

トップクォークの質量測定

Georg Weiglein

トップクォークは今まで知られている中で抜きんで重い素粒子である。

その質量を正確に測定することは、自然界の基本的な相互作用を解明するのに意味ある問題である。

原文：From the top ...

Nature Vol.429(613-615) 10 June 2004; <http://www.naturejpn.com/digest>

物質の基本的な構成要素は、私たちが知る限りにおいて、クォークとレプトン、およびこれらの粒子間の相互作用の媒体となる「力を媒介する粒子」からなる。クォークとレプトン(後者には電子が含まれる)は3つの世代に分類される。第2および第3世代の粒子は質量がかなり大きいことをのぞけば第1世代の粒子の完璧なコピーのように見える。トップクォークはすべてのクォークとレプトンの中で最も重く、素粒子物理学におけるいくつかの最も差し迫った問題の中心となっている。例えば、第3世代に属するトップクォークは第1世代に属する電子の30万倍も重いのはなぜか。非常に異なる質量をもつ以外全く同じ性質を持つクォークが2つ別に存在するのはなぜか。そして、質量自身の起源は何かなどである。

トップクォークの質量と相互作用についての正確な情報は、実験データと比較して理論を検証するうえで解決の鍵となる材料である。Nature 6/10号 p.638¹で、DØ共同研究体はシカゴ近郊にあるフェルミ国立加速器研究所のテバトロン陽子反陽子衝突型加速器で得られたデータを用いたトップクォーク質量の、より正確な測定結果を報告している。この実験結果とDØ共同研究体および姉妹関係にある実験装置CDFによって以前に得られた測定結果とを合わせると、トップクォークの新しい世界平均²は $178.0 \pm 4.3 \text{ GeV}/c^2$ となった。ここで、 c は光の速度であり、この単位で表したときの陽子の質量は約 $1 \text{ GeV}/c^2$ である。以前の世界平均³と比べると、質量の代表値は約 $4 \text{ GeV}/c^2$ 高くなっている。実験誤差は約15%減少し、基本的な物理的性質がよりはっきりと見えるようになった。

自然の基本的な原則を解明する上で、トップクォークの果たす役割には2つの面がある。ひとつには、これまで理解されていなかったといってもよい新しい物理学の探求におい

て、トップクォークは質量が大きいために最も重要な対象となっている。例えば、長い間仮説のままであるヒッグスボソンは、素粒子物理学の標準模型において未だに見つからない最後の要素であり、他の粒子とその粒子の重さに比例した強さで相互作用すると予測されている。したがって、重いトップクォークの物理的性質はヒッグスボソンとの相互作用に大きく影響されると思われる。また、トップクォークの質量は多くの観測できる物理量を予測する上で鍵となるパラメーターである。測定結果と予測の小さなずれが新しい物理学のきっかけとなり得るので、トップクォーク質量の実験誤差に起因する予測の不確かさが大きいと、新しい物理学を実験によって見つけることが難しくなる。

いくつかの精密に測定された物理量の値は、標準模型が予測するように、トップクォークの質量 M_t の2乗に比例する。これらの依存関係はかなり弱く、ヒッグスボソンの質量は未知のままである(これまでのところでは、 $114.4 \text{ GeV}/c^2$ より低い質量の値は実験によって除外されている⁴)。それゆえ、すべての入手可能なデータに対する標準模型の予測に、いわゆるグローバルフィットを用いると、 M_t について情報はより明確になり、ヒッグスボソン質量のありそうな値がより狭い範囲に制限される。実際、 M_t の代表値が $4 \text{ GeV}/c^2$ 変わったことによって、ヒッグスボソンの質量上限値は $30 \text{ GeV}/c^2$ 以上変化し、(信頼水準95%で) $251 \text{ GeV}/c^2$ 上がった。この上限値は、現存するあるいは将来作られる衝突型加速器によるヒッグス粒子探索の実験戦略に大きな影響を与える。

