^{修士学位論文} ATLAS 実験における 2ジェットトポロジーの研究

武市祥史

東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専攻 浅井研究室

平成22年1月

概要

欧州原子核研究機構 (CERN)の大型陽子陽子衝突型加速器 (LHC) で ATLAS 実験が 2009 年より開始された。LHC では重心系衝突エネルギーが 14TeV という世界最高エネルギーを持つ加速器であり、ヒッグス粒子、超対称性 粒子 (SUSY 粒子) などの新たな物理現象の発見が期待されている。SUSY 粒子の発見された場合、実験初期でスクォークの質量の特定を目指すた め、本論文ではモンテカルロシミュレーションを用いて、重心系エネル ギーが 10TeV で積算ルミノシティー 10fb⁻¹ でのスクォークの発見能力を 論じる。その際、モンテカルロにはいくつかの不定性があるので、その 大きさを見積もった。また、モンテカルロの不定性をできるだけさけるた め、実験データからバックグラウンドの大きさを見積もる研究を行った。 バックグラウンド見積もりの不定性を含めて、スクォークの発見能力を見 積もった。解析の結果、ATLAS では重心系エネルギー 10TeV,積算ルミノ シティ10fb⁻¹ で m(q) ~ 770GeV のスクォークの発見が可能であることが わかった。

目次

| 概要 | | i |
|---|---|--|
| 第1章 | 序論 | 1 |
| 1.1 | 標準理論 | 1 |
| 1.2 | 大統一理論と超対称性粒子 | 2 |
| 第2章 | LHC 加速器と ATLAS 検出器 | 5 |
| 2.1 | LHC について | 5 |
| 2.2 | ATLAS 検出器について | 6 |
| | 2.2.1 マグネットシステム | 7 |
| | 2.2.2 内部飛跡検出器 | 8 |
| | 2.2.3 カロリメータ | 9 |
| | 2.2.4 電磁カロリメータ | 9 |
| | 2.2.5 ハドロンカロリメータ | 11 |
| | 2.2.6 ミューオンスペクトロメータ | 12 |
| | 2.2.7 トリガー | 12 |
| | | |
| 第3章 | 検出器シミュレーションと再構成 | 14 |
| 第3章 3.1 | 検出器シミュレーションと再構成 Full シミュレーション | 14 14 |
| 第3章 3.1 | 検出器シミュレーションと再構成 Full シミュレーション | 14 14 14 |
| 第3章 3.1 | 検出器シミュレーションと再構成1Full シミュレーション13.1.1Lepton の再構成3.1.2Jet の再構成 | 14 14 14 15 |
| 第3章 3.1 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 1 3.1.1 Lepton の再構成 1 3.1.2 Jet の再構成 1 3.1.3 missing E _T 1 | 14 14 14 15 16 |
| 第3章 3.1 第4章 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 1 3.1.1 Lepton の再構成 1 3.1.2 Jet の再構成 1 3.1.3 missing E _T 1 LHC における超対称性粒子 1 | 14 14 14 15 16 17 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 1 3.1.1 Lepton の再構成 1 3.1.2 Jet の再構成 1 3.1.3 missing E _T 1 LHC における超対称性粒子 1 超対称性のモデル 1 | 14 14 14 15 16 17 17 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 1 3.1.1 Lepton の再構成 1 3.1.2 Jet の再構成 1 3.1.3 missing E _T 1 LHC における超対称性粒子 1 超対称性のモデル 1 4.1.1 SUSY 粒子の生成 1 | 14 14 15 16 17 17 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 3.1.1 Lepton の再構成 1 3.1.2 Jet の再構成 Jet の再構成 1 J.1.3 missing E _T LHC における超対称性粒子 1 超対称性のモデル 1 4.1.1 SUSY 粒子の生成 4.1.2 SUSY 粒子の崩壊 | 14 14 14 15 16 17 17 18 19 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 1 3.1.1 Lepton の再構成 1 3.1.2 Jet の再構成 1 3.1.3 missing E _T 1 LHC における超対称性粒子 1 超対称性のモデル 1 4.1.1 SUSY 粒子の生成 1 4.1.2 SUSY 粒子の崩壊 1 4.1.3 SUSY 粒子の発見モード 1 | 14 14 14 15 16 17 17 18 19 20 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 3.1.1 Lepton の再構成 3.1.2 Jet の再構成 1 3.1.3 missing E _T 1 LHC における超対称性粒子 1 超対称性のモデル 1 4.1.1 SUSY 粒子の生成 1 4.1.3 SUSY 粒子の発見モード 1 SUSY の発見に用いられる物理量 1 | 14 14 14 15 16 17 17 18 19 20 21 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 4.2 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 1 3.1.1 Lepton の再構成 1 3.1.2 Jet の再構成 1 3.1.3 missing E _T 1 LHC における超対称性粒子 1 超対称性のモデル 1 4.1.1 SUSY 粒子の生成 1 4.1.2 SUSY 粒子の崩壊 1 4.1.3 SUSY 粒子の発見モード 1 SUSY の発見に用いられる物理量 1 4.2.1 MissingEt 1 | 14 14 15 16 17 17 18 19 20 21 21 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 4.2 | 検出器シミュレーションと再構成 1 Full シミュレーション 3.1.1 Lepton の再構成 3.1.2 Jet の再構成 1 3.1.3 missing E _T 1 LHC における超対称性粒子 1 超対称性のモデル 1 4.1.1 SUSY 粒子の生成 1 4.1.2 SUSY 粒子の発見モード 1 SUSY の発見に用いられる物理量 1 4.2.1 MissingEt 1 | 14 14 15 16 17 18 19 20 21 21 22 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 4.2 | 検出器シミュレーションと再構成Full シミュレーション3.1.1 Lepton の再構成3.1.2 Jet の再構成3.1.3 missing ETLHC における超対称性粒子超対称性のモデル4.1.1 SUSY 粒子の生成4.1.2 SUSY 粒子の崩壊4.1.3 SUSY 粒子の発見モードSUSY の発見に用いられる物理量4.2.1 MissingEt4.2.2 Jet4.2.3 Effective mass | 14 14 15 16 17 17 18 19 20 21 21 22 22 |
| 第3章 3.1 第4章 4.1 4.2 | 検出器シミュレーションと再構成1Full シミュレーション3.1.1Lepton の再構成13.1.2Jet の再構成3.1.3missing E_T LHC における超対称性粒子超対称性のモデル4.1.1SUSY 粒子の生成4.1.2SUSY 粒子の発見モードSUSY の発見に用いられる物理量4.2.1MissingEt4.2.3Effective mass4.2.4Transverse Sphericity | 14 14 14 15 16 17 18 19 20 21 22 22 22 22 22 22 22 |

