

II. 素粒子実験グループ

近藤都登、滝川紘治、宮下茂幸、金信弘、中野逸夫、安岡聖、原和彦、高野幹男、
二宮真理子、猪野隆

【1】陽子・反陽子衝突実験

米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロンを用い、陽子・反陽子衝突によるCDF (Collider Detector at Fermilab) の実験が行われた。

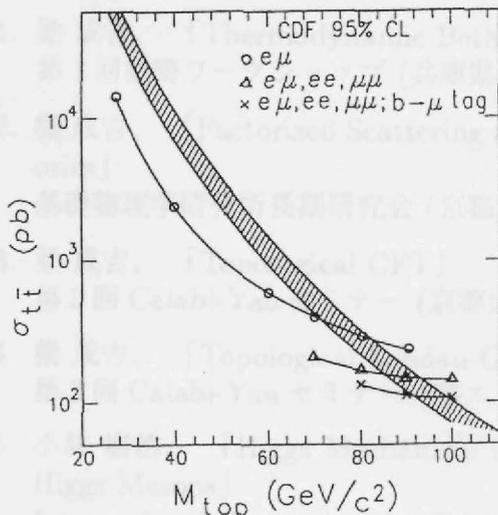
(1) 1988-89年に収集されたデータの解析結果

1988-89年に第1回目の物理ランが行われた。この間取得されたデータは積分ルミノシティ 4.4 pb^{-1} で、W、Zボソンに関する電弱相互作用の研究、ジェットに関連する量子色力学の検証、トップ・クォークの探索、bクォークの物理、超対称粒子など標準模型を超える粒子の探索などが報告されている。主な解析結果を以下に示す。

a) トップ・クォークの探索

トップ・クォークは、ヒッグス粒子と共に、標準理論の検証に不可欠でありながら確認されていない粒子で、これまで多くの e^+e^- コライダー実験 (PEP, PETRA, TRISTAN) 及び CERN の pp コライダー実験で探索されてきた。

CDFの初期の解析では、(a) $t\bar{t} \rightarrow e + \text{jets}$ と (b) $t\bar{t} \rightarrow e + \mu + X$ の2つの崩壊モードで探索が行われた。この結果、(a)のモードでは、95% C.L.で $40 \text{ GeV}/c^2 < M_{t\bar{t}} < 77 \text{ GeV}/c^2$ の質量のトップ・クォークの存在が否定され、(b)のモードでは、95% C.L.で $28 \text{ GeV}/c^2 < M_{t\bar{t}} < 72 \text{ GeV}/c^2$ の質量のトップ・クォークの存在が否定された。その後更に、(c) $t\bar{t} \rightarrow e^+ + e^- + X$ 、(d) $t\bar{t} \rightarrow \mu^+ + \mu^- + X$ 、(e) $t\bar{t} \rightarrow e + \text{jets} + \text{soft } \mu$ という崩壊モードを含んだ解析が行われた。soft μ の横運動量は $2 \text{ GeV}/c < P_T < 15 \text{ GeV}/c$ 、それ以外の荷電レプトンの P_T は $15 \text{ GeV}/c$ 以上であることが要求された。(b),(c),(d),(e)の2つの荷電レプトンが終状態にある事象の選別が行われた結果、崩壊モード(b)を満たす1イベントのみが選別を通過した。この事象は、バックグラウンドの評価から期待される 1.2 ± 0.5 イベントと矛盾しない。この1イベントをトップ・クォーク対生成事象と仮定して、質量下限を求めた結果、下図左に示されるように95% C.L.で $M_{t\bar{t}} > 91 \text{ GeV}/c^2$ が得られた[文献3]。



