

平成21年度 修士論文

$HH \rightarrow WWWW \rightarrow l\nu qq l\nu qq$ 崩壊過程による
ヒッグス自己結合の研究

京都教育大学 教育学研究科 教科教育専攻 理科教育専修
素粒子基礎物理学研究室

085047

武田 彩希

2010年1月15日

概要

現在, 素粒子実験の世界は新たな扉を開こうとしている. スイスにある世界最大級の加速器, LHC(Large Hadron Collider) が稼働し, 実験が始まった. LHCにある汎用大型検出器, ATLAS 検出器での実験は, 標準理論で唯一未発見のヒッグス粒子や超対称性粒子の探索など新たな成果が期待されている. まだ実験は稼働したばかりではあるが, 素粒子物理の世界では将来的な見通しを行い, 加速器のバージョンアップや新粒子の発見に関する話題もある(SLHC). そして, SLHCで行うことができる物理についても研究されている. 本研究は, その一つであるヒッグス自己結合に関するシミュレーションを行い, 将来的にどの程度見つけることができるのか見積もったものである. 扱った反応は, $HH \rightarrow WWWW \rightarrow lvqqlvqq$ という崩壊過程である. この解析の結果, 発見できるヒッグス粒子の数を見積もり, さらに過去のレポートとも比較した.

目次

第1章 序論	1
1.1 はじめに	1
1.2 LHC(Large Hadron Collider)	2
1.3 ATLAS 実験	2
1.4 ATLAS 検出器	3
1.4.1 検出器全体	3
1.4.2 Inner Detector	3
1.4.3 データ収集システム	3
第2章 実験のシミュレーションとデータ解析	5
2.1 シミュレーションによる物理解析	5
2.2 物理解析に必要な素粒子実験の知識	5
2.2.1 検出器の座標系	5
2.2.2 ルミノシティ	6
2.2.3 Lepton	6
2.2.4 Jet	7
2.3 ATLAS 実験でのシミュレーション	7
2.3.1 シミュレーションの流れ	7
2.3.2 Event Generation	7
2.3.3 Detector Simulation	9
2.3.4 Digitization	9
2.3.5 Reconstruction	9
2.4 データ解析に必要な知識	10
2.4.1 MC Truth	10
2.4.2 データへのアクセス	10
2.4.3 PDG ID	10
2.4.4 Cut	11
2.4.5 Matching	11
2.4.6 Signal と BackGround	11
2.5 大量の Job を走らせる	11
第3章 ヒッグス自己結合のシミュレーション	13
3.1 ヒッグス自己結合と扱った崩壊過程について	13
3.1.1 ヒッグス粒子	13
3.1.2 ヒッグス粒子の生成過程	13

3.1.3	ヒッグス粒子の崩壊過程	13
3.1.4	ヒッグス自己結合	15
3.1.5	扱った崩壊過程について	15
3.2	シミュレーションデータの生成	19
3.3	Single Particle を見る	20
3.4	シミュレーションデータの解析	21
3.4.1	解析の流れ	21
3.4.2	使用した StoreGateKey	22
3.5	イベントの情報	22
3.6	Lepton	24
3.6.1	Electron	24
3.6.2	Muon	26
3.7	Jet	27
3.8	ジェットから組んだWボソンの質量	28
3.9	解析に用いた Cut 値	29
3.10	ヒッグス粒子の Visible Mass	30
第4章	結論	32
4.1	まとめ	32
4.2	今後の課題	32

目次

1.1	ATLAS 検出器で検出されたイベント	1
1.2	LHC 全景	2
1.3	LHC のあるトンネル内 1	2
1.4	LHC のあるトンネル内 2	2
1.5	ATLAS 検出器全体	3
1.6	Inner Detector	4
2.1	ATLAS 検出器の断面と疑ラビディティ	6
2.2	フルシミュレーションの流れ	8
3.1	LHC でのヒッグス粒子の生成断面積	14
3.2	ヒッグス粒子の崩壊分岐比 [10]	14
3.3	グルーオン融合によりヒッグス粒子が 2 つできる反応図 (右がヒッグス自己結合)	15
3.4	LHC でのヒッグス自己結合の生成断面積	16
3.5	W^+ の崩壊モード (W^- は電荷が負) [10]	16
3.6	$lvqq\bar{v}qq$ の反応図 (異種電荷対)	18
3.7	$lvqq\bar{v}qq$ の反応図 (同種電荷対)	18
3.8	Efficiency pT of Single Electron (黒:NoIsEM, 青:Loose, 緑:Medium, 赤:Tight)	21
3.9	Electron の Bremss の軌道 (左) と MC Truth での扱い (右)	21
3.10	データの崩壊先情報 (左からその他 (τ), ($\ell^\pm\nu\ell^\mp\nu$)($qqqq$), ($\ell^\pm\nu qq$)($\ell^\pm\nu qq$))	23
3.11	レプトンの組み合わせ (左から $e-e$, $e-\mu$, $\mu-\mu$)	23
3.12	Reconstruct したレプトンの組み合わせ (左から $e-e$, $e-\mu$, $\mu-\mu$)	23
3.13	Efficiency of Electron pT	24
3.14	Efficiency of Electron eta	24
3.15	Electron の pT (青: Reco, 赤: Truth)	25
3.16	Electron の Eta (青: Reco, 赤: Truth)	25
3.17	IsEM Cut をかけた後の pT (緑: Reco, 赤: Truth)	25
3.18	IsEM Cut をかけた後の Eta (緑: Reco, 赤: Truth)	25
3.19	Cut 後の Electron の pT (青: Reco, 赤: Truth)	25
3.20	Cut 後の Electron の Eta (青: Reco, 赤: Truth)	25
3.21	Muon の pT (青: Reco, 赤: Truth)	26
3.22	Muon の Eta (青: Reco, 赤: Truth)	26
3.23	Cut 後の Muon の pT (青: Reco, 赤: Truth)	26
3.24	Cut 後の Muon の Eta (青: Reco, 赤: Truth)	26

3.25 Jet の p_T (青: Reco, 赤: Truth)	27
3.26 Jet の Eta(青: Reco, 赤: Truth)	27
3.27 Cut 後の Jet の p_T	27
3.28 Cut 後の Jet の Eta	27
3.29 1 イベントあたりの Cut をパスした Jet の本数	28
3.30 2つの Jet から組んだWボソンの質量	28
3.31 ヒッグス粒子の Visible Mass	30
3.32 Background を含めた Visible Mass	30
4.1 ヒッグス自己結合の結合定数と断面積	32

第1章 序論

1.1 はじめに

CERN(欧州原子核研究機構)にあるLHC(Large Hadron Collider)は2009年11月20日に稼働し,この論文を執筆時点(2010年1月)ではまだ順調である.このLHCの衝突ポイントの1つにある大型汎用検出器のATLAS検出器では,標準理論で唯一未発見のヒッグス粒子の探索をはじめとし,新しい物理の成果が期待されている.まだ実験は稼働したばかりではあるが,素粒子物理の世界では将来的な見通しを行い,加速器のバージョンアップや新粒子の発見に関する話題もある(Super LHC [3]).その中の一つに現状としては未発見であるがヒッグス粒子の精度よくその性質を調べるための解析について研究がされている.本研究では,質量の起源ともされるこのヒッグス粒子に関する反応,ヒッグス自己結合の反応の1つである,

$$HH \rightarrow WWWW \rightarrow lvqqlvqq \quad (1.1)$$

についてのフルシミュレーションとその解析を行うことが目的である.それには素粒子実験について幅広い知識が必要となる.まず本章ではCERNで行われているATLAS実験の概要,そして次章以降で物理解析について触れていく. [3]

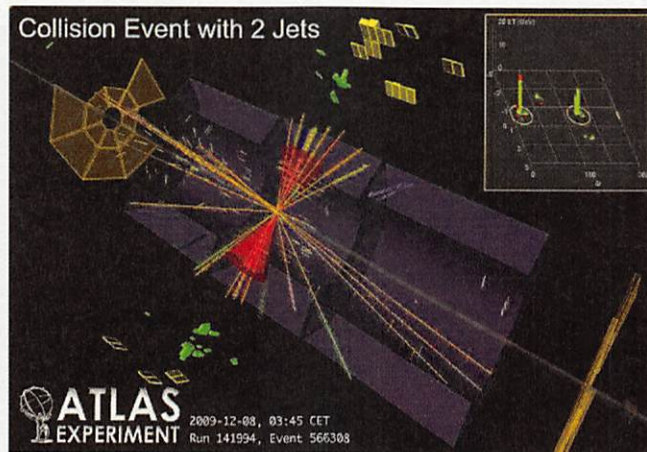


Fig. 1.1: ATLAS 検出器で検出されたイベント

1.2 LHC(Large Hadron Collider)

LHC(大型ハドロン衝突型加速器)は、スイスのジュネーブ郊外にあるCERNで建設された「陽子-陽子衝突型加速器」である。1周27kmのリングが地下100mほどのところにある(Fig.1.2)。(Fig.1.3, Fig.1.4)はLHCのあるトンネル内の様子であるが、青い筒状のものがLHC本体である。これらは14年の歳月を経て完成し、2008年9月10日に稼働実験を成功させた。しかし、同年9月19日にヘリウム漏れの事故のため停止した。そこから修理・調整を行い、2009年11月20日に再稼働し、12月にはアメリカのフェルミ研究所にあるテバトロン加速器のエネルギー記録を抜き、世界最大の加速器となった。

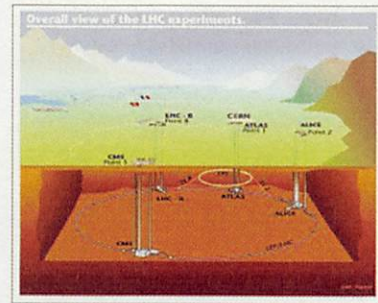


Fig. 1.2: LHC 全景

LHCのリング内には、陽子が双方向に周回しており、リング上にある4つの衝突ポイントで交差する。この衝突ポイントにそれぞれ検出器が設置されており、大きなものとしてATLAS¹, CMS², ALICE³, LHCbがあり、実験が行われる。



Fig. 1.3: LHCのあるトンネル内1



Fig. 1.4: LHCのあるトンネル内2

1.3 ATLAS 実験

ATLAS 実験は、LHC 上にある ATLAS 検出器で行われる実験である。実験の目的としては、

- 標準理論唯一未発見のヒッグス粒子の探索
- 超対称性粒子の探索
- CP 対称性の破れなど

をはじめとした、多くの新たな成果が期待されている。

¹ATLAS (A Toroidal Lhc ApparatuS)

²CMS (Compact Muon Solenoid)

³ALICE (A Large Ion Collider Experiment)

1.4 ATLAS 検出器

1.4.1 検出器全体

ATLAS 検出器は、多くのモジュールが1つにまとまった巨大な測定器システムである。大きさは高さ25m、全長44m、総重量7000tというものだ。内側から、内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミュオン検出器で構成される。これらの検出器は円筒状の形をしているが、その中心にLHCのビームラインがあり、検出器の中心でビームが衝突する。内側の内部飛跡検出器 (Inner Detector) は、荷電粒子の飛跡を検出し、運動量を測定することができる。電磁カロリメータでは運動量の高い電子や光子のエネルギーを測定する。ほとんどはこの検出器の中で電磁シャワーを起こして止まる。ハドロンカロリメータは中間子、陽子や中性子などのハドロンのエネルギーを測定する。これらのほとんどは、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ほとんどを失って止まる。ミュオン検出器はミュオンが物質透過力が強い性質から最外層にある。

