

# USLHC BLOG 記事より(その2)(ver 0.9)

15 Dec. 2011  
Ken Yokoyama

## 【目次】

昨年に引き続き 2011 年の間に Quantum-Diaries に掲載されてた USLHC Flip Tanedo さんのブログの記事をまとめました。記事へは【目次】よりリンクをはりました。各記事の概要を一言だけ入れました。

## 掲載記事

### 1、Mysterious of Mesons, Part I: The Eightfold Way

神秘的なメソン, Part1:八道説 [【原文】](#) [【記事】](#)

湯川理論から中間子ができましたが、この中間子のことをメソン(meson)といいます。中野-西嶋-Gellmann はアイソスピンとスーパーチャージを定義し、このことから「八道説」ということが帰結されます。1960 年代に大量に素粒子が発見された時代に、体系的に素粒子理論として整備されました。

### 2、No love for low scale supersymmetry at th LHC

LHC での低エネルギーでは超対称性に愛はないよ [【原文】](#) [【記事】](#)

階層性の問題に超対称性が有力な解決をもたらすので、LHC の実験で超対称性粒子（パートナー粒子）の発見が期待されていたのですが、2月段階ではどうも否定的な結果が導かれつつあることが、バレンタインデーに模して記述されている。

### 3、Effective Theories: Dancing with the Quarks

有効理論:クォークと踊る [【原文】](#) [【記事】](#)

有効理論は、Wilson により 1970 年代に確立されました。クォークの内部構造の詳細なしで、クォークの性質を探るときなどに、有効理論は有効性の領域内では重要な結果が得られます。この考え方は現代物理学でも様々な形で登場してきます。

### 4、An Idiosyncratic Introduction to the Higgs

Higgs への特有な入門 [【原文】](#) [【記事】](#)

Higgs 粒子が Feynman 図形にどのように描けるのか、非常に独特な登場のしかたをします。これが LHC の実験ではどのようにして現れるのか、ハドロン化してジェットとなることに言及します。

### 5、A hint of something new in “W+dijets” at CDF

CDF の”W ボゾン+dijets”が新しい何かセントに [【原文】](#) [【記事】](#)

本ポストは 4 月 5 日になされていますが、このポストをきっかけに各ブログが一斉に Higgs の噂を書き出したように私には思えます。この実験は LHC ではなく、Fermilab の実験---W ボゾンが 2 つのジェットになることが書かれています。Higgs の兆候ではとの見解には否定的に書かれています。

## 6、When you're a jet, you're a jet all the way

あなたがジェットするとき、あなたはどうしてもジェットです [【原文】](#) [【記事】](#)

衝突実験ではハドロン化したジェットを検出して分析することになるが、これは Feynman 図形として単純に計算できません。そのために、Higgs 粒子の検出のために、様々な方法が開発されてきました。バックグラウンドと検出したいものを分離する方法などを具体的に David Krohn さんの話として記述する。

## 7、A diagrammatic hint of masses from the Higgs

Higgs からの質量の図形的なヒント [【原文】](#) [【記事】](#)

Higgs 粒子は、スカラーボゾンで、他の粒子に質量を与えることが可能です。光子とは相互作用せず、弱い力にのみ反応し、短距離相互作用しかしません。端点を持つ Higgs の線が質量と解釈することが出来ます。電弱対称性の破れに関係しています。

## 8、Higgs and the vacuum: Viva la “vev”

Higgs と真空: やったぜ「真空期待値」 [【原文】](#) [【記事】](#)

Higgs と真空期待値の背後にあるものを示唆する。電弱対称性の破れと Higgs 相

## 9、Helicity, Chirality, Mass, and the Higgs

ヘリシティ、カイラリティ、質量そして Higgs [【原文】](#) [【記事】](#)

ヘリシティとカイラリティの相違点が述べられる、特殊相対論との関係では、有質量に対してはヘリシティとカイラリティとは異なり、無質量の粒子に対しては同一です。W ボゾンは左手系のカイラリティを持つフェルミオンとのみ反応し、右手系のフェルミオンとは反応しません。時空内物理的な電子は、電子と反陽電子との mixing 状態であり、この混合状態を創出するときに、電子と反陽電子との弱い力のチャージを吸収するものが Higgs の真空期待値となり、この破れが電弱対称性の破れであり、標準理論を超える理論への動機となっています。

## 10、The Birds and the Bs

鳥(Birds)たちと蜂(B)たり(ペンギン機構と B メソン) [【原文】](#) [【記事】](#)

$B_s$  も  $B_d$  も両方とも中性の粒子で、それらがメカニズムとして反粒子と量子混合します。この混合は、有質量のフェルミオンのフレーバ現象と似ています。CDF の実験の結果は、LHCb の実験の結果では確認できていません。 $B_s \rightarrow \mu\mu$  の寄与が Higgs の探求に重要です。

## 11、The spin of gauge bosons: vector particles

ゲージボゾンのスピン、ベクトル粒子 [【原文】](#) [【記事】](#)

9のヘリシティとカイラリティをスピン1のボゾンへ拡張します。すると余剰な非物理的な自由度が出てきて、この自由度がゲージ不変性の根拠になります。

## 12、Who ate the Higgs?

誰が Higgs を食べたのだろうか? [【原文】](#) [【記事】](#)

質量を持つベクトル粒子は、縦方向の自由度があります。自発的対称性の破れの理論は、スベクトルに質量のないベクトル粒子を必ず持ちます(南部-Goldstone の定理)。標準モデルでは4つの Higgs たちを想定していて、 $H^+$ ,  $H^-$ , そして  $H^0$  がそれぞれ  $W^+$ ,  $W^-$ , そして  $Z$  に食べられ、質量を持つベクトル粒子に要求されることとなります。これが電弱対称性の破れの意味です。

### 1 3、Why do we expect a Higgs boson? Part I: Electroweak Symmetry Breaking

何故、Higgs ボソンは期待されるのか？ Part I：電弱対称性の破れ [【原文】](#) [【記事】](#)

Higgs が物質粒子と力の粒子へ質量を与えます。このことは一方では、ほとんど Higgs ボソンが存在せねばならないことを意味します。Higgs のポテンシャルは、メキシカンハットの形をしており、ポテンシャルを最小とすることは「くぼみ」の部分に相当し、これが電弱対称性を破ります。

#### 関連する記事

##### 1、Hierarchy problem and why electrons don't have infinite mass

階層性問題と、何故電子は無限大の質量をもたないのか [【原文】](#) [【記事】](#)

階層性の問題と、電子の質量を計算すると有限の値となります。(2009年のポスト)

##### 2、 $E=mc^2$

$$E=mc^2$$

[【原文】](#) [【記事】](#)

Einstein の  $E=mc^2$  の意味。(2009年のポスト)

##### 3、Solar neutrinos, astronaut ice cream, and flavor physics

太陽ニュートリノ、宇宙飛行士のアイスクリーム、フレーバ物理学 [【原文】](#) [【記事】](#)

2010年のポストで、ニュートリノの混合、フレーバ物理について記述されている。

-----  
改訂履歴 ver 0.9 (暫定公開版)  
-----

2011年の F.Tanedo さんの記事も、昨年同様に非常に興味深い記事になっています。特に「ヘリシティ、カイラリティ、質量、そして Higgs」は、素晴らしい記事です。それに続く、「誰が Higgs を食べたのか?」「ゲージボソンとベクトル粒子」「何故、Higgs は期待されるのか? Part1:電弱対称性の破れ」と続く流れは、じっくり読む価値のある記事と思います。電弱対称性の破れの Part2 は、期待される場所ですが、まだ出ていないので掲載できず残念です。

また、[関連の記事](#)として、3点加えました。この小冊子より参照になっていて、小冊子(その1)に掲載していないものを加えました。また、本文が update される重要なコメントについては、追記いたしました。

昨年同様に、非専門家にも素粒子物理の面白さを伝えるように、しかも厳密さをできるだけ失わないように配慮されている記事です。そして何よりも、現在進行中の CERN の LHC の実験に密接に関連を持っていて、非常にエキサイティングなことです。非常に面白い記事をありがとうございます。Tanedo さんに感謝いたします。私のブログに掲載した記事の内容を再吟味しました。対訳の拙劣なことご容赦願います。残念ながら、USLHC のブログのコメントについては、重要なことも多くありますが、ほんの一部しか反映しておりません。(注)である「※」は私が入れたものです。Wikipedia 日本語版へのリンクも、日本語版にあるものは追加しました。

15 Dec. 2011 Ken Yokoyama

## Mysteries of Mesons, Part 1: The Eightfold Way

### 神秘的なメソン, Part1:八道説

[【次の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by [Flip Tanedo](#) on 29 Jan 2011 at 07:17 pm

※ メソンは「中間子」という訳もあるわけですが、メソンのままとします。2個のクォーク(と反クォーク)で形成される考えられるものをメソンといい、3個のクォークから形成されるものをバリオンののですが、バリオンとメソンの対比の意味でカタカナのままとします。歴史的には、もちろん中間子の理論が湯川理論であること、または中野-西島-Gell-Mann の理論(アイソスピンとパイパーチャージ)として出てきていて、Gell-mann の命名であることを注意させてください。(私の勝手な注です。)

やあ、皆さん！私の [Feynman 図形のポスト](#) から少しだけ脱線します。その理由は、Higgs や、より広い展望をもたらすシナリオを得る前に説明したい、重要な考え方があるからです。しばらくの間、メソンの物理の脈絡でこれらの考え方を説明したいと思いますが、それらをもっと短くしたいと決心するまでは、私のドラフトのポストがまだまだ終わりません；このポストは一連の最初のピースです。

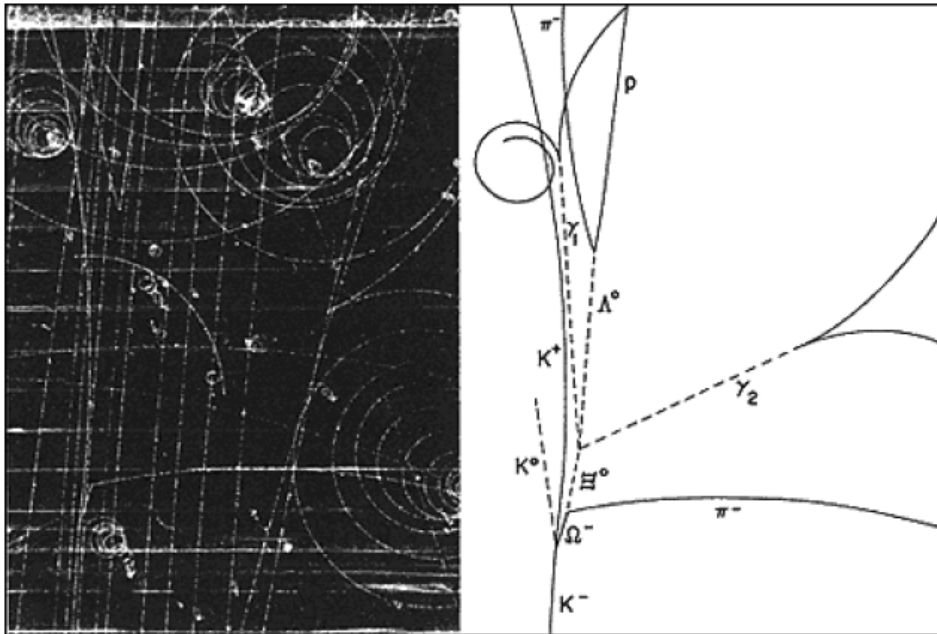
※ [Feynman 図形のポスト](#) の日本語版は、小冊子(その1)の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』を参照下さい。

**メソン(meson)** はクォークと反クォークのバウンド状態(一種のクォークの「原子」)です。メソンは、多くの「知らないことを知って(“known unknowns.”)」ので、興味があります。量子色力学は、原理的には、メソンの系について知りたいことをすべて教えてくれるはずですが、しかし、第一原理からすべてを計算することは**非常に困難**(多くの場合実践的には不可能)です。これについては、既に、何故かを知っています。そうです、**非摂動性**です。

※ **非摂動性** の日本語版は、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の『[Feynman 図形がうまくいかないとき](#)』を参照下さい。

※ **メソン(meson)** 中間子と訳されますが、本小冊子ではメソンで統一することにします。(日本語版 [wikipedia](#) へリンクしています。)

しかしここに奇妙なことがあります：メソンを形成している基本粒子のクォークやグルオンについて知るよりも、メソンは古くから長く知られていることです。最初に「基本的な」対象を発見することに代わりに、初期の加速器で物理学者には、「基本的な」理論(QCD)の生成する複雑な力学系を観察することは、多すぎるおかしな粒子を発見し、それらがどこから来て、何故それらがそのように多いのかについてのアイデアがありませんでした。彼らはこれらの粒子が互いに相互作用をすることを、たとえば、泡箱の軌跡を見ることによって、知っていました。(画像はBNLのもので [image from BNL](#)):



今回の一連のポストの中では、過去の世代の物理学者はいかにしてメソンの理論を開拓したかを、少し探ってみましょう。半世紀以上もたっているにもかかわらず、この物理は、毎月のように新しい粒子が発見されていたときが、（つまり 1960 年代は）夢のような時代でした。その時の教訓は、LHC の新しい結果の解釈に適用できるでしょう。さらに、その時に開発された理論的なアイデアが、驚くほど新しい方法で開発され続けていることを知っています。

## The Eightfold Way 八道説

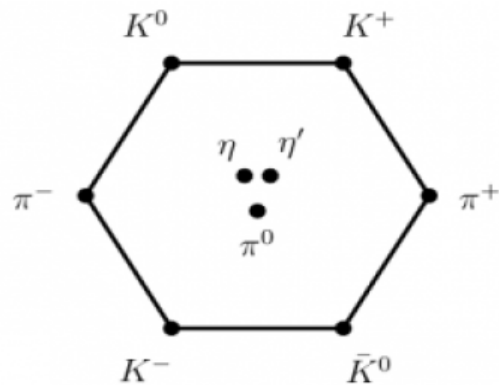
これらの新しい粒子のすべてを物理学者が発見したときに、欲しいと思う最初の一つが、それらを分類する方法を探すことです。

Jim の就任時のポスト [Jim's inaugural post](#) に、「八道説」の素晴らしい例が与えられています。この考えは Murray Gell-Mann（独立に Yuval Ne'eman によっても）により、もともとは考案された、1960 年代のハドロンの周期表の一種です。Jim は陽子、中性子とさらにエキゾチックな仲間のいくつかを表しているバリオン表を示しました。以下にこれに似ているメソンの表があります：

※ Jim's inaugural post は、Quantum-Diaries の [But what are quarks made of?](#)へリンクされています。

※ [バリオン\(baryon\)](#) 日本語版 wikipedia

※ [ハドロン\(hadron\)](#) 日本語版 wikipedia



これが何であるかを説明する前に、この絵から始めることでどんなことを学ぶことができるでしょうかを説明します。

各々の点はメソンを表しています。粒子の名前に3つのタイプがあります：**パイオン** ( $\pi$ )、**ケイオン** (K)、そして**エータ** ( $\eta$ )です。

明らかに、その他に対する各々の粒子の関係の位置を意味があります。メソンは、各々、電氣的な電荷：+、-、と中性(0)を持っています。

反粒子は反対の電荷をもっていることを期待しますので、六角形の反対側の点は、互いに反粒子の関係であるように見えます。（これは実際、この場合、反粒子になります）

それで、最初に9つのメソンに会うわけです。これらはもっとも軽いメソンで、実際パイオンが最も軽いメソンです。実際には、これ以外にももっともたくさんのメソンがありますが、今はこのもっとも軽いものに焦点を当てます。パイオンはすべてアップクォークとダウンクォークで作られていて、ケイオンはストレンジクォークを持っていますし、エータは、アップ-反アップ/ダウン-反ダウン/ストレンジ-反ストレンジクォークの量子スーパーポジションです。

※ 量子スーパーポジション、量子的な重ね合わせのこと。

しかしながら、化学の周期律表のように、この図形の特別な並び方は、何かを語ろうとしています。クォークの脈絡に従ってこれらメソンを並べることは有効はないだろうかと思えるかもしれません。これには2つの問題があります：

八道説は、クォークの実験的な発見よりも前に開拓されました。（実際、八道説は、クォークが実際に存在するのではないかと人々に示唆する理論的な構造を提供し、また理論的構造の位置つをなしているのです！）

エータで分かるように、いくつかのメソンは個別のクォーク/反クォークのペアではうまく定義せず、むしろクォーク/反クォークのいくつかのタイプの量子スーパーポジションとして定義します。実際、このことは、中性パイオンやケイオンの場合には、正しいことが分かります。

そのため、八道説はクォークの脈絡に、全部が全部、従っているわけでは必ずしもありません、少なくとも直接は結び付いていません。図形の構造は、実際、**メソンの対称性**に基礎をもっています。対称性の記述する数学の分野は、**群論**と呼ばれていて（特に、**表現論**）、今はすべての物理学者の教育の中での主要な話題です。しかしながら 1960年代に戻ると、物理学者にそれほどこの分野について知られていなく、Murray Gell-Mann は本質的には、彼自身にとって適切な数学を再研究をしました。（歴史的にはこれは数学者と物理学者の間でしばしば起こりうることです。）

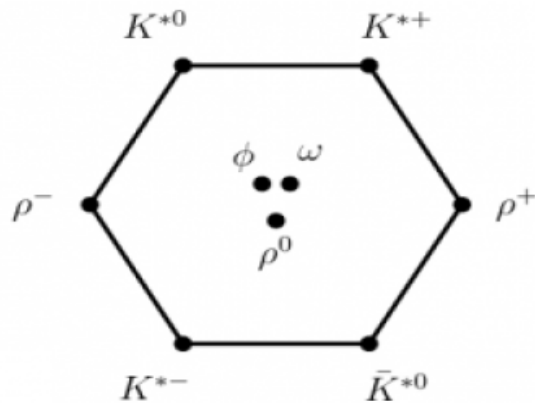
図形の水平軸方向は、**アイソスピン  $I$** と呼ばれます。垂直軸方向は、**ハイパーチャージ  $Y$** と呼ばれます。ここで、重要なことは、通常の電荷が  $Q = I + Y$  で与えられることです。実際、これは次のパターンを見るとわかります：より上でより右側にあるメソンは、正の電荷を帯びる傾向があることに対し、より下でより左側にあるメソンは、負の電荷を帯びる傾向があります。一方、ここではこれらが何を意味しているかの「深い」ことを知る必要はないのですが、粒子の持っている性質と理解ください。まさに、半径を特定して単純に円を描くことが可能なことと同様に、アイソスピンとハイパーチャージを意味する性質をリストとすることで、粒子たちを記述することができます。

※ [アイソスピン](#) 日本語 wikipedia

※ [ハイパーチャージ](#) 日本語 wikipedia 超電荷との訳があります。

上記の図形は、9つの粒子を表していますので、**擬スカラー九重項**（もしくは8重項+1重項）と私は呼びたいのです。（「擬スカラー」は粒子の各運動量について教えてください。）これらはスピンをもたないメソンです。またこれらの粒子たちのより重いバージョンもあり、たとえば、スピンの1の粒子の**ベクトル九重項**です。これは、角運動量を持っているクォークと反クォークの成分の類似で、ハドロンの中の電子の励起状態のようです。

※ [擬スカラー](#) 日本語版 wikipedia



スピン1のパイオンをロー ( $\rho$ ) と呼び、スピン1のケイオンを **K-stars ( $K^*$ )** とよび、スピン1のエータのバージョンをファイ ( $\phi$ ) とオメガ ( $\omega$ ) と呼ぶことが、わかります。事実、これらのより高いスピンのコピーたちもありますが、より重いクォークから形成される類似物については述べません。実際、1960年代は実験物理の「ブーム」の時代で、新しい粒子がほとんど毎週のように発見されていたことが、わかります。

## Relation to modern ideas

### 現代的な考え方との関連

これは、標準モデルを超えた物理の非常に現代的な考えかたと、興味深い関係を持っています。余剰次元のモデルは、**Kaluza-Klein のタワー**と呼ばれる、知られている粒子の類似を集めた「タワー」を予言します。なぜならば、KKタワーはメソンのタワーのように思われるからです。メソンのタワーは、これらが合成粒子であるという事実から出てくるのが理解され、それで、メソンのような合成粒子を余剰次元で真似た理論のように思えます。これは、余剰次元が強結合の理論の「双対」である、**ホログラフィック原理**とか、**ゲージ/重力対応**と呼ばれる原理、理論を基礎とする重要な見方のひとつです。

より広い意味で、上記の議論は、対称性がどのように自然を理解するという中心的な原理となる素粒子物理の深いテーマを表しています ([このことを以前、私は述べました!](#))。今日、理論物理学の基本的ツールのひとつに群論 (対称性の数学的表現) があり、新しい物理モデルは個別の粒子によって多くのことを記述することができなく、理論の対称性の脈絡でのみ記述することができます。



## No love for low scale supersymmetry at the LHC

### LHCでの低エネルギーでは超対称性に愛はないよ

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by [Flip Tanedo](#) on 14 Feb 2011 at 12:01 am



バレンタインデーは、皆さまにとって幸せでしたでしょうか、、、うーん、LHCでの超対称性(SUSY)へのヒントを期待しているのでなければ、ですがね。昨晚、ATLASチームがarXivにその超対称性についてのひとつの[研究結果をポスト](#)しました。彼らは、CMSから[昨年と同じタイプの結果](#)を確認しました。(CDFサイトには[卓越したサマリが公開](#)されていて、公式のバックグラウンドでの物理的な熱狂の正しいレベルであるはずの結果が掲載されています。)

※ ATLASチームの研究結果論文、arxiv:1102.2357 “Search for supersymmetry using final states with one lepton, jets, and missing transverse momentum with the ATLAS detector in  $\sqrt{s} = 7$  TeV pp collisions”

※ 昨月のCMSの結果、arxiv:1101.1628 “Search for Supersymmetry in pp Collisions at 7 TeV in Events with Jets and Missing Transverse Energy”

※ CDFのサイトに公開されているCERNの1月12日の公式発表「Search for Supersymmetry in pp Collisions at 7 TeV in Events with Jets and Missing Transverse Energy」

## What is supersymmetry?

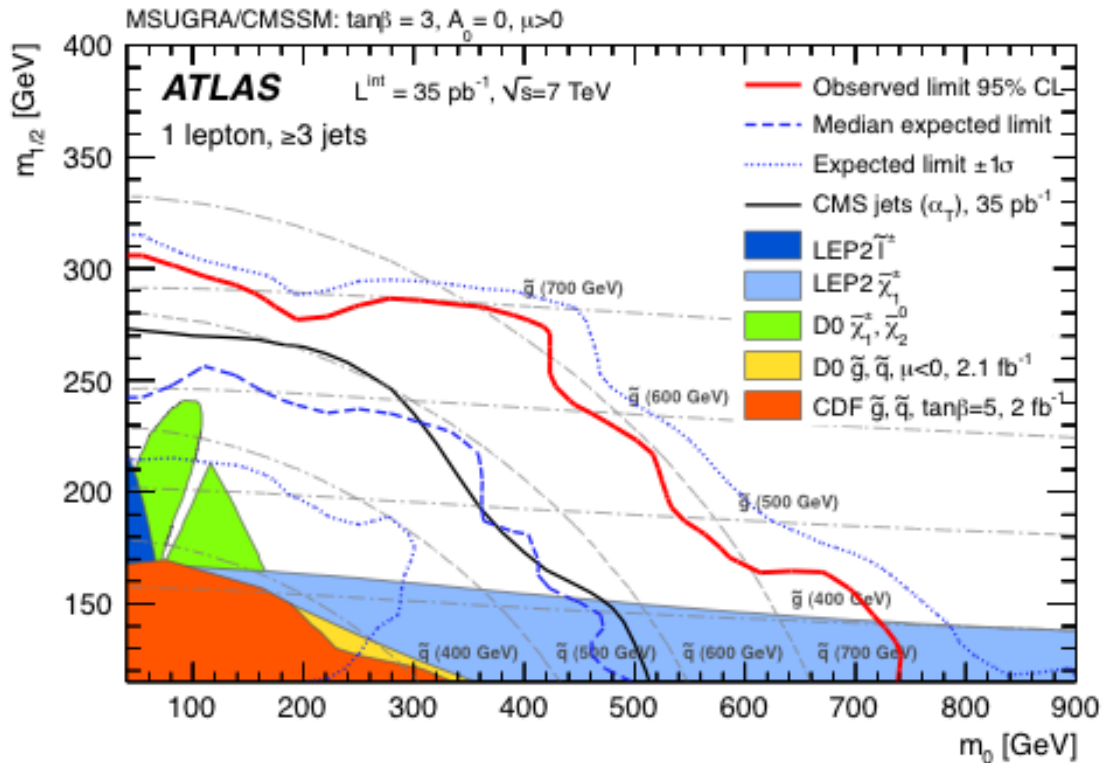
### 超対称性とは何でしょうか？

超対称性とは、標準モデルの拡張で、そこでは粒子と反粒子がスーパーパートナーを組んでいて、少しバカバカしい命名なのですが、「グルーイノ “gluinos”」はグルオン(gluons)のパートナーで、「スクォーク “squarks”」はクォーク(quarks)のパートナーです。超対称性についてのきちんとしてことは、物質粒子のパートナーには(サフィックス “s-” を付けて)力の粒子とし、一方、力の粒子のパートナーには(サフィックス “-ino” と付けて)物質粒子とします。超対称性(SUSY)は、非常の多くのことを理論的に提供する材料ですが、しかし(超対称性は)破れていなくてはいけなくて、標準モデルの粒子と超対称性(SUSY)粒子とは分離して異なる質量をもちます。今日はバレンタインデーなので、この分離の詳細については別の機会にポストにすることにしましょう。

## What is the LHC telling us?

### LHCの結果は何を意味しているのでしょうか？

ここに、ATLASの論文から重要なキーとなるプロットを掲げます（CMSの結果も含まれています）:



詳細に入らずに、できる限り（分かり易い）議論をするようにします。プロットしている軸は、特別な超対称性モデルのパラメータです。水平方向の軸は、「ユニバーサルスカラー質量“universal scalar mass”」の  $m_0$  で（スクォークの質量に関係しています）、一方、垂直軸は、「ユニバーサルグルーイノの質量“universal gaugino masses”」（グルーイノとその仲間の質量に関係）です。曲線の内側の領域（より軽い質量）は除外されています。赤い線はATLASの結果で、黒い線は最近のCMSの結果で、他の線は古い実験で様々に除外されたものです。

これらのパラメータは、同じスーパーパートナーの質量と全く同じものとはいえませんが、しかし場の理論の専門家が提出しているある公式により関係づけられています。実際のスーパーパートナーの質量の限界の説得力のある見積もりが、論文の結果に表れています:

MSUGRA/CMSSM というモデルのパラメータの集まりに対し、スクォークとグルーイノの質量が等しいとすると、グルーイノの質量は 700 GeV 以下であるという見積もりは、95%の信頼性で棄却されます。

いくつかの解釈として：

- **MSUGRA/CMSSM**：これらは、「最小の超重力“minimal supergravity”」と「束縛された最小の超対称性標準モデル“constrained minimal supersymmetric Standard Model”」という意味です。最も一般的な標準理論の超対称性バージョンには115個を超える自由なパラメータがあり、、、これをプロットすると悪夢になります。簡単にいえば、実験家はこれらの結果をより少ないパラメータ空間をもつ単純化された参照モデルにして、この点を典型的にプロットします。
- **スクォークとグルーイノの質量**：スクォークはクォークのパートナーで、グルーイノはグルオンのパートナーです。実験はこれらの質量の低い方の限界が設定されています。（より重いものを生成することはより困難になることを思い起こしてください）スクォーク／グルーイノの質量の低い方の700 GeVの限界は（それらの質量が等しい場合ですが）、標準モデルのどの粒子よりも非常に重いものです… トップクォークの質量が「たったの」172 GeVであったことを思い出してください。
- **95%の信頼性で**：この信頼性レベルとは、この限界の統計的な強さを説明するもので、大まかには、次の疑問があります。「データに基づいて言っていることが、どのくらい確からしいのでしょうか？」ここに素晴らしい説明があります。 [great explanation](#).

※ [great explanation](#) 2007/03/18 の wordpress の記事、匿名の Higgs 粒子を探している科学者のブログのように思えます。

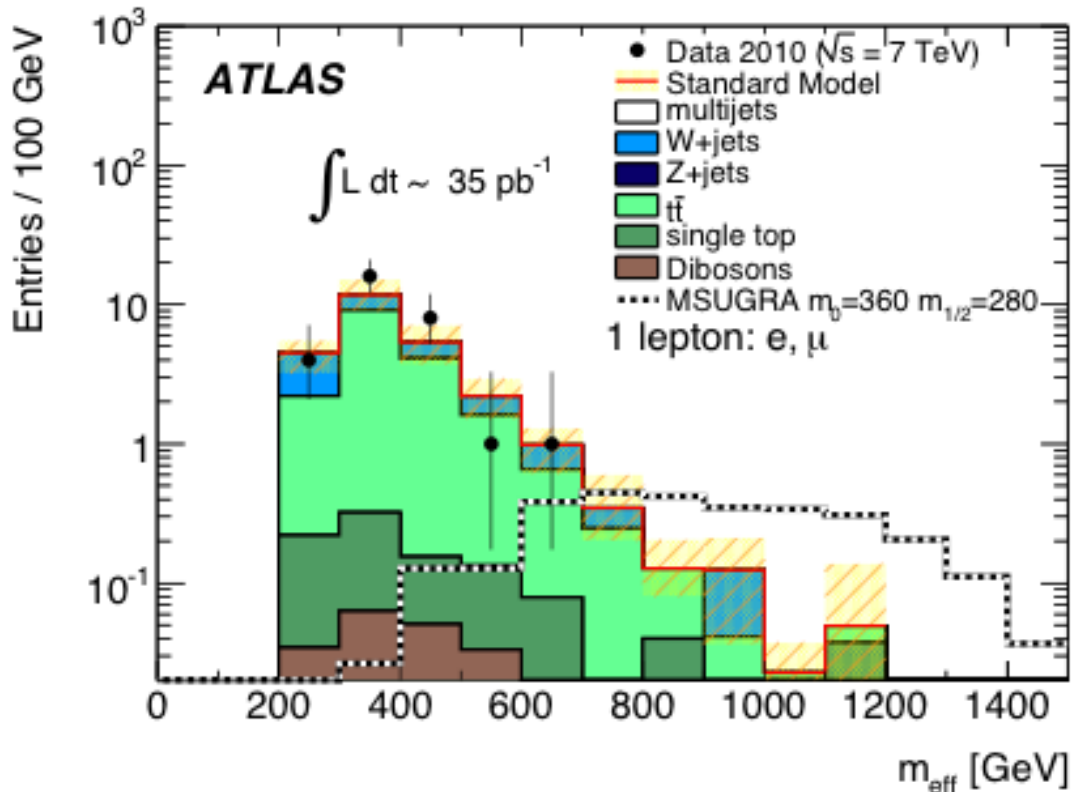
## What's actually happening at the LHC? 何が LHC で実際に起きているのでしょうか？

一般的な考え方として、超対称性 SUSY モデルの共通の様子は超対称性パートナーが衝突器で生成されたときには、結局それはありふれたものとして検出されずに逃げてしまう粒子に崩壊するでしょう。この逃げ出した粒子は、**最も軽い超対称性粒子 lightest supersymmetric particle (LSP)** と呼ばれ、自然なダークマター **dark matter** の候補ですが、しかしその存在は、ありふれたものすべての測定された運動量のバランスを失っているので、実験的に決定するしかありません。このようにして、超対称性パートナーの存在の探索は、この方法で探するのがよいのです：

1. 高エネルギーの「通常の」粒子（典型的には QCD の「ジェット」です）
2. 大きな「失われたエネルギー」、つまり足し上げられていない運動量

高エネルギーは、ある重い(新しい粒子のように)この意味を教えてくれるかも知れないという重要性を持っていて、失われたエネルギーは、検知されずに逃げ去ったものがあることを教えてくれる重要性を持っています。このタイプの崩壊を探ることにより、ATLAS と CMS は、ある質量での超対称性パートナーの存在に制約条件を入れることができるのです。実際、LHC が超対称性 SUSY についての制約条件を大きく改善できる理由は、--- 実験走行の最小のステージでさえも --- Tevatron での以前の制約条件が、どのくらい多くのデータを採取するかによってではなく、衝突のエネルギースケールによって制限されるからです。

ここに例として、他の ATLAS の論文のプロットしたグラフがあります：



このプロットは、「有効な質量」の特別なレンジでのイベントの数を示しています。これは一種のイベントのエネルギーを特徴づける力学変数です。ここで何が起きているかというと：

1. ATLAS は、過去一年以上の大量のデータを記録しています。各々の記録された粒子の衝突について（「イベント」）、ATLAS は検出器で検出したもの（「シグナル」）についての情報を記録しています。
2. 物理学者たちは新しい物理を見つけたいときに、このデータを通して仕事をします。この研究に従事する物理学者たちはレプトン（電子  $e$  もしくはミューオン  $\mu$ ）や、QCD のジェット（クォークやグルオン）や、失われたエネルギーに含まれる情報をイベントにのみ注目しています。
3. 彼らは、従ってあるエネルギーレンジの中にある「有効な質量」のイベントの数をプロットしています。上の図はこれをプロットしたものです。
4. 標準モデルと比較するために、彼らはよくわかっている物理がこの特別なチャンネルの中で生成するシグナルの一種を、「モンテカルロ」シミュレーションを走らせて確認します。これらは、ヒストグラムの色を変えて表示しています… これらはもしイベントの中に新しい物理がないとしても勘定に入れるべきイベントを表示しています。
5. もしデータの点が期待しているイベントのように並ぶとすると、（ある統計的確からしさを添えて）そこには新しい物理は観察されないと結論づけます。

参考のため、点線は超対称性(SUSY)パラメータを特別に選択したときに期待されるイベント数を表しています。この線は、標準モデルの和（細い赤い線で示されています）に加えられるべきものです；明らかに、この過剰を示してはいません。

## What does this mean for supersymmetry?

このことは超対称性にとっては何を意味するのでしょうか？

これは超対称性には大きなニュースではありません。超対称性の素晴らしいことのひとつに、**Higgs 質量の階層性問題**を解くことができることがあります。しかし、もし超対称性 SUSY 粒子が標準モデルのパートナーよりも非常に重いということがなければ、この問題は現実には解決してしまっているのです。このように、スーパーパートナーの質量の低い限界をより上へ押し上げれば押し上げるほど、標準モデルの中での Higgs パラダイムを説明することは、どんどんと難しくなります。

※ **階層性問題** USLHC ブログの「階層性問題と何故電子は無限大の質量をもたないのか」 [Hierarchy problems and why electrons don't have infinite mass](#)」の記事、F. Tanedo さんの記事です。本小冊子の中に日本語で「[階層性問題と何故電子は無限大の質量をもたないか](#)」として収録しました。

最近の ATLAS/CMS の結果が、超対称性の現在の人気のあるモデルのが、どれほど厳しいのかコメントできるほど、私は専門家ではないとは考えています。しかしながら、私の注意したいことは、これらの境界を持った領域を作ることに使用した特定のモデルは、超対称性を持った標準モデルの拡張が、非常に狭い範囲でしかないことを表現しています。上に説明したように、このことはやむをえないことです：115次元を超えるパラメータ空間のプロットは単純には実現できません。これらのパラメータのほとんどは、もっともな方法で関連付けられていて、ATLAS と CMS からの制限領域は、パラメータ空間の巨大な帯の上では可能なかぎり正しいロバスト性をもっています。しかし原理的には、特別な実験的な制限事項を試すために、あちこちからパラメータをいじる多くの自由度があります。[専門家用として：最近、私はこれらの結果の the  $\tan\beta$  dependence (tangent  $\beta$  独立性) という細かなことへのこだわりがあるのか？ということを知りました。]

これは実際に非常に重要な点です。過去 20 年間、理論家たちは、うまい超対称性モデルを探すことに苦労しています。そのモデルは貴重にも実験的に超対称性の兆候を示すことができたり、SUSY を実験的に制限することに使う普通のモデルによっては捕えられない方法で、(SUSY 粒子を)「生成」したりすることができるようなモデルです。しかし、LHC 時代の到来により、さらに新しい考えが、SUSY パラメータのよりロバスト性を持ったものを作るために、私たち実験仲間との話会いによりよい効果を発揮しています。(過去 10 年を超える期間で、理論家たちと実験家たちとの間のよりよいコミュニケーションを作るため、素粒子物理学コミュニティの大きなシフトが起きています。)

いずれにせよ、確かなことはただひとつで：標準モデルの粒子は、バレンタインディには、スーパーパートナーなしでということになるでしょう。



追伸：－ [[Cosmic Variance](#) の記事から] このバレンタインディに、どうやら、ホワイトハウスは2012年の予算要求を受け付けるようです。これ以上の予算のカットとなると、基礎的な科学が多くの愛を得るようには思えませんが、、、しかし、とにかく、私はお祈りします。（私は政治的なことに関わりたくないのですが、基礎的な研究は、アメリカの科学やエンジニアリングの基盤、ひいては未来のアメリカの経済にとっての投資です。）

※ [Cosmic Variance](#) (英文の科学ネット雑誌、2011/02/13 の記事 [Bloodbath for Science](#) がリンク先)

※ 2011年12月1日現在、2011年のバレンタインデーと同様に、LHCでの超対称性粒子の実験的な検証、発見はなされていません。

## Effective Theories: Dancing with the Quarks

### 有効理論：クォークと踊る

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by [Flip Tanedo](#) on 17 Feb 2011 at 06:38 pm

# dancing with the quarks

**前回のポストでは**メソンの「八道説」の分類を見ました。これは**対称性**にのみ基礎を置き、1960年代の物理学者がクォークと反クォークが本質的に原子よりも小さな内部で「ダンス」をしているときに、メソンは非常に込み入った「**非摂動的な**」対象であるにも関わらず、メソンについて意味深い予言をすることができたという議論をしました。（これについて以下にさらに見てみましょう！）

※ 「前回のポストでは」は、本小冊子の「[神秘的なメソン、Part 1:八道説](#)」を参照下さい。

※ 「非摂動的」の日本語版のリンクは、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の『[Feynman 図形がうまくいかないとき](#)』を参照下さい。

## Historical model of mesons

### メソンの歴史的なモデル

実際、科学者たちは、**基本粒子**としてメソンの理論を--- クォークのバウンド状態として -- 観測される軽いメソンの質量と相互作用を正確に記述するものとして発展させたのでした。これらの理論は、「**現象論**」モデルとか、**カイラル摂動理論**、あるいは**非線型シグマモデル**とかとして知られています。これらは、同じアイデアに対してつけられた夢ある名前です。

非線型シグマモデルは、現代の素粒子物理学でも有効なツールで、いわゆる**リトル Higgs モデル**により明らかにされています。これらのモデルでは、多重な対称性が破れて Higgs の質量を生成せねばならないという**共同の対称性の破れ**と呼ばれるメカニズムにより Higgs ボソンは比較的軽いのです。（物理学者によるテクニカルな入門書は、[こちら](#)と[こちら](#)にあります。）軽い粒子が対称性の破れから来るというアイデアは、**Goldstone メカニズム**を通して、その起源をメソンの「現象論」に持っています。

※ [arXiv:hep-ph/0502182v1](#) [arXiv:hep-ph/0512128v1](#) が紹介されています。リトル Higgs モデルの総合報告。

※「Goldstone メカニズム」は、『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の『時空の対称性 IV』を参照下さい。

形式的な観点からはこれらのモデルは理論的な不十分な点を持っています：**低エネルギー**での実験にうまく適合する一方で、**高エネルギー**での予言を計算することに使うとすると、大きな意味を持っているとは思えません。これは実験に適合しないとは言えないのですが、理論は予言をもたらさないように見えるのです！（あるいは、その予言がナンセンスなように見えるのです。）この病気の命名は非摂動性で、アメリカのノーベル賞受賞者である [Ken Wilson](#) がこれらの理論を理解する正しい方法を示しました。

※ Ken Wilson は英語版 Wikipedia にリンクされています。



**Ken Wilson** (b. 1936) は Richard Feynman や Robert Oppenheimer のように公な名声を持ってはいないかもしれませんが、彼は疑いなく世紀の偉大はアメリカの物理学者の一人です。彼の研究は量子場理論の理論的なフレームワークとその素粒子論と凝縮系物性の双方への応用に焦点があります。彼は「[big idea](#)」を実際に理解する分野での偉大な考案者の一人で、私は彼を現代物理学のヒーローであると言えます。

※ big idea は”[Kenneth Wilson and Renomalization](#)”へリンクされています。

非摂動理論は「病気の」理論であることの詳細な意味に入りこむ代わりに、Wilson の重要なキーとなる見方を強調しておきましょう：これらの病的な理論は、注意深く正しい質問をしている限り素晴らしいのです。Wilson はこのステートメントを非常に多くの数学的に厳密でエレガントな方法で示しています --- しかし、このポストでは**直観的**に正しいということに焦点を当てたいと思います。