ヒッグスボソンが予測された範囲内に見つかれば、トップクォークの発見と同様に、標準模型にとって新たな成功となるだろう。歴史的には、トップクォークの質量は電子-陽電子衝突型加速器LEP(ジュネーブのCERN)と

電子-陽電子衝突型加速器SLC(スタンフォードのSLAC)で得られた豊富な精密測定の結果に対するグローバルフィットによって予測された。トップクォークは1995年にテバトロンで発見され、その質量は予測された範囲に完璧に一致していた。

標準模型は多くの実験検証に合格しているといっても、基本的な相互作用の究極理論にはなり得ない。これは標準模型が既知の4つの相互作用のうち、重力相互作用以外の3つ、つまり電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用しか記述していないという事実から明らかである。また、標準理論には理論的に不十分な点がいくつかあり、未回答の問題が多く残っている。おそらく、標準模型を拡張する最も注目される枠組みは超対称性である。超対称性理論はすべての既知の粒子にパートナーが存在すると予測する。超対称性によって拡張された標準模型は、重力を無矛盾に含み、すべての基本的な力を統一的に記述するであろう、より基本的な高エネルギー理論の低エネルギー側の極限になるかもしれない。標準模型の超対称性による最小限の拡張である「MSSM」は各々のクォークとレプトンに対応する超対称パートナー粒子の対、力を媒介する粒子に対応する超対称パートナー粒子、そして5つのヒッグスボソンからなる。

超対称模型では、対称性がより高いため、最も軽いヒッグスボソンの質量は直接予測できる(対照的に、標準模型ではヒッグス質量は自由なパラメーターであり、グローバルフィットを介して間接的に決められるだけである)。予測される質量はトップクォークの質量に非常に敏感で、 M_t^4 の関数になるという、標準模型の場合よりもさらにはっきりとした M_t に対する依存性をもつ。図1にMSSMにおける最も軽いヒッグスボソンの質量の予測^{5,6}を示す。トップクォークの質量が $178.0 \pm 4.3 \text{ GeV}/c^2$ に変わった影響が明らかに見てとれる。ヒッ

▶ グスボソンが直接実験によって検出されれば、1%程度よりよい正確さで質量を測定できるようになるだろう。現在得られるよりもさらに正確な M_t についての精密な情報は超対称性によって拡張された標準模型におけるヒッグス物理に極めて重要である⁷。

ヒッグス物理に対する大きな影響に加えて、トップクォークの質量はMSSMの他の多くの予言、例えばトップクォークの超対称パートナー粒子の質量と両者間の相互作用の強さに影響を及ぼす。MSSMや他の標準モデルの拡張とより高いエネルギースケールの基本理論とを結びつけることが最終的な目標である。この結果、自然界のすべての力を単一の基本的な相互作用に統合する根拠が得られるかもしれない。衝突型加速器による実験で我々が直接利用できるエネルギースケールで得られる測定結果はさらに高いエネルギースケールに外挿できるが、このためには M_t の精密な情報が信頼できるものであることが極めて重要である。外挿が十分に精密であれば、統一された力自身の構造に関する手がかりさえ得られるかもしれない。