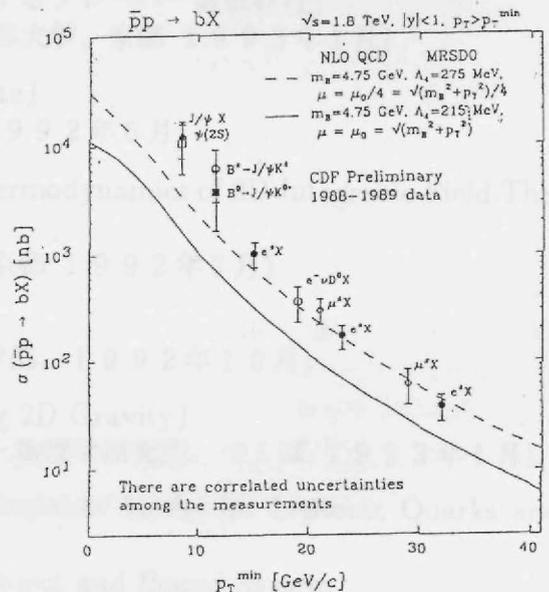
b) bクォークの物理

bクォークの生成断面積を次の崩壊モードで測定した。(a) $B^\pm \rightarrow K^\pm + J/\psi$; $J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (b) $B^0 \rightarrow K^0 + J/\psi$ (c) $pp \rightarrow bX \rightarrow eX$ (13,000イベント) (d) $bX \rightarrow e\nu D^0 X$ (e) $pp \rightarrow bX \rightarrow \mu X$ 。(a)は 14.1 ± 4.3 イベントが測定された。これよりB中間子とボトム・クォークの生成断面積として以下が得られた。

$$\sigma(pp \rightarrow BX; P_T > 9 \text{ GeV}/c, |\eta| < 1.0) = 2.8 \pm 0.9 (\text{stat}) \pm 1.1 (\text{syst}) \mu\text{b}$$

$$\sigma(pp \rightarrow bX; P_T > 11.5 \text{ GeV}/c, |\eta| < 1.0) = 6.1 \pm 1.9 \pm 2.4 \mu\text{b}$$

(b),(c),(d),(e)のモードでのbクォークの生成断面積の測定結果は上図右に示される。この測定結果は、



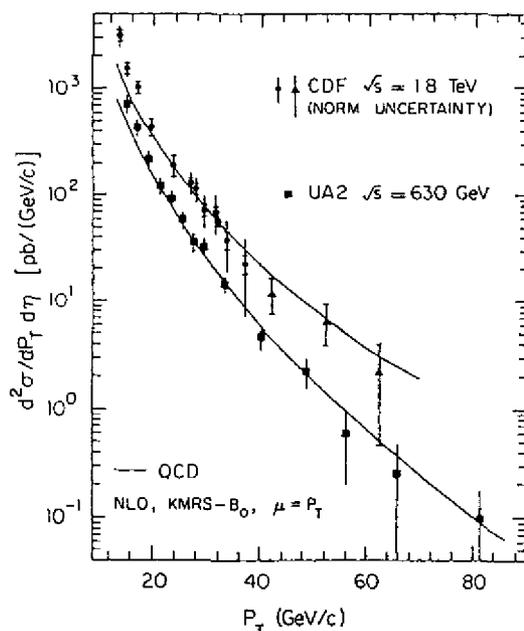
一様に50%程度、理論曲線よりも高くなっている[文献5]。

c) 量子色力学 (QCD)

CDF実験での直接光子の生成断面積の測定結果が横運動量 $P_T=14$ GeV/c ~ 68 GeV/c の範囲で右図に示される。14 < P_T < 40 GeV/c の範囲では、直接光子の同定はストリップ・チェンバーで測定されるシャワーの横方向の広がりを見て行われ、28 < P_T < 68 GeV/c の範囲では、中央ドリフト・チューブで観測された光子の電子対生成率を用いて行われる。CDFの測定結果は、NLOまでのQCD予想曲線と一致している[文献2]。

d) 標準理論を超える物理

超対称性粒子の探索は、消失横エネルギー (E_T) 分布のバックグラウンドからの過剰分を評価することによって行われた。 $E_T > 40$ GeV のイベントは $Z \rightarrow \bar{\nu}\nu$ 、 $W \rightarrow e\nu$ 、 $\mu\nu$ 、 $\tau\nu$ 及び $b\bar{b}$ から期待される分布で説明される。超対称性粒子 \tilde{Q}, \tilde{g} がカスケード崩壊モードなしで崩壊すると仮定するとき、 $M_{\tilde{Q}}, M_{\tilde{g}}$ の90% C.L. の下限が与えられ、 $M_{\tilde{Q}} > 126$ GeV/c²、 $M_{\tilde{g}} > 141$ GeV/c² である[文献10]。



(2) 1992-93年に収集されたデータの解析結果

1992年8月末から1993年5月末までにCDF実験第2回目の物理ランが行われ、積分ルミノシティは 21 pb^{-1} に達した。平成4年度に得られた主な解析結果としてはトップ・クォークの新しい質量下限がある。(b) $t\bar{t} \rightarrow e^+\mu^- + X$ 、(c) $t\bar{t} \rightarrow e^+e^- + X$ 、(d) $t\bar{t} \rightarrow \mu^+\mu^- + X$ の3つの崩壊モードを用いて 16 pb^{-1} のデータの解析が行われた。荷電レプトンの P_T は 20 GeV/c 以上であることと消失横エネルギーが 25 GeV 以上であることが要求された。(b),(c),(d) の2つの荷電レプトンが終状態にある事象の選別が行われた結果、崩壊モード(b)を満たす2イベントのみが選別を通過した。この事象は、バックグラウンドの評価から期待される 2.6 ± 0.6 イベントと矛盾しない。この2イベントをトップ・クォーク対生成事象と仮定して、質量下限を求めた結果、95% C.L. で $M_{\text{top}} > 108 \text{ GeV}/c^2$ が得られた。

