第0章　はじめに

2001 年 3 月より、アメリカのフェルミ国立加速器研究所 (Fermi National Accelerator Laboratory　FNAL) にて CDF RUNⅡプロジェクト (the Collider Detector at Fermilab) が行われる予定である。CDF RUNⅡプロジェクトとは、その存在は予言されているが、未発見の粒子であるヒッグス粒子を観測しようとする計画である。本研究では、フェルミ国立加速器研究所 FNAL で研究されている CDF RUNⅡソフトウェアを研究することと、CDF RUNⅡソフトウェアを用いて CDF RUNⅡプロジェクトの結果をシミュレートすることを目的とした。

目 次

第 0 章　はじめに **1**

第 1 章　現在の素粒子物理学 **4**

1.1　クォーク、レプトン 4

1.1.1　クォーク 4

1.1.2　レプトン 4

1.2　相互作用 5

1.2.1　電磁相互作用 5

1.2.2　弱い相互作用 6

1.2.3　強い相互作用 6

1.3　ヒッグス粒子 7

第 2 章　加速器と測定器 **8**

2.1　加速器 8

2.1.1　線形加速器 8

2.1.2　円形加速器 8

2.1.3　衝突型加速器 9

2.2　検出器、測定器 10

第 3 章　CDF **12**

3.1　CDF 測定器 12

3.2　ヒッグス粒子の生成と崩壊の過程 13

3.3 CDF RUNIIソフトウェア 14

第4章 シミュレーション **16**

4.1 Z^0粒子 16

4.1.1 $Z^0 \longrightarrow q\bar{q}$におけるシミュレーション . 17

4.1.2 $Z^0 \longrightarrow e\bar{e}$におけるシミュレーション . 22

4.2 ヒッグス粒子 26

第5章 まとめ **27**

第1章　現在の素粒子物理学

1.1　クォーク、レプトン

1.1.1　クォーク

3 個のクォークが結合して、バリオン (B) をつくる。$B = (qqq)$ 陽子 (p) や中性子 (n) はバリオンの一つで、アップクォーク (u) とダウンクォーク (d) からなる。$p = (uud)$ $n = (udd)$ クォークには、異符号の量子数をもった反クォークが存在する。クォークと反クォークが結合して、メソン (M) ができる。$M = (q\bar{q})$

クォークには香り (フレーバー) という量子数があり、それぞれアップ、ダウン、チャージ、ストレンジネス、トップ、ボトムと呼ばれている。クォークの電荷 Q は $+\frac{2}{3}e$ のものと $-\frac{1}{3}e$ のものとがある。電荷の異なるものどうしが二重項をつくり、この二重項を世代と呼ぶ。

さらに、クォークには色電荷 (カラー) があり、カラーは r(赤)g(緑)b(青) の 3 つと、その補色となる $\bar{r}$, $\bar{g}$, $\bar{b}$ の 3 つとが存在する。

1.1.2　レプトン

レプトンもクォークと同様に 3 つの世代からなり、電子、ミュー粒子、タウ粒子、電子ニュートリノ、ミューニュートリノ、タウニュートリノの 6 種類がある。レプトンには、各

世代ごとに軽粒子数が存在する。この軽粒子数は、レプトンと反粒子との生成・消滅の際にも保存則が成り立つ。

	世代 I	世代 II	世代 III	電荷 Q
クォーク (q) 質量 GeV	アップ (u) 0.33	チャージ (c) 1.5	トップ (t) 175	$+\frac{2}{3}e$
	ダウン (d) 0.33	ストレンジ (s) 0.50	ボトム (b) 5	$-\frac{1}{3}e$
レプトン 質量 GeV	電子 (e) 5.0×10^{-4}	ミュー粒子 (μ) 0.106	タウ粒子 (τ) 1.784	$-e$
	電子ニュートリノ (ν_e) 0	μ ニュートリノ (ν_μ) 0	τ ニュートリノ (ν_τ) 0	0

表 1.1: クォークとレプトン

1.2 相互作用

普段私達が力と呼ぶ相互作用は媒介粒子のやりとりで記述され、相互作用を媒介粒子のやりとりで記述される理論がゲージ理論である。クォークやレプトンといった素粒子には、重力相互作用、電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用の 4 つの相互作用が働いている。しかし、素粒子の質量は大変小さいため、素粒子の世界では重力相互作用は無視される。

1.2.1 電磁相互作用

電磁相互作用は荷電粒子間にのみ働き、2 つの粒子の電荷が同じならば斥力、異なれば引力となる。つまりクーロン力は電磁相互作用である。電磁相互作用におけるゲージ粒子は光子 (γ) で、一方の粒子が光子を放出し、もう一方の粒子が

光子を吸収することで、2 つの粒子は相関関係をもつ。このように、電磁相互作用を光子のやりとりで表す力学を量子電磁力学 (Quantum Electro Dynamics QED) と呼ぶ。

相互作用の大きさを示す結合定数は、微細構造定数 α と呼ばれ、

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0\hbar c} \simeq \frac{1}{137.036}$$

である。

1.2.2 弱い相互作用

弱い相互作用はクォーク、レプトンともに働くが、その力の大きさは電磁相互作用よりも小さい。原子核のβ 崩壊、中性子やπ 中間子などの粒子の崩壊の原因となる力である。弱い相互作用における媒介粒子は W^+、W^-、Z^0 の 3 つである。

1.2.3 強い相互作用

強い相互作用はクォーク間にのみ働き、相互作用の中でもっとも力が大きく、その大きさは電磁相互作用のおよそ 100 倍である。強い相互作用はクォークを結合させて陽子 (q) や中性子 (n) をつくり、また陽子や中性子を結合させて原子核をつくりだす。

強い相互作用における媒介粒子はグルーオン (g) といい、グルーオンは 8 種類だけ存在する。グルーオンの交換で強い相互作用を表す理論を量子色力学 (Quantum Chromo Dynamics QCD) と呼ぶ。量子色力学とは、色電荷の理論である。

電磁相互作用と弱い相互作用は GWS(グラショー・ワイン

バーグ・サラム) 理論で記述され、2 つの相互作用をあわせて電弱相互作用と呼ぶ。強い相互作用は量子色力学 (QCD) で与えられ、この 2 つを合わせたものが標準理論となる。

