

■ 研究紹介

CDF 実験の現状と将来

筑波大学 物理学系

金 信 弘

skim@hep.px.tsukuba.ac.jp

2002 年 5 月 13 日

1. はじめに

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、CDF (Collider Detector at Fermilab) 実験グループは 1985 年の初衝突以来、世界最大の重心系エネルギー 1.8 TeV の陽子反陽子衝突実験を行ってきた。CDF 実験グループは日米伊三カ国の国際協力のもとに 1979 年に結成され、以来日本グループは、日米科学技術協力事業の一つとして、検出器の建設・稼働と物理の解析を主導的に行ってきた。

1992 年から 1996 年にかけて行われた衝突実験 (Run I) で収集された約 110pb^{-1} 相当の衝突データの物理解析は、多くの成果を生み出した。その最大の成果は既に発表されたトップクォークの発見である[1]。また CDF 実験では、 b クォークの生成が豊富であることを活用して、 B_c 中間子の発見[2]をはじめとして、 b -ハドロン質量・寿命測定、 $B^0 - \bar{B}^0$ 混合測定などの B の物理の研究を行ってきた。W ボソン質量の精密測定をはじめとする電弱相互作用の研究、ジェット生成特性の測定などの QCD の研究にも、多くの成果を上げてきた。テバトロンにおける CDF 実験と D0 実験のトップクォークの質量[3]と W ボソンの質量[4]の測定結果は、LEP などの他の電弱相互作用の実験結果と合わせて、図 1 に示されるように、ヒッグス粒子の質量上限 $196\text{GeV}/c^2$ (95% 信頼度) を与えている[5]。

テバトロン加速器は新入射器の建設をはじめとする増強を完了し、またその増強に呼応して CDF 検出器各部の増強も行なわれ、2001 年春から衝突実験 Run II を開始した。

LHC 陽子陽子衝突実験が本格稼働する 2007 年頃までは、テバトロン加速器が唯一トップクォークを生成できる加速器であり、このフェルミオンの中で最も (あるいは異常に) 重いトップクォークの生成崩壊を精密測定することは、単にヒッグス粒子の質量に対する知見を与えるにとどまらず、標準模型の枠組を超える物理に到達できる可能性を有している。

ヒッグス粒子の直接探索は、2000 年にヨーロッパ CERN 研究所の LEP 実験が終了した現在、LHC 陽子陽子衝突器の稼働までは CDF 実験が唯一発見可能な実験である。

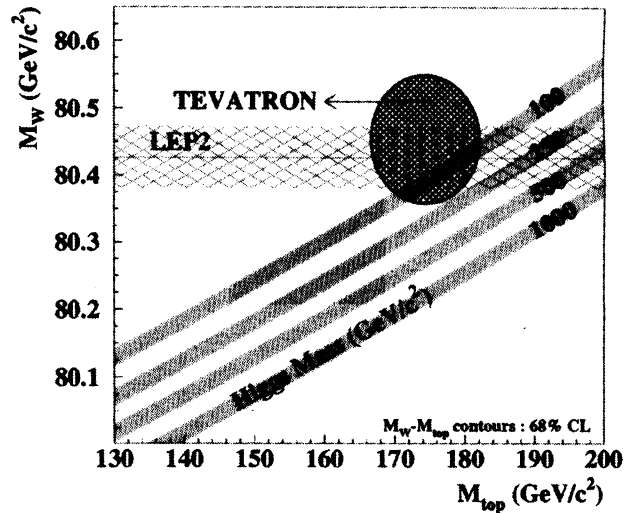


図1 トップクォークと W ボソンの質量が与えるヒッグス粒子の質量への制限

2. テバトロン衝突器の増強

2001 年春から開始した衝突実験 Run II では、2004 年までに 2fb^{-1} (Run I の 20 倍) の積算ルミノシティ相当のデータを収集することが期待される。また、重心系エネルギーも 1.8 TeV から 2.0 TeV に上げられた。ビームバンチ間隔は $3.5\mu\text{sec}$ から 396 nsec (2004 年から 132 nsec) に短縮された。この衝突器の性能を得るために、下記のテバトロン衝突器の増強が行われた。