| 4.2.5 lepton | 24 |
|--------------------------------------|--|
| 4.2.6 Transverse mass | 24 |
| シグナルとバックグラウンド | 25 |
| SUSY シグナル | 25 |
| バックグラウンド | 26 |
| 5.2.1 Top pair process | 26 |
| 5.2.2 W + jet process | 26 |
| 5.2.3 Z + jet process | 26 |
| 5.2.4 QCD process | 27 |
| 5.2.5 ジェネレーター | 27 |
| 5.2.6 MLM matching | 27 |
| 2jet analysis | 29 |
| motivation | 29 |
| イベントセレクション | 30 |
| 6.2.1 multi-jet analysis のイベントセレクション | 30 |
| 6.2.2 2jet analysis のイベントセレクション | 31 |
| SignificanceのmET cut 特性 | 33 |
| 発見能力 | 34 |
| バックグラウンド | 35 |
| バックグラウンドの不定性 | 36 |
| 6.6.1 バックグラウンドの不定性 | 36 |
| バックグラウンドの評価 | 41 |
| 1 lepton モード | 41 |
| 7.1.1 M_T 法について | 42 |
| 7.1.2 BGの評価 | 43 |
| 0 lepton mode | 45 |
| 7.2.1 BGの評価 | 48 |
| cross-section の見積もり | 54 |
| まとめ | 57 |
| | 58 |
| Jet のエネルギースケールについて | 58 |
| | 60 |
| | 4.2.5 lepton 4.2.6 Transverse mass シグナルとバックグラウンド SUSY シグナル パックグラウンド 5.2.1 Top pair process 5.2.2 W + jet process 5.2.3 Z + jet process 5.2.4 QCD process 5.2.5 ジェネレーター 5.2.6 MLM matching 2jet analysis motivation イベントセレクション 6.2.1 multi-jet analysis のイベントセレクション 6.2.1 multi-jet analysis のイベントセレクション 6.2.1 multi-jet analysis のイベントセレクション Significance の mET cut 特性 発見能力 パックグラウンドの不定性 6.6.1 バックグラウンドの不定性 7.1.1 Mr 法について 7.1.2 BG の評価 0 0 lepton mode 7.2.1 BG の評価 0 0 lepton mode 7.2.1 BG の評価 0 Jet のエネルギースケールについて 7.2.1 |

iii

図目次

| 1.1 | 標準理論の粒子1 |
|------|-------------------------------------|
| 1.2 | 超対称性粒子 2 |
| 1.3 | GUT スケールにおける力の統一 3 |
| 2.1 | LHC 加速器 |
| 2.2 | CMS |
| 2.3 | ALICE |
| 2.4 | LHCb |
| 2.5 | ATLAS 検出器全体図 7 |
| 2.6 | magnet system 磁場の様子 8 |
| 2.7 | 内部飛跡検出器 9 |
| 2.8 | カロリメータ |
| 2.9 | 電磁カロリメータ 10 |
| 2.10 | タイルカロリメータ 11 |
| 4.1 | SUSY 粒子の生成 18 |
| 4.2 | SUSY 粒子の崩壊 19 |
| 4.3 | \tilde{chi} の崩壊 |
| 4.4 | SUSY 発見に用いる物理量,mET 21 |
| 4.5 | Meff & Msusy 23 |
| 4.6 | SUSY 発見に用いる物理量,St 23 |
| 4.7 | SUSY 発見に用いる物理量,Mt 24 |
| 5.1 | Matrix Element & Parton Shower |
| 6.1 | Multi-jet となるイベント 30 |
| 6.2 | 2jet となるイベント 30 |
| 6.3 | ISRJet の eta 分布 33 |
| 6.4 | Cut2の分布 33 |
| 6.5 | 2jet 解析 Olepton モードにおける mET 分布 33 |
| 6.6 | 2jet 解析 1lepton モードにおける mET 分布 33 |
| 6.7 | cut 毎の Significance(Olepton モード) 34 |
| 6.8 | cut 毎の Significance(1lepton モード) |

| 6.0 | 怒目能力 (Olenten モード) | 25 |
|-------------|--|----------|
| 0.9 6 10 | 光兄能力 (diepton モード) ※目能力 (liepton モード) | 25 |
| 6.10 | 光兄能刀 (Thepton $\chi = \Gamma$) | 26 |
| 6.12 | $\frac{1}{2} = \frac{1}{2} $ | 26 |
| 6.12 | nepton モートのハッククラフラント | 20 |
| 0.15 | α_s or λ_s or λ_s . The second | 20 20 |
| 0.14 | Factorization $\wedge \gamma = \gamma \gamma$ | 38 |
| 0.15 | | 40 |
| 6.16 | ハッククフワントの个正性を考慮しに依の光見能力 | 40 |
| 7.1 | 11eptonmodeの mET 分布 | 41 |
| 7.2 | tīのTransverse mass 分布 | 42 |
| 7.3 | M_T 法 | 43 |
| 7.4 | W+ietのMT分布 | 43 |
| 7.5 | SUSY シグナルの MT 分布 | 43 |
| 7.6 | 1lepton モードコントロールサンプルの構成 | 44 |
| 7.7 | 11epton モードの BG 評価 mET | 45 |
| 7.8 | 11epton モードの BG 評価 Meff | 45 |
| 7.9 | Oleptonmode の分布 | 45 |
| 7.10 | Olepton モードコントロールサンプルの構成 | 46 |
| 7 11 | コントロールサンプルと Signal Region | 47 |
| 7.12 | Olenton モード MT 法·W+iet の mET 分布 | 47 |
| 7.13 | Olepton モード MT 法:Z+jetsの mET 分布 | 47 |
| 7.14 | Olepton モード MT 法:Z+jets の評価 | 48 |
| 7 15 | lenton と nu の Pt 分布 | 49 |
| 7 16 | コントロールサンプルの補正方法 | 49 |
| 7 17 | 補正前後の mET 分布 | 50 |
| 7 18 | 評価後の mET 分布 | 50 |
| 7 19 | MC法 | 51 |
| 7 20 | data と MC の比較 | 52 |
| 7.21 | MC 法による評価 | 53 |
| 7.21 | | 55 |
| 8.1 | 評価バックグラウンドと data(0lepton モード) | 54 |
| 8.2 | $\operatorname{xsec}(\operatorname{Olepton} \mathfrak{E} - \mathfrak{F}) \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $ | 56 |
| 8.3 | $\operatorname{xsec}(\operatorname{llepton} \mathfrak{E} - \mathfrak{F}) \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots $ | 56 |
| Λ 1 | Iatのエネルギースケール+50% | 50 |
| A.1 | Ju $-\pi / \pi - \pi / \pi - \pi / \pi - \pi / \pi - \pi / \pi /$ | 50 50 |
| A.2 | J_{0} v_{-} $v_{$ | 50 50 |
| A.3 | JCL $v_{\perp} + v_{\nu} + - \lambda / - \nu + 3\%$ | 50 50 |
| A.4 | $J \subset V \to T / T = A / T = N - 3 \% \dots \dots$ | 38 |