(3) タイル/ファイバー型端冠電磁カロリメータの開発と製作

1996年に開始される物理ランでは、ルミノシティが高くなる為に、信号が遅い気体プロポーションナルチェンバーでサンプリングを行っている端冠カロリメータは使用できなくなる。したがって、タイル/ファイバー型カロリメータに変更することが決定され、筑波大学/高エネルギー物理学研究所グループが端冠電磁カロリメータの製作を担当することになった。このカロリメータはシンチレータ板(タイル)に溝を掘り、そこに波長変換ファイバーをはめこんで読み出すサンプリング部と4.5mm厚の鉛板とを交互に23層重ねた構造をしている。このカロリメータで十分なエネルギー分解能 ($16\%/\sqrt{E(\text{GeV})} + 1\%$) を得るためにタイル/ファイバーから十分かつ一様な光量があることが必要である。1 minimum ionizing particle (MIP) に対して光電子増倍管で読み出した時、3光電子以上あること、タイル平面上における応答非一様性が2.5%以下であることが要求される。この要求を満たすタイル/ファイバー系の開発研究を行った結果、クラレ社のシンチレータ (SCSN38) とファイバー (Y11 multiclاد) が採用され、更に溝の深さ、反射材等も決定された。こうして、光量が7光電子/MIP、非一様性が2.5%以下であるタイル/ファイバー系が得られた。端冠電磁カロリメータを構成するタイル/ファイバーの総数は22,080枚である。全てのタイル/ファイバーの品質をできるだけ一様にするのが高いエネルギー分解能を得るうえで重要である。この為に光量測定装置がタイル/ファイバーを製作する会社に送られて品質検査に用いられている。生産は1992年12月より始まっており、現在継続中である。

【2】超伝導・超コライダーでの実験のための基礎研究

米国で計画中のSSC加速器に据え付けるSDC検出器の中央カロリメータのためにタイル/ファイバー型カロリメータの開発研究を継続した。

(1) タイル・ファイバー系光学最適化 (文献: 講演1)

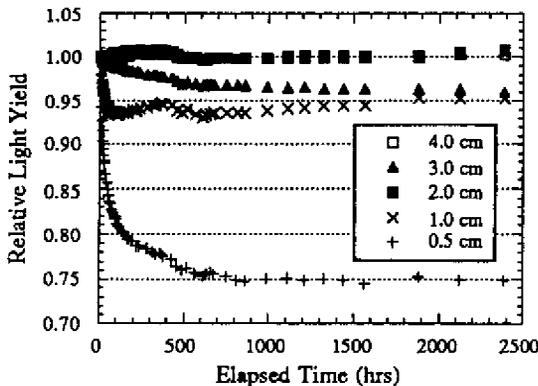
放射線源スキャナーを用い、タイルとファイバーの組み合わせ、ファイバー径、反射材の選定をし、形状や大きさの異なるタイルについて、溝加工条件等を変えて光量と一様性を測定した。この結果、4 mm厚のSCSN38/Y11の組み合わせで目標とする光量、4光電子/mip以上を達成した。また電磁部タイルについて2-4%の一様性を達成した。タイルに圧力が加わった場合の光量変化を各種反射材について測定した。ファイバーの曲率半径を変え透過光量の安定性をテストをした(下図左)。

(2) タイル加工法、ファイバー製法等の大量生産法の確立

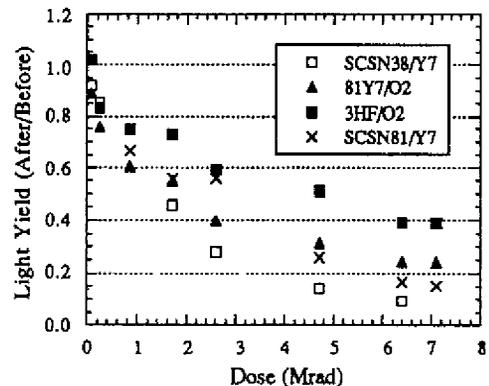
タイル溝や端面加工時の切削速度の最適化、ファイバー端面の鏡面化法、波長変換ファイバーと透明ファイバーの接合法について研究した。ファイバー端面はアルミスパッタリング法を用い4%以下の個体差で90%近い反射率を得た。ファイバーの熱融着法として補強用にチューブを用いる方式を確立した。またコネクタを用いる方法も開発し、熱融着に近い性能を得た。取り外しの必要な部位で使用できる。

