

アトラス実験における電弱相互作用の精密測定に関する  
シミュレーション

岡山大学大学院自然科学研究科数理物理学専攻  
素粒子物理学実験研究室

41416016

内藤大輔

平成18年2月13日

## 概要

2007年に開始予定のLHC(Large Hadron Collider:大型ハドロン衝突型加速器)計画は標準模型によって予言されている未発見粒子であるヒッグス粒子の探索を主な目標としている。それ以外にも超対称性粒子や余剰次元の発見も期待されている。また、Wボソンの質量の精密測定なども目標の一つとなっている。この測定は重要な意味を持つ。Wボソン質量の精密測定から輻射補正によりヒッグス粒子の質量を予言できる。直接測定と間接測定によるヒッグス粒子の質量が一致するかどうかは標準理論の重要な検証となる。

このLHCで起こる事象を観測しようとしている実験の一つがアトラス実験である。アトラス実験はアトラス検出器と呼ばれる巨大な装置を用いて行なわれる。この装置は様々な検出器を装備しているが、その中の一部である半導体飛跡検出器の開発に日本も参加してきた。岡山大学もその開発に携わっており、その検出器のジオメトリーを構築した。ジオメトリーとはコンピューターシミュレーションによってLHCで起こる事象を再現したり、アトラス検出器の振舞を再現する際に必要となる検出器の幾何情報の事である。ジオメトリーはジオモデルと呼ばれるライブラリーによって記述される。ジオモデルはC++言語で書かれており、ジオメトリーの構築もC++を用いたプログラミングという形で行なわれる。

我々はSCTバレルおよびSCTバレルモジュールのジオメトリーを構築した。その結果、物質量が初期のジオメトリーに比べて約19%増加した事が分かった。

また、我々はWボソン質量の測定における内部飛跡検出器の物質量の影響を調べた。我々は故意に物質量を増加させた内部飛跡検出器のジオメトリーを用いてWボソンの横方向質量を再構成し、通常のジオメトリーでの再構成の結果と比較した。その結果、物質量20%の増加に対し、Wボソンの横方向質量の分布におよそ500MeVのずれが生じる事が分かった。この事から、もし、現行の精度に近い50MeVの精度でWボソンの質量を決定するには内部飛跡検出器の物質量を2%で記述する必要がある事が分かる。

まず、1章でLHC計画やアトラス実験、Wボソン質量の精密測定が高エネルギー物理学においてどのような位置にあるのかを紹介する。次に2章でWボソンの質量測定の重要性、測定の方法について述べる。続いて3章では本研究で携わったアトラス実験及びLHCについて述べる。次の4章で我々が行なったジオメトリー構築についての詳細を述べる。そして5章で $W \rightarrow e\nu$ 事象からWボソン横方向運動量をもとめ、それが検出器の物質量によってどのような影響を受けるのかを調べた結果を示す。最後に全体のまとめで終る。

# 目次

<b>1</b>	<b>はじめに</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>電弱相互作用の精密測定</b>	<b>7</b>
2.1	W ボソンの質量	7
2.2	W ボソンの生成	7
2.3	W ボソンの横方向質量	8
<b>3</b>	<b>アトラス実験</b>	<b>16</b>
3.1	大型ハドロン衝突型加速器	16
3.2	アトラス検出器	17
3.3	半導体飛跡検出器	18
<b>4</b>	<b>SCT バレルのジオメトリ構築</b>	<b>22</b>
4.1	物質量	22
4.2	ジオメトリ構築の方法	22
4.3	ジオメトリを構築した部分	23
4.4	物質量の評価	25
<b>5</b>	<b><math>W \rightarrow e\nu</math> 事象の検出器シミュレーション</b>	<b>29</b>
5.1	方法	29
5.2	シミュレーションの条件	30
5.3	シミュレーションによる W ボソンの横質量分布	32
5.4	考察	32
<b>6</b>	<b>まとめ</b>	<b>37</b>
<b>7</b>	<b>謝辞</b>	<b>38</b>

## 目次

1	様々な実験によって W ボソンの質量測定の結果。これは 2005 年夏の結果である。 . . . . .	6
2	W ボソンの生成と崩壊を示すファインマンダイアグラム . . . . .	7
3	W ボソンの 2 体崩壊 . . . . .	8
4	加速器実験の座標形。衝突点が原点となるように座標形を定義し、z 方向にビームが流れる。また y 軸は鉛直上向きで、x 軸は水平方向である。LHC では x 軸の延長線上に LHC リングの中心が来る。 . . . . .	9
5	x-y 平面。 $\mathbf{p}_T$ は 3 元運動量を x-y 平面に投影して得られる。 . . . . .	10
6	衝突によって出来た粒子。太い円弧の飛跡は電子の軌道を表し、細い直線はその他の粒子を表す。点線はニュートリノを表す。 . . . . .	11
7	W ボソンの横方向質量分布。特徴は W ボソンの質量のところにあるピークである。W ボソンの横方向質量分布は Breit-Wigner 分布によって W ボソンの質量を少しだけ超えて分布する。ヒストグラムは W ボソンの質量に相当する赤い線よりもすこしはみ出している。 . . . . .	12
8	電子の $\theta$ 分布。分布からはビームパイプに近い角度で飛び出す電子が比較的多い事が分かる。 . . . . .	13
9	ニュートリノの電子の $\theta$ 分布。電子と同様に分布からはビームパイプに近い角度で飛び出すニュートリノが比較的多い事が分かる。 . . . . .	14
10	Breit-Wigner 分布。この分布の中心値はちょうど W ボソンの質量に一致する。この分布の幅は W ボソンの崩壊幅 $\Gamma$ に等しい。これは PYTHIA で生成された W ボソンの質量をプロットしたもの。PYTHIA の W ボソンの質量のデフォルト値は 80.45GeV で崩壊幅は 2.07155GeV である。 . . . . .	15
11	LHC の航空写真。 . . . . .	16
12	アトラス検出器のイメージ図。一番内側の黄色い部分が内部飛跡検出器、緑色の部分が電磁カロリメーター、赤い部分がハドロンカロリメーター、水色の部分がミュオン検出器である。 . . . . .	17
13	粒子が痕跡を残す検出器。ミュオンは全ての検出器を通過する。光子は内部飛跡検出機には飛跡を残さないが電磁カロリメーターでシャワーを起こす。 . . . . .	18
14	TRT と SCT のイメージ。SCT の周りを TRT が囲む形になっている。TRT と SCT は円筒形の部分と円盤の部分からなる。 . . . . .	19
15	Pixel 検出器を見せた図。SCT の内部に Pixel 検出器がある。 . . . . .	19
16	SCT バレルモジュールが配置された SCT バレル。 . . . . .	20
17	SCT バレルモジュールの写真。 . . . . .	21
18	粒子が物質中を通過する様子。粒子が感じる物質の量は物質質量によって評価できる。 . . . . .	23
19	$\eta$ と $\theta$ の関係。 $\eta$ は $\theta=0$ で無限大、 $\theta=\pi$ で負の無限大になる。 . . . . .	24
20	SCT バレルジオメトリーを視覚化した様子。これは HepvisEventViewer というソフトを使ってジオメトリーを見たもの。図には SCT のバレル部分とその両側にフォワードホイールとよばれる円盤の部分が見える。 . . . . .	25
21	SCT バレルモジュールの模式図。 . . . . .	26

22	SCT バレルモジュールをプログラミングの為に簡略化した図形。橙色の部分は図 21 にある Hybrid assembly の部分である。灰色の部分は Baseboard TPG と呼ばれる部分である。図 21 には多くの部品 (BeO facing や Datum washer など) があるが、これらを混ぜ合わせて灰色の部分としている。緑色の部分はシリコンセンサー (Silicon sensor) である。 . . . . .	26
23	SCT バレルの側面についている部品の拡大図。 . . . . .	27
24	SCT バレルの物質分布。一番上の分布は SBG0 ジオメトリー (初期のジオメトリー) の物質分布。平均値が 10.34 % $X_0$ になる。真中にある分布は SBG1 (我々が新しく構築したジオメトリー) の物質分布である。平均値が 12.31 % $X_0$ になる。一番下の分布は SBG0 と SBG1 の分布を重ねたものである。全体的に SBG1 ジオメトリーの方が物質量が増加している様子が分かる。 . . . . .	28
25	シミュレーションの全体の流れ。一般的に一番時間がかかるのは検出器シミュレーションである。 . . . . .	30
26	アトランティスによる $W \rightarrow e\nu$ 事象の視覚化。多くの点が表示されているのが TRT でその内部に SCT と Pixel 検出器がある。黒い部分が内部飛跡検出器である。中心から出ている水色の線が電子が通った飛跡をフィットしたものである。この線上にある白い点が検出器に残ったヒット点であり、それ以外のところに沢山見られる点は検出器のノイズである。シミュレーションではノイズも考慮出来るようになっている。 . . . . .	31
27	W ボソンの横方向質量の分布。ピンク色の鉛直線が PYTHIA のパラメータとして与えられている W ボソンの質量 (80.45GeV) を示す。青いヒストグラム (Parton Level) は W ボソンが崩壊して出てきた電子とニュートリノの真の横方向運動量によって再構成した W ボソンの横方向質量である。真の値を使っているので、検出器の分解能や物質量の影響を受けない。こん青いヒストグラムには W ボソンの質量 80.45GeV (PYTHIA の W ボソンの質量の設定値) にピークがある。そこから右の方への浸み出しは W ボソンの Breit-Wigner 分布によるものである。もし Breit-Wigner 分布の効果がなければピンクの鉛直線のところで分布は切れてしまう (すなわち青いグラフに見えるような浸み出しは起こらない)。黒いヒストグラムは G1 ジオメトリーを使った検出器シミュレーションで再構成した W ボソンの横方向運動量である。赤いヒストグラムは G5 ジオメトリーを使ったものである。このヒストグラムのピン幅は 0.5GeV に相当する。 . . . . .	33
28	W ボソンの横方向質量の分布。72GeV から 86GeV を拡大したもの。赤と黒のヒストグラムのずれがよく分かる。 . . . . .	34
29	電子の横方向運動量の分布。黒いヒストグラムは G1 ジオメトリーを用いたシミュレーションによって得られた結果。赤いヒストグラムは G5 ジオメトリーを用いた結果。ピンクの鉛直線は W ボソンの質量の半分の位置を示している。 . . . . .	35
30	電子の横方向運動量の分布 (図 29) の 30GeV から 50GeV を拡大したもの。 . . . . .	36

## 表目次

1	重量及び物質量の比較のまとめ。SCT 全体及びバレル部分の本当の重量は分かっていない。 これは装置自体が開発段階であり、総重量が測定できないからである。 . . . . .	26
2	重量及び物質量の比較のまとめ。 . . . . .	27
3	G1 と G5 のジオメトリーの違い。 . . . . .	30

# 1 はじめに

電子陽電子衝突型加速器 LEP や SLC により W・Z ボソンの質量や崩壊幅が精密に測定された (図 1)。さらに陽子反陽子衝突型加速器 Tevatron によるトップ・クォークや W ボソンの質量測定から軽いヒッグスが 186GeV 以下に存在することが、電弱相互作用の輻射補正による計算により予言されている。

LHC 計画では、早期に軽いヒッグスが発見されることが期待される。一方 W ボソンの質量をさらに測定して、ヒッグス粒子の直接観測と、輻射補正によるヒッグス粒子の予言が一致しているのかどうかは非常に重要なテストである。

この W ボソンの質量を精密に測定するには、検出器内部にある物質の影響をよく把握しなければならない。W  $\rightarrow e\nu$  事象 (2.2 節参照) から出てくる電子は物質中で制動輻射を起こしてエネルギーを失う。その為、電子の運動量が低く見積もられ、それから再構成された W ボソンの横方向質量の分布 (2.3 節参照) に影響する。この影響をよく把握する為に検出器内にある物質を正しく評価する必要がある。

LHC の衝突によって起こる現象を捉える実験の一つがアトラス実験である。アトラス実験はアトラス検出器と呼ばれる巨大な装置で行なわれる。この検出器は全長が 44m、高さ 22m の円筒形をしている。この装置は LHC の衝突によって発生する多様な粒子を捉える為に、様々な検出器を装備している。その為、検出器内の物質の量は十分に把握できていない。先も述べたようにこの物質量は W ボソン質量の精密測定に重要になってくる。

日本のアトラスグループ (<http://atlas.kek.jp/>) もこのアトラス検出器の一部である SCT (SemiConductor Tracker: 半導体飛跡検出器) バレルモジュール (3.3 節参照) の開発に携わった。そして、我々はこの SCT バレルおよび SCT バレルモジュールのジオメトリー構築 (4 章参照) を行なった。検出器の物質をよく把握し、実物に近いジオメトリー構築を行ないシミュレーションの段階で検出器内の物質量を把握しておく事は W ボソン質量の測定に重要な意味を持つ。ジオメトリーはジオモデル (4.2 節参照) と呼ばれるライブラリーによって記述される。ジオモデルは C++ 言語で書かれている為、ジオメトリー構築も C++ を使ったプログラミングという形で行なわれる。我々は正しく物質を評価する為に図面を読み、物質の表を作って詳細にジオメトリー構築を行なった。その結果、初期のジオメトリーよりも我々の構築したジオメトリーの方が物質量 (4.1 節参照) の平均が 19% 増加した。また、新たに構築したジオメトリーと初期のジオメトリーの重量を比較した結果、我々の構築したジオメトリーの方が約 11kg 重くなる事が分かった。我々のジオメトリーはアトラス実験で正式に使われる事となった。

また、我々は W ボソンの横方向質量の分布が、SCT の物質量から受ける影響を調べた。SCT バレルの物質量を疑似的に増加させ、そのジオメトリーを使ってシミュレーションを行なった。その結果 20% の物質量の増加に対し W ボソンの横方向質量分布がおおよそ 500MeV のずれを示す事が分かった。