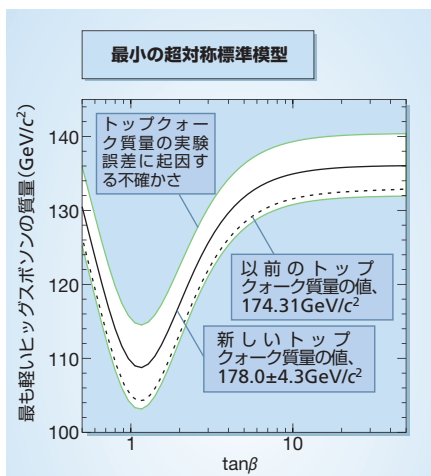


図1 最小の超対称標準模型(MSSM)における最も軽いヒッグスボソンの質量。予測された値^{5,6}をパラメーター $\tan\beta$ の関数として示す。 $\tan\beta$ はMSSMにおける異なるヒッグスボソン間の関係を表している。(他のMSSMパラメーターは結果として生じるヒッグス質量を最大にするように選んだ。)予測されるヒッグス質量は計算に使われるトップクォーク質量の値に敏感である。実線はDØ共同研究体¹によるトップクォーク質量の新しい測定結果を用いた予測を示す。白いバンドはトップクォーク質量の実験誤差に起因する予測の不確かさを示す。波線は新しい測定がされる前の状況を示す(以前の実験誤差 $\pm 5.1\text{ GeV}/c^2$ は示されていない)。トップクォーク質量の新しい値に基づいて、最も軽いMSSMヒッグスボソンの質量の上限は約 $140\text{ GeV}/c^2$ となった。

さらなる進歩には新しい実験データ、つまりヒッグスボソンや超対称パートナー粒子のような新しい粒子の発見と、根元的な理論に対する感度の高い検証を可能にする観測可能な物理量の精密な測定の両者が必要になるだろう。これらの中でも、トップクォーク質量測定の正確さを向上させることは最も重要であり続けると思われる。テバトロン現在の運用フェーズ(「Run II」として知られている)で取得されるデータによって、 M_t の実験誤差は $2\sim 3\text{ GeV}/c^2$ に減少するであろう。また、CERNで建設中の大型ハドロン衝突型加速器⁸では、この正確さは誤差 $1\sim 2\text{ GeV}/c^2$ にまで向上すると思われる。

しかしながら、 M_t の最も精密な値は線形電子-陽電子衝突型加速器で得られるだろう。このような装置は目下のところ計画段階にあり、次の十年間の中頃に運用に入るかもしれない。線形衝突型加速器によって得られるデータによってトップクォーク質量の正確さは十倍向上する可能性がある。その時になって初めて、トップクォーク質量の実験誤差に起因する不確かさは十分によく掌握され、ヒッグスボソン、超対称パートナー粒子、その他の新しい物理について次の十年間にLHCで集められたデータが完全に活用されることになるだろう。

Georg Weigleinはダーラム大学素粒子物理現象学研究所 (the Institute for Particle Physics Phenomenology, Department of Physics, University of Durham, Durham DH1 3LE, UK) に所属している。e-mail: georg.weiglein@durham.ac.uk

1. The DØ Collaboration *Nature* **429**, 638–642 (2004).
2. The CDF Collaboration, the DØ Collaboration and the Tevatron Electroweak Working Group. Preprint at <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0404010> (2004).
3. Hagiwara, K. *et al. Phys. Rev. D* **66**, 010001, 271–433 (2002).
4. The ALEPH, DELPHI, L3 and OPAL Collaborations and the LEP Working Group for Higgs Boson Searches *Phys. Lett. B* **565**, 61–75 (2003).
5. Heinemeyer, S., Hollik, W. & Weiglein, G. *Comput. Phys. Commun.* **124**, 76–89 (2000).
6. www.feynhiggs.de
7. Heinemeyer, S., Kraml, S., Porod, W. & Weiglein, G. *J. High Energy Phys.* JHEP09(2003)075 (2003).
8. Beneke, M. *et al. in Standard Model Physics (and More) at the LHC* (eds Altarelli, G. & Mangano, M.) 419–529 (CERN, Geneva, 1999).
9. Heuer, R.-D. *et al.* Preprint at <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0106315> (2001).
10. Abe, T. *et al.* Preprint at <http://arxiv.org/abs/hep-ex/0106056> (2001).
11. ACFA Linear Collider Working Group. Preprint at <http://arxiv.org/abs/hep-ph/0109166> (2001).

Nature Publishing Group makes an IMPACT



インパクトがある雑誌は、

Nature です。

2002年度、*Nature* のインパクト・ファクターは30.432でした。

もちろんmulti-disciplinaryジャーナルのナンバー1です。

nature publishing group 