	粒子	質量 GeV	電荷	相互作用
光子	γ	0	0	電磁相互作用
ベクトル・ボゾン	W^+	50	$+e$	弱い相互作用
	W^-	50	$-e$	
	Z^0	50	0	
グルーオン	g	0	0	強い相互作用

表 1.2: ゲージ粒子

1.3 ヒッグス粒子

標準模型の原理となっているゲージ理論がなりたつためには、ゲージ不変性によりゲージ粒子の質量が 0 でなくてはならない。しかし、現実にはクォークやレプトンだけでなく、W 粒子や Z 粒子にも質量が存在する。この矛盾を解決するために、スカラー場であるヒッグス場を導入する。これによって、粒子はヒッグス場より相互作用を受け、粒子は光速より遅い速度で運動することになる。このときの相互作用のエネルギーが質量に相当すると考えられる。このようにヒッグス場を導入して質量を定義することで、ゲージ不変性を保つ方法をヒッグス機構という。ヒッグス場が存在するならば、最低 1 つ以上のスカラー粒子となるヒッグス粒子が存在するはずである。

第2章　加速器と測定器

2.1　加速器

高エネルギー物理学における実験のほとんどが、加速器を用いて粒子とどうしを衝突させて、その結果、生成された粒子やそのエネルギーを観測するというものである。このような高エネルギー物理学の要となる加速器には大きく分けて、線形加速器、円形加速器、衝突型加速器の3つがあげられる。

2.1.1　線形加速器

線形加速器は、一連の空洞管に高周波発振器で電圧をかけて、その中で粒子を走らせることによって粒子を加速させる。粒子を加速できるのは一回きりなので、粒子のエネルギーを大きくするためには高電圧をかけることが要求される。

2.1.2　円形加速器

円形に設置した空洞に磁場をかけて粒子を円軌道に走らせ、一ヵ所に設置した加速管で粒子が通過するたびに加速する。一つの加速管で何回も加速を行うことができる。

一様な磁場をかけたDEE(中空の円を2つに割ったような形をしている) の中で粒子を走らせ、DEEの隙間を通過するたびに加速される。粒子は加速されるにつれて、粒子の軌道半

径が大きくなっていく。このような円形加速器はサイクロトロンと呼ばれている。

サイクロトロンでは、粒子のエネルギーが大きくなると円形軌道が大きくなる。そこで円形軌道の半径を一定にし、粒子のエネルギーの増加に合わせて、かける磁場を増大させるのがシンクロトロンである。現在使われている円形加速器のほとんどがシンクロトロンである。

粒子のエネルギーが大きくなればエネルギーの損失が起こる。これは荷電粒子が回転運動をする際に光を放射することによって、その軌道を変化させるために起こる。これをシンクロトロン放射といい、シンクロトロンの限界以上に荷電粒子を加速するにはシンクロトロン放射の起こらない線形加速器 (リニアコライダー) が必要となる。

2.1.3 衝突型加速器

加速させた粒子を静止している粒子に衝突させるよりも、加速させた2つの粒子を逆方向から衝突させた方が衝突のエネルギーは大きくなり、1つの粒子を加速させるエネルギーは小さくてすむ。CDF RUNIIプロジェクトで使われるTEVATRONのエネルギーは1Tev+1Tev=2TeVである。

2つの加速させた粒子を衝突させるとなると、加速した粒子を静止した粒子に衝突させるより反応する確率は極端に低下する。そのため加速させた粒子をすぐに放射させずに、円形加速器の中である程度の量まで貯めてから一気に放射する。このときに放射される粒子の密度が小さい方が反応する確率が大きくなるため、粒子をしぼって粒子ビームとして放射する。

高エネルギー物理学では、衝突の頻度をルミノシティ L と

いう量を用いて表す。

$$L = \frac{N_1 N_2 f}{n_b A}$$

N_1, N_2 ： 加速器内のビーム粒子の総数
f ： ビーム粒子の回転周波数
n_b ： 一周の中にあるバンチ数
A ： ビームの面積を表す量

ルミノシティ L と反応断面積 σ との積をとれば、反応頻度 N が求まる。

$$N = L \cdot \sigma(\mathrm{sec}^{-1})$$

2.2 検出器、測定器

検出器は、粒子が検出器の内部にある物質と反応を起こして生じる信号を、光や電気信号やとして取り出す。シンチレーションカウンターやチェレンコフカウンターなど検出する粒子に応じて、多くの検出器がある。

カロリーメーターはシャワーを利用して、ミューオンとニュートリノ以外のすべての既知の粒子のエネルギーを測定することができる。また、シャワーを発生させないことによりミューオンを識別することができる。

半導体検出器においては、空乏層を荷電粒子が通過すると、軌跡に沿って電子とホールのペアがつくられ電流が流れるた

めパルスが発生する。半導体検出器を集積させて帯状に並べれば、空間分解能をもつ位置検出器として使用可能である。

半導体検出器であるSVX(Sillicon Vertex Detector)検出器は、CDF RUNⅡプロジェクトでもCDF測定器で使われる検出器であり、本研究室でも動作研究などを行っていた。

