

テバトロン実験でヒッグス粒子にどこまで迫れるか

金 信弘

筑波大学 数理物質科学研究科 物理学専攻

305-8571 茨城県つくば市天王台 1-1-1

e-mail: skim@hep.px.tsukuba.ac.jp

増淵 達也

東京大学 素粒子物理国際研究センター

113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1

e-mail: tatsuya@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

日本語抄録

米国フェルミ国立加速器研究所の陽子反陽子衝突型加速器テバトロンを用いて行われている大型国際共同実験CDFとDØでのヒッグス粒子探索の結果と今後の展望について報告する。

1 はじめに

宇宙を構成する物質の質量がどのようにして生じているのかを解明することは素粒子物理の最重要課題の一つである．素粒子標準理論の基本仮説ではヒッグス粒子が真空中に凝縮して素粒子に質量を与えるが，ヒッグス粒子は未だ発見されていないので，この仮説は検証されていない．その発見を目指して，多くの高エネルギー衝突型加速器実験が行われてきた．その中で現在稼働中の加速器が，米国シカゴ郊外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あり，また 2009 年より稼働予定の加速器が，スイス・ジュネーブにある CERN (欧州原子核研究機構) の LHC 陽子・陽子衝突型加速器である．

テバトロン加速器は 1987 年から重心系エネルギー 1.8 TeV で本格稼働し，その後の改良により 2001 年からは重心系エネルギー 1.96 TeV で稼働している，世界最高エネルギーの加速器である．CERN の LHC 加速器は 2009 年から重心系エネルギー 14 TeV を目指して本格的な衝突実験を開始する予定である．テバトロン加速器を用いて行う CDF 実験は日米科学技術協力事業の一つとして進められてきたもので，日米伊の国際共同実験として 1979 年に測定器建設が始められ，現在はアジア，米国，ヨーロッパから 60 の研究機関が参加する国際共同実験として実施されている．日本からは筑波大学を中心に 9 機関が参加している．CDF 実験では 1994 年にトップクォーク生成の証拠を見つけ，1995 年にはテバトロンでのもう一つの実験 DØ と共にトップクォークの生成を確認した¹⁾．2001 年からテバトロンは運転を再開して，現在までに CDF と DØ はそれぞれ積算ルミノシティ約 4fb^{-1} 相当のデータを収集した．これは，それ以前に収集したデータの約 40 倍の量である．CDF と DØ は

テバトロンで大量に生成したトップクォークと W ボソンの質量を精密に測定して、ヒッグス粒子の質量を間接的に測定する精度をあげてきた。この測定により、ヒッグス粒子の質量をかなり狭い範囲に限定した。

また直接探索でもヒッグス粒子の質量に対する制限が得られている。LEP2 実験 (CERN での重心系エネルギー 209 GeV の電子陽電子衝突実験) はすでに実験を終えているが、2003 年に 95% の信頼度でヒッグス粒子の質量の下限值 $114 \text{ GeV}/c^2$ を得ている²⁾。一方、テバトロン実験でも直接探索が行なわれていて、2008 年 8 月に $1.1 \sim 3 \text{ fb}^{-1}$ のデータを用いた解析結果が報告されている。テバトロン実験でのヒッグス粒子の間接質量測定、直接探索の最新の結果を以下に述べる。

2 ヒッグス粒子の質量の間接測定

トップクォーク発見から 10 年あまり経った現在、テバトロンでは大量に生成したトップクォークを用いて、質量起源のヒッグス粒子に対する知見を広げつつある。素粒子標準理論では W ボソンの質量 M_W 、 Z ボソンの質量 M_Z 、ワインバーグ混合角 θ_W の間には、 W 、 Z ボソンの質量測定値に対する輻射補正項 Δr を含めて $M_W^2 / (M_Z^2 \cos^2 \theta_W) = 1 + \Delta r$ という関係が成り立つ。その補正項で支配的なパラメータがトップクォークの質量とヒッグス粒子の質量である。この関係式の中で Z ボソンの質量 M_Z とワインバーグ混合角 θ_W はこれまでに高精度で測定されているので、トップクォークと W ボソンの質量を精密に測定すると、標準理論の枠内でヒッグス粒子の質量を間接的に測定することができる。