- (1) 主リングトンネル内に設置されていた従来の入射器に代わる新入射器として、大ビーム強度の 150 GeV 陽子シンクロトロンを主リング横に建設した。
- (2) 永久磁石で構成されたリサイクラーリングを新入射器と同じトンネル内に建設し、従来衝突実験に使用した後に捨てていた反陽子ビームを、取り込んで再利用できるようにした。
- (3) テバトロンリングを構成している超伝導電磁石の電流上限の低いものを取り出して、新しいものに交換した。また超伝導電磁石の冷却系の改良を行った。

現在、以上の建設・設置は完了しており、調整中である。

- (2) のリサイクラーリングの運転は 2003 年から行われる予定である。

Run II の先には、ピークルミノシティが約 $0.4 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$ 、積算ルミノシティが 15 fb^{-1} 程度の Run IIb が 2005 年頃から開始予定で計画されている (表 1 参照)。Run IIb で期待される性能は、リサイクラーリングの反陽子を電子冷却することによって達成する計画である。電子冷却装置は 2003 年に設置完了し、2004 年から運転する予定である。

表 1 テバトロン衝突器の長期計画

年	休止期間	ルミノシティ		
		ピーク	年積算	全積算
	months	$10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$	fb^{-1}	fb^{-1}
2002	2	0.75	0.32	0.3
2003	2	1.2	0.83	1.2
2004	3	2.2	1.31	2.5
2005	4	3.1	1.81	4.3
2006	1	4.1	3.38	7.6
2007	1	4.1	3.85	11.5
2008	1	4.1	3.85	15.0

この Run IIb に備えた CDF II 検出器の大きな改造の必要はなく、放射線耐性の強いシリコン飛跡検出器への改造を主とした小規模の改良を行う。

3. CDF II 検出器の建設・運転

Run II に向けて、検出器各部の増強が完了した。CDF 検出器は、ソレノイド電磁石、中央部カロリメータ、中央部ミュオンカウンターを除いたすべての部分を新検出器に代えて、CDF II 検出器 (図 2) を建設した。

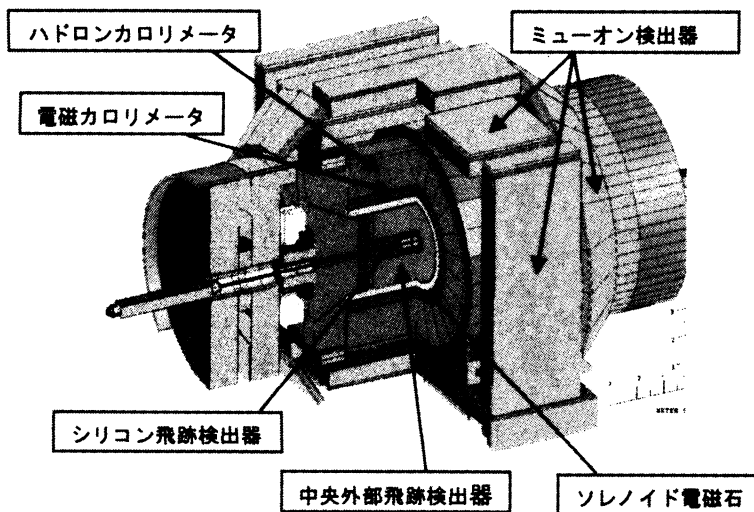


図 2 CDF II 検出器

この新しい CDF II 検出器の建設において、日本グループは、端冠部電磁カロリメータ、端冠部プリシャワーカウンター、シリコンバーテックス検出器 SVX II、中間部シリコン検出器 ISL、データ収集装置、TOF カウンターの建設に寄与した。また現在新たに計画中の高放射線耐性シリコン飛跡検出器の開発研究にも携わっている。

CDF II 検出器を設置 (図 3) して 2TeV 陽子反陽子衝突実験 Run II を 2001 年春に開始した。CDF II 検出器の最終調整と物理データ収集が進行中である。

