

宇宙と素粒子のなりたち

究極の理論に向けて — 超弦理論の展望 —

2012年4月7日

於 大阪国際会議場

川合 光

自然科学の発展のしかた

- 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?, ...

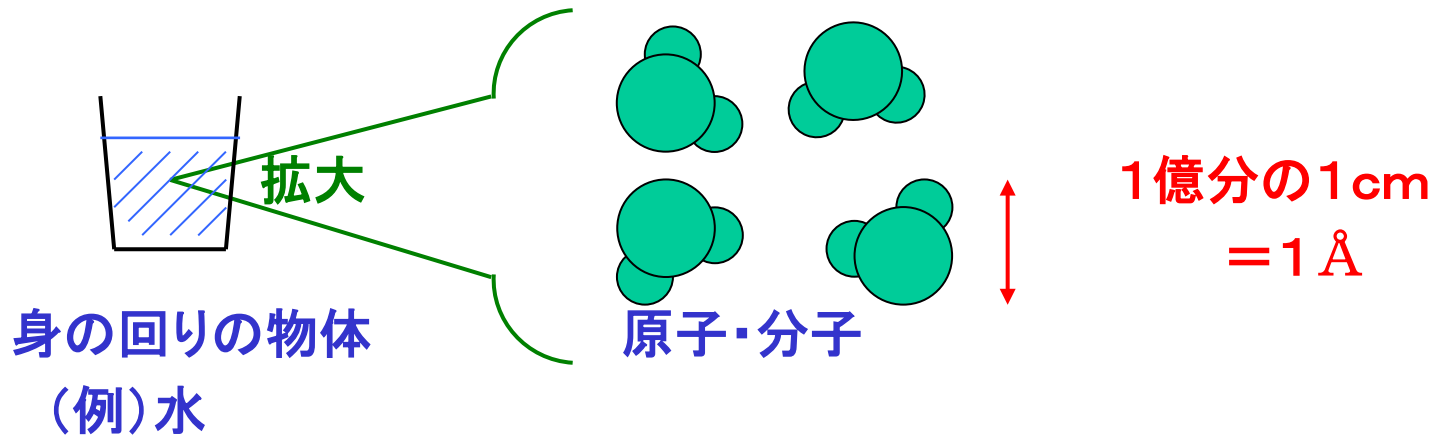
お互いに補い合いながら発展してきた
基本法則 \Leftrightarrow 複雑なものの性質

この話

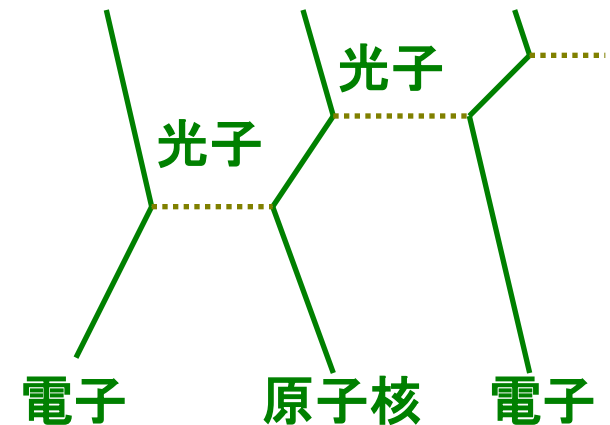
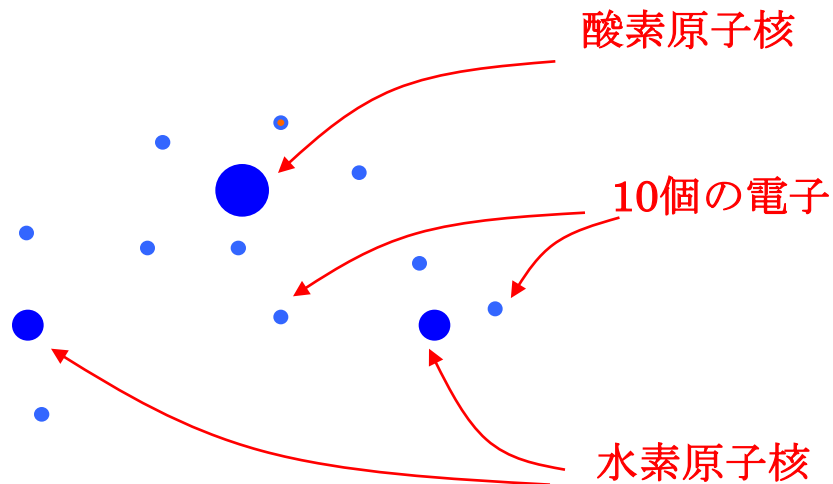
基本法則の理解がどこまで進んでいるか