2.1 W ボソンの質量測定

2007 年に , CDF は 0.2fb^{-1} のデータを解析して , W ボソンの質量の測定結果を報告した³⁾ . W ボソンが荷電レプトン ℓ (ミュー粒子 μ または電子 e) とニュートリノ ν に崩壊した $W \rightarrow \mu\nu, e\nu$ 崩壊候補事象を約 11 万個選び出し , 荷電レプトンの横運動量 p_T , ニュートリノの横運動量に対応する消失横エネルギー E_T^{miss} , W ボソンの横質量 M_T を測定した . ここで横運動量とは陽子・反陽子ビームに垂直方向の運動量成分であり , W ボソンの横質量は $M_T = \sqrt{2p_T E_T^{miss}(1 - \cos \Delta\phi)}$ で定義される . $\Delta\phi$ は荷電レプトンとニュートリノの運動量ベクトルの偏角の差である . これら p_T, E_T^{miss}, M_T の分布を W ボソン生成事象と背景事象から予想される分布(モンテカルロ法を用いたシミュレーションで求められた分布) の和と比較することによって W ボソンの質量を測定した結果 , $M_W = 80.413 \pm 0.048 \text{ GeV}/c^2$ を得た . この結果とこれまでに LEP2 実験およびテバトロン実験で得られている結果を合わせて $M_W = 80.398 \pm 0.025 \text{ GeV}/c^2$ を得た .

2.2 トップクォークの質量測定

2008 年夏に , CDF と DØ はそれぞれ 2.8fb^{-1} のデータを解析して , 合計約 1800 個のトップクォーク対生成候補事象を選び出して新しいトップクォークの質量の測定結果を報告した⁴⁾ . 標準理論ではトップクォークはほぼ 100 % の確率で $t \rightarrow b + W$ のようにボトムクォークと W ボソンに崩壊し , W ボソンは軽いクォーク対や荷電レプトン + ニュートリノのモードで崩壊する . ここで崩壊により生成されたクォークは , 他のクォークあるいは反クォークと結合して , 多くのハドロン粒子が親のクォークの進行方向に出ていく

粒子群，すなわち，ジェットとして観測される．したがってトップクォークの質量を測定するために，最終状態が以下の3つのいずれかの条件を満たすことを要求して，候補事象を選ぶ．

- (1) 高エネルギー ($p_T > 20 \text{ GeV}/c$) の荷電レプトン (μ 粒子または電子) が2個と，大きい消失横エネルギー ($E_T^{miss} > 20 \text{ GeV}$) と，2つ以上のジェットがある (ダイレプトン・チャンネル)，
- (2) 高エネルギーの荷電レプトンが1個と，大きい消失横エネルギーと，4つ以上のジェットがある (レプトン + 4ジェット・チャンネル)，
- (3) 6つ以上のジェットがある (マルチジェット・チャンネル)，

特に荷電レプトンが1個または0個の(2)(3)の場合は，さらにジェットの1つあるいは2つがボトムクォークの特徴を備えていることを要請し，背景事象の混入する割合を低減する．ボトムクォーク・ジェットを同定するために，ボトムクォークを含むハドロンは寿命が少し長く，生成点から数 mm 離れた所で崩壊することを利用して，その崩壊点が陽子・反陽子衝突点から十分離れていることを要請する．トップクォークの質量を測定するためには，まず各候補事象ごとにトップクォーク対の崩壊で生成したジェットと荷電レプトンのエネルギー，運動量及びニュートリノの横運動量を測定して，トップクォークの質量を再構成する．次にこの質量分布をトップクォーク対生成事象と背景事象から予想される質量分布 (モンテカルロ法を用いたシミュレーションで求められた質量分布) の和と比較することによってトップクォークの質量を決定する．このようにしてトップクォークの質量 $172.4 \pm 1.2 \text{ GeV}/c^2$ を得た．

以上，トップクォークと W ボソンの質量測定結果および電弱相互作用の測定結果から，標準理論でのヒッグス粒子の質量が間接的に決定され， $M_H = 84^{+34}_{-26} \text{ GeV}/c^2$ となった，また，直接測定された下限値を考慮に入れて上限値を求めると 95% の信頼度で $185 \text{ GeV}/c^2$ となった⁵⁾(図 1)．この結果，直接測定と合わせて $114 \text{ GeV}/c^2 \sim 185 \text{ GeV}/c^2$ という範囲にヒッグス粒子の質量を限定した．

