

首都大学オープンユニバーシティ



2009年5月23日

素粒子物理学へのいざない

第二回

対称性の自発的破れと標準理論

このスライドのファイルは以下に置いてあります：

<http://musashi.phys.metro-u.ac.jp/~yasuda/ou2009-2.pdf>

首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論サブグループ 安田修

素粒子論における主な問題:

A) 素粒子の分類(どのような素粒子があるか)

→ 前回の講義

物質を構成する素粒子にはクォークとレプトンがあり、それぞれ三世代のコピーを持つ

物質粒子			
	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 μニュートリノ	 τニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

B) 素粒子間の相互作用(どのような相互作用をして、どのような複合粒子をつくるか)

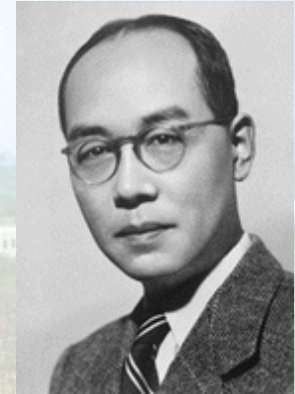
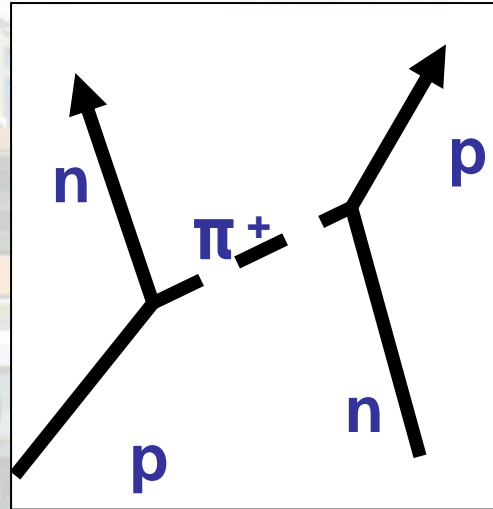
→ 今回の講義

(B) 素粒子間の相互作用

素粒子論における力（＝相互作用）の記述

湯川の中間子論

相互作用(核力)は粒子(π 中間子)を媒介して起こる

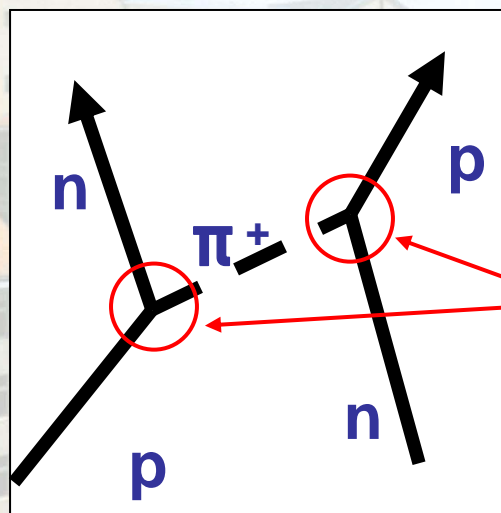
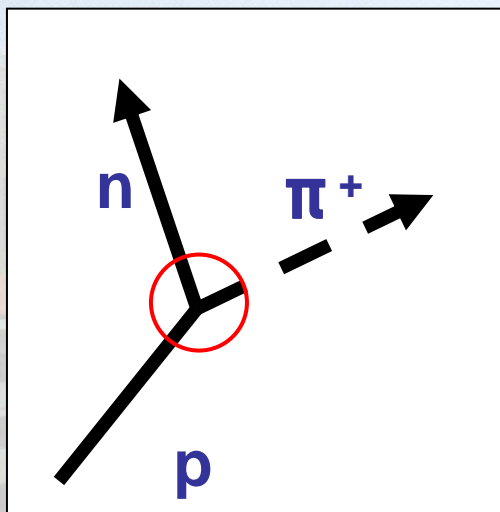


湯川秀樹

この湯川の中間子論は素粒子論における相互作用の基本的な考え方として現在まで引き継がれている

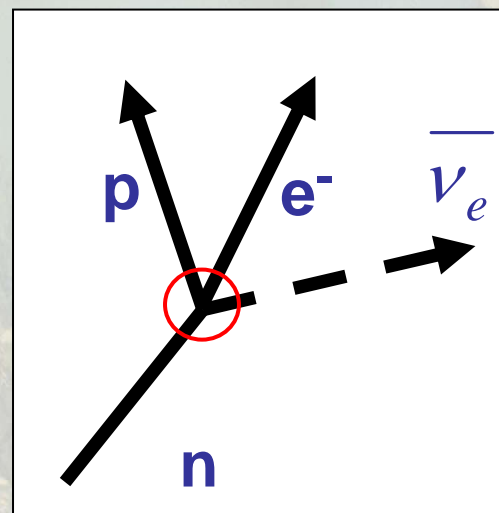
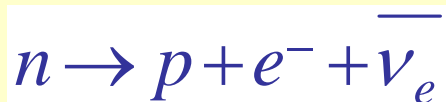
素粒子論における相互作用(=力)

- 相互作用はファインマン図における枝分かれ部分に対応



核力の場合は2点における相互作用が1組で1つの過程となる

- 崩壊も相互作用による現象(崩壊なのに力?)
(例) 中性子の崩壊



ちなみに核力は現在のクォークの猫像では以下のよう
に理解されている(複合粒子のやりとり):

$n = (udd)$

$p = (uud)$

$\pi^+ = (u\bar{d})$

ファインマン図では反粒子の矢印を逆向きに書くのが慣例

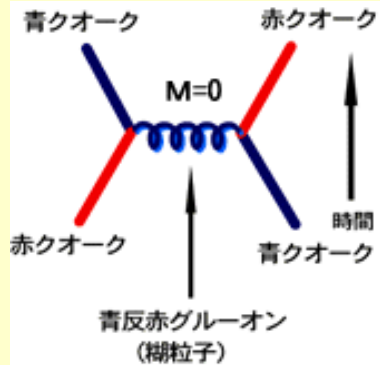
$p = (uud)$

$n = (udd)$

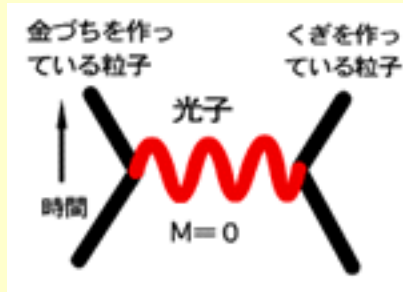
自然界には4つの相互作用(=力)があることが知られている

相互作用	強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	重力相互作用
相互作用の媒介粒子	グルーオン	光子	W,Zボゾン	重力子
相互作用の大きさ	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-40}

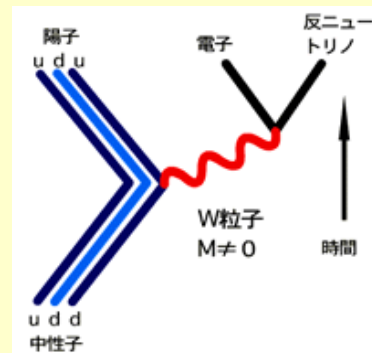
強い力



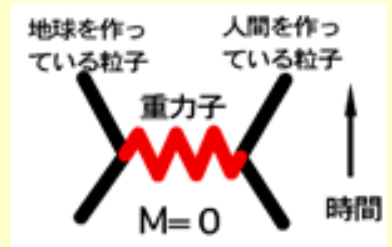
電磁気力



弱い力



重力



現代の標準理論と呼ばれる理論は3つの相互作用(強い相互作用・電磁相互作用・弱い相互作用)を記述する

重力は現在の素粒子の実験エネルギーでは無視できるためここでは議論しない

素粒子の感じる力

素粒子		電荷	強い力	電磁気力	弱い力	重力
クォーク	u	$+2e/3$	○	○	○	○
	d	$-e/3$	○	○	○	○
レプトン	e	$-e$	×	○	○	○
	ν_e	0	×	×	○	○