基本的な粒子と相互作用

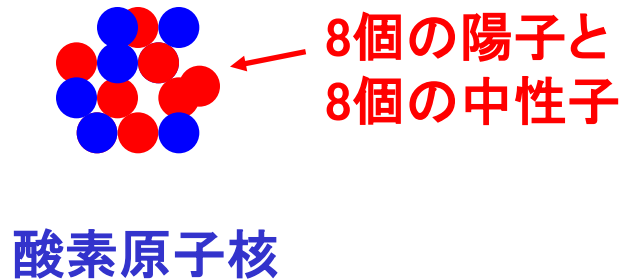
物質のより基本的な構成単位とその相互作用を調べる。



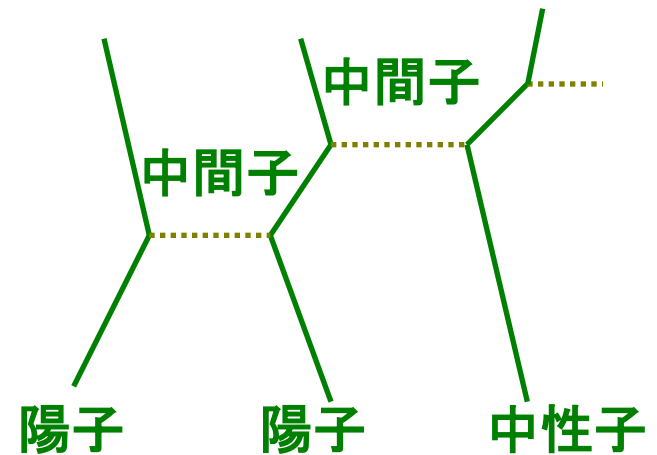
原子・分子 = 原子核 + 電子
電気力



原子核を拡大してみる

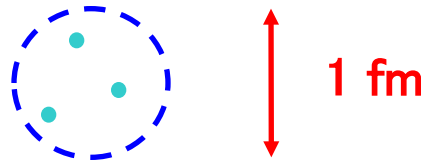


原子核 = 陽子 + 中性子
核力



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



陽子

2個のu-クォーク
1個のd-クォーク



中性子

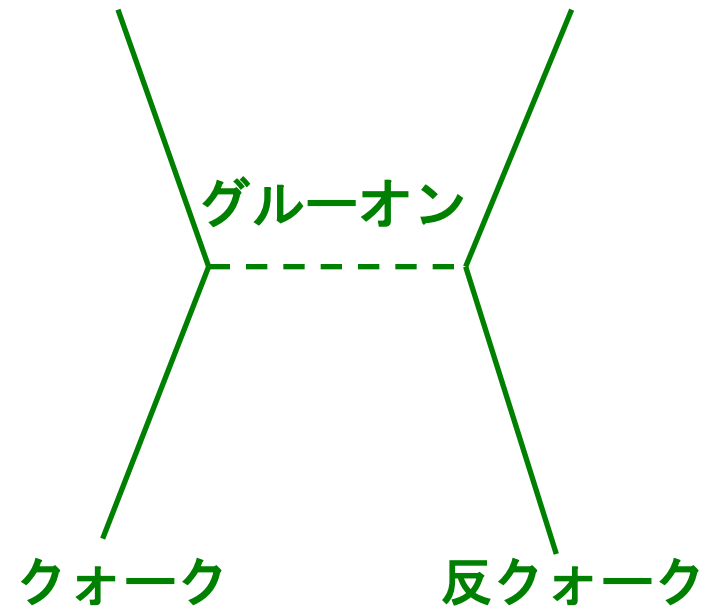
2個のd-クォーク
1個のu-クォーク



中間子

クォークと
反クォーク

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



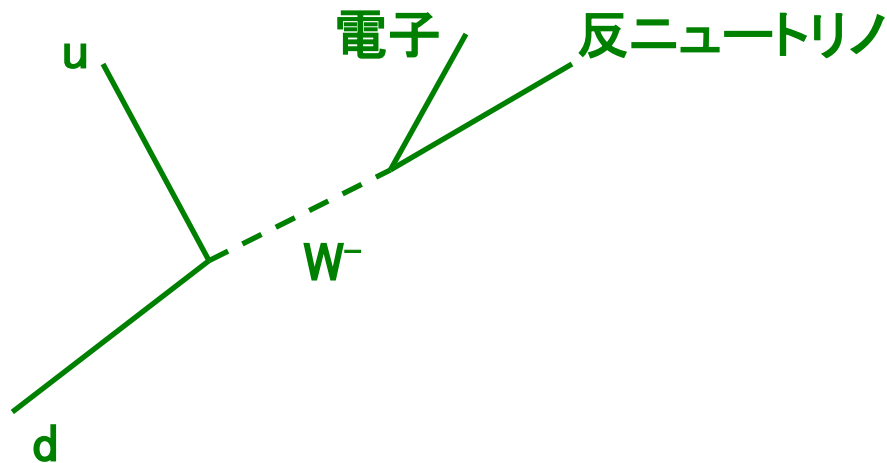
標準模型

現在、1 fm の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 \rightarrow 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
電子ニュートリノ