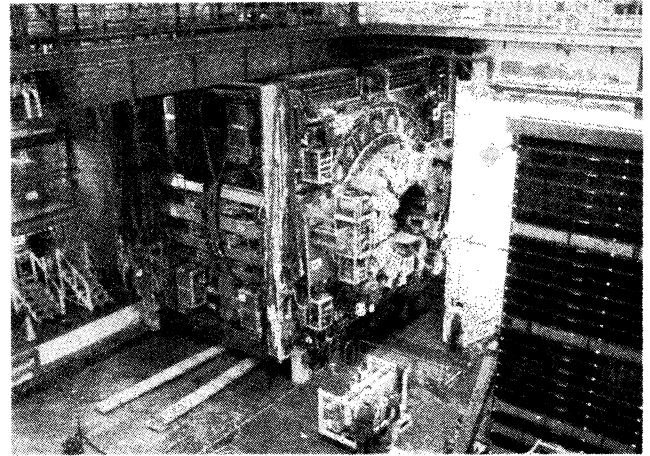


図 3 CDF II 検出器中央部を衝突地点へ移動(2001年2月)

日本グループが関与した検出器の運転の状況は以下の通りである。

(1) 端冠部カロリメータ

筑波大学が長年培ってきたカロリメータ開発技術を生かして電磁カロリメータとプリシャワーカウンターの設計製作を行い、2000年に CDF II 検出器内に設置した。現在は Run II で収集したデータを用いたキャリブレーションを進めると同時に、電子・光子の同定アルゴリズムを改良している。筑波大、KEK、フェルミ研他が製作運転を担当し、清矢良浩 (筑波大) がプロジェクトリーダーを務めた。

(2) シリコンバーテックス検出器 SVX II

広島大学のグループによるシリコン検出器の開発が成功し、CDF での採用が決定された。浜松ホトニクスとの共同研究で蓄積された技術を用いて、センサーを製作した。Run II データに順次シリコンバーテックス検出器 SVX II の読み出しチャンネルの組み入れを行い、2001年12月に全チャンネルの読み出しへの組み入れを終えた。現在デッドチャンネルの修理が進行中である。広島大、岡山大、フェルミ研、INFN 他が製作運転を担当している。SVX II は SVT (シリコンバーテックス検出器トリガー) に用いられている。

SVT では、インパクトパラメータ d が $50\mu\text{m}$ 以上で、横向き運動量 $2\text{GeV}/c$ 以上の飛跡が 2 本以上あり、バーテックスを共有していることが要求される。SVT トリガーで収集したデータを解析した結果、 $D^0 \rightarrow K\pi$ のピークが図 4 のように得られている。

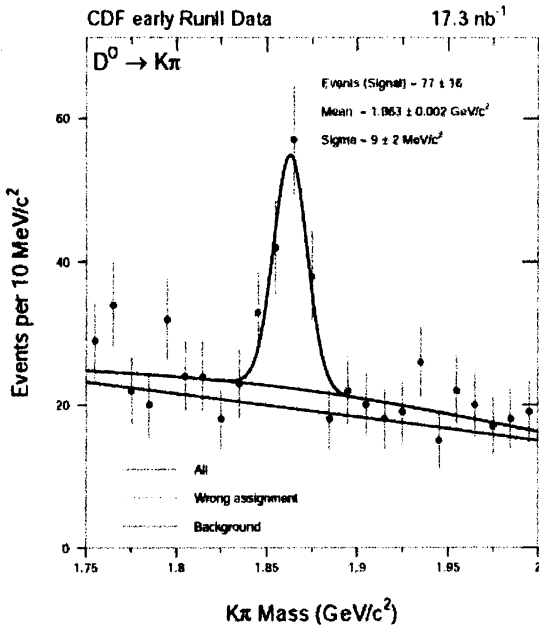


図 4 $K\pi$ の不変質量分布

SVT でとったデータに、さらに $d > 100\mu\text{m}$ を要求した。

(3) 中間部シリコン検出器 ISL

中間部シリコン検出器 ISL の冷却パイプが詰まるという問題があったが、解決法を得た。現在修理中で、70%のチャンネルが稼働している。筑波大、大阪市大、フェルミ研、ピサ大、LBNL 他が製作運転を担当している。