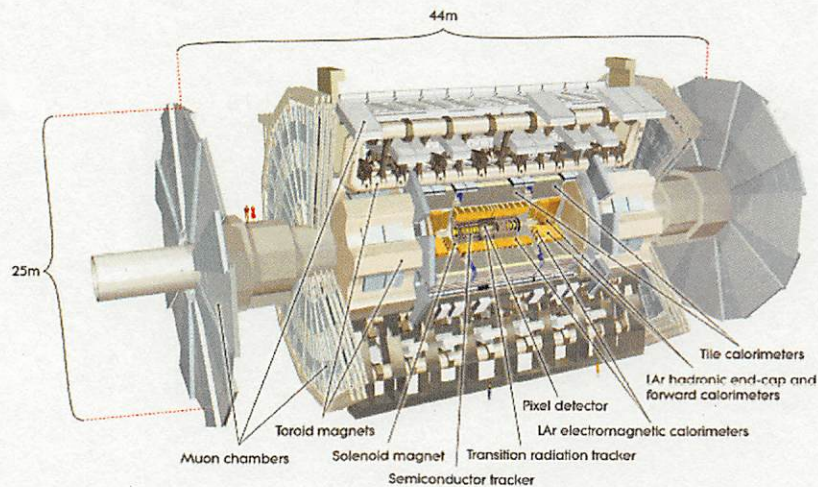


Fig. 1.5: ATLAS 検出器全体

1.4.2 Inner Detector

Inner Detector では荷電粒子に関して測定する検出器であるが、その構成はビームラインに最も近い内側から、Pixel Detector, SCT, TRT となっている (Fig.1.6)。検出器には、2テスラの磁場がかかっており、荷電粒子が通過する際にローレンツ力により、その飛跡は曲げられる。この曲率より荷電粒子の運動量を測定することができる。

1.4.3 データ収集システム

ATLAS 検出器では、1 イベントのデータサイズが約 2MB である。つまり、1 秒間に 4000 万回のイベント全てを記録しようとしても、10 秒ほどで 1PB (= 1,000TB = 1,000,000GB)

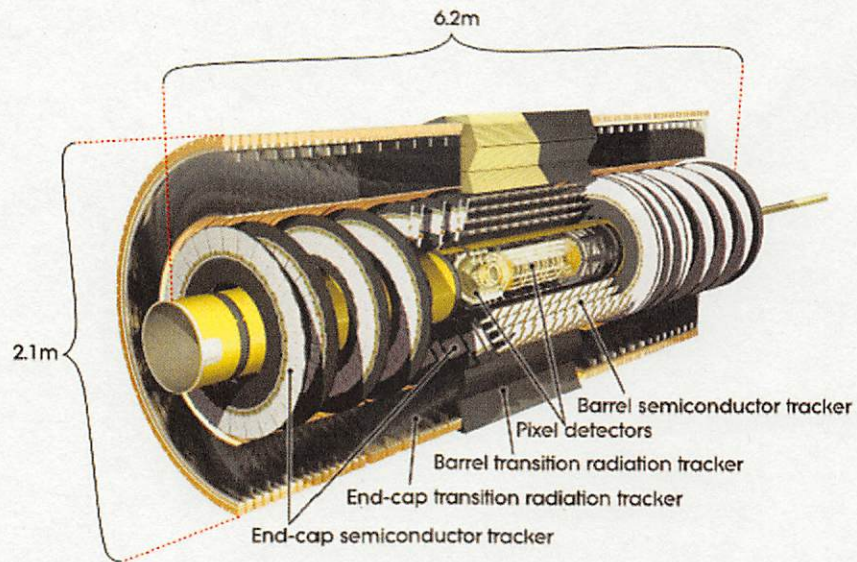


Fig. 1.6: Inner Detector

よって、全てを記録せず、トリガーシステムにより興味深い衝突イベントのみに選別され、1秒間に200イベントほどになる。それでも1年に数PBというデータサイズになる。この得られた膨大なデータはCERNにあるTire0というシステムに行く。ここでは実験のRAWデータ(元データ)を収集し、保管と一次処理が行われる。そして、次にネットワーク経由で世界中の研究機関10カ所に存在するTire1というシステムへ行く。ここでは、RAWデータを複製保管、そしてRAWデータから粒子と検出器情報を持つよう変換されたデータのESDの保管とデータの再処理を行う。Tire1サイトは互いに広帯域ネットワークで連携している。そして、一般ユーザーが利用するのはTire2というシステムである。Tire2はTire1に所属している。主にシミュレーションデータの生成とユーザーによるデータ解析が行われる。

第2章 実験のシミュレーションとデータ解析

2.1 シミュレーションによる物理解析

現在, 実験がはじまりデータが出てきているが, それまではシミュレーションにより解析の手法が研究されていた. 素粒子実験のシミュレーションは今ある理論に基づいたものであり, シミュレーションデータにより物理解析を行ったものと実験データを比較することで, 理論の正しさを示すことへとつながる. そのためにもシミュレーションによる検証は必要なのである. ATLAS グループでも衝突点で起こったイベントでどのような反応がみられるか, また ATLAS 検出器でどのような信号が得られ, どの程度現象の再構成が行えるかを検証するフレームワークが整っている. シミュレーションによる物理解析を行っていくには, 素粒子の衝突によって起こる現象から ATLAS 検出器のように検出する装置の特徴, そしてデータ収集システムについて, 他にはデータから起こった現象について考察するための解析手法など, 非常に多くのことを知る必要がある. 本章では, シミュレーションから解析に至るまでに必要な知識をまとめる.

2.2 物理解析に必要な素粒子実験の知識

2.2.1 検出器の座標系

物理現象を把握するためには, その空間的な座標が重要となってくる. ATLAS 検出器には, 予め定められた座標系がある. まずビームライン方向を Z 軸とし, それに対して垂直方向を Y 軸としている. 検出器の筒状の形に合わせた円筒座標系が定められている. 検出器断面を η 方向としている. Z 軸に沿った検出器断面を ϕ 方向としている. η は pseudorapidity (疑ラピディティ) とよばれる量であり,

$$\eta = -\ln \left(\tan \frac{\theta}{2} \right) \quad (2.1)$$

と定義されている. ATLAS 検出器の各部と疑ラピディティ η の関係は (Fig.2.1) となっている. ϕ は, 粒子の運動方向と X 軸とのなす角である. ATLAS 検出器での空間的な座標は, この ϕ と η を直接測定することで把握する. この検出器内の空間では, 数多くの粒子が検出されることになるが, あるイベントで発生した粒子間の距離は ΔR という値を計算する. これは ϕ と η から計算する空間的な距離であり,

$$\Delta R = \sqrt{(\Delta\phi)^2 + (\Delta\eta)^2} \quad (2.2)$$

と計算する.

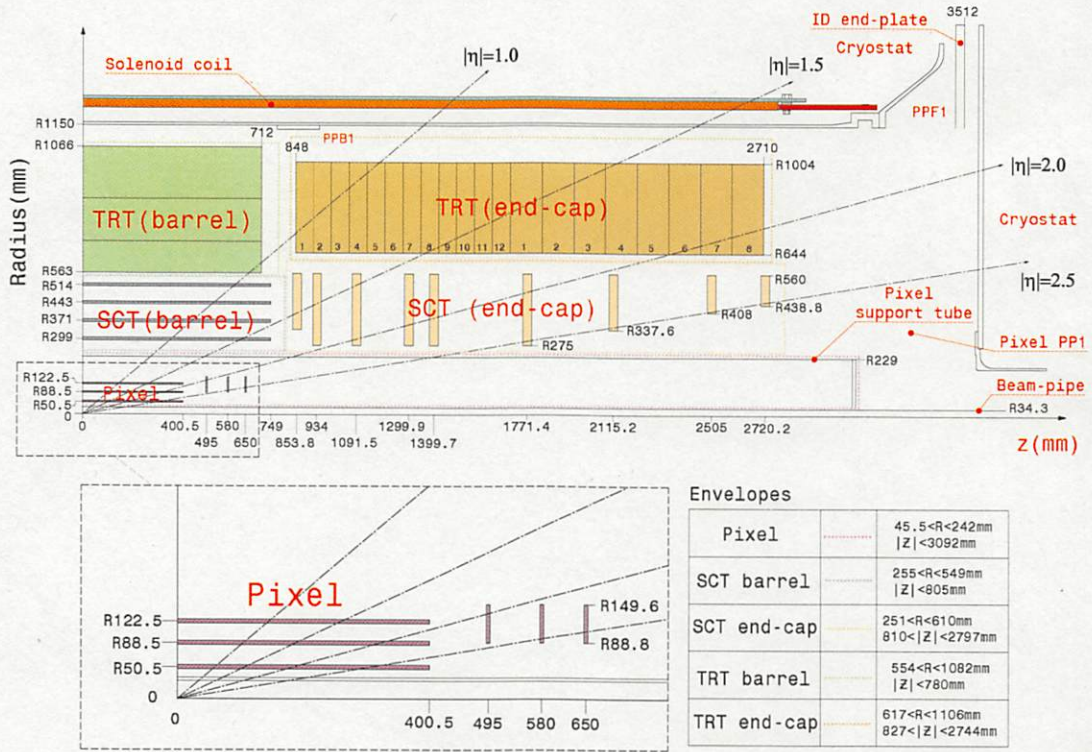


Fig. 2.1: ATLAS 検出器の断面と疑ラピディティ

2.2.2 ルミノシティ

ルミノシティは衝突輝度ともよばれるものであり、加速器の性能として可能な衝突頻度の指標となるものである。このルミノシティが高いほど、同一期間で比較したときの反応数が多いということである。衝突頻度を N とし、ルミノシティを \mathcal{L} 、反応断面積を σ としたとき、

$$N = \mathcal{L} \cdot \sigma \quad (2.3)$$

と表わされる。ルミノシティの単位は断面積の逆数であるから $[1/b]$ である。

2.2.3 Lepton

レプトンとは、物質を構成する粒子で、強い相互作用をしない粒子のことである。レプトンはさらに、電荷を持つ荷電レプトンと中性レプトンに分けられる。種類としては電子 (e^-)、電子ニュートリノ (ν_e)、ミュー粒子 (μ^-)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウ粒子 (τ^-)、タウニュートリノ (ν_τ) とそれぞれの反粒子のことである。(e^-, μ^-, τ^-) は電荷が -1 、(e^+, μ^+, τ^+) は電荷が $+1$ 、($\nu_e, \bar{\nu}_e, \nu_\mu, \bar{\nu}_\mu, \nu_\tau, \bar{\nu}_\tau$) は電荷が 0 である。

2.2.4 Jet

粒子の衝突反応などによって、クォーク・反クォーク対が生成される場合、ハドロンのジェットと呼ばれる現象が起こる。この対は、大きさが等しく方向が反対の運動量を持つので、180度方向に離れていくが、閉じ込めのポテンシャルによって対を結ぶ線上に大きなエネルギーが蓄えられる。そもそも、なぜジェットという現象が起こるのかというと、クォークは単独で存在できないという事実が大きく関係している。クォークはいつも他のクォークとグルーオンにより結ばれている。ビームの衝突によって、クォーク・反クォーク対は運動量を保存するためにビーム方向の平面に対して対象方向に離れていく。グルーオンによる結びつきが切れると、そこからクォーク・反クォークの対でできた中間子ができる。これが繰り返され、正反対に進むたくさんの粒子群になり、これがジェットとよばれるものとなる。これらの情報から、親粒子であるクォークの情報を得る。

2.3 ATLAS 実験でのシミュレーション

2.3.1 シミュレーションの流れ

ATLAS 実験では、グループで使用されているシミュレーション・解析の環境とその流れがある。まず環境であるが、「Athena」とよばれる解析フレームワークにより行われている。現在の最新バージョンは Release15 である。Athena の中で様々な作業が進む。シミュレーションの流れとしては、

1. ビームを衝突させて素粒子反応を作り出す (Event Generation).
2. 起こった反応が検出器の各モジュールに (HITS Simulation).
3. 検出器の各モジュールの信号が出力される (Digitization).
4. モジュールから出力された信号から反応を再構成する (Reconstruction).