クォーク: d-クォーク
u-クォーク

↑
第1世代

ミュー粒子
ミューニュートリノ

s-クォーク
c-クォーク

↑
第2世代

タウ粒子
タウニュートリノ

b-クォーク
t-クォーク

↑
第3世代

基本的な相互作用 (4つの力)

電磁場

光子

弱い相互作用

Wボソン, Zボソン
ヒグス粒子

強い相互作用

グルーオン

重力

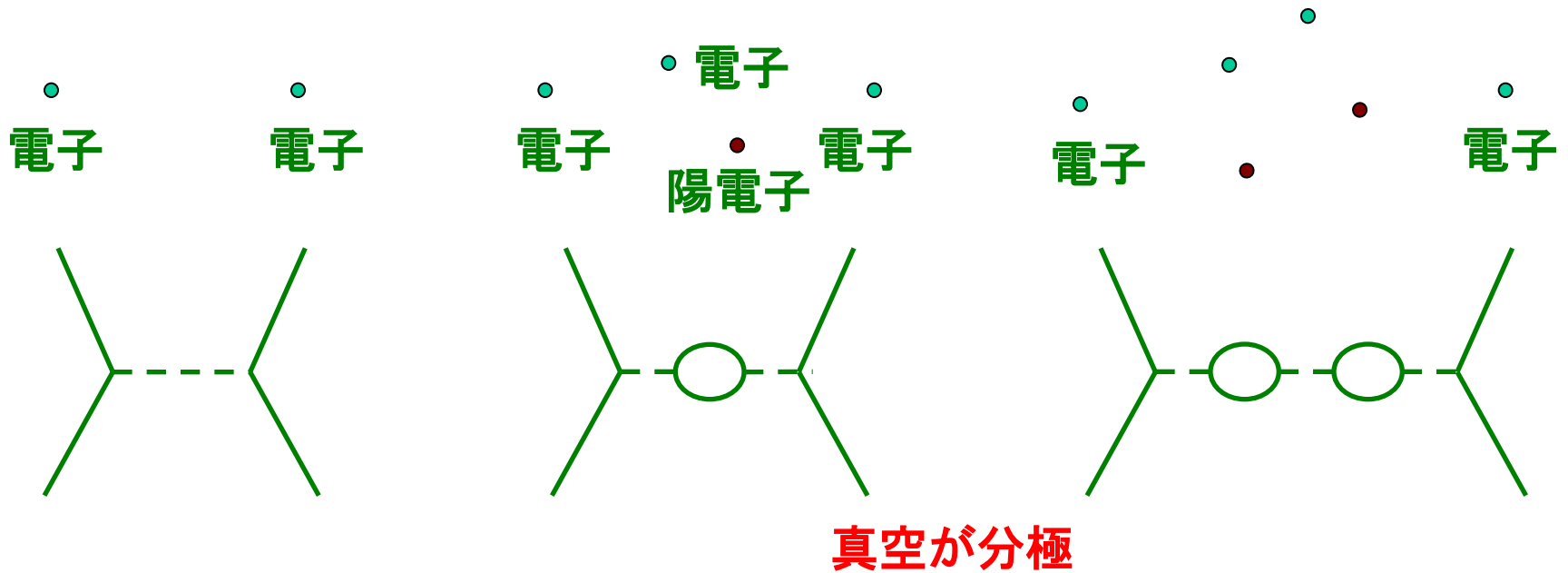
重力子

} 弱電磁相互作用

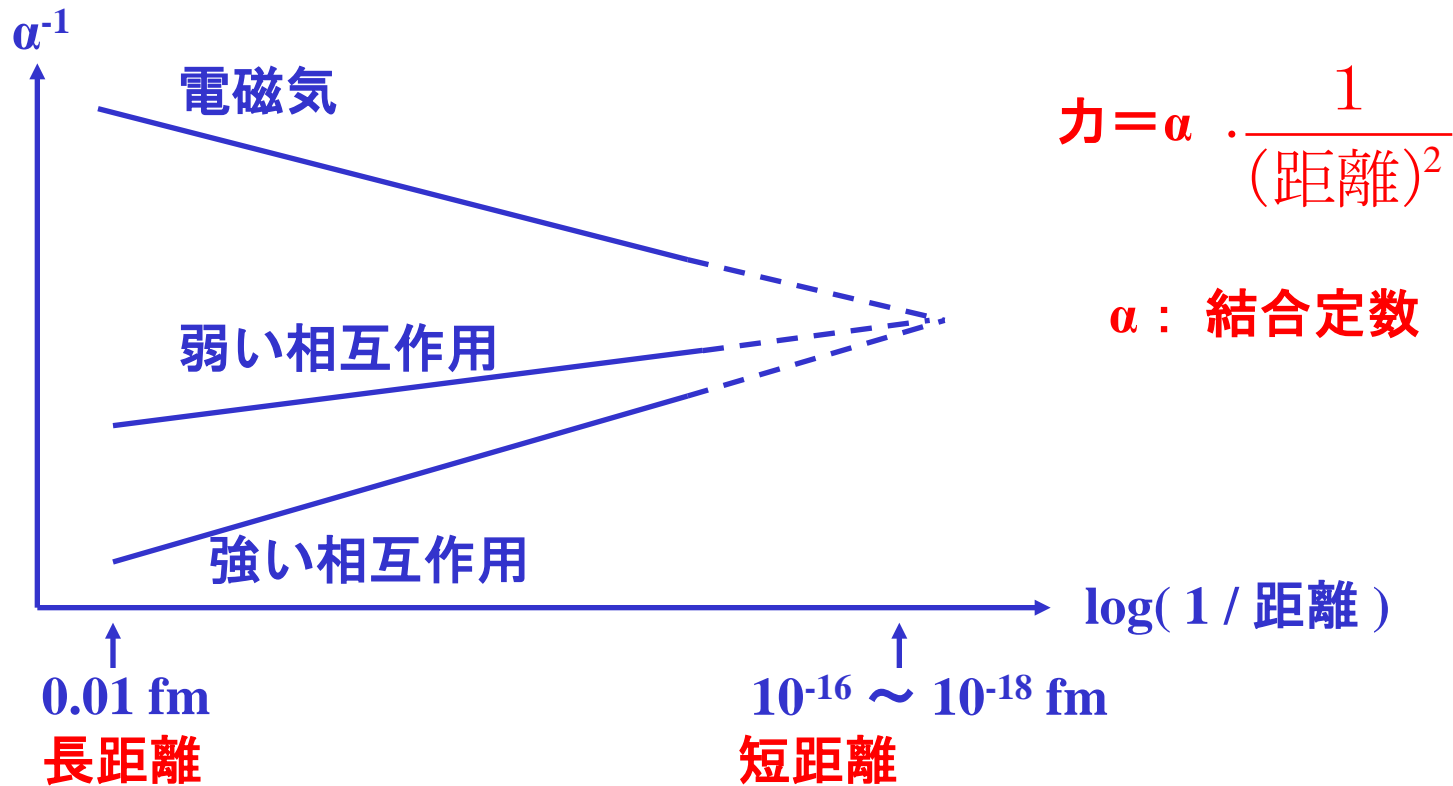
相互作用の統一

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 $10^{-16} \sim 10^{-18}$ 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

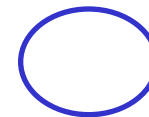


我々が観測しているのは、真空が分極するという効果を含んだ後の力である。そのような効果を含まない、生の力を見たければ、2つの電子の間の距離をどんどん小さくしてやればよい。（これは計算できる。）



$10^{-16} \sim 10^{-18}$ 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？ ⇒ 弦理論



粒子に見えていたものは実は、

大きさが $10^{-16} \sim 10^{-18}$ fm の
輪ゴムのようなもの

2つを組み合わせると、

短い距離 \Leftrightarrow 高いエネルギー \Leftrightarrow 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。

$l_p = 10^{-18}$ fm プランクスケールとよぶ。

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 = $\alpha \cdot \frac{q_1 q_2}{(\text{距離})^2}$



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

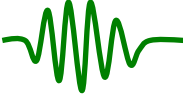


2つの陽子の間の力

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。

量子力学 $p = \frac{h}{\lambda}$ 粒子 = 波動 

h : プランク定数 p : 運動量 λ : 波長

特に、粒子の速さが光速 c に近いときは、 $E \sim pc \sim \frac{hc}{\lambda}$.