v

表目次

| 2.1 | LHC の主なビームパラメータ | 6 |
|-----|--|----|
| 2.2 | ミューオンスペクトロメータの主なパラメータ | 12 |
| 2.3 | レベル1トリガーメニュー | 13 |
| 5.1 | Bulk Point の主なパラメータ | 25 |
| 5.2 | Bulk Point の主な質量 | 25 |
| 5.3 | 作成した SUSY 粒子 | 26 |
| 6.1 | バックグラウンドの不定性 (0 lepton モード missingE _T cut = | |
| | 400) | 39 |
| 6.2 | バックグラウンドの不定性(1lepton モード missingE _T cut = | |
| | 300) | 39 |
| 8.1 | 0lepton モード:検出効率 | 55 |
| 8.2 | 0lepton モード:cross-section の算出 | 55 |
| 8.3 | 1lepton モード:cross-section の算出 | 56 |

第1章 序論

1.1 標準理論

素粒子物理学では図 1.1 のように、標準理論 (Standard Model) と呼ばれ る理論体系がある。この理論体系は低エネルギー領域で自己矛盾のないも のとされている。標準理論は、スピン 1/2 をもつクォークとレプトンから なる物質の構成要素と素粒子間の力を媒介するゲージ粒子によって形成さ れる。ゲージ粒子はグルーオン、フォトン、W およびZ ボソンと呼ばれる スピン 1 の粒子であり、それぞれ、強い相互作用、電磁相互作用、弱い相 互作用を説明する。このうち、電磁相互作用と弱い相互作用は Weinberg, Salam, Glashow によって電弱理論 (Electroweak Theory) として統一された。 また、強い相互作用はカラー荷を源とする量子色力学 (Quantum Choromo Dynamics,QCD) によって説明される。電弱理論では重いゲージ粒子 (W,Z) を理論的に取り入れてくり込み可能な理論を構成するために、ヒッグス場 を導入した。これにより、新たなスカラー粒子であるヒッグス粒子が理論 的に予想され、CERN の加速器 LHC で発見されることが期待されている。



図 1.1: クォーク、レプトン、ゲージボソン、ヒッグス粒子からなる。

1.2 大統一理論と超対称性粒子

電弱相互作用が統一された現在、次は強い相互作用との統一を考えるの がもっとも自然なテーマであるといえる。これを大統一理論 (Grand Unifies Theory, GUT) という。3つの力が統一されるスケールはおよそ 10¹⁶GeV の スケールである。

そして、この大統一性を間接に示唆するものが超対称性 (SUSY) である。 超対称性はボーズ粒子とフェルミ粒子を交換する最も基本的な対称性であ り、超対称性理論では図 1.2 のように、標準理論の粒子とスピンが 1/2 だ け異なるスーパーパートナーが存在する。もし超対称性が完全な対称性 ならば、その 2 つのパートナーは同じ質量を持つが、現実にはそのよう なパートナーはまだ見つかってはいないので、何らかの理由で対称性が破 れていると考えられている。超対称性粒子の質量は O(TeV) ほどの質量を もっていると考えられており、その時、図 1.3 が示すように、3 つの結合 定数は GUT スケールで一致する。



図 1.2: スピン 1/2 違う超対称性粒子



図 1.3: 超対称性を仮定した大統一理論では 10¹⁶GeV で 3 つの力が統一 する。

O(TeV)の領域の SUSY の存在が期待される理由として、以下が挙げられる。

1. 階層問題

GUT スケール (10^{16} GeV) やプランクスケール (10^{19} GeV) から電弱ス ケール (10^{2} GeV) を自然につくれるかという問題である。素粒子論 的にこのような高いエネルギーからいかに自然に電弱スケールを導 きだすかが問題になる、仮に SUSY を仮定、SUSY 粒子のスケール が TeV オーダーであると、top クォークの Yukawa 結合の働きによ り自然に電弱スケールをつくることができる。

2. ファインチューニング

$$m_h^2 = m_h^2(tree) + O(\Lambda^2) \tag{1.1}$$

は輻射補正を考慮した場合の Higgs 粒子の質量 m_h を切断パラメー タ Λ の 2 乗に比例する項で表した式である。左辺の Higgs 粒子の質 量は EW スケールであるのに対し、 Λ は一般に GUT スケールであ る。よって、GUT スケールから EW スケールを導く微調整が必要に なり、自然ではないという問題である。SUSY ではスーパーパート ナーを入れることによって、スーパーパートナーのループによって 質量の発散を打ち消すことができるため、カットオフ Λ^2 の 2 乗発 散が SUSY スケールから *log*Λ の発散に変わる。もし SUSY の存在 するスケールが大きすぎると2乗の発散の効果が大きくなり、ファ インチューニングの問題が解決しない。したがって、SUSY 粒子の 質量は数 TeV 程度であると予想されている。

3. ダークマターの候補

SUSY の最も軽い粒子 (lightest supersymmetric particle, LSP) はダー クマターの有力な候補である。TeV スケールの SUSY はちょうどよ い量のダークマターを予言している。

第2章 LHC加速器とATLAS検出器

ここではLargeHadronCollider(LHC)とATLAS検出器について説明する。

2.1 LHC について



図 2.1: LHC 加速器

LHC(Large Hadron Collider) はスイスとフランスの国境付近地下 100m にある CERN(欧州合同原子核研究機構)の大型陽子陽子衝突型加速器である。図 3.1 に LHC の全体図を示す。

表 2.1 に LHC 加速器の主なパラメータを示す。重心系衝突エネルギーは 14TeV に達する。デザインルミノシティは 10^{34} cm⁻² sec⁻¹ である。

表 2.1: LHC の主なビームパラメータ

| 主リング周長 | 26.6km | 重心エネルギー (陽子 + 陽子) | 7.0 TeV + 7.0 TeV |
|-----------|-----------------------|-------------------|-------------------|
| バンチ数 | 2808 | 入射エネルギー | 450GeV |
| 1バンチ内の粒子数 | 1.15×10^{11} | バンチの長さ | 7.55cm |
| バンチ衝突頻度 | 40.08MHz | バンチ間隔 | 24.95ns |
| 衝突点のビーム半径 | 16µm | 衝突角度 | 200µrad |

また、LHC には主に4つの実験があり、本論文で述べる ATLAS の他に CMS、ALICE、LHCb と呼ばれる検出器が設置されている (図 2.2, 図 2.3, 図 2.4)。