第3章　CDF

3.1　CDF 測定器

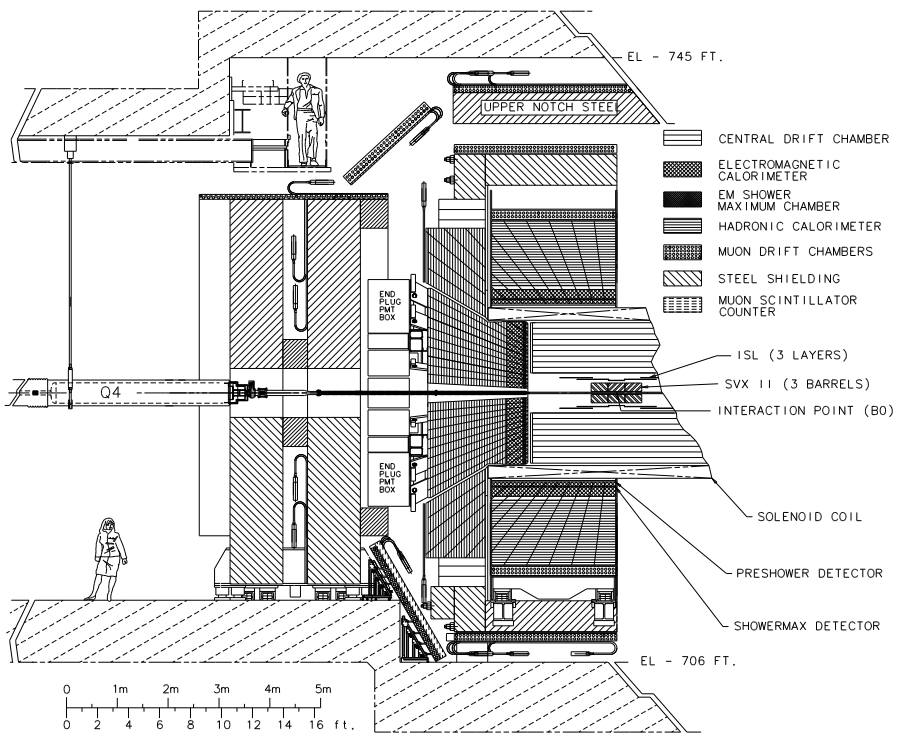

図 3.1: CDF 測定器の断面図

CDF 測定器は CDF RUNⅡプロジェクトにおける測定器である。CDF 測定器は、入射する粒子が進むビームパイプの外側を、飛跡検出器・ソレノイドコイル・カロリメーター・吸収材 (鉄)・ミューオンチェンバーの順にとり囲んでいる。図

3.1 が CDF 測定器の断面図である。

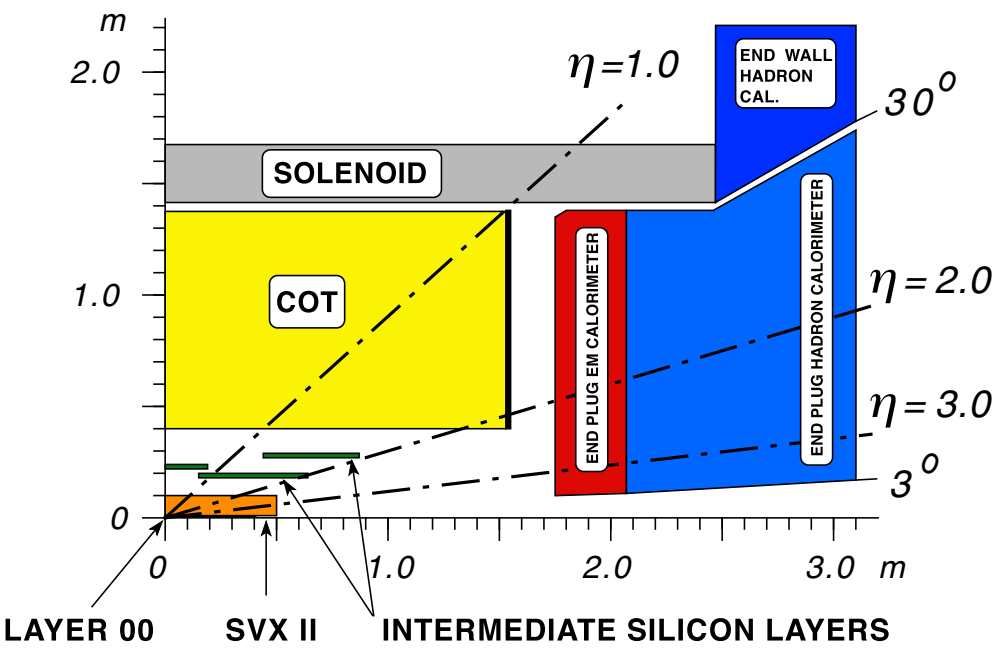

図 3.2: CDF 測定器

図 3.2 の η は擬ラピディティーという値で、詳しくは第 4 章で述べています。

3.2 ヒッグス粒子の生成と崩壊の過程

CDF で行われる実験におけるヒッグス粒子の生成と崩壊の過程は、主に次の 2 通りである。

$$q\bar{q} \longrightarrow WH \quad , \quad H \longrightarrow b\bar{b}$$
$$q\bar{q} \longrightarrow ZH \quad , \quad H \longrightarrow b\bar{b}$$

CDF で検出される粒子は、ヒッグス粒子が崩壊した $b\bar{b}$ の b クォークのジェットである。

ヒッグス粒子は崩壊過程において b クォーク $\bar{b}$ クォークとに崩壊するが、ヒッグス粒子とともに W 粒子や Z 粒子もジェットを放出する。したがって、ジェットの数が倍の 4 ジェットとなるためにシミュレーションを行った結果の解析が難しくなる。これを解決するために、b クォークのジェットだけを選んで選出する方法を調べなくてはならない。

そこで、まず崩壊ジェットが 2 ジェットである Z^0 粒子のシミュレーションから行うことにした。

3.3 CDF RUNⅡソフトウェア

CDF RUNⅡソフトウェアは CDF で研究されていて、様々な粒子の衝突実験のシミュレーションや解析を行うことができる。

CDF RUNⅡソフトウェアの PYTHIA というプログラムを使って、粒子の衝突シミュレーションを行った。PYTHIA を動かすと反応させる粒子をつくり衝突のシミュレーションを行い、PYTHIA は、さらに GEANT3 というプログラムを動かして、測定器の設定を行い観測を行う。PYTHIA では衝突させる粒子と生成される粒子とを指定することができ、そのプロセスは 2000 近くある。

最終的な結果は ROOT ファイルとして見ることができる。この ROOT というプログラムは、CDF で研究された解析用のプログラムで、簡単な C や C++のソースコードでグラフ