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 \Leftrightarrow 高いエネルギー \Leftrightarrow 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

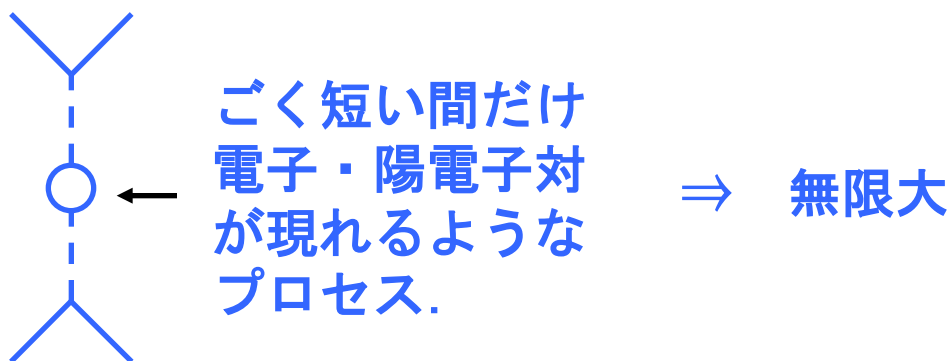
となることがわかる。

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。

$l_p = 10^{-18}$ fm プランクスケールとよぶ。

発散の問題

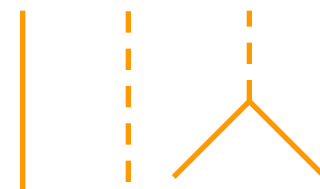
途中に現れる仮想的な運動についての和を素朴にとると結果が無限大になってしまう。(途中に現れる仮想的な状態を中間状態という。)



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

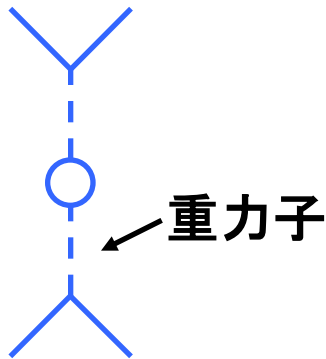
ゲージ理論(重力以外の3つの力)はくりこみができて、実験と非常によく一致する結果が得られる。

(例) 電子の磁気能率

$$g_{\text{理論}} / 2 = 1.001159652177 (9)$$

$$g_{\text{実験}} / 2 = 1.001159652180 (1)$$

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

南部
小林・益川

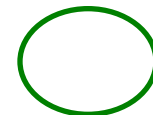
1970年代 強い相互作用もくりこみ理論で解決

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 程度の広がったもの



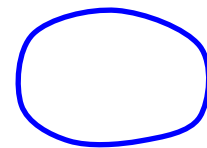
弦理論

弦理論とは

基本的なもの 太さのない輪ゴムののようなもの

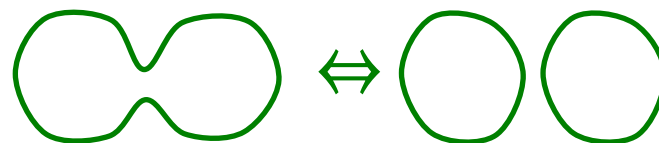
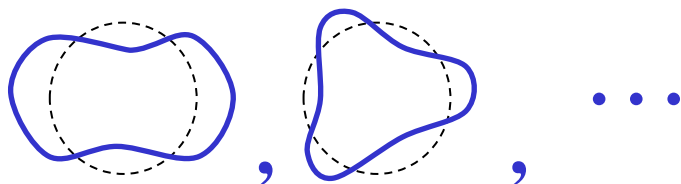
1次元的な広がりを考える。

(2次元以上のものも自動的に含まれる。)