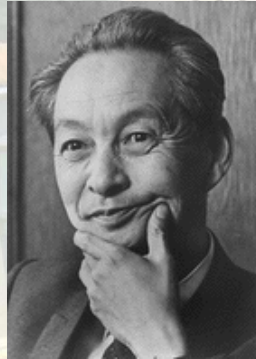
電磁気力

量子電磁気力学(大学院修士課程1年で学習)

電磁気力 = 光子の交換

例: 分子、原子、エレクトロニクス、磁石

$e^- \rightarrow e^- + \gamma$ などの反応



朝永振一郎



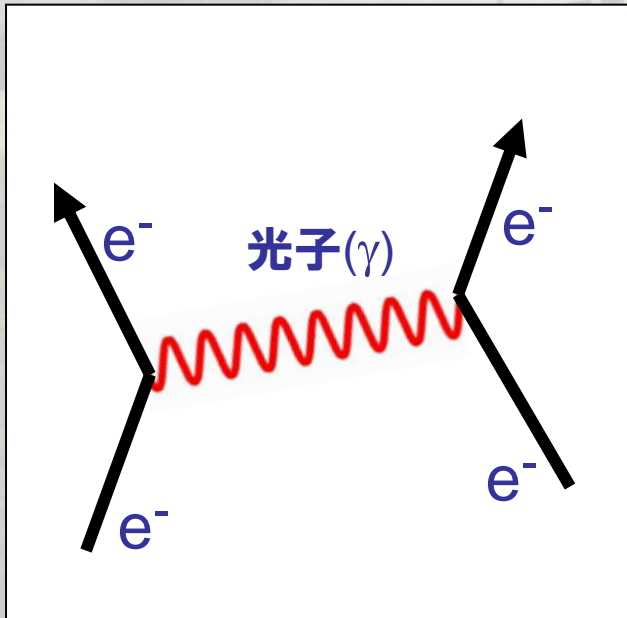
シュウィンガー



ファインマン



ダイソン



電荷を持った粒子が光子を放出し、電荷を持った別な粒子がそれを吸収することにより相互作用する

弱い力

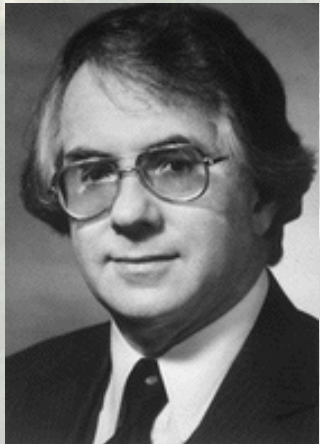
ワインバーグ・サラム理論 (大学院修士課程1年で学習)

弱い力=W,Z粒子の交換

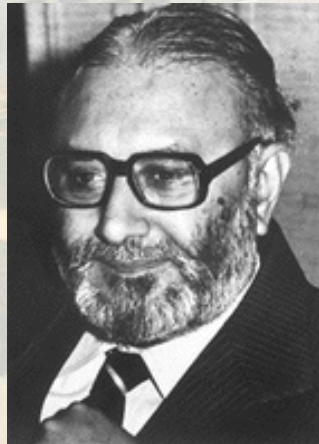
例:ベータ崩壊(中性子、原子核の崩壊(原子力発電))、地熱

$$d \rightarrow u + W^- , e^- \rightarrow \nu_e + W^-$$

$d \rightarrow d + Z , \nu_e \rightarrow \nu_e + Z$ などの反応の組み合わせ



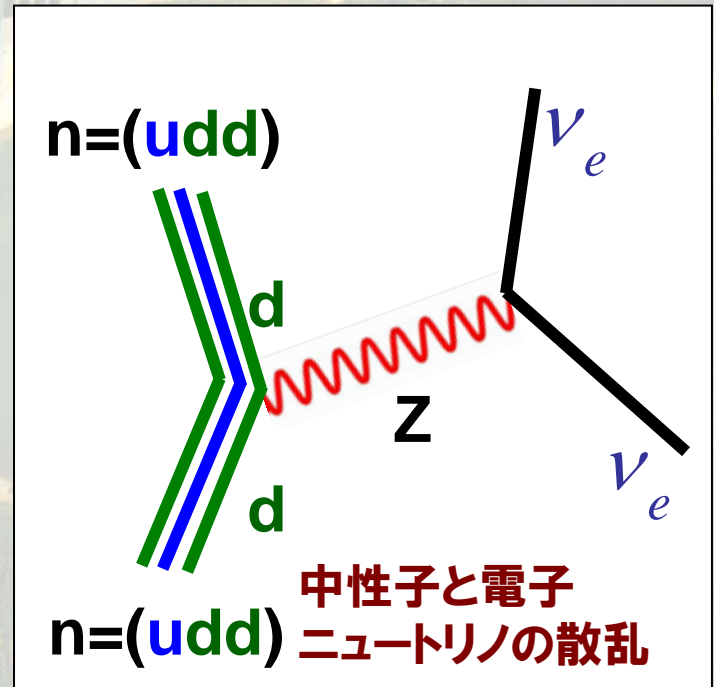
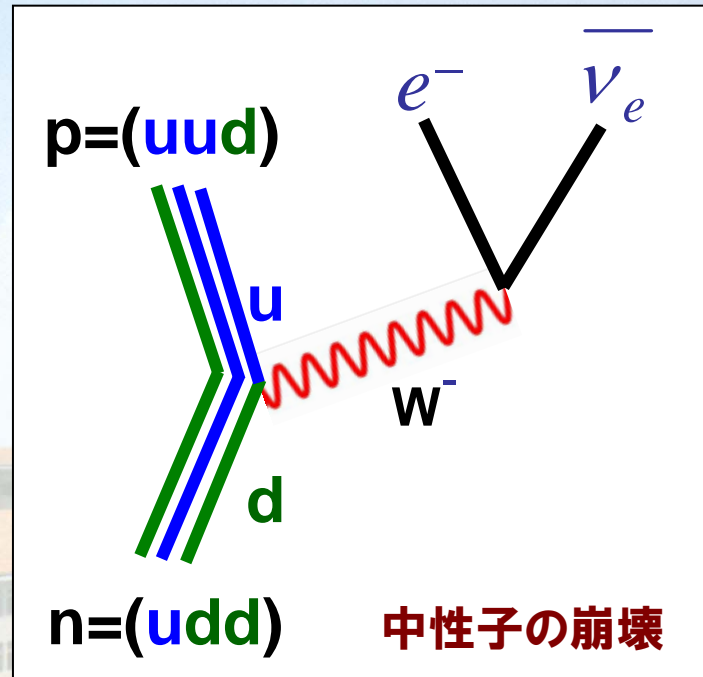
グラショウ



サラム



ワインバーグ



強い力

量子色力学(大学院修士課程1年で学習)

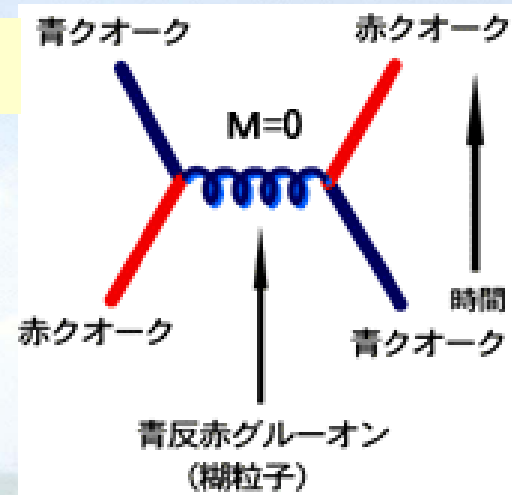
強い力=グルーオンの交換

例: 核力、核融合

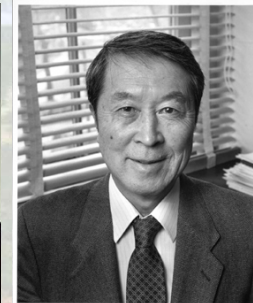
$u \rightarrow u + \text{グルーオン}$ 等の反応の組み合わせ