(4) オンラインデータ収集装置

オンラインデータ収集装置の最終段に位置するデータ記録システムとオンラインモニター装置の設計製作を筑波大、早稲田大、KEK 他が担当した。これらは順調に稼働中である。

(5) TOF カウンター

TOF カウンターは、遅れていた読み出しエレクトロニクスの設置も 2001 年夏に完了し、Run II で収集したデータを用いたキャリブレーションが進行中である。筑波大、ペンシルバニア大、フェルミ研他が製作運転を担当しており、受川史彦(筑波大)がプロジェクトリーダーを務めている。昨年 12 月 23 日に収集したデータについて、飛行時間と運動量を用いて、ハドロン質量と運動量の 2 次元プロットにしたのが図 5 である。1GeV/c 以下では K と π が明らかに分離している。

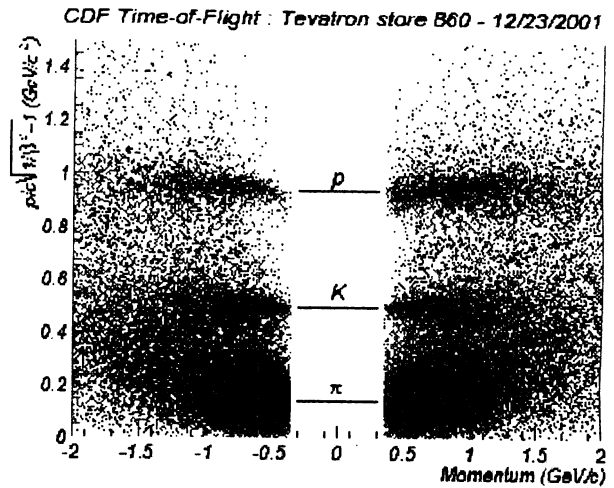


図 5 質量と運動量の 2 次元プロット

(6) 高放射線耐性シリコン検出器 SVX IIb

2005 年から開始予定の衝突実験 Run IIb の準備として、放射線耐性の高いシリコン検出器の開発研究を行っている。筑波大、岡山大、大阪市大、フェルミ研、INFN 他が設計製作を担当する。原和彦(筑波大)がプロジェクトリーダーを務めている。この検出器を 2004 年までに完成し、既存のシリコン飛跡検出器(L00 と SVX II) と入れ替えた後、2005 年からデータ収集を再開する予定である。この検出器に用いるシリコンセンサーと信号ケーブルは、筑波大学グループと岡山大学グループが共同で製作する。この検出器は b -ハドロン飛程の高精度測定とボトムクォークジェットの同定に有効で、ヒッグス粒子の探索に重要な役割を果たす。

4 RUN II データの初期解析結果

2001 年春より開始した Run II では、2002 年春に $2 \times 10^{31} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ という Run I で達成した最高ルミノシティに達した。また 2002 年 4 月までに積算ルミノシティ 20pb^{-1} のデータを収集した。これらのデータを用いて、キャリブレーションが進行中であり、またそれと並行して物理解析も行われている。

電弱相互作用の研究を筆頭に多くの研究に用いられる W ボソン、 Z ボソンの候補事象が同定されており、その質量再構成は正しく行われている。図 6 に $Z \rightarrow e^+e^-$ の不変質量分布を、図 7 には $W \rightarrow \mu\nu$ の横質量 (transverse mass) 分布を示す。共に実験結果とシミュレーションが一致している、すなわち新しい検出器の性能が良く理解できていることを示している。