この論文では、我々が行なったジオメトリー構築と、W ボソン質量の精密測定に関するシミュレーションから得られた結果を報告する。

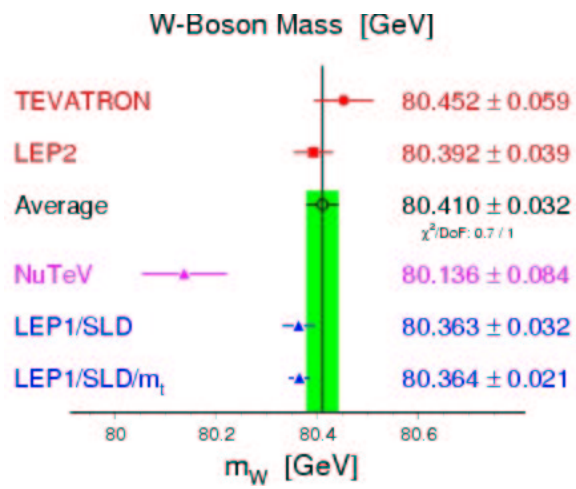


図 1: 様々な実験によって W ボソンの質量測定の結果。これは 2005 年夏の結果である。

## 2 電弱相互作用の精密測定

この章ではまず、W ボソンの質量がどのような意味を持ち重要であるかを述べ、次に W ボソンの LHC での生成について述べる。最後の節で W ボソンの質量を直接測定するのではなく、W の横方向質量を測定する理由とその定義、典型的な W の横方向質量の分布を示す。

### 2.1 W ボソンの質量

現在知られている自然界の力の種類は4つある。それは重力、弱い力、強い力及び電磁力である。標準模型によればこの4つの力は粒子によって媒介されると考えられる。重力はグラビトンによって、弱い力は W ボソン及び Z ボソンによって、強い力はグルーオンによって、電磁力は光子によって媒介される。

弱い力を媒介する W ボソンの質量は標準模型の基本的なパラメーターとなっている。次の式に示す様に W ボソンの質量  $m_W$  はいくつかの重要な物理定数（フェルミ定数  $G_F$ 、ワインバーグ角  $\sin \theta_W$  及び量子電磁気学の微細構造定数  $\alpha$ ）と関係している。

$$G_F = \frac{\pi\alpha}{\sqrt{2}} \frac{1}{M_W^2 \sin^2 \theta_W} \frac{1}{1 - \Delta r} \quad (1)$$

ここで  $\Delta r$  は輻射補正を表す。W ボソンの質量を精密に測定する事によって、これらのパラメーターをより精密に決定する事が出来、標準模型の精密な検証となる。

現在知られている W ボソンの質量は  $80.410 \pm 0.032 \text{ GeV}$  である [13]。図 1 に LEP 実験での W 質量の測定結果を示す [13]。アトラス実験では  $\pm 0.015 \text{ GeV}$  の精度で測定しようとしている [2]。

### 2.2 W ボソンの生成

CERN(3.1 節参照) に建設中の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) は陽子と陽子を重心系エネルギー 14 TeV で衝突させる事が出来る。このとき、陽子の中にあるクォークと反クォークが反応して W ボソンが生成される。図 2 に  $W^-$  ボソン生成のファインマンダイアグラムを示す。生成された W ボソンは、その

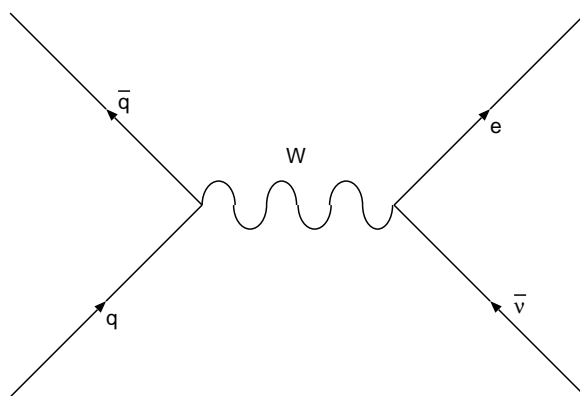


図 2: W ボソンの生成と崩壊を示すファインマンダイアグラム

崩壊幅  $\Gamma$  が  $2\text{GeV}$  であるために、すぐに崩壊する。その崩壊の仕方の1つが電子とニュートリノに崩壊する事象で、これを使って  $W$  ボソンの不変質量を再構成する。次の式 (2) 及び式 (3) に  $W^+$  ボソンが陽電子とニュートリノに崩壊する事象と、 $W^-$  ボソンが電子と反ニュートリノに崩壊する事象を示す。  $q$  及び  $\bar{q}$  はクォークと反クォークを示す。

$$q\bar{q} \rightarrow W^+ \rightarrow e^+\nu_e \quad (2)$$

$$q\bar{q} \rightarrow W^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e \quad (3)$$

LHC では低ルミノシティ時（始動から数年の期間）で、 $W \rightarrow e\nu$  の事象が年間  $3 \times 10^8$  個生成される。これだけ多くの事象を観測できれば  $\pm 15\text{MeV}$  の精度で  $W$  ボソンの質量を決定する事は可能である [2]。

### 2.3 $W$ ボソンの横方向質量

$W$  ボソンの質量  $m_W$  を再構成する事を考える。ここでは  $W$  が電子とニュートリノへ2体崩壊する場合を考える。図3は  $W$  の2体崩壊を示している。 $W$  ボソンの重心系を考え、 $p_\nu$  をニュートリノの4元運動

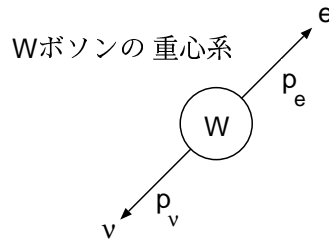


図 3:  $W$  ボソンの2体崩壊

量、 $p_e$  を電子の4元運動量とする。すると、 $W$  ボソンの不変質量  $m_W$  は次の式4で与えられる。

$$m_W^2 = (|\mathbf{p}_e| + |\mathbf{p}_\nu|)^2 - (\mathbf{p}_e + \mathbf{p}_\nu)^2 \quad (4)$$

ここで  $\mathbf{p}_e$  及び  $\mathbf{p}_\nu$  はそれぞれ電子及びニュートリノの3元運動量である。原理的には  $\mathbf{p}_e$  及び  $\mathbf{p}_\nu$  を観測できれば  $W$  ボソンの質量を求める事が出来る。電子は物質と電磁力による相互作用があるので観測する事が出来る。しかし、ニュートリノは弱い相互作用しかしないので、ほとんど相互作用せずに物質を通過してしまう。この為、直接ニュートリノの運動量  $\mathbf{p}_\nu$  を観測する事は出来無い。

また、 $7\text{TeV}$  に加速された陽子の運動エネルギーは、陽子の中のクォークに分布していて、実際にはそれぞれのクォークがどれほどのエネルギーを持っているのかわからない。そのため  $W \rightarrow e\nu$  の初期のクォーク2つの全エネルギーは知る事ができない。

しかし、ビーム軸に垂直な面(横方向)の運動量は無視できるので、初期の横方向の全運動量はゼロであると仮定できる。そこで横方向運動量及び横方向質量を定義し、横方向の全エネルギーが保存する事を利用する。

今、座標系は図4の様定義する。図の中の点線で描かれた円筒は検出器を表す。ビームは  $z$  軸に沿って流れているとし、衝突は原点で起こるとする。 $y$  軸は鉛直上向きで、 $x$  軸は水平で LHC リングの中心を

向く方向に定義されている。 $\theta$ は正のz軸から測った角度で、 $\phi$ は正のx軸から測った角度である。図4にある  $\mathbf{p}$  は粒子の3元運動量を表す。

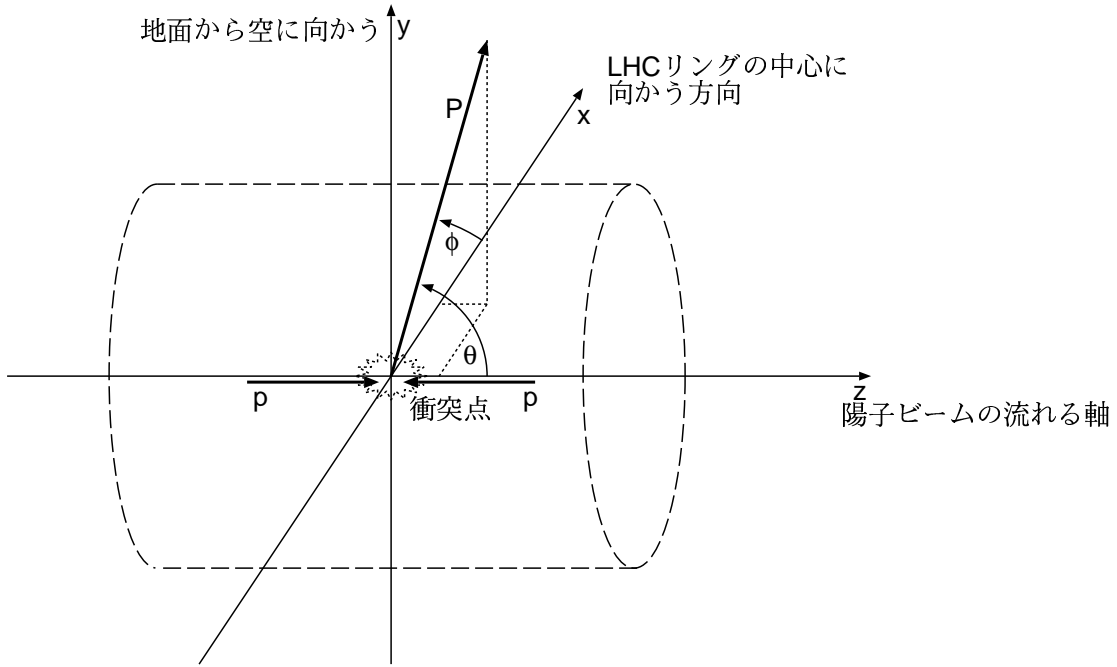


図 4: 加速器実験の座標形。衝突点が原点となるように座標形を定義し、z 方向にビームが流れる。また y 軸は鉛直上向きで、x 軸は水平方向である。LHC では x 軸の延長線上に LHC リングの中心が来る。

横方向運動量  $\mathbf{p}_T$  は  $\mathbf{p}$  を x-y 平面に投影した物である。図 5 は x-y 平面と横方向運動量  $\mathbf{p}_T$  を表している。図 5 にある円は検出器の断面を示す。 $|\mathbf{p}_T|$  は次の式 (5) で表せる。

$$|\mathbf{p}_T| = |\mathbf{p}| \sin \theta \quad (5)$$

また、3 元運動量  $\mathbf{p}$  の成分を  $\mathbf{p} = (p_x, p_y, p_z)$  とすると、横方向運動量は 3 元運動量の 2 成分だけを持つ 2 次元運動量  $\mathbf{p}_T = (p_x, p_y)$  となる。

W ボソンの横方向質量  $m_T^W$  は横方向運動量を使って定義する。次の式 (6) に定義を示す。

$$m_T^{2W} = (|\mathbf{p}_T^e| + |\mathbf{p}_T^\nu|)^2 - (\mathbf{p}_T^e + \mathbf{p}_T^\nu)^2 \quad (6)$$

この横方向質量  $m_T^W$  は式 (4) の  $\mathbf{p}_e$  及び  $\mathbf{p}_\nu$  を  $\mathbf{p}_T^e$  及び  $\mathbf{p}_T^\nu$  に置き換えて作った量である。x-y 平面で横方向運動量の保存を考え、ニュートリノの横方向運動量を間接的に計算する。

陽子の衝突によって W ボソンが生成され電子とニュートリノに崩壊し、その他の横方向運動量が高い粒子が検出されたとする。図 6 は今考えている事象を示している。図 6 の太い矢印は電子の軌道を表し、細い矢印はその他の観測可能な粒子を表す。ニュートリノは点線で表されている。

衝突前の全横方向運動量はゼロであったとすると、衝突後に観測された粒子（電子も含む）の横方向運

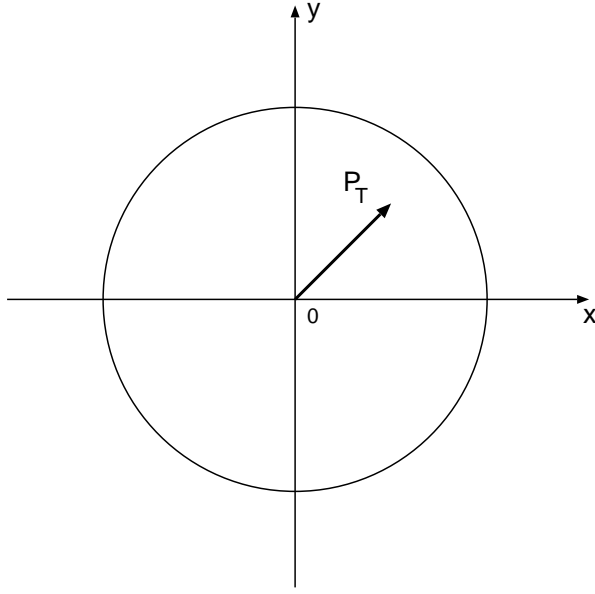


図 5: x-y 平面。  $\mathbf{p}_T$  は 3 元運動量を x-y 平面に投影して得られる。

動量  $\mathbf{p}_T^i$  の総和とニュートリノの横方向運動量  $\mathbf{p}_T^\nu$  は次の関係にある。

$$\mathbf{0} = \sum_i \mathbf{p}_T^i + \mathbf{p}_T^\nu \quad (7)$$

$$\mathbf{p}_T^\nu = -\sum_i \mathbf{p}_T^i \quad (8)$$

これで高い横方向運動量を持った粒子を全て検出する事が出来れば、ニュートリノが持ち去った横方向運動量を評価できる。

式 (6) を変形して次の式を得る。

$$m_T^W = \sqrt{2|\mathbf{p}_T^e||\mathbf{p}_T^\nu|(1 - \cos \Delta\phi)} \quad (9)$$

ここで  $\Delta\phi$  は電子とニュートリノの横方向運動量が x-y 平面内で成す角度である。この式の中から得られる W ボソンの横方向質量の分布を図 7 に示す。式 (5) より  $\mathbf{p}_T^e$  と  $\mathbf{p}_T^\nu$  は次の式で 3 元運動量を使って表せる。 $\theta$  はビーム軸からの角度である。

$$\begin{aligned} |\mathbf{p}_T^e| &= |\mathbf{p}_e| \sin \theta \\ |\mathbf{p}_T^\nu| &= |\mathbf{p}_\nu| \sin \theta \end{aligned} \quad (10)$$