となり、Reconstruction されたデータを解析する。これが ATLAS 実験でのフルシミュレーションのながれである。以下では、この流れについて詳しく触れる。

2.3.2 Event Generation

標準理論に基づきビームライン同士の衝突を仮想的に行うことが Event Generation である。各現象のことをイベントと呼ぶが、イベントを生成し、それによってどのような粒子ができるかをシミュレーションする。シミュレーションは Monte Carlo と呼ばれているが、これにより生成された情報を Truth と呼ぶ。単に MC Truth と読んだりする。これらは Pythia [1] や Alpgen [12] という Event Generator により行う。これによって出力されたデータは、ファイル名を "EVNT" から始めるというのが ATLAS 標準の命名法である。

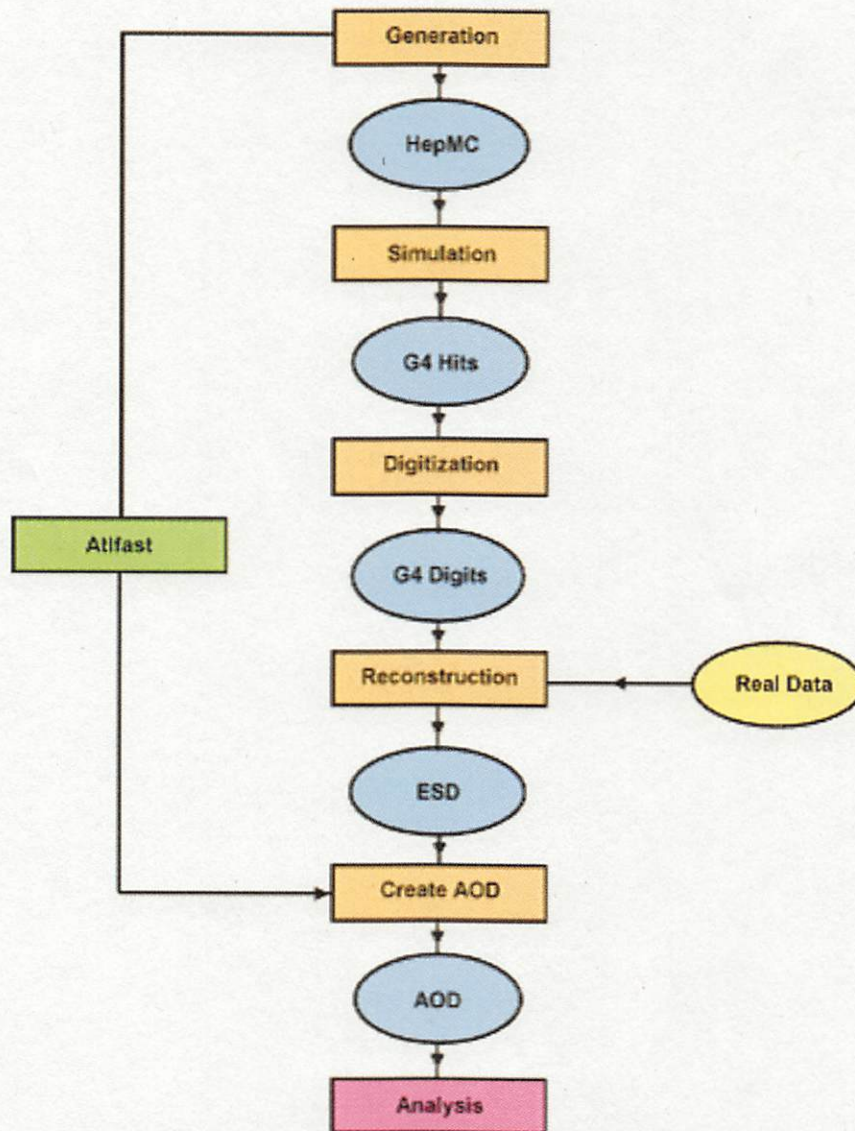


Fig. 2.2: フルシミュレーションの流れ

2.3.3 Detector Simulation

次に検出器シミュレーションが行われる。Event Generationにより出力されたEVNTファイルを元に行われる。イベントデータに検出器の情報をパラメータとして与える。この情報には、各モジュールがどのような素材でできておりどのように設置されているのかが含まれる。シミュレーションには"Geant4"とよばれる、高エネルギー分野ではよく使われているシミュレーターが利用されている。ジェネレートされた粒子が検出器とどのような反応をしていくかは、ここで全て計算されていき、その結果が情報としてデータ化される。これにより出力されたデータは、ファイル名を"HITS"からはじめるというのがATLAS標準の命名法である。

2.3.4 Digitization

Detector Simulationにより出力されたHITSファイルを元に、各イベントにおいて粒子が通過するときにモジュールではどのような信号が出力されるかがシミュレーションされる。つまり、Digitizationを行うことでモジュールからの信号出力がファイルとして得られる。そしてこのデータ以降はハードウェアによる処理が進む。実験データとしてもこの処理までが素粒子反応に依存するものであるから、このDigitizationにより得られたものでシミュレーションデータと実験データがつながる。これにより出力されたデータは、ファイル名を"RDO(Row data object)"からはじめるというのがATLAS標準の命名法である。

2.3.5 Reconstruction

Digitizationにより出力されたRDOファイル、つまりモジュールから得られた信号を元に、各イベントでどのような反応が起こったのかを再構成する。これは大きく分けて2段階ある。トラッキングのヒットやカロリメータのセルなど検出器の詳細情報を含めたESD(Event Summary Data)と、そこから詳細な情報を落としたAOD(Analysis Object Data)がある。通常の解析ではAODを用いる。もし検出器の位置情報が必要な解析であれば、ESDを使用して行っていく。どのデータを使用するかは、解析内容による。本物の実験データはRDO形式で出力されてくるので、これをシミュレーションデータと同様にReconstructionし解析することになる。つまり、シミュレーションデータと実験データは基本的には同じ解析アルゴリズムを用いることができるようになっている。以上のシミュレーションがフルシミュレーションとよばれているものであり、その流れをまとめると(Fig.2.2)のようになる。しかし、フルシミュレーションは特に検出器シミュレーションは膨大な時間がかかるため多くは行われない。手早く物理的な結果を得たい場合は簡易シミュレーションであるFastSimulationというものを行う。これによりEventGenerationからATLFASTというシミュレーターを使用してAODファイルを作ることができる。

2.4 データ解析で必要な知識

2.4.1 MC Truth

AOD ファイルを作成したら、そのデータを解析する。シミュレーションデータには実験データにはない様々な情報が付加されている。例えば MC Truth の情報である。これは、シミュレーターがどのようなシミュレーションをしたか、どのような粒子を作ったかという情報であるため、Truth の情報を用いることで 100 % 正しく全ての粒子を検出できた場合の情報を知ることができる。実際には検出器シミュレーションによって、イベントの情報が全て正しく得られずにある程度のゆらぎを持った情報となってくる。Truth データと検出器シミュレーションの後再構成したデータを比較することで、検出効率などを見ることができる。

2.4.2 データへのアクセス

Athena による解析では、StoreGate というツールを介してデータへアクセスする。データはコンテナという入れ物に入っており、必要とするコンテナからデータを取得する。取得の際には、データへアクセスするための StoreGateKey が必要である。これは、コンテナの名前である。

2.4.3 PDG ID

トラッキングなど様々なデータから、粒子の種類などが識別されることになる。そして、データとして納められる際に識別子が割り当てられる。粒子の識別子としては、PDG ID というものが用いられる。本研究で使用しているものを抜粋したものが (Table.2.1) である。例えば、電子は PDG ID が 11 であるが、この場合、反粒子の陽電子は -11 ということになる。ID がプラスで定められてる粒子の反粒子は全て符号がマイナスとなる。

PDG ID	粒子	PDG ID	粒子	PDG ID	粒子
1	d	11	e^-	21	gluon
2	u	12	ν_e	22	γ
3	s	13	μ^-	23	Z^0
4	c	14	ν_μ	24	W^+
5	b	15	τ^-	25	H
6	t	16	ν_τ	2212	proton

Table. 2.1: PDG ID

2.4.4 Cut

物理解析を行っていくにあたり、目標とする結果とそれ以外を分離していかなければならない。そこで、データから条件に制限をつけて減らしていく。この作業を Cut をかけるという。実際に解析を行っていくと、Cut の値を決めていかなければならない。一般的によく使われる値というのもあるが、やはり自分の扱うデータを見て決めていくことになる。Cut をかける前の情報をプロットし、それによって判断したり、Signal と Background を合わせることで得られる S/N や Efficiency との兼ね合いで決めていくこともある。

2.4.5 Matching

MC Truth による情報と Reconstruct された情報から、粒子の同定が必要となる。その場合は、Truth と Reconstructed Particle とで Matching する。Matching とは、Truth にある粒子と Reconstruct された粒子の空間的な距離を見て、その値がとて小さければ同一のものと判断することである。参考までの値としては、Lepton は 0.02 以下、Jet は 0.2 以下程度になるが、これらの Cut 値についてはプロットを見て判断する。

2.4.6 Signal と BackGround

物理的に重要な意味を持つイベントというのは、出現確率が低い傾向にある。まれにしこ起こらない現象ほど興味深い。つまり、全てのイベントをシミュレーションすることは計算機資源と時間の無駄になる。そこで、イベントジェネレーションの時点でシミュレーションを行いたいイベントのみを選別する。この選別したイベントを Signal という扱いにする。BackGround とは、シミュレーションを行いたいイベントではないが、その終状態が同じ粒子であるイベントのことを言う。

2.5 大量の Job を走らせる

シミュレーションの流れについては大まかに見てきたが、統計的に必要なイベント数を実際に行うと膨大な計算機資源が必要となってくる。中でも、検出器シミュレーションには大変時間がかかる。それは 1 台～数台では不可能な場合もよくある。本研究で行ったフルシミュレーションは、東京大学素粒子物理国際研究センター (ICEPP) のアトラス地域解析センターの計算機システムを借りて行った。素粒子センターの地域解析センターは、ユーザが解析を行うことのできる Tier 2 のサイトとなっている。アトラスグループの一般ユーザーも利用できるが、その計算機スペックは、

- ブレードサーバー : Dell PowerEdge 1955 (計 650 台)
- CPU: Dual Intel Xeon 5160(WoodCrest 3.0GHz, 4 cores)
- Memory: 4GB または 8GB(LCG 提供分)
- 内蔵 disk: SAS 73GB (RAID-1 構成)
- NIC : 1Gbps (Broadcom 5708)

となっている。もちろん ATLAS からのデータ解析用は別途存在する。この計算機システムでは、LSF(Load Sharing Facility) という Platform 社のジョブ管理ソフトが使われている。これにより大量のジョブを投入しても、その管理をしながらシミュレーションをこなしてくれる。あとは、シミュレーションに必要なパラメータを変化させながら LSF にジョブ投入を行うスクリプトを書けばよい。このスクリプトは何でもよ k が ShellScript により記述した。文字列操作が多いので Perl も使いやすい。これは手作業では不可能に近い。

第3章 ヒッグス自己結合のシミュレーション

3.1 ヒッグス自己結合と扱った崩壊過程について

3.1.1 ヒッグス粒子

ヒッグス粒子は、標準理論の中で唯一未発見の粒子であり、質量の起源ともされる存在である。そして自発的対称性の破れを引き起こす機構の鍵を握る粒子として、電弱統一理論 (GWS 理論) の要をなす粒子でもある。それゆえ、ヒッグス粒子を発見し、ヒッグス機構の仕組みを解明することが課題とされている。このヒッグス粒子の探索は ATLAS 実験の目的の一つであり、その存在が発見された後、さらに質量をはじめとした物理的な性質について精密に調べられる予定である。このように実験対象として未知なるものではあるが、その性質は理論によって知られている。

3.1.2 ヒッグス粒子の生成過程

ヒッグス粒子の生成過程は、グルーオン融合 (gluon fusion), VBF (Vector Boson Fusion), W/Z ボソンとの随伴生成 (W/Z associated production), top/bottom クォークとの随伴生成 (t/b associated production) の主に 4 つがある。LHC での各生成過程とその生成断面積が (Fig.3.1) である。これによるとグルーオン融合が最大で、数 10[fb] オーダーとなっている。

3.1.3 ヒッグス粒子の崩壊過程

生成されたヒッグス粒子は不安定であるため、すぐに他の安定粒子へと崩壊する。標準理論から、その崩壊過程の分岐比を計算することができる。質量と各崩壊過程の分岐比との関係は (Fig.3.2) のようになる。この図からすると、ヒッグス粒子は質量によって崩壊先が大きく変化する。例えば、W ボソンの質量は 80.4[GeV], 91.2[GeV] であるため [10], ヒッグス粒子の質量が 160[GeV] 以上で WW への崩壊比が多くを占め、180[GeV] 以上で ZZ への崩壊比が上がってくる。つまり、調べる領域の崩壊過程は常に意識する必要がある。