図 2.2: CMS 図 2.3: ALICE

図 2.4: LHCb

2.2 ATLAS 検出器について

ATLAS 検出器は、LHC における汎用検出器の1つで、図2.5 のような 直径25m、長さ44m、操縦長は7,000t という巨大な円筒形の検出器であ る。検出器は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、ミューオンスペクトロメータから構成されている。また、内部 飛跡検出器と電磁カロリメータの間に2T のソレノイドマグネット、ハド ロンカロリメータとミューオンスペクトロメータの間に3つのトロイダル マグネットがある。

ATLAS での座標の取り方は、X 軸がLHC の中心方向を向き、Y 軸を垂直 上向き、Z 軸をビームパイプに沿った向きで右手系としている。また、円 座標 ($R = \sqrt{x^2 + y^2}, \phi, \theta$) から、

$$\eta = -\ln(tan(\frac{\theta}{2})) \tag{2.1}$$

で表される η を使い、(R, ϕ, θ)を一般的に用いている。ATLAS 検出器は barrel 領域 ($|\eta| < 1.5$)と end-cap 領域 ($1.5 < |\eta|$)の2つの領域に分けられて いる。さらに end-cap 領域は ($1.5 < |\eta| < 1.9$)を end-cap 領域、($|\eta| > 1.9$) を forward 領域と呼ぶこともある。



図 2.5: ATLAS 検出器全体図

2.2.1 マグネットシステム

ATLAS では4つ超伝導磁石システムがある。1つは内部飛跡検出器と カロリメータの間にあるソレノイドマグネット、他の3つはカロリメータ とミューオンスペクトロメータの間にトロイダルマグネットが barrel 領域 に1つと end-cap 領域にそれぞれ1つずつ設置されている。

トロイダルマグネットは8つのコイルがビーム軸に対して8回対象になる ように配置されており、barrel 領域で内径 9.4m 外径 20.1m に位置してお り、全長 25.3m である。また、積分磁場強度 は 2 – 6Tm の磁場をつくる。 end-cap 領域では内径 1.65m 外径 10.7m に位置している。積分磁場強度は 4 – 8Tm である。



図 2.6: magnet system 磁場の様子

2.2.2 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器 (図 2.7 は ATLAS 検出器で最も内側に位置する検出器 である。その構成は内側から pixel 検出器、Semiconductor Tracker (SCT)、 Transition Radiation Tracker (TRT) の3つである。

pixel 検出器は 45.5 < *R* < 242mm, |Z| < 3092mm に位置し、1744 個の pixel モジュールがあり、その 1 つ 1 つに 50 × 400μm² の半導体検出器が 43723 個存在する。そのため高い位置分解能を有し、*R* – φ 方向で 10μm、Z 方向 で 115μm である。

SCT は barrel 領域で 255 < R < 549mm, |Z| < 805mm に位置し、pixel 検出 器と同様に 2 次元の位置情報を与える。SCT は 80 μ m 間隔で並べられた 12cm の strip を ±20 μ m ずらし合わせたもので 1 モジュールをつくってい る。位置分解能は $R - \phi$ 方向で 17 μ m、Z 方向で 580 μ m である。

TRT は barrel 領域で 554 < R < 1082mm, |Z| < 780mm に位置し、直径 4mm の円筒形のドリフトチューブが幾層にも積まれている。TRT を通過する 粒子は最低でも 36 層のドリフトチューブを通るよう設計されている。分 解能は 130 μ m と pixel 検出器や SCT よりは悪いが、track の再構成や遷移 輻射を利用した粒子識別に使用されている。





2.2.3 カロリメータ

カロリメータは粒子のエネルギーや角度の測定を行う。図 2.8 に概略図 を示す。ATLAS におけるカロリメータは電磁カロリメータとハドロンカ ロリメータに分けられる。

2.2.4 電磁カロリメータ

電磁カロリメータでは電子、陽電子、光子のエネルギーおよび角度の測定を行う。電磁カロリメータはアコーディオン構造の鉛吸収体と液体アルゴンからなる検出器である。アコーディオン構造にすることによりφ方向に不感領域を作らないようにしている。テストビームでの electron のエネルギー分解能は electron のエネルギーを *E* として、

$$\frac{\sigma E}{E} = \frac{(10.1 \pm 0.4)\%}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus (0.2 \pm 0.1)\%$$
(2.2)

で表される。第1項は electron の統計的な揺らぎによるサンプリング項、 第2項はキャリブレーションの精度からくる項である。図 2.9 は電磁カロ リメータの構造であり、電磁カロリメータは3層から成っている。1 層目 は η 方向に細かくきられており、位置解能の向上に寄与する。電磁カロ リメータは細分化されており、例えば barrel 部のミドル層では、セグメン テーションが $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.025 \times 0.0245$ となっている。この1単位をセル とする。セグメンテーションは各層で異なるため、セルも各層で異なる大 きさをもつ。



図 2.8: カロリメータ



図 2.9: 電磁カロリメータ

2.2.5 ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータは電磁カロリメータの周りに位置し、Jet のエネ ルギーや角度の測定を行う。barrel 領域のタイルカロリメータ (図 2.10) と end-cap 領域の液体アルゴンカロリメータに分かれる。

タイルカロリメータは吸収体として鉄を用い、タイル状のシンチレーター からなるサンプリングカロリメータである。タイルからの信号は両端か らファイバーを用いて光電子増倍管で測定する。テストビームでのエネル ギー分解能は、



図 2.10: タイルカロリメータ

end-cap 領域の液体アルゴンカロリメータは銅の吸収体と液体アルゴン を用いたサンプリングカロリメータで、銅の内径は 0.475m、外径は 2.03m である。この径はフォワードカロリメータと 0.372m のオーバーラップが ある。テストビームでのエネルギー分解能は、

$$\frac{\sigma E}{E} = \frac{(70.6 \pm 1.5)\%}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus (5.8 \pm 0.2)\%$$
(2.4)

である。フォワードカロリメータは銅およびタングステンの吸収体を用いた液体アルゴンのカロリメータで3.1 < |η| < 4.9 の超前方に設置されている。フォワードカロリメータは3層からなり、衝突点から近い1層目は吸収体に銅を使用しており、残りの2層は吸収体にタングステンを使用している。テストビームでのエネルギー分解能は、

$$\frac{\sigma E}{E} = \frac{(94.2 \pm 1.6)\%}{\sqrt{E/\text{GeV}}} \oplus (7.5 \pm 0.4)\%$$
(2.5)

