

# ゲージ相互作用からヒッグス粒子を超えて

森 俊 則 (東京大学素粒子物理国際研究センター mori@icepp.s.u-tokyo.ac.jp)

## 1. ゲージ相互作用の検証と確立

平成元年は、日本の電子・陽電子コライダー TRISTAN が米国の SLC と欧州の LEP に世界最高エネルギーの座を譲った年である。LEP と SLC では電弱相互作用のゲージボゾンである  $Z^0$  粒子が初めて大量に生成され、複数の国際チームによる実験がその詳細研究を行った。LEP はその後衝突エネルギーを約2倍にし (LEP-II)、もう1つのゲージボゾン  $W^\pm$  粒子を対生成してさらに実験を続けた。

素粒子に働く電磁気力、弱い力、強い力の3つがすべてゲージ相互作用であるというのが、素粒子の標準模型である。ゲージ相互作用はゲージボゾンによって媒介され、素粒子の種類には関係なくその電荷によって普遍的に働く。その普遍性は、電荷の保存則の基になるゲージ対称性が保証している。電磁気力には電荷が1種類しかない ( $U(1)$  対称性) が、弱い力には2種類の弱電荷 ( $SU(2)$ )、強い力には3種類のカラー電荷 ( $SU(3)$ ) がある。

LEP/LEP-II, SLC で  $Z^0$  と  $W^\pm$  の性質が何年もかけて非常に精密に測定され、そうして得られたありとあらゆる測定量が標準模型の予想と見事に一致したことで、これらの粒子がまさにゲージボゾンであることが確立された (図1)。

## 2. 量子効果で高エネルギーの世界を見通す

測定結果を理論と精密に比べるためには、輻射補正が不可欠である。輻射補正にはループを通して重い粒子の効果が

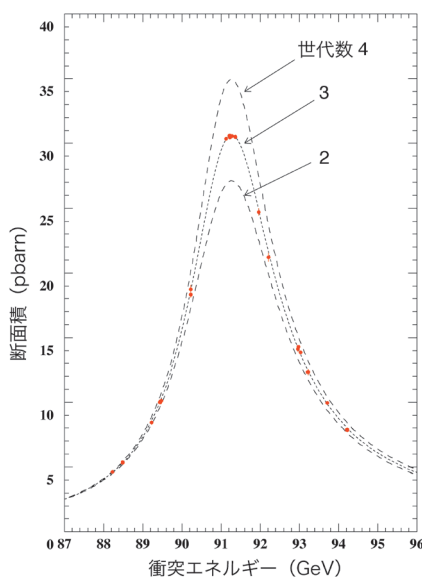


図1 LEP の OPAL 実験による測定値 (赤点) と標準模型による予想 (点線) との比較の例。この  $Z^0$  粒子の生成断面積の測定から素粒子の世代数が正確に3であることが示された。

が入るため、実験と理論を注意深く比較することにより、未知の重い粒子について知見を得ることができる。実際に LEP の測定結果からそのような量子効果が観測された。それは当時まだ発見されていなかったトップ・クォークによるもので、質量を算出すると想像以上に重いことがわかった。その後米国の陽子・反陽子コライダー Tevatron で、その予想通りの質量を持つトップ・クォークが発見され、量子効果まで含めて標準模型の正しさが証明された。

LEP では、電弱相互作用に加えて、 $Z^0$  がハドロンへ崩壊する事象を使って、強い相互作用の結合定数もこれまでにない高い精度で測定された。結合定数は量子効果により、測定するエネルギーによって値が変わる。そこで、LEP で測られた3つの相互作用の結合定数をずっと高いエネルギーまで外挿してやると、プランクエネルギーの少し手前あたり ( $\sim 10^{16}$  GeV) で1つの値に統一されることがわかった (図2)。これは、宇宙が誕生して間もない頃に、これら3つの相互作用が1つに統一されていた可能性を示唆している (大統一理論)。宇宙初期には、おそらく5種類以上の電荷を持つたった1つのゲージ相互作用しか存在していなかったと考えられる。ただし大統一が起こるためには、クォークや電子などのフェルミオンとゲージボゾンを統一する「超対称性」という新しい対称性が必要となる。