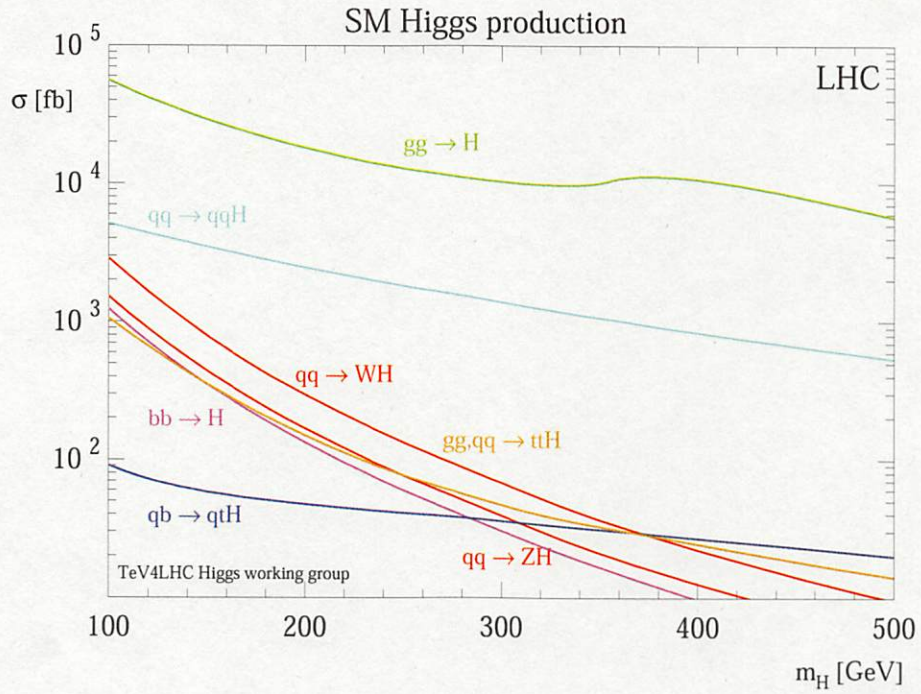


Fig. 3.1: LHCでのヒッグス粒子の生成断面積

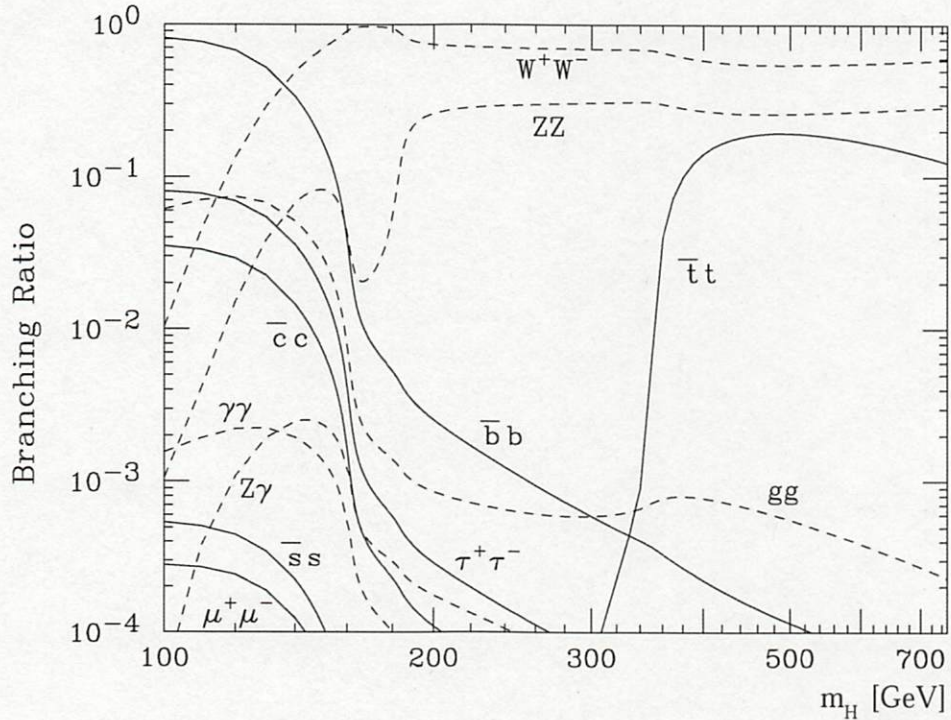


Fig. 3.2: ヒッグス粒子の崩壊分岐比 [10]

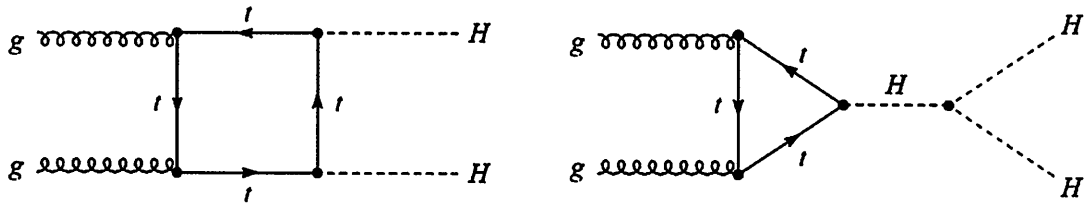


Fig. 3.3: グルーオン融合によりヒッグス粒子が2つできる反応図 (右がヒッグス自己結合)

3.1.4 ヒッグス自己結合

ヒッグス粒子が質量の起源とされるのは、相手の質量に比例した強さで結合するという性質のためである。標準理論によると、本来粒子には質量がなく、ヒッグス粒子との相互作用が大きくなるほど結合が強い状態となり、それが質量として現れると言われている。つまり、質量が重い粒子ほど結合が強いということである。例えば、W/Zボソンやトップクォーク、そして自分自身であるヒッグス粒子と結合しやすい。この、ヒッグス粒子がヒッグス粒子と結合する反応を「ヒッグス自己結合」という。(Fig.3.3)は、トップクォークを介したグルーオン融合によりヒッグス粒子が2つできる反応図の例である。右がヒッグス自己結合によるものである。ヒッグス粒子が未発見の現在、実験的にとらえることはできないが、シミュレーションにより自己結合の強さを調べることができる実験の可能性について研究することができる。

3.1.5 扱った崩壊過程について

ヒッグス自己結合という反応は、そもそもの程度現実的なものなのか。LHCでのヒッグス自己結合でのヒッグス粒子の質量と生成断面積の関係は(Fig.3.4)となっている。これより、LHCでは最も大きいグルーオン融合であっても数十[fb]オーダーであり、ヒッグス粒子(数十[fb])と比較するとその難しさがわかる。このように起こりにくい反応であるため、LHCではなくSLHCへとアップグレードした場合の実験が必要となる。よって、可能性についての研究としては、まず反応がより起こりやすい生成・崩壊過程を調べることとなる。生成過程は生成断面積が最も大きいグルーオン融合とする。次に崩壊過程についてであるが、(Fig.3.2)より、質量が150~200[GeV]でWWへの崩壊過程が見やすいとわかる。これらより、以下のようなグルーオン融合からWWへの崩壊過程を扱う。

$$\bullet \quad gg \rightarrow HH \rightarrow (W^+W^-)(W^+W^-)$$

また、ヒッグス粒子の崩壊先であるWボソンも不安定であり、さらに安定な粒子へと崩壊していく。ヒッグス粒子の崩壊と同じく、Wボソンの崩壊も確率的に決まっている。(Fig.3.5)は、 W^+ ボソンの崩壊確率についての表である。これより $(e^+\nu)$ 、 $(\mu^+\nu)$ 、 $(\tau^+\nu)$ へ各1割、ハドロン(ジェット)へは7割弱という確率で崩壊することがわかる [10]。

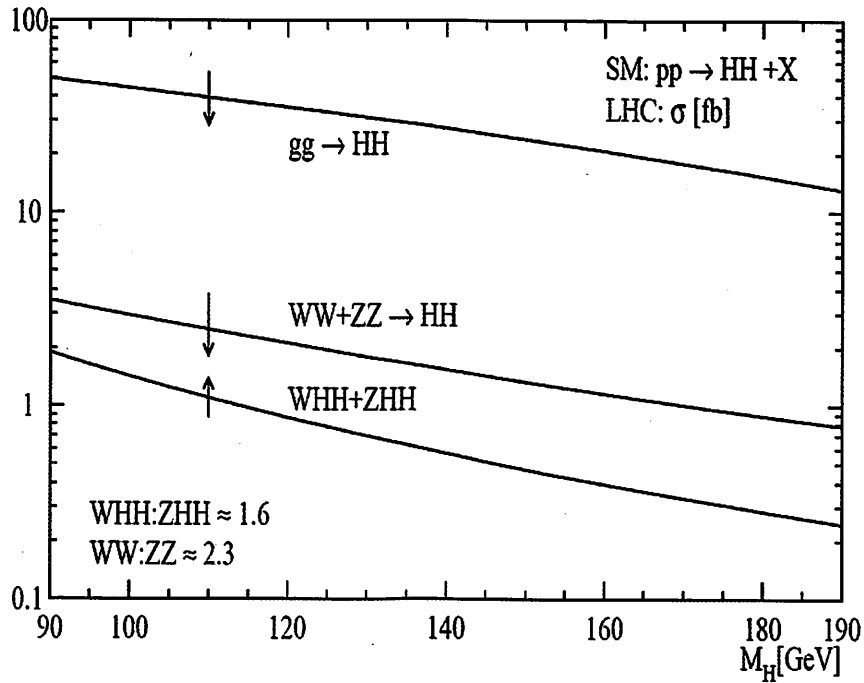


Fig. 3.4: LHC でのヒッグス自己結合の生成断面積

W^+ DECAY MODES	Fraction (Γ_i/Γ)	Confidence level	(MeV/c)
$\ell^+\nu$	[b] $(10.80 \pm 0.09) \%$		—
$e^+\nu$	$(10.75 \pm 0.13) \%$		40199
$\mu^+\nu$	$(10.57 \pm 0.15) \%$		40199
$\tau^+\nu$	$(11.25 \pm 0.20) \%$		40179
hadrons	$(67.60 \pm 0.27) \%$		—
$\pi^+\gamma$	< 8	$\times 10^{-5}$	95% 40199
$D_s^+\gamma$	< 1.3	$\times 10^{-3}$	95% 40175
cX	$(33.4 \pm 2.6) \%$		—
$c\bar{s}$	$(31 \begin{smallmatrix} +13 \\ -11 \end{smallmatrix}) \%$		—
invisible	[c] $(1.4 \pm 2.8) \%$		—

Fig. 3.5: W^+ の崩壊モード (W^- は電荷が負) [10]

ヒッグス粒子, Wボソンは, あまりにも短い時間で崩壊していくので, 検出器でとらえることはできない. 実際に検出されるのは, Wボソンの崩壊先の粒子たちである. レプトンやニュートリノ, ジェットを

- $e^+, \mu^+, \tau^+ \rightarrow \ell^+$ (正電荷のレプトン)
- $e^-, \mu^-, \tau^- \rightarrow \ell^-$ (負電荷のレプトン)
- $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau \rightarrow \nu$ (ニュートリノ)
- $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau \rightarrow \bar{\nu}$ (反ニュートリノ)
- quark Jet $\rightarrow q$ (ジェット)

と表わすと, $HH \rightarrow (W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (** ***)(** ***)$ の崩壊過程は,

- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^+\nu\ell^-\bar{\nu})(\ell^+\nu\ell^-\bar{\nu})$
- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^+\nu\ell^-\bar{\nu})(\ell^+\nu qq)$
- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^+\nu\ell^-\bar{\nu})(qq\ell^-\bar{\nu})$
- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^+\nu\ell^-\bar{\nu})(qqqq)$
- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^+\nu qq)(\ell^+\nu qq)$
- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^+\nu qq)(qq\ell^-\bar{\nu})$
- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^+\nu qq)(qqqq)$
- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (qq\ell^-\bar{\nu})(qqqq)$
- $(W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (qqqq)(qqqq)$

の9パターンが考えられる. ニュートリノは検出されないため, ヒッグス粒子の情報は反応過程の最終的な状態(終状態)であるレプトンやジェットから得ることとなる. これらから, 親粒子であるヒッグス粒子を再構成していく. 複数の崩壊過程でどれを対象としてもよいが, 重要なことは解析によって