である。

2.2.6 ミューオンスペクトロメータ

ミューオンは ATLAS の最も外側にある Muon Spectrometer で測定を行 う。ミューオンスペクトロメータには運動量の精密測定を行う MDT(Muon Drift Tube)、CSC(Cathode Strip Chamber) とレベル1トリガーの役割を果 たす RPC(Resistive Plate Chamber)、TGC(Thin Gap Chamber)の4種類の 検出器で構成されている。表 2.2 にミューオンスペクトロメータの主なパ ラメータについてまとめる。

| 表 2.2: | ミュー | -オンス・ | ペクト | 、ロメー | タの主なパラ | ラメータ |
|--------|-----|-------|-----|------|--------|------|
|--------|-----|-------|-----|------|--------|------|

| 検出器 | MDT | MDT CSC | | TGC |
|-----------|--------------------------|--------------------|-----------------|------------------------|
| Coverange | Coverange $ \eta < 2.7$ | | $ \eta < 1.05$ | $1.05 < \eta < 12.7$ |
| チェンバー数 | 1088(1150) | 32 | 544(606) | 3588 |
| チャンネル数 | チャンネル数 339000(354000) | | 359000(373000) | 318000 |
| Function | Precision tracking | Precision tracking | Triggering | Triggering |

2.2.7 トリガー

LHC では最高ルミノシティでの運転が行われると衝突頻度がイベント レートは 10⁹Hz にまで達する。1 イベントで 1.5MB 程度のデータサイズ になると見積もられるため、資源の有効活用の点からもデータ収集レート を下げる必要がある。ATLAS ではレベル 1 トリガーとレベル 2 トリガー およびイベントフィルターを用いて 200Hz 程度にイベントレートを落と している。

レベル1トリガー

カロリメータやミューオンスペクトロメータによってトリガーをかける。 検出器の情報が2.5µsの間保持されるため、その間にトリガーを判定する。 トリガーが掛かるとまず信号を Derandomizers に送る。Deran domizers は 一定時間信号を保持し、Read Out Driver(ROD) へ信号を送る。この時に Bunch Crossing ID(BCID) も ROD に送られる。トリガーの条件を表 2.3 に 示す。

| trigger | | Rate(kHz) |
|-------------|--|-----------|
| EM18I | IsolatedEMcluster(> 18GeV) が1つ以上 | 12.0 |
| 2EM11I | IsolatedEMcluster(> 11GeV) が2つ以上 | 4.0 |
| MU20 | Muon(> 20GeV) が1つ以上 | 0.8 |
| 2MU6 | <i>Muon</i> (> 6GeV)が2つ以上 | 0.2 |
| J140 | Jet(> 140GeV) が1つ以上 | 0.2 |
| 3J60 | Jet(> 60GeV) が 3 つ以上 | 0.2 |
| 4J40 | <i>Jet</i> (> 40GeV) が 4 つ以上 | 0.2 |
| J36+XE60 | Jet(> 36GeV) が 1 つ以上かつ 星 _T > 50GeV | 0.4 |
| Tau16I+XE30 | <i>Tau</i> (> 16GeV) が 1 つ以上かつ <i>E</i> _T > 30GeV | 2.0 |
| MU10+EM11I | <i>Muon</i> (> 10GeV) が1つ以上かつ | 0.1 |
| | <i>IsolatedEMcluster</i> (> 11GeV)が1つ以上 | |
| Other | | 5.0 |

表 2.3: レベル1トリガーメニュー

レベル2トリガー

レベル2トリガーはイベントレートを数 kHz まで落とすために用いら れる。レベル1トリガー条件から Region of Interest(ROI) と呼ばれる領域 のみの情報を用いる。

イベントフィルター

イベントフィルターはレベル2トリガーに掛かったイベントに対し検出 器全体の情報を用いて判定を行う最終段階のトリガーでイベントレートを 数 100Hz まで落とす。

第3章 検出器シミュレーションと再 構成

ここでは、検出器シミュレーションと事象を再構成について、ATLAS の解析フレームワークに基づき説明する。検出器シミュレーションには、 Geant4 シミュレーションを用いて検出器のジオメトリや物質量などを正 確に再現した Full シミュレーションと、ジェネレータの情報を Full シミュ レーションの結果に合うようにスメアリングする Fast シミュレーション (Atlfast) がある。

ここでは、本研究で用いた Full シミュレーションについて述べる。

3.1 Full シミュレーション

Fullシミュレーションは次の4行程に分けられる。

- 1. イベント生成イベントジェネレータを用いて、粒子情報を生成する。
- 2. Geant4 シミュレーションジェネレータの生成した粒子が検出器にど れだけのエネルギーを落とすかを Geant4 によって計算する。
- 3. ディジタイゼーション Geant4 シミュレーションで計算されたエネル ギーから、検出器がどれくらいの出力を出すかを計算する。
- 4. 再構成検出器の情報を基に、jetや lepton などの事象を再構成する。

3.1.1 Lepton の再構成

Electron の再構成は電磁カロリーメタを用いる。まずセル単位で $\Delta \eta \times \Delta \phi = 3 \times 7$ の EM クラスターを作る。その後、7×7セルから成るクラス ターを電磁クラスターと定義し、電磁クラスターに対して以下のカットを かけることによって行われる。

 ハドロンカロリメータへの漏れが無い Electron はほとんどのエネル ギーを電磁カロリメータに落とすため、ハドロンカロリメータへの エネルギーの漏れがないことを要求する。電磁カロリメータの2層 目の EM クラスター (3×7セル)の \mathcal{E}_T を \mathcal{E}_T^{EM2} とし、ハドロンカロ リメータの 1 層目の \mathcal{E}_T を \mathcal{E}_T^{H1} とした場合の $\mathcal{E}_T^{H1}/\mathcal{E}_T^{EM2}$ を計算し、 ある閾値以下であることを要求する。

- ・ シャワーのシェイプが細い Electron のシャワーはハドロンのシャワー に比べて細いため、シャワーのシェイプが細いことを要求する。シャ ワーのシェイプは電磁カロリメータの2層の $\eta \times \phi = 3 \times 7 \times 100$ [] 比とし、閾値を超えないことを要求する。
- トラックとのマッチングトラックが電磁クラスターの近くにあり、 さらに E/Pが1に近いことを要求する。デフォルトでは、π[±]との 区別のため E/Pが0.7~4を要求している。
- Isolation Jet と区別するために、electron の周りにエネルギーが落と されていないことを要求する。b クォークや c クォークのセミレプト ニックディケイからの electron と $\pi^{\pm} \rightarrow e^{-}e^{+}\gamma$ は崩壊による electron は周辺にハドロンからのエネルギーがあるために、isolation を要求 することで区別することができる。

Electron は photon が対生成で e^-e^+ を作り、その片方がソフトだった場合 や、 π^0 からの photon が同じ方向に飛び、E/P が 1 に近かった場合など、 fake として間違って同定される。fake で jet を electron と同定される確率 はおよそ 10⁻⁴ である。