## Effective theories

### 有効理論

重要な点は、これらの「非摂動的」理論は、より基礎的な理論のまさに近似であることです。これを**有効理論**といいます（大きなアイデアについてはここに[旧いポスト](#)があります）。これらの近似は、正しい「大まかな振る舞い」を得ますが、詳細には働きません。したがって、もしある拒否された詳細について何かの近似を問おうとすると、わけのわか

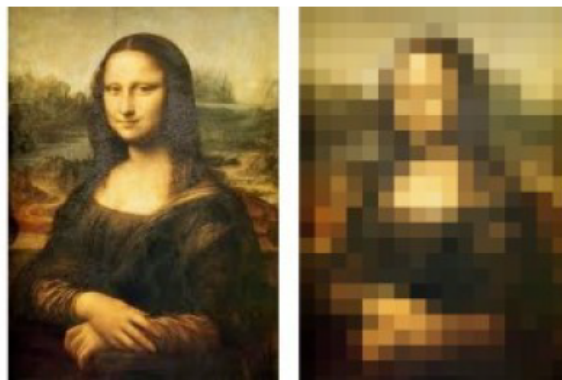


らない反応がでできます。Wilson は、どのようにしてわけのわからないものを理解するかを教えてください。「それに回答するには十分なほど複雑ではないのですよ」というような理論として、

具体的な例として、[前にポストした](#)中のひとつに、「光子 QCD」のデモ用に Mona Lisa のピクセル化したイメージがありました（これは実際、正確に Ken Wilson が仕事をした有効理論を表しています。）

※ 「古いポスト」は、F. Tanedo さんの「My research [Part 2] — effective theories」というタイトルの、2009 年 7 月の記事を指しています。

※ 「前にポスト」の日本語版は、その 1 の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の『Feynman 図形がうまくいかないとき』を参照下さい。



ピクセル化された Mona Lisa は、「基本的な」イメージに比較して、詳細を漠然とさせた「効果的な」イメージです。これらの詳細をイメージから遠くへ取り去っても、同じように見えます。実際、効果的なイメージは、次のような質問に答えることに充分です。

異なる継ぎ目やイメージの全体の色は何でしょうか？（ベージュ／茶色）

イメージの中に何人いますか？（一人です、、、がしかしこのことを後のために覚えておいてください）

他方で、有効な Mona Lisa は次のようなさらに微妙な問題に対しては、完全には準備がなされていません

Mona Lisa はどこをみているのでしょうか？

Mona Lisa は幸せそうなののでしょうか、悲しそうなののでしょうか？

そうです、芸術の歴史家でさえこれらの質問に答えることはできないことが当然でしょう。しかし重要なことは、ピクセル化されたイメージがこれらの質問に回答しようとし始めることさえできないことです --- これらの質問は「有効な」イメージに残されていることを超えた詳細を問うています。そのような質問は、有効なイメージの**有効性の領域**を逸脱しています。

さてここで素粒子物理での非常に重要な教訓があります：

**素粒子モデルは有効性の領域を持っていて、その領域を超えると妥当性をもった予言が間違っただけになります。**

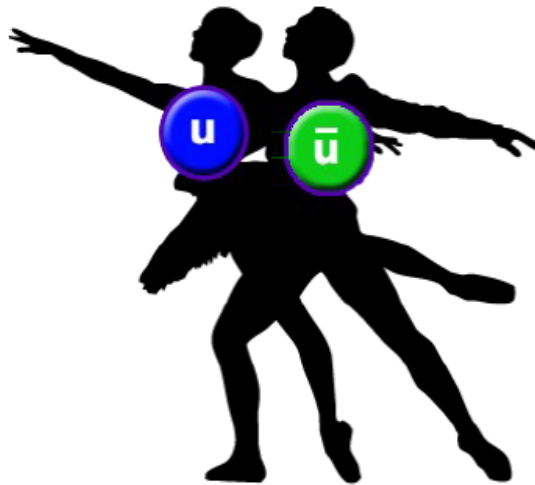
メソンの有効理論のようないくつかのモデルに対して、モデルの有効領域を逸脱する質問をすることは、意味のない回答を引き出してしまいます。他方で、有効性の領域の中では、モデルは完全に予言力を持っています。実際、「異なるモデル」も、有効性の領域がオーバーラップする場合には一致すべきです。[ここに古いポストからの例があり](#)、そこでは古典的な電磁気学が、電気的な場の公式により量子電磁気学が明らかになるように、量子電磁気学の有効理論です。

※ 古いポストからの例とは、本小冊子の日本語版は「[階層性問題と何故電子は無限大の質量をもたないのか](#)」を、英語版は”[Hierarchy problems and why electrons don't have infinite mass](#)”の記事を参照下さい。F. Tanedo さんの記事です。

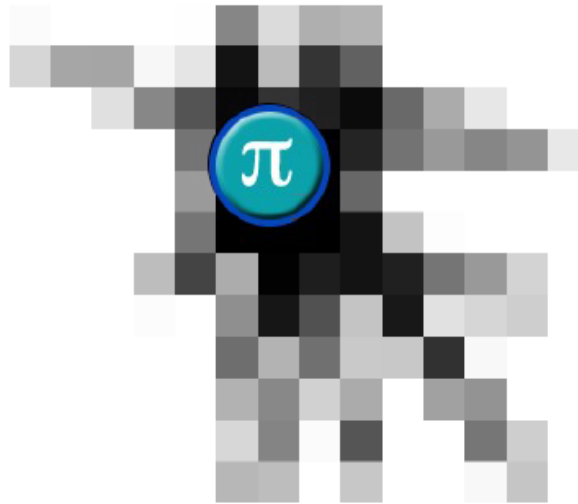
## Dancing with the quarks

### クォークと踊る

さて、メソンの話に戻り、類似をたどってみましょう。パイオンが実際は、原子よりも小さな領域でダンスをしているクォークと反クォークであることを、（私たちは既に）知っています。これらはグルオンを交換し、互いに相手も周りをスピンしていて結合したエンティティとして相互作用さえ可能です。大まかな素描がこれです：



しかし、ここでは：この素描はもし非常に近くで見ることができて、クォークを直接観測できる場合にのみ得られる素描です。このことは、「クォークのダンス」を見る一番前の席をとることを要求します（または、少なくとも HDTV を）。低い解像度の方法でしか見ない人は、ダンスはこれとは変わって見えます：すべてが捨てられたようにです：



実際、これはまさにピクセル化された Mona Lisa の場合のようです。クォークはあまりにも小さな座標ですので、省略された素描ではたった一つでダンスしているように見えることに注意します！この対象をパイオンと呼び、どのようにスピンをし、相互作用しているかを注意深く見ることができます、、、さらに解像度を上げるならば、1つのパイオンというよりも**2つ**のクォークがいっしょになってダンスしているように見えるかもしれないということが分からなくとも。

※ この図は、 $u$  と  $u\text{-bar}$  がいったいとなり、 $\pi$  パイオンとして見えることを言っています。

1960年代の素粒子物理の状態へ戻ります。パイオンを記述する完全な**有効理論**を作ることができますが、ぼんやりしたガラスがあることを受け入れねばならず、それ以上の詳細を知ることはできません。「上の絵の中にいくつの手があるのでしょうか？」といった有効理論を求めることはできません。うーん、2つのように見える、、、しかし、確認は難しい。さらに難しい質問にさえ答えることができたらいいかもしれません：上の絵でダンサーの性別は何でしょうか？ここでは、有効理論とは完全に離れています。これが回答可能とすることは、明らかに誤りです。理由は、これより非常に小さな素粒子の性格、2人のダンサーというようなことを知る事が不可能です。これと同様に、有効性の領域を超えた高いエネルギーについての質問をしたとき、メソンの有効理論は遠く離れてしまっているように見えます。

## Modern Effective Theories

### 現代の有効理論

高エネルギー物理学の**基礎となる**目標は、基本的なレベルで自然を探求することであるにもかかわらず、有効理論は**未だに**、信じられないくらい有効なツールであることを注意して、終わりたいと思います。

**1.低エネルギー実験に理論を合わせること.** 高エネルギーでのエキゾチックな新しい粒子の理論が、非常に低いエネルギーで指示された実験により、制約条件を与えられる場合があります。たとえば、新しい物理の多くのモデルは、通常の  $W$  ボゾンや  $Z$  ボゾンの物理に影響を与えるかも知れないという制約があります。新しい物理の効果をパラメトライズする  $W$  ボゾンと  $Z$  ボゾンの有効理論を書き出すことにより、高エネルギーで現れるいかなる新しい粒子の性質に強い制約を設けることができます。（専門家のために：これらは電弱の詳細な制約条件です。次を参照ください（[hep-ph/0405040](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0405040), [hep-ph/0412166](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0412166), [hep-ph/0604111](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0604111)）. ダンスをするクォークの類似は、「いくつかの手があるか分からないが、もし2つより多くの手があるならば、それらは互いに非常に近くになければならない」ことを教えるために、省略された絵を使うことです。（専門家のために：このアプローチは最近**ダークマターの直接検出**に適用されました。）

※ ダークマターの直接検出には、[arXiv:1008.1591v2](https://arxiv.org/abs/1008.1591v2) がリンクされています。

**2.「現象論的なモデル」、** 前の場合は、有効理論を使うことにより基本理論の計算を単純します；これはトップダウンのアプローチです。ボトムアップのアプローチも考えることができます；そこでは知られている低エネルギー物理の記述ができ、どのようなエネルギーが破れるかを構成できるモデルを書き下すこともできます。それで、それらのエネルギーで現れるモデルの中にカプセル化された、ある新しい物理が存在すべきであることを予言可能です。これは、素粒子物理のあるべき姿です：整理された粒子の一塊の観察し…しかし  $Higgs$  ボゾンが出現するような何かを得たいならば、 $TeV$  スケールの近くで全フレームワークが壊れます。

**3.強い結合定数と双対性、** これはメソンに戻ることになります。今、私たちが存在すると知っている恐ろしい非摂動的な  $QCD$  のサブ構造に悩まされることなく、初期の衝突器から出てくる粒子を記述するために、1960年代の物理学者のとった方法が効果的なメソンの理論であったことを思い出してください。ある意味では、基本理論と有効理論の間には非常に強い関係があり、2つの理論はいわば、互いに**双対**の関係にあると言われます。1990年代は、関係ないように思える理論の間の形式的な双対性の発展にとって革命的な時代でした：超対称性ゲージ理論の中の **M-理論** や **Seiberg 双対性** といった双対性の Witten の **WEB** や Maldacena により提案された **AdS/CFT 対応** のようなゲージ/重力双対性です。（理論物理のファンには：これらの領域で本当に有名な名称です；各々のひとつが、MacArthur の「天才」仲間です！）

とにかく、メソンについて考えることから引き出すことのできる「深い」物理は驚くべき量があります……たとえそれらが、基本粒子でさえない「あきあきする」粒子であったとしてもです。有効場の理論の考えは、（統計物理学のように）素粒子物理の中心のひとつで、実際、おそらく高エネルギー物理学についての最も強い直観をもたらすでしょう。

※ M-理論、Seiberg 双対性、AdS/CFT については、英語版の Wikipedia へリンクされています。日本語版はありません。

## An Idiosyncratic Introduction to the Higgs

### Higgs への特異な入門

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by [Flip Tanedo](#) on 25 Mar 2011 at 02:51 am

### Higgs の別の表現

類似を使った一般の人への Higgs の説明の非常にうまい説明がいくつかあります；私の気に入っているもののひとつに [David Miller さんの説明](#) に基づく [CERN の漫画](#) があります。類似の科学は、しかしながら、伝えるには恐ろしく微妙な綱渡りです。実際、私たちは別なアプローチをして、直接物理の世界へ飛び込みましょう。 [素粒子の相互作用を記述するために Feynman 図形を使うこと](#) により既に私たちはこの基礎作業をしているので、このことが可能となるのです。

- ※ 「CERN のコミック」は、CERN のサイトへリンクされています。
- ※ David Miller さんの説明、カクテルパーティに、、、の譬えにリンク
- ※ 「Feynman 図形を使う」は、『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p5 の「Feynman 図形を描きましょう！」を参照ください。

この後の数回のポストでは、[標準モデルの他の粒子](#) を扱い、Higgs を含む図形をどのように描くかを学ぶことへ進みましょう。劇的な観点から何が Higgs を作るのかについて知ることがになり、そしてゆっくりとそれに付随するより深い考え方をひも解きましょう。アプローチは特異なものとなるでしょうが、しかし、実際、私たちの分野での大きなアイデアのいくつかを考えている素粒子物理学者の方法に近いと、私は考えています。

- ※ 「標準モデルの他の粒子」は、『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p60 の「標準モデルについて知られていること」を参照ください。

この最初のポストは、純粋な気持ちで始めましょう。Higgs に対する単純化された Feynman 規則を与え、これらを LHC では Higgs をどうしたら生成できことを期待することの議論することに使いましょ。次に来るポストでは、Feynman 規則を整備し、さらに質量の性質や **電弱対称性の破れ** と呼ばれる現象をより深く理解しましょう。

### (単純化された) Feynman 規則

最初に、点線は Higgs ボゾンの伝搬を表しています：

.....

皆さんは、前に出てきた線ではこの種類を知らないで、すでに何か違う方向へ行くのではないかと想定されているでしょう。第一に、物質粒子 (**fermions**) を矢印付きの実線で、

力の粒子 (**gauge bosons**) を波線で表しました. この **Higgs** は実際はボゾンですが、しかし私たちの見てきた、光子、**W** ボゾン、**Z** ボゾンやグルオンというゲージボゾンとは、違っています. この違いを理解するために、もう少しこのことに深く入り込んでみましょう:

- **Gauge bosons** は「基本的な」ちからを伝搬するものであり、各運動量、もしくは **spin** を持っています. ゲージボゾンは整数のスピンを持ち; 大まかには、このことは、もし光子を 360 度回転させると、同じ量子力学的状態へ戻ることを意味します.
- **Fermions** は、物質粒子で、やはり各運動量を持っています. しかしながら、ゲージボゾンとは違い、半整数のスピンをもっています: 720 度電子を回転させないと元と同じ状態へ戻りません. (忌々しいことに!)
- **Higgs ボゾン** はスカラーボゾンで、これはスピンを持たないことを意味します. どのような量でも回転させることができ、同じ状態を保ちます. すべてのスカラー粒子はボゾンですが、それらはゲージボゾンがするような方法では「基本的な」力を媒介しません.

このスピンの考え方は、完全に量子力学的で、完全な整数は**ボゾン** (「力の粒子」) であり、半整数のスピンは**フェルミオン** (「物質粒子」) であるということは定理になっています. **Higgs** が媒介する「力」がどちらの種類になるかについて、くどくどと考えすぎることは意味がありません --- 非常に興味のあることが起きていることがわかります.

さて、**Higgs** の他の粒子との相互作用はどのようになるのかについて問うことにしましょう. 2つのうまく書くことのできる **Feynman** 規則があります:



ここに、**Higgs** はフェルミオンのペア、もしくはゲージボゾンのペアと相互作用することができます. たとえば、このことは、**Higgs** が電子/陽電子のペア (もしくは、同様にクォーク/反クォークのペア) へと崩壊することができます. 後ほど理由を明らかにするために、**Higgs** は質量を持った標準モデルのすべての粒子と相互作用をすることができるようにしましょう. すると光子とグルオンとは相互作用しないとし、この議論の目的のためにニュートリノとの相互作用を無視することができます.

フェルミオンとの相互作用は今までに皆さんが使ってきたもので: まさしく描きだしたすべての他のフェルミオンの頂点のように見えます: ひとつのフェルミオンが入射してきて、ひとつのフェルミオンが出力され、いくつかの種類のボゾンも出てきます. これはフェルミオン数の保存を反映しています. なぜ **Higgs** がスカラーなのかを後で明らかにしますが、ここには実際、何かけちなことが起きています.

結局、Higgs は 4 点相互作用を通して自分自身とも相互作用します：（これは [QCD](#) の 4 点グルオン頂点に似ています。）

※ [QCD](#) は、『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p50 の「グルオンの世界」を参照ください。



実際に、ここではないかもしれませんが多くの微妙な点と、さらに投入すべき Feynman 規則もありますが、この点は Higgs が「真空期待値」を獲得すると何が起きるかを見てみる次のポストにこれらの話をしようと思います。どうか、今のところこの点の誤り全部については、コメントなしでお願いし、、、ゆっくりとすべて解決することを約束いたします。

※ 「次のポスト」は、本小冊子に日本語で収録した、「Higgs からの質量の図形的なヒント」  
「Higgs と真空: やったぜ『真空期待値』」を参照願います。

## Higgs の生成

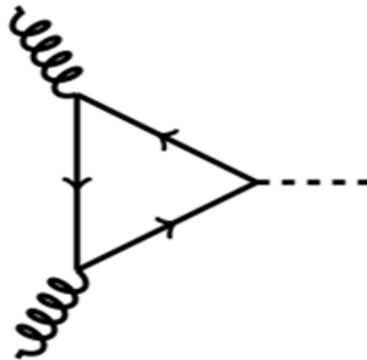
このようにして、やっていることはみな、Higgs を特別なものとする整理された議論の準備のバックグラウンドとしてあるのです。にもかかわらず、その材料に入る前でさえ、私たちはどのようにして LHC で Higgs を生成すると期待できるかについての話で聞いたことを使うことができます。これは、Feynman 図形を描く練習問題です。（必要ならば、[前の Feynman 図形のポスト](#)を参照ください！）

※ 「前の Feynman 図形のポスト」は、『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の Feynman 図形についての部分を参照下さい。

一般的な問題はこれです：LHC では、他の陽子の中へ陽子を打ち込んでいます。陽子は、それぞれクォーク、反クォーク、グルオンから作られています。このことは重要で、陽子は、まさに 3 つ以上のクォークです！私が [前に述べたように](#)、陽子は恐ろしく非摂動的な対象です。仮想的な（反）クォークたちとグルオンは、生成され、そこらじゅうで再吸収されます。陽子衝突から Higgs ボソンを生成する主要なプロセスは、これらの **仮想的な粒子**の相互作用から来るのです！

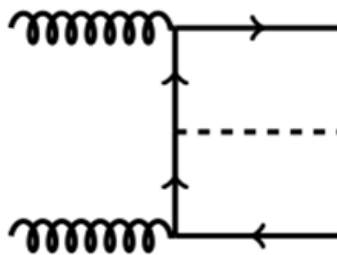
※ 「前にのべたように」は、『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の「Feynman 図形がうまくいかないとき」を参照下さい。

LHC での主要な「生成チャンネル」のひとつは、次の **グルオンフュージョン図形**です：

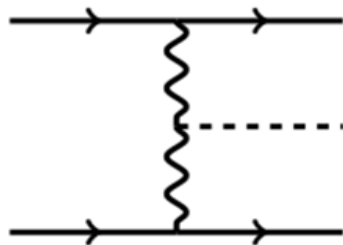


この図形は、中ほどに閉じたループがあるので、おかしな図形の種類です。（これが非常量子的な効果を生み、実際の計算のためにトリッキーなものですが）何が起きるかという、ひとつの陽子から来るグルオンと他の陽子から来るグルオンは、相互作用して Higgs を形成することです。しかしながら、グルオンは**直接は Higgs と相互作用しません**ので、それらはクォークを通してそのようにならねばなりません。トップクォーク --- これは最も重いのですが --- は、Higgs と最も強い相互作用を持っていますので、それで仮想クォークはトップクォークなのです。

Higgs を得るもう一つの方法は、**トップクォークのペアに付随する生成**です。図形は次のように見えます：



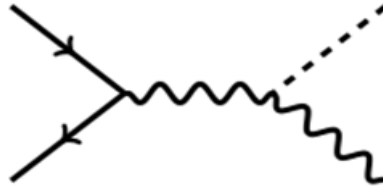
ここでグルオンは再びトップクォークを通して Higgs を生成します。しかし、この時は、トップクォークと反トップクォークもまた Higgs に従い生成されます。グルオンなしの同じ図形を描くことができます。：



これを**ベクトルフュージョン**と呼びます、というのは、仮想的な W ボゾンと Z ボゾンが Higgs を生成するからです。同じように生成される 2 つのクォークがあることに注意しましょう。

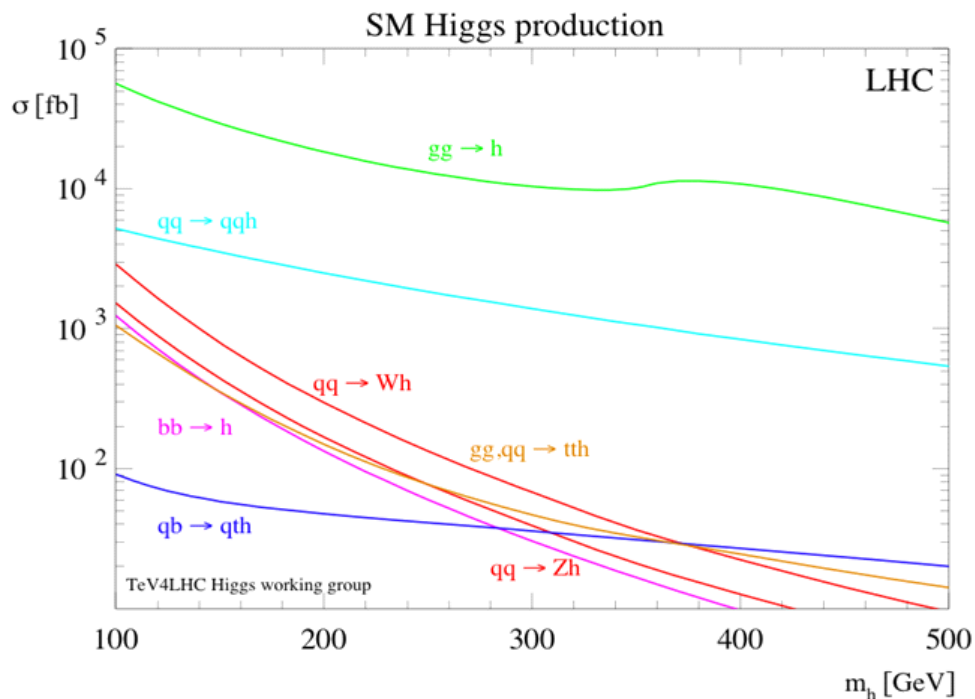


結局、W ボゾンと Z ボゾンに付随する生成があります。宿題として、最終的ゲージボゾンが W ボゾンにも Z ボゾンにもなることを仮定して、粒子のラベルを埋めることが可能です：

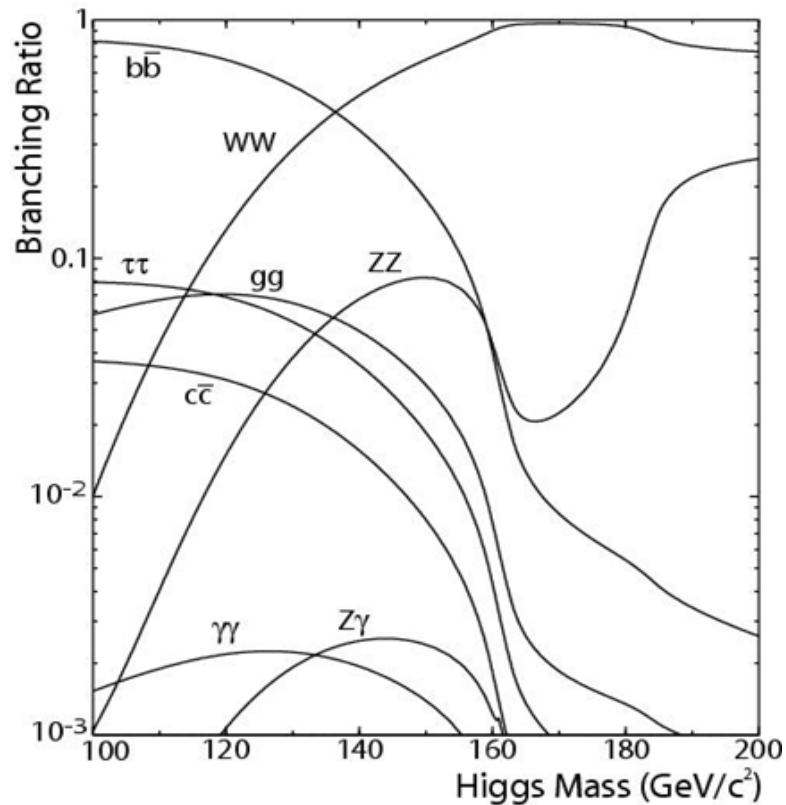


陽子-陽子衝突から Higgs を生成するには他の方法もあり、これらが支配的なプロセスです。私たちは、標準モデルの Higgs の性質について多くを知っていますが、一方、その質量については未だに知られていません。これらのプロセスの相対的な（生成）率は、以下にプロットした中に見ることができるように、Higgs の質量に依存することが判明しています。（“[Tevatron-for-LHC](#)”レポートから）：

※ [Tevatron-for-LHC](#) は、[arxiv:hep-ph/0612172](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0612172) にリンクが張られています。



水平軸は、仮定した Higgs の質量で、一方垂直軸は様々なラベル付けられたプロセスにより生成される Higgs 生成の断面の測定値です。ここでの目的は、断面は基本的には、これらのプロセスの発生する率です。（実験的には、標準モデルの Higgs の質量が 115GeV と 200GeV の間にあるであろうことが知られています。）私たちは、 $gg \rightarrow h$  がありうる Higgs の質量の幅を通して、支配的な生成メカニズムであることがわかりますが、--- しかしこれはストーリーの半分でしかありません。



Higgs は標準モデルのより軽い粒子へ崩壊しますので、Higgs を私たちの検出器で実際に直接検出できません。異なる最終状態へと崩壊する特別の率（「分岐率」）を上グラフである [CDF](#) からのイメージにプロットしました。これは、最初の Higgs を生成することから出てくる余剰な材料に加えて、Higgs が崩壊したとき生成されるものを探索する検出器について言わねばならないことを意味します。たとえば、トップクォークのペアに付随する生成では、 $gg \rightarrow t\bar{t}$  を得ます。各々のトップクォークは、ひとつの  $b$  クォークとひとつのレプトンとひとつのニュートリノに崩壊し（これを示す図形をあなたは描くことができますでしょうか？）、一方、Higgs はまた、--- いわば、 $b$  クォークのペアにも崩壊します。（いまここでは、クォークと反クォークを区別していません。）これは、探索しているひとつのチャンネルは、むしろ邪魔な崩壊です、

※ CDF は、[http://www.cdf.fnal.gov/physics/exotic/r2a/20050623.lmetbj\\_wh\\_tc/](http://www.cdf.fnal.gov/physics/exotic/r2a/20050623.lmetbj_wh_tc/) がリンクされています。

$$gg \rightarrow t\bar{t} \rightarrow b\bar{v} b\bar{v} b\bar{b}$$

これは最終状態の中に発見される多くのゴミ(junk) (各々の  $b$  クォークは [ハドロン化してジェットとなります](#)) であるだけでなく、これと **同一の最終状態** を与えるすべての他の標準モデルのプロセスの種類が、存在します！ このようにして、もし単純化して「4つのジェット、2つのレプトンと失われたエネルギー（ニュートリノ）」のイベントを考えに入れると仮定すると、Higgs 生成のイベントを考えるだけとはいかず、Higgs を扱うものが全くない **他の背景となるイベント** のバンチも考慮せねばなりません。これらの背景イベ

ントのレートも予言せねばならず、また実験的な考えからこれらを導出せねばなりません。  
(実験的な不確定性やありうる測定誤りを扱う仕事を言及することのならないように！)

※ 「ジェットとしてハドロン化する」「前にポスト」の日本語版は、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の『[Feynman 図形がうまくいかないとき](#)』を参照下さい。

重要なことは、Higgs の探索することは非常にトリッキーであろうことで、この探索は Higgs の質量とは全く独立であるということです。これが、Higgs ボゾンについての決定的なデータを LHC が提出する前に、何故、数年間またねばならないのかの理由です。

(私はここでいくらか簡潔に言いましたが、私の主張の要点は、すべての詳細を語るというよりも、LHC の Higgs 探索の「香り(flavor)」を伝えるということにあります。)

ひとつの具体的な例として、グルオンフュージョンチャネル  $gg \rightarrow h$  を考えてみましょう。これは、生成プロセスの中で余剰な粒子がないので、素晴らしいかのように見えますが、しかし、上のプロットからは、相対的には軽い質量に対して (140GeV よりも軽い) Higgs は  $b$  クォークへと崩壊する傾向にあることが理解できます。この兆候は Higgs イベントのない大きな背景を持っていることが期待できないので、これは実験的な芳しくありません。

実際、直観的考えるよりも、軽い質量の Higgs の探索のためのグルオンフュージョンを使う最良の方法のひとつが、たとえば、**光子**のペアへと崩壊するときに探すこととなります！ Higgs は直接、光子と相互作用をするわけではありませんので、**実際**、怪しいので、このプロセスは仮想的なクォークを通して発生すべきで、つまり、上記の Higgs-グルオンの結合のようになるでしょう。上記の分岐率の図に示したように、これは非常にレアなプロセスです：Higgs はいつもいつも光子に崩壊する傾向にあるわけではありません。しかしながら、非常に小さな背景を持つようなこの「2つの光子」の兆候を真似できる標準モデルに多くのことはありませんということが、この結果です。もし光子への崩壊率がアッという間に小さくなるので Higgs が非常に重いとすると、このようなことは起きなくなってしまうことを理解できます。

## 次回では

次のポストでは、Higgs の「**真空期待値**」を表す新しいタイプの Feynman 規則を導入したいと思います。そうすると、粒子が質量を持ち、電弱対称性の破れの夢のようなトピックへ前進し続けるときに言うべきことが、本当は何を意味しているのかを、よりすぐりたいと思います (「Higgs メカニズム」)。

※ 「Higgs の真空期待値」については、本小冊子の「[Higgs からの質量の図形的なヒント](#)」「[Higgs と真空：やっただけ真空期待値](#)」を参照下さい。

## A hint of something new in “W+dijets” at CDF

### CDF の“W ボゾン+dijets”が何か新しいヒントに

[【次の記事】](#)[【前の記事】](#)[【目次】](#)

Posted by [Flip Tanedo](#) on 05 Apr 2011 at 11:11 pm

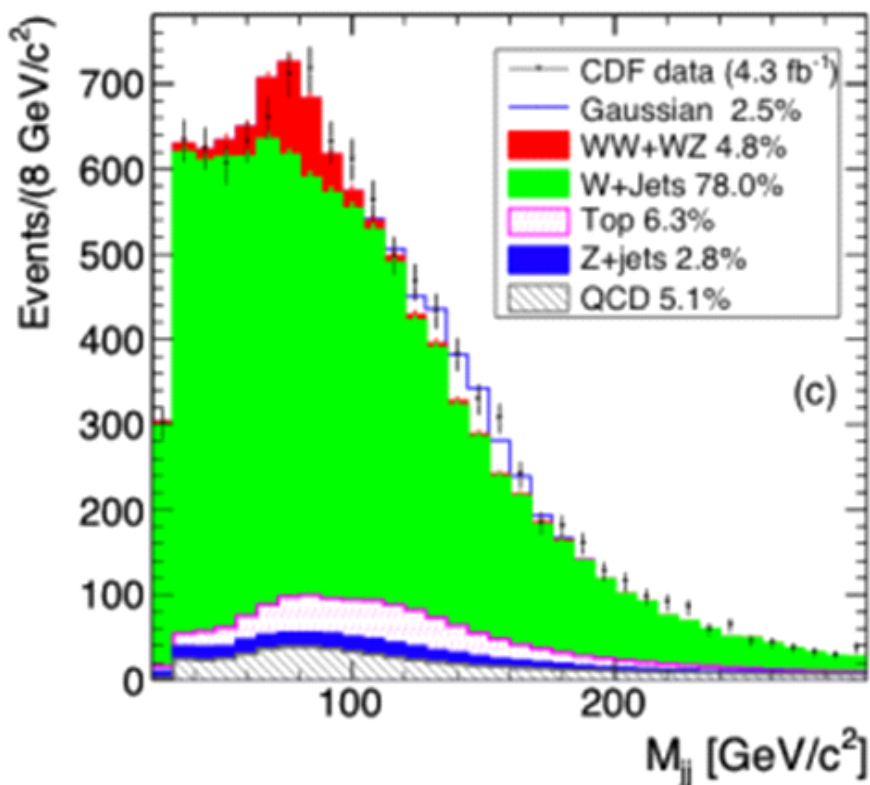
4/9: 赤字で、修正を入れました.

Update:これを同時に読まれたかたには、[Fermilab の Web ページを通してこの結果をオンラインで放送する 세미나](#) (この分野に従事する物理学者のレベルのトークでしょう) があります. また [NY Times today](#) にもこの結果が述べられています.

(Tevatron が) 走行を停止する日数がカウントダウンしているとしても、Tevatron は新しい物理の面白いヒントを未だに私たちに与えてくれると心に思っています. このポストは、CDF チームからの新しい結果を受けて、急に行います. 新しい結果は、「 [\$\sqrt{s} = 1.96\$  TeV 陽子-反陽子衝突実験での W ボゾンに付帯して生成されたジェットのペアの不変質量分布について](#)」です. まさに、食欲を強烈にそそる、理解したいと思うプロットのひとつが現れています (新鮮な出版!) :

※ CDF チームの新しい結果とは、[arXiv:1104.0699v1 \[hep-ex\]](#)です. Abstract は、

ルミノシティ  $4.3 \text{ fb}^{-1}$  に対応する CDF 検出器で集められたデータを使い、W ボゾンに付帯して生成されたジェットのペアの不変質量分布の研究レポートです. 計測された分布は、統計的システムの不確定性をもって、現在の理論予想では記述されていない  $120\text{-}160 \text{ GeV}/c^2$  の質量レンジで超過を持っています.



## タイトルをひも解く

この話に入る前に、まずタイトルが何を意味しているか理解しましょう。素晴らしい物理の多くを内包していますので、少し困るかもしれません。タイトルの終わりから始め、背景を考えると簡単であることが分かります。

### “… $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ での陽子-反陽子衝突で”

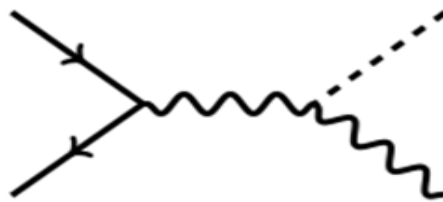
これは一般的な Tevatron の実験について教えてくれています：そこでは陽子( $p$ )と反陽子( $p\text{-bar}$ )をおよそ TeV のエネルギーで衝突させます。TeV は、だいたいは飛んでいる蚊の力学的エネルギーです。Feynman 図形の計算では、パラメータ  $s$  を使うことがしばしば有効で、エネルギー自身というよりもエネルギーの平方で、いまいまでも”  $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$ .”となります。比較のために、LHC は現在 7 TeV で運転していて、結局は 14 TeV までに至るでしょう。

※ 「飛んでいる蚊」は CERN の「LHC Glossary」と題する次の単位についての説明にリンクされています。

[http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/lhc\\_glossary.htm](http://lhc-machine-outreach.web.cern.ch/lhc-machine-outreach/lhc_glossary.htm)

### W ボゾンに付帯する …”

これは前のポストで Higgs ボゾンについて描いた「関連する生成物」の図のように聞こえるでしょう：



※ 前のポストは、本小冊子では「[Higgs への特有な入門](#)」を参照下さい。

左から右へ呼んで行くと、クォークと反クォークが Higgs を伴ってゲージボソンを生成しています (W ボゾンの場合には)。ここで私は正しいことを言いましょう：CDR の結果は、Higgs が現れたようには見えませんが、しかしこれに反応して新しい粒子が存在すると仮定すると、同一図が作成されます (破線は新しい粒子を表しています)。[ 修正、4 月 6 日:何人かの人々が、新しい状態は中間的なフェルミオンをもった” t-channel”の図形からくるものでもあることを正しく指摘しています。(私は実際に Feynman 図形のポストを読んでおられる方には練習問題としてどのような図形となるかを残しておきます。) ]このようにして、W ボゾンは、検出器に到達する前に崩壊します。2つの兆候は

$W \rightarrow e\nu$  もしくは  $W \rightarrow \mu\nu$  であり、これは検出器の中で電荷を帯びたレプトンと「失われたエネルギー（ニュートリノ）」として現れています。

※ 「W ボゾン」は、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p36 を参照ください。

### “…生成されたジェットのペア…”

これはまた、検出器に到達する前に、Higgs が他のものに崩壊したことも分かります。このようにして、検出器が**エキゾチックな**粒子でないものではなく、通常のそれ（W ボゾン）が崩壊するものに対して見張り続けていることを語っています。もしそれがクォークやグルオンへと崩壊するのであれば、**ジェット**として結果することを知っています。このようにしてこの論文は W ボゾン（それ自身はレプトンとニュートリノ／失われたエネルギー）とジェットのペアを探しています。これは解析に適切な「興味深い」事象をピックアップする評価基準です。

※ 「ジェット」については、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p54 「QCD と閉じ込め」を参照ください。

### “…の不変質量分布”

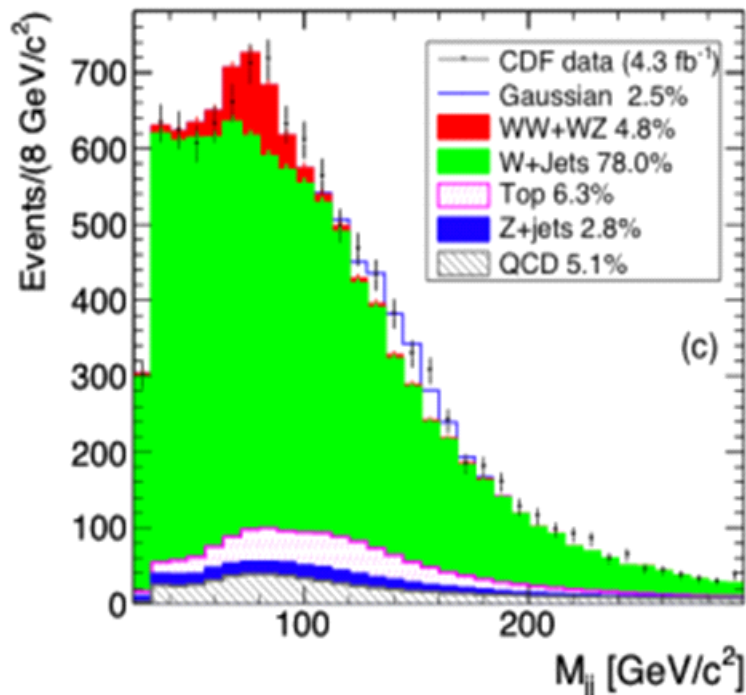
さて、興味深い事象をピックアップしたことは、それらをデータの中に隠れた新しい粒子があることを示すことのできる方法で、プロットしたいのです。これをする最も簡単な方法は、「衝突探索、バンプハンティング(bump hunting)」することで、これは、[Z ボゾンの検出](#)で議論しました。重要なアイデアはこれです：もし2つのジェットのエネルギーと運動量を加算すると、それらを生成する中間的な粒子の質量を得ることができるはず（もしそれらが同じ粒子により生成されているとすると）。この話は不変質量(the invariant mass)と呼ばれ、不変質量に基づく興味ある事象の数をプロットすることで、新しい粒子の性質である衝突を探することができます。

※ 「Z ボゾンの検出」については、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p26 「Z ボゾンと共鳴」を参照ください。

んんん、全く、もうっ… タイトルの説明に全く多くを使ってしまった。しかし、ここでプロットを理解する物理の大半を確立することができたので、[注意深く]人々が何にエキサイトしているかを見てください！

## 結果

もう一度ここにプロットします：



水平軸上は、2つのジェットの**不変質量**で、大まかにはジェットのエネルギーの和です。垂直軸は与えられた不変質量のデータの事象の数です。もし2つのジェットより生成された粒子が存在すると、新しい粒子の質量の周辺の不変質量をもった事象の数に衝突があることとなります。

それで…プロットの中のカラフルなものは何でしょう？これは実験を難しくしているもので：**背景**は、特別に実験した新しい粒子からくるであろう兆候と同一視しました（2つのジェット、レプトン、失われたエネルギー）。考えに入れねばならないものは、同一の兆候を導くかも知れない「うんざり“boring””するようなプロセスです。「うんざり“boring””するということばで、私は既に理解している。

