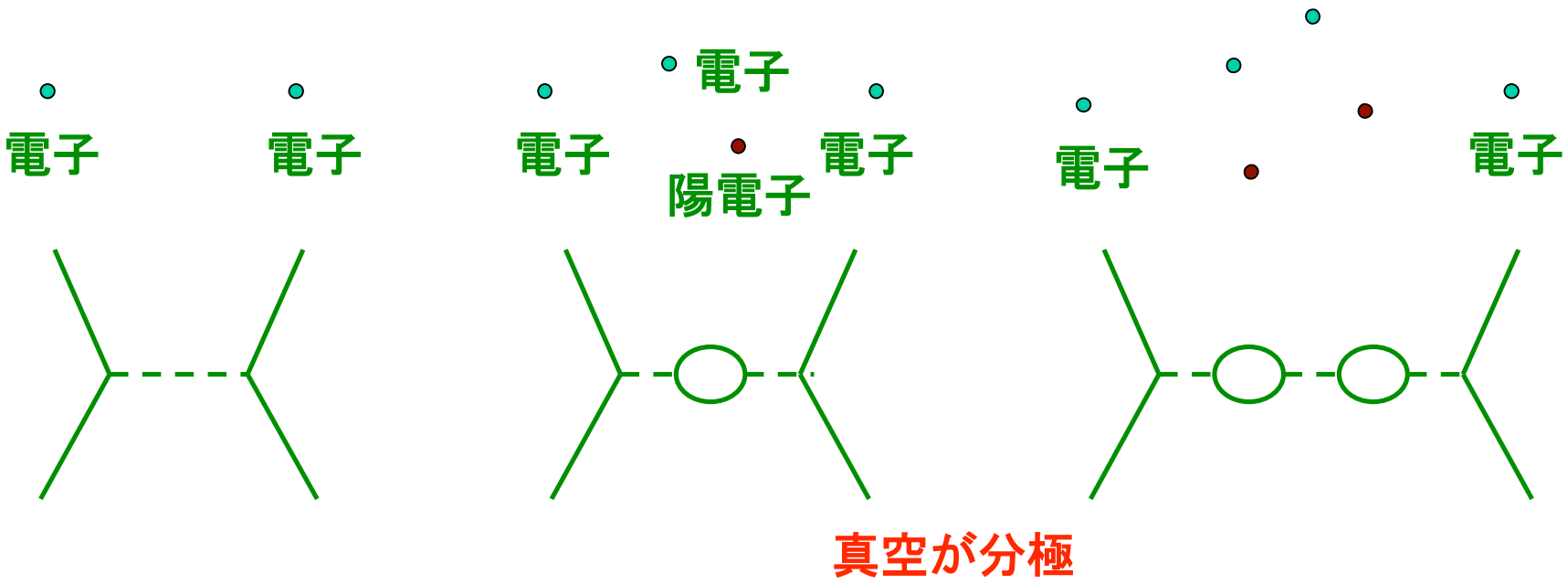
基本的な相互作用 （4つの力）

電磁場	光子	弱電磁相互作用
弱い相互作用	Wボソン， Zボソン	弱電磁相互作用
	ヒグス粒子	弱電磁相互作用
強い相互作用	グルーオン	
重力	重力子	

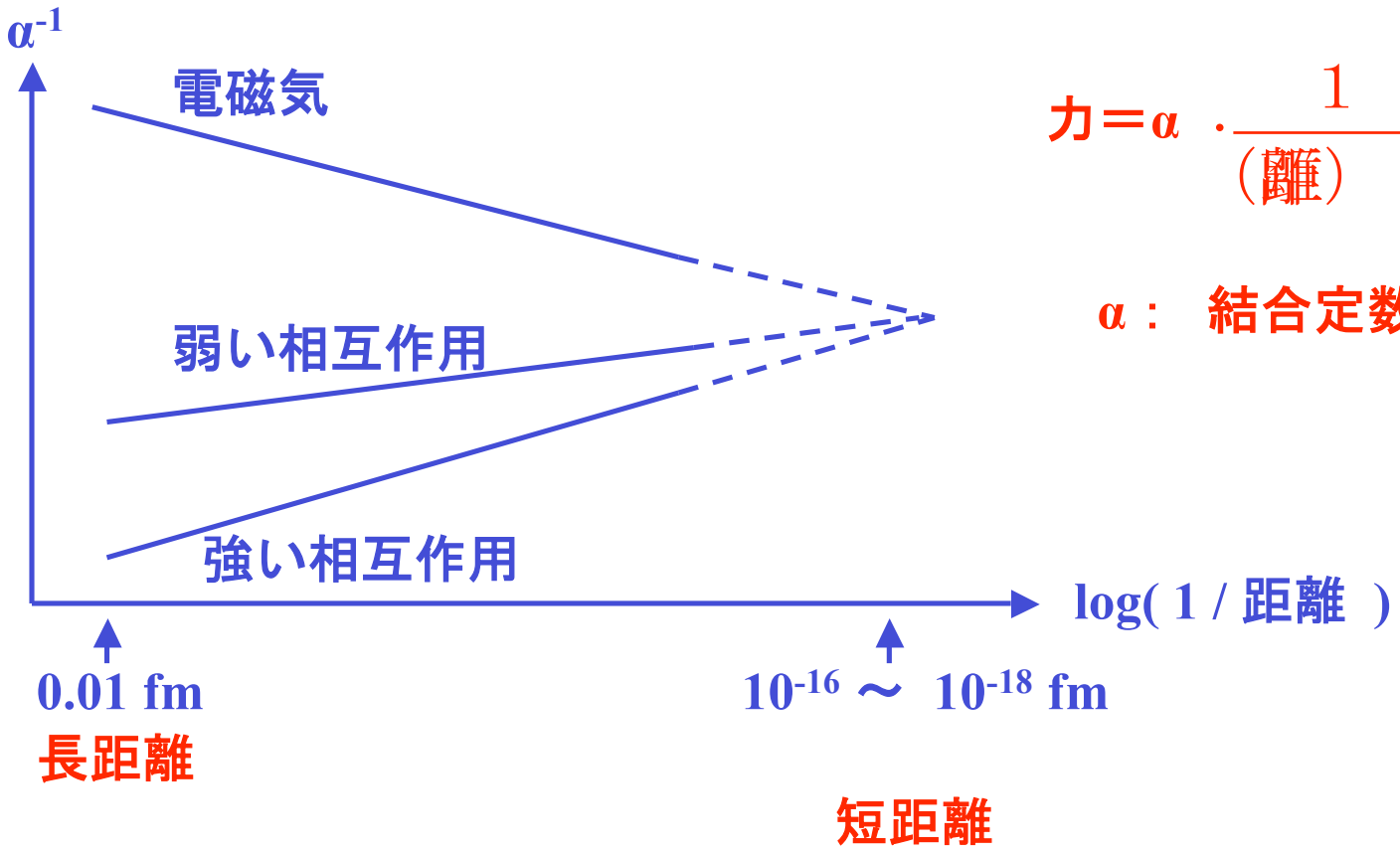
相互作用の統一

4つの力のうち、重力以外のものは非常に似ており、ゲージ理論で記述される。
しかも、それらは 10^{-16} ～ 10^{-18} fm 程度で統一されているように見える。

相互作用の強さ　　例として電気力を考える



我々が観測しているのは、真空が分極するという効果を含んだ後の力である。そのような効果を含まない、生の力を見たければ、2つの電子の間の距離をどんどん小さくしてやればよい。（これは計算できる。）



$$力 = \alpha \cdot \frac{1}{(距離)^2}$$

α： 結合定数

10^{-16} ～ 10^{-18} fm の間で3つの力は統一されると思われる。

もっと短距離にいくとどうなるか？ ⇒ ひも理論

粒子に見えていたものは実は、 大きさが10^{-16} ～ 10^{-18} fm の輪ゴムのようなもの

重力と他の3つの力の大きさの比較