や図形を描くことができる。

図 3.3 は ROOT を用いて、下の式におけるヒッグス粒子の質量に対する生成断面積をグラフにしたものである。

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}(q\bar{q} \to ZH) &= \frac{(G_F M_W^2)^2}{9\pi}(V_q^2 + A_q^2)\frac{p_Z}{\sqrt{\hat{s}}}\frac{3M_W^2 + p_W^2}{(\hat{s} - M_Z^2)^2} \\ p_V^2 &= \frac{1}{4\hat{s}}(\hat{s}^2 + M_V^4 + M_H^4 - 2\hat{s}M_V^2 - 2\hat{s}M_H^2 - 2M_V^2 M_H^2)\end{aligned}$$

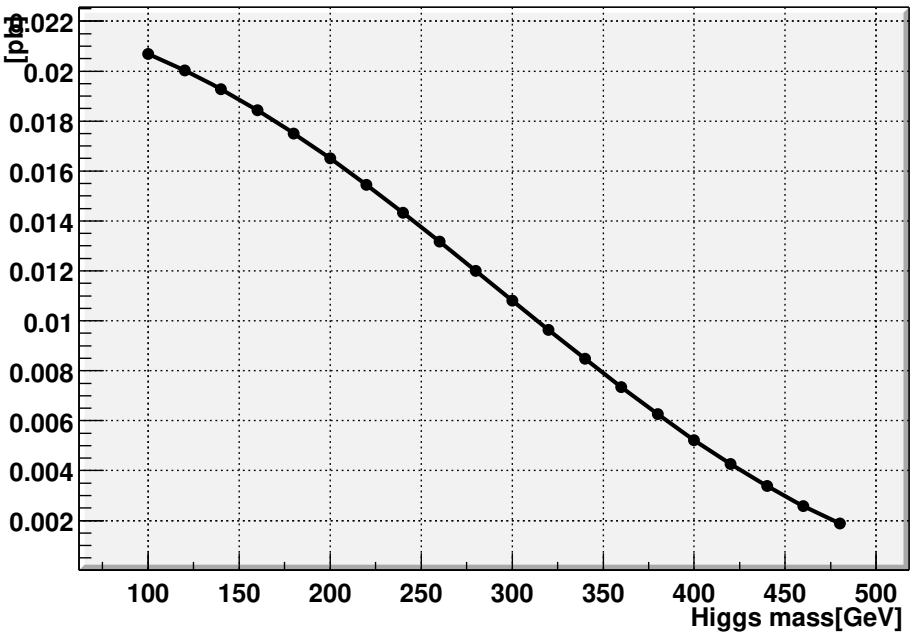

図 3.3: ROOT による計算結果

生成された粒子の質量分布を観測するために、JetExample-Module というプログラムを編集して使用した。シミュレーションを行った結果を入力として、エネルギー分布と質量分布、ジェットの数をヒストグラミングできるようにした。

第4章　シミュレーション

4.1　Z^0 粒子

フェルミオンと反フェルミオンとの衝突実験を 100 イベント シミュレートして、生じた Z^0 粒子の崩壊ジェットを観測した。Z^0 粒子のシミュレーションは以下の崩壊過程となる 2 通りを行った。

$$f_i\bar{f}_i \longrightarrow \gamma^*/Z^0 \quad , \quad Z^0 \longrightarrow q\bar{q}$$
$$f_i\bar{f}_i \longrightarrow \gamma^*/Z^0 \quad , \quad Z^0 \longrightarrow e\bar{e}$$

4.1.1 $Z^0 \longrightarrow q\bar{q}$ におけるシミュレーション

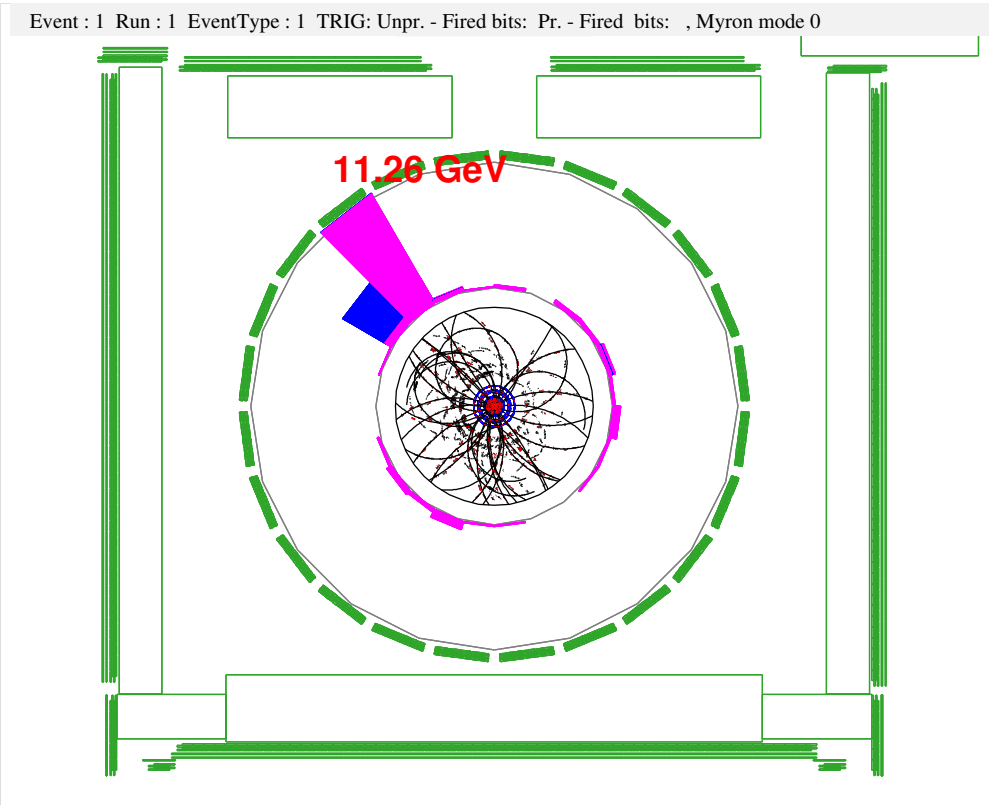

図 4.1: $Z^0 \longrightarrow q\bar{q}$ におけるシミュレーション結果

図 4.1 はシミュレーションを行った結果である。中心部で粒子の衝突が起こりジェットが放出されている。扇型のものはカロリーメーターで測定された電磁シャワーとハドロンシャワーである。そのエネルギーは 11GeV となっている。外側を囲んでいるのはミューオンチェンバーである。Z^0 粒子のジェットが左上と右下に 2 つ存在するのが何とかわかる。