**赤**のヒストグラムの部分は、生成されたWボゾンもしくはWとZボゾンのペアの事象です。第二のWボゾン（もしくはZボゾン）はジェットのペアに崩壊します。

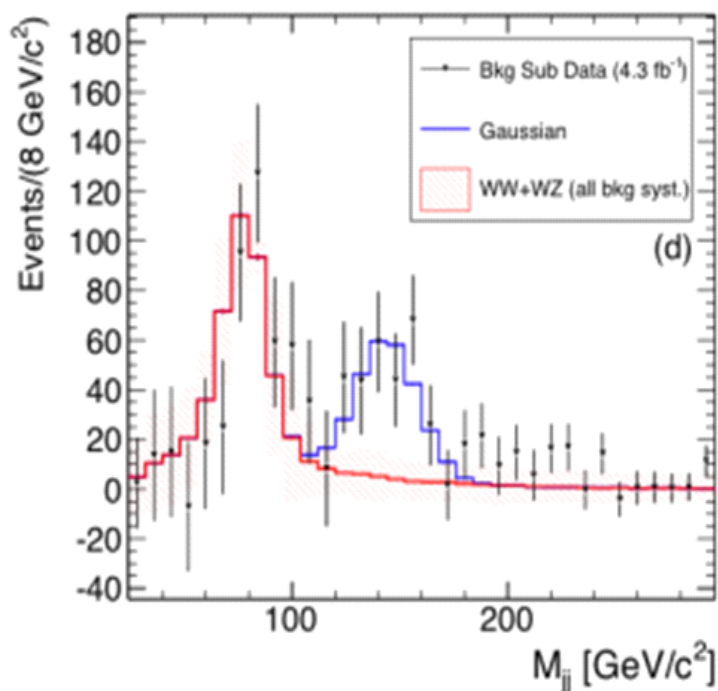
大きな**緑**のヒストグラムの部分は、様々なプロセスから来ます、そこでは単独のWボゾンが生成されていて、2つのジェットは独立して生成されたWボゾンへ分離します。

**白**（□ピンクの縁取り）のヒストグラムは、生成されたトップクォーク-反トップクォークの事象です。これらのトップクォークは、それぞれ、中間的に**b**（もしくは反**b**）とWボゾンへ崩壊します。これらのWボゾンの事象はレプトン+ニュートリノへ崩壊し、実験によって紐づけられていて、一方他の事象はジェットへと崩壊するかもしれません。ここで、4つのジェット（**b**クォークからきたもの2つとWから来たもの2つ）を得ますが、しかし、それらの2つのジェットが「失われた」ものを得ることもあり得ます、というのは、

それらはジェットを同一視する検出器の評価基準を満たすものではないからです。（これは恐ろしく微妙なことです。）また、単独のトップクォークからの寄与もあります。

**青**の縦線は2つのジェットを持つ単独のZボゾンの生成です。Zボゾンは2つのレプトンへ崩壊し、レプトンののひとつは、特別な探索によってのみ粒子を発見できるので「隠れて」います。特別な探索とは、ビームの方向に全く垂直になっているので、ジェットとしては特定されません。

結局、影を持つ（斜線のある）縦線のヒストグラムは、QCDのバックグラウンドで：これらは、2つのジェットとレプトンを与えることのできるグルオンに媒介されたプロセスです。



一度、これらの背景となる効果すべてを考えに入れると、---そして、こうすることが非常に非自明なことで---私たちは、不変質量当たりの計測された事象の実際の数から、これらを引き出すことができます。この「背景から引き出されたデータ」を以下にプロットします。

さて、事態はさらに面白くなってきました。まず最初に注意すべきは、背景の**全部が引き出されているわけではない**ということです：それらは、WWとWZという背景を離れず、その理由はこれらが、特定の衝突（赤い線）をも生成するからであり、2つのジェットが単独の粒子から来ることもあるからです（実際、衝突はWとZボゾンの周辺です）。他の背景は、広く、スムーズなプロフィールを持っていて、信頼性をもって引き出すことが可能です --- 衝突は引き出すことがより難しいので、これをそのままにします。

*(Update: 私には、これは部分的には比較する理由を意味しているのではないかといいまし*



た： $W/Z$  の衝突は実際に、よく理解されていて、突き刺さることを計測することとして使うことが可能です。）

しかしながら、特に整理されていることは、150 GeV ほどのピークを持っている**第二の**衝突があるように見えることです。これは、青線で示したことです。この衝突の現れは、ほぼ 3.2 の偏差で、これは大まかには、99.7% の確からしきで、これが統計的な揺らぎではないことを意味しています。

## (標準の)Higgs ではない

もしこの衝突が実際、ほぼ 150 GeV の質量をもった粒子から来るものであれば、最初に考えるであろうことは、これは Higgs ボゾンの第一のヒントであるということなのです。実際、上に示したことは、Higgs の生成は、Higgs が 2 つのクォークへ崩壊するとき特徴的な兆候を与える図形を意味しています。しかしながら、この分析の最大の興味深いところは、**標準の Higgs ボゾンから来る衝突のようには見えない**ことです！

理由は単純です：私たちは、標準の Higgs を充分理解していますので、もし Higgs が 150 GeV の質量を持っているとすると、約 **300 分の 1** 以上に小さいであろう（衝突の）効果が期待されるからです。この分野の話し方の中で、観察された衝突は 4 **picobarn** dijet の横断面積を持った粒子に対応していて、一方 150 GeV Higgs は、12 **femtobarn** dijet の横断面積を持っていると期待されます。さらに CDF は既に、[緻密な関連する解析](#)：

$WH \rightarrow \ell \nu b \bar{b}$  を行っています。これは基本的には、今の論文の解析と同一で、違うところはそれらが  $b$ -クォークからのジェットと同一視できる点です（これは **b-tagging** と呼ばれます）。この  $b$ -tagged ジェットの解析では、100 — 150 GeV のレンジでの重要な超過はありませんでした。

※ 関連する緻密な解析は、<http://prl.aps.org/abstract/PRL/v103/i10/e101802>

Phys. Rev. Lett. 103, 101802 (2009) [8 pages]

Search for a Standard Model Higgs Boson in  $WH \rightarrow \ell \nu b \bar{b}$  in  $p \bar{p}$  Collisions at  $\sqrt{s}=1.96$  TeV

この意味していることは、**もし**この衝突が実際に新しい粒子から来たのであれば、少なくとも非常に頻繁には、 $b$ -クォークへと崩壊する粒子ではあり得ません。しかしながら、私たちは、標準の Higgs が  $b$ -クォークへと崩壊することを知っていますので、それで**この仮設的な新粒子は普通の Higgs ではない**のではないのでしょうか。

これは実際もっともっと興味深いことです。その理由は、非標準の Higgs セクタと想定するか、あるいは、完全に違う新しい物理の兆候ではなかろうかと思われるからです。

**Update:** 私たちは少なくとも、**B-ジェット**の過多の領域(**120-160 GeV**)を持つ事象の部分  
を、その脇の領域 (**100-120** と **160-180 GeV**)を比較して、それらがたがいに整合している  
ことが分かります。

基本的には、どのくらい多くの **b-クォーク**のジェットが衝突の中であり、あるいは衝突以  
外にあるのかの違いを見つけます。これは、何が衝突を引き起こそうと、**b-クォーク**へと  
崩壊するわけではないことを意味しているように思われますが、私は専門家ではありません  
し、これは間違っているかもしれません。

## ここからどこへ行くのか

しかし、興奮しないでください。シャンパンのボトルはまだ誰も開けてはいません。標準  
偏差値 3 のあたりで、効果が行ったり来たりすることが知られています --- つまり、不幸  
にも統計的/システムの揺らぎである可能性もあります。たとえば、ひきだされたはず  
の背景の誤ったモデリングかもしれません。(標準偏差値 3 は、ある人が私に説明するに  
は、「どのようにして知らないことを見積もるか」ということを前提にしています。) す  
べて同じように、私は、次の週には飢えた理論家がモデルを作る数多くの論文を提出して  
くるでしょう。[このようにして **CDF** では何度かこの効果について知られています; 現在  
の実験は、標準偏差値 3 の確からしさを破っていますので、その結果を公開しています。]

発見されたものがいくつかあります:

さらにデータを必要としています! 私たちは、「逆 **femtobarns (1/fb)**」でデータを測りま  
す。この論文は **4.3/fb** の解析に基づいています。私の[外側にいます]の理解は、年末には  
**CDF** は約 **10/fb** 程度になりますので、チームはこれが実際の効果であれば、より重要な何  
かを言うことができるはずです。

**D0** についてはどうなのでしょう? **Fermilab** の他のチームは、この効果を確認 (もしく  
は反論) することができるはずです。

私は **LHC** が今のところこれについて言及するに十分なデータを持っているとは信じてい  
ません。しかしながら、夏時間になれば、データの **1/fb** を見ることができ、**2012** 年を通  
しておそらくは逆 **femtobarns** での実験が可能でしょう。この兆候が現実になれば、**2012**  
年の終わりからの長い停止期間の前に効果を見ることのできる期待があるでしょう。

これは用心して楽観的になっている人も多いようです。多くの理論家は、もしこれらの適  
当なモデルが、崩壊する **150GeV** の粒子がジェット (しかし目に見える **b-ジェット** の解  
析) を与えるほうへ引っ張ることができることはほぼ確かなようです。以上が興味ある部  
分です。私はどのようなものが開発されるのかを前向きに見ています (そしておそらく、  
機会があればそれに飛び込みます) !

確認事項:私は実験の同僚たち、**SP** および **DP** に多くの有用な会話を感謝いたします。本ポストのどのようなエラーも単に私自身の誤解によります。論文が出版して、私が何か間違いを起こす前に、それらから情報を得るために、最近、何人かの高エネルギー物理の大学院生に聴いてみることにしました。[さらに、どのようなゴシップも厳密に禁止すべきです...特に理論家に]

## When you're a jet, you're a jet all the way

### あなたがジェットのと看、あなたはどうしてもジェットです

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by [Flip Tanedo](#) on 22 Apr 2011 at 02:19 pm

USLHC ブログでは**ジェット**について数回に渡り言及してきましたので、私も少し詳しく、ハドロン衝突器の中のこれらの少しおかしい不可避な対象のことを述べてみたいと思います。幸いにも、Cornell 大学は最近、ジェットの部分構造のエキスパートである Harvard 大学の Simons フェローである David Krohn さんを招きました。願わくは、この分野を開拓してきたいくつかの仕事をジェットの基礎として、ハイライト的に彼のトークを再現したいと考えています。

話を始める前に、この分野の物理学者の公式なサービスアナウンスメントは：David さんは、来月の Boost 2011 の副オルガナイザーの一人です。理論家として実験家としての両面で大きなイベントが起きるのではないかと思います。

### ハドロンジャンク

**量子色力学 (QCD)** に関して知っていることをレビューしましょう。陽子と中性子は、**グルオン**によって結びつけられた**クォーク**からなる対象です。量子電磁力学 (QED) における電子や光子のように、クォークとグルオンは「基本」粒子とされています。しかしながら、電子や光子と異なるところは、クォークとグルオンは単独では観測できないことです。水素原子から電子を引き離すことは苦勞なくできますが、陽子からクォークを引き離すことは、**全く異なって見える衝突実験によって、陽子を粉砕すること**には、不可能なことです (このことはパイオンに似ています)。

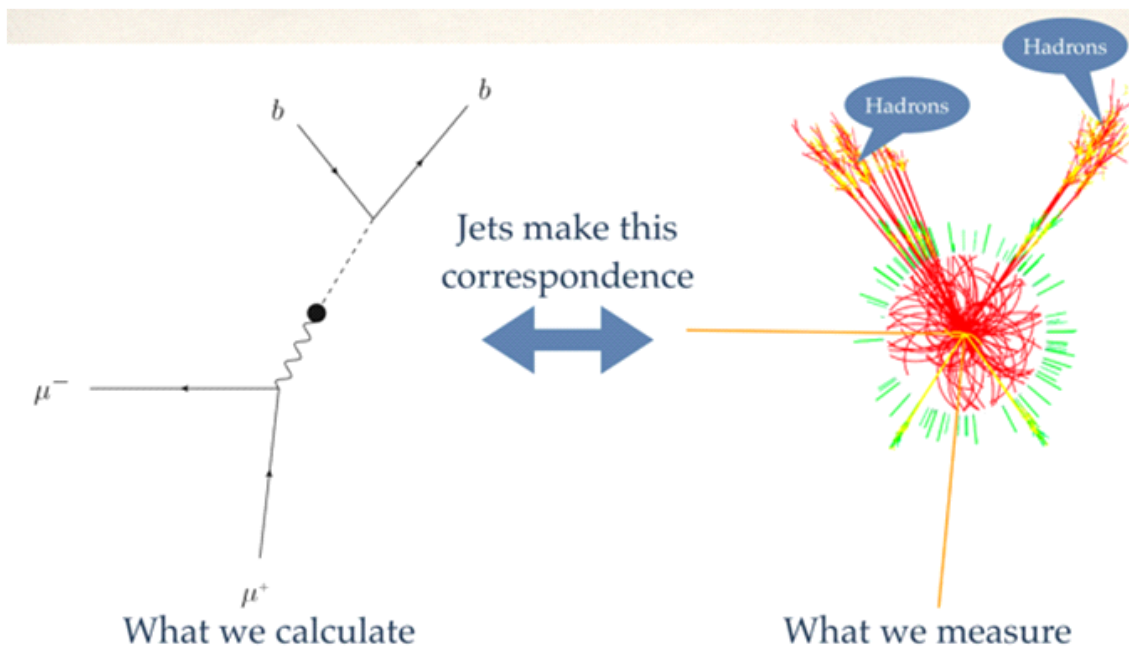
※ 「量子色力学 (QCD)」については、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p50 「グルオンの世界」を参照ください。

理由は、QCD が低エネルギーでは、**非常に非摂動的**だからです。QCD は周りに漂うカラー電荷を持つことを嫌いますので、たとえ量子的な真空から新しい粒子を生成することが (電磁氣的に) 中性なものならば何でも作れることを意味したとしても、ただちにカラー電荷が中性な結合として合成可能な対象となってしまいます。これらのカラー電荷が中性な対象のことを**ハドロン**と呼びます。不幸にも、通常は、クォークを**ハドロン化**するプロセスは、自分自身をハドロン化したグルオンと他のクォークたちを輻射することを意味します。このプロセスは、もともとカラー電荷を帯びた対象の一で粒子の散らかった噴射を結果するまで継続されます。この噴射がジェットです。(私がジェットについて記述するときはずいつも、**ウェストサイドストーリ**を連想するように感じます。)

※ 「非常に非摂動的」については、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p54 を参照ください。

※ 「ウェストサイドストーリ」は <http://www.westsidestory.com/site/level2/lyrics/jet.html> へリンクされています。

※ [ハドロン](#) [日本語版 wikipedia リンク](#)



イメージは D. Krohn さんより、ATLAS Experiment © 2011 CERN でのイベントを趣味レートしたものです。

問題はどこにあるかという点、上記のイメージ図にみられるように、計算をどのようにするかを知るうまい Feynman 図形が、実際の LHC 実験の測定によるジェットを形成する現実の現象材料がとが、直接には対応しないということです。そして、これは本当に困ったことなのです。各々のジェットの中では**すべての**単独な粒子を有効に測定することができず、たとえ仮に（この対応が）できたとしても、非常に膨大な数の粒子の Feynman 図形を計算することは、現実的には困難です。

このように、ジェットそのものと Feynman 図は一対一に対応しない状況が起こります。高エネルギーのジェットは、普通は単独のカラー電荷を帯びた粒子を生成することに対応しますので、それらが実際はハドロンの噴射である場合も、「単独な対象」としてジェットについて言うことが意味を持つこととなります。

## ジェットを特定すること

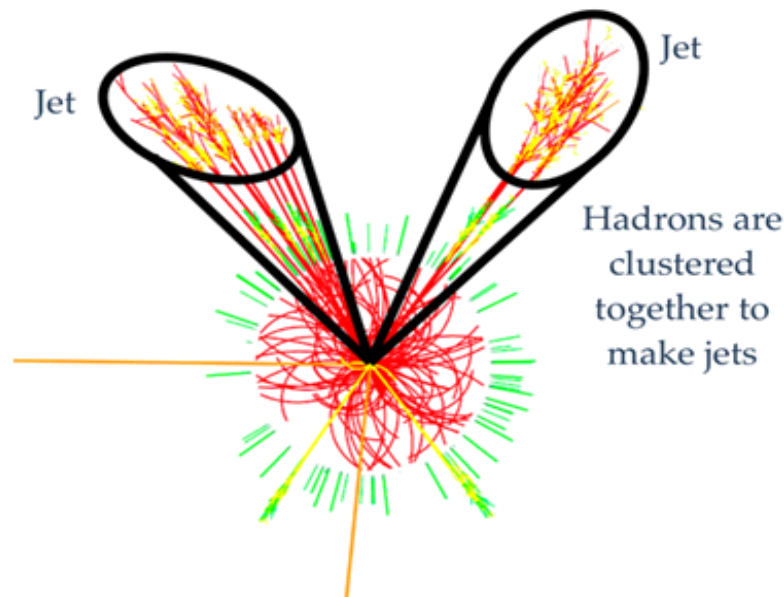
それで、素粒子衝突器では、QCD の命である次の事実を受け入れます：

たとえ、高エネルギー衝突がクォークやグルオンのような「基本」粒子を生成したとしても、私たちの観測できることはただ、ジェットだけです：ハドロンの散らかった噴射だけです。

このように、ひとつの非常に重要な仕事は、Feynman 図形の「基本」粒子と実際に測定されるハドロンスロープと対応させようとすることです。事実、ジェットの**テクニカル**な定義を提出することが、既に非常に難しい問題です。私たちの検出器は「ハドロンスロー

プ」の大部分を特定することができますが、しかし、このことからどのようにしてジェットのある数量の測定をへと進むことができるのでしょうか？

このプロセスを**クラスタリング**といいます。（このことは、）単独の高エネルギーのカラー電荷を帯びた粒子（クォークもしくはグルオン）から得ることができそうなグループへと、ハドロンをグループ分けするアルゴリズムを開発することを意味します。たとえば、上記の単純な図では、大半のエネルギー方向の周りにせまい円錐を描き、ジェットの部分である円錐の中にあるすべてのものと定義することにより、ハドロンをクラスタとするルールを開発できるのではないのでしょうか。：



イメージは D. Krohn さんからで、ATLAS Experiment © 2011 CERN のものをシュミレートしています。

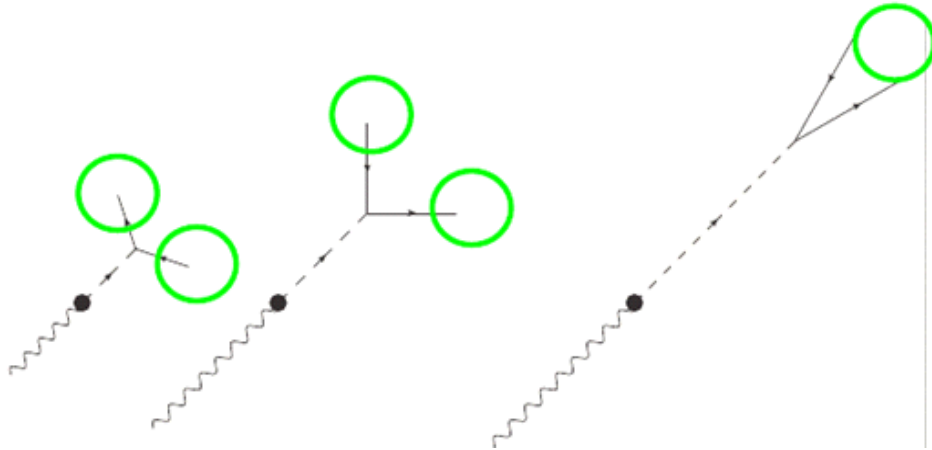
すると、円錐の中に含まれるエネルギーの測定が可能となり、いわば、これがジェットを生成する初期の粒子のエネルギーに等しいはずとなります。よって、基本的な対象について何かが発見することになります。私の注意したいことは、このジェットの「円錐のアルゴリズム」の類が少し未完成で、もう少し実際は複雑なテクニックがあるのではないかとということです（「直列の再結合(sequential recombination)」）。

## ブースト(補強)されたジェット

上記の絵は大変に素晴らしかったのですが、（読者は）物事が込み入ってくる様子を想像可能でしょう。たとえば、もし2つの円錐が近づき始めたらどうなるのでしょうか？もし1つが大きなジェット、もしくは狭いジェットで、互いに直ぐ隣り合っていたら、どのようにしたら、それらを知ることができるのでしょうか？実際、このことが、まさに、高度に補強された(boosted)対象がジェットに崩壊するとき起きることなのです。

「補強された(boosted)」の意味は、崩壊する粒子は大きな力学的エネルギーを持っているということです。これは、たとえ粒子が2つのカラー電荷を帯びた粒子へと崩壊するとき

でも、---つまり2つのジェットへ---検出器を叩く前にジェットはもう一つから分離することに時間はかかりません. このように、上の例で見たように、2つのうまく分離されたジェットの代わりに、重なり合った2つのジェットを結果することになります：



イメージはD. Krohnさんより. 崩壊する粒子が補強されるので、2つのジェットが重なり合い単独のジェットとなります.

さて、物事が非常にトリッキーになってきました. ここに具体的な例を上げます. LHCでは、多くのトップ/反トップ (クォーク) のペア ( $t\text{-}t\text{-bar}$ ) を生成すると期待されています. これらのトップクォークの各々は直ちに崩壊して、ひとつの  $b$ -クォーク (ボトムクォーク) と一つの  $W$  ボゾンとなります. このようにして次を得ます.

### $t, t\text{-bar} \rightarrow b, b\text{-bar}, W W$

(練習問題として、トップクォークのペアの生成とその崩壊の結果の **Feynman 図形を描く** ことができます.) これらの  $W$  ボゾンたちは、明らかに質量を持った粒子であり、電荷を帯びたレプトンとニュートリノ、もしくはクォークのペアへ崩壊することができます. レプトンたちは、カラー電荷を帯びてない対象ですので、それらはジェットを形成しません; このようにして、(電氣的) 電荷を帯びたレプトンは (典型的にはミューオンです) 非常に素晴らしいシグナルです. それで、トップクォークペアの生成を探し出すもっとも約束されたチャンネルは、レプトンとニュートリノに崩壊した  $W$  ボゾンが一方にある、他方で2つのクォークへと崩壊する  $W$  ボゾンがある時です：

### $t, t\text{-bar} \rightarrow b, b\text{-bar}, W W \rightarrow b, b\text{-bar}, q, q\text{-bar}, \text{lepton}, \nu$

ニュートリノは検出できませんので、クォークのすべて (ボトムクォークを含む) がジェットとなります. このようにして、トップクォークのペアの生成は、高いエネルギーもつレプトンの4つのジェットの数を数えることで、研究することができます. この議論のためには、バックグラウンドのイベントを心配する必要はありませんが、レプトンを要

求する理由の一つには、バックグラウンド（の影響）を判断することの助けになるということだけは、言っておきます。

※ 「Feynman 図形を描きましょう」については、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』のp5を参照ください。

※ [レプトン 日本語版 wikipedia](#) ハドロンは「重い」を意味し、レプトンは「軽い」を意味します。

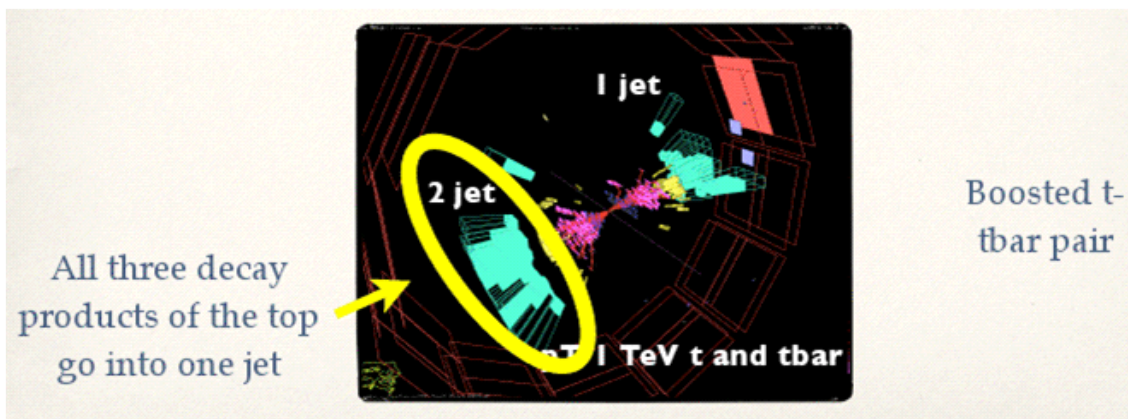


以下に、そのようなイベントがどう見えるのかをしめします：

イメージは D. Krohn さんからのもの； ATLAS Experiment © 2011 CERN のイベントをシュミレートしています。

ここに “ $p_T$ ” はトップクォークの(ビームに垂直な運動量) エネルギーを表しています。上の絵の中ではトップクォークが、適当な力学的なエネルギーを持っています。他方、トップクォークは高度に補強(boosted)されている場合もあるかもしれません --- たとえば、それらが大きな力学的エネルギーをそれらに与える非常に重い粒子の崩壊から来たものかも知れないのです。次に示すイベント表示では、トップクォークは、前のイベントの 10 倍も大きな  $p_T$  を持っています：





イメージは、D. Krohn より ; ATLAS Experiment © 2011 CERN の結果をシュミレートしたものです。

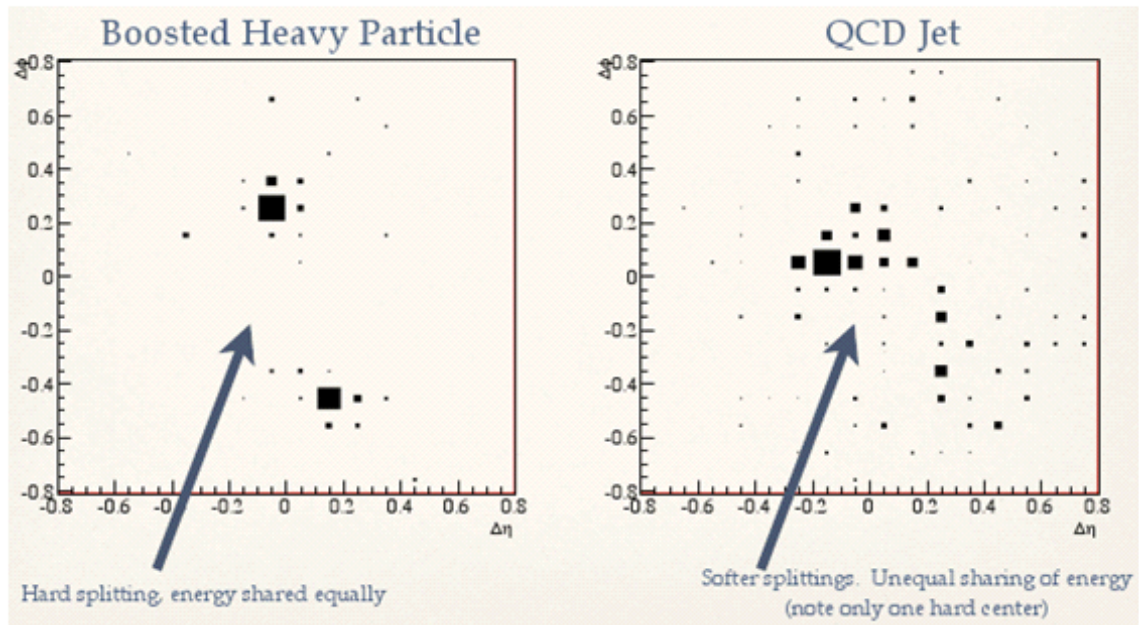
さて、物事はトリッキーです！4つのクリーンなジェットのために、2つの少し太いジェットが現れているようです。このイベントをシュミレートしたものが、実際に今探している“ $b, b\text{-bar}, q, q\text{-bar}, \text{lepton}, \nu$ ”のシグナルを持っていたにしても、ジェットは重なっているのです、おそらくこのイベントは数えることができません。

ジェットを数え違える傾向は他にもあり、たとえば、ジェットが（または、実際は何でもよいのですが）ビーム方向に出ていくとすると、それを検出できません。これは、ハドロン衝突器で探索するシグナルの種類特有な技術的なひとつの理由です。しばしば、イベントの選択条件に「少なくとも」ジェットのいくつかの数を、運動量ジェットエネルギーに、何らかの制限を加える研究もあるでしょう。

## ジェットのさらに小さな構造

皆さんは、たとえ補強された(boosted)トップクォークのペアが2つのジェットだけに見えたとしても、ひとつの大きなジェットというよりも、それらは2つの小さなジェットであり、何かの遺物ではないだろうかというかもしれません。この分野の最近、多くの進展があります。

より小さな部分構造なしで、補強された(boosted)重い粒子 (2つの重なったジェット) から、「普通」の QCD のジェットを区別すること. プロットは検出器の円筒状の横断面です --- それをビームに沿ったトイレットペーパーの周りに巻きつけることを想像してください.



イメージは D. Krohn さんより.

重要な点は、「ハドロンの噴出」がひとつのジェットか、それとも複数のジェットかを決定するために、「内部の輻射分布」を使うことが助けになることができます. 上のプロットで見たように、これはお茶の葉を見るのと同じ技術です (、、、単に最も軽い皮肉を言っているにすぎません!)

[専門家に対して: QCD ジェットを見つけることがそれほど難しい理由は、Alterelli-Parisi splitting functions です: クォークとグルオンが実際にソフトに放射する傾向にあります]

(2つのジェットというより、) 1つのジェットが実際にジェットである可能性を測定するために開発された方法が、今では少しの前進しています. このプロセスはジェットの**部分構造(jet substructure)**と呼ばれます. 典型的には、検出器のデータを採取するアルゴリズムを定義して、ジェットの中のハドロンの内部分布について教えてくれる**ジェット形状変数(jet shape variable)**と呼ばれる数値を分離します. 期待していることは、この変数のいくつかがイベントの各々から可能な限りの多くの有益な情報として抽出することを助けるに十分な信頼性があるからです. より長く一つのアイデアとともに過ごしていればいるほど、よりばかばかしい名前をそれに付けたいくなることは、物理学の法則のようでもあります. 最近の例として一つ "**N-subjettiness**" 変数があります.

※ 「N-subjettiness」は [arxiv:1011.2268](https://arxiv.org/abs/1011.2268) へリンクしています.

[Jesse Thaler, Ken Van Tilburg](#) "Identifying Boosted Objects with N-subjettiness"

## ジェットの超微細構造

部分構造に加えて、最近の進展には、ジェット超微細構造(**jet superstructure**)の分野があり、そこでは、2つ、あるいはそれ以上の数のジェットの相関を見ます。基本的なアイデアは、非常に直観的なものへボイルダウンすることです。水素原子が陽子と電子で合成されていることを、私たちは知っています。総じて、水素原子は電気的には中性であるので、電気的な場を輻射しません。(もちろん、これは全く正しいということではありません；原子は、より小さな電荷を持ったものにより実際は構成されているという事実から、**双極場** (a *dipole field*) があります。)しかし、重要な点は、原子から離れて、中性な対象として見えることから、電気的な場を輻射することをそれ(水素原子)には期待できません。

カラー電荷を帯びた粒子についても、同じことが言えます。既に、クォークとグルオンはカラー電荷が中性である対象へと再度結合する傾向があることを知っています。しかし、私たちの持っている高エネルギー素粒子衝突器の中では、これが起きる前に、どのようにカラー電荷を中性とするのかの様子をとらえようとする場所の周りには、飛び回っているクォークたちがあります。時間スケールに焦点を合わせて、カラー電荷が中性であるようなクォークの中間状態からは、グルオンの輻射(グルオンはカラーの場です)することはもっともらしくないと想像することができます。他方で、他の中間状態はカラー電荷を持っているかも知れないので、グルオンを輻射することがあるかも知れないとも思われます。これは、ジェットのスロープの分布を変えるという結果をもたらします。

この一連の仕事の中で、素晴らしい例が、[第一論文](#)にあります。「クォークのフュージョン」を通して Higgs ボソンを生成することを考えましょう。すなわち、クォークと反クォークが結合して、ひとつの Higgs ボソンになると考えましょう。既に、この Higgs の議論は[最近のポスト](#)でスタートしています。そこでは2つの重要な点があります：

- (1) 一度 Higgs が生成されると、それがどのように崩壊するかを形とすることが重要
- (2) 崩壊のチャンネルを特定すると、バックグラウンドも考慮に入れねばなりません(このシグナルに寄与する Higgs ではないイベント)。

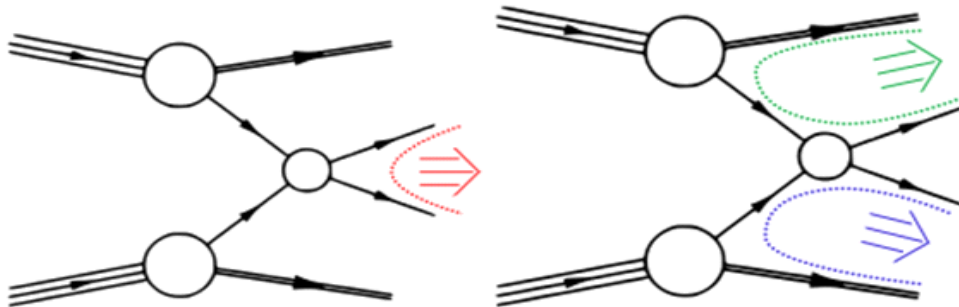
※ 「第一論文」は Seeing in Color: Jet Superstructure Authors: [Jason Gallicchio](#), [Matthew D. Schwartz](#) [arXiv:1001.5027v3](#)

※ 「最近のポストは」 USLHC ブログの F. Tanedo さんの 2011 年 3 月 25 日の [An Idiosyncratic Introduction to the Higgs](#) にリンクが張られています。日本語版は、私のブログの 2011 年 3 月 31 日のポスト「USLHC 独特な Higgs への入門」を参考下さい。

1 つの良い Higgs (崩壊の) チャンネルは  $b\bar{b}$  です。この理由は、ボトムクォークのジェットが、明らかな兆候を持っていることで、--- 時折、さらなるクォークやグルオンへとシャワーを(崩壊を)始める前に、 $b$  クォークは検出器の中を動くことがあります。このように、探しているシグナルは、2 つの  $b$ -クォークのジェットです。これにはバックグラウンドがあり： $q\bar{q} \rightarrow \text{Higgs} \rightarrow b\text{-jets}$  と、また、 $q\bar{q} \rightarrow \text{gluon} \rightarrow b\text{-jets}$  も考えに入れる必要があります。

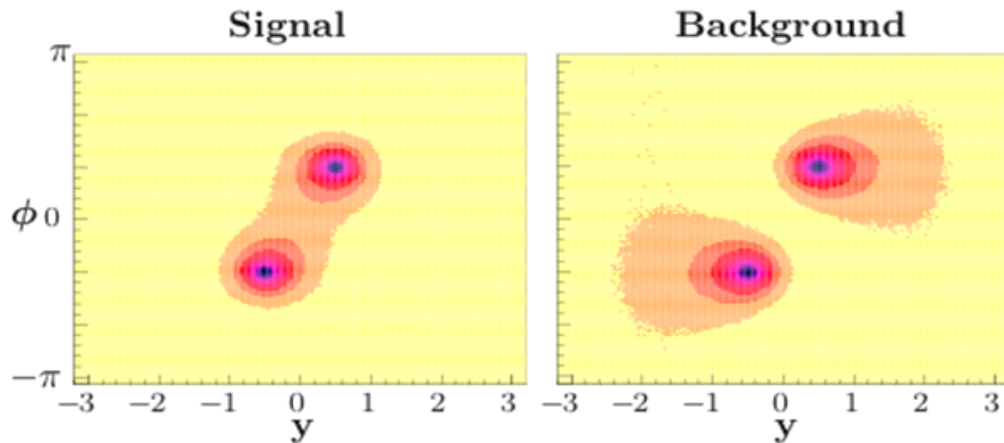
グルオンに媒介されたバックグラウンドは、典型的には非常に大きいので、データからこれらのバックグラウンドのイベントを取り去る賢い方法を見つけたいのです。それには、ジェットの部分構造が助けてくれるかも知れないことが判明しています。この  $\text{Higgs} \rightarrow b\text{-jets}$  への崩壊と、グルオン  $\text{gluon} \rightarrow b\text{-jets}$  への崩壊の間の違いは、グルオンがカラー電荷を持っていることです。このようにして、グルオンが崩壊したときに、2つの  $b$ -クォークがまたカラー電荷を帯びています。他方、 $\text{Higgs}$  はカラー電荷が中性ですので、2つの  $b$ -クォークはカラー電荷が中性です。

このことを、発見的に(heuristically)に「カラーの線」として描くことができます。そこではクォークは同じカラーのカラー電荷を持っていることを表しています。下の図のイメージでは、最初の図は、中間的な  $\text{Higgs}$  が生成されたときの表現で、第二の図は中間的なグルオンの表現です。



カラーの付いた線は  $qq\text{-bar} \rightarrow \text{Higgs} \rightarrow b\text{-jets}$  であり、 $qq\text{-bar} \rightarrow \text{gluon} \rightarrow b\text{-jets}$  です。イメージは 1001.5027 より。

媒介的な  $\text{Higgs}$  に対して、2つの  $b\text{-jets}$  は同じカラーでなければなりません（一つは赤、もう一つは反赤）ので、結合された対象はカラー電荷は中性です。媒介的なグルオンに対しては、2つの  $b\text{-jets}$  のカラーの線は、陽子の残り物に結び付いています（上と下の太い黒線）。この結果は、ジェットを作るハドロンの噴出が  $\text{Higgs}$  の崩壊を高いに引く傾向にあり、一方グルオンの崩壊は押し離すような傾向にあります。これは以下に発見的に(heuristically)に示します。そこでは、再び、検出器に対して円筒の横断的な面であるようにプロットされていることがわかるでしょう：



Higgs の 2 つの  $b$ -jets (signal) への崩壊 versus グルオンへの崩壊 (バックグラウンド) .  
イメージは 1001.5027 より.