- 強い力はクォークを結合して核子・中間子を作る
- レプトンには強い力は働かない

強い力は電磁気力に似ているが、電荷ではなく、カラーチャージと呼ばれる量(1965年、ハン-南部)を持つ粒子に働く(赤青緑の色を合成して白色になる組み合わせのみが観測可能)



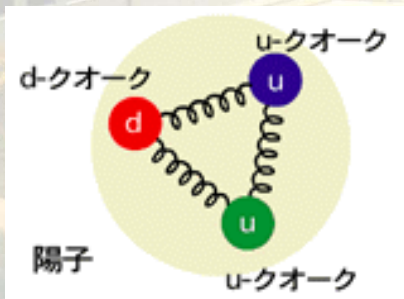
ハン



南部陽一郎

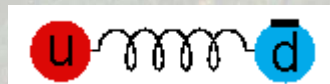
核子

$$p = (uud)$$



中間子

$$\pi^+ = (u\bar{d})$$



	電磁気力	強い力
力の対象	電荷 ($\pm e$)	カラーチャージ(赤青緑)
力の媒介	光子	グルーオン
単独電荷の取り出し可能性	可能	不可能

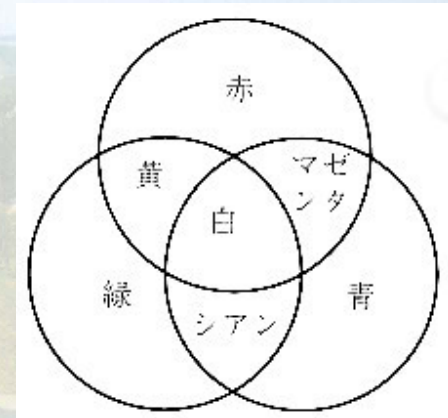
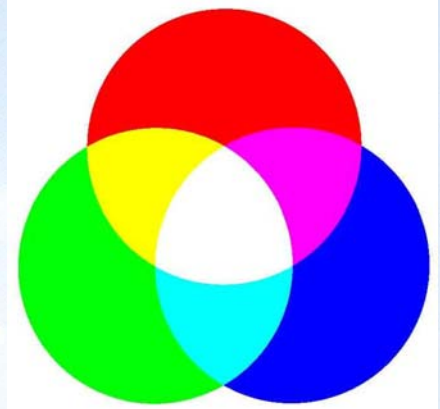
クォークと色の自由度

光の三原色

- 赤、緑、青の三色を混ぜ合わせて種々の色を作り出せる
- 特に同じ比率で三色を加えると白色となる

- クォークの「色」も数学的に3種類あり、通常の色と同じような性質を持つので、色で表すのがわかりやすい
- 物理的に観測されるのは白色の状態になる物のみ

	R	G	B
赤	1	0	0
緑	0	1	0
青	0	0	1
反赤 = 空色	0	1	1
反緑 = 桃色	1	0	1
反青 = 黄色	1	1	0
白	1	1	1



\bar{q} の「色」は、通常の色の補色となる

これらを総称して
ハドロンと呼ぶ(すべて強い相互作用をする粒子)

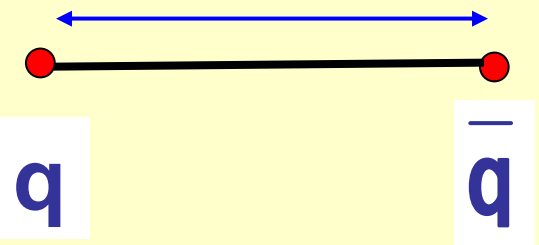
バリオン: (赤緑青)

中間子: (赤赤) + (緑緑) + (青青)

バリオン (qqq)

中間子 $(q\bar{q})$

クォークと反クォークの距離を大きくすればするほど大きな力が必要となる



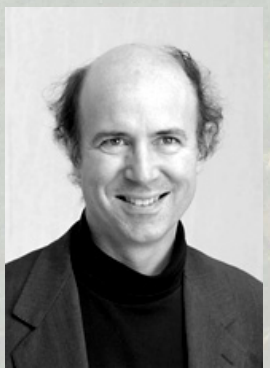
グルーオンによる強い力には近距離では結合定数が小さくなる一方、遠距離では結合定数が大きくなる性質がある

クォークは単独では観測できない

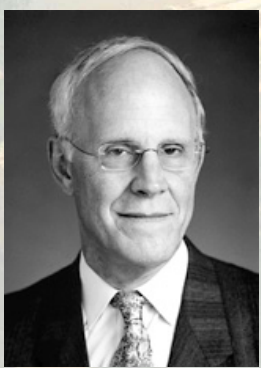
量子色力学は非常に難しい理論で、現在でも完全には理解されていない



しかし計算機によるシミュレーションは可能で、その結果から、現実を正しく記述していると考えられている



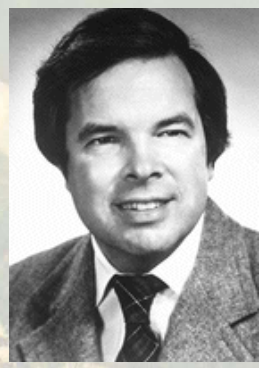
ウィルチェク



グロス



ポリッツァー



ウイルソン

ここでいきなり聞きなれない言葉が出てきてしまいますが。。。

ゲージ理論 (大学院修士課程1年で学習)

ゲージ変換：

理論に現れる粒子の自由度に対して、位相と呼ばれる量を時空の位置に依存させて変換することをゲージ変換と呼ぶ

ゲージ対称性：

ゲージ変換に対する不変性

ゲージ理論：ゲージ対称性を持つ理論

ゲージ場：ゲージ対称性を持たせるのに導入される粒子

位相とは、数学における複素数 $z = re^{i\theta}$ に出てくる概念(θ)ですが、ここでは省略します

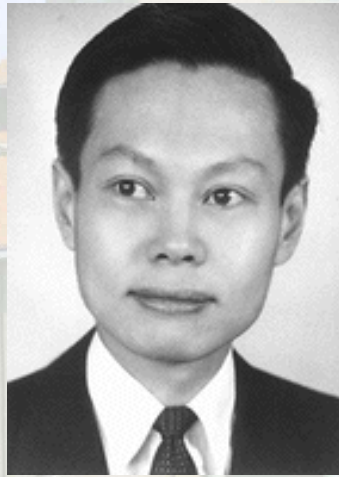
[注]すべての粒子は粒子としての性格と波としての性格の両方を持っており、その粒子の自由度を場と呼ぶ

ゲージ場

素粒子論に出てくる4つの力を媒介する粒子はすべてゲージ場であることが知られている:



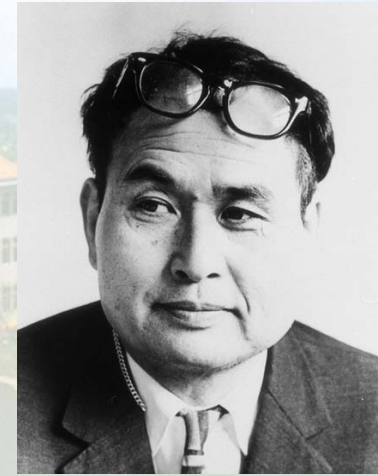
ワイル



ヤン



ミルズ



内山龍雄

電磁気力 (光子)

弱い力 (W,Zボゾン)

強い力 (グルーオン)