q_1　　q_2　　電荷　　電気力＝ $\alpha \cdot \dfrac{q_1\, q_2}{(\text{距離})^2}$

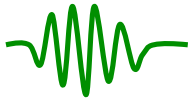
m_1　　m_2　　質量　　重力　＝ $G \cdot \dfrac{m_1\, m_2}{(\text{距離})^2}$

2つの陽子の間の力　　電気力＝10^{36} ×重力

近距離で見るとこの関係はどうなるか？

相対論　$E = mc^2$　重力の式にあらわれる m はエネルギーとともに増大。

$p = \dfrac{h}{\lambda}$



量子力学　　粒子＝波動

h :プランク定数　　p :運動量　　λ :波長

c

$E = pc = \dfrac{hc}{\lambda}$

特に、粒子の速さが光速　に近いときは、

短い距離　⇔　高いエネルギー

短い距離の現象を見るには

高いエネルギーの衝突が必要

2つを組み合わせると、

短い距離 ⇔ 高いエネルギー ⇔ m が大きい

すなわち、短い距離では逆二乗よりもずっとはやく重力は大きくなる。

実際、10^{-18} fm 程度の距離を実現するくらいの高いエネルギーでは

電気力＝重力

となることがわかる。

10^{-18} fm くらいの距離では4つの力がすべて同程度の強さになっている。基本のスケールとして 10^{-18} fm をもつものがすべての力の背後にあると期待される。