上の式 (10) と式 (9) によれば、 $\theta$  が大きいほどすなわち  $\pi/2$  に近いほど W ボソンの横方向運動量は W ボソンの質量  $m_W$  に近づき、 $\theta$  が小さいほど  $m_W$  より小さくなる。図 7 は PYTHIA イベントジェネレーターで作った  $W \rightarrow e\nu$  事象から再構成した W ボソンの横方向質量の分布である。黒いヒストグラムは式 (9) の振舞を示している。W ボソンの質量 (赤い鉛直線) でピークになり、そこで切れている。このピークから

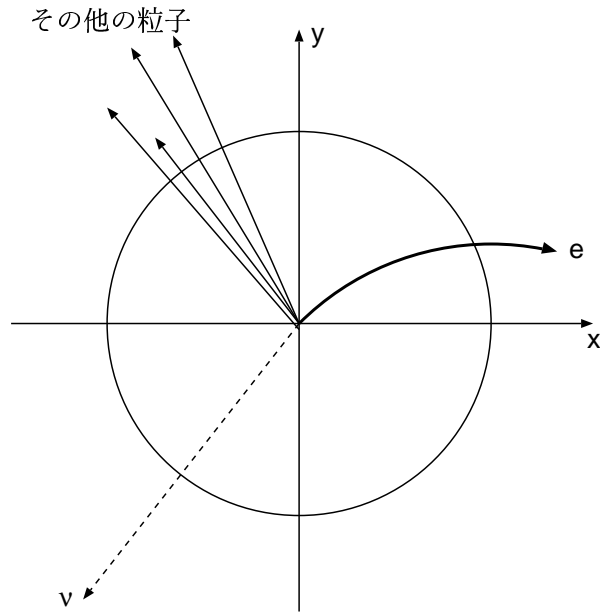


図 6: 衝突によって出来た粒子。太い円弧の飛跡は電子の軌道を表し、細い直線はその他の粒子を表す。点線はニュートリノを表す。

左側にある分布は電子とニュートリノが飛び出す角度  $\theta$  の分布に依存する。その分布を図 8 と図 9 に示す。赤い鉛直線はからの右側へのはみ出しは陽子の衝突によって生成された W ボソンの質量が Breit-Wigner 分布によって広がる効果が現れたものである。W ボソンの質量  $m_W$  が、有限の崩壊幅  $\Gamma$  (およそ  $2\text{GeV}$ ) をもって、Breit-Wigner 分布で分布する様子を図 10 に示す。この分布の幅は崩壊幅  $\Gamma$  によって決まる。PYTHIA のデフォルトの設定値は  $m_W = 80.45\text{GeV}$ 、 $\Gamma = 2.07115\text{GeV}$  である。

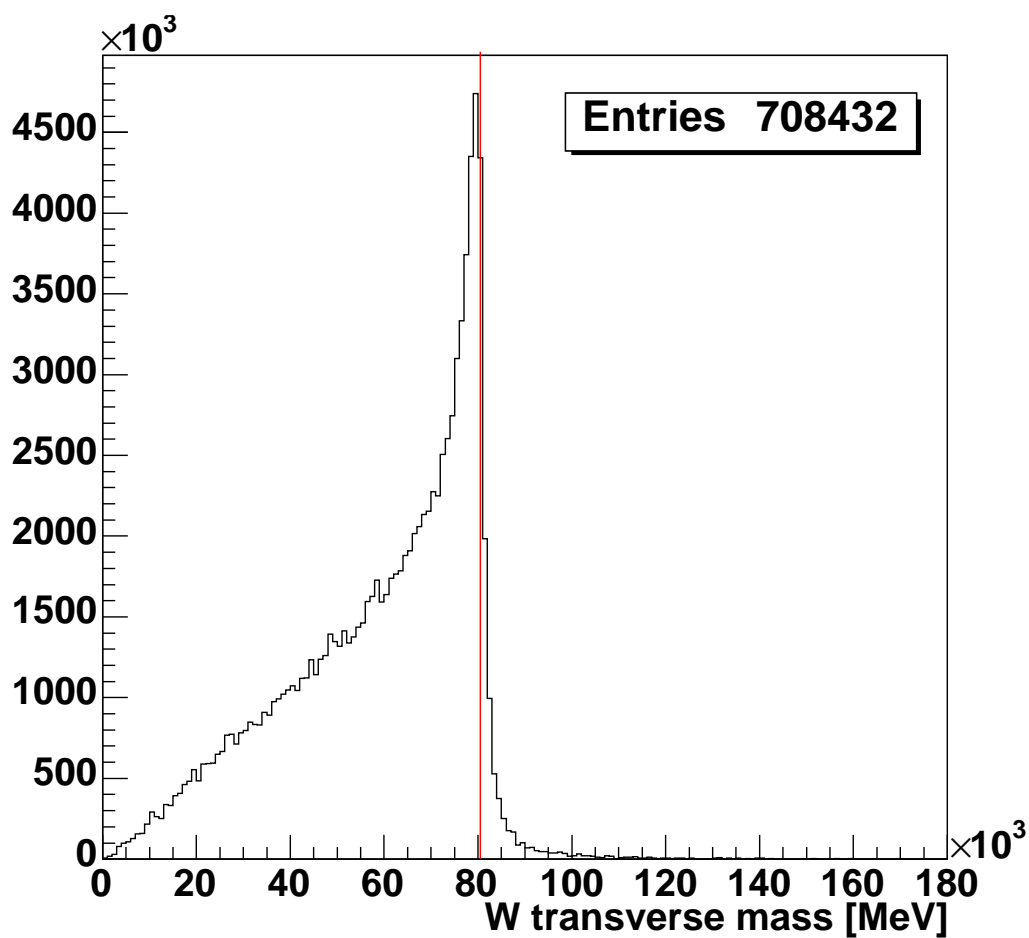


図 7: W ボソンの横方向質量分布。特徴は W ボソンの質量のところにあるピークである。W ボソンの横方向質量分布は Breit-Wigner 分布によって W ボソンの質量を少しだけ超えて分布する。ヒストグラムは W ボソンの質量に相当する赤い線よりもすこしはみ出している。

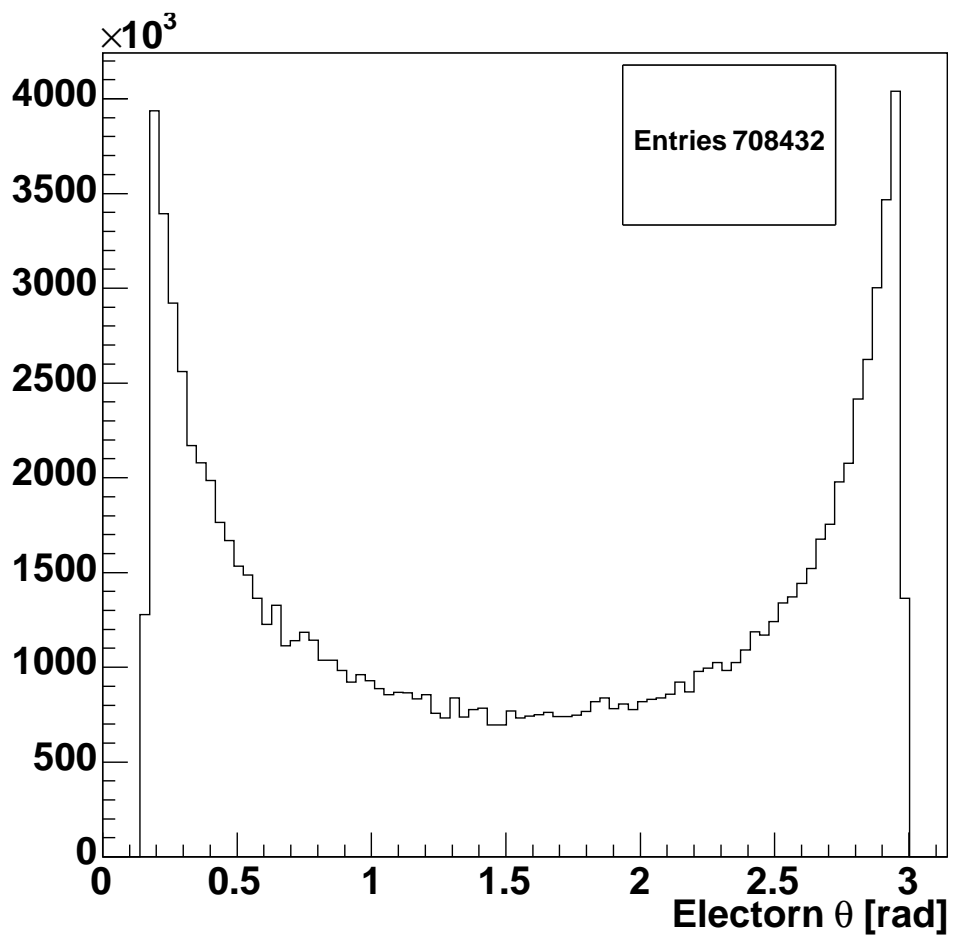


図 8: 電子の  $\theta$  分布。分布からはビームパイプに近い角度で飛び出す電子が比較的多い事が分かる。

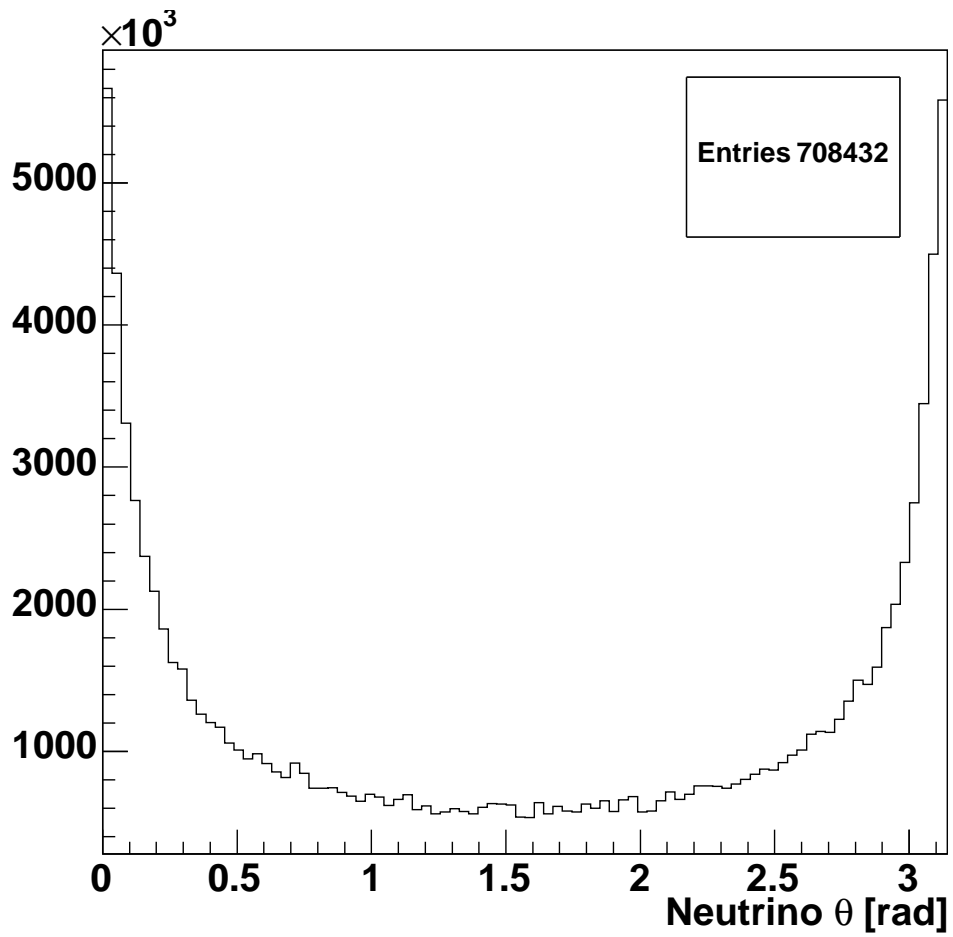


図 9: ニュートリノの電子の  $\theta$  分布。電子と同様に分布からはビームパイプに近い角度で飛び出すニュートリノが比較的多い事が分かる。

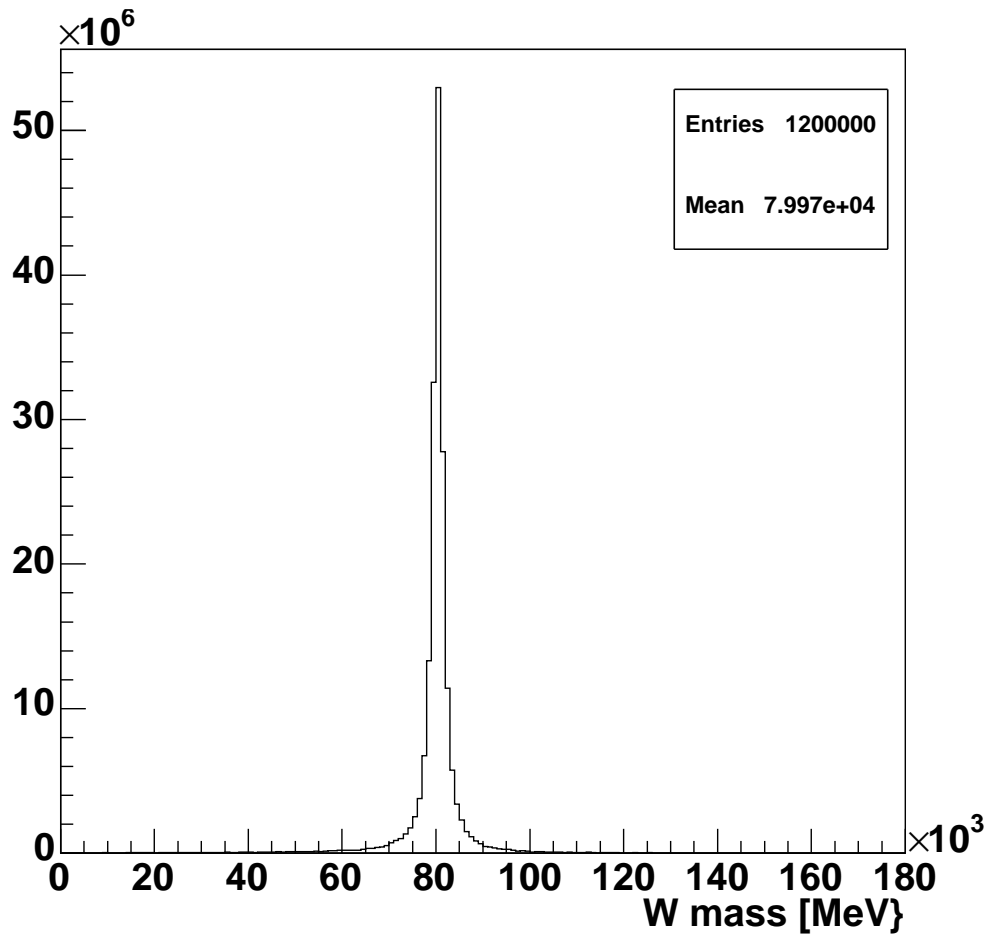


図 10: Breit-Wigner 分布。この分布の中心値はちょうど W ボソンの質量に一致する。この分布の幅は W ボソンの崩壊幅  $\Gamma$  に等しい。これは PYTHIA で生成された W ボソンの質量をプロットしたもの。PYTHIA の W ボソンの質量のデフォルト値は 80.45GeV で崩壊幅は 2.07155GeV である。