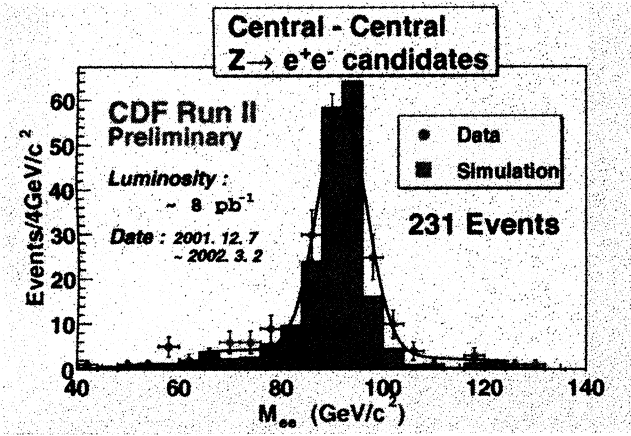


図6 $Z \rightarrow e^+e^-$ の不変質量分布

点はCDFのデータを表し、ヒストグラムはシミュレーション予想を表す。

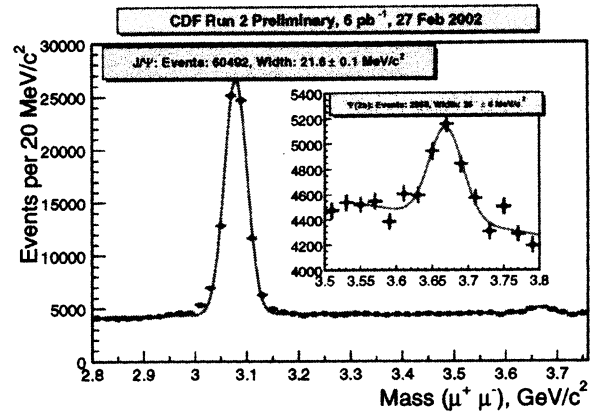


図8 $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ の不変質量分布

$\psi(2s) \rightarrow \mu^+\mu^-$ の不変質量分布を挿入図に示す。曲線は信号(ガウス関数)とバックグラウンド(直線)の和による最適曲線を表す。

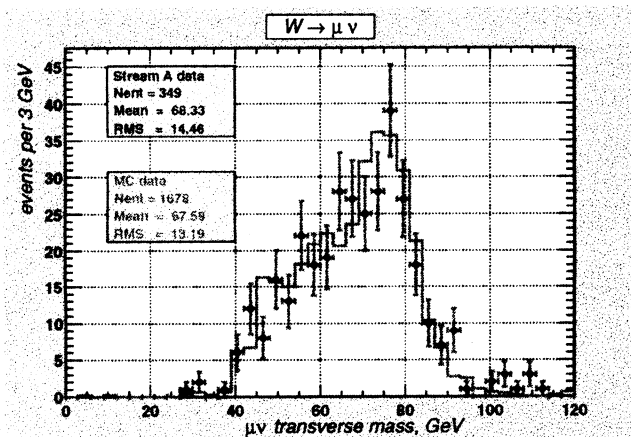


図7 $W \rightarrow \mu\nu$ の横質量 (transverse mass) 分布

点はCDFのデータを表し、ヒストグラムはシミュレーション予想を表す。

B の物理をはじめ多くの研究に用いられる J/ψ 粒子の候補事象も同定されており、その質量再構成も正しく行われている。図8に $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ の不変質量分布を $\psi(2s) \rightarrow \mu^+\mu^-$ の不変質量分布とともに示す。質量ピークの値は世界平均値と一致しており、また質量ピークの幅も検出器の分解能から予想されるものと一致している。

さらに、この J/ψ 粒子の候補事象と横向き運動量 $1.75\text{GeV}/c$ 以上の荷電粒子飛跡を K 中間子と仮定して $J/\psi K^\pm$ の質量再構成をした結果を図9に示す。この図より $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ も同定されており、その質量再構成も正しく行われていることがわかる。質量ピークの値は世界平均値と一致しており、また質量ピークの幅も検出器の分解能から予想されるものと一致している。