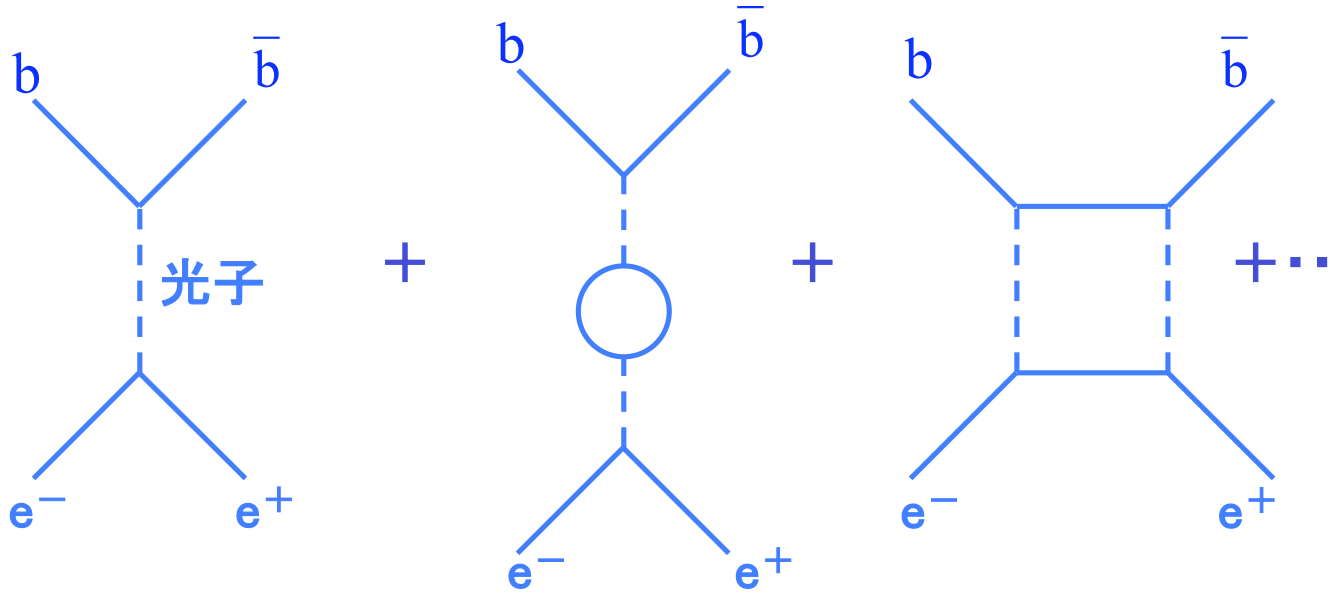
$l_P = 10^{-18}\,\mathrm{fm}$ プランクスケールとよぶ。

ゲージ理論（重力以外の3つの力）のくりこみ

古典力学　粒子は各時刻で確定した位置をもつように運動する。

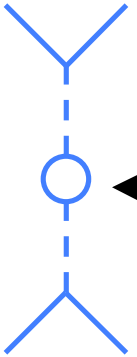
量子力学　ある始状態からある終状態へ遷移する確率振幅
＝各粒子のすべての仮想的な運動についての確率振幅の和
（確率振幅とは複素数で、その絶対値の2乗が確率を表す。）

（例）　電子＋陽電子　→　b-クォーク＋反 b-クォーク



発散の問題

途中に現れる仮想的な運動についての和を素朴にとると結果が無限大になってしまう。（途中に現れる仮想的な状態を中間状態という。）



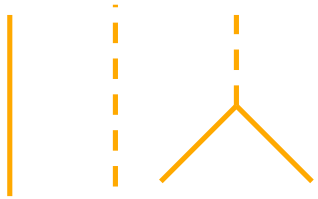
ごく短い間だけ電子・陽電子対が現れるようなプロセス.