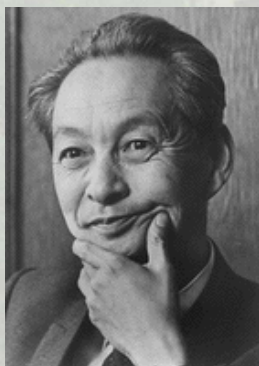
重力 (重力子)

なぜこんなにゲージ理論にこだわるかと言うと

くりこみ理論（大学院修士課程1年で学習）
と呼ばれるものが理論的整合性から要求されるため

特殊相対論 + 量子力学 = 場の量子論

- 場の量子論における量子力学的補正を計算すると一般にその結果は発散することが知られている
- ゲージ理論の場合にはくりこみという操作により意味のある答を出すことが出来、その予言は実験結果とも一致することが知られている（但し重力に関しては未解決）



朝永振一郎



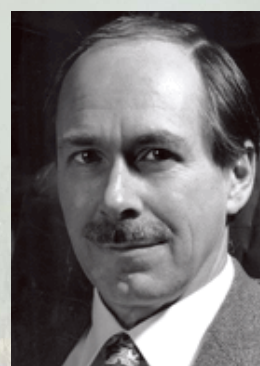
シュウィンガー



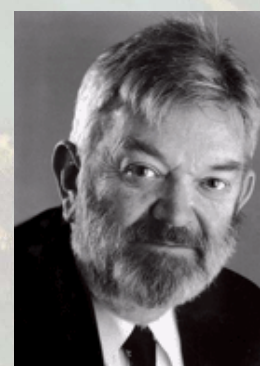
ファインマン



ダイソン



トホーフト



ヴェルトマン

電磁気力

弱い力・強い力

理論(量子電磁気力学)と実験の比較

実験値(括弧内は誤差)

$$a_e(HV06) = 1\ 159\ 652\ 180.85\ (0.76) \times 10^{-12}$$

$$a_e(Rb) = 1\ 159\ 652\ 188.70\ (0.10)\ (0.26)\ (7.71) \times 10^{-12}$$

理論値(括弧内は誤差)

9桁も一致している!!!

→量子電磁気力学+くりこみ理論は、最も成功している理論の一つと考えられている

→くりこみ理論を他の相互作用にも適用したくなる



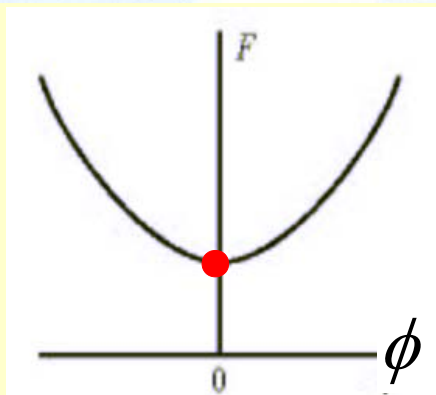
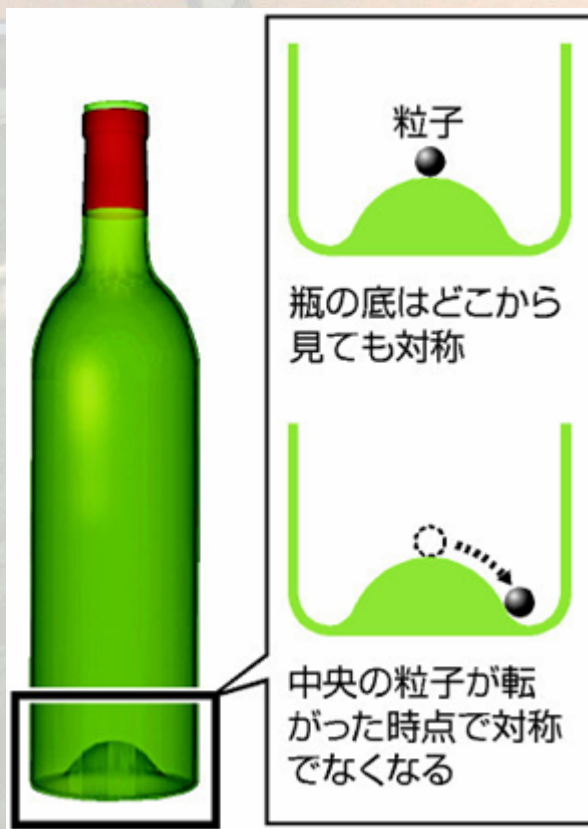
木下東一郎

ここでいきなり脈絡のない話が出てきてしまいますが。。

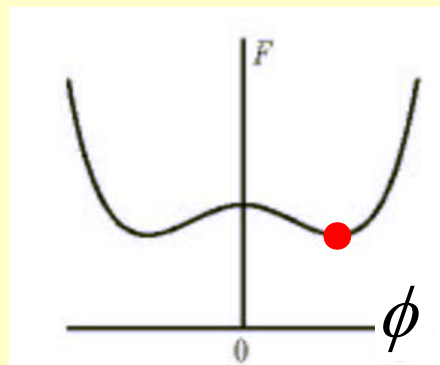
対称性の自発的破れ (大学院修士課程1年で学習)

真空: ポテンシャル(位置エネルギー)の中でエネルギーの一番低い点

ϕ : 対称性を自発的に破るための新たな粒子の自由度



対称性の破れていない真空: この形のポテンシャルでは対称性は破れない



対称性の破れている真空: この形のポテンシャルでは対称性が破れる



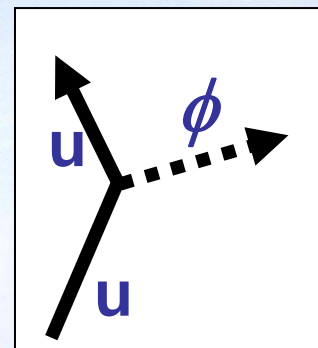
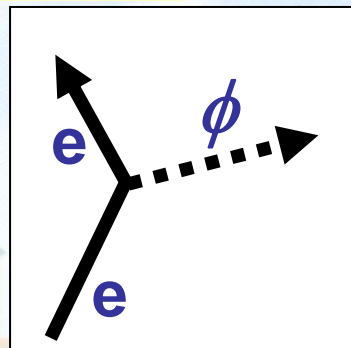
南部陽一郎



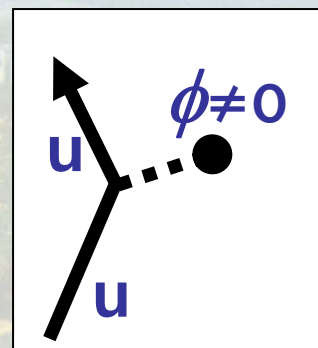
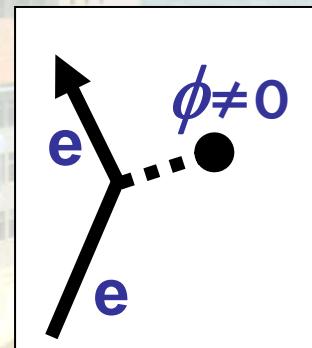
ゴールドストーン

対称性の自発的破れによる質量の生成

ϕ (新粒子)が存在すると、クォーク・レプトンと新たな粒子の相互作用が生じる



$\phi \neq 0$ となった場合、クォーク・レプトンは至る所で ϕ の効果を感じる(W・Zも同様)



ϕ の効果を感じる粒子は光の速度より遅くしか飛べない

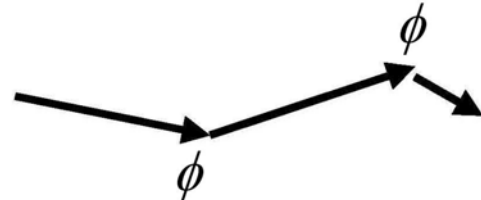
→ ϕ の効果を感じる粒子には質量が生じる

→ ϕ の効果は、結合の強さに比例して大きく現れるので、結合の強さに比例して大きな質量が生じる

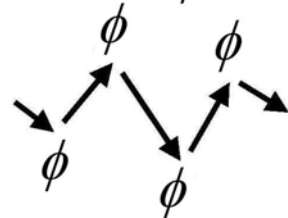
光子



電子
(軽い)



tクォーク
(重い)