以上の解析結果はキャリブレーションが順調に行われ、新しい検出器の性能がよく理解できていて、この時点で物理解析を行う準備ができていることを示している。

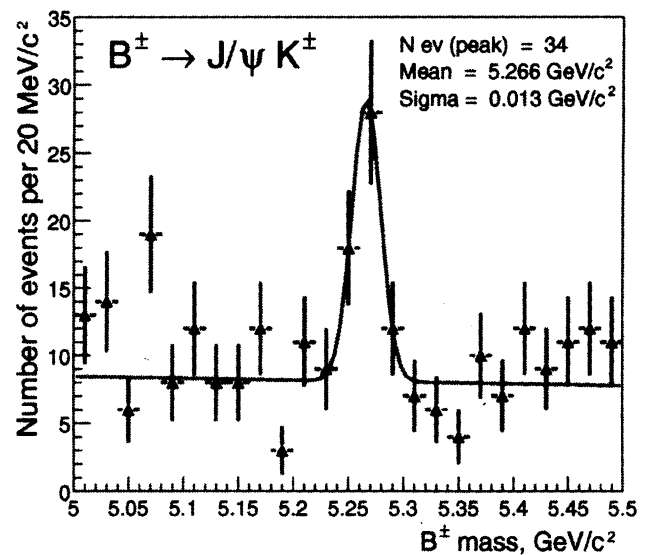


図9 $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$ の不変質量分布

5. RUN II で期待される物理の成果

Run II では、トップクォークの質量の精密測定と生成・崩壊特性の精密測定、 W ボソン質量の精密測定、 B 中間子系での CP 不変性の破れの検出、 B_s^0 中間子系での粒子反粒子振動の観測、高次 QCD 計算の検証、より広い質量範囲でのヒッグス粒子・超対称性粒子をはじめとする新粒子の探索など多くの成果が期待される[6]。

トップクォークと W ボソンの質量の精密測定 ($\Delta M_{top} < 3\text{GeV}/c^2$, $\Delta M_w < 40\text{MeV}/c^2$) によってヒッグス粒子の質量に対する厳しい制限が、図10に示されるように課され、これによりヒッグス粒子の質量の間接測定が約30%の精度で行われる。

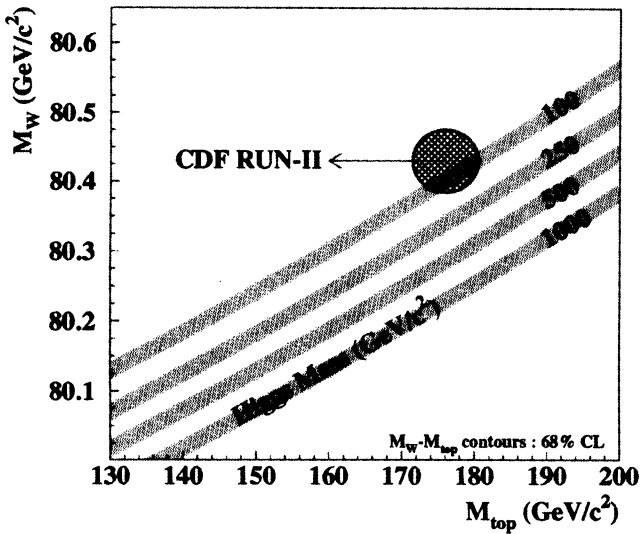


図10 Run IIで期待されるトップクォークとWボソンの質量が与えるヒッグス粒子の質量への制限

Bの物理としては、 B_s^0 中間子系での粒子反粒子振動を $B_s^0 \rightarrow D_s \pi, D_s \pi \pi \pi$ のモードで観測する解析の研究が行われており、図11に示すように $x_s < 40$ ならば積算ルミノシティ 0.3 fb^{-1} で 5σ の精度で測定することができる¹。また $B \rightarrow J/\psi K_s$ のモードで CP 不変性の破れのパラメータ $\sin 2\beta(\sin 2\phi_1)$ を図11に示すように、Run IIa (積算ルミノシティ 2 fb^{-1}) で 0.04 の精度で測定することができる。