### 3 アトラス実験

スイス・ジュネーブ郊外に在る欧州合同原子核研究機関 (CERN) では大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) を建設中である。この加速器は陽子と陽子を重心系エネルギー 14TeV で衝突させる。この衝突によって起こる様々な現象を捉えようとする実験の一つがアトラス実験である。この実験はアトラス検出器と呼ばれる巨大な装置を用いて行なわれる。この実験の主な目的の1つは、標準模型から予言されるヒッグス粒子の探索である。

この章ではまず大型ハドロン衝突型加速器がどのような物であるかを述べ、次にアトラス検出器の構造を述べる。最後に本研究で着目した半導体飛跡検出器の特徴及びこの検出器の  $W \rightarrow e\nu$  事象への影響を述べる。

#### 3.1 大型ハドロン衝突型加速器

現在 CERN では大型ハドロン衝突型加速器 (LHC:Large Hadron Collider) の建設が進められており、この加速器は 2007 年に始動予定である。LHC の航空写真を図 11 に示す。LHC は円形の加速器で周長が 27km ある。地下 100m の深さにトンネルが掘られており、そのトンネル内に加速器が設置される。陽子ビームが衝突する箇所 (衝突点) には検出器が置かれる。図 11 には 4 つの検出器が示されている。本研究が携わったのは図 11 にある ATLAS(アトラス) である。

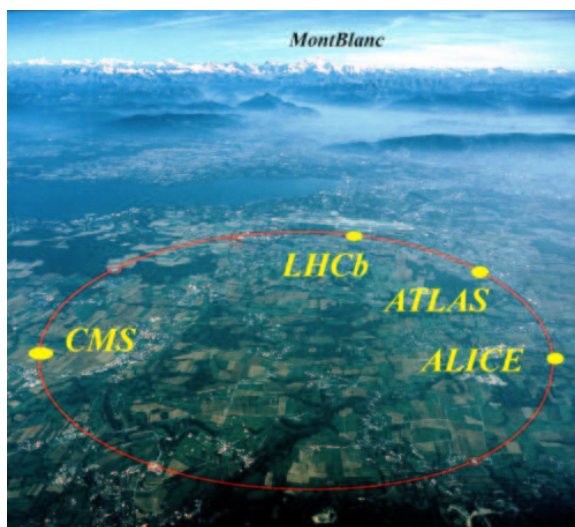


図 11: LHC の航空写真。

LHC は 7TeV に加速した陽子を正面衝突させて、重心系エネルギー 14TeV を実現する。この陽子ビームの交差は 25ns に 1 回 (40MHz) で起こる。ルミノシティーは  $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  に達するように設計されている。このルミノシティーで、1 回陽子ビームが交差する度に 23 回の陽子衝突が起こる。始動から約 3 年間は低ルミノシティー ( $2 \times 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) で運転される。

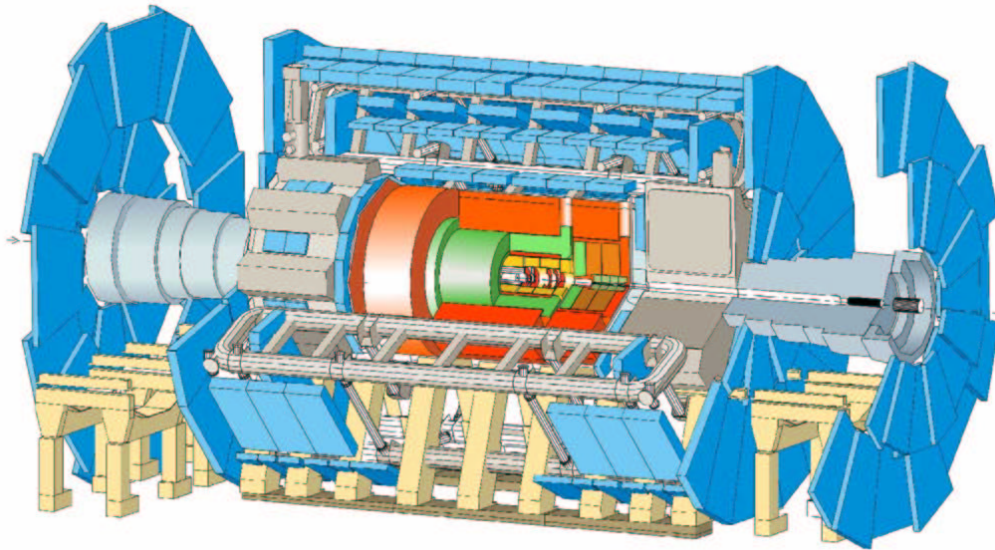


図 12: アトラス検出器のイメージ図。一番内側の黄色い部分が内部飛跡検出器、緑色の部分が電磁カロリメーター、赤い部分がハドロンカロリメーター、水色の部分がミュオン検出器である。

### 3.2 アトラス検出器

図 12 にアトラス検出器の絵を示す。この検出器はビーム軸に沿った円筒形をしている。円筒の中心軸を陽子ビームが流れる。この検出器は全長 (図 12 のビーム軸方向の長さ) が約 40m あり、高さ (円筒の直径) が約 22m、重量が 7000 トンに達する。

検出器は一番内側 (ビーム軸に近いところ) 内部飛跡検出器 (ID:Inner Detector; 図の橙色の部分)、電磁カロリメーター (図の緑色の部分)、ハドロンカロリメーター (図の赤い部分)、ミュオン検出器 (図の水色の部分) の順に配置されている。これらの検出器全てはバレル部分 (円筒形の部分) とエンドキャップ (バレル部分の両側にある円盤の部分) から成っている。

内部飛跡検出器はソレノイド磁石から提供される 2T の磁場の中にあり、その磁場によって円弧を描く荷電粒子の飛跡を検出する。電磁カロリメーターは運動量の高い電子及び光子のエネルギーを測定する。殆どの電子及び光子はこの検出器の中で電磁シャワーを起こして止まり、エネルギーを落す。ハドロンカロリメーターでは  $\pi^\pm$  中間子や陽子、中性子などのハドロンのエネルギーを測定する。これらハドロンの殆どは、この検出器でハドロンシャワーを起こし、持っているエネルギーの殆どを失って止まる。最後に内側の全ての検出器を透過してきたミュオンをミュオン検出器で検出する。この検出器の一部はトロイド磁石の中に納められており、バレル部分で 3.9T、エンドキャップ部分で 4.1T の磁場をかけられる。この磁場によりミュオンの軌道が曲げられその曲率から運動量を測定する。図 13 に各粒子が痕跡を残す検出器の図を示す。

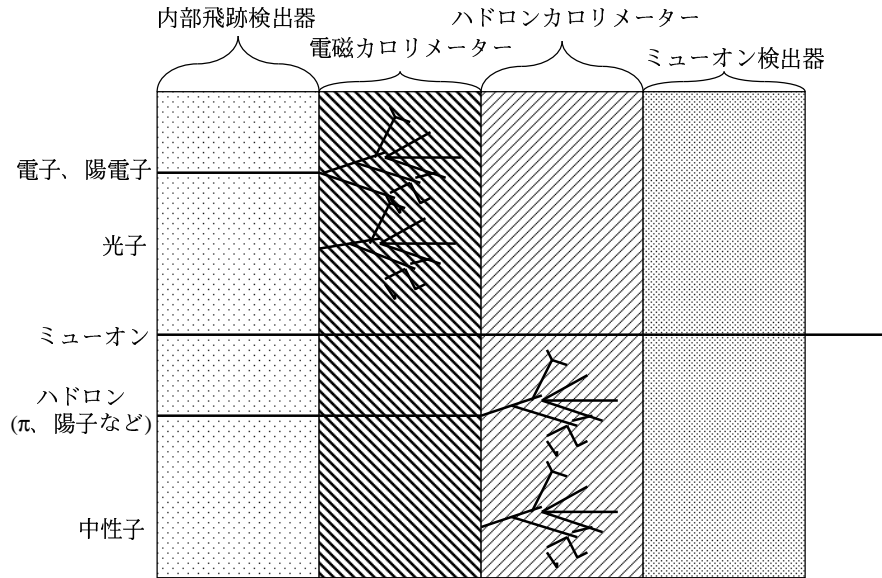


図 13: 粒子が痕跡を残す検出器。ミュオンは全ての検出器を通過する。光子は内部飛跡検出機には飛跡を残さないが電磁カロリメーターでシャワーを起こす。

### 3.3 半導体飛跡検出器

半導体飛跡検出器 (SCT:SemiConductor Tracker) は内部飛跡検出器の 1 部分である。図 14 に内部飛跡検出器における SCT の位置を示す。SCT は TRT の内側に位置する。SCT の内側には Pixel 検出器がある (図 15)。図 14 に示すように、SCT はバレル部分 (以下 SCT バレルと呼ぶ) とフォワード SCT (Forward SCT) の部分から成る。以下に本研究で着目した SCT バレルについて述べる。図 16 の実物の写真を示す。SCT バレルは 4 層になっており (図 16 の写真は 1 層だけ写っている)、半径が一番内側から 30cm、37.4cm、44.7cm、52cm ある。長さは 147cm になる。SCT バレルの検出部分となるのは SCT バレルモジュールと呼ばれる半導体検出器である。図 17 にその実物の写真を示す。

SCT バレルモジュールは 4 枚のシリコンセンサーから成っており、表に 2 枚、裏に 2 枚のセンサーが角度 40mrad (ステレオ角) をもって張り合わせてある。図 17 の写真には表の 2 枚が見えている (銀色に光る長方形の部分)。シリコンセンサーには 80 $\mu$ m 間隔でストリップが入っており、それからの信号を ABCDChip と呼ばれる回路で読み出す。ABCDChip で読み込まれた電気信号は光り信号に変換される。

この SCT バレルモジュールが CarbonFiber と呼ばれる物質で出来た円筒形の側面にすき間なく装着される。この SCT バレルモジュールを装着する土台となる円筒をサポートシリンダーと呼ぶ。SCT バレル 4 層あわせて 2112 枚の SCT バレルモジュールが装着される。サポートシリンダーには SCT バレルモジュールからの信号を検出器の外に読み出す為の光ファイバーや、電源を供給する為のケーブルが張り付けてある。

SCT は荷電粒子の飛跡を検出する事に使われる。本研究で調べた  $W \rightarrow e\nu$  事象の電子もこの検出器で捉えられる。この時、問題となるのが SCT に含まれる物質の量 (物質質量: 定量的な定義は 4.1 節を参照) である。

$W \rightarrow e\nu$  事象から出てくる電子の運動量はおよそ 40GeV であり、このエネルギー付近では制動輻射が

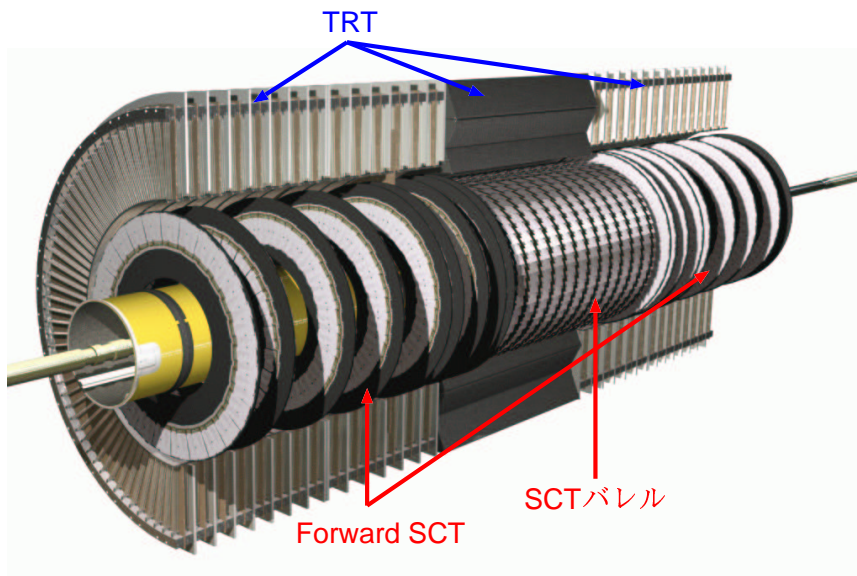


図 14: TRT と SCT のイメージ。SCT の周りを TRT が囲む形になっている。TRT と SCT は円筒形の部分と円盤の部分からなる。

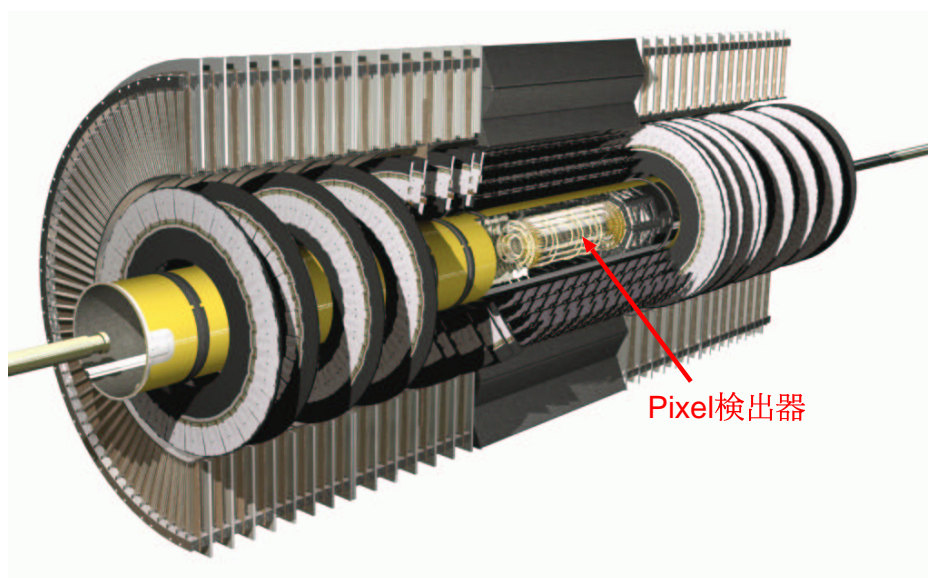


図 15: Pixel 検出器を見せた図。SCT の内部に Pixel 検出器がある。

電子と物質の主な相互作用になる。この為、SCT 内に多く物質が存在すれば、その分制動輻射が起こり易くなる。電子は制動輻射によってエネルギーを失い、SCT で測定された電子の運動量は低く見積もられてしまう。