なぜ対称性の自発的破れにそんなにこだわるかと言うと

1. 素粒子間の力の理論では、**ゲージ対称性**がないと、**くりこみ**の操作により意味のある答を出せない
2. 弱い力の理論では、**ゲージ対称性**のためにゲージ粒子やクォーク・レプトンの質量は0となってしまう
3. **ゲージ対称性の自発的破れ**の場合には、ゲージ粒子やクォーク・レプトンの質量は元々0でも結果的に質量を出すことができる

→ **ゲージ対称性の自発的破れ**に起因する質量の導入により、くりこみの操作もうまく出来、W・Zボゾン・クォーク・レプトンの質量も出すことが出来る

ゲージ対称性の自発的破れを起こすには、新たな粒子 ϕ (**ヒッグス粒子**)を導入する必要がある



ヒッグス



キップル

ヒッグス粒子はまだ発見されておらず、質量も未定

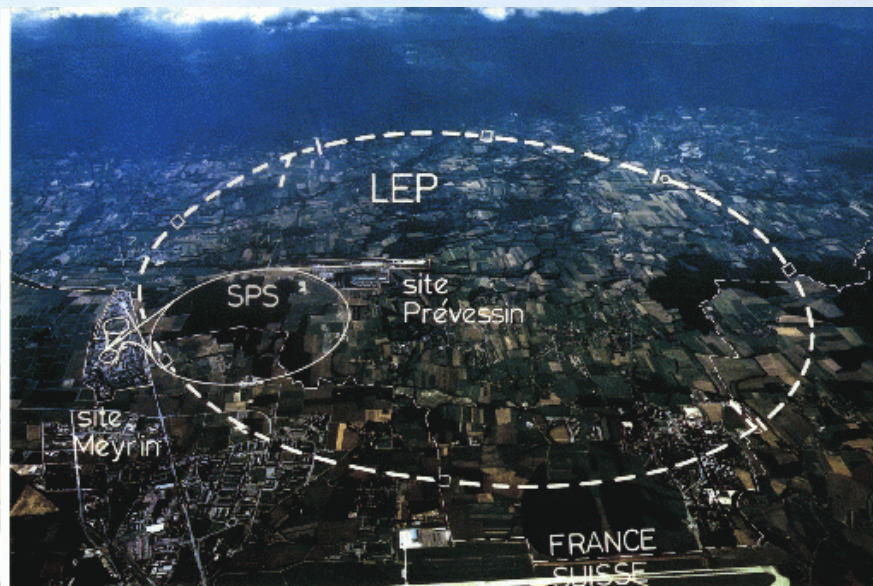
標準理論と実験の比較

LEP (Large Electron Positron collider)

1989年～2000年 LEP (電子陽電子大衝突装置; LHCが使っている周長27kmのトンネルは元々LEP用のものだった)

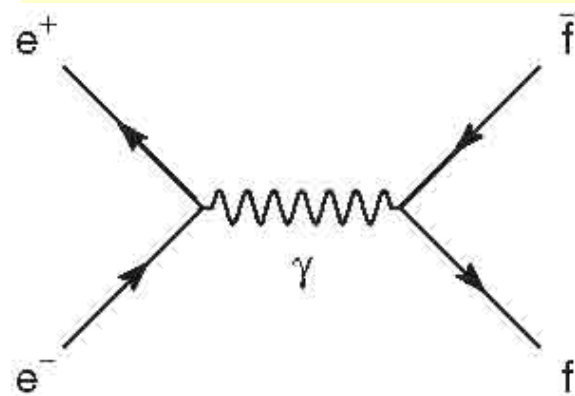
= 粒子・反粒子消滅実験

LEPでは電子と陽電子のエネルギーの和をZボゾンの質量エネルギーと等しくしたので、Zボゾンが大量に生成できる→Zボゾンの相互作用に関する研究が可能



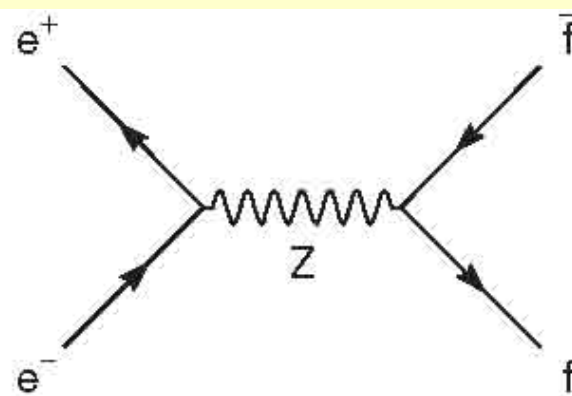
その結果は標準理論の予言通りだった

$$e^- + e^+ \rightarrow \text{光子} \rightarrow f + \bar{f}$$



空間方向

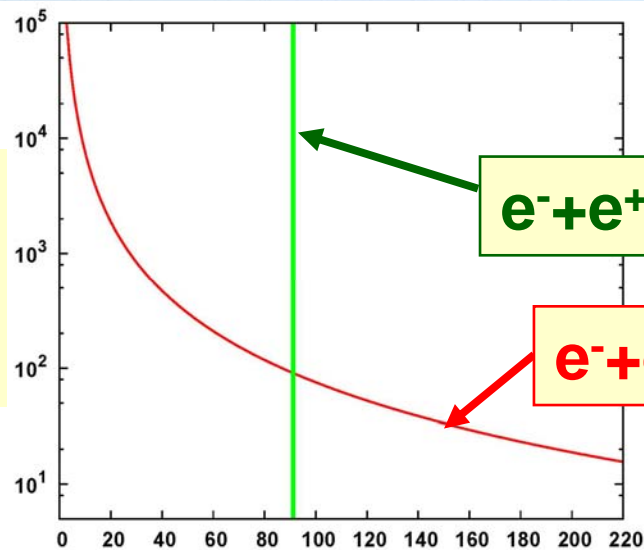
$$e^- + e^+ \rightarrow Z\text{ボゾン} \rightarrow f + \bar{f}$$



時間方向

f, f-bar はクォーク・レプトン

イベント数



$$e^-+e^+ \rightarrow Z\text{ボゾン} \rightarrow f + \bar{f}$$

$$e^-+e^+ \rightarrow \text{光子} \rightarrow f + \bar{f}$$

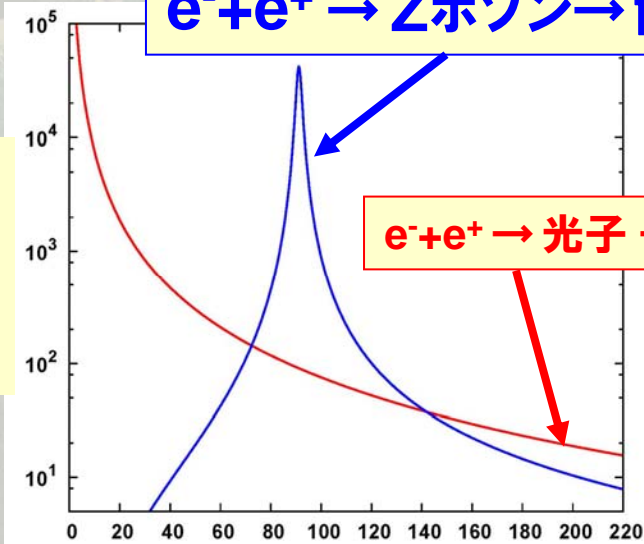
電子+陽電子のエネルギーの和

光子経由のイベントは
なだらかな減少関数
(赤)、Z経由のイベ
ントは本来は厳密に
シャープな線(緑)にな
るはずだが、..