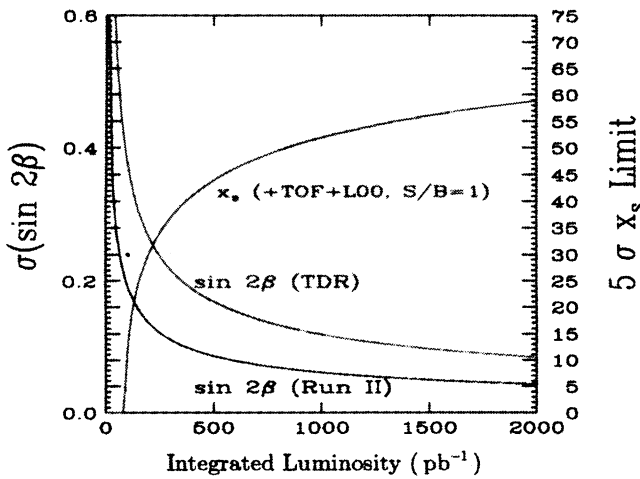


図11 $\sin 2\beta(\sin 2\phi_1)$ の測定精度 vs 積算ルミノシティと 5σ で発見可能な x_s vs 積算ルミノシティ

¹ $x_s = \Delta m_s / \Gamma_s$ 、ただし Δm_s は2種類の B_s^0 中間子の質量差で、 Γ_s は B_s^0 中間子の崩壊幅である。また現在の標準模型予測では $x_s < 40$ である[7]。

ヒッグス粒子の直接探索については、標準模型におけるヒッグス粒子の生成断面積と崩壊分岐比の積がヒッグス粒子の質量の関数で図12のように計算されているので、ヒッグス粒子の質量範囲によって以下のモードで直接探索する研究が行われている。

- (1) $M_H < 140 \text{ GeV}/c^2$

$$p\bar{p} \rightarrow WHX \rightarrow l\nu + bb + X$$

(レプトン, missing E_T と2個のbジェット)

$$p\bar{p} \rightarrow ZHX \rightarrow \ell\ell(\nu\nu) + bb + X$$

(レプトン対あるいは missing E_T と2個のbジェット)

- (2) $120 < M_H < 160 \text{ GeV}/c^2$

$$p\bar{p} \rightarrow WHX \rightarrow l\nu + W^*W^* + X \rightarrow l\nu l\nu qq + X$$

(同符号電荷のレプトン対とジェット)

- (3) $140 \text{ GeV}/c^2 < M_H$

$$p\bar{p} \rightarrow HX \rightarrow WWX \rightarrow l\nu l\nu X$$

(異符号電荷のレプトン対と missing E_T)

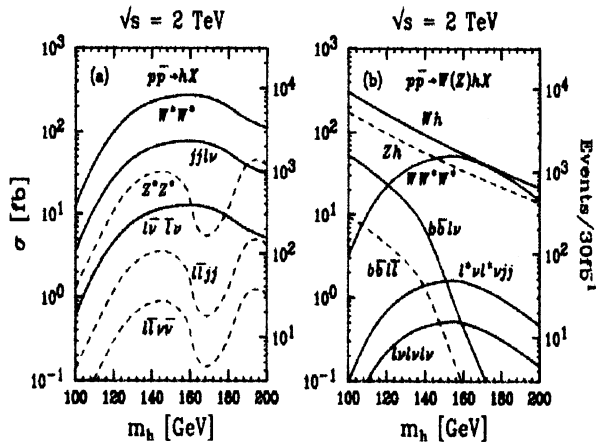


図12 ヒッグス粒子の生成断面積と崩壊分岐比の積ヒッグス粒子の質量の関数として与えられる。

このヒッグス粒子の直接探索により、図13に示すように、Run IIa (2 fb^{-1}) ではヒッグス粒子の探索可能な質量下限は95%信頼度で $120 \text{ GeV}/c^2$ と低いが²、Run IIb ではヒッグス粒子の質量が $180 \text{ GeV}/c^2$ 以下であれば、 3σ の検出が可能である[8]。

² 2000年に終了したLEP実験はヒッグス粒子の質量下限として、95%信頼度で $114.1 \text{ GeV}/c^2$ を得ている[9]。したがって、標準模型におけるヒッグス粒子の質量は95%の信頼度で $114.1 \text{ GeV}/c^2$ から $196 \text{ GeV}/c^2$ の範囲にある。