Muonの再構成はミューオンスペクトロメータと内部飛跡検出器のトラックとのマッチングによって行われる。よって、muon は isolation をせずに 再構成を行うことができる。しかし、b クォークのセミレプトニックディ ケイからの muon との区別の際には isolation が必要になる。muon の fake としては π^{\pm} がカロリメータの前で崩壊し、muon を出す場合がある。fake で jet を muon と同定する確率は 10⁻⁴ 程度である。

3.1.2 Jet の再構成

Jet の再構成には、カロリメータの情報を用いて行う。 クラスタリングについては、カロリメータを $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.1 \times 0.1$ の領域に 区切り、全ての奥行き方向のカロリメータのセルを足し合わせたタワーを と呼ばれるクラスターを作る。

このクラスターに再構アルゴリズムを適用する。ATLAS では Cone アルゴリズムを用いている。Cone アルゴリズムは、まず 2GeV 以上の横方向エネルギー E_T をもつクラスターを seed として選ぶ。seed を中心に $\Delta R < 0.4$

もしくは 0.7 の cone の中にあるクラスターを足し合わせ jet のエネルギー とする。もし jet が重なった場合、共有するエネルギーが 50% 以上かどう かで jet を重ね 1 本の jet にするかを決める。

3.1.3 missing E_T

missing E_T の計算方法はセルベースで行われる。

$$E_X = -\left(\sum E_X^{cell} + \sum E_X^{cryostat} + \sum E_X^{muon}\right)$$
(3.1)

$$\mathbf{E}_T = \sqrt{\mathbf{E}_X^2 + \mathbf{E}_Y^2} \tag{3.3}$$

と missing E_T は計算される。

式 3.1,3.2 の右辺はそれぞれセルのエネルギー、cryostat の補正、muon のエ ネルギーを表している。 \mathbf{E}^{cell} は noise に対して 2σ を超えたものの和として いる。 $\mathbf{E}^{cryostat}$ はハドロンがカロリメータに到達するまでのエネルギーロ スの補正をした値である。 \mathbf{E}^{muon} は muon が MIP であるためにカロリメー タでほとんどエネルギーを落とさないため、ミューオンスペクトロメータ を用いて muon のエネルギーを計算している。

第4章 LHCにおける超対称性粒子

本性では本論文のメインテーマである超対称性粒子の性質とそのモデ ル、質量、崩壊モードなどについて説明する。

4.1 超対称性のモデル

パートナーと同じ質量を持つ SUSY 粒子は発見されていないことから この対称性は破れている。Hidden Sector と呼ばれる我々の世界とは別の 隠れた世界と何らかの相互作用を通じて、その結果質量が大きくなってい ると考えられる。この Hidden Sector との関わり方によって主に3つのモ デルが存在する。

- つまり、
 - 1. Super Gravity: 破れを伝える機構が重力である
 - 2. Gauge Mediation: 我々の世界の相互作用をもつ messenger sector である
 - 3. Anomaly Mediated SUSY Breaking: 結合ではなく1次の loop で伝 える

である。本論文では、中でも最も一般的とされている Super Gravity モデ ルについて論じる。

SUSY の破れのエネルギースケールが高くても重力の結合は小さいので、 GUT スケールでの SUSY 粒子の質量オーダーは以下の式の程度である。

$$SUSYScale = \frac{(SUSY の破れの Scale)^2}{PlanckScale}$$
 (4.1)

SUSY スケールが数 TeV であると考えられるので、破れのスケールは 10¹¹GeV 程度であると考えられている。

理論的に簡潔な SUSY のモデルでも 124 個のパラメータがあるが、もっ ともらしい仮定を入れてパラメータを5 個に減らしている。このモデルを mSUGRA(minimal Super Gravity) と呼ぶ。

mSUGRA は以下の4個+1個の符号をパラメータにもつ。

- m₀: GUT スケールでの scalar 粒子の共通の質量
- m_{1/2}: GUT スケールでの gaugino の共通の質量
- A: GUT スケールでの Higgs, squark, slepton 間の共通の結合定数 (trilinear coupling)
- tanβ: 2 つの Higgs doublet の真空期待値の比
- sign(µ): Higgsino の質量パラメータの符号

mSUGRA では m₀, m_{1/2}, A はそれぞれのパラメータは粒子によらず統 一されていると仮定している。EW スケールでの SUSY 粒子の質量は、こ れらに輻射補正を加えた値となる。mSUGRA は R パリティが保存すると 仮定する。R パリティは B をバリオン数、L をレプトン数、S をスピンと して、

$$R = (-1)^{3B - L + 2S} \tag{4.2}$$

で与えられる。R パリティの保存は各バーテックスにおいて SUSY の粒子 は対で生成され、SUSY 粒子が崩壊した時は、崩壊先に必ず SUSY 粒子が 含まれることを意味している。

4.1.1 SUSY 粒子の生成

squark, gluino の生成

LHC は陽子陽子加速器なので、図 4.1 のような強い相互作用による $\tilde{g}\tilde{g}$, $\tilde{g}\tilde{q}, \tilde{q}\tilde{q}$ 対生成が生じる。これらの生成断面積は、 \tilde{g}, \tilde{q} の質量に強く依存している。



図 4.1: SUSY 粒子の生成

4.1.2 SUSY 粒子の崩壊



図 4.2: SUSY 粒子の崩壊

生成された \tilde{g} や \tilde{q} は、図 4.2 のように高いエネルギーを持った複数の jet や lepton を放出ながら崩壊する。mSUGRA では R パリティが保存するとしているため、LSP は安定であり、v と同じく検出器に掛からないので消失横運動量 (*missing* E_T) として観測される。

SUSY 粒子の崩壊プロセスは、それらの質量関係によって決まる。

- $m(\tilde{g}) > m(\tilde{q})$ の時、 \tilde{g} は強い相互作用によって直接 \tilde{q} に崩壊する。しかし、 \tilde{q} は \tilde{g} には崩壊することができないため、弱い相互作用によって直接 \tilde{B}, \tilde{W} に崩壊する。
- $m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$ の時、 \tilde{q} は強い相互作用によって直接 \tilde{g} に崩壊する。しかし、 \tilde{g} は $\tilde{g} \rightarrow q\bar{q}\tilde{B}^{0}, q\bar{q}\tilde{W}^{\pm}, q\bar{q}\tilde{W}^{0}$ に崩壊する。ただし、3体崩壊は $\alpha_{S}\alpha_{EM}\frac{1}{(m_{\pi}^{4})}$ で抑えられる。
- $m(\tilde{g}) \sim m(\tilde{q})$ の時、 $\tilde{g} \rightarrow q\tilde{q}$ が禁止されていても第3世代の \tilde{q} が軽いため、 \tilde{g} の \tilde{t} や \tilde{b} への崩壊が起こる。