⇒　無限大

しかしこれは光子の伝播

に対する補正であり、補正後のものが有限となるように、もとの理論を調節できる。

このように、物理的な確率振幅が有限になるように、素過程のパラメーターを調節することをくりこみという。



素過程

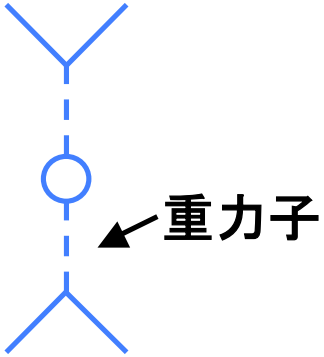
ゲージ理論（重力以外の3つの力）はくりこみができて、実験と非常によく一致する結果が得られる。

（例） 電子の磁気能率

$$g_{理論}/2 = 1.001159652411\,(166)$$

$$g_{実験}/2 = 1.001159652209\,(31)$$

重力はくりこみができない。



重力はエネルギーとともに増大するため、発散の度合が大きく、

重力子の伝播

に対する補正として吸収できない。

⇒ 重力は本質的に点粒子では記述できない。

発散の問題の歴史

1930年ころ　場の理論　（相対論的な点粒子の量子論）

1935年　　湯川　中間子論　　素粒子は場の理論で記述すべきもの

当初から、発散の問題は重要

　　湯川　　点粒子を考えること自体に問題がある。

　　⇒　基本的に広がったもの　（非局所場）

　　朝永　　くりこみ理論

　　重力以外の場の理論は矛盾なくできることがわかった。

1940年代　　量子電磁気学がくりこみ理論によって解決

1967年　　弱い相互作用もくりこみ理論で解決

（～1971年）　　ワインバーグ・サラム理論

1970年代　　強い相互作用もくりこみ理論で解決

1980年前後　実験的にも標準模型が確立　（重力以外のすべて）

1980年以降の中心的課題　　重力と ゲージ理論、物質場（クォーク・レプトン）の統一

　　重力は本質的に点粒子ではない。

　　一方、10^{-18} fm 程度ですべての力は統一されているように見える。

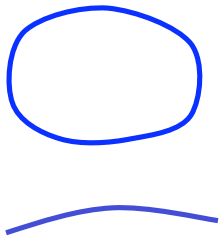
　　⇒　何が基本法則か？　　10^{-18} fm 程度の拡がったもの　　ひも理論