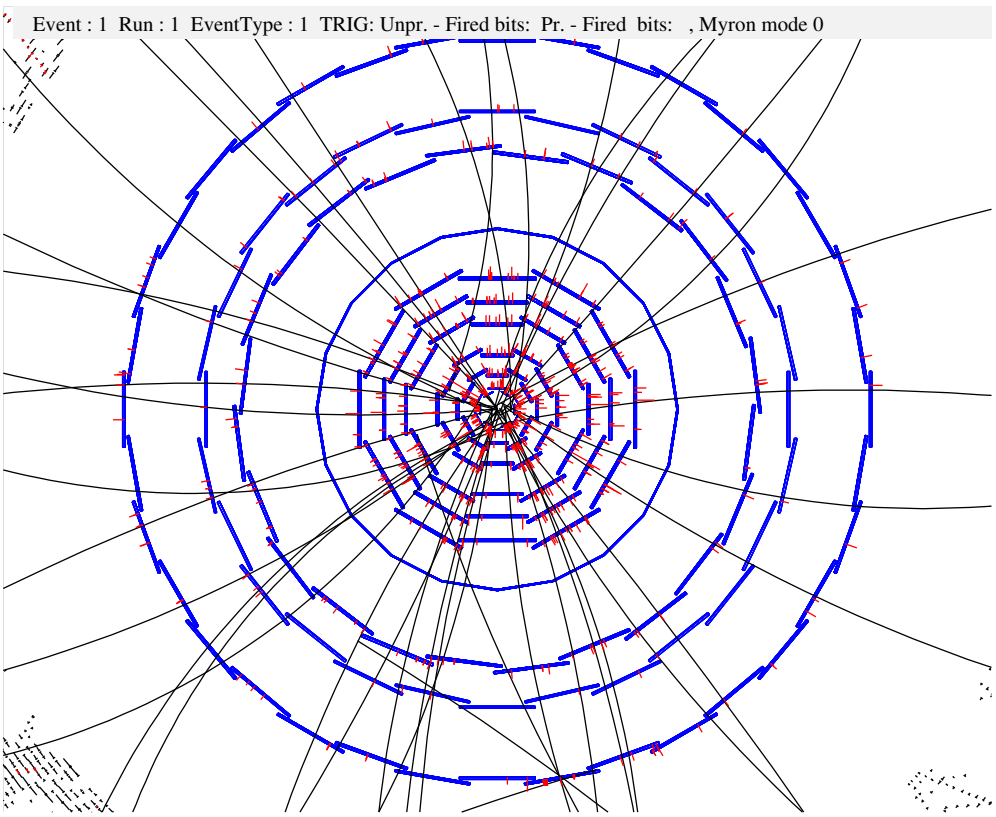

図 4.2: 図 4.1 における中心部の拡大図

図 4.2 は図 4.1 の中心部の拡大図であり、中央から出ている線は粒子の飛跡である。内側の 5 層は SVX 検出器である。

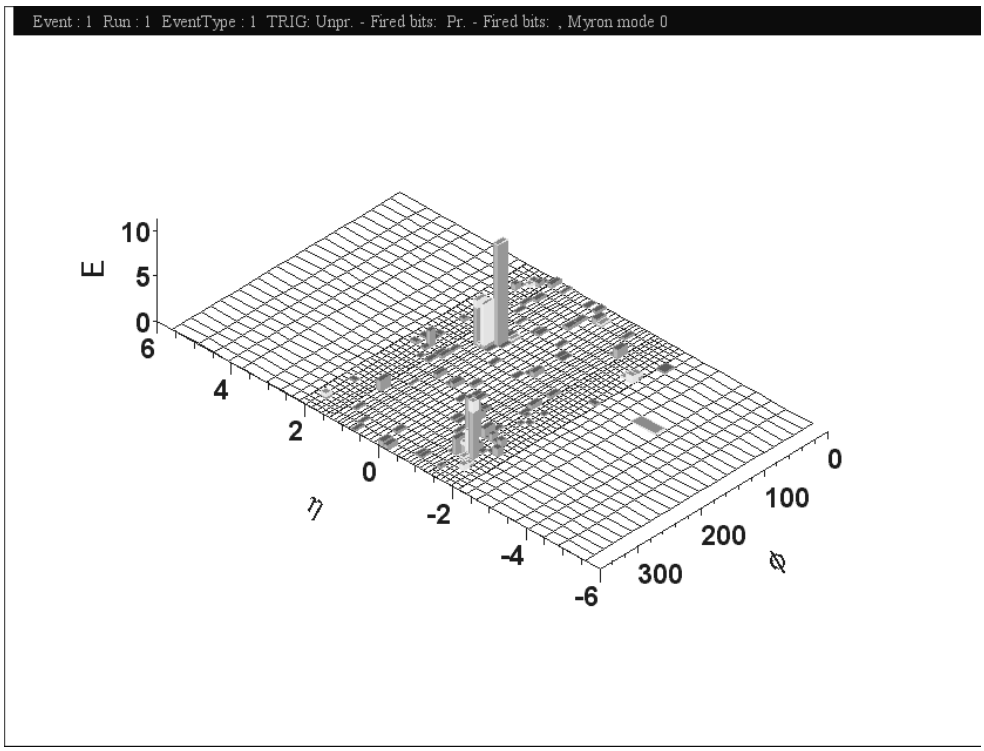

図 4.3: カロリーメーターで測定したエネルギー

図4.3において、Eはエネルギーで、ϕは入射粒子に対して垂直な平面におけるジェットの方向を角度で表したものであり、ηは下式で表される。

$$\eta = -\ln \tan \frac{\theta}{2}$$

このときのθは入射粒子の軌道からジェットがどれだけずれているかを表し、ηは擬ラピディティーと呼ばれ、ジェットがどれだけ検出器に入射するかを示す。$\theta = 0$のときに$\eta = \infty$となり、$\theta = \pi/2$のときに$\eta = 0$となる。 $-2 < \eta < 2$を満たすηの値をもつジェットが検出に有効なジェットとなる。$\eta = 2$となるθは約15°である。