## 3. 自発的破れを実験で探る

さて、対称性によりゲージボゾンは質量がゼロでなくてはならず、現実の  $Z^0$ ,  $W^\pm$  が水素原子の百倍近い質量を持つことと矛盾する。そこで考えられたのがゲージ対称性を

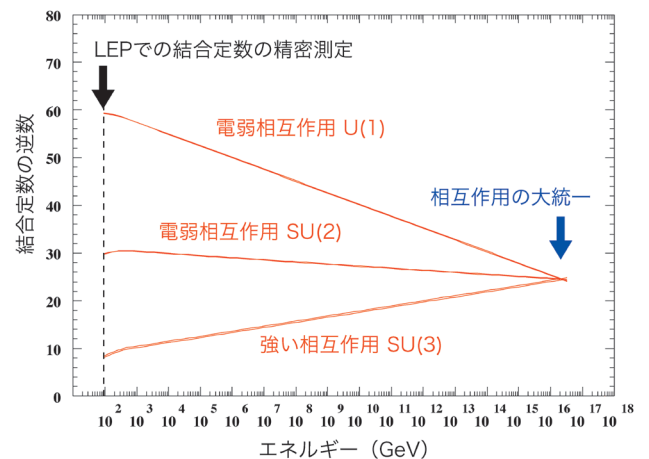


図2 LEP での実験で精密測定された3種類のゲージ相互作用の結合定数を、超対称粒子の存在を仮定して高いエネルギーへくりこみ群方程式により外挿すると、プランクエネルギーの少し手前で大統一される。

自発的に破る仕組みである。標準模型では、1種類のヒッグス粒子によってこれを実現する(ヒッグス機構)。自発的破れと呼ぶが、実際には理論の対称性は破れない。

ヒッグス機構により、ヒッグス粒子の場が宇宙に一樣に充満する。これは、光子の場である電場が宇宙に充満するようなものである。この状態を宇宙の「真空」と考える。もし電場が充満していれば荷電粒子に力が働くが、スカラーであるヒッグス場が充満した真空中では、粒子の動きに抵抗する力が働く。これが質量として観測される。

こうして質量を得たゲージボソンは、荷電粒子が電波(光子)を放出するように、ヒッグス粒子を放出する。この現象を使ってLEP/LEP-IIでヒッグス粒子が探索された。有望な理論である超対称性を入れた模型では、何種類かあるヒッグス粒子のうちの1つは必ず $Z^0$ と同程度かそれより軽く、したがって間違いなく発見されるものと期待された。質量がゼロの可能性も含めて徹底探索し、超伝導加速空洞が音を上げる限界の衝突エネルギーまで上げて実験を行ったが、残念ながらヒッグス粒子は見つからなかった。

LEP-IIは2000年末に運転を停止し、その地下トンネルの中に陽子・陽子コライダーLHCの建設が始まった。米国の陽子・陽子コライダーSSCは建設途中で中止となったため、自発的破れの研究はLHCの完成を待つことになった。

#### 4. 深まる素粒子の世代の謎

CP対称性(粒子・反粒子の対称性)の謎を解明するため、TRISTANは1998年にKEKB加速器として生まれ変わり、米国のPEP-IIと共にBメソンを大量生成するBファクトリーとして動き出した。小林・益川理論の予想通り大きなCPの破れが観測された。だが現在の宇宙の粒子と反粒子の存在量の違いを説明するには十分でないと考えられる。