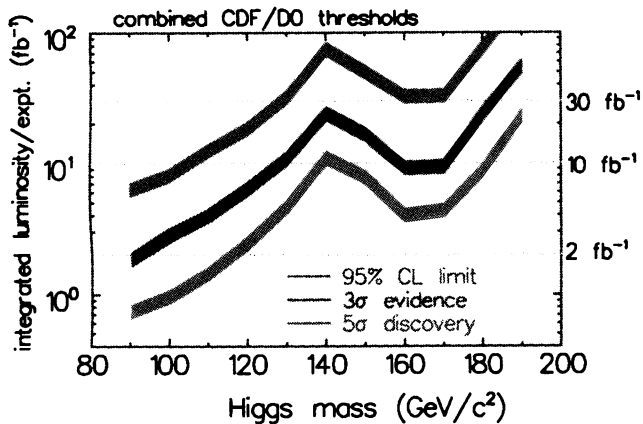


図 13 ヒッグス粒子の検出に必要な積算ルミノシティ
ヒッグス粒子の質量の関数としてプロットした。各曲線は下から
95%信頼度での質量下限、 3σ 、 5σ の有意さでの検出に対応する。

6. おわりに

テバトロン加速器とCDF検出器の大改造が完了して、2001年春より陽子反陽子衝突実験が再開された。データ収集が進むにつれて、新しい加速器と検出器の理解が深まり、いよいよ物理の結果を得る段階に近づきつつある。今後2年程度の期間に、これまで取得しているデータの20倍にあたる 2fb^{-1} のデータを取得すると期待される。

このデータ解析によって、トップクォークの質量の精密測定と生成・崩壊特性の精密測定、 W ボソンの質量の精密測定、 B_s 中間子系でのCP不変性の破れの検出、 B_s^0 中間子系での粒子反粒子振動の観測、高次QCD計算の検証、より広い質量範囲でのヒッグス粒子・超対称性粒子をはじめとする新粒子の探索など多くの成果が期待される。

中でもトップクォークと W ボソンの質量の精密測定によってヒッグス粒子の質量に対する厳しい制限が課され、これによりヒッグス粒子の質量の間接測定が約30%の精度で行われる。またヒッグス粒子の質量が $120\text{GeV}/c^2$ 以上であれば、ヒッグス粒子の直接探索によって、95%の信頼度でそのことを確認できる。

さらに2005年開始予定のRun IIbでは、 15fb^{-1} のデータが得られ、これにより質量が $180\text{GeV}/c^2$ までのヒッグス粒子の検出が 3σ の有意さで可能となる。

参考文献

- 1) F. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **73**, 225 (1994).
F. Abe *et al.*, Phys. Rev. **D50**, 2966 (1994).
F. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2626 (1995).
S. Abachi *et al.*, Phys. Rev. Lett. **74**, 2632 (1995).
近藤都登, 滝川紘治, 金 信弘, 近松 健 :
日本物理学会誌 **50** (1995)176.
- 2) F. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 2432 (1998).
F. Abe *et al.*, Phys. Rev. **D58**, 112004-1 (1998).
金 信弘, 鈴木潤一 : 日本物理学会誌 **53** (1998) 704.
- 3) T. Affolder, *et al.*, (CDF collaboration),
Phys. Rev. **D63**, 032003 (2001).
B. Abbott *et al.*, (D0 collaboration),
Phys. Rev. **D58**, 052001(1998).
- 4) T. Affolder *et al.*, (CDF collaboration),
Phys. Rev. **D64**, 052001(2001).
B. Abbott *et al.*, (D0 collaboration),
Phys. Rev. **D58**, 092003(1998).
- 5) A. Tonazzo "Precision Tests of Electroweak Standard Model" La Thuile 2002, March (2002).
- 6) CDF II Collaboration "The CDF II Detector Technical Design Report" FERMILAB-Pub-96/390-E (1996).
- 7) Particle Data Group, Review of Particle Physics
Eur. Phys. J. **C15**, 1-878(2000) p.622.
- 8) The Tevatron Higgs Working Group,
FERMILAB-Conf-00/279-T(2000), hep-ph/0010338.
- 9) The LEP Higgs Working Group,
CERN-EP/2001-055(2001), hep-ex/0107029.