 $\tilde{\chi^{\pm}}, \tilde{\chi}^{0}$ の崩壊はパラメータによって異なる。主な崩壊を図 4.3 に示す。



図 4.3: *x*[±], *x*⁰の崩壊

- I の領域では、 $m(\tilde{\chi}_2^0), m(\tilde{\chi}_1^{\pm}) > m(\tilde{l}^{\pm})$ となり、 $\tilde{\chi}_2^0$ が \tilde{l} を通して $\tilde{\chi}_2^0 \rightarrow l\tilde{l} \rightarrow \tilde{\chi}_1^0 ll$ のように2段階で崩壊する。そのため、この領域では lepton が多く出る。
- II の領域では、 $m(\tilde{\chi}_{2}^{0}) m(\tilde{\chi}_{1}^{0}) > m(h)$ となり、 $\tilde{\chi}_{2}^{0} \to \tilde{\chi}_{1}^{0}h$ のようにヒッ グスが大量に生成される。ヒッグスはほとんど $h \to bb$ の崩壊をす る。この 2 つの b クォーク起源の jet を組めばヒッグスの質量を再構 成することができる。
- III の領域では、 $m(h) > m(\tilde{\chi}_2^0) m(\tilde{\chi}_1^0) > m(Z)$ となり、 $\tilde{\chi}_2^0 \to \tilde{\chi}_1^0 Z$ のように Z が大量に生成される。一方、 $\tilde{\chi}_1^{\pm} \mathrel{ th } \tilde{\chi}_1^{\pm} \to \tilde{\chi}_1^0 W^{\pm}$ と崩壊する。
- IV の領域では、 $m(W,Z) > \tilde{\chi}_2^0 \tilde{\chi}_1^0 \ge table b$ 、 $\tilde{\chi}_2^0 \to \tilde{\chi}_1^0 ff \ge \tilde{\chi}_1^{\pm} \to \tilde{\chi}_1^0 ff \ge h$ と崩壊する。

4.1.3 SUSY 粒子の発見モード

SUSY 粒子の発見モードは lepton の数によって以下のように分けている。なお lepton の定義は 4.2 節で述べる。

- Olepton モード *Isolated lepton(e,µ)*が0本のモード。シグナルの分岐 比が大きくなるがバックグラウンドも大きくなる。
- 1lepton モード *Isolated lepton(e,µ)*が1本のモード。0lepton モード に比べ、バックグラウンドを少なくすることができるが、シグナル も減る。
- 2lepton モード *Isolated lepton(e,µ)*が2本のモード。さらに lepton の 電荷の組み合わせによって、Same Sign(SS) と Opposite Sign(OS) の 2つに分けられる。

本論文では Olepton モードと 1lepton モードの 2 つのモードについて発見能力等を検証する。

4.2 SUSY の発見に用いられる物理量

ここで SUSY 粒子の発見のための一般的に用いられている物理量の説 明をする。

4.2.1 MissingEt

前節で述べた崩壊プロセスの特徴は多段階崩壊+検出されないLSPであることから、SUSYのイベントは大きな missingE_T が発生することがわかり、バックグラウンドと区別するための物理量である。

SUSY 粒子は、図4.4 に示すように、バックグラウンドより大きな missing E_T が観測される。



図 4.4: SUSY シグナルとバックグラウンドの E_T 分布

4.2.2 Jet

Jet は $P_T > 20$ GeV, $|\eta| < 2.5$ を満たすものを Jet と定義する。

4.2.3 Effective mass

Effective mass(M_{eff}) と呼ばれる物理量を使用する。 M_{eff} は以下の式で 定義される。

$$M_{eff} = \sum |P_{T_{jet}}| + \not\!\!E_T \tag{4.3}$$

また、SUSY の質量 (M_{SUSY}) として、 $\tilde{g} \geq \tilde{u}_R$ の軽い方の粒子の質量を用いると、

$$M_{SUSY} = min(m(\tilde{g}), m(\tilde{u}_R))$$
(4.4)

はより高頻度で生成される SUSY 粒子の質量スケールを与える。また、 M_{SUSY} が大きくなれば、jet の P_T や missing E_T も大きくなる。そのため、 M_{eff} のピークの値は図 4.5 のように M_{SUSY} に比例する。

4.2.4 Transverse Sphericity

Transverse S phericity (S_T) は jet の $P_X \ge P_Y$ から作られるテンソル S の 固有値 λ_1, λ_2 から以下のように計算される。

$$S = \begin{vmatrix} \sum P_X^2 & \sum P_X P_Y \\ \sum P_X P_Y & \sum P_Y^2 \end{vmatrix}$$
(4.5)

$$S_T = \frac{2\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \tag{4.6}$$

 S_T は jet の分布が球形に近いほど 1 に近く、Back-to-Back に jet が放出 されると 0 の値を取る。

一般に、 \tilde{g}, \tilde{q} の質量は大きいため、あまりブーストされず球形に近い値を取る。

図 4.6 は SUSY シグナル (黒) と QCD バックグラウンド (赤) の S_T 分布の 比較である。比較し易いように、それぞれの総イベント数を 100 イベント でノーマライズしている。図 4.6 のように QCD バックグラウンドの S_T は 小さな値を取りやすい。



図 4.5: Effective mass のピークと M_{SUSY}



図 4.6: SUSY シグナルの QCD バックグラウンドの S_T 分布

4.2.5 lepton

Lepton は $P_T > 10$ GeV, $|\eta| < 2.5$ の e, μ_o さらに、lepton を中心とし、 $\Delta R < 0.2$ の間にエネルギーデポジットが 10GeV 以下であり、Jet との $\Delta R > 0.4$ のものを *Isolated lepton* とする。

4.2.6 Transverse mass

1lepton モードについては横方向質量 *Transverse mass*(M_T)を以下のように定義する。

$$M_T = \sqrt{2\not E_T P_{Tl}(1 - \cos\phi)} \quad (l = Isolated \ e, \mu) \tag{4.7}$$

$$\cos\phi = \frac{P_{Xl}\not\!\!\!E_T + P_{Yl}\not\!\!\!\!E_Y}{\not\!\!\!E_T P_{Tl}} \tag{4.8}$$

図 4.7 は W + *jets*(黒) と SUSY シグナル (黒) の M_T 分布である。比較し 易いようにこれも総イベント数を 100 イベントでノーマライズしている。 W + *jets* は M_W で特徴的なピーク (ヤコビアンピーク) を持つが、SUSY シグナルはフラットな分布を示す。よって、llepton モードでは W + *jets* のバックグラウンドを減らすために *Transverse mass* のカットを採用して いる。



図 4.7: SUSY シグナルの W バックグラウンドの M_T 分布

第5章 シグナルとバックグラウンド

5.1 SUSY シグナル

本論文では、SUSY シグナルとして mSUGRA の Bulk point を基準とした。Bulk point の主なパラメータを表 5.1、主な質量を表 5.2 に示す。