小林・益川理論は、3世代の素粒子があれば自然にCPが破れることを示したもので、なぜ3世代あるのか、という根本的な疑問には答えない。異なる世代の素粒子は質量が違うだけであり、質量が生まれる仕組みを理解する必要がある。実はクォークや電子などのフェルミオンもカイラル対称性のため質量がゼロであり、ゲージボソンと同様に対称性の自発的破れを通して質量を持つと考えられている。標準模型では、その役割も同じヒッグス粒子が担っており、すべての謎がこのたった1つの粒子に集約される。

蛇足だが、TRISTANからKEKB、最近稼働を始めたSuperKEKBと、世界最先端の加速器を通して獲得・継承してきた技術力は、国内での物性・医療・材料開発等への加速器応用の発展に大きく貢献してきたと言えるだろう。

#### 5. ヒッグスから真空・時空の研究へ

2008年よりLHCが稼働し、2つのゲージボソンに崩壊する事象が観測されて、2012年に遂にヒッグス粒子が発見された。その質量は $Z^0$ より4割近く重く、量子効果から

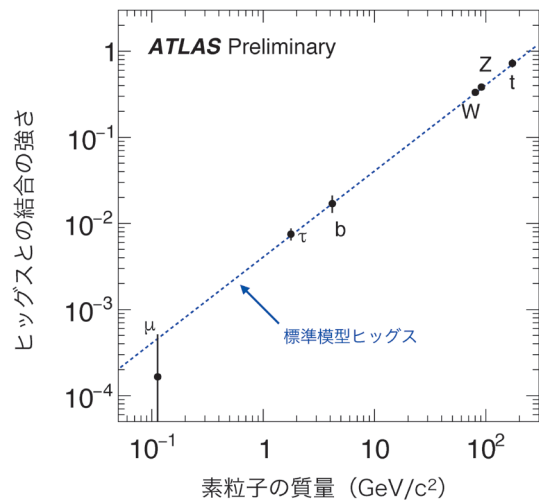


図3 LHC実験で測定されたヒッグス粒子との結合の強さは、標準模型の予想通りゲージボソンもフェルミオンもその質量に比例していることがわかった(ATLAS CONF Note 2018-31より引用)。

の予想と矛盾しないが、超対称模型で許されるほぼ上限である。懸命な探索にも関わらず超対称模型の新粒子がまだ見つかっていないのは、このことと関係するかもしれない。

その後フェルミオンである $b$ クォークや $\tau$ レプトンへの崩壊も観測され、ゲージボソンとフェルミオンのすべてに質量を与えているという標準模型の予想と矛盾しないことがわかった(図3)。ただし、別種のヒッグス粒子の存在や自発的破れの仕組みを調べるためには精度が全然足りず、LHCの性能を大幅に改善して研究を続け、さらに電子・陽電子リニアコライダーILCの登場が必須である。

ヒッグス粒子の研究はまさしく、我々が住む宇宙の「真空」の研究である。自発的破れのない宇宙には銀河も星もなく、宇宙の複雑さはすべてこの「真空」が生んだものだ。そこにはインフレーション宇宙やダークエネルギーの種となる未知の「場」も潜んでいるはずで、ヒッグス粒子の研究はこの先、時空の研究へと繋がっていくだろう。

この記事に記した実験成果は、海外実施のものも含め、どれも日本のグループが入った国際チームによるものである。ニュートリノ研究も考慮すると、平成時代を通して、研究の中心が米国から大きく欧州・日本へ動いた感がある。

最後に、ここに載せた平成時代の研究によって受賞が決まったノーベル物理学賞は、1999年'tHooft-Veltman(電弱相互作用)、2004年Gross-Polizer-Wilczek(強い相互作用)、2008年南部(自発的破れ)、小林・益川(CP破れ)、2013年Higgs-Englert(ヒッグス粒子)と、どれも平成より前の理論研究が平成の実験によって検証・証明されて受賞に至ったものである。理論研究がやや混沌としてきた現在、令和時代には、理論で予想もしないことが、ILCなど日本がリードする実験で多く発見されることを期待したい。

(2018年11月29日原稿受付)