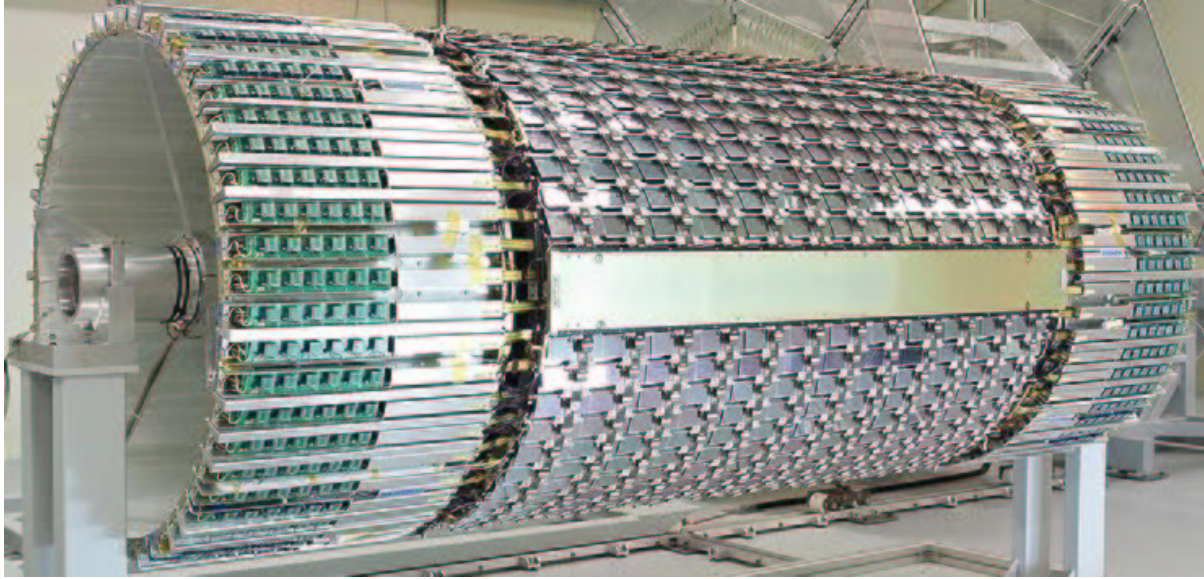


図 16: SCT バレルモジュールが配置された SCT バレル。

TRT、SCT 及び Pixel 検出器は物質量が最小に成るように設計されている。しかし、初期の設計から多くの変更が加えられ、実物の物質量は十分に把握されていない。

$W$  ボソンの質量を目標の精度で測定するには、 $W \rightarrow e\nu$  事象から出てくる電子の運動量が検出器内の物質との相互作用 (主に制動輻射) によってどの程度低く見積られるかを、よく評価する必要がある。これはあらかじめシミュレーションによって行なえる。しかし、シミュレーションに組み込まれている検出器の幾何情報や物質情報 (これらの情報をジオメトリーと称する) が大きく違っていると、物質量の評価が正しくできない。正しく物質の影響を評価する為には正しいジオメトリーをシミュレーションに組み込む必要がある。

この事を達成する為には、アトラスジャパングループでは、SCT バレルの図面などを詳細に調べ、より実物に近いジオメトリーを構築した (4 章参照)。

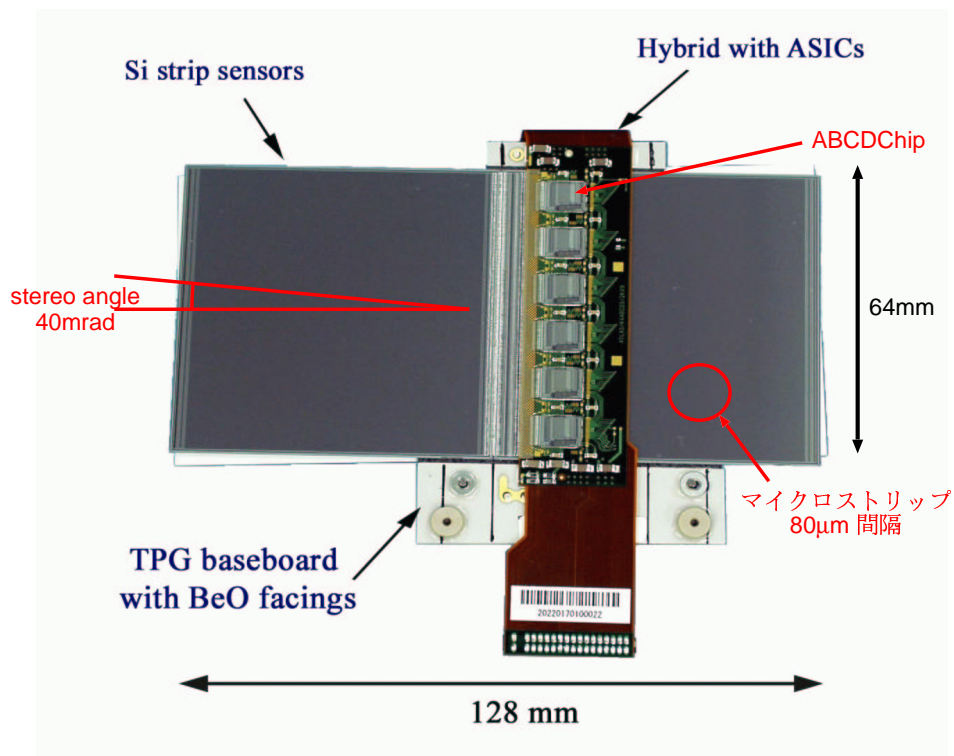


図 17: SCT バレルモジュールの写真。

## 4 SCT バレルのジオメトリー構築

この章では我々が行なった SCT バレル及び SCT バレルモジュールのジオメトリー構築について述べる。ジオメトリーとはコンピュータシミュレーションを行なう際に用いられる検出器の幾何情報の事である。幾何情報とは検出器の大きさ、配置、その検出器を構成する物質の情報である。つまりジオメトリーとは、どのような物質で出来た検出器が、どの程度の大きさで、どこに配置されているのか、という情報の総称である。シミュレーションではこの情報を基に検出器内部での粒子の反応を計算する。

以下の節ではまず、コンピュータ上に構築された検出器の物質量を定量的に定義する。そして、ジオメトリーを構築する方法の技術的な側面を簡単に述べる。次に、我々が SCT バレルのどの部分のジオメトリーを構築したのかを、図と写真を用いて説明する。最後に我々が構築した SCT バレルのジオメトリーと初期のジオメトリーの物質量を比較した結果を示す。

### 4.1 物質量

物質量とは、粒子が物質内を通過した距離  $L$  とその物質の輻射長  $X_0$  (Radiation Length) の商をとった量である。

輻射長とは物質を通過中の電子のエネルギーが、電磁波の放出によってのみ失われ、そのエネルギーが元の  $1/e$  になるまでの通過距離での事である。輻射長は物質に固有の値で、近似的には次の式 (11) で計算できる。

$$X_0 = \frac{(716.4g/cm^2) \cdot A}{Z(Z+1) \ln(287/\sqrt{Z})} \quad (11)$$

ここで  $Z$  は通過する物質の原子番号で、 $A$  は原子質量である。

この輻射長を単位にして物質の厚さを測ったのが物質量となる。図 18 に、簡単な例として 3 種類の物質を粒子が通過する場合を示す。この例で各物質は輻射長  $X_0^1$ 、 $X_0^2$ 、 $X_0^3$  を持つとする。この場合通過した粒子が感じる物質量は、各物質の物質量  $L_i/X_0^i$  を総和したものになる。すなわち

$$t = \sum_i t_i = \sum_i \frac{L_i}{X_0^i} \quad (12)$$

となる。後の節では物質量  $t$  を  $\eta$ (pseudorapidity) の関数としてプロットし、SCT バレルの物質量を評価するために以下に  $\eta$  の定義を示す。

$\eta$ (pseudorapidity) を式 (13) のように定義する。図 19 に  $\eta$  と  $\theta$  の関係の図を示す。

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) \quad (13)$$

### 4.2 ジオメトリー構築の方法

コンピュータ上に検出器を構築する事、すなわちジオメトリー構築はアトラス実験の場合、ジオモデル (GeoModel) と呼ばれるライブラリーを用いて行なわれる。ジオモデルは C++ 言語で書かれており、ジオメトリー構築も C++ を使ったプログラミングによって行なわれる。

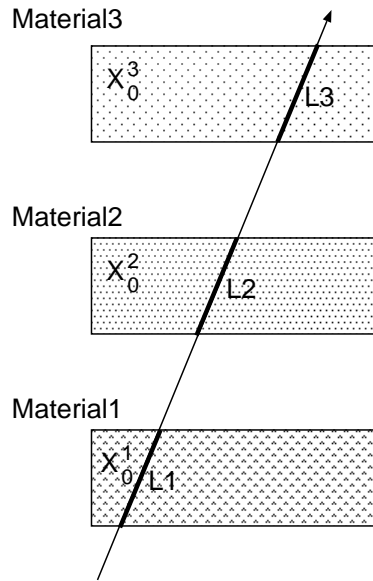


図 18: 粒子が物質中を通過する様子。粒子が感じる物質の量は物質質量によって評価できる。

このジオモデルは、検出器をコンピューター上に構築し、保持する為に必要な基本的なオブジェクトを集めた物である。例えば、長方形や球、円柱などの基本的な部品 (すなわちオブジェクト) が定義されている。そしてそれらの物体に対し、どんな物質で出来ていて、どこに置かれているかなどの物理情報を与える昨日を提供する。ジオモデルはコンピューター上にジオメトリーを記述する為の道具である。

図 20 はジオモデルを用いて構築した SCT バレルのジオメトリーを視覚化したものである。構築したジオメトリーからは物質や寸法などの物理情報を取り出す事が出来る。

### 4.3 ジオメトリーを構築した部分

この節では我々がジオメトリーを構築する際にとった手順とその結果を示す。まず手順を示す。

1. 技術者が書いた図面を手に入れる。
2. 図面から部品の形や含まれる物質を読み取る。
3. 読みとった部品の形をプログラムし易い様に基本的な図形 (球や長方形など) から成る形に焼き直す。
4. 物質の表を作る。重さが図面から分からない場合は実測する。
5. ジオモデルを用いてジオメトリーを記述する。

以下に我々が構築したジオメトリーと実物との対応を示す。

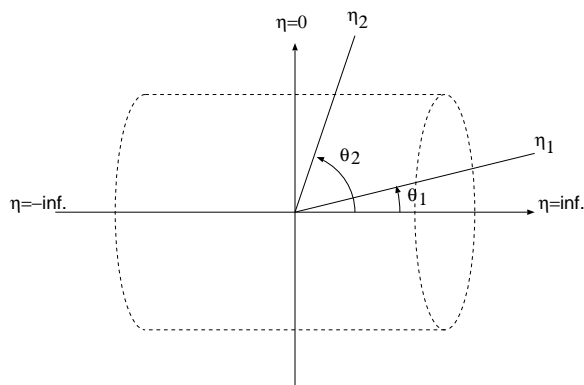


図 19:  $\eta$  と  $\theta$  の関係。  $\eta$  は  $\theta=0$  で無限大、  $\theta=\pi$  で負の無限大になる。

- SCT バレルモジュール

図 21 に SCT バレルモジュール (以下モジュールと記す) の模式図を示す。このような複雑なモジュールをプログラミングが容易なように簡略化する。簡略化した図を図 22 に示す。

例えばモジュールの Hybrid と呼ばれる部分には ABCDChip やコンデンサーなど読み出し回路を構成する細かい部品が乗っている。ジオメトリーには、これらは 1 枚の板として定義してある。定義する際には ABCDChip やコンデンサーに含まれる物質を混合して平均化した物質を定義して、その板を構成する物質としてある。

- SCT バレル

SCT バレルのサポートシリンダーの側面にはケーブルなどの多くの物質が存在する。以下にジオメトリーを構築した SCT バレル部分にある部品の名称を示す。また、各部品名と実物との対応を図 4.3 に示す。

- Bracket  
SCT バレルモジュールをサポートシリンダーに固定する為の金具。これは同時に CoolingPipe や電源ケーブルなどを固定している。
- Dogleg  
モジュールから読み出された電気信号を光信号に変換する回路などが載っている。茶色の薄いフィルムのような部品。
- CoolingPipe  
モジュールを冷却する為のパイプ。
- CoolingBlock  
モジュールと CoolingPipe の間で熱を伝達する為の金属のブロック。