図4.3においては2ジェットを観測することができる。

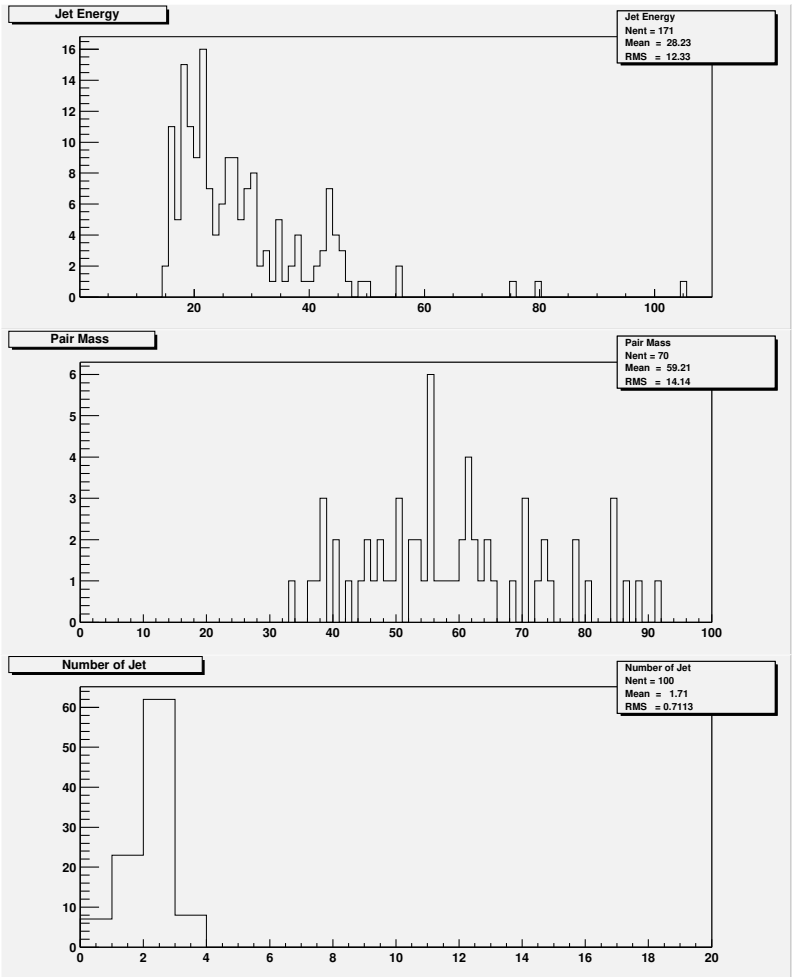

図 4.4: $Z^0 \longrightarrow q\bar{q}$ におけるヒストグラミング結果

図 4.4 は $Z^0 \longrightarrow q\bar{q}$ のシミュレーションの結果を、上からそれぞれトランスバースエネルギー E_t 分布・Z^0 粒子の不変質量分布・各イベントのジェットの数をグラフにしている。どのグラフも縦軸はイベント数で、E_t 分布と不変質量分布の横軸の単位は GeV となっている。トランスバースエネルギーとは入射させる粒子に対して垂直な方向のエネルギー成分を表す。不変質量分布を計算するときに、ジェットの数が一つ以下だと計算することができないので、ジェットのかずが二つ

以上のときに計算を行うように指定してある。そのため、不変質量分布の全イベント数は 70 となっている。

E_t 分布では、ジェットのエネルギーが $20\mathrm{GeV}$ 付近のイベントが多くなっている。

Z^0 粒子の質量は $90\mathrm{GeV}$ だが、不変質量分布では平均質量が $60\mathrm{GeV}$ となっている。これはハドロンシャワーのエネルギーを測定するときに、カロリーメーターの後方に崩壊した粒子が飛んでしまうために質量が小さくなると考えられる。

4.1.2 $Z^0 \longrightarrow e\bar{e}$ におけるシミュレーション

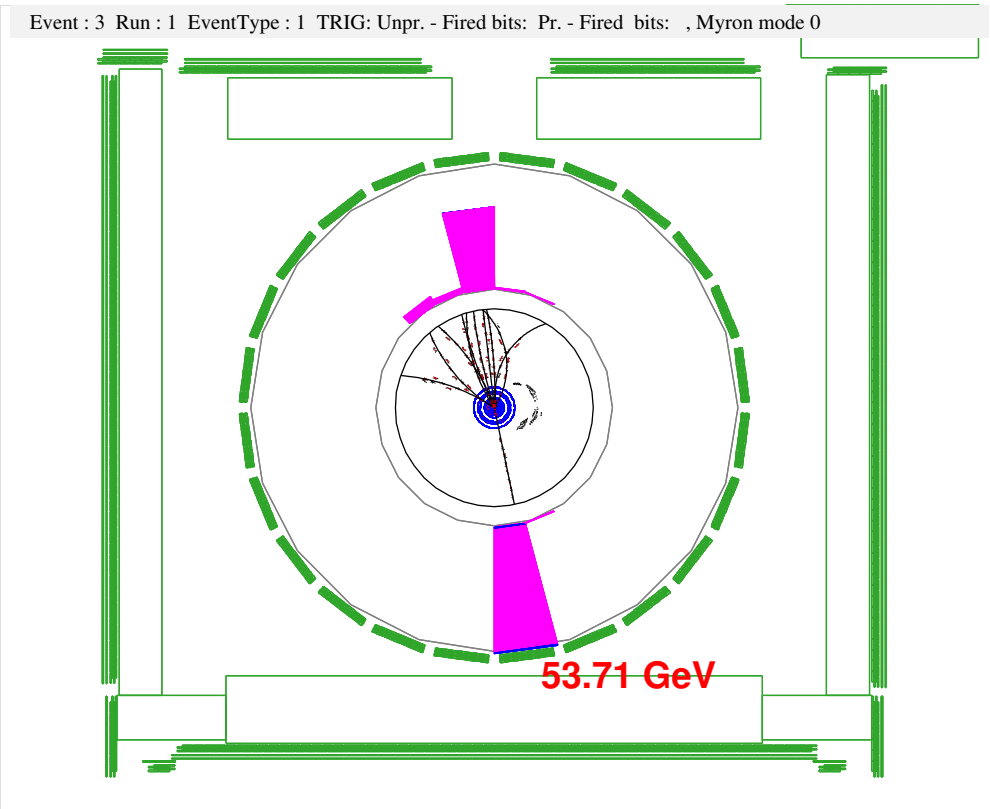

図 4.5: $Z^0 \longrightarrow e\bar{e}$ におけるシミュレーション結果

図 4.5 は、図 4.1 と比較すると、こちらの方がより 2 ジェットであることがわかる。また、もっとも大きなジェットのエネルギーも 54GeV と大きな値になっている。