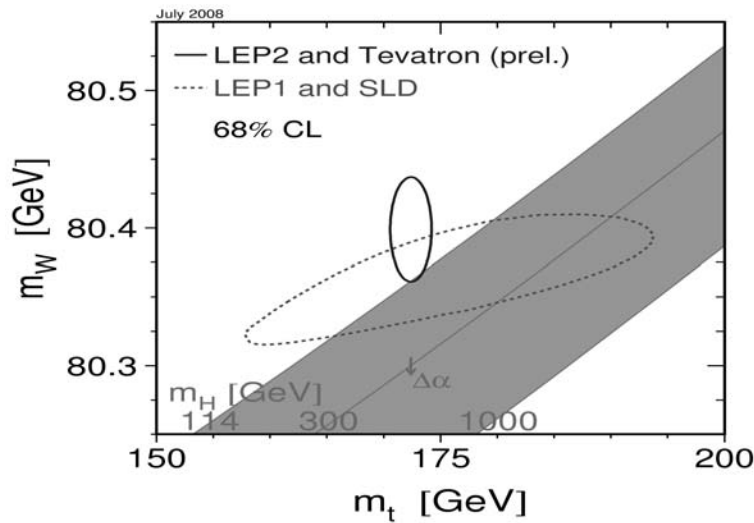


図 1: トップクォークの質量と W ボソンの質量はヒッグス粒子の質量が決まると一定の曲線にのる関係をもつ．テバトロンでの CDF 実験と $DØ$ 実験で測定したトップクォークの質量と CDF, $DØ$, LEP2 実験で測定した W ボソンの質量が 68% の信頼度で実線で囲まれた領域にある．

3 ヒッグス粒子の直接探索

現在までの実験で限定されたヒッグス粒子の質量範囲は，テバトロン実験でも直接探索することができる．ここでは唯一稼動しているテバトロン実験での直接探索の特長を説明し，その最新結果を報告する．また，今まさに始まろうとしている LHC 実験でのヒッグス粒子探索との比較につ

いても述べる．

ヒッグス粒子の主要な崩壊モードはヒッグス粒子の質量によって変わるので，解析手法も質量によって異なる．比較的質量が低い領域 ($M_H < 135\text{GeV}/c^2$) では，主にボトムクォーク対 ($b\bar{b}$) に崩壊し，高い領域 ($M_H > 135\text{GeV}/c^2$) では主に W ボソン対に崩壊する．ヒッグス粒子の生成については，グルオンが対消滅しクォークのループダイアグラムを介してヒッグス粒子が生成されるグルオン融合と呼ばれるチャンネルが最も生成断面積が高く，次いで W, Z ボソンを伴って生成されるチャンネルが高い．さらに生成断面積が低いベクターボソン融合と呼ばれる2個のウィークボソンを介してヒッグス粒子が生成されるチャンネルがある (図2).

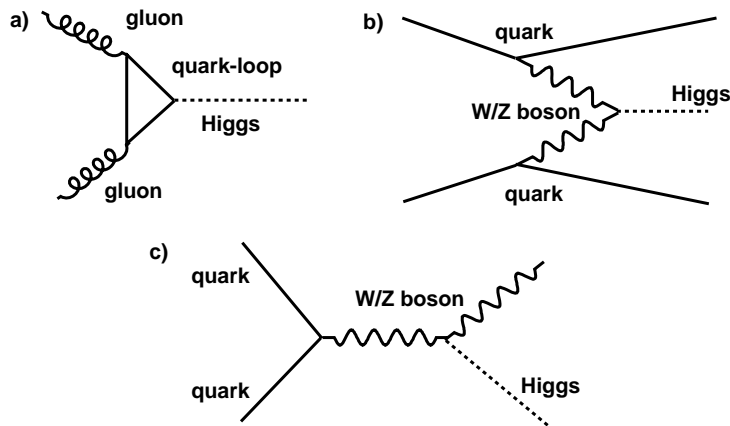


図 2: ヒッグス粒子生成反応. a) グルオン融合過程，b) ベクターボソン融合過程，c) W/Z 粒子随伴生成過程

これらヒッグス粒子の生成と崩壊からテバトロン実験で有望とされる探索チャンネルはヒッグス粒子の質量によって以下のようにまとめられる．

- 低い質量領域 ($M_H < 135\text{GeV}/c^2$)