ひも理論とは

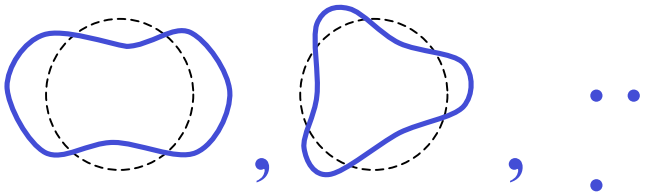
基本的なもの　太さのない輪ゴムのようなもの

1次元的な拡がりを考える。

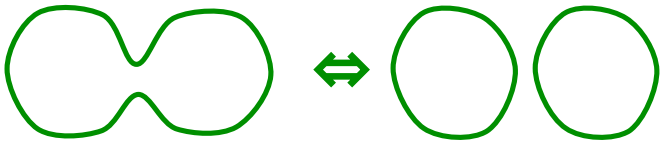
（2次元以上のものも自動的に含まれる。）



いろいろなし方で振動しながら、

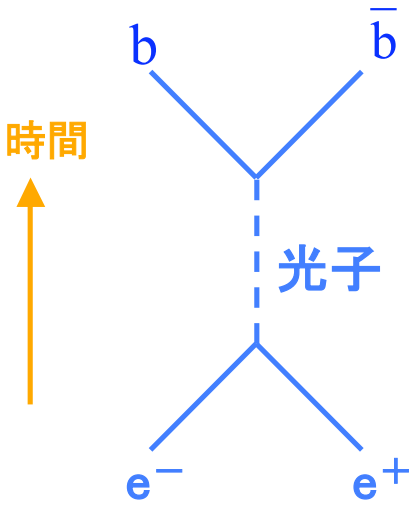


切れたりくっついたりする。

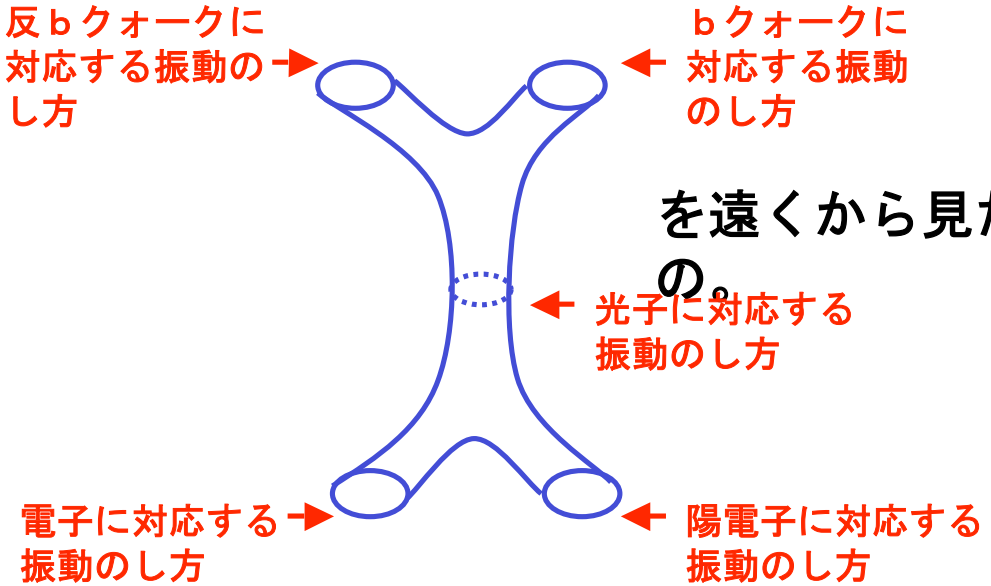


遠くから見ると、異なった種類の粒子に見える。振動のし方＝粒子の種類

たとえば、

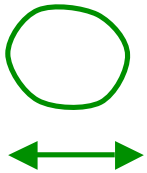


は



を遠くから見たもの。

振動エネルギーが小さなひも　＝　軽い粒子



10^{-16}～　10^{-18} fm

クォーク・レプトン

光子・Wボソン・Zボソン・グルーオン

ヒグス粒子

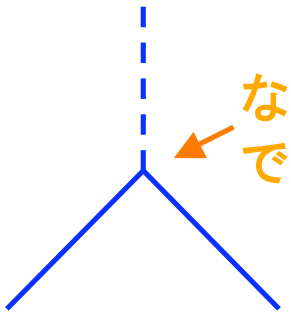
重力子

重力子自身もひも　⇒　時空の歪みもひも　⇒　時空≠点の集まり

ひも理論の特徴

1．標準模型に現れるすべてのものが、1種類のものの振動のし方の違いとして、統一的に記述できる。

2．発散の問題はない。



なめらかではない

点粒子の相互作用

なめらか　⇒　ひも理論では中間状態にあまり短い波長のものは現れない

ひもの相互作用

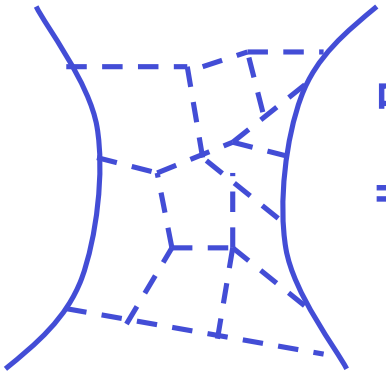
克服すべき点

ひも理論では、非摂動効果が本質的に重要。

（無限個のものが中間状態に現れる効果、すなわち、無限多体効果。）

非摂動効果は標準模型でも強い相互作用に対しては重要。

（例） クォーク間の力



中間状態に非常に多くのグルーオンが現れる。

⇒いくら離れていても、クォーク間の力は一定

（クォークの閉じ込め）

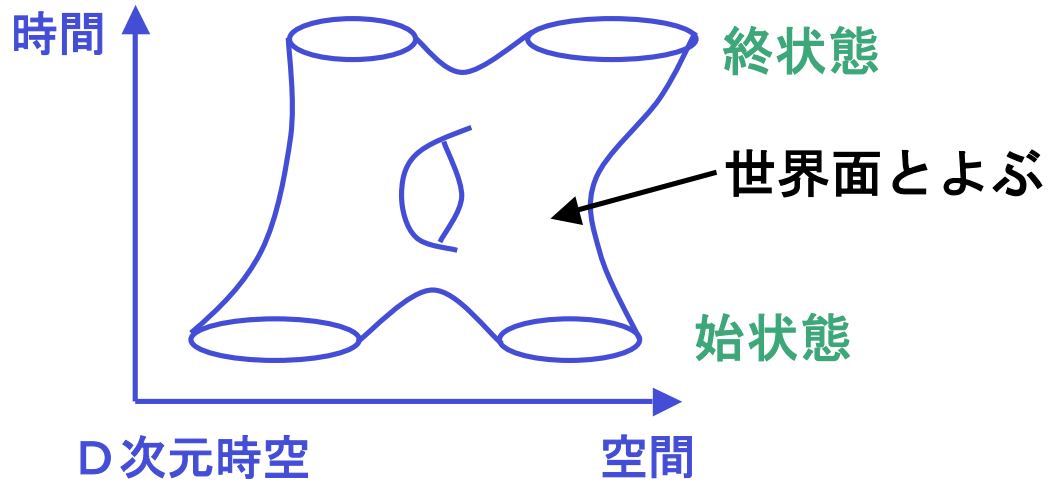
強い相互作用は格子ゲージ理論によって、非摂動効果も含めて完全に記述できる。実際、コンピューターによる数値計算によって、陽子、中性子、中間子の質量が計算できる。