これら部品の図面を調べた結果、初期のジオメトリーには含まれない多くの元素や重金属がある事が分かった。我々は新たに分かった物質の情報をジオメトリーに組み込んだ。

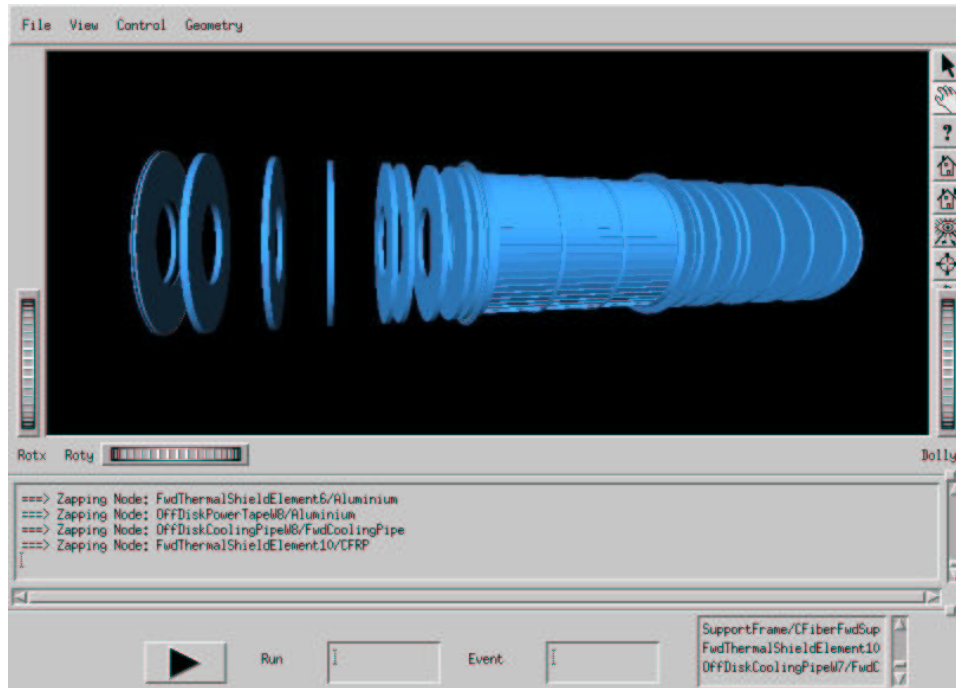


図 20: SCT バレルジオメトリを視覚化した様子。これは HepvisEventViewer というソフトを使ってジオメトリを見たもの。図には SCT のバレル部分とその両側にフォワードホイールとよばれる円盤の部分が見える。

#### 4.4 物質量の評価

我々が構築したジオメトリ (SBG1 と記す) と初期のジオメトリ (SBG0 と記す) の物質量を比較した結果を図 24 に示す。このプロットは SCT バレルに関する物質量を  $\eta$  の関数としてプロットしたものである。

一番上の分布は SBG0 ジオメトリ (初期のジオメトリ) の物質量分布。平均値が  $10.34 \% X_0$  になる。真中にある分布は SBG1 (我々が新しく構築したジオメトリ) の物質量分布である。平均値が  $12.31 \% X_0$  になる。一番下の分布は SBG0 と SBG1 の分布を重ねたものである。全体的に SBG1 ジオメトリの方が物質量が増加している様子が分かる。平均値を比べると SBG0 よりも SBG1 の方が物質量の約 19% その差は約 2 また、SCT バレルのジオメトリの重量を計算した結果、SBG0 よりも SBG1 のほうが約 11kg 重くなった事が分かった。

これらの原因は SBG1 で考慮した、SBG0 には考慮されなかった、実物には含まれる微量な重金属にある。表 1 に重量と物質量の比較のまとめを示す。また、表 2 には重量の増加に寄与する部品の詳細を載せる。

重量増加の主な原因は、Bracket や Dogleg に微量な重金属が含まれていた事が上げられる。表 2 を見ると、Bracket と Dogleg の重量に大きな差がある事が分かる。

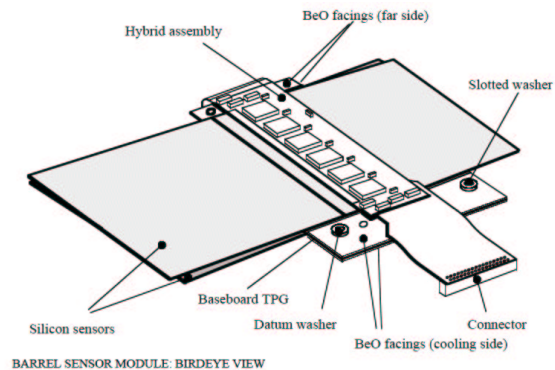


図 21: SCT バレルモジュールの模式図。

	SCT 全体の重量	SCT バレル	SCT バレルモジュール	SCT バレル平均 % $X_0$
SBG0	345 kg	121 kg	27.7 g	10.3 % $X_0$
SBG1	356 kg	132 kg	24.7 g	12.3 % $X_0$
差	+3.2 %	+9.1 %	-11 %	+19 %
実物	不明	不明	24.77 g	

表 1: 重量及び物質量の比較のまとめ。SCT 全体及びバレル部分の本当の重量は分かっていない。これは装置自体が開発段階であり、総重量が測定できないからである。

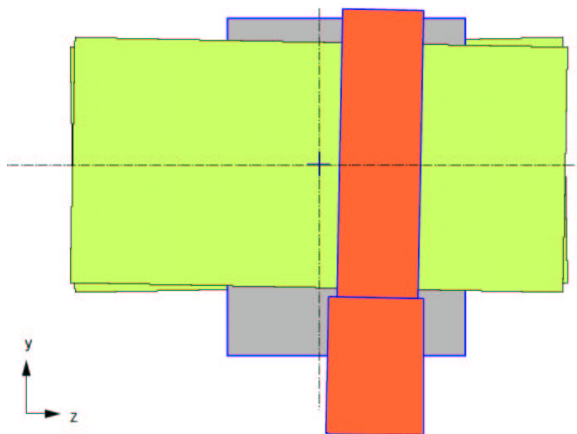


図 22: SCT バレルモジュールをプログラミングの為に簡略化した図形。橙色の部分は図 21 にある Hybrid assembly の部分である。灰色の部分は Baseboard TPG と呼ばれる部分である。図 21 には多くの部品 (BeO facing や Datum washer など) があるが、これらを混ぜ合わせて灰色の部分としている。緑色の部分はシリコンセンサー (Silicon sensor) である。

### SCTバレル

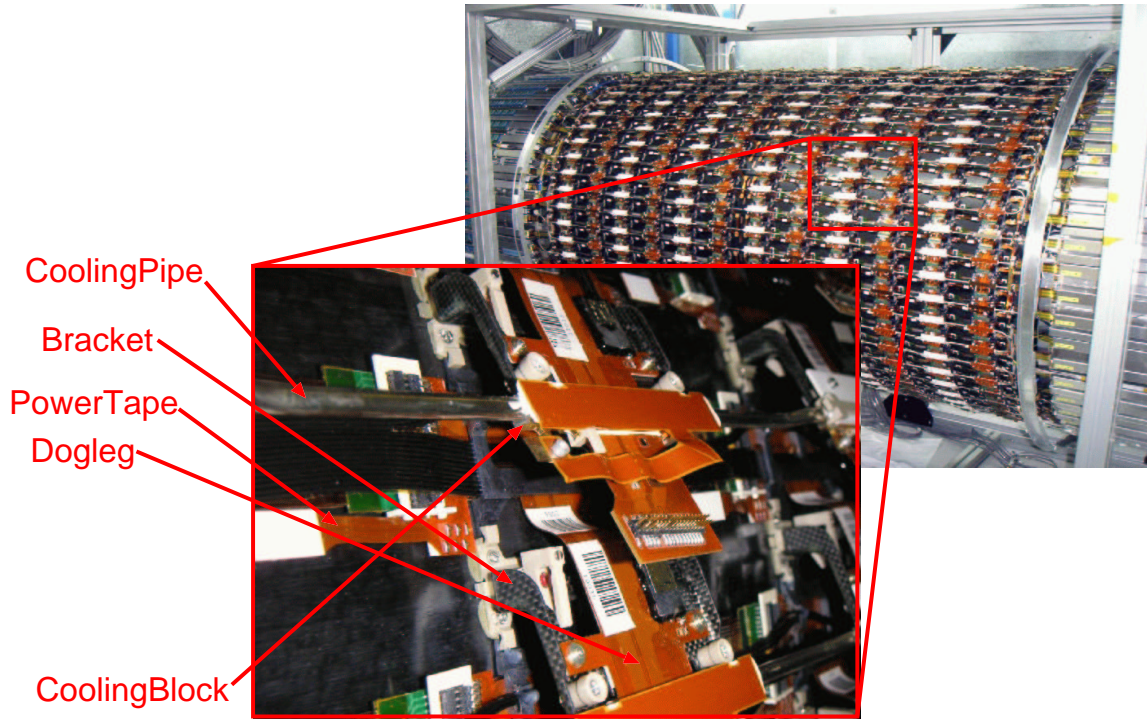


図 23: SCT バレルの側面についている部品の拡大図。

	SBG0	SBG1	差	個数	バレル全体の差
SCT バレルモジュール	27.7 g	24.7 g	-3.0 g	2112	-6.3 kg
Bracket	2.13 g	4.94 g	+2.81 g	2112	+5.93 kg
CoolingBlock	1.95 g	2.42 g	+0.47 g	2112	+0.99 kg
Dogleg	2.25 g	6.96 g	+4.71 g	2112	+9.95 kg
PowerTape	36.5 g	37.5 g	+0.9 g	176	+0.2 kg
合計					+10.8 kg

表 2: 重量及び物質量の比較のまとめ。

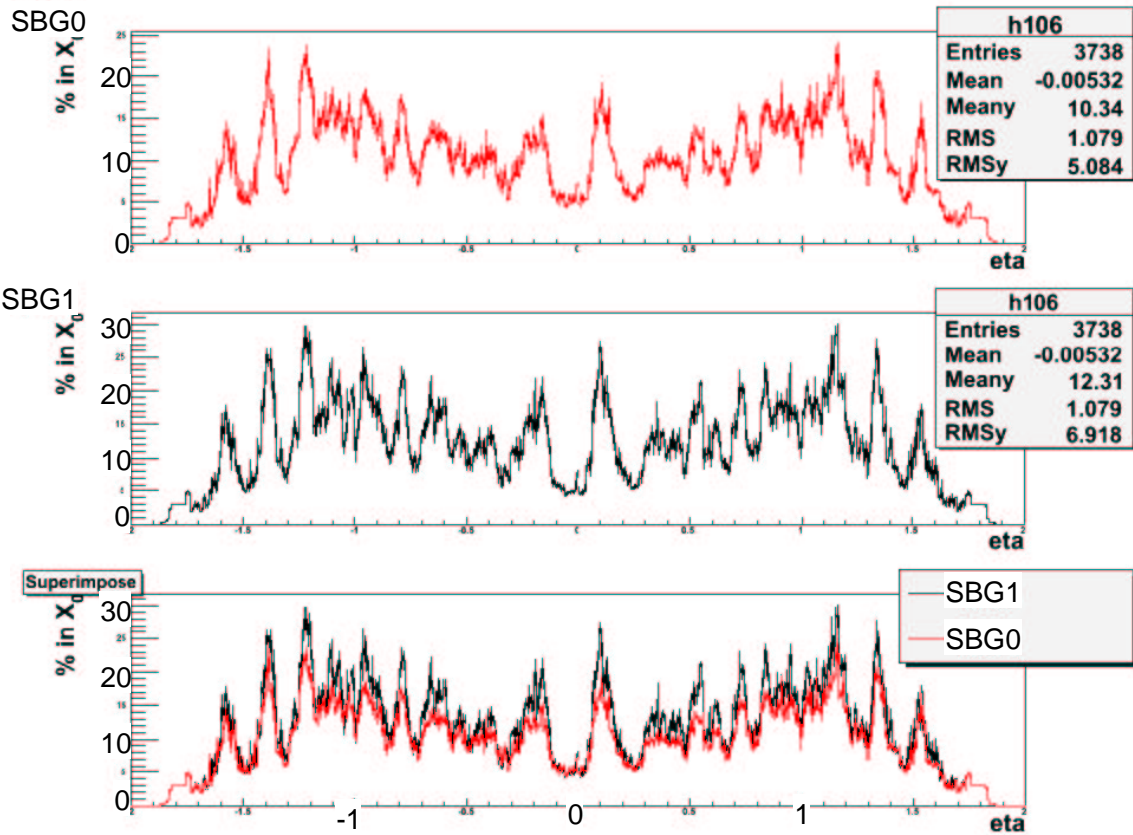


図 24: SCT バレルの物質質量分布。一番上の分布は SBG0 ジオメトリー (初期のジオメトリー) の物質質量分布。平均値が 10.34 %  $X_0$  になる。真中にある分布は SBG1(我々が新しく構築したジオメトリー) の物質質量分布である。平均値が 12.31 %  $X_0$  になる。一番下の分布は SBG0 と SBG1 の分布を重ねたものである。全体的に SBG1 ジオメトリーの方が物質質量が増加している様子が分かる。

## 5 $W \rightarrow e\nu$ 事象の検出器シミュレーション

この章では  $W$  ボソンの横方向質量の再構成に対し、SCT バレルの物質量が与える影響を調べる為に行なったシミュレーションについて述べる。

先に述べたようにアトラス実験の目的の一つは電弱相互作用の精密測定である。その為に  $W \rightarrow e\nu$  事象から  $W$  ボソンの横方向質量を再構成する時に必要となる電子の運動量は内部飛跡検出器で測定される。この電子の運動量の測定は内部飛跡検出器の物質量の影響を受ける。この影響がどの程度のものなのか、つまり、検出器の物質量が何変化するか、を調べる事は電弱相互作用の精密測定にとって有用な事である。

本研究では SCT バレルのサポートシリンダーの密度を疑似的に 5 倍にしたジオメトリーを用いて  $W \rightarrow e\nu$  事象のシミュレーションを行なった。この密度の増加は SCT 全体の物質量にしておよそ 20 このジオメトリーの変化によって  $W$  ボソンの横方向質量分布におよそ 500MeV のずれが生ずる事が分かった。

以下の節ではまずシミュレーションの方法を述べ、次に手順を示す。そして今回行なったシミュレーションの条件を述べる。そして、 $W$  ボソンの横方向質量分布とそのずれを示す。最後にそのずれに対する考察で終る。