$$- q\bar{q}' \rightarrow WH \rightarrow \ell\nu b\bar{b}$$

- $q\bar{q} \rightarrow ZH \rightarrow \ell\ell b\bar{b}$
- $q\bar{q} \rightarrow ZH \rightarrow \nu\nu b\bar{b}$ (W/Z 粒子随伴生成過程, 図 2c)
- 高い質量領域 ($M_H > 135\text{GeV}/c^2$)
 - $gg \rightarrow H \rightarrow WW \rightarrow \ell\nu\ell\nu$ (グルオン融合過程, 図 2a)
 - $qq' \rightarrow qq'H \rightarrow qq'WW \rightarrow qq'\ell\nu\ell\nu$ (ベクターボソン融合過程, 図 2b)

低い質量領域でグルオン融合の探索チャンネルが使えないのは, ヒッグス粒子がボトムクォーク対に崩壊するために, このチャンネルが終状態にレプトン ℓ, ν を含まないからである. テバトロン実験では, 主な背景事象がグルオン交換による QCD 事象 (ヒッグス事象と比べて生成断面積は $\sim 10^{10}$ 倍) であるので, その背景事象を大幅に減らすために終状態にレプトンを要求することが解析の最初の段階として重要である.

一方 LHC 実験は, 陽子・陽子衝突なので陽子・反陽子衝突であるテバトロン実験と比較すると W, Z ボソンを伴うチャンネルは, 始状態でクォークと反クォークが必要であるため生成断面積が比較的小さい. そのため, LHC 実験でのヒッグス粒子探索で有望なのはグルオン融合とベクターボソン融合のチャンネルとなる. テバトロン実験と同じく QCD 背景事象を減らすために, LHC 実験ではヒッグス粒子がタウレプトン対かフォトン対に崩壊するモードが低い質量領域で盛んに研究されている.

これらの崩壊モードはテバトロン実験でも研究されているが, ヒッグス粒子の発見感度は W, Z を伴うチャンネルより低い⁶⁾. しかし, テバトロン実験での実際のデータを用いた背景事象の理解やモンテカルロ・シミュレーションの理解は, LHC 実験でも参考になるので重要な意義を持つ.

以下に，現在のテバトロン実験の解析手法と結果を低い質量領域と高い質量領域に分けて述べる．

3.1 低い質量領域でのヒッグス粒子探索

この領域では，ヒッグス粒子はボトムクォーク対に崩壊するモードが支配的である．ボトムクォークはジェットとして観測される．ボトムクォーク・ジェットを効率よく同定することが，この質量領域でのヒッグス粒子探索において重要な鍵である．そのため，ヒッグス粒子探索に最適化された，ボトムクォーク・ジェット識別法を適用する．

また，現在のテバトロン実験において検出器や背景事象の理解がかなり進んできているため，生成崩壊の遷移行列要素を用いる手法やニューラルネットワーク等，多変数を用いてヒッグス信号事象と背景事象を識別し，発見感度を向上させる統計手法が，ほとんどの解析で用いられている．しかし高度な統計手法を用いても，現在のテバトロンで収集されたデータ量ではこの質量領域でヒッグス粒子の兆候が検出されなかった．よって各々のチャンネルにおいてヒッグス粒子の生成断面積に対する上限値を決定した．ヒッグス粒子の質量 $115\text{ GeV}/c^2$ において生成断面積に対する上限値は各々のチャンネルにより異なり，CDF 実験では標準理論予言値の 5～12 倍⁷⁾，DØ 実験では標準理論予言値の 8～11 倍⁸⁾であった．

3.2 高い質量領域でのヒッグス粒子探索

高い質量領域では，ヒッグス粒子は W ボソン対に崩壊するモードが支配的であり，QCD の背景事象を減らすために両方の W ボソンがレプトンに崩壊するチャンネルが有望である．この解析では， W ボソンから崩壊したレプトン

を効率よく選ぶことが重要である．そのため CDF 実験では，荷電レプトンの選択条件を解析モード毎に最適化している．図 3 は 2 つの W ボソンから崩壊した荷電レプトンの角度相関を表わす偏角差の分布である．信号事象と背景事象を識別するために，このような信号事象に特徴的な分布をニューラルネットワークの変数として用い発見感を改良している．