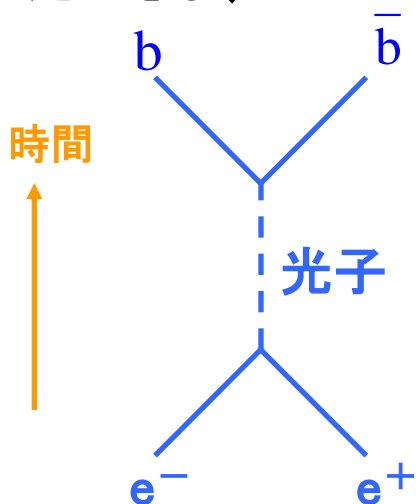
いろいろなし方で振動しながら、

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

反bクォークに
対応する振動の
し方 →

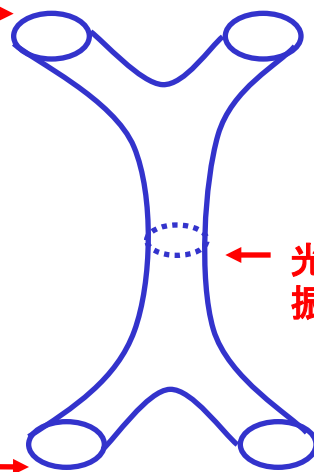
← bクォークに
対応する振動
のし方

を遠くから見たもの。

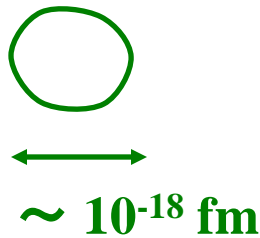
← 光子に対応する
振動のし方

→ 電子に対応する
振動のし方

← 陽電子に対応する
振動のし方



振動エネルギーが小さなひも = 軽い粒子



クォーク・レプトン

光子・Wボソン・Zボソン・グルーオン

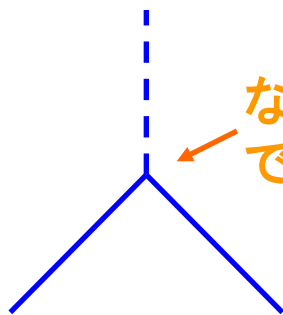
ヒグス粒子

重力子

重力子自身もひも \Rightarrow 時空の歪みもひも \Rightarrow 時空 \neq 点の集まり

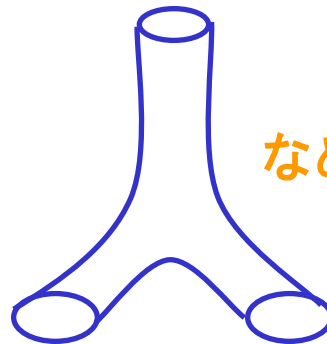
弦理論の特徴

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 \Rightarrow

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

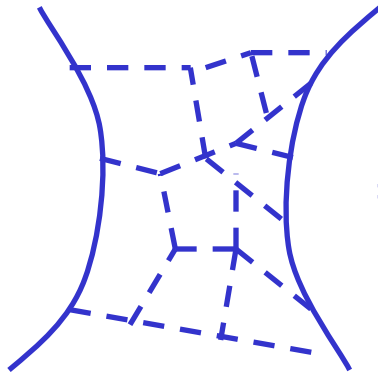
克服すべき点

弦理論では、**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。

弦理論の場合も、非摂動効果を含んだ記述のし方が見つければ、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。