- 検出された粒子の中からヒッグス粒子の終状態を選別できるか
- 終状態が同じ反応(バックグラウンド)と区別できるか

ということである. この目的を達成するために, より特徴的な崩壊過程を解析対象とする. そこで今回扱うことにしたのが,

$$gg \rightarrow HH \rightarrow (W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^\pm\nu qq)(\ell^\pm\nu qq) \quad (3.1)$$

である. これは2つのレプトンとニュートリノ, そして4つのジェットへと崩壊する過程であるが, 同種電荷のレプトン対(Like-Sign Lepton pair)が終状態に含まれるところが特徴である. 通常, 粒子の生成過程では電荷が保存されるため, 異種電荷対(+/-)となる場合がほ

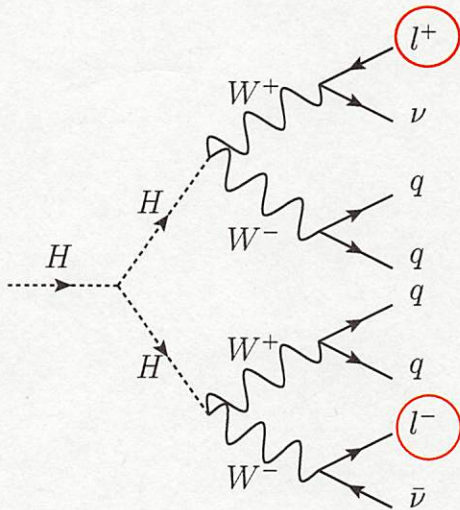


Fig. 3.6: $lvqq\bar{l}\nu qq$ の反応図 (異種電荷対)

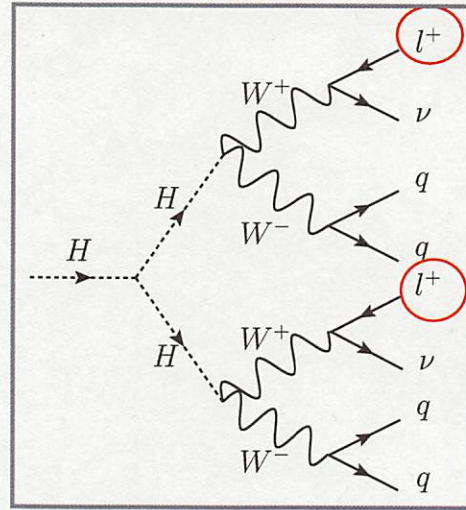


Fig. 3.7: $lvqq\bar{l}\nu qq$ の反応図 (同種電荷対)

とんどである。つまり、異種電荷対である粒子と反粒子が対生成されることで、電荷の保存則が成り立つ (例えば、陽電子と電子の対生成: $\gamma \rightarrow e^+ + e^-$)。もし、終状態に+同士、又は-同士の同種電荷対が存在すれば、これは極めてまれな反応の可能性がある。現にこの条件は、実際に考えられている大きなバックグラウンドとなり得る $t\bar{t}W$ からのものを落とすために有効なものとなる。 $t\bar{t}$ の崩壊による終状態は異種電荷対である。(Fig.3.6, Fig.3.7) は崩壊過程の反応図の一例であるが、(Fig.3.6) が異種電荷対の場合であり、(Fig.3.7) が解析の対象とする異種電荷対のものである。以上をまとめた反応の流れとしては、

1. LHC を周回する陽子同士が衝突
2. 陽子の中のグルーオンが反応しヒッグス粒子が生成
3. ヒッグス粒子が自己結合し、2つのヒッグス粒子が生成
4. 2つのヒッグス粒子が4つのWボソンへと崩壊
5. 各Wボソンが2つのレプトンとニュートリノ、4つのジェットへ崩壊

となる。フルシミュレーションによりこの崩壊過程についてのシミュレーションデータを生成し、ヒッグスシグナル (Higgs Signal) とする。その後、これらの終状態をとらえるまで、そしてバックグラウンドとの比較について解析を行っていく。また、フルシミュレーションではないが、ファストシミュレーションによる同じ崩壊過程についてのレポートが U.Baur を中心とした理論グループ [4], [5], [6], A.Blondel を中心とした実験グループ [2] のそれぞれで過去に存在するため、その結果とも比較する。

3.2 シミュレーションデータの生成

ヒッグス自己結合であるシグナルと $t\bar{t}W$ や WWW_{jj} のバックグラウンドについてのシミュレーションデータを作成したが、イベントジェネレーションデータに関しては KEK の東城順治先生が行ったものを使用させてもらった。(Table.3.1) は、本研究、そして U.Baur, A.Blondel らによる過去の研究で使用しているイベントジェネレーターである。そしてシミュレーションは、2章でも述べたように ICEPP のアトラス地域解析センターの計算機資源を借りて行った。ヒッグスシグナルデータは 200k event¹, バックグラウンドは各 50k event 生成した。しかし、中には失敗したものもあるため、最終的な数としては

- Higgs Signal : 198,052 event
- $t\bar{t}W$: 48,462 event
- WWW_{2j} : 49,216 event
- WWW_{1j} : 49,000 event
- WWW_{0j} : 49,231 event

となった。以下の解析は、このイベント数でのものである。

	This Thesis	U.Baur(02/03)	A.Blondel
Higgs Signal	HPAIR + Pythia mH = 150 ~ 200 [GeV]		HPAIR + Pythia mH = 150 ~ 200 [GeV]
$t\bar{t}W$	AlpGen + Herwig	MadGraph	—
WWW_{2j}			
WWW_{1j}	AlpGen + Herwig	MadGraph	AcerMC + Pythia
WWW_{0j}			

Table. 3.1: 本研究, そして過去の研究で使われたイベントジェネレーター

¹200k event = 200,000 event (1k event = 1,000 event)

3.3 Single Particleを見る

物理解析を行っていくにあたり、自前で作った解析コードが適切なものかを判断するため、適宜チェックをしていかなければならない。特に、独自にイベントを生成したときには注意が必要である。もし理論的に考えて意図しない結果が出た場合、シミュレーションデータか作成した解析コードかに不備があることがほとんどである。しかし、どちらが悪いかを判断することは難しい。そこで、予め作成した解析コードが適切なものかをテストしておく方法がある。ATLAS 実験グループによりジェネレートされた信頼のある単純な物理イベントデータに対して、意図した結果が出ているかどうかを確認すればよい。解析でも扱うこととなる、Electron と Muon に対してそのチェックを行った。既存のサンプルデータとして、あるエネルギー範囲の粒子が衝突点で空間的 (ϕ 方向, η 方向) に均一な条件でランダムに単一生成されたイベント (Single Particle Event) というものが生成されている。例えば、エネルギーに確率的な偏りがない Electron が衝突点にて1つ生成され、それが検出器の全 ϕ 方向, η 方向へ確率的に偏りなく放出されるというものである。そのため、解析後の Electron の運動量や放出された空間の情報を確認すると、偏りがない均一でフラットなものとなるはずである。この検証で使用した Single Electron, Single Muon のデータサンプルは、

- DS107020 : single-particle electron, $ET = 7 - 80[\text{GeV}]$
(tag = e342, s462, r604 : tid032274)
- DS107522 : single-particle muon, $ET = 80 - 500[\text{GeV}]$
(tag = e372, s462, r635 : tid046262)

である。このサンプルに対して、

- Electron $\rightarrow ET: pT > 15[\text{GeV}]$, $\text{Eta} : |\eta| < 2.5$, IsEM : Loose, Medium, Tight
- Muon $\rightarrow ET: pT > 15[\text{GeV}]$, $\text{Eta} : |\eta| < 2.5$

という Cut をかけた。Electron の IsEM Cut というのは Electron らしさの指標であるが、制限のレベルを厳しくすれば、より Electron らしいものが選別される。制限は、Loose, Medium, Tight の順に厳しくなる。しかし、厳しくすれば検出効率 (Efficiency) が下がってしまう。SingleParticle の pT の Efficiency に関するプロットは (Fig.3.8) である。黒が IsEM Cut をかけていない状態 (No IsEM Cut), 青が Loose, 緑が Medium, 赤が Tight であり、 $15 < pT < 80[\text{GeV}]$ で No IsEM が 9 割, Loose が 8 割 5 分, Medium が 8 割, Tight が 7 割ほどということがわかる。実際の解析では、Medium を使用する。Electron の Truth データを見るときに重要なことがある。それはブレイムス (Brems) の問題だ。Electron は、磁場の影響により軌道が変わると、そのエネルギー変化分を photon として放出する (Fig.3.9, 左)。これはブレイムスとよばれる現象である。しかし、MC Truth のデータ内での扱いとしては、Electron が photon と Electron に崩壊するという形となる (Fig.3.9, 右)。つまり、もともとは1つの Electron であったのに、空間内を進むにつれ大量に発生したように見え、正しくとらえることができない。このとき、Electron の親粒子を見ていくとその粒子がジェネレートされたものかどうかを判断することもできる。解析では、このように Truth を適切に見ていくことが重要である。

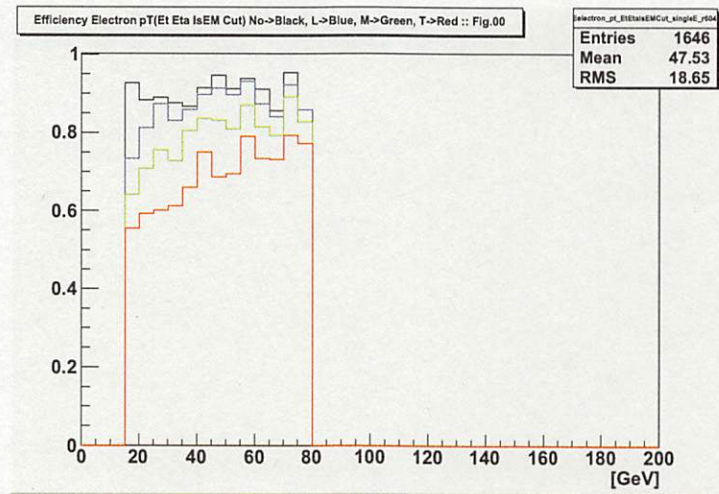


Fig. 3.8: Efficiency pT of Single Electron (黒:NoIsEM, 青:Loose, 緑:Medium, 赤:Tight)

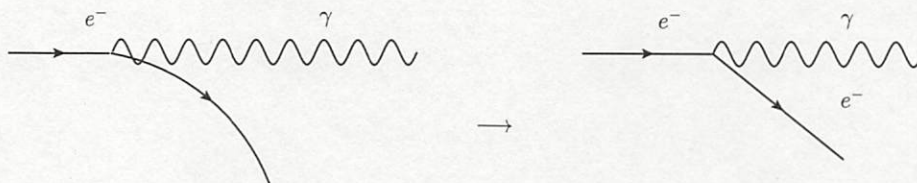


Fig. 3.9: Electron の Brems の軌道 (左) と MC Truth での扱い (右)

3.4 シミュレーションデータの解析

3.4.1 解析の流れ

解析は、フレームワークである Athena で解析プログラムを実行することにより行う。生成したシミュレーションデータで必要な情報にアクセスし、目的とする解析結果が残るように条件に制限をかけていく。また、シミュレーション独特の Truth データとの比較により、解析の信頼性についても検証していく。解析の流れとしては、

1. レプトン (Electron, Muon) に pT, Eta の制限をかける
2. ジェットに pT, Eta の制限をかける
3. 2つのレプトンを選ぶ
4. 4のジェットを選ぶ
5. 2つのレプトンと4つのジェットが選べたらヒッグス粒子の質量を組む

となる。2つのレプトンは同種電荷対 (Like-Sign Lepton pair), 4つのジェットは2つのWボソンの質量を組み、よりWらしいものとなるよう選択し決定する。それは、2つのWボソンか

ら4つのジェットが生成されたことから、逆にランダムに取りだしたジェット4つで無理やり2つのWを作り出し、より2つのWらしい組み合わせになるようなジェット4本を選び出すという方法となる。これで、主なバックグラウンドである ttW と $WWWj$ の崩壊パターンと区別できるかもしれない。これらは1つのWが2つのジェットとして生成されるので、無理やり2つのWとして生成すれば、Wのピークが1つは見えて、残りは崩れる(テールを引く)と予想される。以上の制限の判断は、各プロットを見て行っていく。そして最終的にヒッグス自己結合がどれほど選別できるか、終状態が同じバックグラウンドとなるイベントと区別できるかを検証していく。