このように、ジェットの超微細構造変数(‘pull’と呼ばれます)は、どのように 2 つのジェットが互いに引き合うか、押し合うかを測り、定義されます。期待はこの変数がシグナルとバックグラウンドを判別することに使うことができることで、これが新しい粒子の眼球によりよい統計的な見地を与えてくれることです。

いづれにせよ、これはきちんとしてものの典型的な例で、人々は LHC のようなハドロン衝突器での各々のイベントから得ることのできる情報の量を改善するために、働いています。私は David Krohn さんに感謝いたします。繰り返しますが、重要なトークと非常に面白い議論ができました。専門家には、是非、来月のワークショップ「Boost 2011」では、何かもう一つ私にやらせてください。

※ Boost 2011 <http://boost2011.org/> ワークショップ. 5/22/11 – 5/26/11 次の研究集会で活躍したいという F.Tanedo さんの気持ちが全面にでています。

## [A diagrammatic hint of masses from the Higgs](#)

# Higgs からの質量の図形的なヒント

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by [Flip Tanedo](#) on 05 May 2011 at 08:09 pm

二週間のほど前に、私は [Higgs ボゾンにあるその Feynman 規則](#) についての議論をしました。

※ 「Higgs ボゾンにある」は 3月 25 日の "[An Idiosyncratic Introduction to the Higgs](#)" のポストを指しています。日本語化は、3月 31 日にポストした本文の「USLHC 独特な Higgs への入門」を参照ください。

※ 「Feynman 規則」は、一連の Feynman 規則についての記事、小冊子の先頭から Feynman 図形関連するページを参照ください。



その時の最後のポストで [Particle Zoo に豪華な Higgs の姿](#) を提示する義務を忘れてましたが、しかし US LHC の読者たちは、[Burton が\[豪華な\]Higgs の素晴らしい写真](#) を載せていたので、ご存知と思います。（Higgs は Particle Zoo の中では電荷のある色をしています。）

※ 「Particle Zoo に豪華な Higgs の姿」は [http://www.particlezoo.net/individual\\_pages/shop\\_higgsboson.html](http://www.particlezoo.net/individual_pages/shop_higgsboson.html)

へリンクされています。

※ 「Burton」は、<http://blogs.uslhc.us/author/burton-dewilde> へリンクされています

※ USLHC の小冊子には、「豪華な Higgs の素晴らしい写真」は小冊子の p61 に写真だけ引用させていただきました。また、Particle Zoo には Higgs ボゾンが加わった版を掲載させていただいています。

Higgs が普通の **ゲージボゾン** である「力」の粒子や、**フェルミオン** である「物質」粒子と異なる種類の粒子であることを、私たちは学びました：Higgs は、**スカラー** 粒子で、詳しく知りたい人のためには、それらは本質的に量子力学的なスピンを持たないことを意味します。実践的には、これらのポストでは、Higgs は点線として描くという結論となっ

ていることを意味します。しかしながら、前のポストで提示した Feynman 規則は、全くうんざりです、、、



どのようにして Feynman 図形を描くかという大きな素描を思い出しましょう：

1. 異なる粒子は線で表現されます。3つの種類があって：フェルミオン（実線の矢印）、ゲージボソンは（波線）そしてスカラーは（点線）です。
2. これらの粒子が相互作用するとき、これらの線は交叉します。上の「規則」はどのような相互作用が許容されるのかを教えてください
3. もし可能なプロセスが描きたいのであれば、初期の粒子の集まりから最終の粒子の集まりへ変換する規則を使うことができるかどうか決定する必要があります。

[Feynman 図形のポスト](#)に従うとすると、既にこのプロセスにはうんざりであるかもしれませんが、どのように電子がミュオンに代わるかを知っていますし、Higgs ボソンがどのようにして LHC で生成されるかもしれないということさえも、知っています；しかし今ここで、Higgs ボソンに到達したのです --- LHC の主要な目標の一つは --- その活力 (pizzazz) がどこにあるのかです？何がそれを特別にしている、どのようにして Feynman 規則の中で見出すのでしょうか？

※ 「Feynman 図形を描きましょう」については、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p5 を参照ください。

## Higgs は特別です

Higgs はその「袖」に、他の標準モデルの粒子は持っていないトリックを持っていることが分かっています。Feynman 図形のことばで書くと、Higgs の線は端点を持っていません：



“x”の意味は、線がまさに終わっているということで；そこから他の粒子は出てきません。ここが非常に特別なのです！私たちは通常の粒子がそのようなことはしないことを知っています、、、何もないところへ物質粒子が消えることも、力の粒子が他の粒子によって吸収されることなしに消えることも知りません。私たちが知っていることは、物質と反物質が消滅するときに、これが起きると考えられますが、普通は、力の粒子（通常は光子）としてエネルギーを放出します。上の規則は、単独の Higgs の線が --- 幸運にも、これだけができるのですが --- 突然切れてしまうことが可能なことがわかります。このことは、初期

状態や終了状態として理解することができません。まさに止まってしまうことが起きることを媒介している線なのです。

この物理的な意味を、今後のポストで議論したいと思います。物理的な意味を説明しようとする、しばしば、それら自身の類似物として掴まえることができます。しかし、この代わりに、Feynman 図形をこの不思議な Feynman 規則の効果を知るための「支え (crutch)」として使ってみましょう。前のポストで、4点の Higgs の相互作用を導入しましたことを思い出してください。（「4点」とは4つの Higgs の線の交わりを意味します。）：

※ 「前のポスト」とは、3月25日の"[An Idiosyncratic Introduction to the Higgs](#)"のポストを指しています。本小冊子の「[Higgs への特有な入門](#)」を参照ください。



線の一つを取り去って終わらせると、3点の Higgs の自己相互作用となります：



実際、交わったのちに何もしない線なので、次の形の新しい Feynman 規則があるといってもよいでしょう：





さて、このことは、何か面白いことです。「交わりからなくなる Higgs の線」という規則については忘れて、3つの頂点を要求します。実際、普通はこれが Feynman 規則として書かれている方法です（これが「[独特な\(Idiosyncratic\)](#)」の持っている意味です）；しかし、私たちの目的のためには、次のことが非常に重要です。**実際に**意味していることは、暗に「交わりから消えて出て行っている Higgs の線」があるということを強調することです。この重要性は、Higgs が非常に特別なものであることと密接に結びついています。

※ 「[独特な\(Idiosyncratic\)](#)」とは、3月25日の"[An Idiosyncratic Introduction to the Higgs](#)"のポストを指しています。本小冊子の「[特有な Higgs への入門](#)」を参照ください。

これらの3本の線の一つに対して、このゲームを繰り返すと、2点の Higgs 相互作用へと導かれるでしょう。



繰り返すと、2つの端点を持つ線を切り落とすと、「新しい」2点 Higgs の Feynman 規則と言うことになります。しかしこれは、実際には1本の線であり、既に Feynman 規則の一部として描いていることがわかります。実際、その線はまさに粒子がある部分から別なところへ移動することを意味しているだけです。従って、2つの交わった線の相互作用が、何も新たなものをもたらさないように見えます。

、、、実は、これ以外にも、もっとあって、これは Higgs に付帯する魔術的なヒントを得たことの最初です。何も動機なしで、次のステートメントを言わせて下さい：

**主張:**上記の Feynman 規則は Higgs の質量への寄与です。

ここで、皆さんは、何か疑うように「なに〜い？」と言うでしょう。今までは、粒子はその固有の質量を持っていると言ってきました。その（質量の）数値は決して問題にせず、多くの場合は、ある粒子は他よりも軽いとか、ある粒子は質量がゼロだとかと言ってきました。質量は、まさに各々が（個別に）持っているように見える性質です。しかし、ここで氷山の奥深くに入り込むようなさらに深いステートメントがあります：私たちは、粒子の質量に特別な Feynman 規則を関連づけています。このことは、以前は、理論を特別なものとせねばならないある数値であることを前提にしていたのです。

そのような関係が、何故存在するのか、そして実際に質量とは何なのかということを得るには、次のポストまでお待ちください。しかし、これは少なくとも、Higgs ボゾン粒子に質量を与えることができるというアイデアを信用することから始めるべきなのです。この

点で、非常にミステリアスであり、理解しがたい何かがあるようです --- それで OKEY です！そこにおいておきましょう。ここでは、次の一連のアイデアを感じ取っていただくだけで十分です：

1. Higgs ボゾンは、特別な Feynman 規則を持っていて、端点を持つことができます。
2. このことは、任意の相互作用と考えると、頂点の後直ちにそれを端点とすることで、Higgs の線を実質的に消し去ることができることを意味します。
3. 特に、このことは2つの線の頂点を生成することを意味します。
4. 2つの線の頂点は、--- ミステリアスな理由により --- 質量と同一視すべきです。

## 他の粒子に質量を与える

どのようにゲームがなされるかを理解すると、ただちに、書きだした最初の2つの Feynman 規則に戻ることになります：

これらは Higgs とフェルミオンの相互作用、Higgs とゲージボゾンの相互作用です。ここに、考えるべきことがあります：

ふーむ、、、私は Higgs ボゾンの線が端点を持つことができることを理解しました；まさに点線の終点を交わりとすることができるのです。そして、私は次のように理解しました。



私が Higgs の自己相互作用の頂点を何度も何度もこれで考え、Flip が私に教えた2点相互作用を持つという結論となる時、ある不思議な理由で**質量**となります。ここで Higgs と2つの物質粒子、もしくは2つの力の粒子との相互作用で、2点頂点を表していることを、私は言いたいのです。Higgs の線が端点を持つことは、これらの粒子に質量を与えることでもあるのでしょうか？

答えは **Yes** です！頂点は次のように端点を持ちます：



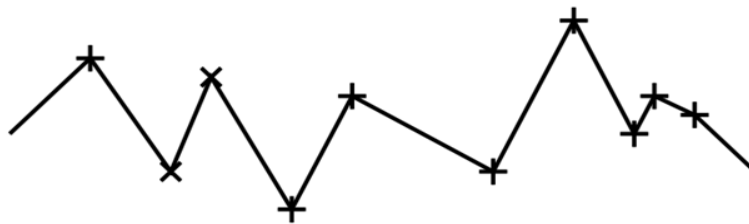
美しさの理由から（そして、実際に美しいという理由だけで）、この図形を短縮することができます：



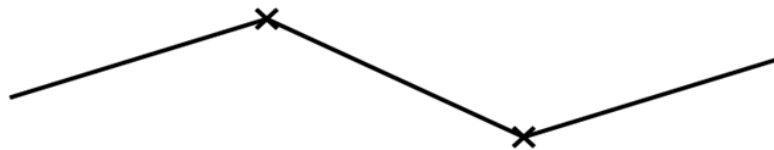
さらに潔癖にしたいならば、” x”を落としてしまうことも可能です、、しかし、明らかに普通の線とこれとを区別するために残しておくことにします。これらの図形は、実際にフェルミオンやゲージボゾンへ与える質量を表しています。繰り返しますが、私は、皆さんにこれをミステリアスな事実として話しています --- 何故、この解釈が正確なのかの説明は後でしたいと考えています。「質量」とは本当は何なのかを最初に理解する必要があります、、それには注意が必要でしょう。

## Higgs に突き当たる

実際、任意の質量を持って「始った」粒子を言う代わりに、完全に無質量な粒子のことばで全 Feynman 図形のプログラムを定式化できます。そのような素描では、トップクォークや Z ボゾンのような粒子は、前に述べた多くの 2 点「質量」相互作用に従い、そのためにより大きな質量を持って観測されます。発見的には、重い粒子は樽詰めにされていて、これらの 2 点相互作用をたくさん持ちます：



比較のために、電子のような軽い粒子はこれらの相互作用を少ししか持っていません。（これも **発見的** (*heuristically*) ですが）これらの運動は、次のように見えます：



覚えておくべきことは、これらの交点の各々は実際、端点を持つ Higgs の線であることです。前のポストで出てきたいくらか夢のような口調を使うと、Higgs は「**真空期待値**」を持っていて、これらの粒子はこれに対して突き当たっているということができます。上の素描では、まさに Feynman 図形の「漫画」ですが、これがどのように「慣性」というようなの意味を持つように思えるかを理解することができます。さらに重い粒子（トップクォークのような）は、Higgs に対してぶつかり続けているので、さらに周りから押されて重くなっています。電子のように軽い粒子は、Higgs とはそれほど多くは相互作用せず、少ししか押されないのです。

この意味で、粒子を無質量として考えることもできますが、Higgs との相互作用は、**有効な質量**である 2 点相互作用を生成します。Higgs とより強く相互作用する粒子は、より重い質量を持ち、一方 Higgs と弱くしか相互作用をしない粒子は、より軽い質量を持ちます。実際、一度このことを仮定すると、これらの線のばかばかしい十字をすべて落としてもよいでしょう --- そして Feynman 規則を残して（端点を持った Higgs の線のなくして）、普通に表現します。

（小テクニカルノート：Higgs は**すべての**質量に反応しているわけでは**ありません**。たとえば、バウンズ状態はそれらの結合しているエネルギーから質量を得ます。陽子の質量を見てください。これを構成しているクォークの質量と比較してください。陽子や約 1 GeV の質量を持っているのに対して、up/down クォークはこのたった **1000 分の 1** です。陽子のほとんどの質量は、QCD の結合エネルギーからきます。）

## いくつかの結論的な注意

これらのことを少し考え始める前に、次の議論への興味をそそるために、すこし結論的な注意をさせてください。

- 光子は、ご存知のように、無質量です。このように、**Higgs は光子とは相互作用しなく**、もしくは、そうでないと「端点を持つ」Higgs の線ができてしまい、光子に質量を生み出してしまうことを期待してしまいます。
- 他方では、Higgs は W ボゾンと Z ボゾンに質量を与えます。このことは、エネルギーを消費して、こいつら（の質量）を生成することを意味します。それで、弱い力は短い距離でしか有効ではないのです。これを無質量である光子と比較すると、光子は長距離力を生成することができるのです。（グルオンもまた無質量ですが、これらは**閉じ込め**のために短距離力です。）このように **Higgs は弱い力の「弱さ」にしか反応しません**。
- 、、、以上のノートでは、「弱い」力は実際はそれほど弱くないことを注意する必要があります --- W ボゾンと Z ボゾンの質量のために、長距離では弱く見えるだけです。短い距離で見ると --- いわば、上の漫画の素描の中の 2 つの Higgs の交叉の間の距離よりも短い距離では --- 弱い力は、電磁気力と比較できる能力を、実際には持っていることが分かります。このように、さらに正確なステートメントは、**Higgs は弱い力の短距離に対して反応します**となります。

※ 「閉じ込め」については、その 1 の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p54 「QCD と閉じ込め」を参照ください。

このポストで指摘する価値があるいくつかの未解決な問題があります。この主題で次に来るべきポストでは、これらをまとめてみたいと思います。

- 部屋の中の大きな象は、**端点を持つ Higgs の線から来る 2 点相互作用が質量と解釈すべきであることは何故**なのかという疑問です。少なくとも発見的には、上の素描の中で、どのようにして「Higgs に突き当たる」ことが、慣性を持つことのように思えるのかのヒントとなります。質量の意味するものは何かについてより良く知りたいのです。
- 非常に長々と、無質量としてすべてを扱うことと、Higgs の相互作用を通して「有効な」質量が生成されることについて話をしてきました。特殊相対論は、**質量を持**

たない粒子と何らかの質量を持つ粒子の間には非常に大きな違いがあることを教えています、、、これは、**原理的には**、粒子を捕まえることができるかどうかと考えるべきです。どのようにして、上記の素描の中で質量は「Higgsに突き当たること」から得られるかを、網目にひっかけることができるのでしょうか？

- Higgsの線が端点を持つことができるということの**物理的な意味**は何でしょうか？「真空期待値」とは何を意味するのでしょうか？これは**量子場として粒子のすべてが描かれているというアイデア**に関連していることが分かるでしょう。これは何を意味するのでしょうか？
- このすべての仕事は、**電弱対称性の破れ**と呼ばれるものに関連していて、このHiggsに付帯する現象は本当に、本当に魔術的です。

※ 「量子場」は、2008年にポストの<http://blogs.uslhc.us/the-quantum-field>を指しています。Vivian O'Dellさんの記事です。

コメント欄に既に、問答が投函されています。

**質問**：質量を持たない光子が、どうしてブラックホールに吸収されたり、その近くで曲がったりするのでしょうか？

**回答**：これは素晴らしい質問です。答えは重力は質量とのみ結合するだけではなく、エネルギーとも結合します。光子は質量を持っていませんが、エネルギーをもっていますので、時空の曲率に反応するのです。言い換えると（同じことです）、それらは重力と相互作用します。このことは、重力の結合する「チャージ」は、質量だけではなく、全エネルギーです。

## Higgs and the vacuum: Viva la “vev”

### Higgs と真空: やったぜ「真空期待値」

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

FLIP TANEDO | USLHC | USA Friday, June 3rd, 2011 at 2:09 pm

皆さん、こんにちは！最近、[Higgs ボゾン](#)についての [Feynman 規則](#)を見てきました。先回の[ポスト](#)では、Higgs と質量の起源の間の非常に示唆に富んでる関係から始めました。Higgs は袖の下に特別なトリックを持っていることに注意しました:それは、Higgs の線は終点を持つことが可能であるという Feynman 規則を持っていることです。



このことは、2つのフェルミオンもしくはゲージボソンを、終点を持つ Higgs に関連づけて、描くことができます:

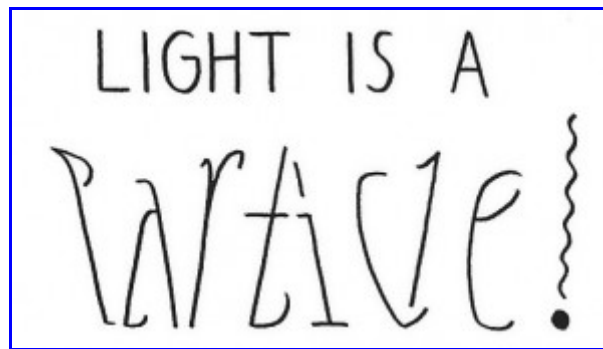


これらの図形は Higgs に関連する粒子の質量として解釈できることを強く主張しました。この解釈をさらに探求したいのです。今は、何故この奇妙な Feynman 規則を持っているのか、これが何を意味するのかについてより良く理解しましょう。

- ※ 「Higgs ボゾン」は、本小冊子の「[特有な Higgs への入門](#)」を参照下さい。
- ※ 「Feynman 規則」は、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p54 「QCD と閉じ込め」を参照ください。
- ※ 「先回のポスト」は、本小冊子の「[Higgs からの質量の図形的なヒント](#)」を参照下さい。

## 量子場は永遠 Quantum Fields Forever

しかしながら、このことに入る前に、量子物理学の基本的な考え方の一つに立ち返る必要があります: **波動性と粒子性の双対です**。Douglas Hofstadter の有名な美しいまとめで、大衆的な科学的な声明をまとめました:



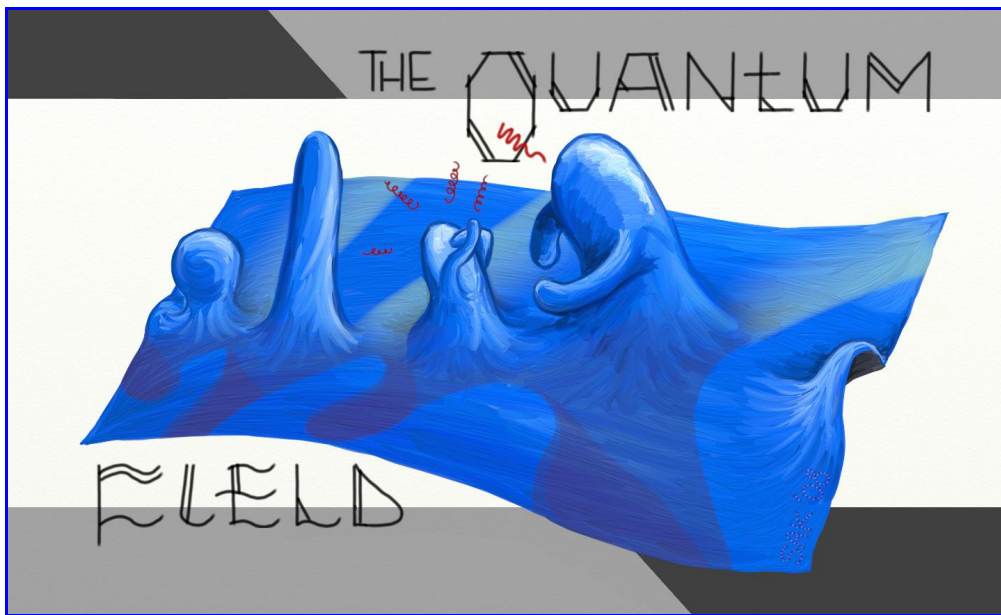
Douglas Hofstadter による美しいイメージは、the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license に従い、使います。

波動性と粒子性の双対は、量子力学のよく知られた言葉の一つです。光は粒子でしょうか、波動でしょうか？電子は粒子でしょうか、波動でしょうか？もし、これらのものが波動だとしたら、**何の**波動なのでしょう？

高エネルギー物理学では、普通は非常に早く動く小さなものに興味を持ちますので、**量子場理論 (QFT)**のフレームワークを使います。量子場理論は、量子力学(これは「小さな」ものを記述します)と特殊相対論(これは「早い」ものを記述します)を結合したものです。量子の「波動」は粒子に付随する量子場の波動です。場の緩い解釈は、粒子が存在することを見つける確率です。

もう少しテクニカルな説明は：**QFT**の全体のフレームワークは、因果律の考え方に基礎を持っています。原因の前に効果(結果)を得ることはできませんが、特殊相対論が、前と後の考え方を非常に複雑にしています。このように、粒子の相互作用は時空の中では、局所的でなくてはならないことを導入します；**Feynman** 規則の頂点は実際、特定の時間で特定の場所を表します。記述されると期待される対象は、正直で善良な**粒子**ですが、しかし量子的な粒子の局所的な記述は、自然に**場**のことばでまとめられます。素晴らしい議論(上級の大学院生のレベル)のためには、Perimeter での [N. Arkani-Hamed によるレクチャ](#)の前の 30 分を見てください。

それで量子場は、数学的な対象で、時間と空間の中の各々の点では、どのようにして粒子であるように見えるかを教えてくれる構成になっています。時間のほとんどで、量子場は全くゼロです：空間の真空は、さらにもっと小さな空の状態です。量子場の中でゆらぎを持っている粒子を想像することができます。それは以前の US LHC ブロッガーの [Sue Ann Koay がうまく描いていました](#)、このように：



Sue Ann Koay の量子場の描写. 場のゆらぎは粒子と解釈すべきです. ここに 2 つの粒子の相互作用が生じます. (専門家には: イメージの中の ISR を指摘しています.)

時折、ゆらぎは他のゆらぎに励起することができ(おそらく、他の量子場)、詳しくは、異なる粒子の相互作用を記述する Feynman 図形を描くとき、このことが起きます.

## 真空と「Higgs 相」 The vacuum and the 'Higgs phase'

さて、**真空**の考えを得ました ---- その中に材料が何もない空間です. 普通は空の空間の真空を考えると、何もないことを想定します. 真空は小さなスケールでは、むしろ非常に忙しいことが分かっています、というのは、量子的なゆらぎがあるからです: 仮想的な粒子・反粒子の生成と消滅が絶えずおこっているからです. さらに、真空はまた、2.735Kelvein の [宇宙マイクロウェーブの背景輻射](#) で満たされています. しかし、今まではこれらの効果の双方を無視してきました. そこには、真空について **非常の驚くべきこと** があるということが判明しています:

※ 「宇宙マイクロウェーブの輻射」は、日本語版 wikipedia「[宇宙マイクロ波背景輻射](#)」を参照下さい.

それは Higgs ボゾンで満たされていることです.

電子やクォークのような通常の粒子の量子場は、それらが動いている周辺以外では、どこでもゼロです. 粒子は、ゼロという値の上でゆらいでいるのです. Higgs は、違っています、というのは、その真空での量子場の値がゼロではないからです. 私の言いたいことは、それが『**真空期待値**』、短くは『**vev**』というものを持っていることです. 詳しくは、この Higgs の真空期待値は、Feynman 規則の中で交叉している Higgs の線により表現されていることです.

Higgs の真空期待値の荒い解釈は、時空の中の任意の与えられた点で Higgs ボゾンの存在するバックグラウンドの確率です. これらの「バックグラウンド」の Higgs ボゾンは、運動量を持っていませんが、しかし、上でみたように他の粒子と相互作用することができます:





この交叉の意味は、「物理的」な Higgs 粒子の破線が、これらのバックグラウンドの Higgs の一つとの相互作用に対応しているという意味です。この意味で、私たちは Higgs の上の中を泳いでいるのです。この Higgs の解釈は、私たちに質量を与えるものです、がしかし、このステートメントはおそらく、実際、質量とは何かというこの後のポストで、いくらか時間をかけて後でのみ、理解していただけでしょう。

何故 Higgs が真空期待値を持つのかという質問は、良い質問です。これは **電弱対称性の破れ** と呼ばれるものの結果で、電磁気力と弱い力との統一、すなわち、基本的な力の統一についての広いストーリーの一部です。

しばしば、人々は、宇宙が「Higgs 相(phase)」の中にあるという言うことがありますが、この相は非常にエレガントに素粒子の量子場理論と凝縮型物性系間の関係を描き出します。まさに、私たちは液体と気体の相転移(もしくはそれよりも込み入った相)について議論しています。私たちはまた、宇宙がどのようにしてよく知られている粒子に質量を与える Higgs の真空期待値を導出する電弱の相転移のもとに支配されているかを議論できるのです。

## 次回は…

Higgs の話を続けるとき、ほかの標準モデルの粒子に質量を与える Higgs の真空期待値のことをより良く理解することか始めましょう。電弱対称性の破れについてより良く学びましょう。

※ 標準モデルの他の粒子の質量が全て、Higgs の真空期待値だけで与えられているわけなく、質量の多くの部分は Higgs 以外から与えられていることに注意ください。この文だけの脈絡上では、Higgs のみが全て与えているように読み取れかねませんが、、、(私の勝手な注)

このことについて、誤解を招かないように、F.Tanedo さんご自身のコメントを繰り返させていただきます。P51 には

(小テクニカルノート: Higgs は**すべての**質量に反応しているわけでは**ありません**。たとえば、バウンズ状態はそれらの結合しているエネルギーから質量を得ます。陽子の質量を見てください。これを構成しているクォークの質量と比較してください。陽子や約 1 GeV の質量を持っているのに対して、up/down クォークはこのたった **1000 分の 1** です。陽子のほとんどの質量は、QCD の結合エネルギーからきます。)

とあります。

## Helicity, Chirality, Mass, and the Higgs

### ヘリシティ、カイラリティ、質量そして Higgs

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Flip Tanedo | USLHC | USA Sunday, June 19th, 2011 at 11:14 pm

※ 本記事は、日本語 wikipedia の「[ヘリシティ\(素粒子\)](#)」「[カイラリティ](#)」「[カイラル対称性](#)」を参考下さい。

私たちは、Higgs (その[相互作用](#)、その[粒子の質量における役割](#)、その[真空期待値](#))を [Feynman 図形を使った標準モデルの理解](#)のシリーズの一部として議論してきました。さて、ここで私は、標準モデルの非常に微妙な内容についての議論をポストしたいと思います: そのカイラルな構造と「質量」の意味です。本ポストは、少し他のものと性格を異にしますが、素粒子物理学の非常に微妙な内容に依存していて、それらは標準モデルの完全な足場としての理解が重要ですので、それらを注意深く説明したいと考えています。

※ 「相互作用」は、本小冊子の「[特有な Higgs への入門](#)」を参照下さい。

※ 「粒子の質量における役割」は、本小冊子の「[Higgs からの質量の図形的なヒント](#)」を参照下さい。

※ 「真空期待値」は、本小冊子の「[Higgs と真空: やったぜ「真空期待値」](#)」を参照下さい。

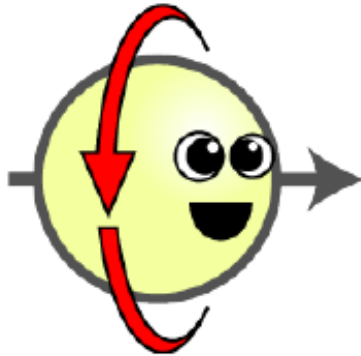
※ 「Feynman 図形を使った標準モデル」は、その1の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p5「Feynman 図形を描きましょう」を参照下さい。

私の目標は、そこでは標準モデルが「カイラル」であることと、それが何を意味するかを説明することです。このことをするためには、まず第一に、関連する考え方について学びましょう、**ヘリシティ**、これは粒子のスピンに関係しています。それから、さらに抽象的な**カイラリティ**の概念を理解する直感的なステップとしてこれを使い、それからどのようにして質量がカイラルな理論に影響し、この全てが Higgs であるべきものは何であるかについて見てみたいのです。

## ヘリシティ

**事実**: 全ての物質粒子(電子、クォークなど)はスピンしています、つまり、各々の物質粒子は、固有の角運動量を持っています。

この**スピン**は、基本粒子の固有の量子力学的性質であることに注意してください! そこには実際、軸を中心として小さな球が回っているという古典的な意味ではありません。しかしながら、何が起きているのかは、次の漫画の素描が有益となります:

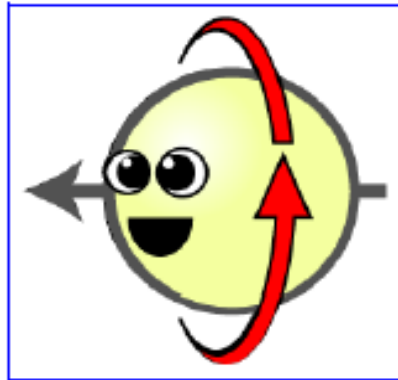


※ このアニメーションはとてもインパクトがあります。(pdfファイルにしていますので、回転していませんが Web では、これが回転します。)

これはスピンする粒子です。赤い矢印は粒子のスピン方向を示しています。グレーの矢印は粒子の進行方向を表しています。顔を描いたのは粒子がスピンをしている様子を描きました。

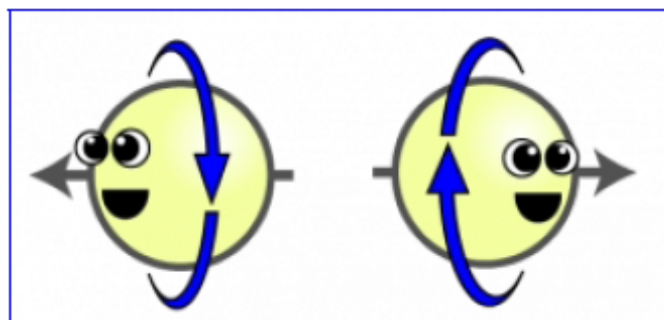
この(スピンを表す)赤い矢印と(運動方向を表す)グレーの矢印は、向き、もしくは、右手系とか左手系とか(handedness)を定義します。上の特別な粒子は、“**右手系**”です、というのは右手と同じ向きだからです:もし親指をグレーの矢印に合わせると、指は赤い矢印の方向に巻き付くようになります。物理学者は、この右手系か左手系かを**ヘリシティ(helicity)**と呼びます。

明らかに、右手系の粒子を反対方向へ(左の方向へ)動かすように描くこともできます:



スピンの方向(赤い矢印)は変化することに注意しましょう。親指を反対の方向に向けると、指が反対の方向へ巻き付くことを確かめることができます。

これ、いいと思いませんか? よろしい、今度は、**左手系**(もしくは“左ヘリシティ”)の粒子を想定することもできます。参考のためにここでは左手系の粒子が互いに反対方向へ動いていることを描いて



みます;左手系と右手系のスピンを区別するために、左手系の粒子の(スピン)は青い矢印で描きました:

[ これらの2つの粒子は赤い矢印をもった粒子とは異なっています! ]

**観察:**もし、グレーの矢印の方向にのみ動くのみであれば、反対のハンドルネスを持つ粒子と結論づけることができます。詳しくは、なぜ(もしあなたが右利きであれば)鏡に写した人が左利きである理由です!

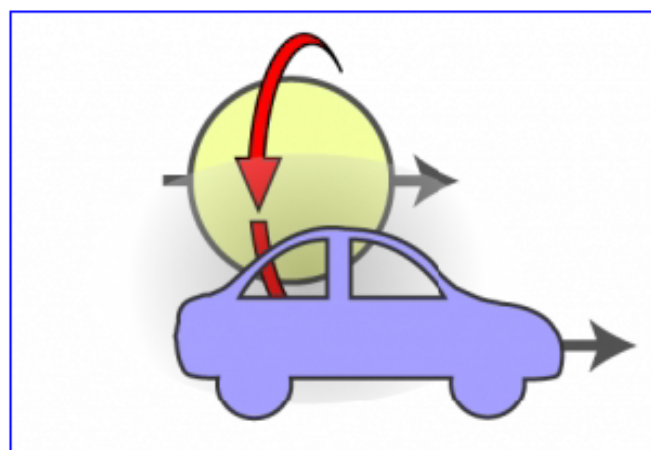
このようにいままで、物質粒子(フェルミオン)に限定してきました。同じストーリーが力の粒子(ボゾン)にも成り立ちますが、しかしそこでは、**特別な注意が必要で、ツイストを加える必要があります**。Higgs ボゾンは、スピンを持っていませんので、特別の場合であり、実際、ボゾンのストーリーに入っています。

一度フェルミオンの特別なタイプをとると、いわば電子をとったときに、自動的に左手系のヘリシティと右手系のヘリシティのバージョンがあることとなります。

## ヘリシティ、相対性、そして質量

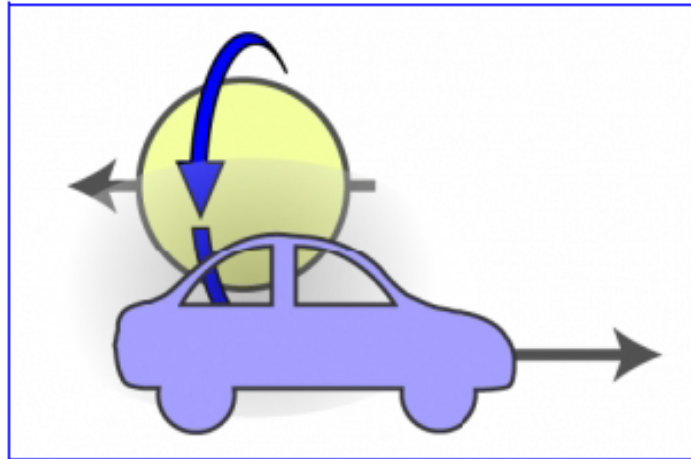
さて、質量の意味について考えることにしましょう。質量について考えるには多くの方法があります。例えば、おそらく、最も直感的には粒子がどれくらい「重い」かに結びつけることです。私たちは、特殊相対論による別な見方をしたいのです。

**無質量(massless)**粒子(光子のような)は、光の速度で飛ぶことができ、それを捕まえることは出来ません。無質量粒子にはそこで静止すべき「静止座標」がありません。この類似を、フリーウェイで考えてみます:もし、あなたが、隣のレーンを走っている自動車と同じ速度で走っているとすると、(あなたと相対的には)隣の自動車は止まっているように見えます。ここで車を粒子へと置き換えて見ます。



他方で、**質量を持つ(massive)**粒子は光の速度よりも遅い速度でしか運動しませんので、(原理的には)あなたから見て、相対的に静止しているように見える速度に合わせることが可能です。事実、質量をもった粒子よりも**早い**速度で運動すれば、粒子は**反対の**方向へ運動しているように見えます。

す(これはグレーの矢印で示しています)。注意すべきことは、スピンの方向(赤い矢印)が変化しないことです！しかしながら、既に粒子の方向に対してのみの粒子のヘリシティ ---- そのスピンではありません ---- が変化しています：



するとここでは、右手系から左手系となるので、青い矢印を持つ粒子を描きました。明らかにこれは同じ粒子です：行なったことの全ては、異なる座標系へ移動したことで、特殊相対性理論の原理は座標系は変化するということを言っています。

よろしい、それではここで今までの重要な点は：**質量**はヘリシティが粒子の「本質的な」性質か否かを、私たちに教えてくれます。もし粒子が無質量とすると、そのヘリシティは全ての座標系の中で固定した値を持ちます。他方、粒子に何らかの質量があると、ヘリシティは、異なる観察者は(有効な座標で)ヘリシティ(左手系か右手系か)の異なる値を観測することが可能です。それでヘリシティを視覚化することが簡単なことであったとしても、そのことは、ほとんどの粒子の「基本的」性質とは言えません。

さて、ここで聞くべき良い質問は：**粒子に固有的であるヘリシティに関する粒子の性質は何かあるのでしょうか？**言い換えると、次を満たす性質はあるのでしょうか？

1. 無質量の極限ではヘリシティに同値
2. 有効な座標系で全ての観察者が与えられた粒子と同じと測定できるものであること

そのような性質が存在することは良いことで、これを**カイラリティ(chirality)**といいます。これは少し抽象的であることは悪いことです。しかしながら、これは標準モデルにある多くの微妙さであり、私の考えでは、まさに注意深く行くのがベストです。

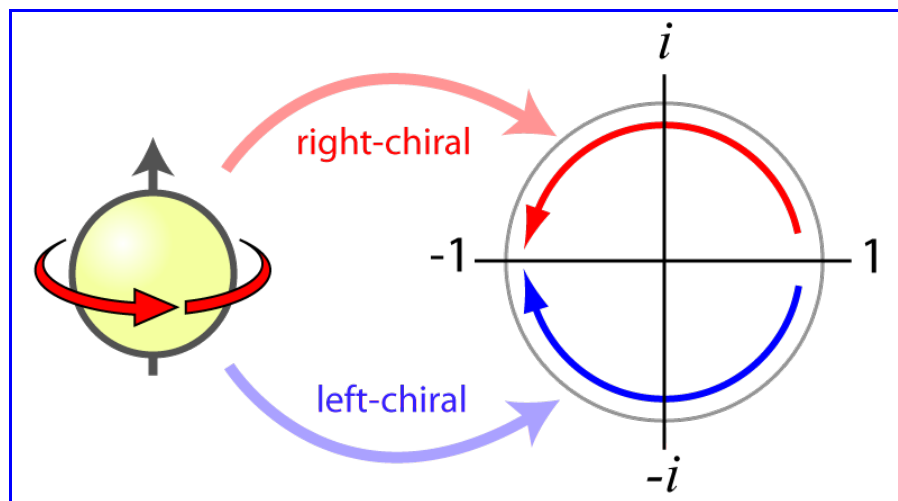
## カイラリティ(chirality)

カイラリティとヘリシティは、非常に密接に関連する考え方です。まさに、粒子は右手系と左手系のヘリシティを持つことができることも言いましたし、また粒子は左手系と右手系のカイラリティを持つこともできることも言いました。上に述べたように、無質量粒子に対してカイラリティとヘリシティは同じです。無質量左手系カイラリティを持つ粒子は、左手系のヘリシティも持ちます。

しかしながら、質量のある粒子は、特別なカイラリティを持っています。質量のある左**カイラル**粒子は左手系のヘリシティか、もしくは右手系のヘリシティを持っているかもしれません。それは粒子に対しての座標系のとりかたに依存します。全ての座標系で、(左手系のカイラリティの)粒子はどのようなヘリシティを取ろうと、左**カイラル**のままでしょう。

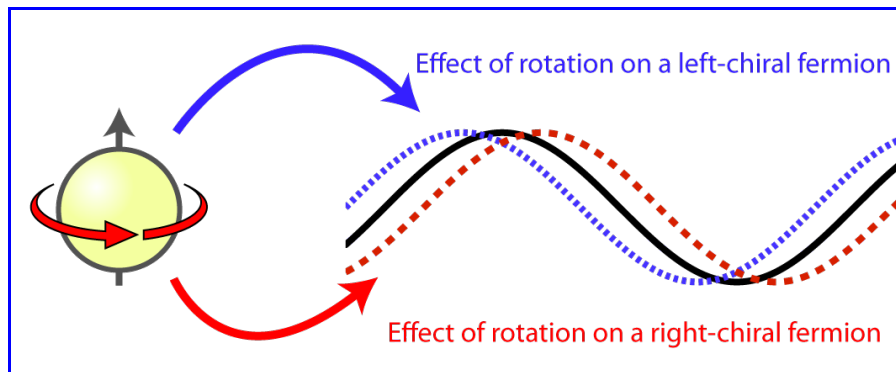
不幸にも、カイラリティは少し、定義がトリッキーです。それは**量子力学**の意味で、(カイラリティは)本質的に、粒子は左手系もしくは右手系です。今、フェルミオンに話の焦点を合わせましょう、それは**スピンが  $1/2$** です。これはもし電子の周りを  $360$  度回ると、同じ量子力学的状態を得ることができないことを思い出してください: 同じ状態のマイナス符号のついたものと得ます! このマイナス符号は、**量子干渉**に関係しています。フェルミオンの**カイラリティ**は、複素数のことばでこのマイナス符号を得る方法を教えてくれます:

※ 量子干渉は、2009 年の F. Tanedo さんの記事「The double slit experiment: summing over paths」にリンクされています。この中で、英語版 wikipedia の「[Double-slit experiment](#)」が参照されています。ここでは、wikipedia 日本語版の「[二重スリット実験](#)」を指しています。



その移動方向に対して  $360$  度回転するとき、左カイラルに回転しているときと、右カイラルに回転している時に何が起きるか、双方とも  $-1$  を得ますが、左カイラルフェルミオンは複素平面をある方向で回るのに対し、右カイラルフェルミオンは別の道を通ります。図の右側の円は、粒子の量子状態の複素フェーズを表しています; 粒子が回転するに従い、フェーズの値は円に従い変化します。 $360$  度回転させることは、フェルミオンのカイラリティにより決められた方向に円の半分を周ることを意味します。

この**物理的な意味**は、粒子の波動関数のフェーズです。フェルミオンを回転させるとき、その量子波動関数はフェルミオンのカイラリティに従い、シフトします:



フェルミオンの回転はその量子波動関数をシフトします。左手系と右手系のカイラリティを持つフェルミオンは反対の方向へシフトします。これは純粋に量子力学的現象です。

私たちは、この量子力学的フェーズシフトについてさほど困る必要はありません。重要な点は、粒子の本質的な量子的性質に「深い」方法で、**カイラリティ**が関連していることです。以下に見るように、このカイラリティの知識は、質量を導入したときに劇的な効果を発揮します。

いくつかの技術的な注意事項：前の2つのセクションの中で述べた広いプロセスは、群論のことばで理解することができます。主張したいことは、質量がある粒子と質量をもたない粒子は、Poincaré 群の異なる[ユニタリな]表現です。フェルミオンのカイラリティの考え方は、Poincaré 群のスピンの1/2の表現の2つのタイプを表しています。上の議論の中で、私はz-軸についての回転の効果を見ることで相違点を説明しようとした、これは $\pm\sigma^3/2$ により生成されます。

※ Poincaré 群 英語版 wikipedia は「Poincaré group」という項目で、日本語版は「[Lie 代数](#)」という項目で、下記の内容です。

ポアンカレ代数とはポアンカレ群の[リー代数](#)で、次の交換関係をみます。

- $[P_\mu, P_\nu] = 0$
- $[M_{\mu\nu}, P_\rho] = -i(\eta_{\mu\rho}P_\nu - \eta_{\nu\rho}P_\mu)$
- $[M_{\mu\nu}, M_{\rho\sigma}] = -i(\eta_{\mu\rho}M_{\nu\sigma} - \eta_{\nu\rho}M_{\mu\sigma} - \eta_{\mu\sigma}M_{\nu\rho} + \eta_{\nu\sigma}M_{\mu\rho})$

ここで、P は[並進の生成子\(運動量\)](#)で、M は[ローレンツ変換の生成子\(角運動量\)](#)である。η はミンコフスキー空間の[計量](#)である。

※ ユニタリ表現 英語版 wikipedia は「[Unitary Representation](#)」です。日本語版は、「Lie 群」などの項目へまたがって記載があります。日本語の教科書はよいものがたくさん出ていますので、そちらを参照ください。たとえば、小林俊之先生の岩波書店の教科書「リー群と表現論」など。

この元となるメッセージは、異なる**カイラリティ**を持つ粒子は、実際に異なる粒子であることです。左手系の**ヘリシティ**を持つ粒子があるとすれば、右手系のヘリシティを持つ粒子のバージョンもある必要があることを知っています。しかし他方で、左手系の**カイラリティ**を持つ粒子は、右手系のカイラリティを持つことはないはずで、(しかし、いずれにせよ両方のヘリシティで満たされること