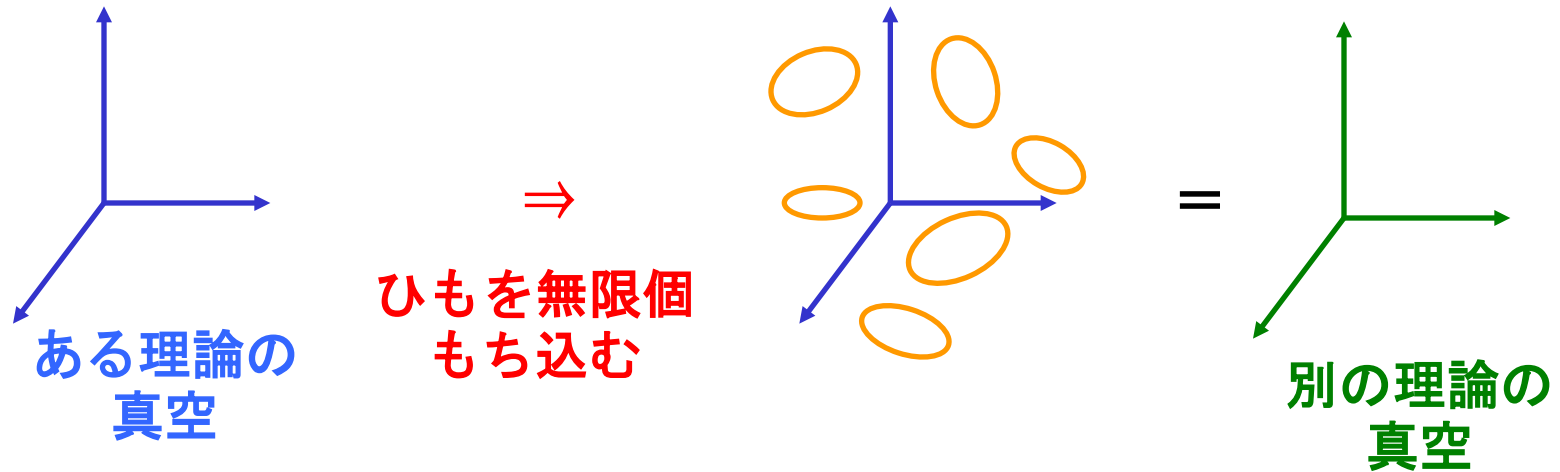
弦の非摂動効果

摂動論的には弦上の自由度のとり方に対応して無数の理論がある。

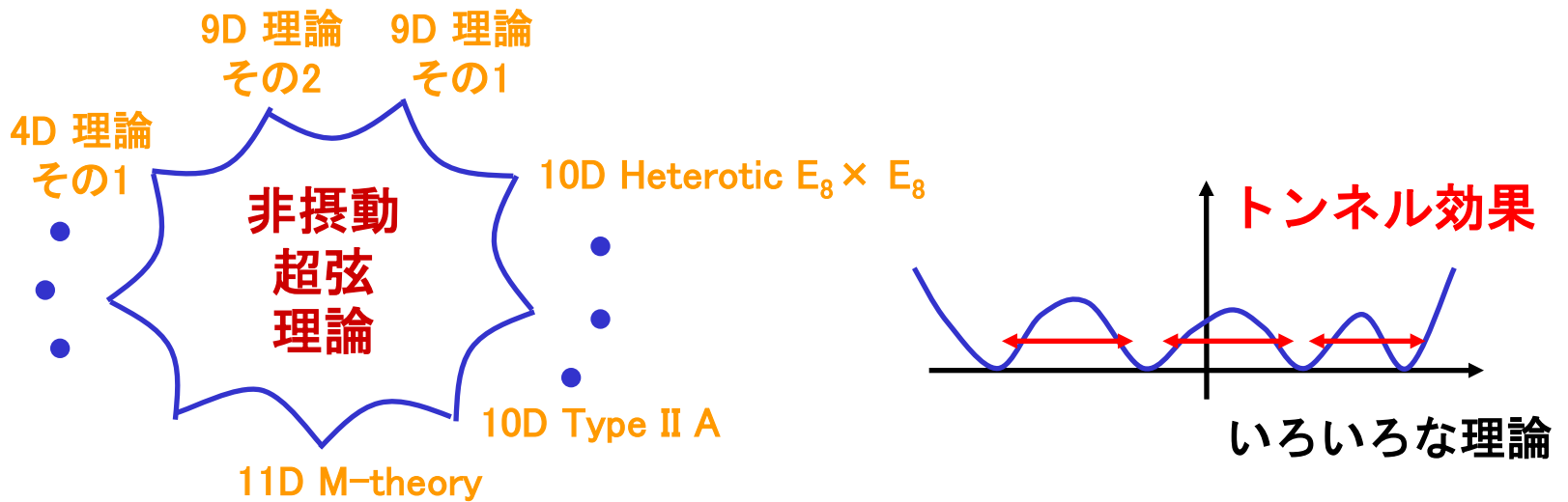
(例) 極端な場合として、弦上の自由度を最も小さくとる。

⇒ 時空が10次元の5種類の弦理論がある。

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数の弦理論は、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ではなく、“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。

超弦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

基本法則の解明の概観（20世紀以降）

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見つかる。
⇒ 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	⇒	弦理論 すべての場の統一