3.4.2 使用した StoreGateKey

データにアクセスするためには StoreGateKey が必要であるが、今回使用したものを示す。

- Electron (Reco) : StoreGateKey → ElectronAODCollection
 - Muon (Reco) : StoreGateKey → StacoMuonCollection
 - Jet (Reco) : StoreGateKey → Cone4H1TowerJets
 - Jet (Truth) : StoreGateKey → Cone4TruthJets
 - Other (Truth) : StoreGateKey → SpclMC
- ※ Higgs , W , quark (all : u, d, c, s, t, b), lepton (electron and muon)

基本的に実験データともなる再構成 (Reconstruct) されたレプトンやジェットがアルゴリズムの対象であるが、シミュレーションならではの Truth がどのようなイベントかを知るための鍵となる。W から崩壊した quark は最終的に Jet として識別されるという関係も忘れてはいけない。これらから Truth と Reconstruct された粒子との Matching を行ったりしていく。

3.5 イベントの情報

シミュレーションでは、イベントジェネレーションの段階で生成されたイベントからヒッグス粒子から2つのレプトンと4つのジェットへ崩壊している組み合わせをフィルタ条件としてかけ選別している。つまり、この残ってきたものであるシグナルとしては、 $gg \rightarrow HH \rightarrow (W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^\pm\nu qq)(\ell^\pm\nu qq)$ や $gg \rightarrow HH \rightarrow (W^+W^-)(W^+W^-) \rightarrow (\ell^\pm\nu\ell^\mp\nu)(qqqq)$ という崩壊パターンがある。レプトンには、 e^\mp や μ^\mp に加え τ^\mp も含まれている。このシグナルは、フィルタにより実際にジェネレートされた数よりも少なくなっているため、実験への還元を行うためにはフィルタをかける前の実際にジェネレートした数へと換算しなければならない。

まずはヒッグスシグナルを見ていくが、最初にこのシミュレーションデータがどのような構成になるか確認しておく。今回成功した 198,052 イベントの $HH \rightarrow (W^+W^-)(W^+W^-)$ への崩壊先についてプロットしたものが (Fig.3.10) である。左はその他 (τ など), 真ん中が $(\ell^\pm\nu\ell^\mp\nu)(qqqq)$, 右が $(\ell^\pm\nu qq)(\ell^\pm\nu qq)$ のイベント数となっている。これで $\ell\nu qq$ イベントが

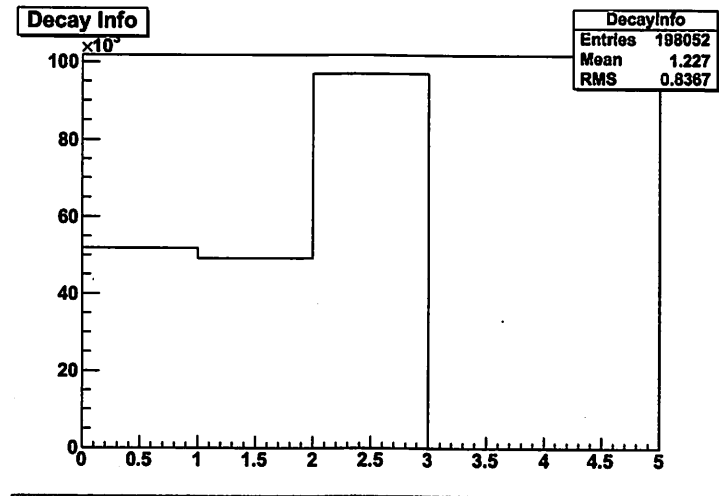


Fig. 3.10: データの崩壊先情報 (左からその他 (τ), $(\ell^\pm\nu\ell^\mp\nu)(qqqq)$, $(\ell^\pm\nu qq)(\ell^\pm\nu qq)$)

どのような崩壊パターンであったのかを情報として得ることができる。 $(\ell^\pm\nu qq)(\ell^\pm\nu qq)$ はおおよそ 50 % であり、確率的には適切なものと言える。

レプトンの組み合わせについてのプロットは (Fig.3.11) であり、左が $e-e$ 、真ん中が $e-\mu$ 、右が $\mu-\mu$ となっている。崩壊先の確率は均等なため、組み合わせで考えると ($e-e : e-\mu : \mu-\mu = 1 : 2 : 1$) となるはずであり、確率的にも適切であると言える。しかし、実際に Reconstruct されたレプトンの組み合わせは (Fig.3.12) となる。ここでは ($e-e$) と ($\mu-\mu$) に差が見られるが、これは Electron の検出効率が Muon よりも低いためである。それからすると、適切な結果であると言える。

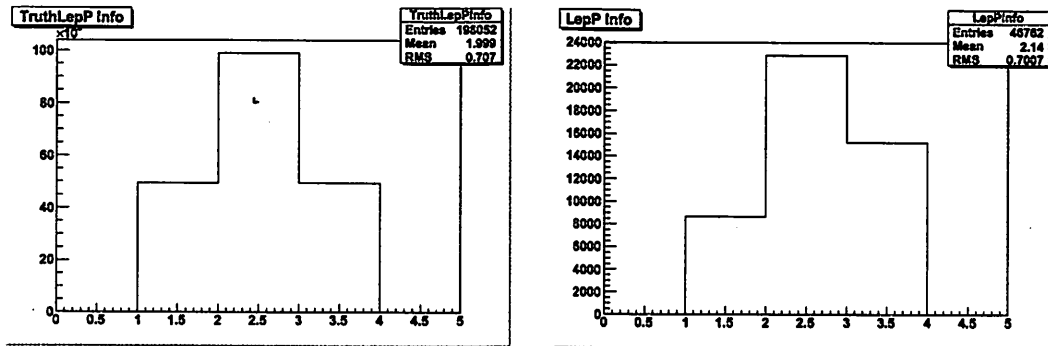


Fig. 3.11: レプトンの組み合わせ (左から $e-e$, Fig. 3.12: Reconstruct したレプトンの組み合わせ (左から $e-e$, $e-\mu$, $\mu-\mu$)

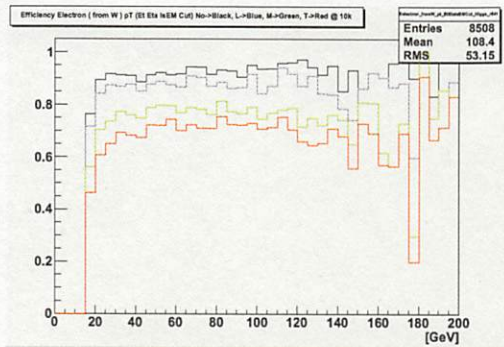


Fig. 3.13: Efficiency of Electron pT

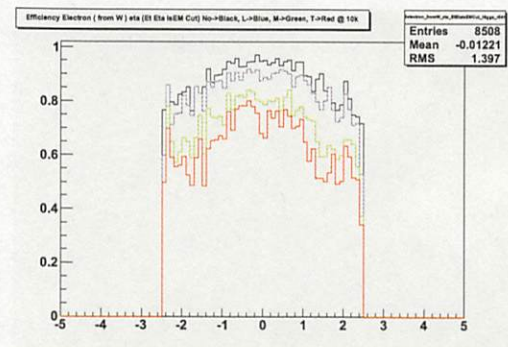


Fig. 3.14: Efficiency of Electron eta

3.6 Lepton

3.6.1 Electron

ここからは、解析の順番にプロットを確認していく。まずは、Electron について見る。(Fig.3.13, Fig.3.14) は、シグナルの Electron が IsEM の制限によってどの程度の Efficiency になるのかを確認したものである。Single Particle Electron のときと同様、黒が IsEM Cut をかけない状態 (No IsEM Cut)、青が Loose、緑が Medium、赤が Tight であり、似たような傾向が見られる。よって、IsEM の制限は Medium で行うこととする。

(Fig.3.15, Fig.3.16) は、Reconstruct された Electron (青) とその MC Truth (赤) をオーバープロットしたものである。Low pT で Reconstruct されたものとは大きく差があるとわかる。この Truth に近いものを選別するために Cut 値を決めていく。さらに、IsEM Cut をかけたものが (Fig.3.15, Fig.3.16) である。緑が IsEM (Medium) Cut 後であるが、Truth との差がなくなっている。しかし、Low pT に関しては Cut をかけて落としておきたいところである。ここでの制限としては、

- Electron :: $pT > 15[\text{GeV}]$, $|\eta| < 2.5$, IsEM = Medium

とした。その結果得られたプロットが (Fig.3.19, Fig.3.20) である。青が Reconstruct された Electron、赤が MC Truth のものである。

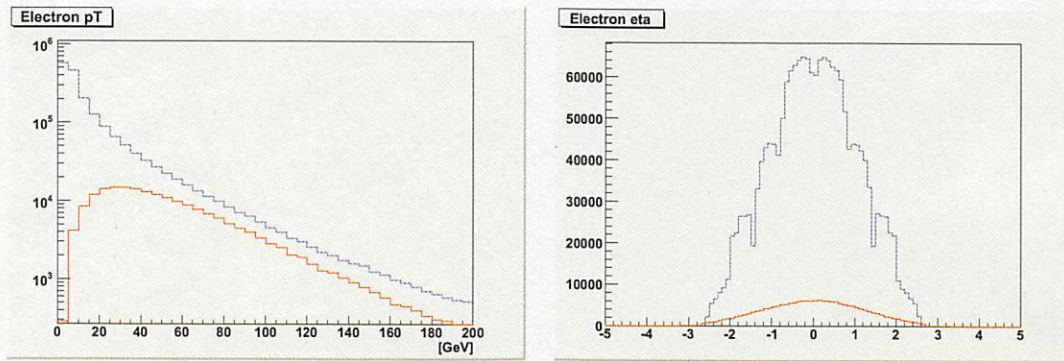


Fig. 3.15: Electron の pT(青:Reco, 赤:Truth) Fig. 3.16: Electron の Eta(青:Reco, 赤:Truth)

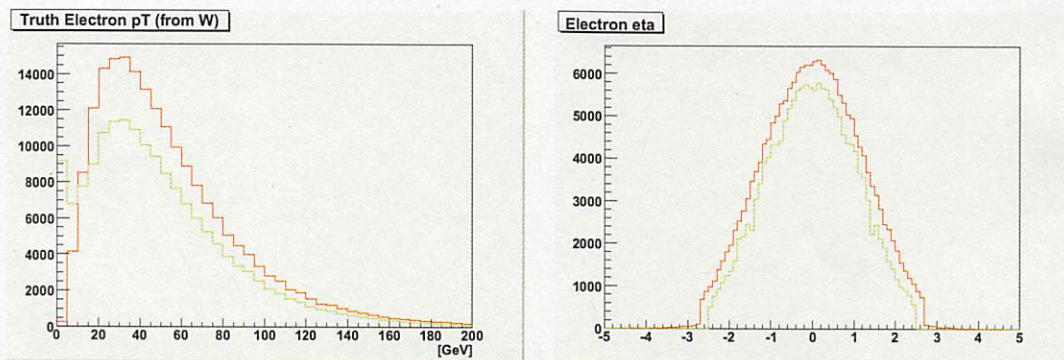


Fig. 3.17: IsEM Cut をかけた後の pT(緑:Reco, 赤:Truth) Fig. 3.18: IsEM Cut をかけた後の Eta(緑:Reco, 赤:Truth)

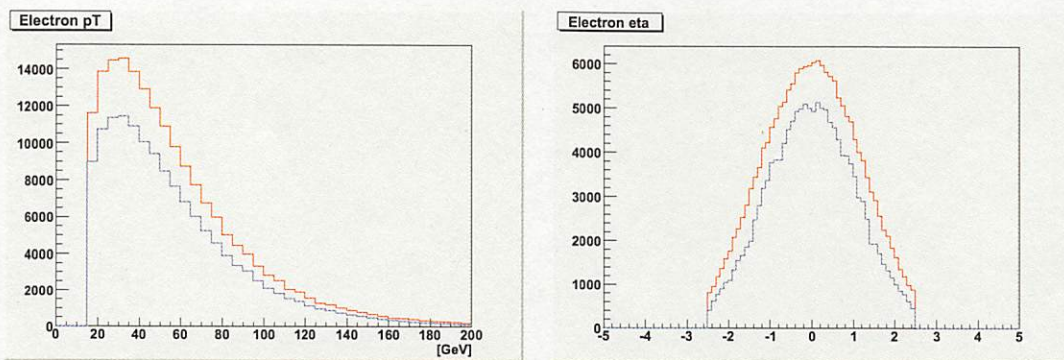


Fig. 3.19: Cut 後の Electron の pT(青:Reco, 赤:Truth) Fig. 3.20: Cut 後の Electron の Eta(青:Reco, 赤:Truth)