も確かでしょう。)これの前で待たねばなりません。何故ならば、このことは実際 Higgs のマジックが標準モデルの中で示されるときだからです。

## カイラリティの理論 Chiral theories

標準モデルのおかしな内容の一つは、**カイラリティの理論**にあります、それは左カイラリティと右カイラリティの粒子は異なる振る舞いをするを意味します。特に **W ボゾン**は**左手系のカイラリティを持つフェルミオンとのみ相互作用し、右手系のフェルミオンとの相互作用を拒否**します。ここでしばらく立ち止まり、このことを考えてみるべきです：自然は左手系と右手系の粒子たちの差異を判別しているのです！（もちろん、生物学では既に、[アミノ酸の'カイラリティ'](#)以来、このことはありふれた話です。）[自然は左手系と右手系のヘリシティをもつ粒子の観点からは未だに対称性を持っていることに注意してください。]

※ W ボゾンは左手系のカイラリティを持つフェルミオンとのみ相互作用する、右手系のフェルミオンとは相互作用しません

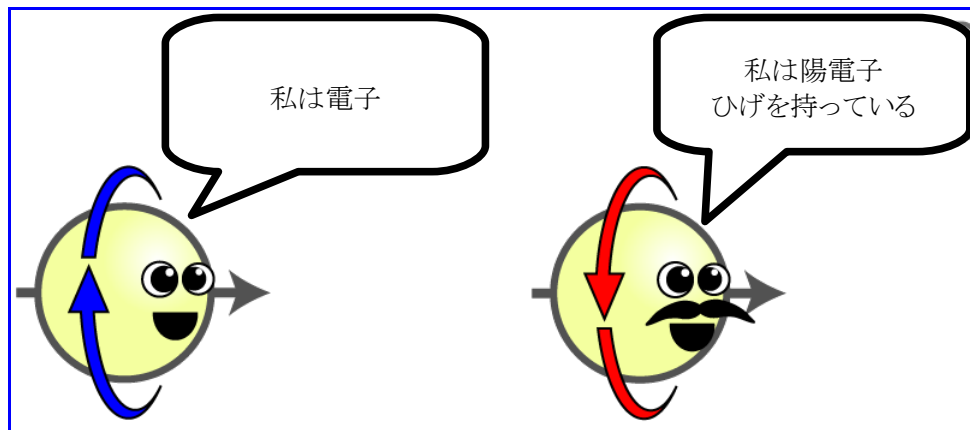
※ 「アミノ酸のカイラリティ」は、英語版は「[Cheirality\(Chemistry\)](#)」にリンクされています。日本語版は、「[キラリティー](#)」に相当しますが、分子のカイラリティで化学的な話が少し記載されています。

**技術的な注意事項:**カイラリティとヘリシティの差異は、最初に場の理論を勉強しようとするときに、非常に微妙な点の一つです。数学的な相違点は、ヘリシティとカイラリティの作用素の形の違いを見ることで理解できます。直感的には、ヘリシティは直接計測することができるもので(角運動量を見ることにより)、一方、カイラリティは Lorentz 群の下の変換に関連しています(つまり、回転の下での量子力学的なフェーズです)。

※ Lorentz 群は、日本語 wikipedia は、「[Lorentz 変換](#)」という項目があります。

実際に元の位置へ戻すために、2つの粒子を再度紹介させてください：電子と陽電子です。既にご存知でしょうが、陽電子は電子の反粒子です、、、しかし、今はあなたがこれを知らないことにします。電子は左手系ですが、陽電子は右手系です。それらは、2つの完全に異なる粒子です。



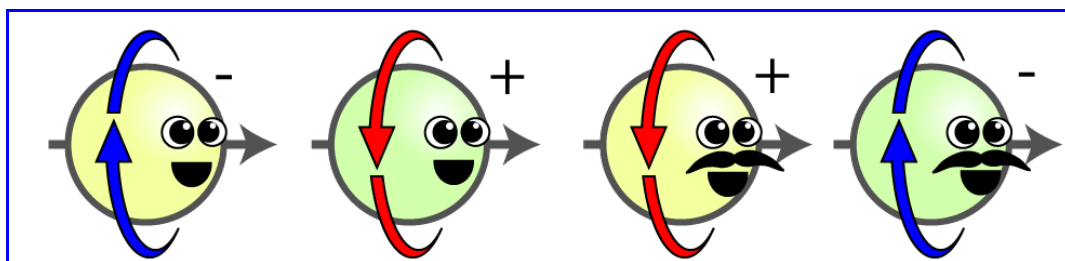


電子(左手系のカイラリティ)と陽電子(右手系のカイラリティ)は、2つの全く異なる粒子です、陽電子は口ひげを早しています。

これらの粒子はどのくらい異なるのでしょうか？うーんそうですね、電子は電荷-1を持っていて、陽電子は電荷は+1を持っています。さらに、**電子は  $W$  ボゾンを通してニュートリノと結合することができますが、一方、陽電子はできません。** 何故  $W$  ボゾンのみが(左手系のカイラリティの)電子とのみ相互作用をすることができるのでしょうか？これはまさに標準モデルが構成された方法です：左手系の電子は弱い力の下で電荷を帯びていて、右手系のカイラリティの陽電子は帯びていません。

※ 電子は  $W$  ボゾンを通してニュートリノと結合することができます。陽電子は右手系ですので、電子と  $W$  ボゾンを通して結合することができません。

ここでは、これらの粒子は無質量であることを前提としましょう。すると、これらのカイラリティはヘリシティの言っていることと同じことになります。さらに、このステージでは、電子は自分の反粒子(つまり「反電子」)は右手系のカイラリティを持っていて、 $W$  ボゾンと結合します。陽電子も別の反粒子(つまり、「反陽電子」)を持っていて、これは左手系のカイラリティを持っていますが、 $W$  ボゾンとは結合しません。ですから、全体では4つの粒子を得たこととなります(プラス4つの反対のヘリシティをもった)：



電子、反電子、陽電子、反陽電子です(反粒子は、薄い緑色で描きました)。

**技術的な注意事項:** 左手系と右手系のヘリシティの電子と左手系と右手系のヘリシティの反陽電子は、普通に(質量をもった)電子と呼んでいる対象の4つ

の **Dirac スピノル** の成分です。同様に、左手系と右手系のヘリシティをもった反電子と左手系と右手系のヘリシティをもった陽電子の普通の意味の(質量をもった)陽電子の Dirac スピノルの成分です。

※ 「Dirac スピノル」は、日本語版 wikipedia「[ディラックスピノル](#)」の項目を参照下さい。

**重要なまとめ:** [6/20/11: ある混乱と動揺を持っているこのセクションに追加します: [CV の David と James](#) と Steve にお礼を言います。] 私たちは、普通の命名規則を学術的な理由で変更しています ---- 「電子」と「陽電子」(そしてそれらの反パートナー)と呼んでいるものは、「物理的」電子、いわば、水素原子の中の電子ではありません。私たちは以下に見るように、どのようにしてこれら 2 つの考え方を結合させるかでしょう。このように、重要な点は、**4 つ**の異なる粒子があるという点です:

※ Cosmic Variance で議論があります。CV の David と James は、そのサイトのコメントの議論。

1. **電子:** 左手系カイラル、電荷 -1、W ボゾンと相互作用できる
2. **反電子:** 右手系カイラル、電荷 +1、W ボゾンと相互作用できる
3. **陽電子:** 右手系カイラル、電荷 +1、W ボゾンと相互作用できない
4. **反陽電子:** 左手系カイラル、電荷 -1、W ボゾンと相互作用できない

私たちは「電子」と「陽電子」という名前を使い、W ボゾンと結合すると結合しないかの区別をしています。素粒子物理学の伝統的な言葉では、これらを左手系の(カイラリティの)電子と呼び、右手系の(カイラリティの)電子と呼びます。しかし、私はこれらは互いにパリティ(空間反転、角運動量の反転)により互に関連していないことを強調するために異なる記法を使いたかったのです。

※ この「陽」ということの意味は、W ボゾンと相互作用するか否か、反は右手系か左手系かということで反対の意味であり、伝統的な使い方とは異なっています。

※ 「Cosmic Variance の David と James」は、素粒子物理専門のブログで、「[Chirality and the Positron's Mustache](#)」というタイトルで、F.Tanedo さんのこの記事を取っています。『カイラリティと陽電子の髭』というタイトルです。

※ この□で囲まれた部分は、コメントに指摘の後、追記されています。

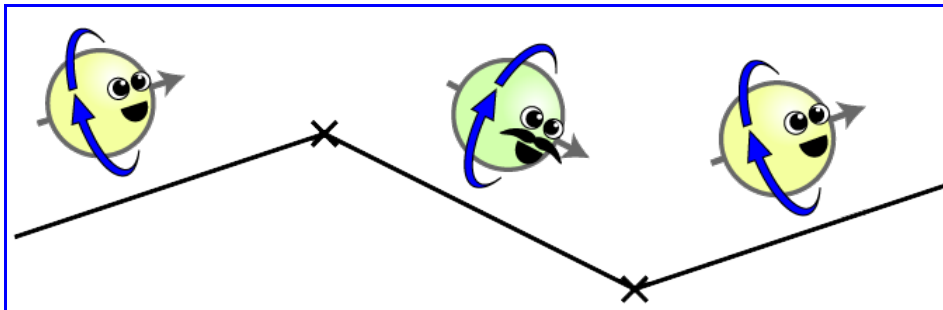
## 混合した異なる粒子の質量(Masses mix different particles!)

さて、ここで魔法のようなステップがあります: 質量は、異なる粒子を互いに「混合」することを引き起こします。

[「Higgs ボゾンの真空期待値\(vev\)」に対して励起されている粒子](#)として質量を理解することができます、と説明したことを思い出してください。 [Higgs 真空期待値](#)で相互作用する粒子と表現する Feynman 図形のフェルミオンの線の交叉を描きます、そこでは、各々の交叉は実際は消されてしまった Higgs の線です。どのような粒子がこれらの図形に現れるのかを示して見ましょう:

※ 「Higgs ボゾンの真空期待値(vev)に対して励起している粒子」は、「Higgs からの質量の図形的なヒント」を参照下さい。

※ 「Higgs 真空期待値」は、「Higgs と真空: やったぜ「真空期待値」」を参照下さい

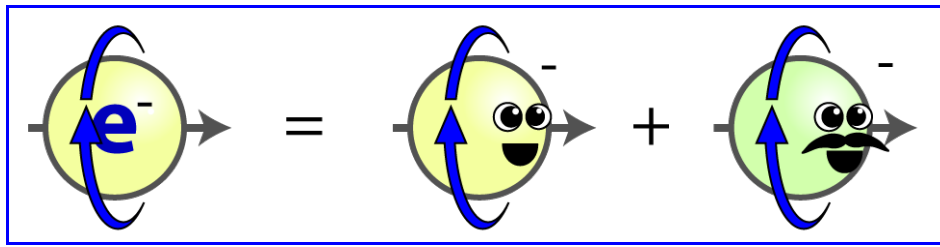


空間の中を伝播し、Higgs 場と相互作用する「電子」です。注意すべきことは、Higgs により引き起こされた質量項は、反陽電子と電子を結びつける点です。これは、2つのタイプの粒子が量子混合していることを示していることを意味します。

これは非常に重要なことです; 2つの完全に異なる粒子(電子と反陽電子)が、互いに入れ替わるのです。これは何を意味するのでしょうか? 空間を通して伝播する物理的なことは2つの粒子の**混合(mixture)**です。ある点で粒子を観測したときに、それは電子かもしれませんが、一瞬後には、全く同じような粒子であるかもしれませんが、反陽電子であるかもしれないのです! これは非常にありふれたことに聞こえて、それはまさに[ニュートリノ混合](#)(あるいは、同様にメソンの混合)と同じストーリーです。

※ 「ニュートリノ混合」は、日本語版 wikipedia の「[ニュートリノ](#)」を参照し、他を検索下さい。

この伝播する粒子のことを「**物理的電子**」と呼ぶことにしましょう。質量をベースとした電子は、それを観測したときには、電子でもあり、反陽電子でもあるのです; 両者の量子的な混合です。Wボゾンだけが、電子の成分を通して「物理的電子」と相互作用し、反陽電子の成分とは相互作用しません。同様に、「**物理的陽電子**」を定義することが出来て、それは陽電子と反電子の混合です。さて、少し言葉を明確化する必要があります。人々が普通に電子というときには、質量をベースとする電子は何を意味するのでしょうか? あるいは、Wボゾンと相互作用しない電子は何でしょうか? この最も簡単には、次の図のようになります:



この「物理的電子」(多くの人々の「電子」と呼ぶ時に意味しているもの)は電子と反陽電子の組み合わせです。電子と反陽電子は異なる相互作用(つまり、電子は W ボゾンと相互作用することができます)をすることに注意してください;物理的電子は、両者の粒子の相互作用を引き継いでいます。

※ このセンテンスは、上の図の説明です。

「物理的な電子」と「物理的な陽電子」は互いに反粒子ですとすることができることに注意してください。これは、物理的な電子へと出来上がることで結合した 2 つの粒子ですから、物理的陽電子を結合して作り上げる 2 つの粒子の反粒子であることは明らかです。さらに、上の全ての議論では、電子と陽電子を任意の標準モデルの他の物質粒子に置き換えても成り立つことを、時間をかけて注意してください(ただし、以下に見るように、ニュートリノは除きます)。【電子と陽電子はハンディな例です。なぜならば、陽電子は、言葉があいまいかもしれませんが、反電子に以外にも名前を持っています。】

**技術的な注意事項:**素粒子物理学の用語と合わせるために:

- 「電子」(W ボゾンと相互作用する)は  $e_L$  と呼ばれます、あるいは左カイラルな電子と呼ばれます
- 「反陽電子」(W ボゾンと相互作用をしません)は  $e_R$  と呼ばれ(しばしば  $e_R^c$  とか  $e_R\text{-bar}$  とかとも書きます)、右カイラルな電子です
- 「物理的電子」は普通に呼ばれている電子で、 $e$  と書き、質量とベースとする電子とも言われます

フレーバ混合という類似も文字通りに取り上げるべきでしょう。これらは異なる粒子で、異なるフレーバは異なる粒子の間で移り合う方法と同じに、互いに移り合うことができます。しかし、注意せねばならないことは、混合角はいつも 45 度であることです。また、「物理的電子」は今は電子と反陽電子として物理的自由度を倍持っていることにも注意します。これはまさに、Dirac 質量が 2 つの 2-Weyl スピノルの成分を 4 つの Dirac スピノルの成分に結合した観察です。

最初に場の量子論を学ぶ時に、普通はこれらの詳細の全てに渡り、書き込みをします。何故ならば、全てのフェルミオンが Dirac スピノルであり、全ての質

量がプロパゲータと再加算となるような質量ベースとする中での直接作用だからです。しかしながら、標準モデルのカイラルな構造は、基礎となっている理論の2つの[カイラルな]Weylスピノルの項で書かれていて、HiggsがDiracスピノルへの混合を導入します。これらのための、殺人的に詳細な2つの成分の定式化を学びたい場合は、私は最近の [Dreiner, Haber と Martin によるレビュー](#) を強く勧めます。

※ 「Martin によるレビュー」は [arxiv:0812.1594v5](#) を指しています。

”Two-component spinor techniques and Feynman rules for quantum field theory and supersymmetry”

[Herbi K. Dreiner](#), [Howard E. Haber](#), [Stephen P. Martin](#)

## これ全てを Higgs とせねばならないものとは何か (What this all has to do with the Higgs)

※ この章が結論です。

今、質量が異なるタイプの間の混合に反応する質量について学びました。質量項は、2つの**前提**的な粒子(電子と反陽電子)を結合させ、一つの粒子(物理的電子)を形成します。[まさに非常に[古いポスト](#)で私は、同じアイデアを述べようとしていました ---- 私の考えでは、うまくいきませんでした。] そのくだらない長話をした理由は、通常、2つの関連をもたない粒子は互いに混合されることは**好みません**と言いたかったからです。

※ 「古いポスト」は、前の小冊子『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p79 の「物理の対称性、Pt2 : 離散対称性と反物質」を参照ください。

この理由は、同じ量子的な性質を持つときだけ、粒子は混合可能なのです。例えば、電子と反陽電子は両方とも、電氣的電荷は(-1)で同じことに注意しましょう。電子と反電子は、それらが異なる電荷を持つので、混合することができないのかもしれませんが。しかしながら、電子は W ボゾンと結合するので、弱い電荷を持っています。一方、反陽電子は弱い電荷をもたないのです。このようにして、これらの2つの粒子は混合しないはずで、大言壮語すると、この質量項は「ゲージ不変性」によって禁止されているといってもよいかもしれませんが。ここで「ゲージ」という言葉は、ゲージボゾンとしての W ボゾンを想定しています。これがカイラル理論である標準モデルの結果です。

ありそうにもない混合が可能である理由は、[Higgs 真空期待値](#)のおかげなのです。Higgs は弱い電荷をもっています。Higgs が真空期待値を得るときには、それは弱い電荷の保存則を「破り」、異なる弱い電荷を持っているにもかかわらず、電子を反陽電子と混合することを可能とします。あるいは、言い換えると、Higgs の真空期待値は、電子と反陽電子の間の弱い電荷の違いを「吸収」します。

※ 「Higgs 真空期待値」は、本冊子の「Higgs と真空: やったぜ「真空期待値」」を参照下さい。

それで、Higgs ボゾンのミステリはまだ続きます。最初に言わねばならないことは、Higgs は何かの方法で粒子に質量を与えます。それから、それらの質量は、Higgs 真空期待値により生成されること

も言わねばなりません. このポストでは、質量が実際に何であるかを遠まわりに説明し、Higgs の真空期待値がこの質量を可能とすることが、何故必要なのかを取り上げました. 次のステップは、結局、どのようにしてこの Higgs が真空期待値を獲得することになるのか、それが弱い電荷を「破る」ことは何を意味するかを突き止めることです. この現象は、**電弱対称性の破れ**と言い、標準理論を超える新しい物理の理論の最初の動機の一つです.

## 付録: Majorana 質量

よろしい、これは主要な議論から外れることですが、これも触れる必要を感じます. 上で説明したフェルミオン質量の種類は、**Dirac 質量**と呼ばれます. これは 2 つの異なる粒子 (電子と反陽電子) を結合させるタイプの質量です. 同じ種類の 2 つの粒子を結合させる質量を取ることも可能で、**Majorana 質量**と呼ばれます. この質量のタイプは、異なるタイプの電荷をもった粒子では禁止されています. 例えば、電子と反電子は混合しません、何故ならば、上で議論したように、それらは反対の電荷を持っているからです. しかしながら、そこには任意の電荷を運ばない標準モデルの物質粒子の一種があります: ニュートリノです! (ニュートリノは弱い電荷を持っていますが、Higgs の真空期待値により、吸収されることはありません.)

標準モデルの中では、Majorana 質量はニュートリノに特別です. それらは、ニュートリノを反ニュートリノと混合して、「物理的ニュートリノ」はそれ自身の反粒子でもあります. (夢のような言葉を使うと、ニュートリノは Majorana フェルミオンで、もしくは Dirac スピノルであるというより Weyl スピノルで記述されます.) ニュートリノは、Majorana 質量も Dirac 質量も双方持つことが可能でもあります. (後者(Dirac 質量)は「口ひげ」をはやしたニュートリノが、陽電子の役目を果たすために要求されるのではないのでしょうか.) これは、興味深い結論を導出するかもしれません. 上記で示唆したように、Dirac 質量は Higgs のおかげで、弱い電荷の非保存に関連しています. したがって Dirac 質量は典型的には「小さい」のです. (自然は保存側が維持されないときにはこのことを好まないのです.) Majorana 質量は、一方で、いかなる電荷の非保存も引き起こしませんので、任意に大きくなることができます. 2 つの質量の間の「シーソー」は、何故、ニュートリノが、他の標準モデルのフェルミオンたちによりも、何故そんなに軽いのかを自然に説明します. にもかかわらず、しばらくは、これは現在の実験のレンジの範囲外での予想です.

## スピノル場のラグランジアン (日本語版 Wikipedia の Dirac 質量、Majorana 質量について「場の量子論」から)

ワイル場  $\psi(x)$  の運動項は

$$\mathcal{L}_{\text{Kin}} = i\bar{\psi}\sigma^\mu\partial_\mu\psi$$

( $\sigma$  は 4 次元の [パウリ行列](#)) である. くりこみ可能性を課せば、 $\psi$  の 2 次の項までしか現れず、ポテンシャル項は

$$V(\psi) = m_M\bar{\psi}\psi + \text{h.c.}$$

となる. この  $m_M$  は [マヨラナ質量](#) と呼ばれる.

もう 1 つのワイル場  $\chi$  が存在し、[ディラック場](#)

$$\psi_D = \begin{pmatrix} \psi \\ \bar{\chi} \end{pmatrix}$$

となる場合は、運動項は

$$i\bar{\psi}_D \gamma^\mu \partial_\mu \psi_D = i\bar{\psi} \bar{\sigma}^\mu \partial_\mu \psi + i\chi \sigma^\mu \partial_\mu \bar{\chi}$$

となり、ポテンシャル項は

$$m_D \bar{\psi}_D \psi_D = m_D (\chi \psi + \bar{\psi} \bar{\chi})$$

とすることができる. この  $m_D$  は [ディラック質量](#) と呼ばれる.

マヨラナ質量項がある場合はフェルミオン数が保存せず、ディラック質量項の場合はフェルミオン数が保存する. 単に質量と言うと多くの場合はディラック質量を指す.

スカラー場  $\phi$  とディラック場  $\psi$  が存在する場合、くりこみ可能性を課すと、

$$-\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = y \bar{\psi} \psi \phi$$

この形の相互作用項を [湯川相互作用](#) 項と呼ぶ.

## コメントで紹介されている重要なこと

**1**、一つは、直接のサイトへのコメントの中にも発言が見られるのであるが、”(左カイラルな)電子と(右カイラルな)反電子は、Wボゾンと相互作用をするが、(右カイラルな)陽電子と(左カイラルな)反陽電子とはWボゾンは相互作用しない”ということをめぐる議論であり、この点が分かりづらいというものです。

*Björn says:* [June 20, 2011 at 4:29 am](#)

「特に、Wボゾンは左カイラルなフェルミオンと相互作用するだけで、右カイラルなフェルミオンとは相互作用しません」

「そこで、これらの粒子が無質量であることを前提としましょう。するとこれらのカイラリティは、ヘリシティ状態と同一視できます。さらにこのステージでは、電子は、自分自身の反粒子(「反電子」)を持っていて、それは右カイラルな粒子でWボゾンと相互作用します。陽電子は、別な反粒子で(反陽電子)左カイラルですが、Wボゾンと相互作用をしません。私たちは全部で4つの粒子(プラス反対のヘリシティをもった4つ)を得たことになります」

とありますが、私は、このステートメント、Wボゾンは左カイラルな粒子とは相互作用するが、右カイラルな粒子の反電子とは相互作用しないということが理解できていません。どう考えたらよいのでしょうか。そして、なぜそれは左カイラルな粒子である反陽電子と相互作用しないのでしょうか？

*Flip Tanedo says:* [June 20, 2011 at 7:28 am](#)

Hi Bjorn、他にもこのステートメントについて把握されている人がいること、わかっています 😊

正しいステートメントは、”W ボゾンと電子、もしくは反電子と相互作用しますが、陽電子と反陽電子とは相互作用しません”です。

元々、私は、意図したこの行は、W ボゾンは左カイラルなフェルミオン(電子を意図してます)であり、従って、右カイラルな反フェルミオン(反電子)です。しかし私はそのように多くは言わなかったもので、混乱を招いたのかもしれませんが。

この標準モデルのカイラルな性質は、W ボゾンは電子と相互作用するが、陽電子とは相互作用しないです。私たちの理論の物質-反物質の対称性は、反電子も W ボゾンと相互作用をすることに対し、一方では反陽電子は相互作用しないことを、要求します。(宇宙は、物質-反物質対称性とはなっていません、これは量子的揺らぎによるようです ---- しかしこれは微妙なトピックです)

※ 私が数あるコメントの中から重要と思われるものを取り出しました。



## The Birds and the Bs

### 鳥(Birds)たちと蜂(B)たち (ペンギン機構と B メソン)

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Flip Tanedo | USLHC | USA Sunday, Friday, July 22nd, 2011 at 6:06 pm

昨日、注目されている [EPS-HEP 2011](#) の高エネルギー物理のコンファレンスが始まりました。特に LHC で現在、(データ収集が加速されていて)十分なルミノシティでの実験が行われてきており、新しい物理のヒントが出始めています。Ken Bloom さんが指摘しているように、Tevatron の新しい  $B_s \rightarrow \mu\mu$  崩壊比率の新しい下限値が、来るべきものの先駆者のように思われます(専門家は[公式論文](#)、[CDF](#)の公開ページと、Tommaso Dorigo さんと Jester さんの優れたサマリーを参照下さい。)

※ 「EPS-HEP-2011」は、2011 年 7 月 20-27 日に開催された Europhysics Conference On High Energy Physics を指しています。

※ 「Ken Bloom さんが指摘しているように」は、2011 年 7 月 13 日の Ken Bloom さんの Quantum-Diaries の記事をさしています。"Summer conference preview: Is it Bs?"

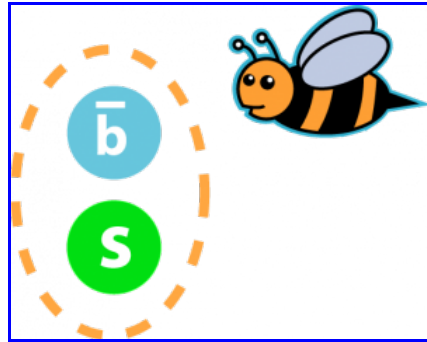
※ 「公式論文」は、[arXiv:1107.2304v1](#) "Search for  $B_s \rightarrow \mu+\mu-$  and  $B_d \rightarrow \mu+\mu-$  Decays with CDF II"を指しています。

少し不幸にも、[このプロセスの LHCb の最初の結果](#)は、それらは未だに食い違っていますが、CDF の隆起を確認できていません。この特別な結果を奥深く詮索する代わりに、私は何故新しい物理を探すのに、これらに興味を持つのかを方向付けるバックグラウンドを述べたいと思います。この記事は、『鳥(Birds)たちと蜂(Bs)』と題しています、---- もちろん、これにより私は B メソンといわゆる「ペンギン図形」を意図しています。

※ 「このプロセスの LHCb の最初の結果」は、[CERN のサイト](#)にリンクしています。

※ クォークによって構成される複合粒子の総称。六種類のクォークおよびそれらの反粒子、あるいはエネルギーの共鳴状態の組み合わせによって、非常に多くのハドロンが存在します。その大部分は天然には存在せず、主に加速器によって人工的に作り出されます。ハドロンは、グルーオンを媒介として強い相互作用をすることが特徴です。さらに、陽子や中性子などのフェルミオンをバリオン(重粒子)、パイ中間子などのボソンをメソン(中間子)と分類することがあります。バリオンは3個のクォークから構成され、メソンは1個のクォークと1個の反クォークから構成されると考えられています。

**Bs メソン:これが何故特別なのでしょうか**



私は、これが恐ろしいダジャレであることを知っています。

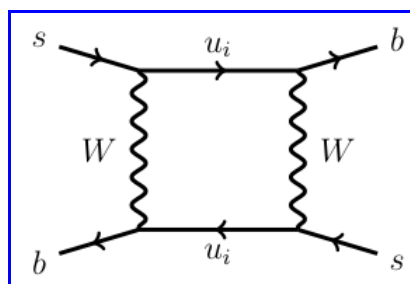
$B_s$  メソンは、ボトムクォークとストレンジクォークのバウンド状態です:クォークの分子のようなものです. 全ての種類のメソンは、異なるクォークと反クォークが互いに突き刺さったようになっていますが、 $B_s$  メソンとその軽い仲間の  $B_d$  メソンは、全ての可能なメソンのスペクトルの中で、特に興味のある特性を持っています。

理由は、 $B_s$  も  $B_d$  も両方とも中性の粒子で、それらがメカニズムとして反粒子と量子混合することが判明しています. これを  $B_s$  と  $B_d$  と呼ぶことにします. この混合は、フレーバ現象と同じ種類のもので、[“Neapolitan”ニュートリノ](#)を述べた時に言いましたし、[質量をもったフェルミオンのカイラリティの混合](#)とも似ています. “bottom-ness”あるいは “strangeness”のような性質は、フレーバとみななされます.  $B_s$  から  $B_d$  への変換は、「ボトムクォークの数」を「-1 から +1 へ」と変化させ、「ストレンジクォークの数」を +1 から -1 へ変化させますので、効果はフレーバの変化を引き起こすことになります。

※ 「Neapolitan ニュートリノ」は、F.Tanedo さんの 2010 年 8 月に掲載された”[Solar neutrinos, astronaut ice cream, and flavor physics](#)”というタイトルの記事にリンクされています。

※ 「質量をもったフェルミオンのカイラリティの混合」は、本小冊子の「ヘリシティ、カイラリティ、質量、Higgs」へリンクしています。

このこと理解のために、量子混合をエンコードした例があります：



$u_i$  はアップタイプのクォークと考えて下さい。

任意の中性のメソンは混合して ---- もしくは「振動して」---- 反粒子となることができですが、しかし  $B$  メソンは寿命がありますので、特別です. メソンは不安定で崩壊することを思いだして下さい. するとニュートリノとは違い、もしそれらが振動して、興味あるものにも変わるとしても、しばらく間それを知るために待つことができません. あるメソンは長く生きて、それらの振動現象は、観察する以前に「流れ」てしまいます. 他のメソンはそれほど長く生きずに、完全に振動する機会を得る前に崩壊

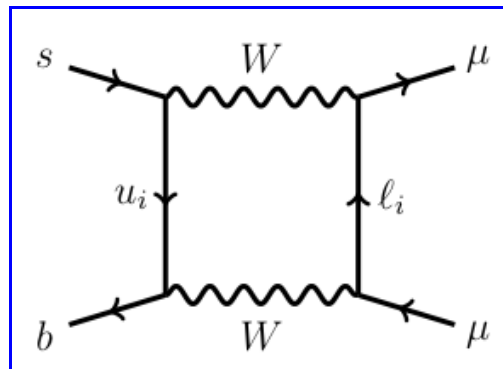
してしまいます。しかし、 $B$  メソンは ---- なんと素晴らしいことに Goldilocks  $B$  メソンは、---- 寿命を持っていて、振動する時間はおよそ同じ大きさです。これは、これら ( $B$  メソン) の崩壊と相対的な崩壊比率をを計測することにより、メソンの混合がどのようになされるかについて、すなわち、標準モデルの基礎となっているフレーバの構造について学ぶことができることを意味します。

**歴史的な留意事項:**  $B_d$  メソンは別な理由で特別です: 一方、むしろ同じように、生成することができます。理由は、 $B_d$  メソンの質量はまさにウプシロン 4S 粒子  $\Upsilon(4S)$  の質量の半分以下となるからです。それらはまさに、 $B_d$ - $B_d$  ペアへと崩壊します。このように、**共鳴**の力により、電子と陽電子を衝突させ、多くのウプシロンを生成することができます。過去 10 年間で、フレーバ物理は「 $B$  ファクトリ」の周囲に注力してきました、主要には SLAC と日本の Belle の BaBar 検出器です。BaBar が退役して以来、Belle は“Super Belle”へとアップグレードされました。しばらくの間、現在、 $B$  (メソン) の物理の牽引車は LHCb となります。

※ 「共鳴」は、その 1 の『Feynman 図形と標準モデルシリーズ』の p26 「Z ボゾンと共鳴」を参照ください。

## CDF と LHCb の結果は: $B_s \rightarrow \mu \mu$

メソンの混合を考えなくとも面白いフレーバ変換効果があります。というより、むしろ  $B$  メソン自身の崩壊の中にあることが判明しています。たとえば、前に掲げた図を変更して、 $B_s$  メソンのミューオン/反ミューオンへの崩壊を考えることができます:



strangeness(+1)と bottom-ness (-1)が保存されないので、これは既にフレーバが変化する崩壊となっています;しかし、ミューオン/反ミューオンのペアは、ミューオン数のネットを持っていないので、レプトンフレーバが保存されることに注意します。(練習問題として:他の図で寄与する図形を描いてください;トリックは、W ボゾンによりフレーバを変化させる必要があります。)電子もしくはタウ粒子によってミューオンを置き換えてもよいかもしれませんが、これらは実験的には検出がより難しくなります。主要なルールとして、ミューオンは実際、検出器を通る時の道全てを検出でき、運動量の測定のため、より少ないショットで行うことができますので、粒子の終了状態がうまく行く性質を持っているといえます。

この崩壊は、極めてであることが分かります。 $B_s$  メソンにとって、標準モデルは二重のニューオンの分岐比率はおおよそ  $3 \times 10^{-9}$  であることを予言していて、このことは  $B_s$  が 2 つのミューオンへと崩壊

することは、単位時間当たりたった 0.0000003%であり、明らかに、正確な計測のためには、一つの比率を出すことに、多くの B メソンを生成する必要があります。

事実、最近まで、真の 2 重のミューオンの崩壊比率を見積もるために、観測できる十分な B メソンの崩壊を、容易に生成することができませんでした。過去 10 年の「B ファクトリ」は、この比率の上の限界をとることが可能ただけでした。実際、この崩壊は、LHCb の主要な動機の一つで、標準モデルの崩壊比率を探索するに十分な感度を持っていると考えられる最初の実験装置として設計されました。(これは、少なくとも標準モデルの崩壊比率であれば、LHCb で観察できるという感度です。)

[先週末の CDF からのエキサイティングなニュース](#)は、---- 一番最初のニュースですが ---- それらは  $B_s$  メソンの二重ミューオンの崩壊比率の下の限界の確定が可能であることを示しています。(  $B_d$  メソンは、より小さな崩壊比率をもっているので、CDF では下限の確定ができませんでした。) 下限は、いまだ統計的には、標準モデルと整合性を持っていますが、示唆された(「中心の値は」)  $1.8 \times 10^{-8}$  です。これが正しいとすると、標準モデルを超える新しい物理の非常に強い兆候でしょう。CDF からは、90%の信頼性レベルでは:

$$4.6 \times 10^{-9} < \text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 3.9 \times 10^{-8}.$$

不幸にも、今日現在は、LHCb からの新しい結果は、90%の信頼性をもつ下限を確定するであろう隆起が検出されていません、

$$\text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 1.3 \times 10^{-8}.$$

2010 年のデータを含めると  $1.2 \times 10^{-8}$  まで落とすことができます。限界はまだ他の別ものようではないですが、多くの人々が LHCb は二重のミューオンのイベントの CDF の隆起を確定することができるのではないかと期待しています。2 つの実験装置の分析は、極めて同じように見えますので、異なる実験装置により、異なった結果が得られるような非常に大きな動きのある余地はありません。

※ 「先週末の CDF からのエキサイティングなニュース」は、["Search for  \$B\_s \rightarrow \mu^+ \mu^-\$  and  \$B\_d \rightarrow \mu^+ \mu^-\$  Decays at CDF II"](#)へリンクされています。

さらに状況を評価するデータがでてくるでしょう; LHCb は標準モデルの予言する  $3 \times 10^{-9}$  を下回る分岐比率を探索するに十分なデータの蓄積があるでしょう。不幸にも CDF は感度が届かないでしょう。

## ループ内の新しい物理

さて、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  の実験の状況が変わりましたので、何故、それが理論的な観点から興味深いのかを描き出してみたいのです。上の「箱」[Feynman 図形](#) から注意することの一つは、それらが閉じたドループを持っていることです。Feynman 図形の閉じたループの面白いところは、ナイーブに期待するよりも、非常に高いエネルギーでも物理的に探索できることです。

※ 「Feynman 図形」は、その 1 の『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の Feynman 図形のシリーズを参照ください。

この理由は、ループを走る粒子が、外部の粒子の運動量の項のようにある決まった運動量を持たないからです。各々の粒子のラインに運動量(それらを  $p_1, p_2, \dots$ , などと呼びます)を割り当て(普通の Feynman 規則に従って)、各々の頂点で運動量の保存法則を適用します。すると、拘束された運動量で、ループを回るものが得られます。この運動量が特定できないので、量子物理の法則では、可能な運動量の全ての寄与を足し合わせねばなりません。このようにして、たとえ  $B_s$  メソンの質量がおおよそ 5 GeV であっても、二重ミュオンの崩壊は、百倍も重い粒子に対して反応することが判明します。

その粒子を直接生成し、崩壊を観察することで、新しい物理を研究することができる他のプロセスとは違い、低いエネルギーのループ図形では、仮想的な効果(量子的な干渉)を通して新しい物理の出現を通し、(新しい物理を)理解可能なことに注意します。詳細は別の機会にするつもりですが、しかし以下に、現在想定できるいくつかの事実を挙げます：

1. ループ図形は、量子的な干渉を通して、新しい重い粒子に反応することが可能です。
2. ループ図形を通して生成されただけのプロセスは、しばしば省略されます。(この一つの理由は、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  の標準モデルの分岐比率が非常に小さいためです。)
3. 標準モデルでは、全てのフレーバを変化させる中性カレント(FCNC) ---- つまり、中間状態は全体としては電気的な電荷を運ばない全てのフレーバを変化させます ---- 単にループレベルで発生するだけです。(電気的な電荷を持つ W ボゾンは、フレーバを変化させることができることを思い起こして下さい。しかし電気的に中性な Z ボゾンはこれができません。同様に、ループを持たない標準モデルの中で  $B_s \rightarrow \mu\mu$  を描く方法は、他にないことにも注意します。)
4. このように、( $B_s \rightarrow \mu\mu$  のような)フレーバを変化させる中性カレントのプロセスは、ループでのみ見ることのできる、新しい物理効果を探すための絶好の場所です。もし、標準モデルのループでないレベル(「ツリーレベル」)の寄与があったとすると、ループから引き起こされる新しい物理効果は、ツリーレベルの結果に小さな修正を加えるだけのために、描き出されないことになるでしょう。しかしながら、標準モデルには FCNC はありませんので、新しい物理的寄与は、標準モデルの結果に比較して、大きな効果を持つ「挑戦的な変化」を持っています。
5. 専門家向けの少しテクニカルな注意: 実際  $B_s \rightarrow \mu\mu$  に対して、標準モデルの図形は、ヘリシティを省略したことと同じように、[GIM suppression](#) により(FCNC の場合のように)省略されます。(ヘリシティは、B メソンが擬スカラーであるので、最終状態はミュオンの質量が挿入されます。)

それで、重要なことは、新しい物理による標準モデルの分岐比率の導出を知ることが、期待できそうなのは、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  であることです。

※ 「GIM suppression」は、英文 wikipedia では「[Glashow–Iliopoulos–Maiani mechanism](#)」にリンクが張られています。日本語の対応する項目はありません。(英文の全文を掲げておきます。)

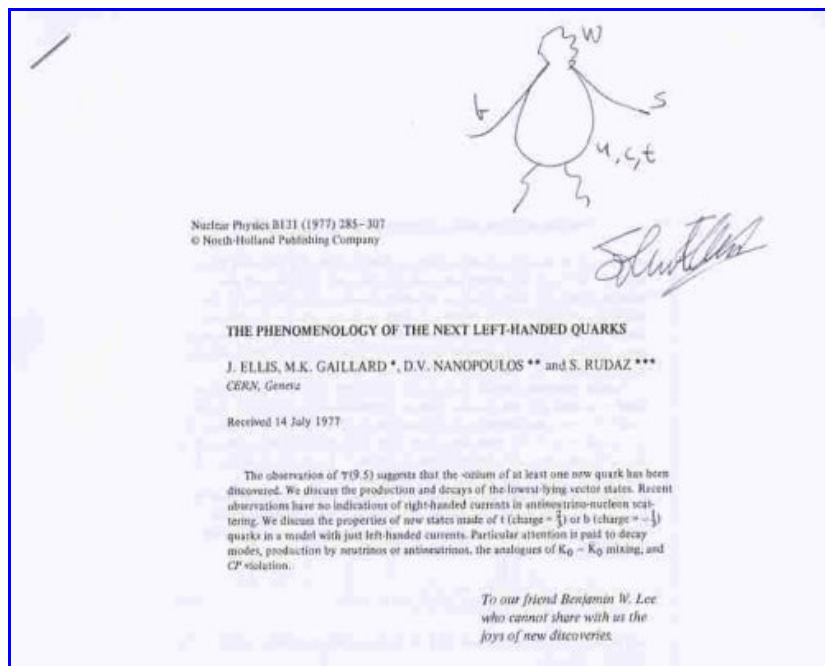
In [quantum field theory](#), the GIM mechanism (or Glashow–Iliopoulos–Maiani mechanism) is the mechanism by which [flavour-changing neutral currents](#) (FCNCs) are suppressed. It also explains why [weak interactions](#) that change [strangeness](#) by 2 ( $\Delta S = 2$  transitions) are suppressed while those that change strangeness by 1 ( $\Delta S = 1$  transitions) are allowed. The mechanism was put forth by [Sheldon Lee Glashow](#), [John Iliopoulos](#) and [Luciano Maiani](#) in their famous paper "Weak Interactions with Lepton–Hadron Symmetry" published in [Physical Review D](#) in 1970.[1]

At the time the GIM mechanism was proposed, only three [quarks](#) ([up](#), [down](#), and [strange](#)) were thought to exist. Glashow and [James Bjorken](#) predicted a fourth quark in 1964,[\[2\]](#) but there was little evidence for its existence. The GIM mechanism however, *required* the existence of a fourth quark, and the prediction of the charm quark is usually credited to Glashow, Iliopoulos, and Maiani.