### 5.1 方法

アトラス実験では、実験から得られるデータの解析やシミュレーションなどを 1 つのまとまった枠内で行なおうとしている。これを実現するのが ATHENA (アセナ) と呼ばれるソフトウェア郡である。これは、実験データの解析はもちろんの事、LHC の陽子の衝突によって起こる事象のシミュレーションや、検出器の振舞を再現するシミュレーションなど、アトラス実験に必要な全てソフトウェアを提供する。この様なものをフレームワークと呼ぶ。ATHENA フレームワークはアトラス実験に関わる世界中の物理学者やコンピューター技術者によって開発されている。

この様なアトラス実験に共通のフレームワークを作る利点は、誰もが同じ解析環境を利用できる事である。また、同じ解析プログラムやシミュレータを多くの人が利用するので、バグの発見やその修正が早く行なわれる。

アトラスでシミュレーションを行なう際、それは 4 つの段階に分けられる。図 25 に我々が行なったシミュレーションの流れを示す。

ジェネレーション (Generation) では LHC で陽子と陽子が衝突した際の発生する粒子のデータを生成する。本研究では PYTHIA (フィシア) というプログラムを用いて、陽子の衝突から  $W$  ボソンが発生し、それが電子とニュートリノに崩壊する事象のデータを生成した。検出器シミュレーション (Detector Simulation) ではジェネレーションで発生した粒子が検出器内を通過する時に起こる現象 (電子の物質中での制動輻射など) を計算する。この検出器シミュレーションには Geant4 (ジアントフォー) と呼ばれるシミュレーターが使われている。

ディジタイゼーション (Digitization) では、検出器シミュレーションで起こった現象によって、検出がどの様に振舞うのかを再現する。例えば SCT バレルモジュールを電子が通過した場合の応答などである。つまりディジタイゼーションによって検出器の機械的な振舞を再現する。

最後の段階がリコンストラクション (Reconstruction) である。これはディジタイゼーションの結果、つまり検出器の振舞から粒子の運動量やエネルギーなどの物理情報を再構成する段階である。例えば  $W \rightarrow e\nu$

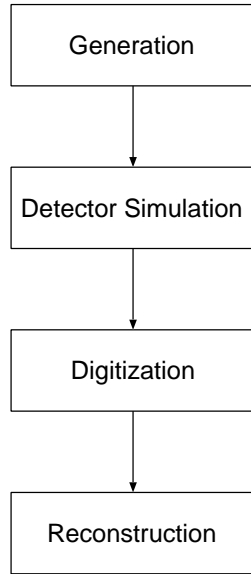


図 25: シミュレーションの全体の流れ。一般的に一番時間がかかるのは検出器シミュレーションである。

	サポートシリンダーの密度の倍率	サポートシリンダーの密度	$\eta = 0$ での物質質量	SCT 全体での物質質量
G1	1	$0.567g/cm^2$	$0.07188 X_0$	$0.1848 X_0$
G5	5	$0.945g/cm^2$	$0.09313 X_0$	$0.2026 X_0$

表 3: G1 と G5 のジオメトリーの違い。

事象から出てくる電子は内部飛跡検出器に弧を描く飛跡を残す。この飛跡から運動量を求めるのがリコンストラクションである。

図 26 に  $W \rightarrow e\nu$  事象から出てくる電子が捉えられた様子を視覚化したものを示す。これは ATHENA フレームワークにあるソフトウェア、アトランティス (Atlantis) によって描かれたものである。この絵は検出器の x-y 平面の断面を見たものである。

## 5.2 シミュレーションの条件

本研究では 2 種類の検出器シミュレーションを行ない W ボソンの横方向質量分布の変化を調べた。

1 つ目の検出器シミュレーションでは、現在アトラス実験で使われている標準のジオメトリーを用いて  $W \rightarrow e\nu$  事象をシミュレーションした。

2 つ目の検出器シミュレーションでは、SCT バレルのサポートシリンダーの密度を 5 倍にし、疑似的に SCT の物質質量を増やしたジオメトリーを使った。

便宜の為、前者のジオメトリーを G1 ジオメトリー、後者を G5 ジオメトリーと呼ぶことにする。表 3 に、2 つのジオメトリーの違いをまとめる。このシミュレーションでは PYTHIA によって  $W \rightarrow e\nu$  事象を

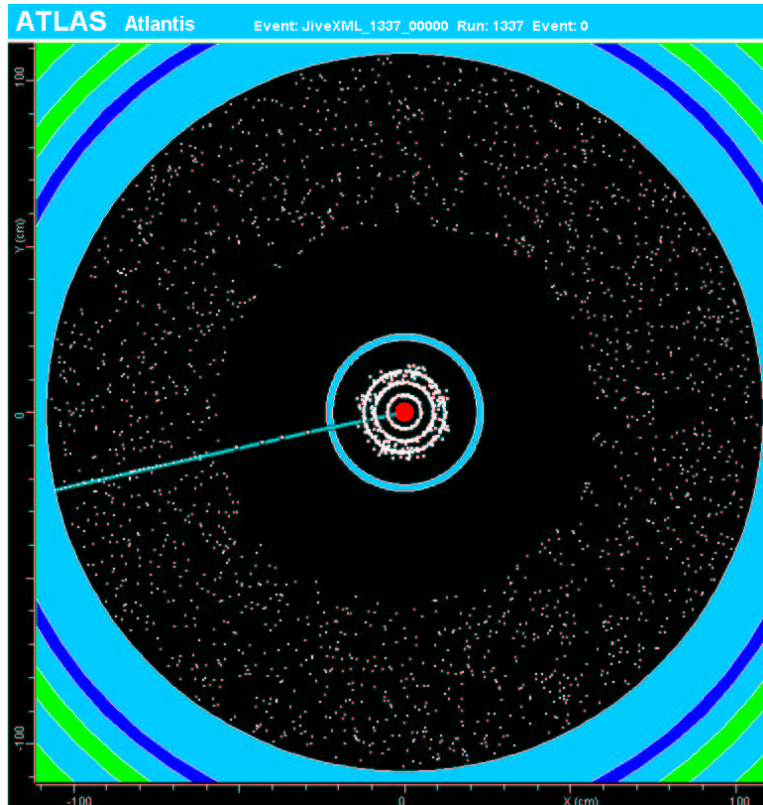


図 26: アトランティスによる  $W \rightarrow e\nu$  事象の視覚化。多くの点が表示されているのが TRT でその内部に SCT と Pixel 検出器がある。黒い部分が内部飛跡検出器である。中心から出ている水色の線が電子が通った飛跡をフィットしたものである。この線上にある白い点が検出器に残ったヒット点であり、それ以外のところに沢山見られる点は検出器のノイズである。シミュレーションではノイズも考慮出来るようになっている。

$1.2 \times 10^6$  個生成し、検出器シミュレーションに通した。実際の LHC では陽子の衝突によってさまざまな粒子が大量に発生するが、今は  $W \rightarrow e\nu$  事象だけを見たいので、PYTHIA のスイッチによって  $W \rightarrow e\nu$  事象の生成だけを有効にした。検出器シミュレーションでは内部飛跡検出器だけを有効にした。これは計算時間の節約の為である。電磁カロリメーターなどの電磁シャワーを起こす検出器のシミュレーションには膨大な時間がかかる。今知りたい電子の運動量は内部飛跡検出器だけで測定できるので電磁カロリメーターやハドロンカロリメーター、ミューオン検出器はオフにした。

また、ここでは W ボソンの横方向質量を再構成する際に、必要となるニュートリノの運動量はジェネレーション時に記録されるニュートリノの情報を使った。実際の実験では  $E_T^{miss}$  によって測定される。

以上の条件は非現実的なシミュレーションになっているが、W ボソンの横方向質量分布への物質質量の影響を調べる最初のステップとしては、十分その目的を達成できる。以下に条件をまとめておく。

- PYTHIA により  $W \rightarrow e\nu$  事象を  $1.2 \times 10^6$  個生成する。

- PYTHIA では  $W \rightarrow e\nu$  事象の生成だけを有効にする。その他の事象は生成しない。
- 検出器シミュレーションでは SCT バレルのサポートシリンダーの密度が 1 倍のものと 5 倍の、2 種類のジオメトリーを使う。
- 検出器シミュレーションでは計算時間の節約の為、内部飛跡検出器のみを用いるようにする。

計算は Xeon 3.06GHz の CPU を 6 つ使った。1 つの CPU は仮想的に 2 つの CPU として使えるので同時に 12CPU を使って並列にシミュレーションを行なう事が出来た。

ジェネレーションの時の乱数の種に注意して 12 個のプログラムを同時に実行した。1 つの CPU に  $10^5$  個の  $W \rightarrow e\nu$  事象のシミュレーションを分担した。これによって、ジェネレーションに数時間、検出器シミュレーションに 3 日、ディジタイゼーションに 1 日、リコンストラクションに 2 日、合計約 5 日でシミュレーションを終える事が出来た。

### 5.3 シミュレーションによる W ボソンの横質量分布

以下にシミュレーションの結果を示す。図 27 にシミュレーションから得られた W ボソンの横方向質量の分布を示す。ピンク色の鉛直線が PYTHIA のパラメータとして与えられている W ボソンの質量 (80.45GeV) を示す。青いヒストグラム (Parton Level) は W ボソンが崩壊して出てきた電子とニュートリノの真の横方向運動量によって再構成した W ボソンの横方向質量である。黒いヒストグラムは G1 ジオメトリーを使った検出器シミュレーションで再構成した W ボソンの横方向運動量である。赤いヒストグラムは G5 ジオメトリーを使ったものである。図 27 の青いヒストグラムは W ボソンの崩壊から出てきた電子とニュートリノの真の横方向運動量をから再構成した W ボソンの横方向質量の分布である。真の値を使っているの、検出器の分解能や物質質量の影響を受けない。この青いヒストグラムには W ボソンの質量 80.45GeV (PYTHIA の W ボソンの質量の設定値) にピークがある。そこから右の方への浸み出しは W ボソンの Breit-Wigner 分布によるものである。もし Breit-Wigner 分布の効果がなければピンクの鉛直線のところで分布は切れてしまう (すなわち青いグラフに見えるような浸み出しは起こらない)。

### 5.4 考察

図 28 の黒と赤のヒストグラムを比較する。このヒストグラムには 77GeV から 81GeV までに明らかにならずれが生じている。このずれは、G5 ジオメトリーの物質質量が増加した結果、電子が SCT バレル内で制動輻射を起こす割合が増えた事による。制動輻射によってエネルギーを失う電子が増え、従って電子の横方向運動量分布が全体的にエネルギーの低い方へずれ、その結果 W ボソンの横方向質量の分布もエネルギーの低い方へずれたと考えられる。この範囲では 1 ビン分のずれが 0.5GeV なので、ヒストグラムのこの範囲でずれは約 500MeV あると言える。

これはアトラス実験で目標の一つとしている、W ボソン質量の測定を 15MeV の精度で行なう事に対して大きな意味を持つ。SCT の物質質量を 20 % の精度で記述した場合、この目標は達成できないことを示唆する。単純に W ボソンの横方向質量のずれが、物質質量の精度に比例すると考えると、もし W ボソンの質量を 50MeV の精度で知りたければ、SCT の物質質量を 2 % の精度で記述する必要がある。そして、15MeV の精度で W ボソンの質量を知りたければ、SCT の物質質量をおよそ 1 % の精度で記述しなければならない。

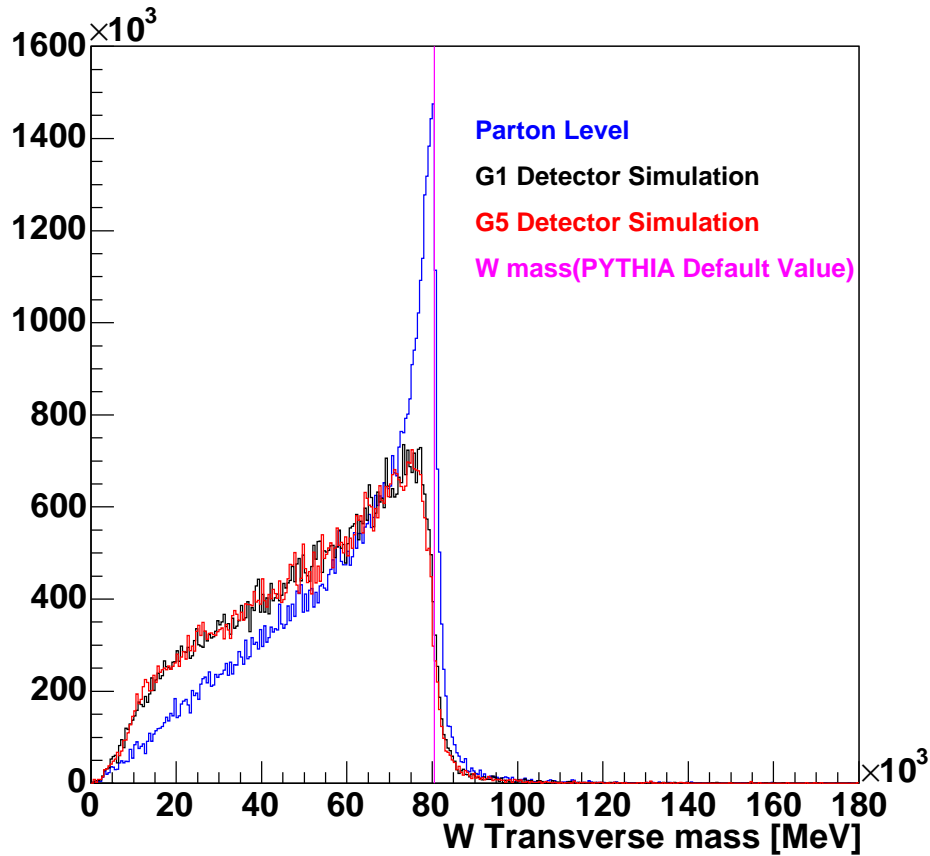


図 27: W ボソンの横方向質量の分布。ピンク色の鉛直線が PYTHIA のパラメータとして与えられている W ボソンの質量 (80.45GeV) を示す。青いヒストグラム (Parton Level) は W ボソンが崩壊して出てきた電子とニュートリノの真の横方向運動量によって再構成した W ボソンの横方向質量である。真の値を使っているため、検出器の分解能や物質質量の影響を受けない。この青いヒストグラムには W ボソンの質量 80.45GeV (PYTHIA の W ボソンの質量の設定値) にピークがある。そこから右の方への浸み出しは W ボソンの Breit-Wigner 分布によるものである。もし Breit-Wigner 分布の効果がなければピンクの鉛直線のところで分布は切れてしまう (すなわち青いグラフに見えるような浸み出しは起こらない)。黒いヒストグラムは G1 ジオメトリーを使った検出器シミュレーションで再構成した W ボソンの横方向運動量である。赤いヒストグラムは G5 ジオメトリーを使ったものである。このヒストグラムのビン幅は 0.5GeV に相当する。