不確定性原理によりエネルギーの
測定には誤差があらわれて幅の大
きな山型曲線(青)になる



イベント数

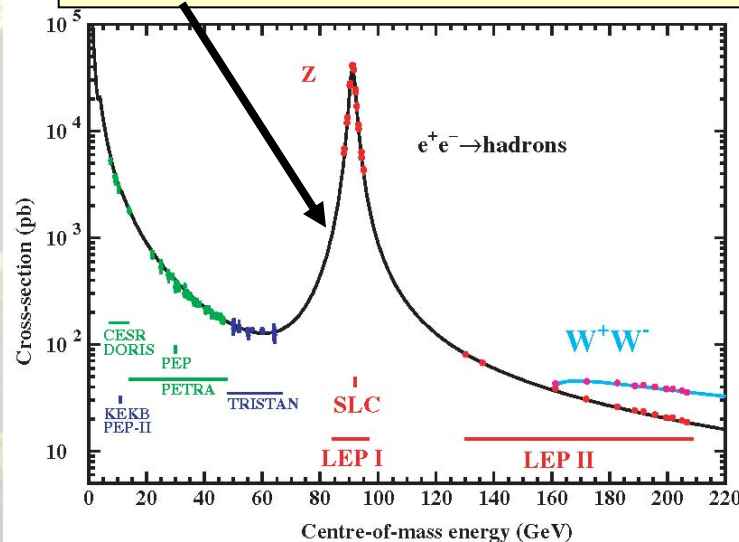


$$e^-+e^+ \rightarrow Z\text{ボゾン} \rightarrow f + \bar{f}$$

$$e^-+e^+ \rightarrow \text{光子} \rightarrow f + \bar{f}$$

電子+陽電子のエネルギーの和

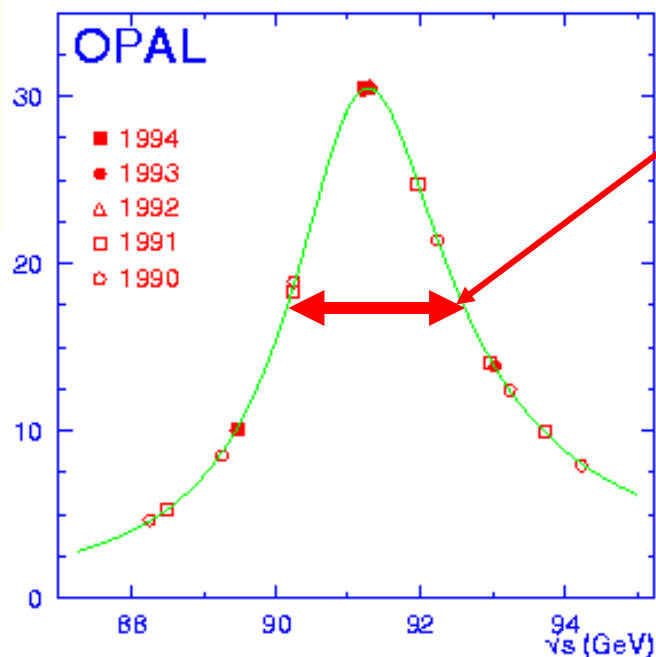
結局、光子経由とZ経由のイベント数
の和(赤+青)は以下のようなになる



ところで、世代の数はなぜ**3**だと言えるか？
ひょっとするとエネルギーを上げていけばもっと重たい第四世代以降のクォーク・レプトンが見つかるのではないか？

→実はLEPの結果＋理論的考察から世代数が**3**だと言える

イベント数



電子＋陽電子のエネルギーの和

このピークの幅(= ΔE)から
($e^-+e^+ \rightarrow Z \rightarrow$ 全部)のイベント数がわかる

[注] 不確定性原理から

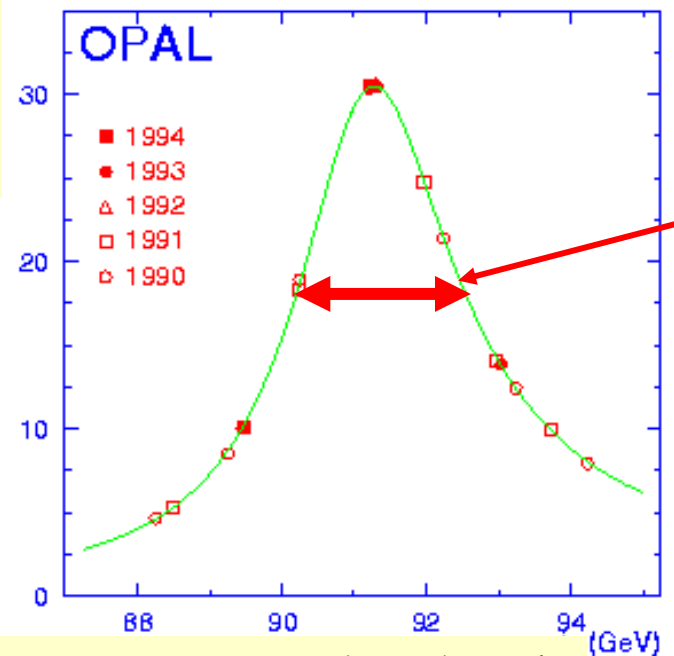
$$\Delta E \times \Delta t = \Delta E \times (Z \text{の寿命}) = h / (4\pi),$$
$$(Z \text{の寿命}) \propto 1 / (e^-+e^+ \rightarrow Z \rightarrow \text{全部のイベント数})$$

[注]

- イベント数は相互作用の強さが強いほど増大する
- 相互作用が強いほど反応が速く起こり、寿命は短くなる(理論的に既知)

世代の数はなぜ3だと言えるか

イベント数



電子+陽電子のエネルギーの和

$Z \rightarrow \nu + \bar{\nu}$ のイベントは、ニュートリノが中性粒子(かつ強い相互作用をしない粒子)であるために観測はできないが、以下のようにして間接的に勘定できる:

[注] 不確定性原理から
 $\Delta E \times \Delta t = \Delta E \times (Z \text{の寿命}) = h/(4\pi)$ 、
 $(Z \text{の寿命}) \propto 1 / (e^- + e^+ \rightarrow Z \rightarrow \text{全部のイベント数})$

$(e^- + e^+ \rightarrow Z \rightarrow \nu + \bar{\nu} \text{ のイベント数})$

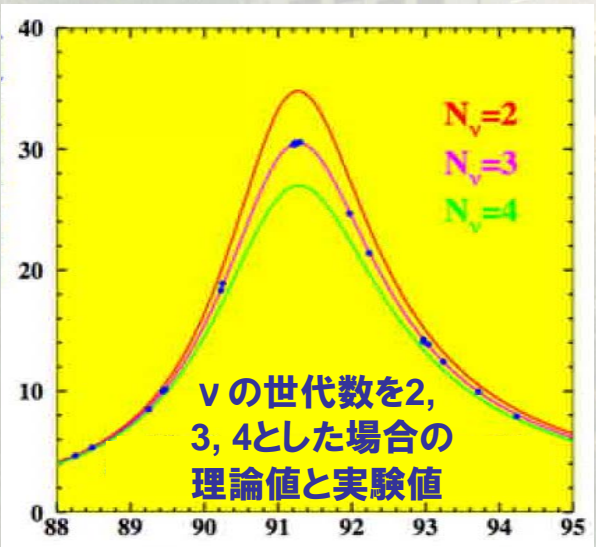
$= (e^- + e^+ \rightarrow Z \rightarrow \text{全部のイベント数})$