## ペンギンの導入

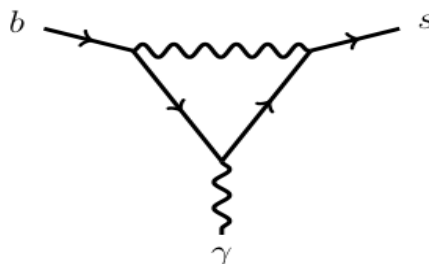
もし「ペンギン図形」についてと、その物理学的役割について述べなければ、私は怠慢と言われるでしょう。Wikipediaの記事でペンギンという言葉の[バカバカしい語源](#)について学びます；私が皆さんを「wow」と言わせるに十分なことは、ペンギンの先駆者の自筆のサインのあるものを示すことです：

※ 「バカバカしい語源」は、英文 wikipedia の「[Penguin diagram](#)」へリンクされています。日本語版はありません。



John Ellisさんの自筆のサインのある「ペンギン」論文のコピー。

主要なアイデアは、ペンギン図形が 2つのフェルミオンと中性ゲージボソンを意味するフレーバを変化させることです。たとえば、 $b \rightarrow s$  ペンギンは次の形となります。(いやいや、これはペンギンのようには全く見えません)



標準モデルの中では、上のほうの波線は、フェルミオンがフレーバを変化させるためには W ボゾンかも知れないことを想定するべきです。光子、あるいは、Z ボゾンであるかもしれませんが、グルオンであることもできますし、Higgs ボゾンであるかもしれません。もしミューオンのペアに崩壊することができるボゾンであれば、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  へ寄与する図形を得ることができます。

ある状況の下では、何故、ペンギンがこのような特別な形をとるのでしょうか: 上記のように、標準モデルの任意のフレーバを変化させうる中性の変換では、ループが必要です。それで W ボゾンのループから始めたのです。このことは素晴らしいことです。その理由は、 $b$  クォークは  $s$  クォークよりも非常に重いので、図形ではエネルギーを発散させてしまいます。  $b$  と  $s$  の間のエネルギーの差異を運ぶような第 3 の粒子が必要となり、それで、ループからゲージボズンを輻射するループを作れるのです。従って、上の図を得るのです。

このようにして、上の箱の図形に加えて、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  へ寄与するペンギン図形を得ます。面白い宿題として、標準モデルの中のこのプロセスに寄与する全てのペンギン図形を書いてみてください。(宿題のほとんどは異なっている内部の状態のラベルを書き換えるということになります。)

[注意事項, 6/23: 私の同僚の Monika さんが指摘したのですが、私が  $b, s$ , 光子のペンギンを書いたことはアイロニックですとのこと。なぜならば、このペンギンは二重ミューオンの崩壊には、実際は、寄与しないからです! (専門家に対して: この理由は Ward の等式です。)]

※ 「Ward の等式」について、大栗先生のブログに次のようなことが出ていました。(2011 年 8 月の記事) 引用させていただきます。

『ジョン・ワードさんは、量子電磁力学(QED)において、電子の波動関数のくりこみ定数と光子と電子の間の結合を表す頂点関数のくりこみ定数の間に関係があることを示し、くりこみの方法を整理しました。高橋康さんはこの関係式を対称性から導出し、一般に対称性があると量子振幅の間に関係がつくことを示しました。これは、古典力学におけるネーターの定理の場の量子版と呼べます。高橋康さんはこの業績に対し[素粒子メダル](#)を受賞されています。

QEDのくりこみ定数の間関係は「ワード恒等式」、対称性から導かれる量子振幅の間関係式は「ワード・高橋恒等式」と呼ぶのが正しいと思います。』

## 超対称性と $B_s \rightarrow \mu\mu$ ペンギン

最後に、私は新しい物理のシナリオの例を述べたいのです。そこでは新しい物理をもっているペンギンが、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  分岐比率に大きく寄与するということです。このことは超対称性や、もっと一般的に「2つの Higgs 二重モデル」では非常に良く発生することが分かっています。

上のことが何を意味しているか分からないようでしたら、これらのモデルについて知っていること全てが、1 つではなくて 2 つの独立した Higgs 粒子で、その粒子が真空期待値 (vevs) を分離する粒子をもったモデルであるとしします。重要な点は、 $\tan \beta$  と呼ばれる自由なパラメータがあり、2 つの真空の比率を測定すると、大きな値の  $\tan \beta$  について、 $B_s \rightarrow \mu\mu$  の分岐比率が  $(\tan \beta)^6$  のようになり…これが充分大きくなり、標準モデルの寄与を妨げることができます。

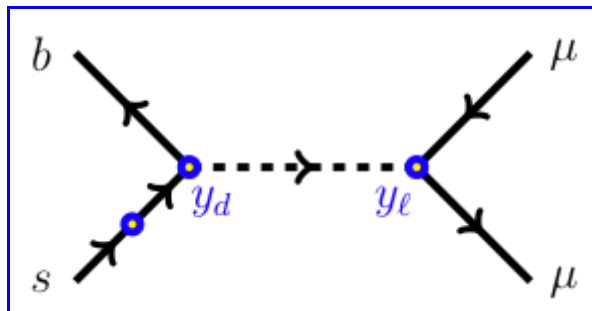
※ 「真空期待値」は、本小冊子の「Higgsと真空: やったぜ、「真空期待値」」を参照下さい。



6/23 追加: 私は、助けることができません: 超対称性ペンギンです。Dorney が私の話からイメージを作りました。

[次に記載するものは、ほとんど専門家向けです、すみません。]

さらに少しテクニカルな注意事項として、何故この分岐比率が  $\tan \beta$  の 6 乗となるのかのうまい説明があまりありません。おかしいかもしれないと思っている人に以下のことを、私は、指摘したいのです。振幅の中には 3 つの  $\tan \beta$  があり; これらはすべて、中性 Higgs 図形の中に現れます:



各々の青い点は  $\tan \beta$  の因子です。各々の Higgs の頂点での Yukawa couplings は Higgs 真空期待値で割ったフェルミオンの質量のようになっています。下のタイプのクォークとレプトンに対しては、これは大きな  $\tan \beta$  に対し、 $m/v \sim 1/\cos \beta \sim \tan \beta$  を与えます。もうひとつの因子は  $s$  と  $b$  クォークの間の混合からくるもので、これも Yukawa coupling です。(これは青い点は  $s$  クォークの足にあります。)従って、振幅内の  $\tan \beta$  は、分岐比率は、 $\tan \beta$  の 6 乗となります。

※ 「Yukawa coupling」は、日本語 wikipedia の「[湯川相互作用](#)」の項目を参照下さい。

## 概観

LHCb の結果がいくら酔いを醒ますようなものであるのに対して、未だに否定することも可能でずし、まだ将来、発見できる隆起があるのではないかと期待します。来年末には LHC は改修のためシャットダウンします; これは、このプロセスの標準モデルでの期待値の全てを探すために、LHCb では充分なデータを提供するでしょう。このポストを記載した一方で、このポストが [Higgs への本質的なヒント](#) (また [私たちの編集者を通して](#)) があるように思えます。… [編集, 6/23: Aidan がこれらの結果のが [優れたイントロ](#) を書いてくれました。]

[このことについて有益な議論をした実験家の方々に大いに感謝いたします。]



※ 「Higgs への本質的なヒント」は Ressonance の”[Higgs won't come out of the closet](#)”というタイトルの記事にリンクされています。

※ 「私たちの編集者を通して」は、Symmetry Magazine の記事”[Higgs buzz at summer physics conference](#)”へリンクされています。

※ 「優れたイントロ」は、Aidan さんの Quantum-Diaries の記事”[Life at the limit](#)”へリンクされています。

## The spin of gauge bosons: vector particles

### ゲージボソンのスピン、ベクトル粒子

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Flip Tanedo | USLHC | Tuesday, August 23rd, 2011 at 4:47 pm

※ 先回の Flip Tanedo さんポスト『[ヘリシティとカイラリティ\(helicity and chirality\)と質量、そして Higgs](#)』という解説がありました。この中に髭の生えたボールでヘリシティとカイラリティの違いを説明するという、衝撃的な解説がありました。本記事でもこれが登場します。先回はフェルミオンでしたが、今回の主眼はボソンの話です。Higgs の話が次回に続くようです。また、Brian Dorney さんの、『[Look Mom No Nabla's!](#)』も、本論の中でよく引用されています。

※ 「ヘリシティとカイラリティ、質量、Higgs」は、本小冊子の該当項目を参照して下さい。

※ 「Look Mom No Nabla's」は、Brain Dorney さんの「Look Mon No Nabla's」へリンクされています。

-----

粒子は固有のスピンを持っています。最近の『[ヘリシティとカイラリティ\(helicity and chirality\)](#)』というポストの中では、フェルミオン("スピン-1/2")の場合を説明しました。さて、これを**ゲージボゾン** -- 力の粒子である**ベクトル**("スピン-1")粒子の場合に拡張したいのです。

さて、USLHC のいつもの読者にはおなじみのように、粒子には 2 つの種類があり、**フェルミオン** (物質粒子)と**ボゾン**(力の粒子)です。物質粒子は、[標準モデル](#)の「代名詞」です。「動詞」はこれらの粒子の間の力を媒介するのがボゾンです。標準モデルのボゾンは、光子と**グルオン**と **W ボゾン**と **Z ボゾン**と **Higgs 粒子**です。最初の 4 つ(基本的な力のゲージボゾン)は、スピンのしかたにより**ベクトル粒子**と呼ばれます。

※ 「標準モデル」は、小冊子(その1)『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p60 の「標準モデルについて知られていること」を参照願います。

※ 「グルオン」は、小冊子(その1)『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p50 の「グルオンの世界」を参照願います。

※ 「W ボゾン」は、小冊子(その1)『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p36 の「W ボゾンと共鳴」を参照願います。

※ 「Z ボゾン」は、小冊子(その1)『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p26 の「Z ボゾン」を参照願います。

※ 「Higgs 粒子」は、本小冊子の「[特有の Higgs への入門](#)」を参照願います。

※ 「ベクトル粒子」は、スピンの 1 である、ボゾンと考えてよいと思います。参考で日本語版 Wikipedia の「[グルーイノ\(gluino、グルオンの超対称性パートナー\)](#)」の項目を上げておきます:

グルーイノ (gluino)とは、[超対称性粒子](#)の一種であり、[量子色力学](#)で強い相互作用を媒介する**ゲージ粒子**として導入された**グルーオン**の超対称性パートナーである。CERN・LHC 加速器の [ATLAS 検出器](#)による探索では、質量が 700GeV 以下の領域では発見できなかったと 2011 年 2 月 17 日にアトラス実験の HP で公表された。

[超対称性理論](#)では、素粒子の標準理論に登場するゲージ粒子は**スピン**が1の**ボース粒子**、即ち**ベクトル粒子**であるので、その超対称性パートナー粒子は、ゲージ粒子と同一のベクトル超多重項に属する、スピンが1/2の**フェルミ粒子**となる。

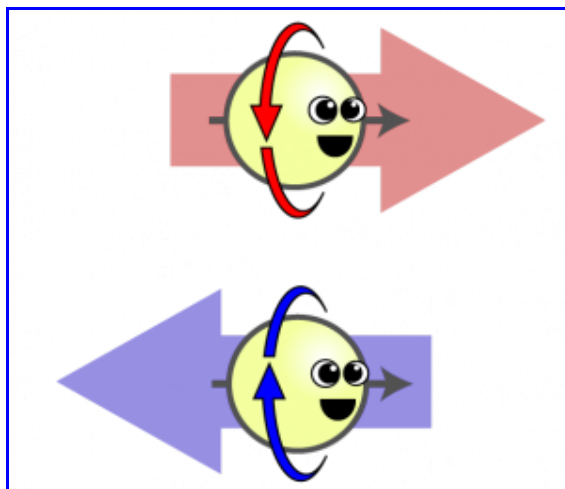
グルーオンがカラー八重項の質量0のゲージ粒子であるのに対して、グルイーノはカラー八重項の質量が0でない**マヨラナ粒子**である。

## スピンを表現する矢印

皆さんは高校で習うベクトルの定義を覚えているかもしれません: 方向と大きさをもった対象です。さらに、話ことばで言いますと、ベクトルとは矢印で描く事ができるものです。よろしいでしょう。力をうまく表す粒子は、何なのでしょうか？

私の最近のポストである「[スピン・1/2 のフェルミオンの研究](#)」の中で、重要なことは(無質量の)カイラルなフェルミオンは、その運動方向に対して時計回りでも反時計回りでも、スピンするということです。スピンの軸を特定することにより、スピンを矢印に変えることが可能です。右手をとって、指を開店方向へ巻き付けます。親指の方向は、フェルミオンのヘリシティを特定する矢印で、それは「スピンベクトル」です。次の漫画では、グレーの矢印は(右)運動の方向を表現していて、大きな色の付いて矢印は、スピンベクトルを与えます。

※ 「スピン・1/2 のフェルミオンの研究」は、本小冊子の「ヘリシティ、カイラリティ、質量、Higgs」を参照願います。



皆さんは、粒子が**上向きスピン** (赤: スピンは運動方向と同じ向きを指しています)、もしくは**下向きスピン** (青: スピンは運動方向と逆の向きを指しています)のいずれかを持つことができます。粒子を記述する2つの成分を持つ数学的対象へ書き下すことができることは、驚くべきことではないでしょう。そのような対象は**スピノル**と言われますが、実際はベクトルの特別な種類のものです。この方法を使って次のように表すことができます:

$$\psi = (\text{spin up}, \text{spin down})$$

皆様をご存知のように、スピンの上向きときには、粒子に(上向きスピンの)情報をもつスロットがあり、一方、スピンの下向きときには、粒子に(下向きスピンの)情報をもつ**別なスロット**があります。これについてはまさに2つのエントリーがリストの中にあるのです。

※ 「スピノル」は、日本語 wikipedia の「[スピノール](#)」の項目を参照願います。

**パニックにならないでください！**このポストは何か数学的なことをやろうとしているわけではありませんが、しかし、入門的で教育的なポストになるでしょう ---- そして、あまり痛みを伴わないでしょう ---- 数学的な対象として、何に見えるかを理解するためです。このことは、ジェット機のcockpitをただ見ることと、実際に飛んでみることの違いのようなものです。

ここで良く理解すべきことの全ては、スピンの矢印の記号で、フェルミオン(スピン-1/2の粒子)を記述していることです。加えて、この対象を2つの成分を持つ「スピノル」で記述することができるということです。

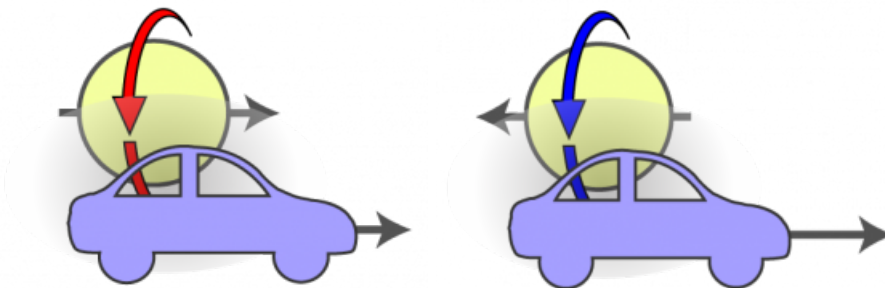
**専門家のために:**スピノルは群  $SL(2, \mathbb{C})$  のベクトル(「基本表現」)であり、 $SL(2, \mathbb{C})$  は Lorentz 群の普遍被覆です。ここでのポイントは、Lorentz 群の**射影表現**を見ていることです(量子力学は相の変換を許すと言います)。群の射影表現の存在は、そのトポロジーと固く結びついています(単連結かどうかです); Lorentz 群は単連結ではなく、**二重連結(doubly connected)**です。射影した相(projective phase)が-1(マイナス1)である対象(つまり、360度回転させるとマイナスの符号をとる)は、正確に半整数のスピノル表現です。つまりフェルミオンです。

※ Lorentz 群の表現から、フェルミオンとボゾンが出てきます。

## 相対論とスピン

何故、2つの成分を持ったスピノルを書くことに悩まされねばならないのでしょうか？何故、同時に1つの成分として振る舞わないのでしょうか:フェルミオンをとって、もしスピンの向きが上向きであれば一つのオブジェクトとして使い、スピンの向きが下向きであれば別のオブジェクトとして使います。

しかし、これはうまくいきません。何故かを知るために、もし**同じ**粒子ではあるけれども、観測者を変えると何が起きるのかを想像することができます。皆さんは、上向きスピンのハイウェイをドライブして追いかけると上向きスピンは加速していると見ることができます。皆さんとは逆の運動方向の粒子は、反対になり、スピンの向きが下向きの粒子となります。



このことは何を意味するのでしょうか？相対論を考慮に入れるために(別の観測者が別なものを見ている)、同時に上向きスピンと下向きスピンの粒子を記述せねばなりません。この効果を数学的に記述するために、上向きスピンの成分を下向きスピンの成分へ変えるスピノルの上の変換を実行することになるでしょう。

**注意:** 私は少し騙しています. というのは、私は暗に質量のあるフェルミオンについて言及しています. 一方では、無質量のフェルミオンの 2 つの成分について言及しているからです. 専門家の方は、私が Majorana フェルミオンについて言っていることを想像できると思います. 非専門家の方は、これを無視して下さい. 何故かというと、重要な点は同じで、このステージでさらに厳密にしても、得られることは大したことはありません.

※ 「Majorana 粒子」は本冊子の「[ヘリシティ、カイラリティ、質量、そして Higgs](#)」を参照下さい.

実際、数学者には、これはベクトルの構成する**全ての**点で:それらは、回転させたときに、どれくらい固有な変換があるかということを知ることができます. このようにして、このことは時空の対称性と密接にリンクしています:粒子を掴んで回転させたときに、それがどのように振る舞うかを知ることができるでしょう.

## スピン1の(ベクトル)粒子

※ ここからがボゾンの話です.

さて、スピン 1/2 (のフェルミオン)をレビューしましたので、スピン 1 の場合へ話を移しましょう:これらはベクトル粒子で、標準モデルではゲージボゾンを意味します. スピンの向きが運動方向に対して平行でなければならないスピン 1/2 の粒子とは異なり、**ベクトル粒子**は任意の方法にスピンの向きを持つことができます. (これは下記に言いたいことの主要な制約事項です.)私たちは 3 次元の中でどう矢印を書くかを知っています:まさに次のように矢の座標を書き出します:

**3D arrow = (x-component, y-component, z-component)**

しかしながら、特殊相対論を考えにいれると、代わりに **4次元**の時空を考えねばなりません. つまり 4 つの成分のベクトルを必要とします(**4-ベクトル**との呼ばれます、[Brianさんの最近のポスト](#)を参照下さい). この理由は、ベクトルの回転に加えて、観測者を加速することもできます ---- これは正確に何をするかであり、上記の例では正確に何をしたかです. そこではフリーウェイの上で粒子を追い抜くかもしれません ---- 従って、特殊相対論の中で発生する、長さが縮んだり、時間が遅れたりする効果を意味することが可能でなければなりません. 発見的には、これらは時間方向への回転です.

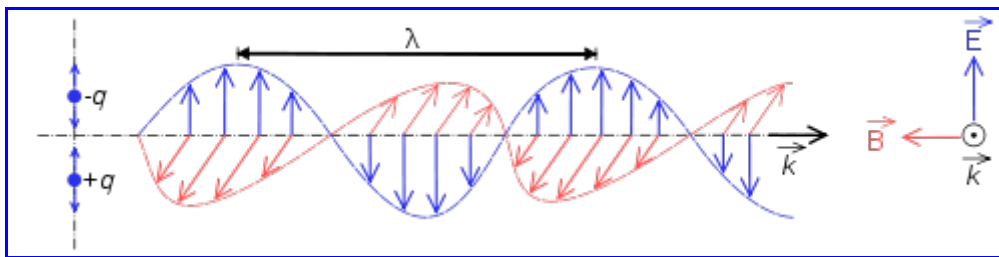
※ 「Brianさんの最近のポスト」は、”[Look Mom No Nabla's!](#)”にリンクされています.

それで、そのスピンの 4 次元の中の方向を持つ矢印によって記述できるようなものとなるベクトル粒子を定義しました. たとえば、光子は次のように表現することができます:

$$A^\mu = (A^0, A^1, A^2, A^3)$$

ここで、1,2,3 により x,y,z 方向のラベル付けとする標準的な記法を使いました.  $A^0$  は時間方向のスピンの成分に対応します. これはいったい何を意味しているのでしょうか? (スピンを持つ)スピン 1 粒子に付随するベクトルは、さらにより一般的な名前を持っています:粒子の**偏極(polarization)**です.

皆さんは、偏光という言葉を知ったことがあるでしょう:電氣的(そして従って磁氣的)な場は、ただ一つの軸に沿って振動するように固定されています:これは偏光サングラスの原理です. ここに 2 つの偏極の電磁気の放射の描画をします. ([Wikipedia](#),から引用します CC-BY-SA license):



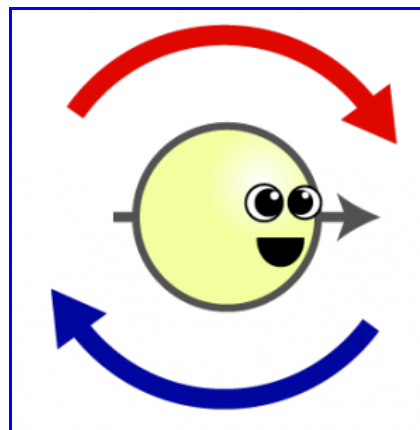
光子の偏極は同じアイデアで言っています。Brianさんのポストで言われているように、電磁場はベクトルポテンシャル  $A$  を微分することで与えられます。このベクトルポテンシャルは、まさに、上に特定したものと同じものです；ある意味では、光子はベクトルポテンシャルの量子です。

※ 「Brianさんのポスト」は、”[Look Mom No Nabla's!](#)”にリンクされています。

## 4次元ベクトルは多過ぎます

今、非常に重要な点を理解して、時空の対称性を基礎とした議論をしました。そこでは光子のような粒子を記述するためには、4つの成分のベクトルを使う必要がありました。しかし不幸にも、4つの成分は多過ぎることが判明しています。言い換えると、非物理的にしか書き下すことができないある光子の偏極もあるのです！

ここに、これが何故正しいのかを記述しようと思います；もう一度、特殊相対論をアピールしたいのです。特殊相対論の教えることの一つに、光の速度よりも早く移動することができないというものがあります。さらに、光子は無質量であり、従って、正確に光の速度で移動するというのも知っています。さてここで、運動方向と同じ方向にスピンしている光子を考えましょう(つまり、スピンベクトルはページに垂直です)：



この場合には、光子の下の部分(青い色の部分)が運動する方向と反対の方向へ動いていて、光の速度よりも少し遅く動いています。他方では、光子の上の部分では、光子とともに動いているので、光のスピードよりも早く動くのではないのでしょうか！

こんなことは有り得ないので、この方法で光子の偏極を理解ことはできません。4成分のベクトルは物理的な光子よりも多い情報を持っています。あるいは、さらに正確に言うならば：**時空の対称性に従い明らかな方法で、理論を書き下すことができることは、粒子のいくつかをどのように記述するかという余剰な非物理的な自由度を導入するという代償を払うこととなります。**

(もし、この自由度を止めて、3つの成分のベクトルで行おうとすると、数学的な定式化は、回転や加速の下で粒子がどのように振る舞うかを記述するの十分な余地がないことになります。)

幸運にも、量子場理論を通して4成分の光子をとると、自動的にこれらの非物理的な偏極を避けることができます。(量子場理論は実際、特殊相対論を知っている量子力学です。)

※ この部分、私が強調文字としました。

## ゲージ不変性:4ベクトルはまだに大きすぎる

さて、素粒子物理の重要なアイデアの一つを導入したいのです。「光より早い」光子の非物理的な偏極を消した後でさえ、多すぎる自由度があることが判明しています。無質量粒子だけが2つの偏極を持っています:上向きスピン、もしくは、下向きスピンです。このようにして光子は、1つの余剰な自由度を持っています!

この問題の答えは、信じられないほど微妙です:2-ベクトルを使い書き出すことができる偏極は物理的に同一視できるものもあります。それらが数学をやるときと同じ数値を与えるということを意味しているのではなく、文字通り同じ物理的な状態を記述していることを言っています。言い換えると、粒子の4-ベクトルの記述の中には冗長性があります!上記の非物理的な偏極のように、この冗長性は時空の対称性を明らかに尊重する方法で物事を書き出す代償です。この冗長性が**ゲージ不変性**と呼ばれるものです。

ゲージ不変性は、非常に重要なトピックで、これ自体でポストする価値のあるものです ---- 私はこれを提供するうまい方法を既に考えている最中です ---- しかし「ゲージ」は「ゲージボゾン」のことばでは、同じものを意味しています。このゲージ不変性は(ここでの物理的記述では、冗長性)密接に理論の基本的な力とリンクしています。

**注意**, 質量を持った粒子:無質量な光子とは異なり、光子は偏極を2つ持っていますが、 $W$ ボゾンと $Z$ ボゾンは3つの偏極を持っています。発見的には、第3の偏極は光の速度では動く無質量粒子ではゆるされない、運動方向のスピンを持っている粒子に対応しています。しかしながら、3-偏極をもつ質量を持ったゲージ粒子の4-成分の記述の中のゲージ冗長性であるといことは、依然として正しいのです。

**専門家のために:**この時点で、ゲージボゾンを本当に記述する数学的な対象はベクトルではなく、むしろ、コベクトル、もしくは(1-)形式であるということもできるでしょう。このことを知る一つの方法は、これらが作用の中で積分された対象であることです。明らかな違いは学問的ですが、多くの微分幾何学やトポロジーの力を集め、ゲージ理論はファイバーバンドルという「自然な」ことばで理論を扱うことができると言えます。さらに殺風景な結論ですが、Maxwell'の方程式をさらにコンパクトな形式: $d * F = j$ と書き下すことができます。(さらにコンパクトには、[Brianの記法](#)があります! 😊)

※ 「Brianさんの最近のポスト」は、”[Look Mom No Nabla's!](#)”にリンクされています。

## Wigner の分類



「大きな素描」について触れることへ戻らせてください。本ポストでは、私は既約な [ユニタリ] な Poincaré 群の表現の分類のヒントを述べたいのです。これはハンガリーの数理物理学者 [Eugene Wigner](#) が 1930 年代の後期に述べたことです。

※ 「Eugene Wigner」は、日本語 wikipedia「ユージン・ウイグナー」の項目へリンクされています。

このプログラムの心臓部は、「粒子」というものが、本当に意味するものの定義です。粒子は時空の対称性の中で限られた方法で変換します。それらは **Poincaré 群** と呼ばれます。Wigner は量子的な粒子を記述する Poincaré 群の「表現」の全体を書き下す、システム的な方法を開発しました；これらの表現は、スピン-1 やスピン 1/2 などが意味するものです。

これらの 2 つの例に加えて、時空の対称性の下では何もしない場があります：これらはスピン 0 の **スカラー場**、これは Higgs ボゾンのようなものです。もし重力を量子力学的に扱うのであれば、**重力子** はスピン 2 で [反対称性を持つ] **テンソル場** です。もし自然が超対称的であれば、重力子はまがスピン-3/2 の **グラビティーノ** をパートナーとして持つはずですが。これらの異なるスピンの場は、異なる数の成分を持つ数学的な対象により表現されます。時空を変換する(たとえば回転や加速といった)ときに、その成分は互いに混合します。

原理的には、さらに高いスピンを持つ場を構成することができますが、しかしそのような粒子が自然界に明らかに存在しないと信ずるに足る理由があります。この基本的な理由は、そのような(高いスピンの)粒子は、いかなるより低いスピンの粒子と相互作用することができないのではないかと言えます(それらが結合するかも知れない「保存カレント」がありません)。

**次回は：** 近日中にブログに掲載したい他の物理的(と非物理的)なトピックもあります。しかし、ゲージ対称性の意味についての重大な疑問へと戻るつもりです。このことから電弱対称性の破れについて話すことができ、何故、**Higgs ボゾン**(もしくはそのようなもの)が自然界に必要なのか話すことができるからです。(何故、私が Higgs について書かなかったのかと不思議に思った人たちに対しては、---- これがその理由です！特別に物事を扱うよりバックグラウンドを見渡す必要があります。)



## Who ate the Higgs?

### 誰が Higgs を食べたのだろうか？

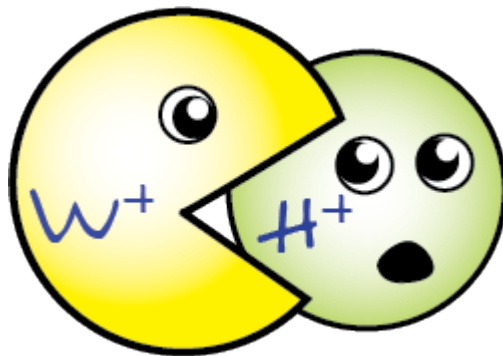
[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Flip Tanedo | USLHC | USA Monday, October 10th, 2011 at 12:02

LHC の優先順位の高い仕事は、Higgs ボソンを探索することである([Aidan's rebuttal](#)さんの記事も参照下さい)一方、既に私たちは標準モデルの Higgs の 3/4 を発見していることも指摘せねばなりません。まさにこれについて *New York Times* の記事の中に期待してはいけません；これは画期的なニュースではないのです --- 私たちは現在まで約 20 年の間に、これが Higgs の「3/4」であることを既に知っているのです。事実、これらの Higgs の 3/4 は 2 つの野獣たちの膨らんだ腹の内側で生きています：2 つの野獣とは Z ボソンと W ボソンです！

※ ”Higgs skeptic”という QuantumDiaries の Aidan Rubuttal さんの記事がリンクされています。

こいつら、全部どういうことなのだろうか？粒子の「3/4」ってなんでしょうっか？Higgs が Z ボソンとか W ボソンなどにならねばとは、何故なのでしょうっか？そして、Higgs ボソンを発見するとかしないとかということとはどのように関係するのでしょうか？これらは全て関係していて、標準モデルの微妙な一片なのです。現在、標準モデルを解釈するという重大な位置にいるのです。



見つけるであろうものは、標準モデルの中の 1 つではなく 4 つの Higgs ボソンです。それらのうちの 3 つは消えてしまいます --- もしくは食べられてしまいます --- Z ボソンと W ボソンが質量を獲得した時に、そいつらによってです(これは [物質が質量を獲得する方法](#)とは全く異なる方法です)。この意味で質量を持った Z ボソンと W ボソンの発見は、これら 3 つの Higgs の発見でもありました。第 4 の Higgs は Higgs ボソンとよばれるもので、その発見(もしくは見出すことができない)は標準モデルの極限についての重要な詳細を明らかにするでしょう。

※ 物質が質量を獲得する方法は、F.Tanedo さんの記事『Helicity, Chirality, Mass, and the Higgs』にリンクされています。

## The difference between massless and massive vectors

### 質量を持たないベクトル粒子と質量を持つベクトル粒子の差異

それほど前ではありませんが、私たちは標準モデルの力の粒子のような**ベクトルボゾンの核心点のいくつかを徹底的に調べました**。そこでは、相対性がこれらの粒子を4つの成分とする数学的な対象により記述可能とすることを知りました。しかしここで、そのような対象は、物理的に存在する偏った状態をエンコードしているのです。余分です。たとえば、光子は運動方向にスピンできません(縦方向の偏光)。何故ならば、このことは場の一部が光の速度以上の速度で運動していることになりません。

※ 「ベクトルボゾンの核心点」は、本小冊子の『**ゲージボゾンのスピン、ベクトル粒子**』を参照下さい。

さて、偏光方法により意味するものはいったい何でしょうか？最初に分かったことは、偏光は量子的な粒子がスピンできる別な方法であるということです。実際、各々の偏光状態は、独立した粒子として、もしくは独立した「自由度」として考えることが可能です。この意味で、2つの光子が存在し：

1つは左手系の偏光、もう1つは右手系の偏光を持っています。

質量を持った粒子(光よりも遅い速度で運動します)は運動方向の偏光をもつことができますので、それらは無質量な粒子に比較して余剰な自由度を持っています。それで、繰り返しますと：

**(光子やグルオンのような)無質量な力の粒子と(W や Z のような)質量を持つ力の粒子の違いは、縦方向の自由度です。**

「自由度」は独立した粒子のようなものですので、実際に言えることは、 $W$  と  $Z$  は光子やグルオンに比較して、「粒子の余剰な粒子的な価値」を持っているように思えます。この詩的なことばより、技術的に正しいことも分かるでしょう。

力の粒子の質量は大きなスケールの物理にとって重要です：Maxwell が 19 世紀に何故、電磁気学の古典理論を書き下せたかの理由は、光子が質量を持たず、従ってマクロスコピックな場を生成可能だったからです。他方で  $W$  ボゾンと  $Z$  ボゾンは、重いので短いレンジしか力を媒介できません ---- 重い力の粒子と交換する粒子はエネルギーを消費します。

## Massive vectors are a problem

### 質量のあるベクトル粒子が問題

$W$  と  $Z$  が無質量であるという事実は、次の理由からも重要です：

**場の量子論の早期には、質量を持つベクトル粒子は意味を持たないように思われました！**

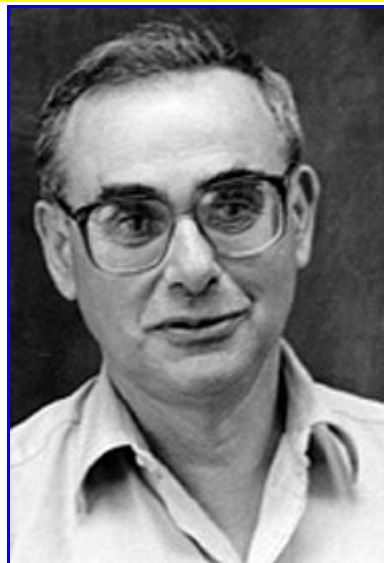
(これは)細かなことが問題ではなく、重要な点は、**質量を持つベクトル粒子の典型的な理論の数学的な整合性は、高エネルギーでは破綻することです**。うまい物理的質問が可能で ----  $W$  ボゾンが別の粒子から分散して出てくる確率は何か ---- と、それはあたかも理論自身が何か正しくなく、紙切れに書きつけた計算を止めて、途中であきらめていることを言っているようなものです。質量を持ったベクトル粒子は許されていないように見えました。

もしそうだとすると、どうして  $W$  と  $Z$  ボゾンは質量と持っているのでしょうか？ 人気女性歌手の歌詞とは対照的に、 $W$  と  $Z$  ボゾンは「このようにして生まれた」ではありません。力の粒子は自然に無質量粒子として理論の中に現れます。上の議論からは、今、無質量な粒子と質量を持った粒子の間の差異が、運動する方向への縦の余剰な自由度一つであることが分かりました。なんとかして  $W$  と  $Z$  ボゾンに余剰な縦の自由度を貸してやる必要があります。

テクニカルな注意事項と修正 (10月10日): コメントをしてくれる人が [以下に指摘しているように](#)、どのようにしてこの部分を述べるかにより注意を払うべきでした。質量のあるベクトル粒子(本質的には非線型シグマモデル)は、ツリーレベルでは私たちの言うそれらは「摂動的なユニタリ性」を失っているというような非ユニタリ性からのみ来ます。これ自体は問題ではなく、確かに、それらが数学的な不整合であることにはなりません。その理由は、それらが強結合から来て、高いオーダーの項で多くの補正を受けるからです。計算可能性が失われていますし、もしそのスケールでの物理の記述があるのであればよいのだと思う人がいるでしょう。きおの点について指摘いただいた匿名のコメントに感謝します。  
😊

Let them eat Goldstone bosons

それらに Goldstone ボゾンを食べさせましょう



Jeffery Goldstone のイメージ、MIT の web ページから

この余剰な自由度はどこから来ることが可能でしょうか？この難問の一つの素晴らしい答えは、**Higgs メカニズム**と呼ばれます。主なアイデアは、ベクトル粒子が他の粒子を単純に併合することができて、質量を持たねばならない「余剰な粒子の財産」を作ることです。以下ではどのようにしてこれたなされるのかを見ますが、しかし実際には夢のような話であることは、質量を持つベクトル粒子の数学的に整合性のある理論を得る非常にまれな既知な方法の一つです。

それではこれらの余剰な粒子とは何でしょう？

スピンを持った粒子は少なくとも 2 つの自由度を持っていますので、この「余剰な縦の自由度」はスピンの無い(もしくは**スカラー**)粒子から来ることができるのみです。そのような粒子は、それを吸収したがる力の粒子に何らかの関係を持たねばなりません。それで、弱いりからの下でチャージを持つべきです。(たとえば、ニュートリノは光子と相互作用をしないので、電磁気的なチャージを持ちません。しかし、 $W$ と $Z$ ボゾンとは相互作用しますので、弱い力のチャージを持っています。)

さらに、この原理は真空期待値("vev")を得ねばなりません。 [Feynman 図形](#)のシリーズに従っている人は、異なった方向からのアプローチですが、[このことに既におなじみでしょう](#)。

※ 「このことに既におなじみでしょう」は、'Higgs and the vacuum: Viva la "vev"'にリンクが張られています。本小冊子の「[Higgsと真空: やったぜ「真空期待値」](#)」を参照下さい。

一般に、無質量の力の粒子と結合し質量を持つ力の粒子を形成することのできる粒子は、[Jeffery Goldstone](#) にちなみ、**Goldstone ボゾン**(もしくは [Nambu-Goldstone](#) ボゾン、一人は(南部先生は 2008 年に Nobel 賞を受賞しています)と呼ばれていて、上に写真を掲げました。Goldstone の定理は、

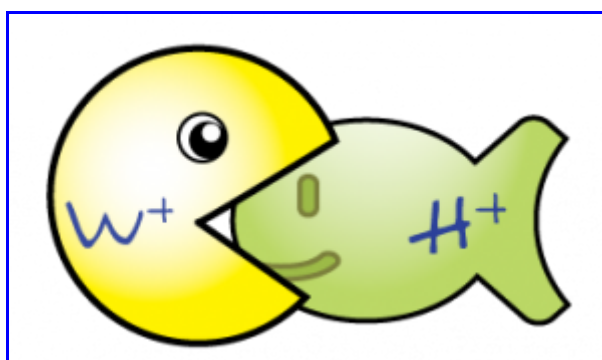
自発的対称性の破れを持つ理論は、スペクトルに無質量スカラー粒子を持っていません。

というものです。今では、これが理論にスカラー粒子が存在すべき条件を与えているという事実以外にこれらの言葉について心配することはありません。さて、以下では詳細に戻りたいのです。これらのスカラー粒子、**Goldstone ボゾン**は**正確に**無質量粒子が質量を持つために吸収することができるスカラー粒子です。

ここで、物理のもう一つの格言に到達します。:

力の粒子は **Goldstone ボゾン**を食べて質量を得るようになる。

この言葉に光をあてると、おそらく、これのもっと適当な漫画が、人気のあるタイプの魚の形をしてクラッカーの Goldstone 粒子を描くことでしょ、..



Goldstone の魚のクラッカーを食べている  $W$  ボゾン...どうなるのでしょうか？(これ以上、追求しないでください。)

**専門家向けの技術的注意:** 質量を持ったベクトルの元々の理論の数学的には整合性を持たないことは、 $WW$  散乱に非ユニタリ性です。そのような散乱の用談断面積はエネルギーとともに増加し、それをユニタリとする加えることのできる構造があるところまで、任意に大きくできます。標準モデルでは、これは Higgs ボゾンのおかげでこのことが起きます。

力の粒子が「無質量で生まれた」と言うことは、質量を持ったベクトル粒子の現象論に付随する非線型シグマモデルの**線型化**することで、UV 完全性をそれ自身与えるという特別な観点です。これは下町のゲームではありません。たとえば、カイラルな Lagrangian の中で、 $\rho$  メソンは質量を持った「[隠されたゲージ対称性のゲージボゾン](#)」として理解することのできるベクトル粒子として扱うことができます。そのような理論の UV 完全性は Higgs ではありませんが、しかし  $\rho$  を形成するバウンドクォークの現れです。標準モデルの UV 完全性のこの種類の類似物は、**テクニカラー**であり、**複合 Higgs** であり、**Higgs レスモデル**です。

※ 隠されたゲージ対称性のゲージボゾンは、Phys. Rev. Lett. 54, 1215–1218 (1985) Is the  $\rho$  Meson a Dynamical Gauge Boson of Hidden Local Symmetry? [M. Bando](#) [T. Kugo](#) [S. Uehara](#) and [T. Yanagida](#) を指しています。

## Massive vectors are a problem

### 質量のあるベクトル粒子が問題

$W$  と  $Z$  が無質量であるという事実は、次の理由からも重要です:

場の量子論の早期には、質量を持つベクトル粒子は意味を持たないように思われました!