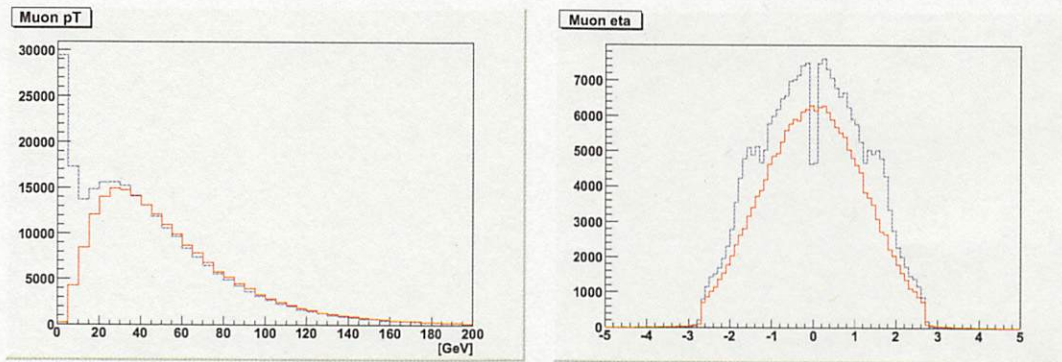


Fig. 3.21: Muon の pT(青 : Reco, 赤 : Truth) Fig. 3.22: Muon の Eta(青 : Reco, 赤 : Truth)

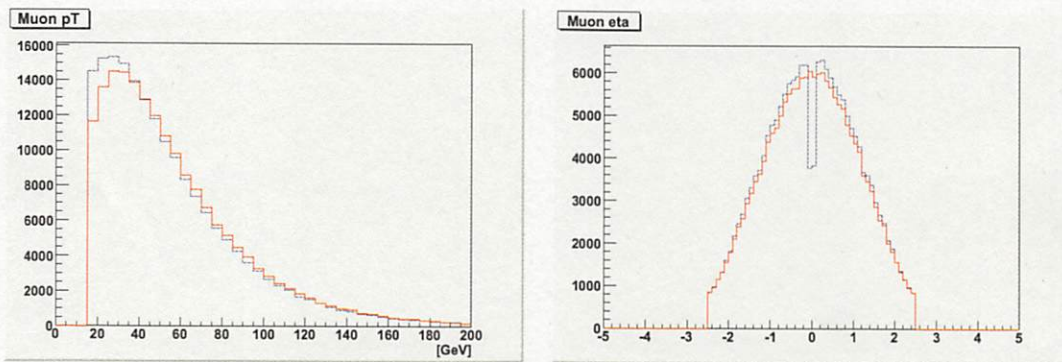


Fig. 3.23: Cut後の Muon の pT(青 : Reco, 赤 : Truth) Fig. 3.24: Cut後の Muon の Eta(青 : Reco, 赤 : Truth)

3.6.2 Muon

次に, Muon について見る. (Fig.3.21, Fig.3.22) は, Reconstruct された Muon(青)とその MC Truth(赤)をオーバープロットしたものである. Eta が 0 付近では, 検出器に穴があるため検出数が落ちているところがある. Electron と同様, Low pT で Reconstruct されたものとは大きく差があるとわかる. ここでの制限としては,

- Muon :: $pT > 15[\text{GeV}], |\eta| < 2.5$

とした. その結果得られたプロットが (Fig.3.23, Fig.3.24) である. 青が Reconstruct された Electron, 赤が MC Truth のものである.

以上がこのデータでのレプトンの情報である. これらが, 次の解析へと進む.

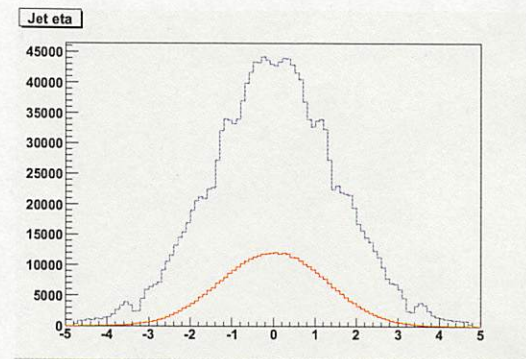
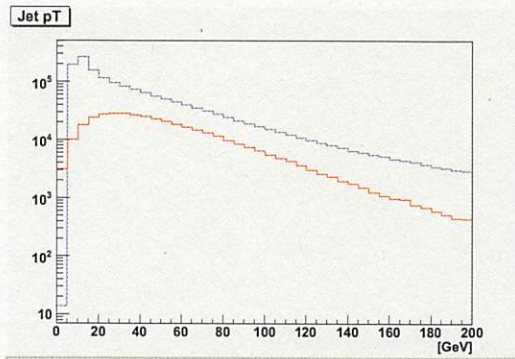


Fig. 3.25: Jet の pT(青 : Reco, 赤 : Truth) Fig. 3.26: Jet の Eta(青 : Reco, 赤 : Truth)

3.7 Jet

レプトンについて見た後は, Jet についての情報を確認する. (Fig.3.21, Fig.3.22) は, Reconstruct された Jet(青) とその MC Truth(赤) をオーバープロットしたものである. レプトンと同様, Low pT で Reconstruct されたものとは大きく差があるとわかる. ここでの制限としては,

- Jet :: $pT > 20[\text{GeV}], |\eta| < 3.0$

とした. Jet へ pT と eta へ Cut をかけると (Fig.3.27, Fig.3.28) となる. そして, この Cut を Pass した 1 イベントあたりの Jet の本数は (Fig.3.29) である. このプロットから, 4 本以上が多く 10 本くらいまでの数を含めれば, 大部分がカバーできるとわかる. 以上が, このデータでのジェットの情報である. これらが, 次の解析へと進む.

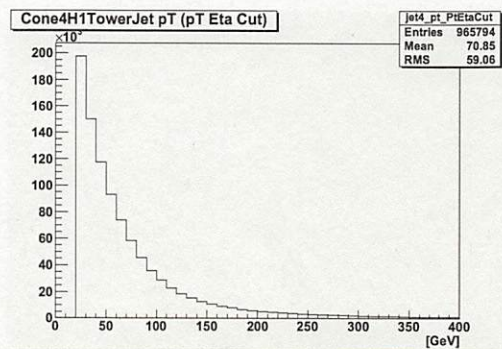


Fig. 3.27: Cut 後の Jet の pT

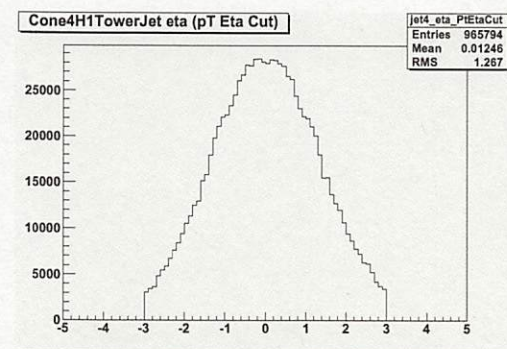


Fig. 3.28: Cut 後の Jet の Eta

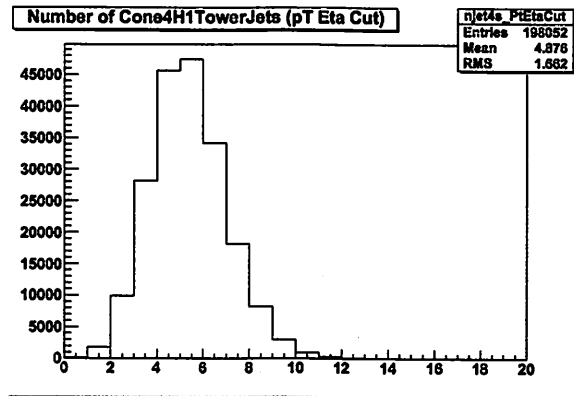


Fig. 3.29: 1 イベントあたりの Cut をパスした Jet の本数

3.8 ジェットから組んだWボソンの質量

4つのジェットから2つのWボソンの質量を組んだプロットが (Fig.3.30) である. このプロットを見ると, Wボソンの質量である 80.4[GeV] 付近にピークが見られる. また, Wボソンの質量で ± 30 [GeV] のところに Cut をかけている.

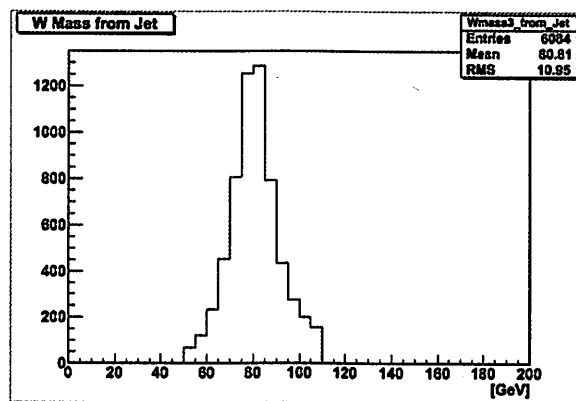


Fig. 3.30: 2つの Jet から組んだWボソンの質量

3.9 解析に用いた Cut 値

今回の解析に用いた Cut 値についてまとめる。以下は、解析を行った順番に記述している。これら全ての Cut の条件を満たしたものだけが、ヒッグス自己結合であるとし、ヒッグス粒子の Visible Mass を組むこととする。

- Electron (Reco) :

StoreGateKey → ElectronAODCollection

IsEM = Medium , $p_T > 15[\text{GeV}]$, $|\eta| < 2.5$

- Muon (Reco) :

StoreGateKey → StacoMuonCollection

$p_T > 15[\text{GeV}]$, $|\eta| < 2.5$

- Jet (Reco) :

StoreGateKey → Cone4H1TowerJets

$p_T > 20, 20, 30, 30[\text{GeV}]$, $|\eta| < 3.0$

- Jet (Truth) :

StoreGateKey → Cone4TruthJets

- Other (Truth) :

StoreGateKey → SpclMC

Higgs , W , quark (all : u, d, c, s, t, b), lepton (electron and muon)

- $\text{deltaR}(\text{ll}) > 0.2$ and like sign lepton pair
- $\text{deltaR}(\text{JJ}) > 0.4$
- JJ → W : (より 2 W に近い組み合わせに)
- W mass Cut : $\pm 15\text{GeV}$ ($m_W = 80.4 \text{ GeV}$)
- $\text{deltaR}(\text{IJ}) > 1.0$

※ ALL Cut Pass → Higgs Visible Mass

3.10 ヒッグス粒子の Visible Mass

選別してきた2つのレプトンと4つのジェットを組み合わせ、ヒッグス粒子の質量を組み上げた (Fig.3.31). ヒッグス粒子の質量が170[GeV] のデータで解析を行うと、2つのヒッグス粒子の340[GeV] 付近にピークが見られる。また、バックグラウンドを含めたプロットが (Fig.3.32) である。青が $t\bar{t}W$, 水色が $WWWjj$, 赤がヒッグスシグナルである。