$-(e^- + e^+ \rightarrow Z \rightarrow (\text{電荷のある}) \text{レプトンのイベント数})$

$-(e^- + e^+ \rightarrow Z \rightarrow \text{ハドロン} \text{のイベント数})$

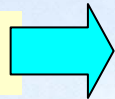
これからニュートリノの世代の数が3だとわかった

さらにゲージ対称性からクォーク・レプトンは各世代で第一世代と同じであるべしということが言える→クォーク・レプトン世代の数は3だと言える



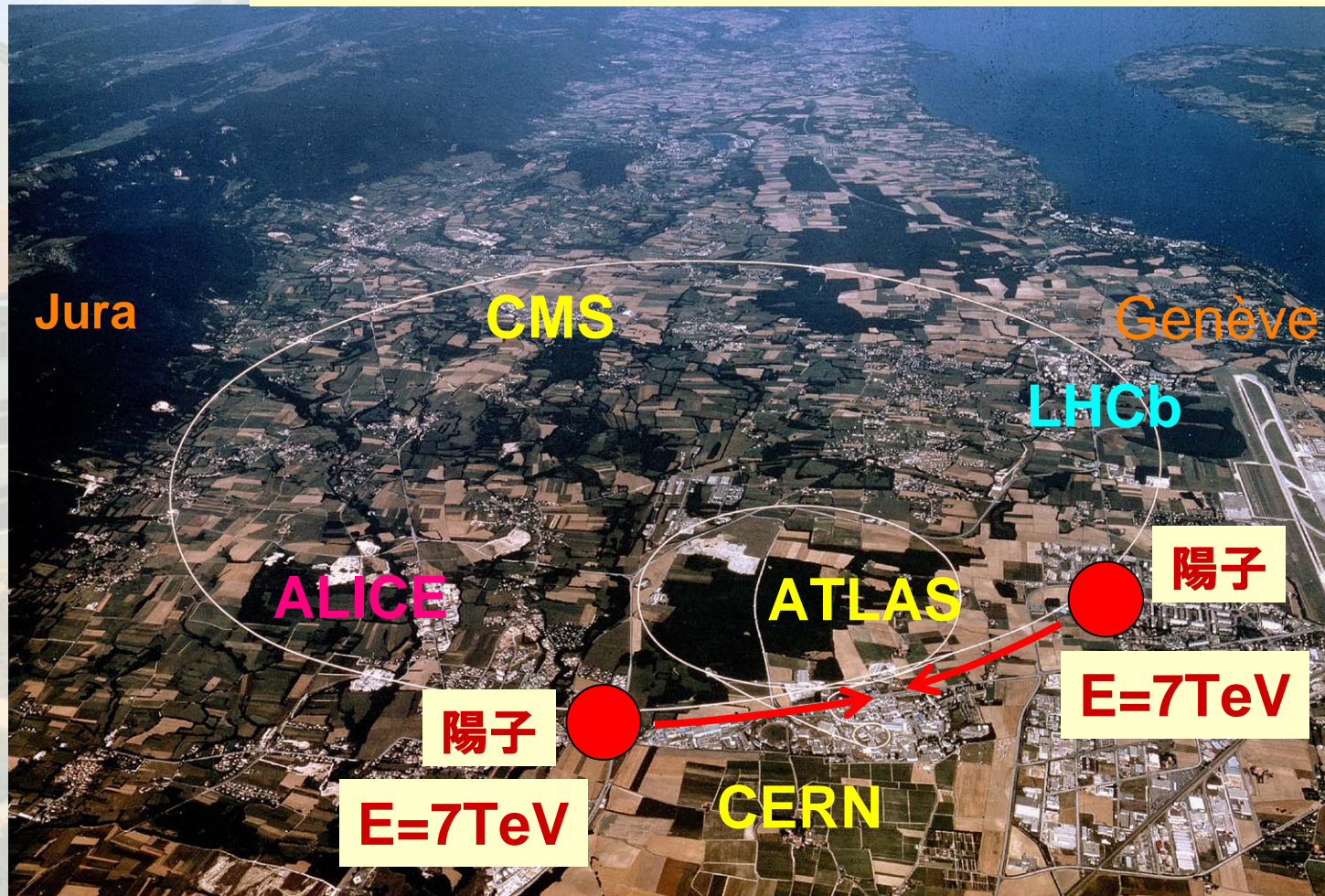
標準理論の範囲内での未解決問題

ヒッグス粒子が未発見



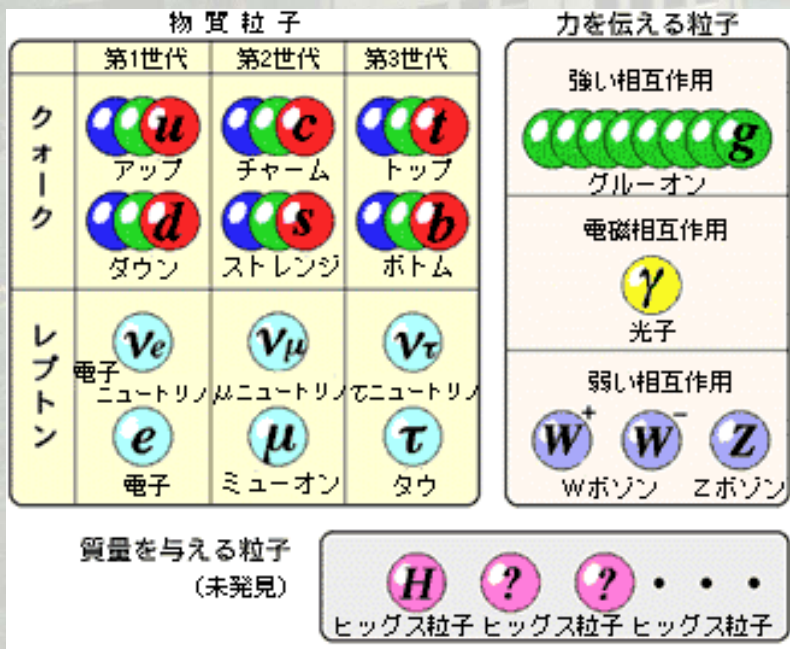
LHC実験 (Large Hadron Collider; スイス・ジュネーブ・CERN) が2008年から稼働しており、探索中

ヒッグス粒子や未知の粒子を探るのが目的



標準理論のまとめ

- 物質は三世代のクォーク・レプトンから構成される
- クォーク・レプトンの相互作用はゲージ理論で記述される
- 弱い相互作用には対称性の自発的破れがあるために、クォーク・レプトン・ゲージ粒子に質量が生じる



相互作用	相互作用の媒介粒子	媒介粒子の質量	相互作用の大きさ
強い相互作用	グルーオン	0	1
電磁相互作用	光子	0	10^{-2}
弱い相互作用	W,Zボゾン	約100GeV	10^{-5}

An aerial photograph of a university campus. In the center, a large, irregularly shaped pond is surrounded by a paved walkway. To the left and right of the pond are several multi-story, light-colored buildings with red-tiled roofs. A prominent feature is a circular building with a white facade and several columns, situated on the left side of the pond. The background shows more campus buildings and a clear blue sky with scattered white clouds. The overall scene is bright and well-lit.