細かなことが問題ではなく、重要な点は質量を持つベクトル粒子の典型的な理論の数学的な整合性は、高エネルギーでは破綻することです。うまい物理的な質問することができて ----  $W$  が別の粒子から分散して出てくる確率は何か ---- と、それはあたかも理論自身が何か正しくなく、紙切れに書きつけた計算を止めて、途中であきらめていることを言っているようなものです。質量を持ったベクトル粒子は許されていないように見えました。

もしそうだとすると、どうして  $W$  と  $Z$  ボゾンは質量と持っているのでしょうか? 人気のある女性歌手の歌詞とは対照的に、 $W$  と  $Z$  ボゾンは「このようにして生まれた」ではありません。力の粒子は自然に無質量粒子として理論の中に現れます。上の議論からは、今、無質量な粒子と質量を持った粒子の間の差異が、運動する方向への縦の余剰な自由度一つであることが分かりました。なんとかして  $W$  と  $Z$  ボゾンに余剰な縦の自由度を貸してやる必要があります。

## Four Higgses: A different kind of redundancy

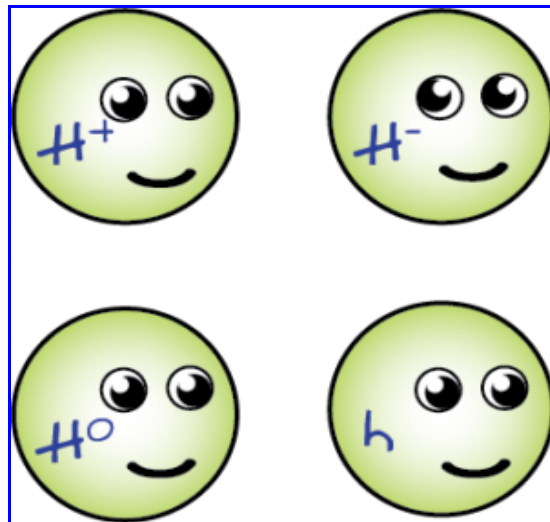
### 4つの Higgs たち: 余剰の異なった種類

よろしい、それでは3つの質量を持つゲージボゾンがあります： $W^+$ 、 $W^-$ そして $Z$ です。これらの各々の一つは、縦方向の偏光に加えて、2つの遷移的な偏光を持っています(右手系と左手系)。これは、これらに食べさせる**3**つの Goldstone ボゾンを必要とします。これらの粒子はどこから来るのでしょうか？答えは、全く驚くべきことではなくて、**Higgs**です。

実際、密告のように標準モデルをあなたに売ろうと思ったとします：

もし、今売ると、標準モデルは一つではなく、2つでもなく、3つでもなく、4つなので  
す ---- それらを数えると、---- 4つの Higgs たちになります！

4つの Higgs ボゾンたち？！随分と多いのですね。しかしこれは正確に得られていること  
です:これらことを  $H^+$ 、 $H^-$ 、 $H^0$ 、と  $h$  と呼びます。これから見るように、それらのうち2つは電荷  
を帯びています( $W$ たちにより食べられてしまうことを想像することができます)。残る2  
つは電荷帯びていません。それらは以下です：



"標準モデルの4つの Higgs たち"、バイブルのようなしゃれを意図してます。

これらの Higgs たちすべてはどこから来たのでしょうか？そして、何故、理論はそれらで充分だとい  
うことができるのでしょうか？これら4つの Higgs たちは全て**ゲージ対称性**と呼ばれる異なる冗長  
性の別な種類であることがはっきりとしています。名称はゲージボゾンに関係していて、力の粒子の  
名前を与えます。

ベクトル粒子を記述するときに、数学的な構造は冗長性を持っているといいました:4つの成分の  
対称は、ベクトル粒子表現している自由度よりも多すぎる自由度を持っています。一つの冗長性は  
無質量粒子は縦方向の偏光を持たないという制限からきます。このことは、自由度4から3へと減  
ります。しかしながら、無質量粒子の偏光は**2**であることを知っています ---- さらに一つの偏光を減

少させる必要があります。(同様に、質量のある粒子の自由度も、4ではなく3とせねばなりません。)これが左手を超える冗長性が、正確にゲージ対称性の意味しているものです。

これらの計算物理によるバックグラウンド: 電磁場がポテンシャルの派生物として記述できるという事実と関連しています。このことはポテンシャルは定数を **upto** として定義されることを意味します。この全ての定数に渡ること(より一般的には全派生物)は、ゲージ対称性です。量子的な素描と組み合わせると、前に述べたこととなります。[ベクトルポテンシャルは光子の偏光を記述する4-ベクトルの古典的類似物です。](#)

※ 2011年8月23日の『ゲージボゾンのスピン:ベクトル粒子』にリンクが張られています。

**テクニカルな注意事項:**いくつかの意味で、このゲージ対称性は、完全に「対称」ではありませんが、明らかな4-ベクトルが同一の状態を記述するように物理状態を過剰に特別化した状態です。(これを同じ物理である異なる状態の対称性と比較して下さい。)

ゲージ対称性は、ベクトル粒子の冗長性の説明ではありませんが、しかし伴う力の下でチャージされている任意の物質粒子の冗長性の説明を含んでもいます。特に、弱い力に付随するゲージ対称性は **Higgs** が2つの成分の複素数値を持っている成分により記述する必要があります。複素数は2つの実数を持っているので、このことは **Higgs** が実際に4つの異なる粒子から成り立っていることを意味します ---- 4つの粒子は既に上で述べました。

さて、上で述べた Goldstone の定理へ戻りましょう:

**自発的対称性の破れをもつ理論は、そのスペクトルの中に無質量スカラー粒子を含んでいます。**

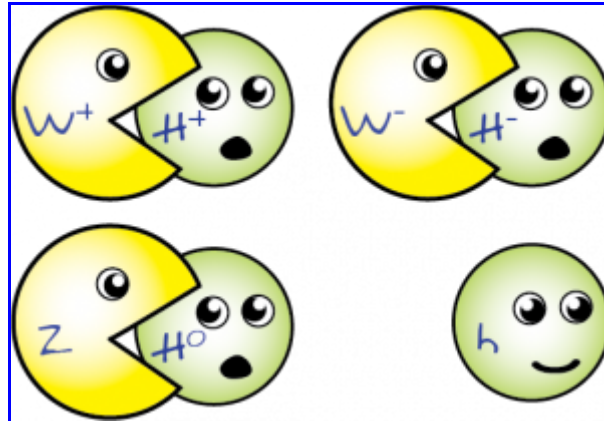
私たちは、スカラー粒子が得られることを知り、既にハッピーです。このセンテンスの残りをひも解きましょう。最も重要な言葉は、“**自発的対称性の破れ**”です。これは、このブログのポストに求められる大きな考え方ですが、今の場合(標準モデル)は、 $W$ と $Z$ ボゾンに関するゲージ対称性が『破れ』しているとしましょう。

起きることは、**Higgs** の一つが(実際、これが「**Higgs**」であり  $h$  と呼ばれます) **真空期待値**を得ます。これは、**Higgs** 場がある時空の至るところで発生します。しかしながら、**Higgs** は弱いチャージしか運びませんので、---- それでもし至るところで発生するとすると、何かゲージ対称性を破るものが無ければなりません… 選択された弱いチャージ(**Higgs**  $h$  のチャージ)があるので、宇宙はもはや対称ではありません。

※ 2011年6月3日の『**Higgs**と真空期待値』へリンクされています。

従って、別の機会にするつむりの理由により、Goldstone の定理は他の **Higgs** たちを Goldstone ボゾンとして保存します。つまり、 $H^+$ ,  $H$ , そして  $H^0$  がそれぞれ  $W^+$ ,  $W$ , そして  $Z$  に食べられ、質

量を持つベクトル粒子に要求される第三番目の偏光を提供します(そして、そうなることで、数学的には高いエネルギーで整合性をもちます)



4つの Higgs のうち 3 つが Goldstone ボゾンで、 $W$  と  $Z$  により食べられます。

## Epilogue

### 最後に

皆さんに言っていないことがまだ少しあります。各々の重い力の粒子の Goldstone 粒子が、何故一つなのかという説明をしていません。さらに、何故各々の Goldstone 粒子がそれを食べる強い力の粒子として同じチャージを持つことが判明するということを説明していません。そして、これらについても触れていませんが、私は何故光子が無質量であり、 $W$  と  $Z$  が質量を獲得するのかについても何も申していません ---- それらは密接な仲間で、何故光子が消えないで、 $h$  を食べてしまわないのどうかと考えるかもしれません。

あらら、これらの全ては、**電弱対称性の破れの**意味するところで、今後のポストを待っているはずですよ。

今ここでしたことは、どのようにしてゲージ対称性と Higgs が力の粒子の質量と関係しているかを示したことです。ここでは、Higgs がベクトルボゾンに質量を、フェルミオンに質量を与える方法とは全く異なる方法で与えることを理解しました。フェルミオンは Higgs のどのような部分も「食べ」はしませんが、しかし[真空期待値に反映され](#)、一方、弱い(力の)ゲージボゾンは Higgs の 3/4 は食べられてしまいます！この違いは、スピン 1 の粒子とスピン 1/2 の粒子の振る舞いを相対性が統制していることに関連しています。

※ 2011 年 6 月 19 日『ヘリシティ、カイラリティ、質量と Higgs』にリンクされています。

最後に、実際「標準モデルの Higgs の 3/4」を既に発見していることを示したとき同時に、標準モデルに残る一つの Higgs は特別で **the Higgs** と呼ばれている理由があることを示しました ---- この Higgs はゲージ対称性を破る(その兄弟たちが食べられることを許す)真空期待値を獲得する特別な自由度です。the Higgs の発見は物理学者がいわゆる電弱対称性の破れを導出することに光を与えます。一方、the Higgs が未だに発見されていないということは、高エネルギーでは  $WW$  散乱の数学的不整合性を解決する変わるべき方法を考えることを私たちに求めていることになるのではないのでしょうか。



## コメントの中に出てくる議論

*anonymous* says: [October 10, 2011 at 3:04 am](#)

Flip さん,

Higgs の存在しない標準モデルは、「数学的には不整合」ではありません。何が問題かという、tree レベルがユニタリであることです ---- 理論は強結合ではありますが、ill-defined ではありません。摂動展開をこれ以上進めるパラメータがありません(カイラルな摂動理論が cut-off に近づいています)。

それでは！

### Reply

- *Leo* says: [October 10, 2011 at 10:21 am](#)

*anonymous* さん,あ

わたしは、これに賛成しかねます。というのは、そのようなユニタリを壊すことは、新しい物理の自由度の出現の兆候であるからです。言い換えると、あるエネルギーで有効理論が破綻すると、そこでは既に作り上げられた粒子が存在しています。標準モデルの場合には、これが Higgs 粒子なのです。非ユニタリなことは新しい粒子の存在の兆候であり、4-Fermi 結合での電弱ボゾンの存在と同様です。

それでは、

- *Flip Tanedo* says: [October 10, 2011 at 10:50 am](#)

*anonymous* さん、そうです、あなたの行っていることは正しいです。----- このことを言う時にもっと慎重になるべきでした。理論は摂動的にはユニタリではありません。しかしおっしゃるように、強結合であり、計算できません。私は適切なテクニカルな注意を追加するようにします。

- *Flip Tanedo* says: [October 10, 2011 at 10:52 am](#)

Leo さんへ:私が考えるに、*anonymous* さんの指摘は tree レベルでユニタリ性が破綻しているということだけです。非ユニタリが散乱理論に行く前に、理論は強結合ですが、ループ補正は測定可能になります。この理論は計算できないのですが、*anonymous* さんの発言している、数学的に不整合ではないということは正しいと思います。

- *leo* says: [October 10, 2011 at 1:00 pm](#)

Flip さんへ:

このことを私は正しく理解していると核心しています:議論は、標準モデルが整合性を持っているのかという点で、この結論がいずれかを私たちは言うことがないのではないのでしょうか?これが計算できないという事実は、後で述べることにして、加えて、摂動展開が破綻しているということが言えるのでしょうか? Higgs のスケール(つまり、有効理論として成り立たなくなる記述)の近くでは、質量  $M$  に対して( $p^2/M^2$ ) 展開となるように私には思えます。

標準モデルは有効場の理論(EFT)の全ての性質を持っていますので(ほぼ一般的な対称性を与えられていて、ニュートリノは第一  $1/M$  補正の質量をもっています)、私は、 $1/M$  展開の破綻が数学的な不整合性を示すと主張したいのです: あなたの主張は、あなたの出発点である質量が  $M$  よりも大きいという状態(基本状態でも境界状態でもよいのですが、)を意味していません。tree レベルのユニタリ性の破綻は、何かあなたが間違えていることの兆候ですが、有効場の理論の破綻は、実際の不整合です。

- [Flip Tanedo](#) says: [October 10, 2011 at 7:24 pm](#)  
Leoさんへ: 私は、標準モデルが必ずしも不整合であるが、しかし、UV 完全であるおかげで非常にもっともらしく破綻すると考えています。
- [renormalisable?](#) says: [October 12, 2011 at 4:46 am](#)  
私の考えでは、ここで失っているより重要な点がひとつあります。理論が繰り込み可能かどうかという点です。このハイライトは 2 つの場合に分かれます: Higgs ボゾンありのケースと Higgs ボゾンなしのケースです。

Higgs ボゾンありの場合は、理論は繰り込み可能ですので、UV 完全です。しかしながら、Higgs の質量が tree レベルの破綻が大きすぎて、理論が強結合となるので、計算できませんが、しかし不整合ではありません。全てのループのオーダーが適切となり、理論をユニタリにします。

Higgs ボゾンなしの場合は、理論は実際、非線型シグマモデルのようになりますがこれは括りこみ可能ではありません。従って、完全な理論ではなく、cut-off について有効な理論というだけです。このシナリオの中で tree ユニタリ性の破綻は、この cut-off があり cut-off の上に新しい物理を必須とすることを私たちに教えています。新しい物理はほぼユニタリな繰り込み可能な理論であるに違いないはずです。

上記の唯一の注意事項として、もし非線型シグマモデルが漸近的に safe であれば、そこでは理論は非摂動的に繰り込み可能で、従って UV 完全になります。ここで、摂動理論が(強結合では)破綻すると気に、tree ユニタリ性が破綻することを私たちに再び認識します。この考え方は Roberto Percacci により最近、注目されました。

## Why do we expect a Higgs boson? Part I: Electroweak Symmetry Breaking

### 何故、Higgs ボズンは期待されるのか？ Part1: 電弱対称性の破れ

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Flip Tanedo | USLHC | USA November 21st, 2011 at 10:34 am

公示：（私のブログ、Philip Tanedo さんの USLHC-Quantum-Diaries が）2011 年の BloggingScholarship の最後までノミネートされています。このブログを維持していくために、どうか [私に投票してください](#) (Philip Tanedo)、そして同様に他の人も投票を進めていただきたい！本ポストの最後にさらに情報がありますので参照願います。

※ 「私に投票してください」は、<http://www.collegescholarships.org/blog/2011/11/18/2011-blogging-scholarship/>にリンクされています。

最近のポストで、Higgs が [物質粒子](#)と [力の粒子](#) へ質量を与えることを見ました。これは素晴らしいことである、一方、ほとんど Higgs ボズンが [存在せねばならない](#)ことを意味しています。---- おそらく粒子は、まさに質量を持ち、質量のこれ以上深い起源は無いように思われます。実際に、素粒子物理学者が Higgs と呼ばれる (もしくはそのような)ものを見つけようとする理由が、ほかにもあります。

※ 「物質粒子」は、本小冊子の「[ヘリシティ、カイラリティ、質量、Higgs](#)」へリンクされています。

※ 「力の粒子」は、本小冊子の「[誰が Higgs を食べたのか](#)」へリンクされています。

## electroweak symmetry breaking. 電弱対称性の破れ

# WANTED



Higgs Boson  
(or something like it)

理解したいステートメントは次です：

Higgs ボズンは電弱対称性を自発的に破ります。

それはかなり性急な材料です。しかし、私たちはそれを一度には 1 個ずつ扱うでしょう。それを書き留めて、あなたの友人たちを印象づけるために、使用してください。それについて後で説明するこ

とができるように、必ずこのポストの残りを読んでいただきたい。(私がポストをフォローアップし検討したステートメントの第二部があります。)

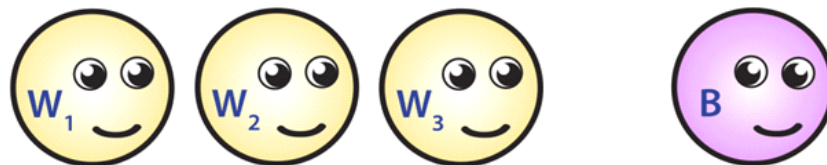
## Electroweak symmetry 電弱対称性

電気と磁気は同一の基本的力の 2 つの現れであるという考え方に慣れていていると思います。このことは Maxwell の方程式により明らかにされ、しばしば物理の下級の大学院生が身につけるような T-シャツです。(もしそのような T-シャツが何かについて知りたいのであれば、[この記事](#)を参照下さい。) **電弱対称性**は、ある意味では、弱い力と電磁気力を統一することが、この(理論的)前進の次のステップです。この『電弱理論』への統一とは理論の結果、崩壊して電磁気と弱い力へ分離するという事は、[1979年ノーベル物理学賞に輝きました](#)。

※ 「この記事」とは、<http://www.slac.stanford.edu/~mpeskin/Physics124/howto.pdf> “How to Write Maxwell's Equations on a T-Shirt”を参照ください。ここで言っている「T-シャツ」とは、Maxwell の電磁場方程式のことで、大学院の下級生が当然にも身につけているものとして使われています。

※ 1979年ノーベル物理学賞は、Sheldon Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg が受賞し、その理論的内容は、電弱対称性についてです。

それでは、ここで何が起きているのでしょうか？電磁気力の力の粒子が光子であるあることを私たちは既知で、弱い力の粒子が  $W^+$ ,  $W^-$  と  $Z$  ボゾンであることも既知です。前提的に、『次のような粒子の組み合わせとして「統一」されている』とすることをお許しいただきたい：つまり、3 つの  $W$  ボゾンが、 $B$  と呼んでいるボゾンのどれかです。



なんですか？今、3 つの  $W$  粒子があるのではないのでしょうか？さらにこのおかしな  $B$  ボゾンとは何でしょうか；[Feynman 図形を描くことのガイド](#)ではおかしな図を描くことはできません。悪く思わないでください、Higgs のために、これらの粒子はみな混合してしまい、私たちのよく知っていて愛すべき普通のボゾンとなっていることが分かるでしょう。これは少なくとももっとうまいでしょう。というのは、上の 4 つの粒子は、4 つの電弱力の粒子を既知しているからで、4 つの粒子とは  $W^+$ ,  $W^-$ , 光子と  $Z$  です。

※ 「Feynman 図形を描くことのガイド」は、小冊子(その1)『[Feynman 図形と標準モデルシリーズ](#)』の p6「Feynman 図形を描きましょう」を参照下さい。

この新しい「統一された」ゲージボゾンの一群は、うまく統一されているように見えませんが、注意してください：この  $W$  たちは完全に  $B$  とは違っているように見えます。この説明では、実際には物理的な差異として現れます： $W$  たちは力の 1 つのタイプの力を媒介することに対し、 $B$  は別の異なる力を媒介します。このことの意味は、「統一された」電弱対称性は、実際は、そのようには統一されてはいないのだということを意味します！

**注意:**力を統一するための次の自然なステップは、実際に  $W$  粒子と  $B$  粒子を互いに統一することではないでしょうか。事実、数学的には、 $B$  と 3 つの  $W$  たちとを大統一理論(**grand unified theory(GUT)**) の中で全て 8 つのグルオンへと結びつけられることが知られています。このことを超える次のステップは、これらの力と重力を統一することではないでしょうか。一般のかたに向けた文書の脈絡では、「万物の理論」と呼ばれています。しかし電弱理論とは異なり、これらの現象のそれぞれを TeV スケールで受け入れられるものかどうかを疑う理由はありません。

※ TeV スケールでは大統一理論の検証はできないことは疑いない、つまり、検証できないと言っています。

**テクニカルな注意:**数学的には力の統一は、連続群の(もしくは、それらの代数の)表現論の問題です。電弱の群は、積  $SU(2) \times U(1)$  で、----  $SU(2)$  は 3 つの生成子を持っています。---- これはまさにこれらが 3 つの  $W$  ボゾンが存在していることの原因です。

## Electroweak symmetry is broken

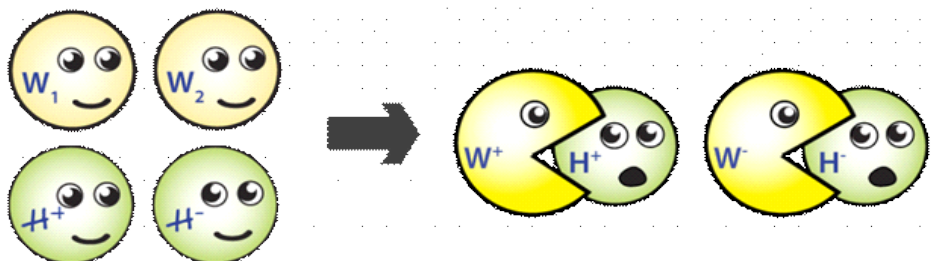
### 電弱対称性の破れ

日常起きる現象の中で、電気と磁気の性質は、別の現象として見るができます。(別の現象として見るということ) 同じことが、電磁気力と弱い力の間でも起きていることが分かります: 3 つの無質量な  $W$  たちと無質量な  $B$  の代わり、質量と電荷を持った 2 つの weak ボゾン( $W^+$  and  $W^-$ )、質量を持ち(電氣的に)中性なボゾン( $Z$ ) と無質量な光子を得ます。電弱対称性は電磁気に破れたということをお願いいたします。

さて、出現する質量は Higgs がこれをする何かを持っているのではないかとされています。実際、4 つの Higgs ボゾンがあることを思い出してもらい、よいチャンスです: [弱いゲージボゾンに「食べられた」](#) ボゾンのうちの 3 つは質量を持つ事が可能となります。この「食べる」とはさらに食べ続けることになり: 結合して「統一された」電弱ボゾンは、その「非統一された」結合形態となる事が判明しています!

※ 「弱いゲージボゾンに食べられた」は本小冊子の「[誰が Higgs を食べたのか](#)」にリンクしています。

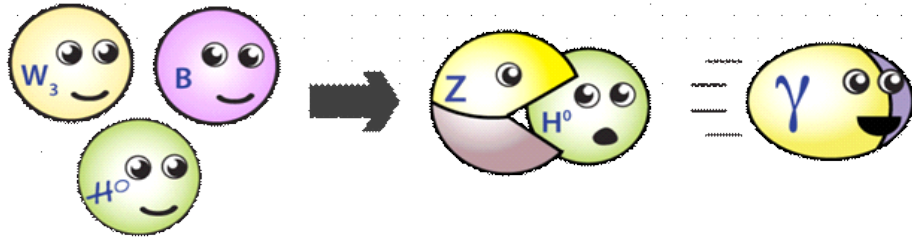
最初の 2 つは容易です:  $W_1$  と  $W_2$  が、電荷を帯びた Higgs ボゾンを「食べることにより」結合して  $W^+$  と  $W^-$  となります。(テクニカルには、それらをここでは「Goldstone ボゾン」と呼ぶべきでしょう。)



何故、Higgs/Goldstone を食べる事が  $W_1$  と  $W_2$  粒子を結合して、いわば  $W^+$  とできるのかについて少し述べたいと思います。ここで、「自由度」の数は一致していることに注意します。「自由度」は大まかには、異なる粒子の状態の数に変える事ができることを思い出してください。電弱理論

では、2つの無質量のゲージボゾン ( $2 \times 2$  polarizations = 4 degrees of freedom) と2つの電荷を帯びた (2 degrees of freedom) は、全部で6つの自由度です。破れた理論では、2つの質量を持つゲージボゾン ( $2 \times 3$  polarizations) を持っていて、再び6つの自由度を回復します。

同一のストーリーが  $W_3$ ,  $B$ , と  $H^0$  に対しても成り立ちます (これは Higgs ボゾンとしては同じではありません、この低い場合を  $h$  と書くことにします)。  $W_3$  と  $B$  は結合して、中性の Higgs/Goldstone を食べて、質量を持つ  $Z$  ボゾンを形成します。一方、光子は左の  $W_3$  と  $B$  の結合の結果です。ここには食べるべき Higgs はなく、光子は無質量のまま残ります。



電弱対称性が破れるまで、 $W$  たちが結合して電荷を帯びた  $W$  たちになることがありえないことは、注意しておく価値があるでしょう。この理由は、[電氣的な]電荷が電弱対称性理論が電磁気理論へと破れるまでは、うまく定義できないからです。この破れの後でのみ、光子が力と電氣的なチャージを媒介する事が可能です。

## Electroweak symmetry is broken spontaneously 自発的電弱対称性の破れ

よろしい、「電弱対称性」が破れることの意味をご理解いただきました。その破れの意味は自発的に破れることで、この全体のストーリーは Higgs のなすべきことを意味するのでしょうか？さて、(これからもう一つ) 重要なことを把握することを始めましょう。

重要なことは: Higgs の真空期待値 (vacuum expectation value) (“vev” と短く言います) は、電弱対称性を破る事です。粒子の質量の脈絡では、[最初の Higgs の真空期待値を導入したポスト](#)を急いで見たいと思うかもしれません。夢のような物理的なたわごと聞こえることに対し、次の行を使うことが可能です。:

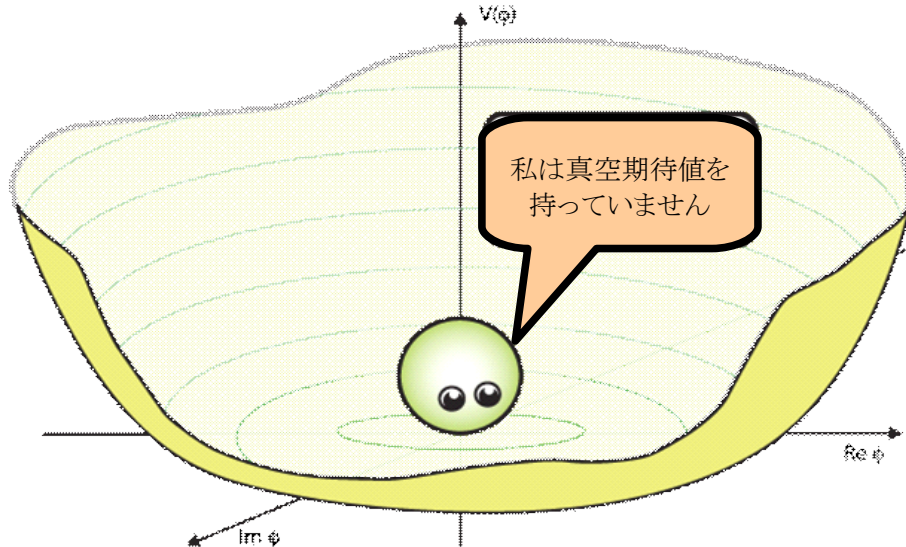
**Higgs の真空期待値(vev)は、電弱対称性の破れのオーダーパラメータです。**

※ 「最初の Higgs の真空期待値を導入したポスト」は「Higgs と真空: やったぜ『真空期待値』」にリンクしています。

最初に、何故 Higgs が真空期待値全てを獲得するを見てみましょう。vev は古典的な量なので、うまい絵を描くことができます。ポテンシャル (potential) は特別な構成のエネルギーであることを教えてくれる函数です。高校の物理での問題を思い出すかも知れませんが、電氣的ポテンシャルを最小とすることを見つれたり、あるいはある高さに岩を保つのに必要な重力ポテンシャルを決定する必要があります。これには極めて多くの同じようなことがあります: Higgs 場のポテンシャルを描きたいと思っています (技術的に明確にすると、これは [4 つの Higgs](#) の結合されたブランチのポテンシャルとなります)。

※ 「4 つの Higgs」は、本小冊子の「[誰が Higgs を食べたのか](#)」にリンクしています。

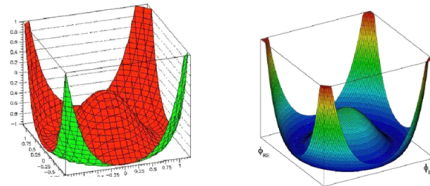
何が「普通の」ポテンシャルに見えるかから始めましょう。ここで  $x$  軸と  $y$  軸上に、場  $\phi$  の実部と虚部をプロットしました; 非常に重要なことは、 $x$ - $y$  平面の上の点が特別な場の構成に対応していることです。(下記の図のようなポテンシャルの中では、)もし粒子が(真ん中の)原点にあれば、持つべき真空期待値はなく、ここで真空期待値を獲得します。



$z$  軸上でポテンシャル  $V(\phi)$  を描きます。粒子は、ポテンシャルを最小となるところへ転がりますので、--- 上の漫画のように --- 「普通」の場合は、--- 粒子は真空期待値を獲得しません。私は、ポテンシャルのくぼみが粒子の質量に関係しているということをここでは言いたいのです。

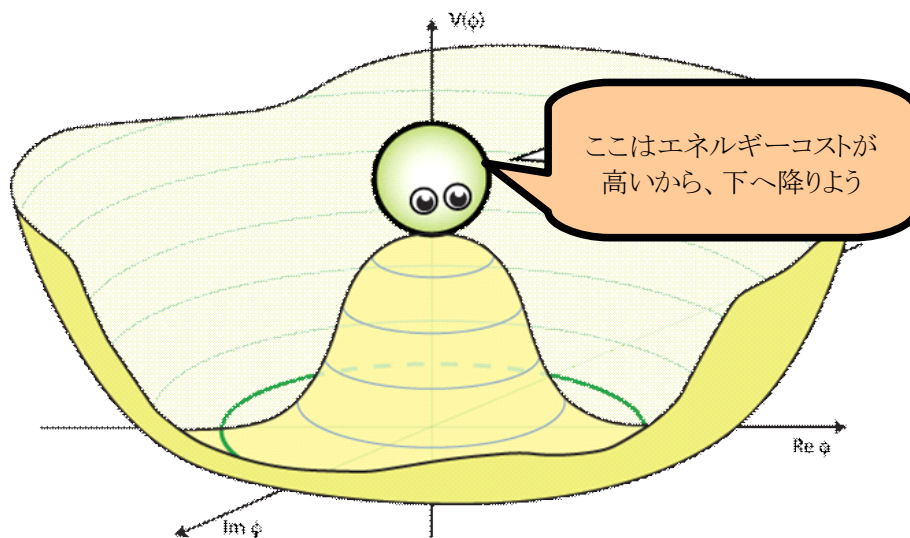
さて、Higgs ポテンシャルがどのように見えるかを試してみましょう。物理学者はこれを「メキシカンハット」ポテンシャルと呼びます。(これらのイメージは物理の会話でしばしば使われることがあります。不幸にも、このグラフィックの原点を探したり、これをもう一度描き直すことは、私にはできません。)

※ 私のアイコン(日本語版、英語版)



は、この Higgs メカニズムのポテンシャルの象徴である「メキシカンハット」から、借りています。

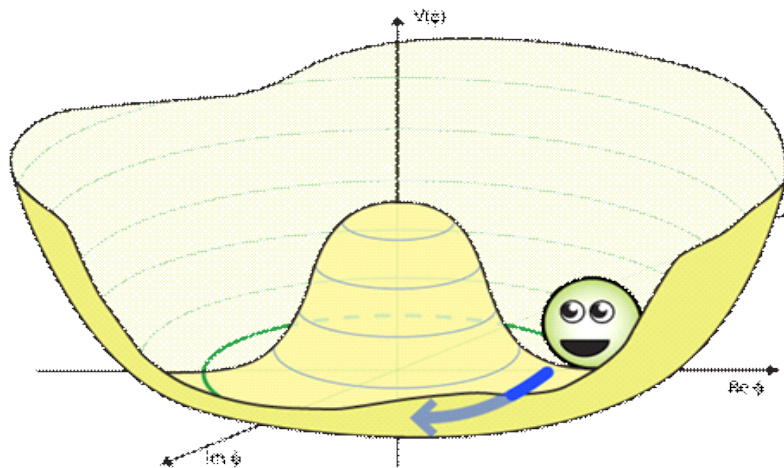
観察できることは、原点ではもはやポテンシャルが最小ではないということです。言い換えると、より低いポテンシャルエネルギーとなることが可能となるときには、Higgs は丘の上から転がり落ちてしまいます。何故、ポテンシャルがこのような形をしているか(最もらしい推測がいくつかあります)と、標準モデルの中ではこれが Higgs についての前提であることを、ここでは申し上げません。



それで、Higgs は丘から最小のポテンシャルエネルギーの谷底へ転がり落ちねばなりません。これが時空の度の点でも発生して、Higgs vev はいつでもどこでもあって、質量を獲得するために物質粒子は転がり落ちることができます。さらに重要なことがいくつかあります。この vev が電弱対称性を破ります：

※ 「物質粒子は転がり落ちることができます」は、本小冊子の「[ヘリシティ、カイラリティ、質量、Higgs](#)」を参照下さい。

上記の漫画では、原点に特別な何かがあります。もし原点に粒子があるのみとすると、 $x$ - $y$  平面について回転させることができても構成は変化しません。他方、もし粒子が原点にないとすると、回転させると粒子を円軌跡に沿って回すことになるでしょう(下記の図では、青色の実線で示しました)。言い換えると、回転対称性は、物理的な構成を変えるために破れます。

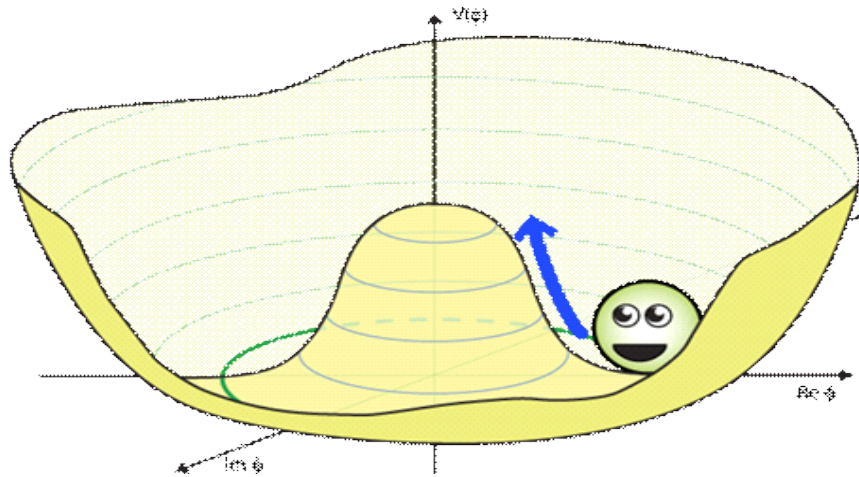


電弱対称性の場合も同じで、簡単に描いた場合よりもさらに多くの次元を必要とする以外は、同様です。ポイントは、元来4つの Higgs たちが存在していて、単一の「Higgs」の全ての部分を形成しています。電弱対称性の破れていない統一された理論では、これらの4つの Higgs たちは、互いに回転しあっていて、物理を変えることはありません。しかしながら、メキシカンハットポテンシャルを持つときは、系が回転するとメキシカンハットの一番低い部分にいることになります：Higgs たちの一つは vev を獲得して、一方、他は獲得しません。従って、「回転」を実行するということは、一つの



Higgs から  $v_{ev}$  を他へ移動することとなり、対称性が破れます。 --- 4 つの Higgs たちはもはや等しく扱うことができません。

さて、次のポストへの要求を刺激するためには: 一度電弱対称性が破れてしまうと、ポテンシャルの中で「平らな方向」(図の青色の円)があります。ポテンシャルの谷底では粒子の質量となるといったことを思い出してください。それが平坦な方向であるという事実は、無質量粒子が存在しているということになります。実際、Higgs に対して、3 つの平らな方向が --- 想像通り --- 弱いゲージボゾン:  $H^+$ ,  $H^-$ , と  $H^0$  の 3 つに食べられた無質量 Higgs/ Goldstone 粒子に対応します。第 4 の Higgs --- 普通に Higgs 粒子と呼ばれている粒子ですが --- は、放射方向で谷底のある方向への励起に対応していますので、Higgs ボゾンは質量を持つことになります。



## Do we really need a Higgs?

### 実際に、Higgs は必要なのでしょうか？

よろしい、それでは、もし上記のとおりとすると、電弱対称性がどのように破れるかという考えが、どのように無質量な  $W$  と  $B$  ボゾンを結合させて、通常の  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z$ , と光子を形成する Higgs たちとなるのかを説明します。(以上で)どのように物質粒子が質量を獲得するか(結果的には  $v_{ev}$  に衝突することにより)のレビューと、これらのゲージボゾンは質量をどのように獲得するか(Higgs の中のあるものを食べることにより)もレビューしました。しかし、電弱の統一のアイデアが好きだと言つて、これが必然性の全てでしょうか、もしくは、まさに全てを料理し終えたことになるのでしょうか？

私のポストのまとめの一つは、実際には電弱対称性の破れは、理論が意味を持つためにはほとんど必然的です。(ここにきて、私は「ほとんど」という言葉を使いましたが、しかし、テクニカルなフェーズは「摂動的にユニタリ」となることは確かでしょう。)注意すべきは、私は電弱対称性の破れが、重要であるということを言っています。この完全なポストを通して、Higgs ボゾンを「それに似た何か」によって置き換えることもできるかもしれません。多くの理論があり、あるものは多くの Higgs ボゾンを持っていて、あるものは Higgs ボゾンのないもの、ある理論は元々 Higgs のようなものであるが Higgs とは完全に違うものをもっている理論もあります。よいでしょう、 --- これらの理論の全ての中に「Higgs のようなもの」がいつでも電弱対称性を破るのです。そうする中で、いつでも  $W^+$ ,  $W^-$ , と  $Z$  により食べられる Goldstone ボゾンを結果します。そして、いつもある種類の Higgs、もしくは Higgs のようなものを LHC で見つかることが期待されているのでしょう。

## One last request: vote to support this blog

最後のお願い:このブログを支持するために投票下さい



はい、皆さん、もしこのポストが気に入ったならば、(もしくは私の他のポストのいくつかが、例えば Feynman 図形のシリーズでもよいですが) 2011 年の Blogging Scholarship の私(Phillip Tanedo)に投票していただくようお願いいたします。投票は、約もう一週間あり、1 日一度投票が可能です。もし、私のポストをもう一度掲載するならば、もしあなたの読者や友人や Facebook の友人なども私に投票下さるよう依頼願います。過去 2 年の間、私は the National Science Foundation や the Paul and Daisy Soros foundation のおかげで、ブログを掲載することが可能でしたが、次の 1 年間はさらに the Blogging Scholarship のような追加の支援がないと、US LHC / Quantum Diaries を継続することができないかもしれないからです。

※ 「Feynman 図形シリーズ」は、小冊子(その1)の p6 の「Feynman 図形を描きましょう」を参照願います。

※ 「私(Phillip Tanedo)に投票して」は、  
<http://www.collegescholarships.org/blog/2011/11/18/2011-blogging-scholarship/>  
にリンクしています。

---

## Hierarchy problems and why electrons don't have infinite mass

### 階層性問題と、なぜ電子は無限大の質量をもたないのか

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by Flip Tanedo on 05 Sep 2009 at 10:05 am

なぜ物理学を高校で学ぶことが難しいのかの理由の一つには、しばしば、矛盾に満ちているように見えることがあるからです。いつもそのような矛盾のひとつが、私がいつも悩んでいる電子のエネルギーです。

古典物理学では、点電荷は意味を持ちません。

古典電磁気学は、電荷の構成するエネルギーは電荷の間の距離が離れば離れるほど弱くなることを教えてくれています。このことを単純に使うと、電荷を近づければ近づけるほどエネルギーが強くなります。2つの間の距離  $R$  だけ離れている電荷  $q_1$  と  $q_2$  に対して、静電気のエネルギーは次で与えられます：

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{R}$$

最初の分数はまさに全体にかかる定数で、しばしば  $k$  と書かれます。パイとイプシロンがあるので、なくなることはありませんが、この数はそれほど重要ではありません。二番目の分数が、**物理学**を教えてくれるものです。電荷  $q_1$  と  $q_2$  にを固定すると、わかることは、エネルギーは電荷を近づければ近づけるほど大きくなることです。

このことは、なんら方程式を見なくとも意味を持つでしょう：2つの電荷を近くに置けば置くほどに、互いに引き離すことが困難になります。

にもかかわらず、何か怪しいのです。もし、2つの電荷を任意に近くに置いたとすると、**任意に**大きなエネルギーを持つ結果となることを意味するのでしょうか？（2つの粒子を互いに力で相互作用させようとする、静電気からブラックホールを生成できるものでしょうか？）

実際、怪しさはより狡猾でさえあります：電子は電荷密度を持つ**点粒子**であると言えます。もし電子が電荷をもった球状の殻のような（ミカンの皮のような）電子を想定し、その大きさをゼロに縮めると、これは**無限大**の静電気エネルギーを持つ結果となることを意味しませんでしょうか？