この質量領域でも，現在のテバトロンのデータ量ではヒッグス粒子の兆候は見られなかったため，ヒッグス粒子の生成断面積に上限値を与えている．この領域では，探索チャンネルの数は少ないが発見感度がよいため，ヒッグス粒子の質量 $160\text{GeV}/c^2$ において生成断面積の上限値は CDF 実験では標準理論予言値の 1.5 倍⁹⁾， $D\phi$ 実験では標準理論予言値の 3.0 倍¹⁰⁾ となった．

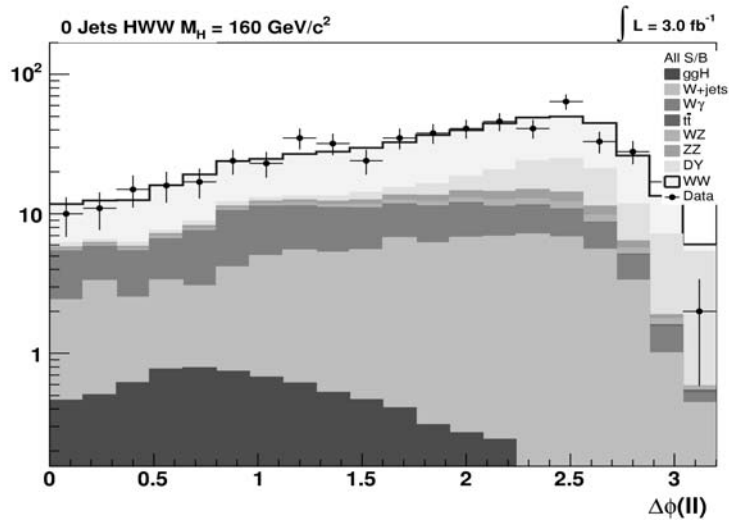


図 3: CDF 実験での 0 ジェット事象の 2 つの W ボソンから崩壊した荷電レプトンの角度相関．信号事象（最暗部の分布）では，スピン 0 のヒッグス粒子から 2 つの W ボソンに崩壊するので，ヘリシティを保存させるために 2 つの荷電レプトンは同方向に飛ぶ傾向がある．

3.3 CDF 実験と DØ 実験を合わせた結果

現在のテバトロン実験の解析において、各々の実験ではヒッグス粒子の存在の証拠を掴むにはまだデータ量が足りない。しかし CDF 実験と DØ 実験の結果を統計的に合わせることで発見感度を向上させることができる。各々の実験では標準理論の予言値に届かなかったが、CDF と DØ 各実験の解析結果を統合することによってヒッグス粒子の質量 $170 \text{ GeV}/c^2$ で実験の上限値は理論予言値以下に達した¹¹⁾。これは質量 $170 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子の存在を 95% の信頼度で否定したことになり、また 90% の信頼度では質量 $163 \sim 176 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子の存在を否定したことになる (図 4)。このようにテバトロン実験ではじめて、ある質量のヒッグス粒子の存在を直接探索によって棄却することに成功した。一方、低い質量領域ではチャンネル数が非常に多いために、正確に各々のチャンネルを統計的に合わせることは複雑であり、現在最終的な確認作業が進められている。

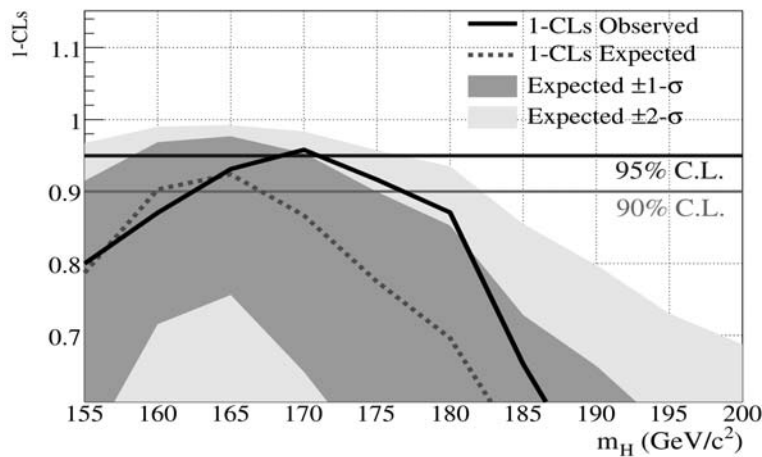


図 4: ヒッグス粒子存在否定の信頼度をヒッグス粒子の質量の関数で表した。実線が実測値、点線がシミュレーションで求めた期待値である。95%の信頼度でヒッグス粒子は $170 \text{ GeV}/c^2$ には存在しないことを示している。