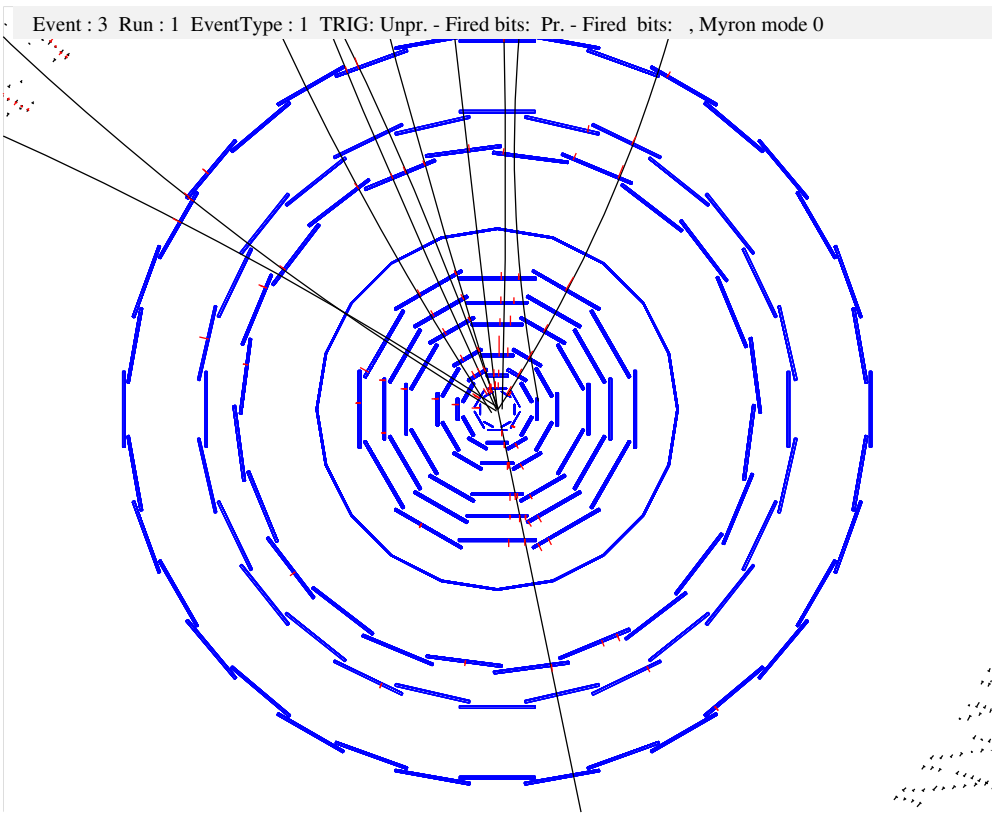

図 4.6: 図 4.5 における中心部の拡大図

図 4.6 は図 4.5 の中心部の拡大図である。$Z^0 \longrightarrow e\bar{e}$ の崩壊において観測される粒子は e と $\bar{e}$ の 2 つだけであるはずだが、ジェットは複数出ている。このジェットはフェルミオンと反フェルミオンとの衝突を行ったときに付随してしまった周りの粒子のジェットだと考えられる。

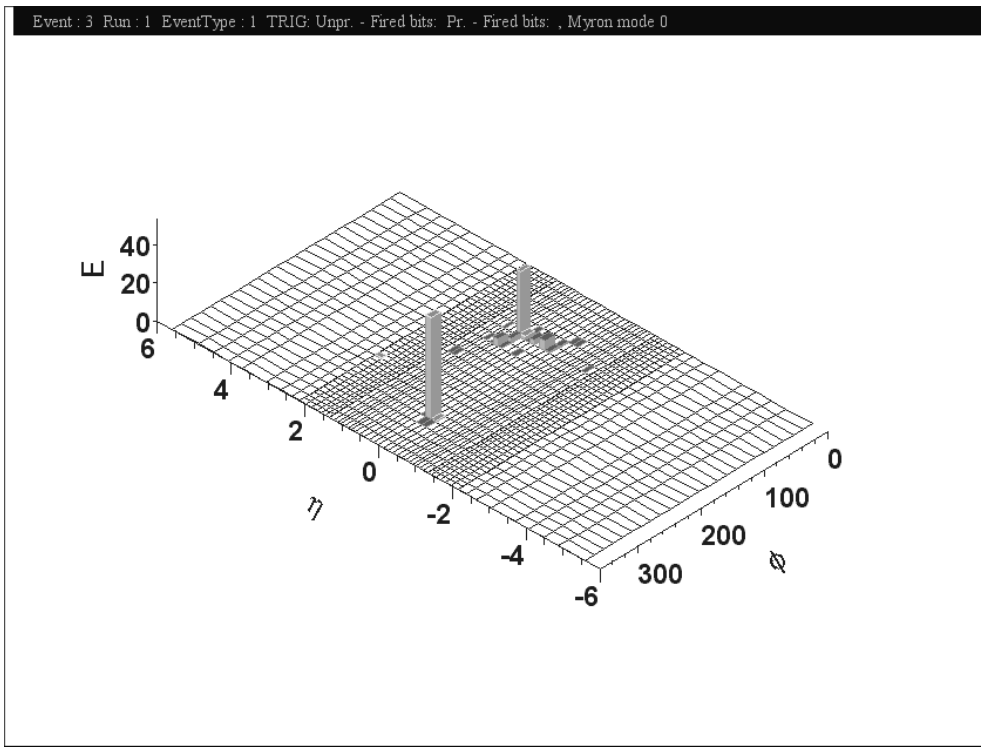

図 4.7: カロリーメーターで測定したエネルギー

図 4.7 は図 4.3 と同様に、E はエネルギー・ϕ はジェットの方向・η は擬ラピディティーを表す。$Z^0 \longrightarrow q\bar{q}$ のグラフよりも、2 ジェットであることがよりわかりやすくなっている。