(3) 高耐放射線性シンチレータの開発

放射線耐性の評価のためにカロリメータ試験機を製作し、KEK直線加速器を使って2.5 GeV電子を照射した(文献13)。この結果等からシンチレータはSDCでも充分使用可能である事が示され、SDCカロリメータとして採択された。より放射線線量の高いエンドキャップ部のためにコバルト線源を用いたテストをした(文献: 講演2)。3HF/O2の組み合わせはエンドキャップ部での候補となった(下図右)。



ファイバーを曲率0.5-4 cmに保って、透過光量の変動を室温で継続測定した。



各種タイル/ファイバーの放射線耐性

(4) 光電子増倍管および高圧電源内蔵ベース、および性能評価試験用システムの開発

6段の光電子増倍管に適合する高圧発生装置内蔵ベースを試作した。従来のものよりノイズが1/10以下のものが製作された。光電子増倍管の応答直線性の評価のためにLEDを光源とし6桁の領域に亘って応答の測定できる電荷積分型アンプの試作をした。

【3】電子・陽電子衝突の実験

トリスタンのルミノシティは前年度に比べ2倍になり、VENUSグループは一年で 100 pb^{-1} の積分ルミノシティを得ることができ、実験開始以来の全積分ルミノシティは 220 pb^{-1} になった。実験の大半の時間は重心系エネルギー58 GeVで行われた。LEPのL3グループの異常事象 $1\gamma\gamma$ の狭い共鳴状態を調べるため59 GeV付近でのエネルギースキャンも行われた。

今年度になされた主なデータ解析は、1) プロンプト軽粒子をともなったcクォークとbクォークの研究、2) D*観測によるcクォークの研究、3) グルーオンジェット内での粒子スペクトルの研究、4) 二光子過程でのcクォークの研究、5) 二光子過程での f_2 粒子生成、6) $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$ での新粒子の探索、といえる。それらについて少し詳しく述べる。

弱電磁相互作用：増強計画で追加された遷移輻射検出器の助けを得て、より精度よく電子同定を行い、重クォーク生成過程での前後方非対称を測定し、標準模型の計算とよい一致をみた。また、D*生成断面積に関しても質量分布の方法を用いて測定された。

クォーク・グルーオン相互作用の性質：91個のqqg事象と221個のqq γ 事象を比較することによって、グルーオンジェットとクォークジェットに違いがあるかどうかを調べた。その結果は、グルーオンジェットはクォークジェットよりソフトに見えることを示した。

二光子相互作用：包含電子を用いて二光子過程でのcクォークの生成が研究され、クォーク・パートン模型とグルーオン $\cdot\gamma$ フュージョン過程の和から予想されるよりも約3倍多くcクォーク事象が検出された。

狭い共鳴状態の探索：CERNのL3グループが $e^+e^- \rightarrow 1^+1^-\gamma\gamma$ 反応が $\gamma\gamma$ の不変質量60 GeV付近で予期できない程起こり、光子、電子に結合する幅の狭い共鳴状態の存在の可能性を報告した。トリスタンでは、57.6 - 59.7 GeV間でエネルギースキャンを行って $e^+e^- \rightarrow e^+e^-\gamma\gamma$ 反応を調べた。VENUSグループは、仮定された新スカラー粒子に対して $\Gamma_{ee} < 1$ MeV, $\Gamma_{ee} B_{\gamma\gamma} < 3$ GeV (95% C.L.)の結果を得た。