4 今後の展望

LHC 実験でヒッグス粒子が発見される前に、テバトロン実験がどこまでヒッグス粒子に迫れるかについての展望を述べる。

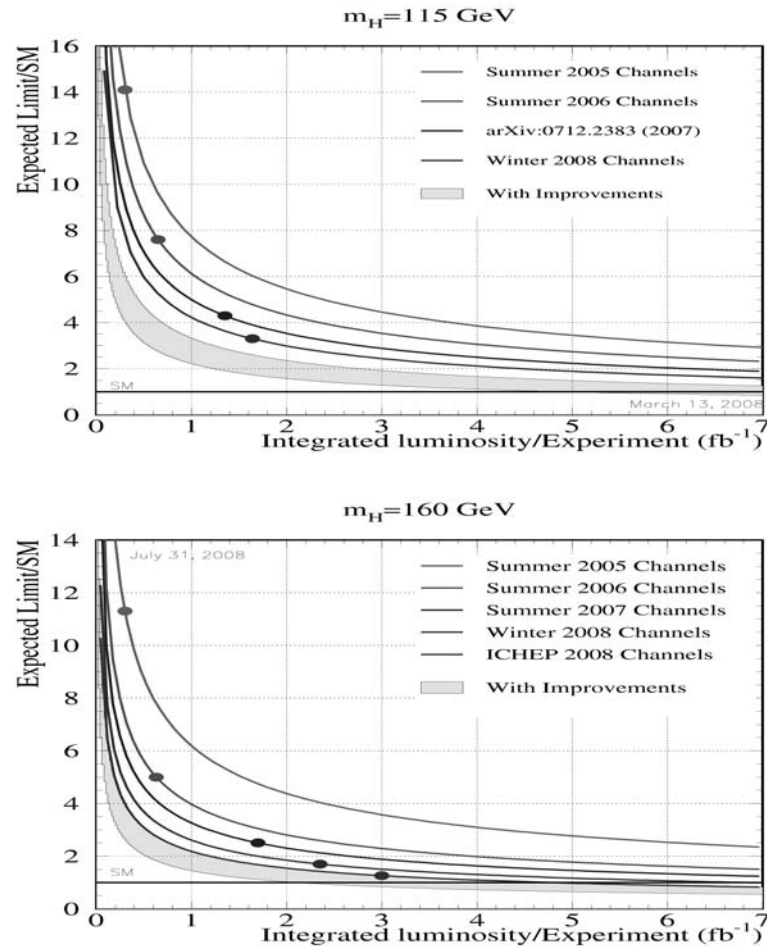


図 5: テバトロンで測定されたヒッグス粒子の生成断面積の上限値 (理論予言値との比) とその予想値を積算ルミノシティの関数として示した。ヒッグス粒子の質量が $115 \text{ GeV}/c^2$ の場合 (上), $160 \text{ GeV}/c^2$ の場合 (下)。下方の帯領域は今後物理解析によって改善されたときの結果の予想範囲。 $115 \text{ GeV}/c^2$ の結果には今夏の結果は含まれておらず、今後さらに感度が改善されると期待できる。

図 5 は、テバトロン実験で得られたヒッグス粒子の生成断面積に対する上限値の推移である。低い (高い) 質量領

域の代表点として $115(160)\text{GeV}/c^2$ を示している。テバトロン実験は、実線で示されるデータ量の増加からの予想以上に解析の改良によって発見感度を向上し続けている。

低い質量領域では、今後データ量の増加だけでは存在を否定することは困難であるが、物理解析にまだ改善の余地が残されており、最高で領域の下線まで発見感度を高めることが期待できる。解析を改善するために、新しいヒッグス崩壊モードでの探索、荷電レプトンの選択条件の拡大、ボトムクォーク・ジェットの同定効率とエネルギー分解能の向上などを目指した解析が現在進められている。この発見感度において、テバトロン実験でもヒッグス粒子の質量領域 $115\text{GeV}/c^2$ に制限を付けることは十分に可能である。