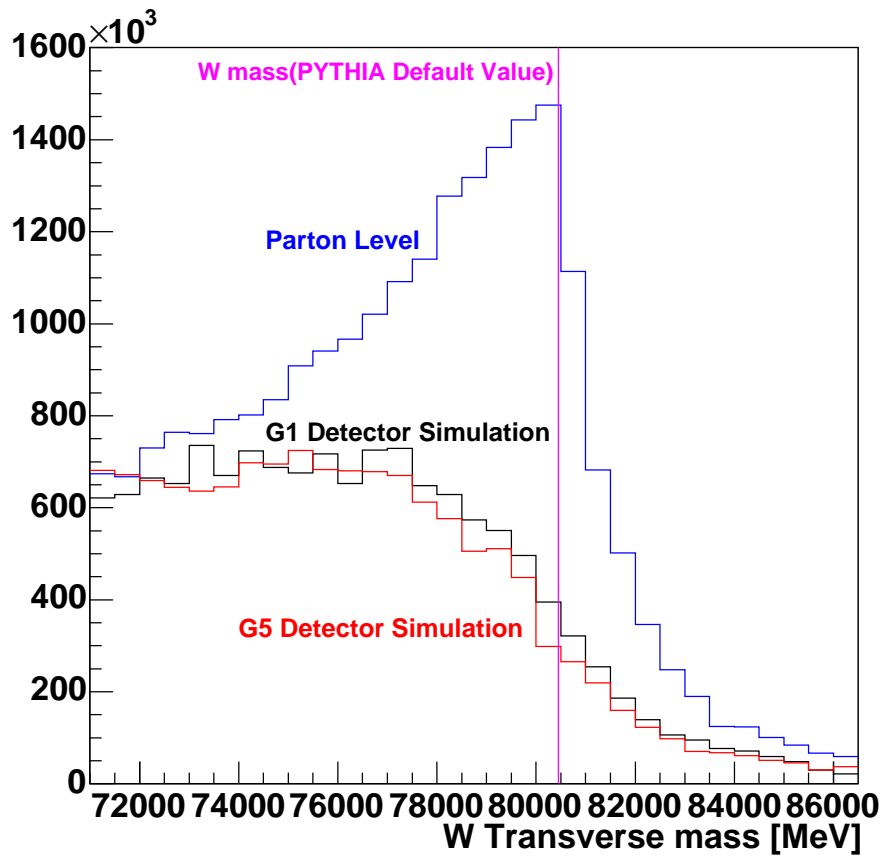


図 28: W ボソンの横方向質量の分布。72GeV から 86GeV を拡大したもの。赤と黒のヒストグラムのずれがよく分かる。

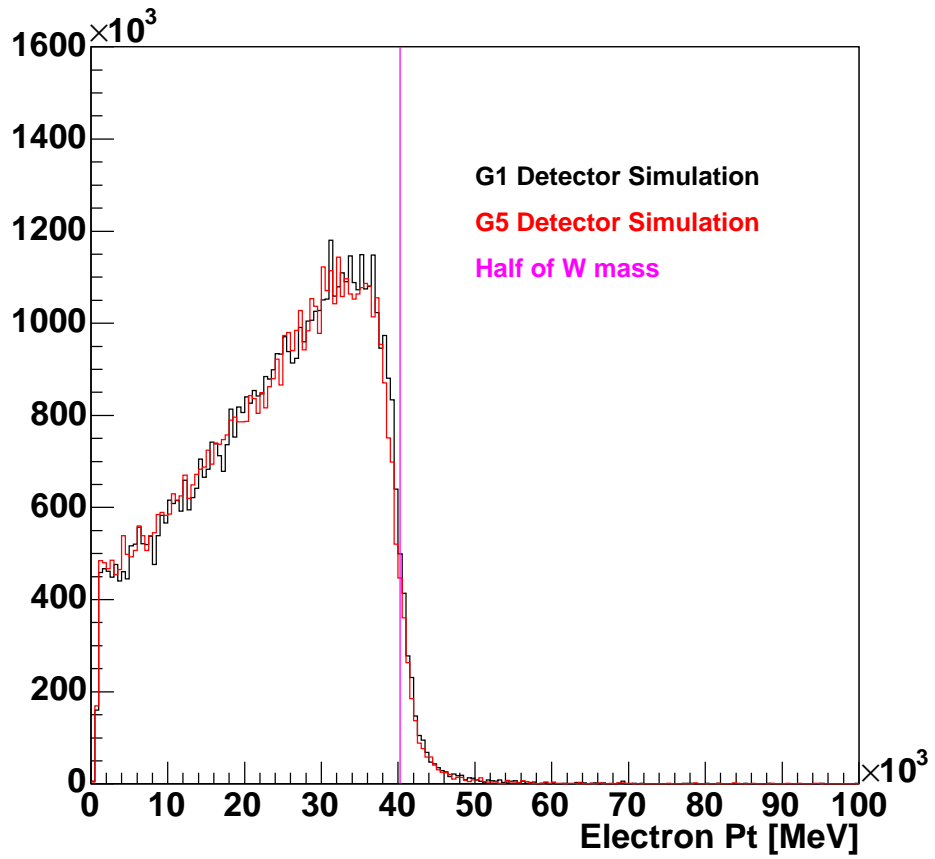


図 29: 電子の横方向運動量の分布。黒いヒストグラムは G1 ジオメトリーを用いたシミュレーションによって得られた結果。赤いヒストグラムは G5 ジオメトリーを用いた結果。ピンクの鉛直線は W ボソンの質量の半分の位置を示している。

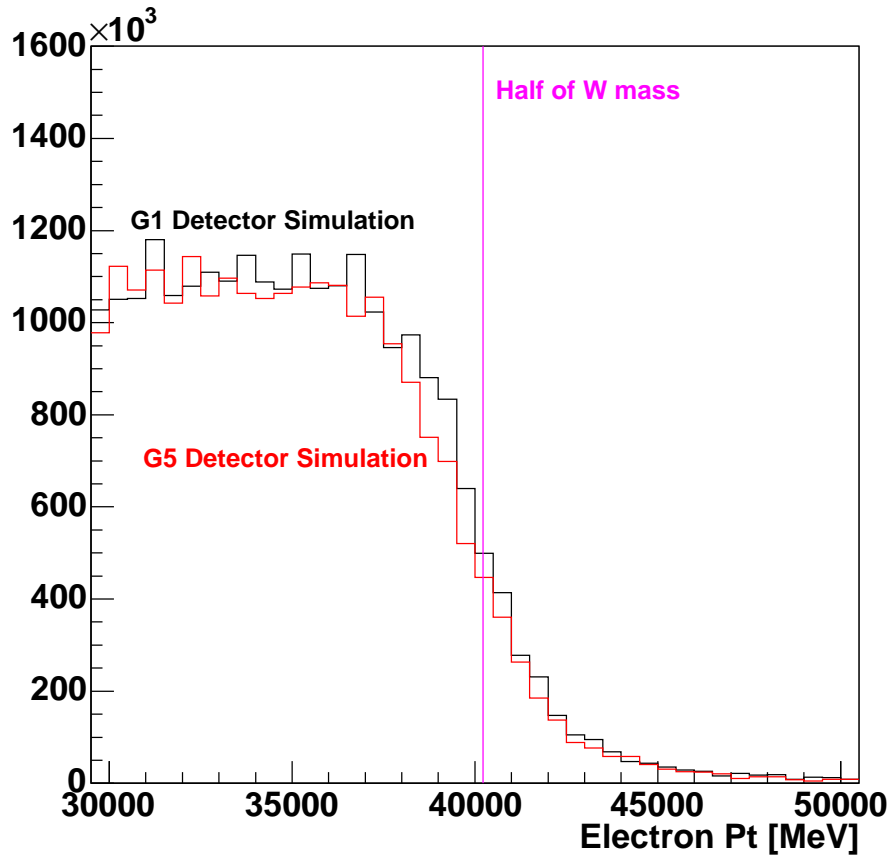


図 30: 電子の横方向運動量の分布 (図 29) の 30GeV から 50GeV を拡大したもの。

## 6 まとめ

本研究で携わったアトラス実験はヒッグス粒子や超対称性粒子さらに余剰次元の発見などが期待される。しかしWボソンの質量測定といった電弱相互作用の精密測定も大切であり、輻射補正によりヒッグス粒子の質量を予言することが出来る。直接測定と精密測定による間接的なヒッグス粒子の質量が一致するのは、標準理論の重要なテストとなる。

この為、我々はWボソンの質量の精密な測定が実現できるようSCTバレルのジオメトリー構築を行なった。その結果、初期のジオメトリーには含まれていない重金属などが、実物には含まれている事が分かり、それをジオメトリーに組み込んだ。そして、我々のジオメトリーは初期の物よりも、SCTバレルに関して物質量が約19%増加した。また重量も約11kg重くなった。これは新たに考慮した重金属の寄与であると考えられる。我々が構築したジオメトリーはアトラス実験で正式に使われるよう、登録された。

また、本研究ではWボソンの質量の精密測定に対する検出器の物質量の影響を調べる為に、 $W \rightarrow e\nu$ の事象を用いてWボソンの横方向質量を再構成するシミュレーションを行なった。シミュレーションは現在アトラスでつかわれている通常のジオメトリーを用いたものと、SCTの物質量を疑似的に平均20%増加させたジオメトリーを用いた2種類を行なった。この時SCTの物質量を増加させる為にSCTバレルのサポートシリンダーの密度を5倍にした。その結果、Wボソンの横方向質量の分布におよそ500MeVのずれが生じる事がわかった。これはアトラス実験で目標の一つとしている、Wボソン質量の測定を15MeVの精度で行なう事に対して大きな意味を持つ。SCTの物質量を20%の精度で記述した場合、この目標は達成できないことを示唆する。単純にWボソンの横方向質量のずれが、物質量の精度に比例すると考えると、もしWボソンの質量を50MeVの精度で知りたければ、SCTの物質量を2%の精度で記述する必要がある。そして、15MeVの精度でWボソンの質量を知りたければ、SCTの物質量をおよそ1%の精度で記述する必要がある。

本研究ではWボソンの横方向質量の分布のずれを、非常に大雑把に議論した。今後の課題はより定量的な評価が上げられる。また、このずれがWボソンの質量決定に対して、どの程度影響するのかを定量的に調べる必要がある。

## 7 謝辞

この研究を進める当って、指導教官である中野逸夫教授には多くのご指導を戴きました。ミーティングでは有意義な意見や反論をして下さい、研究が間違った方向に進まないように指導して下さいました。ここに御礼申し上げます。また、アトラス実験の様な刺激ある研究を紹介して下さいました田中礼三郎助教授には感謝の言葉も御座いません。この2年間不慣れな研究で、なかなか研究が進まず何度もくじけそうになり、その度に田中先生が元気づけて下さいました。また、研究で迷っている時も突破口になるような有意義なアドバイスをして下さいました。ここに御礼申し上げます。また、高エネルギー加速器研究所の近藤先生には、さまざまな面で大変お世話になりました。KEKでの長期の滞在を可能にして下さり、またCERNへの出張もさせて戴きました。そして、何より差さえになったのは近藤先生自身非常に忙しい立場にあるにも関わらず私の様な学生の言う事を熱心に聞いて下さり、大変有意義なアドバイスをして下さった事です。どの様な言葉を並べても足りませんが、この場を借りて御礼申し上げます。また、CERNのICEPPオフィスの上田先生には、CERN滞在中に大変お世話になりました。英語が不慣れな私をさまざまな場面で助けて下さいました。ここに御礼申し上げます。京都教育大の高嶋先生には、CERN滞在中やソフトウェアの使い方で困った時に大変お世話になりました。ありがとう御座います。KEKの寺田先生、尾高先生にはKEK滞在中にお世話になりました。ありがとう御座いました。また安先生にはCERN滞在中に、河野先生にはOxford滞在中に大変お世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。ありがとう御座いました。また、私の同級性である森島君、横山君には研究がうまく行かない時に愚痴を聞いてもらったり、一緒にのみに言ったりと、私はこの二人のおかげで心の健康を保つ事ができました。ほんとうにありがとうございました。つくば大学の中村君にはKEK滞在中に大変お世話になりました。ありがとう御座いました。

最後になりましたが、アトラスジャパングループの皆様やつくば大学の皆様にも御礼も申し上げます。ありがとう御座います。その他私を支えて楽しく毎日を過ごさせてくれた後輩全員に感謝したいと思います。ありがとう御座いました。

内藤大輔

## 参考文献

- [1] ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report Vol1, 1999.
- [2] ATLAS Detector and Physics Performance Technical Design Report Vol2, 1999.
- [3] ATLAS Inner Detector Community, ATLAS Inner Detector Technical Design Report Vol1, CERN/LHCC/97-16 ATLAS TDR 4 30 April 1997.
- [4] ATLAS Inner Detector Community, ATLAS Inner Detector Technical Design Report Vol2, CERN/LHCC/97-17 ATLAS TDR 5 30 April 1997.
- [5] William R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo.
- [6] Donald H. Perkins, Introduction to High Energy Physics, Third Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- [7] Andrew Scott Gordon, Measurement of the W Boson Mass Width the Collider Detector at Fermilab, The Department of Physics in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the subject of Physics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts November 1998.
- [8] Oliver Stelzer-Chilton, W Boson Production and Mass at the Tevatron, arXiv:hep-ex/0506016v2 9 Jun 2005.
- [9] Fabiola Gianotti, Monica Pepe Altarelli, Precision Physics at the LHC, arXiv:hep-ex/0006016 14 Jun 2000.
- [10] Vernon D. Barger, Roger J.N. Phillips, Collider Physics Updated Edition.
- [11] Christian Kiesling, Tests of the Standard Theory of Electroweak Interactions, Springer-Verlag.
- [12] Frieder Lenz, Harald Griesshammer, Dieter Stoll(Eds.), Lectures on QCD, Applications, Springer.
- [13] The LEP Electroweak Working Group, <http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/>