もし、計算をすると（これは下級大学院生の共通の宿題です）、電荷  $e$ （電子の電荷）と半径  $R$  を持つ球状の殻の方程式は、ほとんど2つの電荷の式と同じでしょう：

$$E = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R}$$

殻の正味の効果は追加されたものは、1/2の因子です。すべての数にわたりつつかなくとも、殻の半径をゼロとすると（つまり「点粒子」と考えると）、エネルギーは無限大となるように見えます！これを電子の**自己エネルギー**と呼びましょう、つまり自分自身を押しやろうとする電子のエネルギーです。言い換えると、電気的な自分の場を逃そうとする電子のエネルギーです。

初等的物理学にありふれたあまりに平易な方法では、古典電磁気学は何か重要な間違いに陥ります。

## Electron self-energy vs. mass

### 電子の自己エネルギー vs. 質量

さて、ここで以前に学んだことを思い出してみましょう。前のポストで、私はエネルギーと質量の間の Einstein の関係式を説明しました。もし忘れていた人が入れば、レビューしてください。重要な点は、質量とは粒子に付属するポテンシャルエネルギーの一種と考えることができるということです。

※ 前のポストのリンク先は、現在、異なっていると思われます。このリンクは、Flip Tanedo さんの 13 Aug 2009 のタイトル「 $E=mc^2$ 」を指しているものと思われます。本小冊子の「 $E=mc^2$ 」を参照下さい。（私の注）

しかしながら、これがまさに電子の自己エネルギーなのです：電子の電荷に付随するポテンシャルエネルギーです。これは、電子の質量への寄与として考えることができます。皆さんの中には次のような意見の人もいます：質量はエネルギーの一種ではあるが、このことは質量がすべてのエネルギーを考えたことを意味しないと。よろしい、そう考えた人は、科学者のように考です！ここでの重要なことは、重力はエネルギーに対して反応することで、質量に対してではないということです。普通は、（光の速度のファクタによって）エネルギーの別のタイプに比べて、非常に質量エネルギーが大きいので、相互に交換可能なのです。しかし、無限大のポテンシャルの静電気エネルギーについて言っているこの場合は、確かに質量の中に含まれてしまっています。

このようにして、次の式が「有効な」電子の質量であると結論できます：

$$mc^2 = Mc^2 + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R}$$

まさに  $E=mc^2$  を使いエネルギーを書き出しました。ここに  $m$  は、観測される「有効な」質量で、 $M$  は「内部的」な質量で、静電気からの寄与を意味します。 $m$  が測ることができる質量であるのに対し、一方  $M$  は直接は決して測ることのできないある「非静電的」な寄与です。（これは量子物理学の「深い考え方」ですが、ここで入って行こうとは思いま

せん。)

電子の質量は測ることができていますので、(Thompson と Millikan の実験を通して) 質量はわかります；この式の左辺は 511 KeV です。実験の結果は、電子の特徴的な大きさを  $10^{-17}\text{cm}$  よりも小さいという限定もしていますので、このことを見るために、上記の半径  $R$  の制限としてこのことを使うことにしましょう。

さて、噛み砕いて計算すると、結果は静電気の項が  $10\text{ GeV} = 10\,000\,000\text{ KeV}$  のようになります。これは、方程式が実際おかしくなってしまう、次のような結果になります：

$$511\text{ KeV} = Mc^2 + 10\,000\,000\text{ KeV}$$

これは、 $Mc^2$  が 511 KeV を与える 10 000 の半分のレベルで 10 000 000 KeV をキャンセルせねばなりません。(これが負の寄与を与えねばならないという事実は、 $M$  が負と測定はされえないので、非常に不思議なことといえます。)

## Ridiculous fine-tuning: the hierarchy problem

### 全くとんでもないファインチューニング:階層性問題

この問題は、30 年以上にわたり理論家の背後にある問題のひとつであり、**階層性の問題**と呼ばれています。問題は電子の質量は極端に大きな 2 つの数のキャンセルに依存しているように見えるという問題です。これは大きな問題と思えないかもしれませんが。実際、これを物理学者が、理論上非常に好ましくないものと断定するには、長い時間を必要としました。

問題の骨子は、自然はどのようにしてこれら 2 つの大きな数がキャンセルするののかに対し非常に敏感であるように見えることです。2 つの大きな数が**うまくチューニング**されねばならないともいえるでしょう。電子の物理的な質量 511 KeV は、より高いスケールに依存しています。しかし、高校の物理で使う野球の球の計算が、これは量子補正を考えに入れることなく可能なのかという問うことに似ています。量子補正は、マクロスコピックな野球の物理に対して、非常に短い距離の物理を表しています。**前のポスト**で説明したように、ひとつのスケールでの物理が異なるスケールの物理には無反応であるべきなのです。同じことですが、非常に驚くべきことに、511 KeV の物理は、10,000,000 KeV の物理での量の間の量のファインチューニングに依存しています。

ある意味ではこれは審美的な問題です。自然は「ファインチューニング」され、電子の質量は不思議なキャンセルから来るということがよいのかもしれませんが。しかしこの非常に高いスケールの物理への感受性は、他の物理の階層性の例から出てきた直観には反しています。

## Quantum theory: antimatter to the rescue

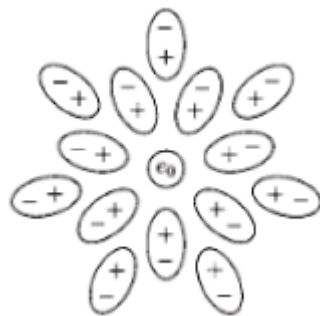
### 量子理論:救いの反物質

量子力学は「電子の質量の階層性問題」から救ってくれることが分かります。これは実際はあまり驚くべきことではありません：電子の質量よりも非常に小さいスケール ( $R \sim 10^{-17}\text{ cm} \sim 10\text{ GeV}$ ) を探索するために、古典物理を使うことからくる問題のように思えます。

しかしながら、私たちは量子力学が小さなスケールで有効であることを知っています。量子力学の結果は、時間的に非常に短い間だけ、エネルギーの保存則を破ることができることです。この「エネルギーと時間」の不確定性は、「位置と運動量」の Heisenberg の不確定性関係の類似で、有名な時代精神(zeitgeist)です。式を書きますと次になります。

$$\Delta t \Delta E \sim \hbar$$

短い距離スケールで量子電磁気学は、**仮想的**な電子-陽電子のペアを真空から生成し、再び消滅することを予言します。電子の主要な効果は、下記に図示するように、**実際の**電子の電荷の影響のために偏極しています：



イメージは Peskin と Schroeder から引用しました。

これらの仮想の電子-陽電子は生成消滅を繰り返し、電子の電荷を**不鮮明にする**結果となります。短い距離で電子を探索すれば、もはや電荷の固い球としてはふるまわなくなりませんが、電荷の雲を持った無限小の点粒子というように振る舞います。（このことと量子的な「電子の雲」を持った原子と混乱しないでください。これは似ていますが異なる現象です。）実際、距離を短くすると、電子-陽電子のペアはもともとの電子の電荷の「スクリーン（遮蔽物）」となるでしょうし、元の原子が期待よりも小さな電荷をもっていると考えられるでしょう。これは実際に有効で、物理学者は**繰り込み**と呼んでいます。（友人に語ることでできる夢のような単語です。）

このようにして、電荷をもった殻のおもちゃのモデルは、壊れてしまうでしょうし、電子が無限小の質量と持つべきと考えるところから救われるのです。

階層性問題は解決したのでしょうか？どのくらいのスケールで量子素描が有効となるのかを、描き出す必要があります。上の不確定性関係を使い、距離に変換して次を得ます。

$$\begin{aligned} d &= c\Delta t \\ &\sim \hbar/\Delta E \\ &\sim \hbar/2mc^2 \end{aligned}$$

エネルギーの不確定性を仮想的な電子-陽電子のペアの生成するために必要なエネルギー

量として書き出したときに； $m$  は物理的な電子の質量で  $\hbar$  は Planck 定数です（量子的揺らぎのスケールを表します）。実際の数を入ると、量子力学がそのスケールで適切となることがわかります。

$$R \sim 10^{-11} \text{ cm} \sim 10 \text{ KeV}$$

それで実際、量子効果は大まかには電子の質量自身のスケールで電子の質量への古典的な無限大の寄与をキャンセルすることがわかります。（この私の最良の知識となった議論は、最初に村山斉さんの超対称性についての [ICTP の講義](#) に明らかにされています。）

※ 「ITCP の講義」は、Arxiv:0002232 "SUPERSYMMETRY PHENOMENOLOGY" にリンクされています。IPMU の機構長、村山斉先生の 1999 年夏の ITCP での講義録

Higgs の質量階層性問題と何故 LHC に新しいものを期待するのか。

この「電子の質量」はまさしく **階層性問題** としてより共通に知られていることに似ていることがわかります。これがなぜ Higgs の質量がそれほどにも小さいかという疑問です。

ちょっと待ってください、私たちは Higgs ボゾンを発見さえしていません、、、何故その質量がそのように小さいと考えるのでしょうか？もし Higgs が存在するとしたら、上記の電子の例に似た自己エネルギーを持つことがわかります。Higgs の質量は任意に大きいのではないかと思えます。上記の例から、これの意味することがわかります：Higgs の質量は、大まかには前の理論を「完全にする」新しい物理のスケールであるべきです。

Higgs の質量をファインチューニングできなくするには、TeV スケールで発見されることを待っている新しい何らかの現象が存在すべきです。新しい物理のひとつの提案が **超対称性** と呼ばれるもので、その方法は「電荷パリティ対称性」が既知の粒子の反粒子を予言したことに非常に似た方法で、おのおの知られている粒子に「スーパーパートナー」粒子を（対応させて存在することを）予言します。特に上の例は、物質-反物質のペアの仮想効果は、質量への静電的な寄与をキャンセルするために電子の電荷を不鮮明にします。これとまさしく同じ方法で、仮想的な超対称性粒子は、Higgs の質量への発散する寄与をキャンセルします。

しかしながら、これは別のポストで言いたかったこととは、全く異なるストーリーとなっています。宿題として持ち帰りのメッセージは、物理学者がいつも新しい物理への動機として口にして「階層性問題」は、電子の自己エネルギーの古典的な問題のことばで理解可能です；高校の物理の学生でさえ、教科書から特定可能な問題なのです。

※ 『階層性問題』は、日本語版 wikipedia に『[階層性問題](#)』という項目があります。参照下さい。

## $E = mc^2$

[【次の記事】](#) [【前の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by [Flip Tanedo](#) on 13 Aug 2009 at 05:18 pm

先月に私が高校の教師のグループで「**天使と悪魔**」について話をしたとき、大きな討議のトピックのひとつに、Einsteinの有名な方程式の性質がありました。 $E=mc^2$ は、加速器衝突実験の全体のプログラムの中の心臓部ですので、私は、皆にとっても素晴らしいことであると考えました。

### $E=mc^2$ explained in one sentence

#### 一行で説明された $E=mc^2$

一行で、 $c$ を光速とすると  $E=mc^2$ はエネルギー  $E$  と質量  $m$  が何らかの同じものであり、光速は基本的な定数で、質量の単位とエネルギーの単位を変換することを可能にするものです。

### How do I use it?

#### どのようにこれを使うのでしょうか？

LHCの脈絡で、この方程式は大まかにどれくらいのエネルギーが、ある質量の粒子を生成することに必要かを教えてくれます。同じように、これは物質のある塊の中に、どれくらいのエネルギーが含まれているかも教えてくれます。たとえば、質量  $m$  の物質と同一の質量の反物質を消滅させると、 $E=2mc^2$  の光子の発散を引き起こすことを期待するでしょう。

### Okay. Is that really all there is to it?

#### よろしい、実際にこれのためのすべてが存在するのでしょうか？

実際には、共通の形式である  $E=mc^2$  はストーリーの全体ではありません。Einsteinの関係式の有名なバージョンは、実際は次の全体表現の近似です：

$$E^2 = m^2c^4 + p^2c^2$$

新しい文字  $p$  は運動量です。これらはすべて高校物理からの一般的な概念です：**エネルギー**は「作用」する能力で（つまり、周りのものを動かします）、**質量**はある物がどのくらい重いかの概念で、**運動量**は物体の運動を特徴づけます。この方程式は、これらのすべてが、光速を因子として、すべて何らかの「同じ」ものであることを教えています。

最初にやるべきことは、これが  $E=mc^2$  を再現するかどうかチェックすることで、確かに  $p=0$  とすると古い関係式を得ます。さらに一般的には、 $p$ の項を  $m$ の項よりも非常に小さくとると、古い方程式を近似として使うことが有効です。それでこの方程式が、少なくとも、有名な科学の本が教えてくれていることに合致してくるのです。



## Potential and Kinetic Energy

### ポテンシャルと運動エネルギー

この式 ( $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ ) を私が書きたい理由は、明白にエネルギーを力学的 (エネルギー) とポテンシャル (エネルギー) の部分に分けるからで、これは基礎科学から教わることです。このことを説明する前に、少し読者は驚かれたかもしれません：ポテンシャルが引き起こす重力的な、あるいは電氣的な背景のない場合に、何もない空間に浮いている **自由粒子** のポテンシャルエネルギーがどのくらいかを、どうやって得るのでしょうか？

それが質量のすべてです！  $m^2 c^4$  は粒子のポテンシャルエネルギーの一種です：原理的には、粒子を包み蓄えている宇宙から借りてきたエネルギー量です。物質と反物質を消滅させたとき、宇宙の中へこの質量ポテンシャルエネルギーを、実際に戻し解放することになります。

しかし待ってください！すると、 $p^2 c^2$  の項は力学的エネルギーのある種類であることを想定していることとなります。しかし、どの力学的なエネルギーが粒子のように見えるかを読者は知っています；それは  $\frac{1}{2} m v^2$  です。私は  $p = m v$  を知っており、もし、これをいれると全く正しくないことも知っています！

## Lies they taught you at school...

### 学校では嘘を教えていたのでしょうか...

よろしい。今、学校で教えている他の「嘘」を議論することができます：力学的なエネルギーの普通の表現は、近似でもあります！主要な方程式を振り返ります：質量項は  $c^4$  が掛け算されているのに対して、一方運動量の項は  $c^2$  が掛け算されているだけです。光速は私たちが慣れている普通の速度に比べて、大きな値ですので、力学的エネルギー項よりも、もっともっと大きくなるのがわかります。

高校で質量ポテンシャルエネルギーについて語るができない理由は、普通は質量エネルギーをエネルギーに変換することが不可能だからです；粒子の質量は (普通は) 変換しないからです。そのような変換を使う最初は化学であり、原子核のベータ崩壊のときです。(それで  $E = m c^2$  は「何故太陽が輝くのでしょうか？」ということに説明の一部です。)

力学的エネルギーの普通の形を回復するために、近似を使うことができます。数学的にはこれは Taylor 展開を行うことを意味します。(計算に慣れていない方のために：これはより小さな補正の項で、関数を展開する自然な方法です。) 物理学の中の質のよい部分に賢く Taylor 展開をするべきだということがあります。展開するためには、小さくしかも無次元の展開パラメータを必要とします (参照すべき点のない、次元をもった量的に小さなものでは意味がありません)。この問題では、私たちは  $p^2$  は  $m^2 c^2$  より非常に小さいので、エネルギーを次のように表現することが可能です：

$$\begin{aligned}
 E &= mc^2 \sqrt{1 + (p^2/m^2c^2)} \\
 &= mc^2 \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{p^2}{m^2c^2} + \dots \right) \\
 &= mc^2 + \frac{1}{2} mv^2 + \dots
 \end{aligned}$$

これです！明らかにエネルギーを質量ポテンシャルの項＋普通の力学的エネルギーの形として書き出しました．ここに・・・は $(p^2/m^2c^2)$ の因子よりも小さい項を意味します．これは実際、光速よりも非常に小さいいつもの速度の極度に小さな値です．

### Another short summary

#### 別の短いまとめ

結論は Einstein の関係式は粒子のエネルギーがその質量と力学的エネルギーの[二次]の和により与えられることを教えてくれます．運動量、エネルギー、質量は同時にみな同一のもの異なる形式なのです．粒子の質量は、粒子を重くすることで蓄えられるエネルギーで、一方、粒子の運動量は、粒子を動かすことに使われるエネルギーです．

### A hint of more advanced stuff

#### より進んだ人へのヒント

このポストの主要なアイデアは以上です．他方、私たちは仕事をしましたが、私はここに将来の物理学者（もしくはリクリエーションとして物理学をしている人）を誘うために少し言いたいことがあります．ここでの「完全な」エネルギー-質量-運動量と高校代数からの一連の方程式を比較することができ、Einstein のいわゆる「特殊相対性」を数学的に理解する動機を与えることができます．

$$\begin{aligned}
 r^2 &= x^2 + y^2 \\
 m^2c^4 &= E^2 - p^2c^2
 \end{aligned}$$

最初の式は半径の  $r$  の円の方程式で、第二の式は示唆深い方法でのエネルギー-質量-運動量の関係式を書き出したものです．双方の方程式の左辺は、定数です．

最初の方程式は、その座標の二乗の和が  $r^2$  に等しいならば、点 $(x,y)$  は半径  $r$  の円の一部です．実際、点  $(x,y)$  は変化することができますが、しかし円の上にとどまっているために、関係を維持するような方法で変化せねばなりません．もし  $x$  が増加するとは  $y$  減少するはずですが；そして  $x$  でも  $y$  も非常に大きくは増加／減少しません、さもないと方程式が満

たされません。（つまり、点  $(2,y)$  は、いかなる  $y$  に対しても、半径 1 の円の上にはありません。）

第二の方程式を同じように理解しましょう。さて私は粒子の質量は定数であると言っています。これは粒子の基本的性質です。（「相対論的な質量」という、これを見る方法としては捨て去られた古い考え方がります。）粒子のエネルギーと運動量を変換することが可能ですが（つまり弾性衝突を通して）、しかしそれは上の関係式を満たす方法で反感すべきです。もし運動量が増加すると、エネルギーは減少します。そうですねえ、このことは運動量の直観的な理解から意味を持っているのでしょうか。これはまた、 $p^2=0$ 、 $E^2=m^2c^4$ により与えられる最小エネルギーが存在することを教えてくれます。すなわち、粒子が止まっているとき、エネルギーはまさに質量ポテンシャルになります。

よろしい。これは私が極端に込み入った方法で始めたようにおもわれます。重要な点は：円の方程式は、長さを定義する方法です。点  $(0,0)$  から  $(x,y)$  への距離は、 $r$  により与えられ、点の「半径」の長さです。長さの定義は（計量、メトリックと呼ばれます）、幾何学の特別な種類を定義します。計量の対称性は幾何学の対称性です：たとえば、円の回転対称性は、2次元の Euclidean 平面の回転対称性であることを明白に言っています。

同じように、書き換えられて質量-エネルギー-運動量の方程式はまたこの運動量エネルギー空間内の「長さ」の定義でもあります。おかしなことにマイナス符号を持っています。関係式は次のように、時空のことばで書くことができます（空間と時間の結合された座標）。

$$s^2 = c^2t^2 - x^2$$

$t$  は時間で、 $x$  は空間内の距離で、 $s$  はある定数（ $r$  もしくは  $m^2c^4s$  のような）で固有距離と呼ばれます。特殊相対論では、自由粒子の軌跡は拘束条件の方程式に従わねばなりません。この「計量」の対称性（これは保存される長さを定義します）を Lorentz 変換といいます。これらの対称性により定義された空間のことを Minkowski と呼びます。（それに対して私たちの慣れ親しんでいる空間を Euclidean 空間と言います）まさに点が定数の半径の円の中を回ることを起こす回転のように、Lorentz 変換は固有距離を保存する時空の回転です。特に、意味することは、次の注目すべき事実です：

**Space and time are in some sense the same thing.**

**空間と時間は、ある意味で同じものです。**

もちろんこのステートメントは数学の脈絡で理解する必要があります。もちろん時間と空間は異なります：私たちは空間の中で前へ進んだり後ろへ行ったりすることができますが、しかし時間の中では一方向しか行けません。しかし数学的には、空間と時間の間で回転させることが可能です。これは詳しくは、特殊相対性の重要な結果の原点です：長さの収縮や時間の遅れ！

Euclid 空間内のある角度での回転の類似が、Minkovski 空間内のブーストであることがわかります。この名前は特に関連する座標系を変化させる関係を明確に与えるために特別に選ばれました。

いづれにせよ、このことは良い本やオンライン参照で見つけることのできて、特殊相対性

のファンタスティックな話・「ウサギの穴」を開けます。基本的なレベルで数学的な話を研究しようとする人にとっては、Sander Baisの本 [Very Special Relativity](#) で充分とは推奨できません。高校物理の背景を持つ人は、[The Feynman Lectures on Physics](#) 適切な章を読むことが可能でしょう。

※ 「Very Special Relativity」は、<http://www.hup.harvard.edu/catalog.php?isbn=9780674026117> Harvard 大出版の書籍へリンクしています。

※ 「The Feynman Lectures on Physics」は、<http://www.feynmanlectures.info/> へリンクがはられています。

※ 高校物理からは Feynman 物理が良いといっているのだと思います。

## Solar neutrinos, astronaut ice cream, and flavor physics

### 太陽ニュートリノ、宇宙飛行士のアイスクリーム、フレーバ物理

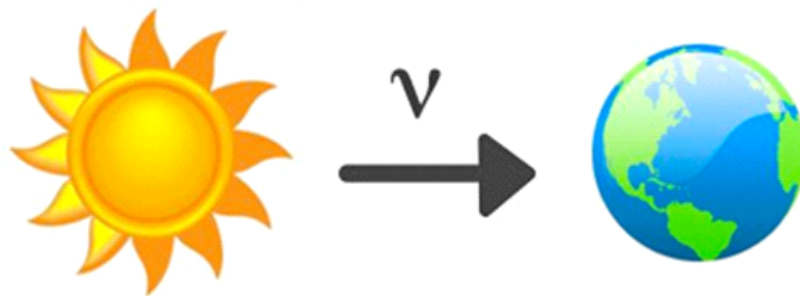
[【前の記事】](#) [【目次】](#)

Posted by Flip Tanedo on 02 Aug 2010 at 03:27 pm

私は、フレーバ物理を導入する良い方法を考えています --- この話題は、一般の読者には、驚くほど微妙な話題です。これに関する私の最良のものを以下に述べます。

#### 太陽ニュートリノ問題への招待 An invitation: the solar neutrino problem.

1960年頃に物理学者は、彼らが太陽が光り輝くことを起こす核反応の非常に良い理解に達したと考えました。彼らのモデルの多くの予言のうちの一つが、太陽から放出される多くのニュートリノです。



科学者のモデルとは、その予言と実験的な評価が同じようになりますので、次の段階は、これらの太陽ニュートリノを実際に数えることとなりました。もちろん、読者は、ニュートリノが非常に弱くしか相互作用しなく、このこと検出が非常に困難なものにしていることを知っています。

※ 「ニュートリノ」は、小冊子(その1)の p32 の「ニュートリノ」を参照願います。

そうですねえ、天文学者の企画が2つ、60年代に Homestake 鉱山でそのような実験の準備が進められたときに（そこでは現代のニュートリノ検出器のテンプレートが既にありました）、彼らは、太陽ニュートリノが期待されるニュートリノの流れの第三番目のみしかカウントできないことを発見してショックを受けました。その時点では、立派な科学者ならば、立ち返り、彼らの実験をチェックし、体系的な間違いを見つけ出し、それから基礎となっているモデルの前提をチェックすることに立ち返えるでしょう。重要な段階というよりもこれらを何とか説明して、この矛盾は知られている効果により説明はできないので、**太陽ニュートリノ問題**ということにしましょう。

※ [Homestake Mine](#) Homestake の実験 1960年代から計画され、1970年から1994年まで太陽からのニュートリノを検出する実験が続けられた。この中で「太陽ニュートリノ問題」が提起され、この後、Kamiokande、SuperKamiokandeでのニュートリノ探求が継承された。ここに至り、太陽ニュートリノ問題は、混合の問題として解決された。同時に、小さいながらニュートリノが質量を持つことも確認された。

※ 第三の期待されるニュートリノの流れ 2002年の Nobel 賞受賞者 Ray Davis さんの検出方法が記載されている。

※ 「[太陽ニュートリノが期待されるニュートリノの流れの第三番目](#)」は [symmetrymagazine](#) の「logbook: solar neutrinos」へリンクしています。

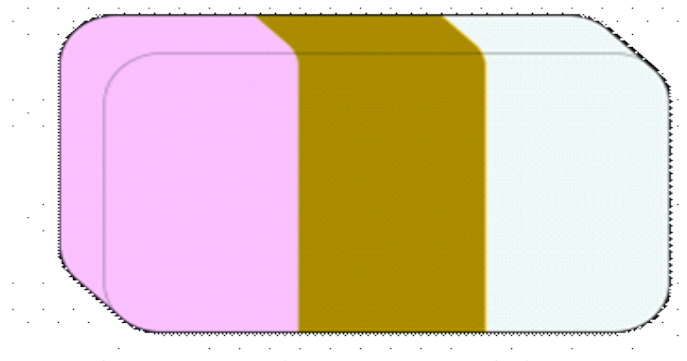
誰が与えたのでしょうか？

## 太陽ニュートリノから宇宙飛行士のアイスクリーム

この難問に答える前に、回り道をして、私がかかなり前ですが、最初に [国立航空宇宙博物館](#) を訪れました。私が 10 歳くらいの時でした。私は展示されている大きな飛行機が非常に冷たいものと考えました。がしかし、私がギフトショップでした発見したこと以外に比較するものは何もないのです：それが宇宙飛行士のアイスクリームです。（何度か思い返して、どうしたら科学者に慣れるのだろうと考えました。）

※ 「国立航空宇宙博物館 [National Air and Space Museum](#)」は、[National Air and Space Museum](#) の H.P. へリンクしています。Washington D.C. Smithsonian にある博物館です。

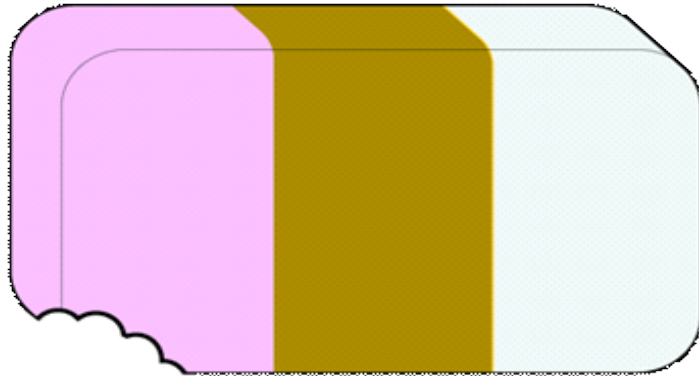
知らない人には、宇宙飛行士のアイスクリームはまさにフリーズドライのアイスクリームで、ユニークなチョークのような材料でした。私の好みはナポリタンで、これはイチゴとチョコレートとバニラの組み合わせでした。このようなものの図がこれです：



宇宙飛行士のナポリタンアイスクリームバーは、次に私が頑張って説明することに非常ににているでしょう。通常は、アイスクリームバーは、イチゴ、チョコレート、バニラのうちの一色を期待するかもしれませんが、代わってナポリタンバーはこれら全部の混合になっています。

実際に、この類似の特別な準備をすると、もし各々のバーのうちの一つだけを食べると、各々の一つフレーバのバーの香りかきしないようになっていますが、3つのタイプのナポリタンバーがあることを想像するかもしれません。このように、3つのナポリタンバーは、3分の1の香りのバーを混ぜ合わせたものです。

さて、ここが最大の重要点です：ナポリタンバーが3つの香りの混合として一体化されているにもかかわらず、一箇所をかじったときには、一つの香りのみ味わうことができます。



そうです、継ぎ目に沿ってかじると2つの香りを混ぜることができるかもしれませんが、--- がしかし、それらを忘れた場合には、これらの注意深い類似を壊しますので、私は一緒にしたいのです。

### これらはニュートリノの何を言っているのでしょうか

さて、これを太陽ニュートリノ問題に結び付けてみましょう。太陽ニュートリノ問題に付随した誤った前提は、ニュートリノは一つの香りのバーというよりもナポリタンバーの状態に近いことが判明しました。問題の中のこの”フレーバ”はニュートリノを電子のようなものと、ミューオンのようなものとタウ粒子のようなものと同一視することです。

言い換えると、前もって”一体化した”ニュートリノで太陽と地球の間を伝搬するニュートリノは、電子／ミューオン／タウのようなニュートリノの混合です。これによって意味するものは、それらがこれらの3つの異なるフレーバの**量子 superposition** であるということで、詳しくは **Schrodinger の猫** が、異なる物質的状態の **superposition** であることと同じです。

※ 「Schrodinger の猫」原文は英語版の Wikipedia にリンクが張られていて、ここでは日本語版の「シュレーディンガーの猫」にリンクしています。

さて、ここが整然とした部分です：ニュートリノがナポリタンバーとして伝搬していたとしても、それらは、限られたフレーバ（電子、ミューオン、タウ）として相互作用ししないのです。言い換えると、ニュートリノが太陽で生成されたとき、それらは限られたフレーバを生成されます。それらはまた、地球でも限られたフレーバでしか検出されません。しかし、それらが自分で伝搬しているときにはいつでも、それらは3つのフレーバの混合なのです。

物理学者は、そこには”相互作用の基底”（電子、ミューオン、タウニュートリノ）があり、”質量基底”（伝搬するときの **superposition**）があるというでしょう。

これで太陽ニュートリノ問題の解くことができます。太陽の中の核反応は（ミューオンやタウではなく）電子で、それで電子ニュートリノを生成します。同様に、地球上の検出器は、電子ニュートリノのみを検出します。なぜならば、電子からなる分子により構成されているからです。しかしながら長い距離のニュートリノの飛行の間は、全て3つのフレーバのナポリタンの混合となっているのです。このようにして、太陽ニュートリノが検出器へ到達したときに、3分の1のみが検出可能で、このことがニュートリノのカウントの欠損を説明します。

実際、この 1/3 の因子の説明は、**大げさな嘘** でした。... これはまさに正確に数値的に一致します。この点は混合が全体のニュートリノの分数しか観測することができないことを引き起こ

す原因ですが、特別な分数になるのは大きな数の時に依存しています。このことを以下に議論しましょう。

## ナポリタンニュートリノとそれらの質量関係

もちろん、この解は理論と実験の何十年に渡る前進からきていて、多くの赤いニシン方向を意味します。これについては議論しません（しかしこのことは実際の科学のなすキーとなる部分です！）量子場の理論の理解からの事実で特に重要な事実があります：

任意の適当な距離を通して伝搬する粒子は、有限な質量の状態です。

さらに進んでいる読者には、この理由は質量項が、明らかに可解でありそれについて摂動理論が実行できる作用の二乗部分の項であるからです。

何故ニュートリノがナポリタンの混合として伝搬するのかは、それらが有限の質量を持っている混合物であることです。ある純粋な電子フレーバのニュートリノは有限の質量を持っていないということがわかりますが、むしろ質量のある **superposition** であることが分かります。エネルギー保存則は単一の質量状態は長い（すなわち、非量子的）な距離を飛行することを可能とすることを要求します。このようにして、ニュートリノ混合の発見（そして従って太陽ニュートリノ問題の解決）は、1998年にニュートリノが小さいがゼロではない質量を持つという発見と協力して発見されました。この発見は、まさに US/Japan の日本の [スーパー Kamiokande 検出器](#) の別な日の偉大な科学的なストーリーです。

※ 「[Super-Kamiokande](#)」原文は英語版 Wikipedia に、ここでは日本語版 wikipedia ヘルリンクを貼りました。

## Feynman ルールをもう一度振り返る。

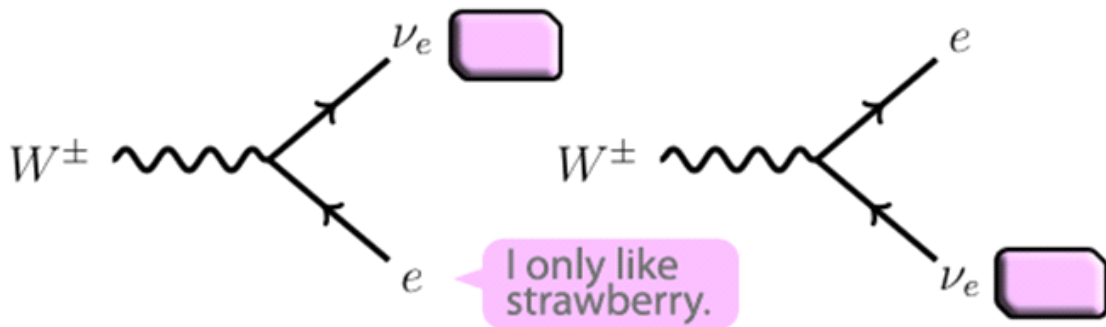
W ボゾンがフレーバを変換する効果を媒介することを思い起こして下さい。以前のポストでは、読者は mori と Stephen が正しく指摘していたように、私は W ボゾンの相互作用について少し誤っていました。これは「フレーバ vs. 質量」状態が出てくることを避けるために故意の選択でした。さて、ニュートリノフレーバ状態の間の（電子、ミューオン、タウ）対ニュートリノ質量状態（ナポリタン混合ではまさに 1, 2, 3 と言います）の間の差異に慣れてきたのですが、しかし、W ボゾンの Feynman ルーツをより正確にするために改定しましょう。

※ 「W ボゾンがフレーバを変換する効果を媒介する」は、小冊子（その 1）の p36 の「W ボゾンと混合」を参照願います。

※ 「mori と Stephen が正しく指摘したように」は「W ボゾンと混合」のコメントで、指摘事項のことを指しています。

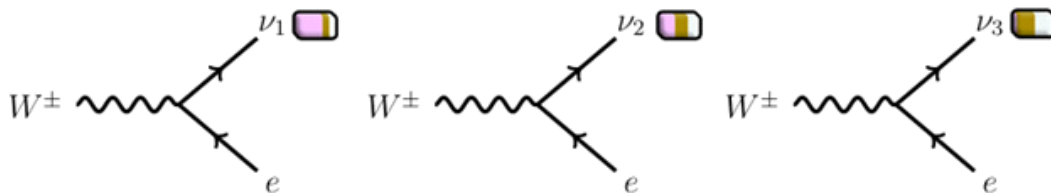
フレーバ基底から始めましょう。明らかにするために私は、電子ニュートリノをイチゴアイスクリームに結びつけます。これらの単一の香りの状態は、実際の他の粒子と相互作用する状態です。特に、電子は、電子ニュートリノとのみ相互作用するでしょう。これらの相互作用状態の項では Feynman ルールは単純です：





我々はただ電子の相互作用のみ描きます。そこにはミューオンニュートリノと相互作用のみするミューオンニュートリノ（チョコレートの香り）があり、同様にタウと相互作用のみするタウニュートリノ（バニラの香り）があります。しかし Feynman ルールは単純であるにもかかわらず、フレーバの基底はあまり有効ではありません。なぜならば、これらの状態は相互作用の瞬間のみに存在するだけだからです。ニュートリノが飛び去る瞬間、それは3つのうちの一つの質量状態をもち、ニュートリノ-1、ニュートリノ-2、ニュートリノ-3と呼ばれるでしょう。これらをナポリタンアイスクリームバーと表現します。

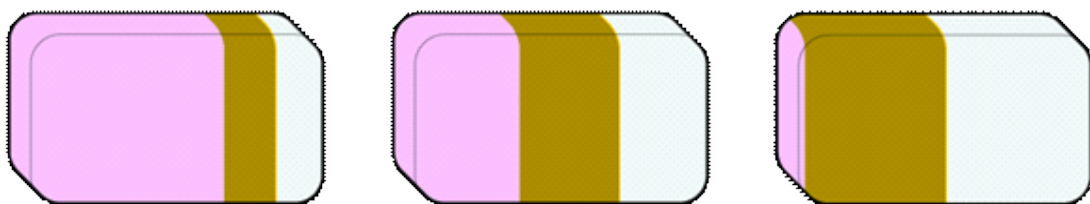
これらの質量状態の項で Feynman ルールを描きましょう。言い換えると、Feynman ルールを粒子がある距離を飛行するチャンスを与えられたことを前提にした Feynman ルールを描くのです。ここでは電子は、3つの質量状態のどれとも相互作用が可能です。



この理由は、電子が電子ニュートリノ、つまりイチゴの香りとのみ相互作用をすることです；しかし3つの質量状態( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ )の各々は同じ、電子（イチゴ）を含んでいます。ここで、W 相互作用の中で示されたフレーバの混合が示されたこととなります：電子  $e$  は  $\nu_1$  とだけではなく、全ての質量固有状態ニュートリノとも相互作用するのです。

## どのくらい混合するのでしょうか？

質量状態ニュートリノの全てが各々のフレーバと等しい量で相互作用すると信じる理由はありません。事実、特別な混合が次のようになっていることもあります：



これらの比率はニュートリノ質量の特別な値の設定です.

- $\nu_1$  は  $2/3$  の電子ニュートリノと  $1/6$  のミューオンニュートリノとタウニュートリノ質量
- $\nu_2$  は 3 つのひとしい混合
- $\nu_3$  は程んどがミューオンニュートリノとタウニュートリノで占められています.

これは何故、元来の **Homestake** の実験が期待されるニュートリノの  $1/3$  を検出するのであろうかという疑問を導くことに注意します. 理由はこれが、もし各々の質量状態が各々のフレーバについて等しい分数となっている値が期待されるからです. この答えは：これが一致するのです！

検出されるニュートリノの全体の数の特別な分数は、意味している方程式の多くの因子にいぞんしています. これらの因子は次を意味します：

- ニュートリノの質量の間の差異
- 地球と太陽の間の距離
- 太陽によって放出されるニュートリノのエネルギー（あるいはエネルギーのスペクトル）
- 太陽の中でニュートリノがどのような相互作用したか
- ニュートリノ検出器の反応するエネルギーのレンジ

別の太陽ニュートリノ実験では、検出されたニュートリノの数の異なる値のレンジが発見されましたが、一度これらの効果を考えに入れるとそれらはみな整合していて、ニュートリノセクタを統制する基本パラメータに光を当てます.

## クォーク混合の類似

私は特別にはまだ、Feynman ルールのクォークを導入しておりませんが、読者はクォークと光子、W ボゾン、Z ボゾンとの相互作用を単にレプトンの Feynman ルールをとり、電荷をもったレプトンとアップタイプのクォークへと置き換え、ニュートリノをダウンタイプのクォークと置き換えることで得ることができます.

特に、3 つの up/down タイプのフレーバペアがあります.

- アップクォークとダウンクォーク
- チャームクォークとストレンジクォーク
- トップクォークとボトムクォーク

W ボゾンはこれらの族の間の混合を再び引き起こし、一方、全ての他の相互作用は単にアップ/ダウンのペアの中に留まっているだけです. クォークの間の混合はレプトンの間の混合ほどドラマチックではないですが、ハドロンの効果（すなわち強い力）により、クォークのフレーバの計測は札付きに困難となります. （専門家に対して：Fermilab の D0 検出器の最近の興味深いクォークの話の流れを更新してありますので、それ [this post at Resonaances](#) 参照ください、さらに、ICHEP からのポスト [this post from ICHEP](#) も、広い状況のレポートについて同じ著者により書かれていますので、参照ください. )

※ Resonaances については、<http://resonaances.blogspot.com/2010/07/this-year-cp-violation-in-bs-meson.html> を参照下さい.

※ ICHEP は

<http://ichep2010.blogspot.com/2010/07/trouble-with-flavor.html>

を参照下さい。

## 最後の注意事項

このニュートリノ混合のパターンは、面白い名前がついています。 **tri-bimaximal mixing** 三重-双最大混合という名前で、研究の興味は、この構造がどこから来るかを理解することにあります。（4面体の対称性との関係があるように思われます。）

※ 「4面体の対称性」、原文は英語版 Wikipedia の「[Alternative Group](#)」を、ここでは日本語の「[交代群](#)」をリンクします。

検出される混合の量はあまりに多くの実験パラメータに依存していますので、基本となる線により区別される多くの異なるニュートリノ実験があります（元と観測者の間の距離）。太陽と地球の間の距離の変更はできませんので、固定した距離の検出装置を準備することで、核反応から放出されるニュートリノを検出することが、良い方法になります。

もうひとつのニュートリノの検出方法は、宇宙線が大気の上層部の分子と反応したときに、大気からきます（LHC のエネルギーで発生します!）。そして、地球上に粒子のシャワーのように降り注ぎます。

ここでまさしく、何名かの物理学者が太鼓判を押してくれるような本当に良い疑問は：**何故、電荷をもったレプトンのようにニュートリノ混合は起きないのか?** というものです。（言い換えると、なぜダウンクォーク混合は発生して、アップクォークでは起きないのか？）それらは何か同じように振る舞わないのでしょうか？この答えは少しテクニカルであることが分かっていますが、重要な点は分かっています、時間スケールが効果を不適切なものにしているのです。それらについて、テクニカルな背景は [arXiv:0706.1216](#) を参照します。

※ [arXiv:0706.1216](#) Do charged leptons oscillate? E. Kh. Akhmedov さんのプレプリントで、「電荷を帯びたレプトン振動が詳細に議論されていて、弱い相互作用を通して生成された電荷を帯びたレプトンの状態の特別な性質に関して議論してされている。この分析からニュートリノの理論の重要な結果が得られる」と abstract にある。

以上です。