ひも理論の場合も、非摂動効果を含んだ記述のし方が見つかれば、時空の次元をはじめ、クォーク・レプトンの質量など、標準模型に現れるすべての量を計算で求めることができるようになると思われる。

ひも理論の摂動論的な定式化

摂動論的な描像

有限個のひもが振動しながら、切れたりくっついたりしている。



始状態から終状態へ遷移する確率振幅

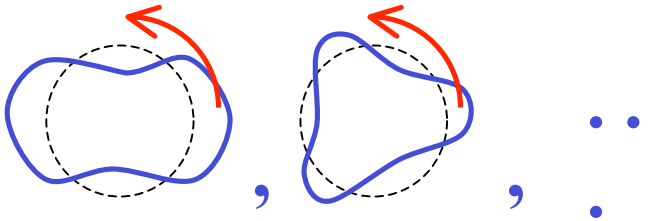
＝2つの状態をつなぐ仮想的な運動に対する確率振幅 $e^{\frac{i}{\hbar}S}$ の和

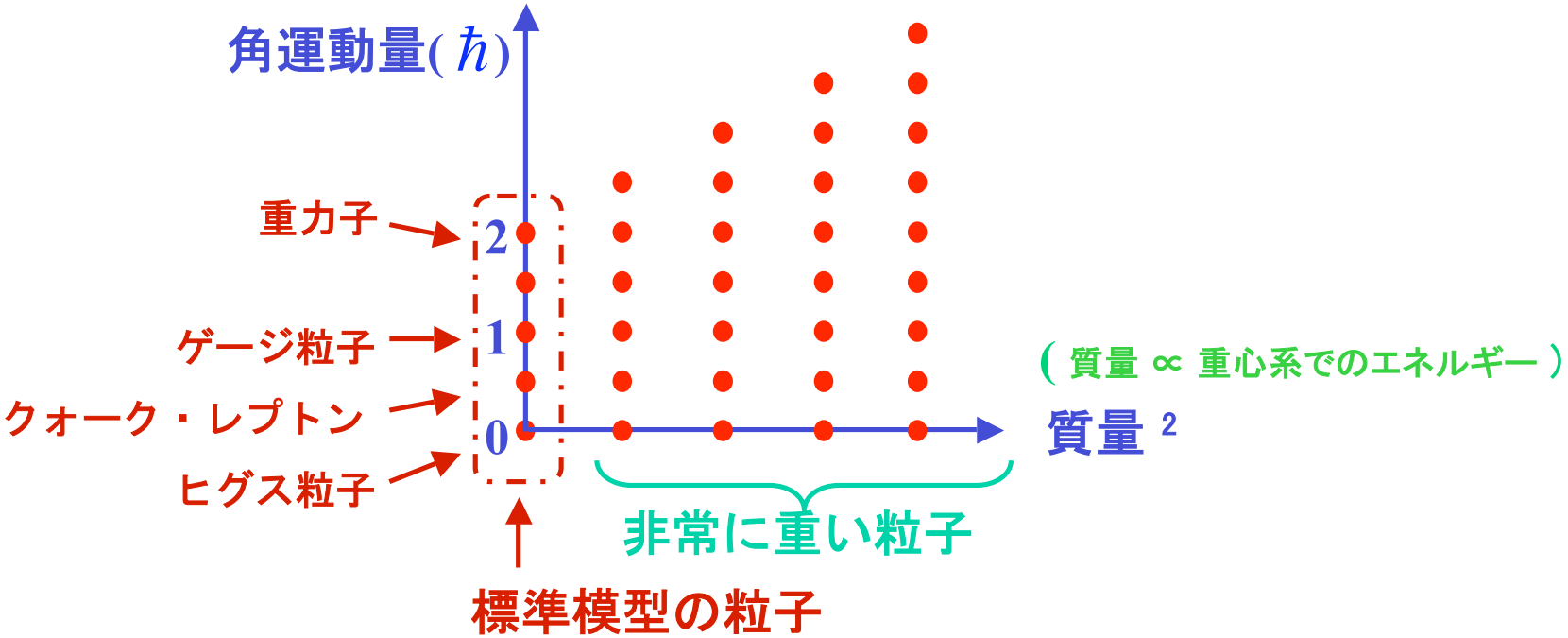
$$\frac{S}{\hbar} = \frac{1}{l_P^{\,2}}(\text{世界面積}) + \boxed{\text{”}\qquad\qquad\qquad\text{”}}$$