理論の具体化

唯一の理論

あと少しのところまで来ているように思われる。

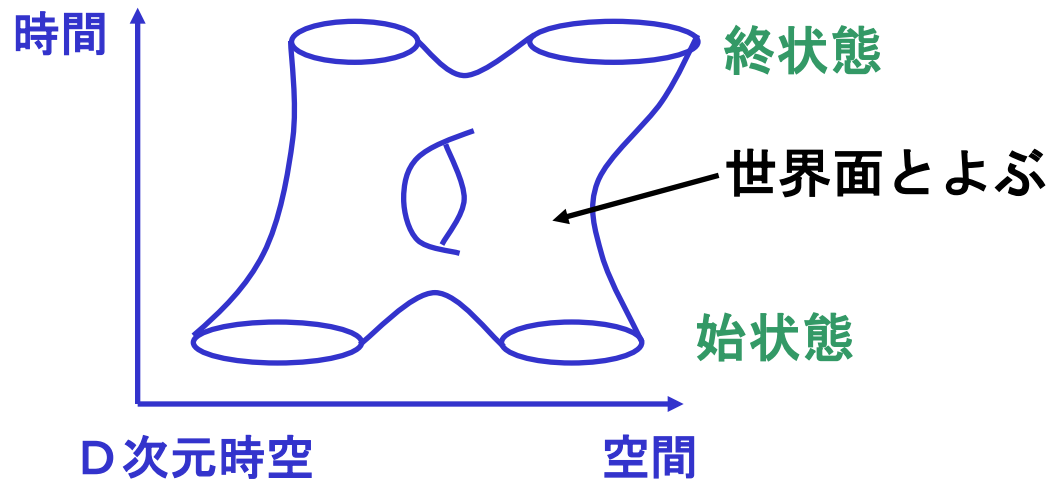
付録

ひも理論の摂動論的な定式化

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。

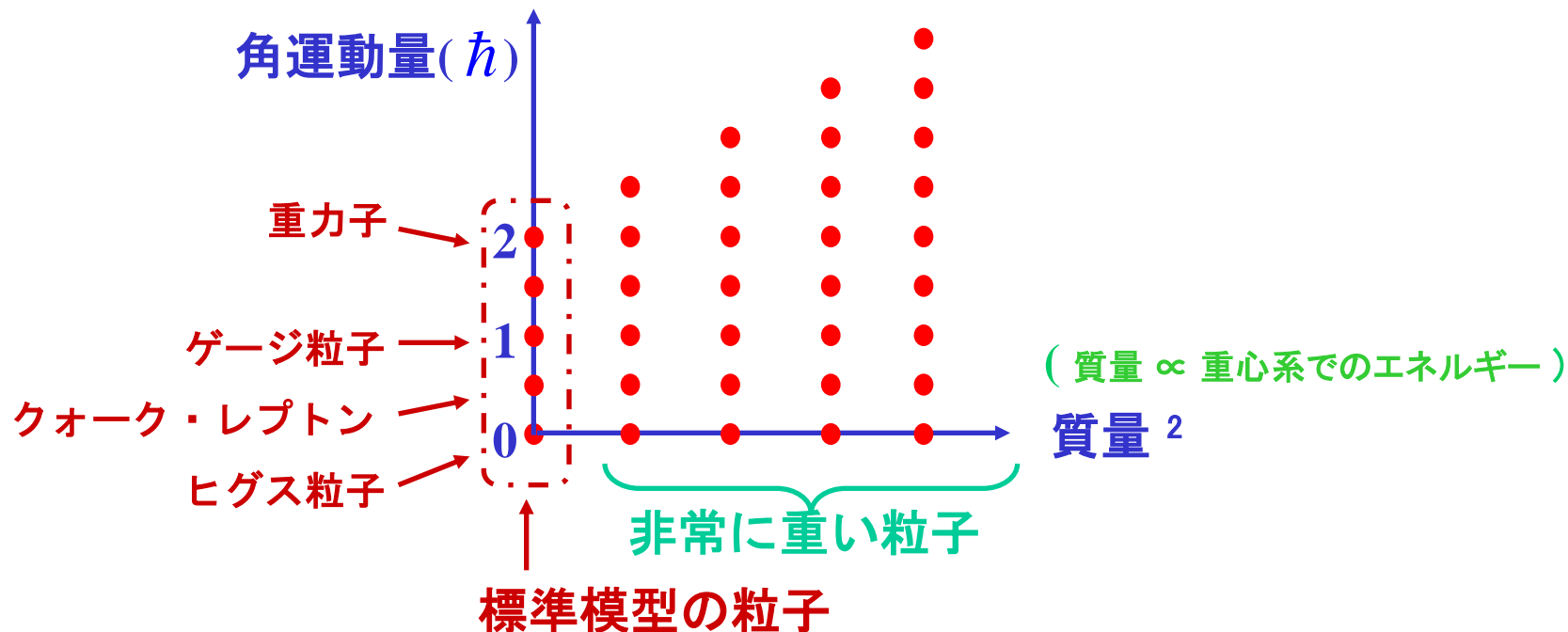
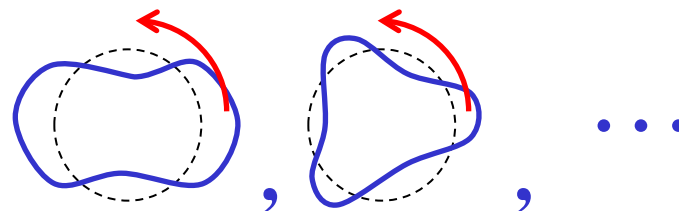


始状態から終状態へ遷移する確率振幅
= 2つの状態をつなぐ仮想的な運動に対する確率振幅 $e^{\frac{i}{\hbar}S}$ の和

$$\frac{S}{\hbar} = \frac{1}{l_p^2} (\text{世界面の面積}) + \boxed{\text{”世界面上の場”}} \leftarrow \text{ひもの内部自由度}$$

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。