高い質量領域では、テバトロンで今後2009年9月までに取得予定の約 5.5fb^{-1} のデータを解析して、ヒッグス粒子が存在しなければ95%の信頼度でその存在を否定できる可能性が高い。

テバトロンでは、さらに1年間データ収集期間を延長する可能性があり、今回解析したデータの約3倍のデータ（積算ルミノシティ $7\sim 8\text{fb}^{-1}$ ）を収集する。この場合、さらに発見感度は向上し95%の信頼度で否定できるヒッグス粒子の質量領域が増加するとともに、質量が $160\text{GeV}/c^2$ 近くのヒッグス粒子の存在の証拠を見つける可能性が出てくる。

5 おわりに

テバトロン実験では、トップクォークと W ボソンの質量精密測定を行ない、LEP、SLD などその他の実験結果とあわせて、間接的に標準理論でのヒッグス粒子の質量が $185\text{GeV}/c^2$ 以下であることを示した。またヒッグス粒子の直接探索によって、テバトロンで初めて質量 $170\text{GeV}/c^2$ のヒッグス粒

子の存在を否定した．今後テバトロン実験は 2009 年末までに今回の解析に用いたデータ量の約 2 倍のデータを収集する予定である．さらに 1 年間データ収集期間を延長する場合，約 3 倍のデータを収集する．一方，CERN の LHC は 2009 年から重心系エネルギー 14TeV で本格的な衝突実験を開始する予定である．LHC とテバトロンがヒッグス粒子探索の競争をすることによって，ヒッグス粒子は近い将来に発見されるであろう．また発見後，ヒッグス粒子の性質を明らかにしていくことによって，質量起源を解明し，素粒子標準理論を超える物理の手がかりを得ることが期待される．

参考文献

- 1) F. Abe *et al.*, CDF Collaborattion: Phys. Rev. Lett. 73 (1994) 225; Phys. Rev. D 50 (1994) 2966. 近藤都登, 滝川紘治, 金 信弘, 近松 健: 日本物理学会誌 50 (1995) 176. F. Abe *et al.*, CDF collaboration: Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 2626. S. Abachi *et al.*, D0 collaboration: Phys. Rev. Lett. 74 (1995) 2632.
- 2) R. Barate *et al.*, LEP electroweak working group and LEP2 collaborations: Phys. Lett. B 565 (2003) 61.
- 3) T. Aaltonen *et al.*, CDF collaboration: Phys. Rev. Lett. 99 (2007) 151801.
- 4) Tevatron electroweak working group for the CDF and D0 collaborations: FERMILAB-TM-2413-E.
- 5) LEP electroweak working group: <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>.
- 6) The CDF Collaboration, CDF Conference Note 9248 (2008).
The D0 Collaboration, D0 Conference Note 5737 (2008).
- 7) The CDF Collaboration, CDF Conference Note 9219 (2008).
The CDF Collaboration, CDF Conference Note 9475 (2008).
The CDF Collaboration, CDF Conference Note 9483 (2008).
- 8) The D0 Collaboration, D0 Conference Note 5472 (2008).
The D0 Collaboration, D0 Conference Note 5570 (2008).
The D0 Collaboration, D0 Conference Note 5586 (2008).
- 9) The CDF Collaboration, CDF Conference Note 7307 (2008).
The CDF Collaboration, CDF Conference Note 9500 (2008).

- 10) The D0 Collaboration, D0 Conference Note 5757 (2008).
The D0 Collaboration, D0 Conference Note 5485 (2007).
- 11) The Tebatron New Phenomena, Higgs working group, CDF Collaboration, D0 Collaboration, arXiv:0808.0534v1 [hep-ex] (2008).

英文題名

How much do the Tevatron experiments reveal on the Higgs particle

著者名

Shinhong Kim and Tatsuya Masubuchi

英文抄録

The CDF and Dzero experiments at Tevatron proton-antiproton collider at Fermi National Accelerator Laboratory in Batavia, Illinois, USA, have recently set the upper limit of the Higgs particle mass to $185 \text{ GeV}/c^2$ by measuring the top quark mass and the W boson mass precisely. They have also excluded the existence of the Higgs particle with a mass of $170 \text{ GeV}/c^2$ at 95 % confidence level through direct search for the Higgs particle. The Tevatron experiment will have two or three times more data of which analyses will make the allowed Higgs mass region narrower and may result in finding evidence for Higgs particle production.