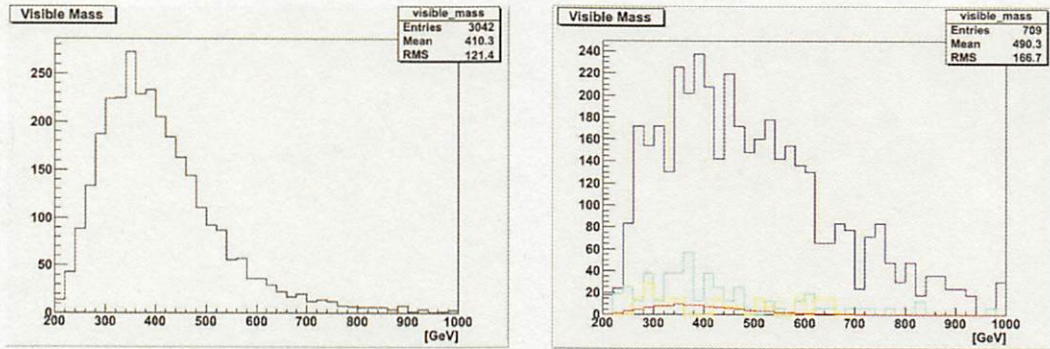


Fig. 3.31: ヒッグス粒子の Visible Mass Fig. 3.32: Background を含めた Visible Mass

そして、解析したシグナルとバックグラウンドの数についてまとめた表が (Table.3.2) である。これは、過去のレポートと比較すると、理論グループより実験グループに近いものとなっている。

	$\sigma_{tot}[\text{fb}]$	$\sigma \times \text{BR} \times E_f$	N [events]	$\mathcal{L}[\text{fb}^{-1}]$	σ_{obs}
Sig(mH=170GeV)	8.429	1.211	200k	165k	0.0725
$t\bar{t}W$	136.3	121.348	50k	412	1.08
$WWW2j$	88.47	46.270	50k	1081	0.667
$WWW1j$	108.2	51.925	50k	963	0.0784
$WWW0j$	125.9	58.178	50k	859	0.0295

Table. 3.2: 解析したシグナルとバックグラウンドの結果

さらに、実験グループのデータと今回の解析結果を SLHC の性能 ($6[ab^{-1}]^2$) で実験した場合の数に換算したものが、(Table.3.3) である。この表からすると、バックグラウンドが多いため、解析としてまだ落とし切れていない部分があるかもしれない。

	Signal	$t\bar{t}W$	WWWjj
mH=170[GeV] (A.Blondel)	350	1600	2400
mH=170[GeV] (Takeda)	435	6480	4650

Table. 3.3: $6[ab^{-1}]$ に換算したときの数

²[ab] = [at barn] , $6[ab^{-1}] = 6000[fb^{-1}]$

第4章 結論

4.1 まとめ

既の実験グループや理論グループで行われた、この崩壊過程より見つけることができるヒッグス粒子の数と、今回行ったフルシミュレーションを比較したところ、理論実験グループより実験グループのものに近い結果となった。フルシミュレーションではジェットの扱いが難しいといった点もあるが、Electron のデータや崩壊過程の粒子の詳細な情報など、得られるものは大きい。膨大な計算機資源の問題さえ解決できればよいが、現実的に難しい。今回は幸運にも、ATLAS 実験が開始されていなかったため、研究を効率よく行うことができた。そして、この解析結果から将来的に LHC から SLHC へとアップグレードした場合に発見できるヒッグス粒子の数を見積もることができたが、それにより参考となる値となった。

4.2 今後の課題

本研究では、ヒッグス粒子の質量 $m_H = 170\text{GeV}$ 、自己結合定数 $\lambda = 1.0$ のときの解析を行った。次の段階として、質量や自己結合定数を変えたときにどのような変化が見られるのかは検証すべき点である。質量は $150\text{GeV} \sim 200\text{GeV}$ まで 10GeV ごとに変化させたデータを生成しており、これらの解析を進めることができる。また、自己結合定数についてであるが、ヒッグス自己結合では結合定数が強くなっても生成断面積が単純に増えるわけではないことが知られている (Fig.4.1)。これらによる影響を見るためにも、自己結合定数を 0.0 から 4.0 まで 0.5 ごとに変化させて比較することは今後必要となる。

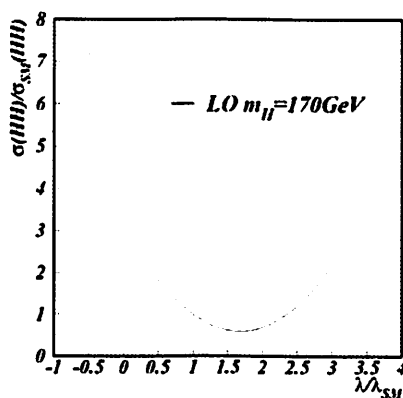
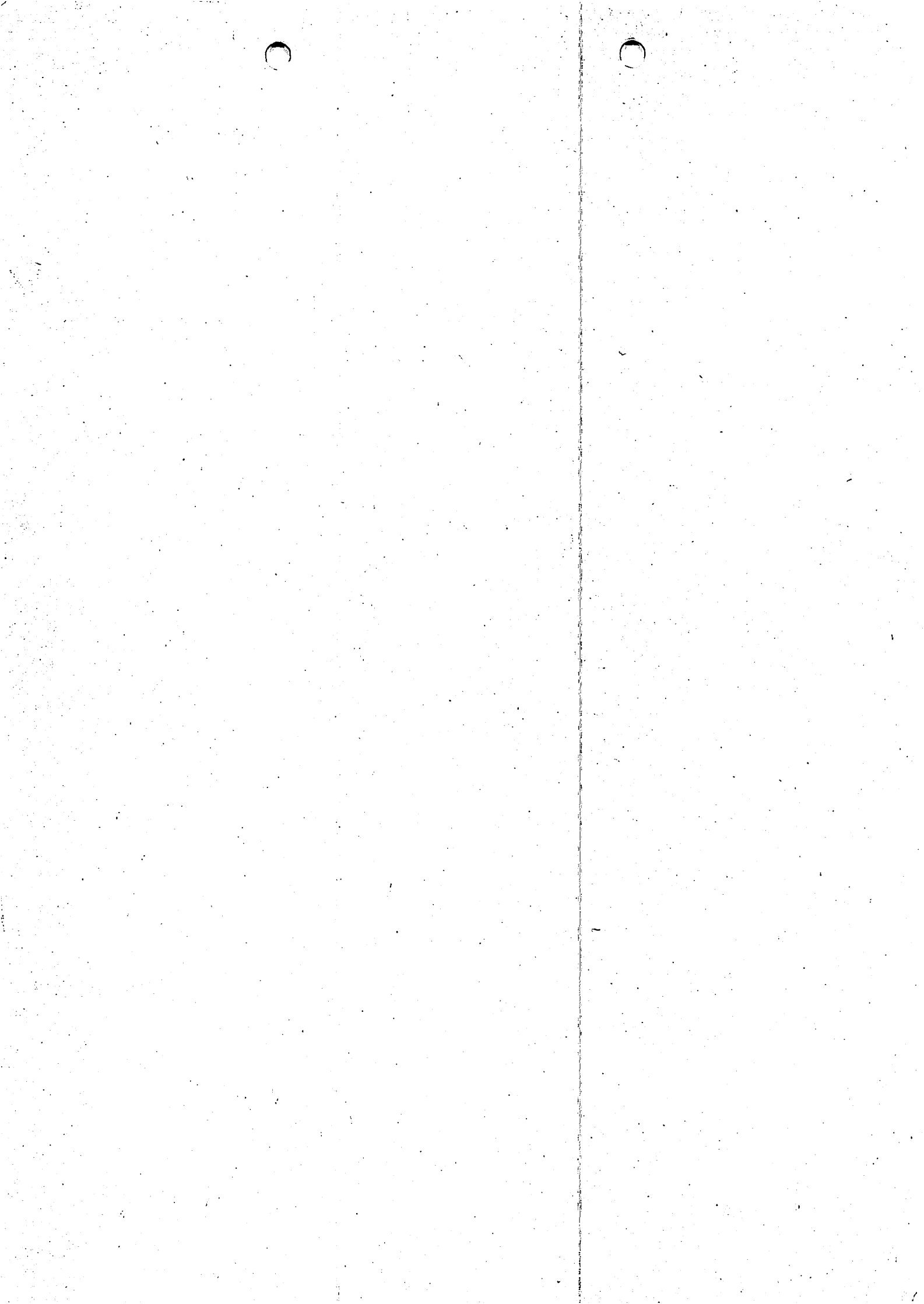


Fig. 4.1: ヒッグス自己結合の結合定数と断面積



謝辞

本研究を行うにあたり、この物理解析の機会を与えてくださり、解析手法について多くの指導・助言をしてくださった、KEKの東城順治先生には本当にお世話になりました。解析について分からないことばかりだった頃から少しずつでも続けることができました。そして、この研究グループの取り仕切りでもあり、解析の基礎から多くの指導を頂いたKEKの海野義信先生にも大変感謝しております。東京大学素粒子国際研究センター(ICEPP)の真下先生には、より快適な研究ができるよう莫大なコンピュータ資源を使用させて頂き感謝しております。いつも迅速な対応、メンテナンスをして下さっているおかげで、このフルシミュレーションを実現することができました。研究室で今年度、研究生が一人にならなかったのは学部研究生の北川寛士くんのおかげです。一年という短い間でしたが、共に生活ができ楽しかったです。ありがとう。大学院では、理学科の先生方には授業や日常生活でお世話になりました。特に物理の沖花彰先生、谷口和成先生には教育実践論文でもある副論文について相談に乗って頂いたりと研究面でお世話になりました。そして、論文の内容に関する助言はもちろんのこと、研究や生活など学部時代から3年間に渡って、多大なご指導を頂きました高嶋隆一先生には大変感謝しております。至らない点もありましたが、専門的な内容で非常に多くの経験をさせて頂きました。修士課程での研究生活全てが、私の生活の幅を広げ、豊かにしてくれるものであったと感じています。本当にありがとうございました。

参考文献

- [1] *PYTHIA 6.4 Physics and Manual*, 2006.
- [2] A.Clark A.Blondel and F.Mazzucato. Studies on the measurement of the SM Higgs self-couplings. *ATL-PHYS*, 2002.
- [3] G. Azuelos, et al. Impact of energy and luminosity upgrades at LHC on the physics program of ATLAS. *J. Phys.*, Vol. G28, pp. 2453–2474, 2002.
- [4] U. Baur, T. Plehn, and David L. Rainwater. Determining the Higgs boson selfcoupling at hadron colliders. *Phys. Rev.*, Vol. D67, p. 033003, 2003.
- [5] U. Baur, T. Plehn, and David L. Rainwater. Probing the Higgs selfcoupling at hadron colliders using rare decays. *Phys. Rev.*, Vol. D69, p. 053004, 2004.
- [6] Ulrich Baur, Tilman Plehn, and David L. Rainwater. Measuring the Higgs boson self coupling at the LHC and finite top mass matrix elements. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 89, p. 151801, 2002.
- [7] S. Dawson, S. Dittmaier, and M. Spira. Neutral Higgs-boson pair production at hadron colliders: QCD corrections. *Phys. Rev.*, Vol. D58, p. 115012, 1998.
- [8] Abdelhak Djouadi. The Anatomy of electro-weak symmetry breaking. I: The Higgs boson in the standard model. *Phys. Rept.*, Vol. 457, pp. 1–216, 2008.
- [9] (ed.) Evans and (ed.) Bryant. LHC Machine. *JINST*, Vol. 3, p. S08001, 2008.
- [10] C. Amsler et al. (Particle Data Group). the 2008 review of particle physics. *Physics Letters B667*, 2008.
- [11] F. Gianotti, et al. Physics potential and experimental challenges of the LHC luminosity upgrade. *Eur. Phys. J.*, Vol. C39, pp. 293–333, 2005.
- [12] Fulvio Picinini Michelangelo L. Mangano and Antonio D.Polosa et al. ALPGEN, a generator for hard multiparton processes in hadronic collisions. *SISSA/ISAS*, 2003.
- [13] T. Plehn, M. Spira, and P. M. Zerwas. Pair Production of Neutral Higgs Particles in Gluon–Gluon Collisions. *Nucl. Phys.*, Vol. B479, pp. 46–64, 1996.
- [14] G. Aad The ATLAS Collaboration, et al. The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider. *JINST*, Vol. 3, p. S08003, 2008.

- [15] 長島順清. 朝倉物理学大系 6 「高エネルギー物理学の発展」. 朝倉書店, 1999.
- [16] 真木晶弘. パリティ物理学コース 高エネルギー実験. 丸善株式会社, 1997.
- [17] 林 浩一 牧二郎. パリティ物理学コース 「素粒子物理」. 丸善株式会社, 1995.