付録

ここでは数学的な話が出てきてしまいます。

ゲージ理論 (大学院修士課程1年で学習)

ゲージ対称性 :

理論に現れる場 $f(x, y, z, t)$ に関して、時空の位置に依存する位相 $\theta(x, y, z, t)$ による変換

$$f(x, y, z, t) \rightarrow e^{i\theta(x, y, z, t)} f(x, y, z, t)$$

に対する不変性

ゲージ理論 : ゲージ対称性を持つ理論

ゲージ場 : ゲージ対称性を持たせるのに導入する粒子

$$\begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} A_0 \\ A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \partial\theta/\partial t \\ \partial\theta/\partial x \\ \partial\theta/\partial y \\ \partial\theta/\partial z \end{pmatrix}$$

[注] 数学に関する若干の説明 (1)

指数関数

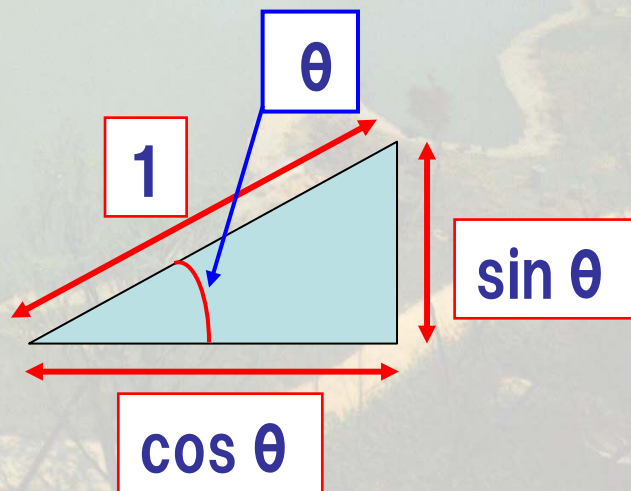
- $f(x)=2^x$ のような関数を指数関数という
[利子の計算（複利計算）に登場、ねずみ算]
- 次式で定義される数を自然対数の底という

$$e = \lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{1}{n}\right)^n = 2.718\cdots$$

- $f(x)=e^x$ の関数は微分と呼ばれる操作をする時に簡単になるため、しばしば用いられる

三角関数

- 角度 θ に対して右図のように定義される量を $\sin \theta$, $\cos \theta$ と呼ぶ：

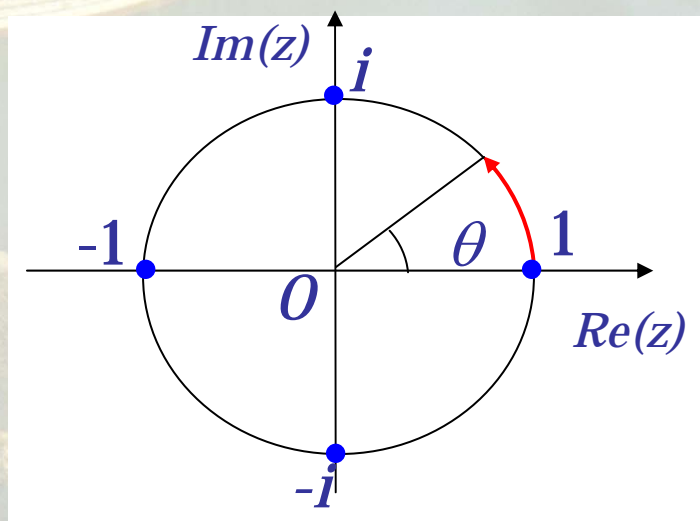
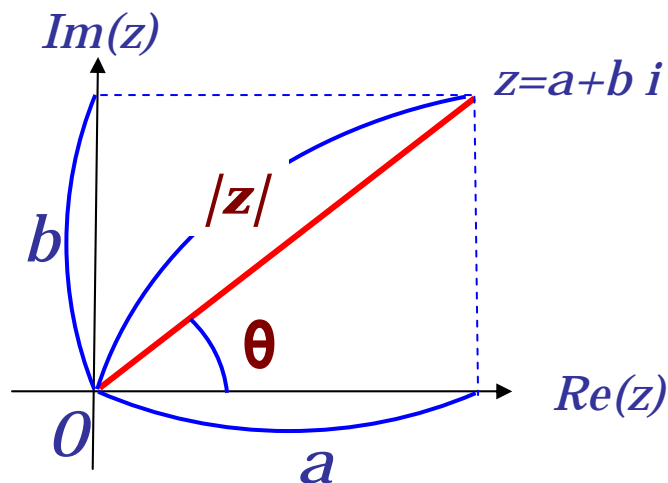


[注] 数学に関する若干の説明 (2)

実数と複素数

- 実数とは二乗するとゼロ又は正となる数：(例) $(-1)^2 = (-1) \times (-1) = +1 > 0$
- 虚数とは二乗すると負になる数(定義)：(例) $i^2 = i \times i = -1 < 0$
- 複素数は実数と虚数をあわせた数全体： $z = a + bi$ (a, b は実数で、それぞれ $a = \text{Re}(z)$, $b = \text{Im}(z)$ と書き、 z の実部(real)、 z の虚部(imaginary)と呼ぶ)
- $|z| = \sqrt{a^2 + b^2}$ を複素数 z の絶対値、 $\tan \theta = b/a$ を複素数 z の偏角(物理では位相とも)と呼ぶ
- オイラーの公式 $e^{i\theta} = \cos \theta + i \sin \theta$ が成り立つ
- 複素数の極形式： $z = re^{i\theta} = r(\cos \theta + i \sin \theta) = a + bi$
- $e^{i\theta}$ をかけることは偏角を変えることに相当し、**複素平面内の回転に相当**

複素平面と呼ばれる図



[注] 数学に関する若干の説明 (3)

微分

$y=f(x)$ の微分は、

$$\frac{df}{dx} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x+\varepsilon) - f(x)}{\varepsilon}$$

と定義され、 $(x, f(x))$ での接線の傾きを表す

偏微分

$w=f(x,y,z,t)$ の偏微分は、

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x+\varepsilon, y, z, t) - f(x, y, z, t)}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial f}{\partial y} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x, y+\varepsilon, z, t) - f(x, y, z, t)}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial f}{\partial z} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x, y, z+\varepsilon, t) - f(x, y, z, t)}{\varepsilon}$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{f(x, y, z, t+\varepsilon) - f(x, y, z, t)}{\varepsilon}$$

と定義され、関数 $f(x,y,z,t)$ の各座標方向の変化を表す

標準理論には

ϕ :ヒッグス粒子の場(粒子を記述する自由度)
がポテンシャルとして現れる

→エネルギーの一番低い点を選ばれるために
 $\phi \neq 0$ となる

→ゲージ対称性が破れる

→ゲージ粒子とクォーク・レプトンが質量を持つ

クォーク・レプトンの質量に関しては理論に

$$m\bar{\psi}\psi$$

の項がある場合($\bar{\psi}, \psi$ はクォーク・レプトンの場)、 m がクォーク・レプトンの質量を表すが、標準理論には

$$g\phi\bar{\psi}\psi$$

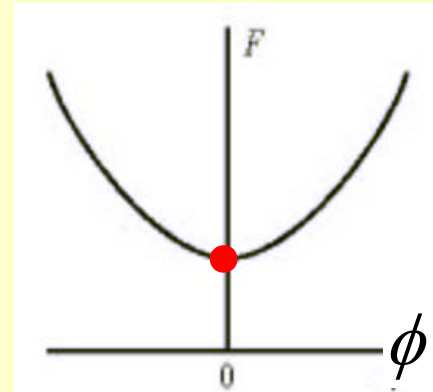
という項が存在している(g は結合定数)

対称性の破れていない場合には $\phi=0$ とおくと

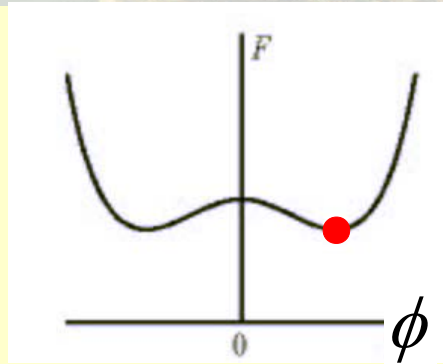
クォーク・レプトンの質量は0となる

対称性の破れている場合には $\phi=v$ とおくと

クォーク・レプトンの質量は gv となる



対称性の破れていない真空：
この形のポテンシャルでは対称性は破れない



対称性の破れている真空：
この形のポテンシャルでは対称性が破れる