←ひもの内部自由度

内部自由度をうまくとって、世界面が局所スケール変換に対して不変であるようにしたものを**臨界弦**とよぶ。ここで議論しているのは臨界弦。

内部自由度のとり方を決めると、
いろいろな振動のし方がもつ
エネルギーと角運動量がきまる。





内部自由度のとり方のかかわらず、臨界弦は必ず重力子を含み、しかも発散のない理論になっている。

重力子以外の部分は内部自由度のとり方によってかわる。

実際、内部自由度のとり方をかえることによって、いろいろな時空次元、ゲージ構造、世代数をもつ、無数のひも理論が構成できる。

これは摂動論の議論、すなわち、ひもの無限多体効果は考えていない。

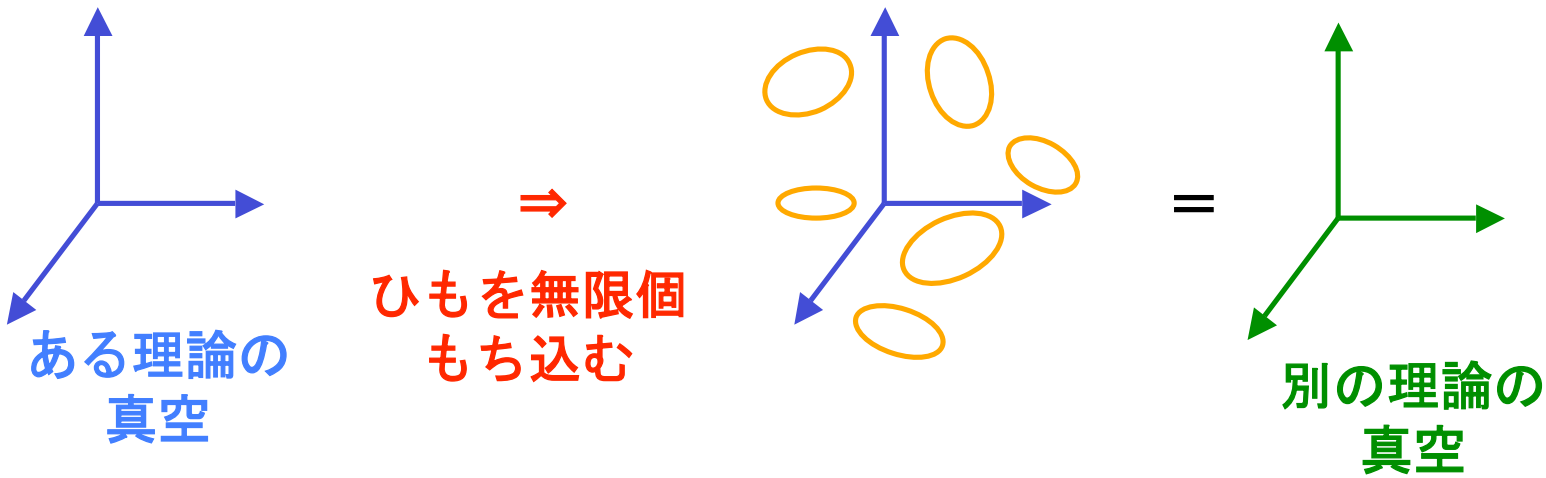
ひもの非摂動効果

摂動論的には内部自由度のとり方に対応して無数のひも理論がある。

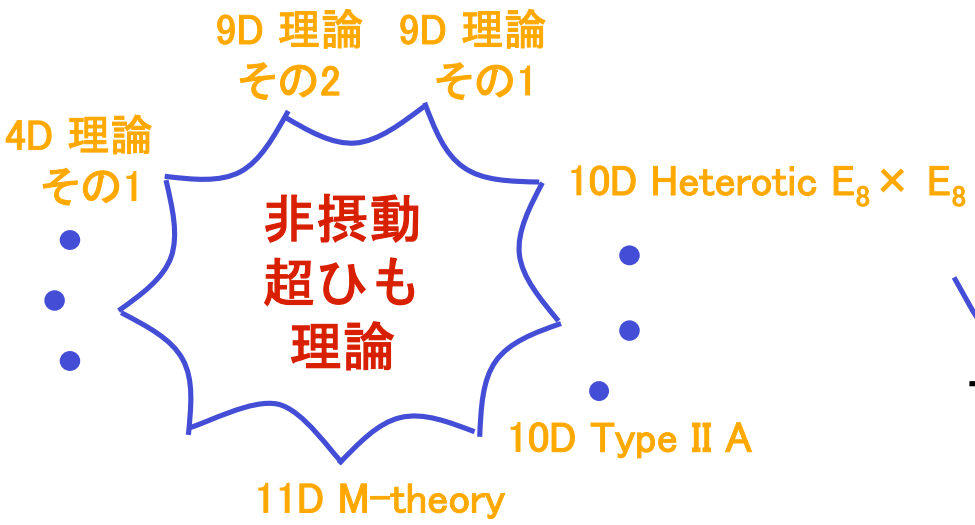
（例）極端な場合として、内部自由度を最も小さくとる。

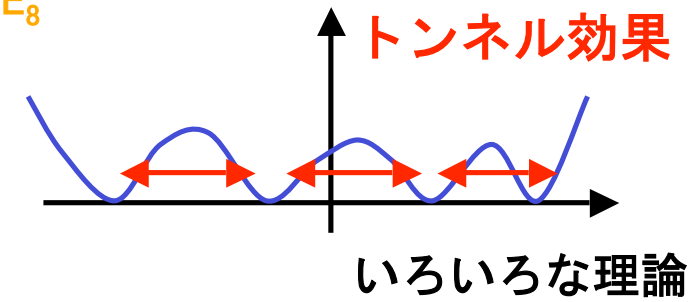
⇒　時空が10次元の5種類のひも理論がある。

これらのうちのひとつの理論の真空（空っぽの状態）に、適当に無限個のひもをもち込むと、別の理論の真空が得られる。　ひものボース凝縮



まだ、完全に示されているわけではないが、摂動論的にえられる無限個のひも理論は、ひとつの理論の異なる基底状態に過ぎないと考えられる。





それぞれの理論は摂動論的には他の真空へ遷移することはなく、“安定”。

非摂動効果は、遷移をひきおこす。

⇒ 無限個の“真空”の縮退は解けて、唯一の真空が得られる。

ひも理論が正しいとすれば、この唯一の真空は我々の標準模型の世界そのもののはず。