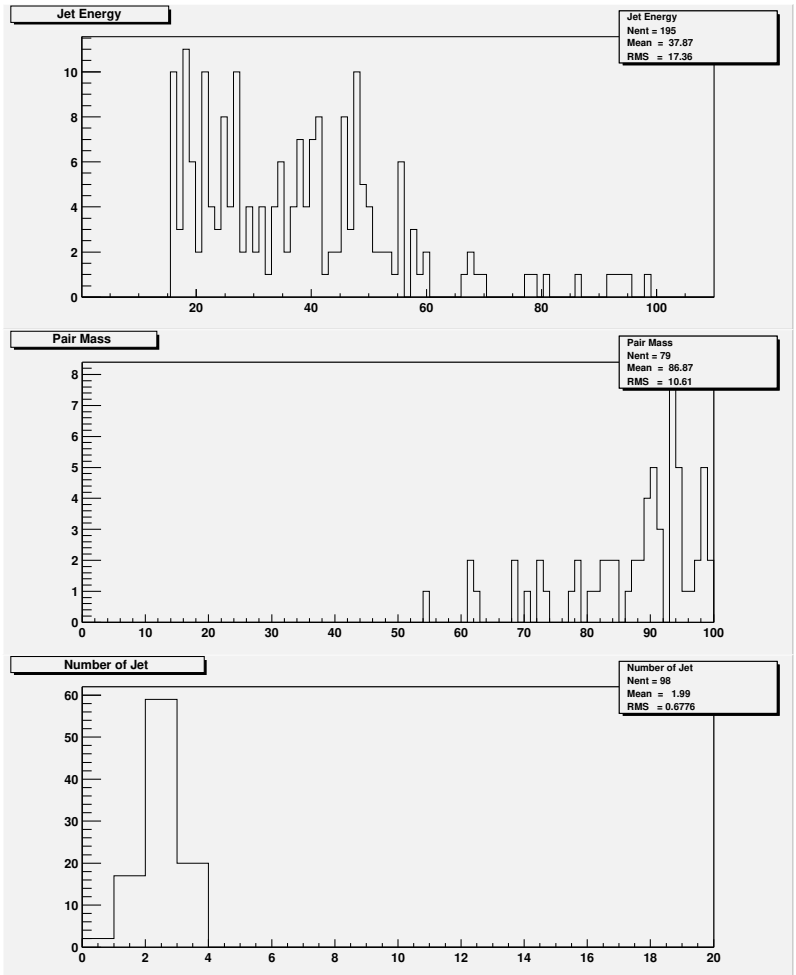

図 4.8: $Z^0 \longrightarrow e\bar{e}$ におけるヒストグラミング結果

図 4.8 は図 4.4 と同様に、上からトランスバースエネルギー E_t 分布・Z^0 粒子の不変質量分布・各イベントのジェットの数をグラフにしている。

ジェットはトランスバースエネルギーが $20\mathrm{GeV}$ から $60\mathrm{GeV}$ のところに多く分布している。ジェットの平均トランスバースエネルギーは $38\mathrm{GeV}$ であった。

$Z^0 \longrightarrow q\bar{q}$ における崩壊過程では Z^0 粒子の平均質量が $60\mathrm{GeV}$ だったのに対して、$Z^0 \longrightarrow e\bar{e}$ における崩壊過程では Z^0 粒子

の平均質量が 90GeV となり正しいと思われる値になった。

15GeV 以上のエネルギーをもつジェットの数に関しても、半分以上のイベントで 2 ジェットとなった。

4.2 ヒッグス粒子

CDF RUNII ソフトウェアで $q\bar{q} \longrightarrow WH, H \longrightarrow b\bar{b}$ における反応をシミュレートしてヒッグス粒子の崩壊した b クォークジェットを観測し、その質量分布をヒストグラミングすることが最終的な目標だったが、そこまでには至らなかった。

しかし、Z^0 粒子のシミュレーションを行い、崩壊ジェットの観測と質量分布をヒストグラミングするところまではできた。

今後は、ヒッグス粒子のシミュレーションを行うために、どうすれば b クォークジェットだけを検出できるかフレーバータギングの方法を調べて、シミュレーションにおける過程との比較を行ってやる必要がある。

第5章　まとめ

2001年3月からフェルミ国立加速器研究所 FNALで行われるCDF RUNⅡプロジェクトでは、ヒッグス粒子を発見するために3年間イベントを貯め続ける。おそらくこの実験によってヒッグス粒子は発見されるであろう。

本研究では、CDF RUNⅡソフトウェアの研究とCDF RUNIプロジェクトの結果のシミュレーションを目的としていた。しかし、ヒッグス粒子のシミュレーションを行うことまではたどり着けなかった。どうすればbクォークジェットだけを検出できるかフレーバータギングの方法を調べて、シミュレーションにおける過程に導入して、最終的にヒッグス粒子のシミュレーションをすることが今後の課題である。

最後になりましたが、一年間さまざまなことを教えて頂いた高嶋先生と、一緒に勉強した研究室の小野君と平松君に感謝の気持ちを述べたいと思います。一年間ありがとうございました。

関連図書

[1] 素粒子物理学の基礎 I
長島順清 / 著　朝倉書店

[2] 素粒子物理学の基礎 II
長島順清 / 著　朝倉書店

[3] パリティ物理学コース 高エネルギー物理学実験
真木晶弘 / 著　丸善

[4] パリティ物理学コース 素粒子物理学
牧二郎、林浩一 / 著　丸善

[5] PYTHIA 5.6 and JETSET 7.3　Physics and Manual

[6] The CDF II Detector　Technical Design Report