<論文>

1. F. Abe et al.: Properties of events with large total transverse energy produced in proton-antiproton collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. D45, 2249-2263 (1992).
2. F. Abe et al.: Measurement of the isolated prompt photon cross section in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. Lett. 68, 2734-2738 (1992).
3. F. Abe et al.: Limit on the top-quark mass from proton-antiproton collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. D 45, 3921-3948 (1992).
4. F. Abe et al.: Measurement of the ratio $B(W \rightarrow \tau\nu)/B(W \rightarrow e\nu)$ in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. Lett. 68, 3398-3402 (1992).
5. F. Abe et al.: Measurement of the B-meson and b-quark cross sections at $\sqrt{s}=1.8$ TeV using the exclusive decay $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$. Phys. Rev. Lett. 68, 3403-3407 (1992).
6. F. Abe et al.: Measurement of the production and muonic decay rate of W and Z bosons in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. Lett. 69, 28-32 (1992).
7. F. Abe et al.: Limits on the production of massive stable charged particles. Phys. Rev. D46, 1889-1894 (1992).
8. F. Abe et al.: Limit on the rare decay $W^\pm \rightarrow \gamma\pi^\pm$ in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. Lett. 69, 2160-2163 (1992).
9. F. Abe et al.: Dijet Angular Distribution in $\bar{p}p$ Collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. Lett. 69, 2896-2900 (1992)
10. F. Abe et al.: Search for Squarks and Gluinos from $\bar{p}p$ Collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. Lett. 69, 3439-3443 (1992).
11. F. Abe et al.: Inclusive J/ψ , $\Psi(2S)$, and b-Quark Production in $\bar{p}p$ Collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. Lett. 69, 3704-3708 (1992).
12. F. Abe et al.: Measurement of jet shapes in $\bar{p}p$ collisions at $\sqrt{s}=1.8$ TeV. Phys. Rev. Lett. 70, 713-717 (1993).
13. S. Funaki et al.: Nucl. Instr. and Methods A317 (1992), 123.
14. A. Okamoto et al.: Phys. Lett. B278 (1992) 393.
15. M. Shirakata et al.: Phys. Lett. B278 (1992) 499.
16. N. Terunuma et al.: Nucl. Instrum. Meth. A323 (1992) 471.

<学位論文>

物理学研究科修士論文

大原健「シンチレーティングタイル・ファイバーカロリメータのタイル厚み計測システムの開発」

岡部正和「SDCシンチレーティング・タイル／ファイバー・カロリメータの光学最適化」

高田強 「B Meson Study at CDF」

佐藤博之「重心エネルギー 1.8 TeV 陽子・反陽子衝突における $W\gamma$ 生成の研究」

林英一郎「シンチレーティングタイル／ファイバーカロリメータの製作と開発」

理工学研究科修士論文

浅川高史「CDFプラグ電磁カロリメータに用いるシンチレーティングタイル／ファイバーの光学的特性と品質管理」

新木晶子「シンチレーティング・ファイバー飛跡検出器の開発」

宮本佳典「SDC タイル／ファイバー カロリメータの研究開発」

<講演>

1. K. Hara et al.: "Fabrication of Tiles and Fibers for the SDC Central Calorimeter", Proceedings of the III International Conference on Calorimetry in High Energy Physics (1992), 598.
2. K. Yasuoka et al.: "Radiation Damage in Scintillating Tile/Fiber Calorimeters", *ibid*, 569.
3. 清矢良浩他「CDF 1.8 TeV陽子・反陽子衝突実験におけるトップクォークの探索」日本物理学会 (1992春)
4. 船木真一他「多ジェット事象によりトップクォークの探索II」日本物理学会 (1992春)
5. 小川了他 "Lepton Charge Asymmetry Measurement in $p\bar{p} \rightarrow W \rightarrow e\nu$ Interactions at $\sqrt{S} = 1.8$ TeV" 日本物理学会 (1992春)
6. 植村暢之他「前後方領域ミュー粒子を用いたボトムクォークのタギング」日本物理学会 (1992春)
7. 原和彦他「SDCタイル・ファイバーカロリメータの光学最適化と大量生産法」日本物理学会 (1992春)
8. 安岡聖他「プラスチックシンチレーティングタイル／ファイバーの ^{60}Co 照射による耐放射線性」日本物理学会 (1992春)
9. 林英一郎他「シンチレーティングタイル／ファイバーカロリメータのビームテスト」日本物理学会 (1992春)
10. 新木晶子他「シンチレーティング・ファイバー飛跡検出器の開発」日本物理学会 (1992春)
11. 二宮真理子 "QCD-related Topics at CDF" 日本物理学会 (1992秋)
12. 宮本佳典他「シンチレーション・タイルファイバー・カロリメータの耐久性」日本物理学会 (1992秋)
13. 岡部正和他「シンチレーション・タイルファイバー・カロリメータの光学最適化」日本物理学会 (1992秋)
14. 浅川高史他「CDFプラグ電磁カロリメータに用いるシンチレーティングタイル／ファイバーの光学的特性と品質管理」日本物理学会 (1992秋)
15. K.Kondo: "Recent Results from Hadron Colliders: UA1/UA2/CDF", Physics in Collision 12 (1992) 161, (Boulder, Colorado, U.S.A.)