これは、非摂動効果をきちんと取り入れることのできる定式化ができたあかつきには、時空の次元をはじめとして、ゲージ群の構造、クォーク・レプトンの質量といった、すべてのものが自由なパラメーターを1つも持たない理論から説明できるということであり、“究極の理論の完成といえる。” ⇒ 行列模型などいくつかの試みがある。

究極の理論に向けて

理論物理学の進歩の概観 （20世紀）

従来の理論の限界・矛盾 ⇒ 新しい原理による統一的記述

それまで無関係と思っていたものの間に統一的な性質がみつかる。

⇒ 理論の形が絞られ、より具体化する。

ニュートン力学と電磁気学の矛盾 ⇒ 特殊相対性理論

時間と空間、電場と磁場の統一

重力と特殊相対論 ⇒ 一般相対性理論

時空と場の統一

原子の安定性、輻射場の自由度 ⇒ 量子力学

粒子と場の統一

相対論と量子論 発散の問題 ⇒ ゲージ理論、くりこみ理論

重力以外の力が

ゲージ理論で統一

重力の発散 ⇒ ひも理論

すべての場の統一

理論の具体化

唯一の理論

やるべきことは非常に明確。

あとほんの少しのところまで来ているように思われる。

付録　ゲージ理論とひも理論の発展の歴史

発展のしかたが似ている。

70年代のゲージ理論の発展の歴史

第1期　（1971～　）　摂動論の理解
くりこみ（ ‘tHooft, Veltman ）

第2期　（1975～　）　摂動論の延長上の非摂動効果を理解
モノポール, インスタントン, デュアリティ

第3期　（1979～　）　構成的な定式化
格子ゲージ理論　閉じ込めの理解、定量的計算

ひも理論の発展の歴史

第1期　（1984～　）　摂動論の理解
有限性、無矛盾性

第2期　（1994～　）　摂動論の延長上の非摂動効果を理解
Dブレーン、デュアリティ

第3期　（　？　～　）　構成的な定式化による完全な記述