表 5.1: Bulk Point の主なパラメータ

| 表 5.1: Bulk Point の主なパリメータ | | | | | | | | |
|----------------------------|-------------------|-----------------------|--------|------|---|--|--|--|
| パラメータ | $m_0(\text{GeV})$ | $m_{1/2}(\text{GeV})$ | A(GeV) | tanβ | μ | | | |
| 値 | 100 | 300 | -300 | 6 | + | | | |

表 5.2: Bulk Point の主な質量

| SUSY 粒子 | $\tilde{u_L}$ | $	ilde{g}$ | $\tilde{\chi_1^{\pm}}$ | $\tilde{\chi_2^0}$ | $\tilde{\chi_1^0}$ | h_0 |
|----------|---------------|------------|------------------------|--------------------|--------------------|-------|
| 質量 (GeV) | 665.4 | 719.7 | 223.3 | 223.2 | 118.8 | 111.1 |

上記の点から m_0 を変えることによって、squark の質量を ~ 1TeV まで 変化させたイベントを作成した。

Generator は ISAJET+HERWIG を利用した。 作成した点の主な質量を表 5.3 に示す。

| $m_0(\text{GeV})$ | $\tilde{u_L}(\text{GeV})$ | $\tilde{g}(\mathrm{GeV})$ | $\tilde{\chi_1^{\pm}}(\text{GeV})$ | $\tilde{\chi_2^0}$ (GeV) | $\tilde{\chi_1^0}$ GeV | $h_0(\text{GeV})$ | xsec (pb) | $\tilde{q}\tilde{q}$ xsec (pb) |
|-------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|-----------|--------------------------------|
| 50 | 660.4 | 719.0 | 223.0 | 222.8 | 118.6 | 111.11 | 5.72 | 2.2 |
| 100 | 665.4 | 719.7 | 223.3 | 223.2 | 118.8 | 111.1 | 5.44 | 2.2 |
| 300 | 721.6 | 728.9 | 225.2 | 225.2 | 119.8 | 110.9 | 4.0 | 1.4 |
| 350 | 743.4 | 732.1 | 225.8 | 225.7 | 120.0 | 110.8 | 3.62 | 1.2 |
| 400 | 767.0 | 735.2 | 226.4 | 226.3 | 120.2 | 110.8 | 3.23 | 1.0 |
| 450 | 793.0 | 739.1 | 227.0 | 226.8 | 120.5 | 110.8 | 2.89 | 0.8 |
| 500 | 820.9 | 742.9 | 227.5 | 227.4 | 120.7 | 110.7 | 2.59 | 0.7 |
| 550 | 850.7 | 746.7 | 228.1 | 228.0 | 120.9 | 110.7 | 2.30 | 0.6 |
| 600 | 882.2 | 750.2 | 228.7 | 228.5 | 121.2 | 110.6 | 2.08 | 0.5 |
| 650 | 915.2 | 753.7 | 229.4 | 229.2 | 121.4 | 110.7 | 1.87 | 0.4 |
| 700 | 949.5 | 756.9 | 230.0 | 229.9 | 121.6 | 110.6 | 1.68 | 0.3 |
| 750 | 985.5 | 761.0 | 230.5 | 230.3 | 121.8 | 110.6 | 1.54 | 0.2 |

表 5.3: 作成した SUSY 粒子

5.2 バックグラウンド

5.2.1 Top pair process

LHC では top クォークの対生成が頻繁に起こる。Tevatron とは異なり、 LHC では gluon-gluon フュージョンのプロセスが効く。top クォークは b クォークと $W \rightarrow l + v$ に崩壊するため、*multi jet* + *missingE_T* + *lepton* で 1 lepton モードでのバックグラウンドとなる。

5.2.2 W + jet process

LHC では W は valence $2\pi - 2e^{2}$ sea $2\pi - 2e^{2}$ のフュージョンにより生成される。W process も $W \rightarrow l + \nu$ により 1lepton モードでのバックグラウンドになる。また $W \rightarrow \tau + \nu$ に崩壊した場合や、 e, μ のアクセプタンス外イベントで 0 lepton モードのバックグラウンドにもなる。

5.2.3 Z + jet process

ZもWと同様に、valence クォークと sea クォークのフュージョンによっ て生成される。Zは lepton の対になるモードと、neutrino の対になるモー ドがあるが、前者は missing E_T のカットによって τ 対に崩壊するモード以 外は落とされる。後者は 0 lepton モードの主要なバックグラウンドになる。

5.2.4 QCD process

QCD process は大きく分けて heavy flavor(b,c)を含むものと含まないもの があり、含む場合、heavy flavor のセミレプトニック崩壊によって neutrino が生成される。これによって missing E_T は生じバックグラウンドとなる。 heavy flavor を含まない場合は missing E_T は生じないが、検出器の効果で fake missing E_T が生じバックグラウンドになりうる。

5.2.5 ジェネレーター

ALPGEN や HERWIG や ISAJET は、Matrix Element(ME) と呼ばれる ファインマンダイアグラム断面積を計算しイベントを生成する手法を用い る。ME は P_T スケールの高い領域で Parton Shower と呼ばれる手法より正 確な予言ができる。Parton Shower(PS) はパートンがスプリットする確率 を用いて ME で生成されたイベントにソフトで collinear なパートンを追 加する手法である。つまり、イベント作成は図 5.1 のようにまず、ME に よってハードはパートンを持つイベント (黒) を作成し、後から PS によっ て collinear なイベント (赤) を付け加えている。

5.2.6 MLM matching

ME はハードな領域、PS はソフト領域のイベントを生成する。もし、PS が ME の領域のシャワーを生成した場合はそのダブルカウントを処理する 必要がある。その対処法として MLM matching という方法を用いている。 MLM matching では PS が ME がカバーする領域の Jet を生成したら、そ のイベントを除く方法である。その比較はパートンの情報を用いている。 ME のカバーする領域を $P_T > 40$ GeV、 $\Delta R_{jet,jet} > 0.7$ としている。そのた め、PS で $P_T > 40$ (GeV) または $\Delta R_{jet,jet} > 0.7$ のイベントは除かれる。



 \boxtimes 5.1: Matrix Element \succeq Parton Shower

第6章 2jet analysis

6.1 motivation

例えば mSUGRA の場合、squark と gluino の mass は

$$m^2(\tilde{q}) \approx m_0^2 + O(1) \cdot m^2(\tilde{g})$$
 (6.1)

のような関係がある。上式からわかるように、squarkの mass は m_0 と gluino の mass によってほぼ決めることができる。

LHC で squark と gluino が同時に見える場合、*m*₀ の値は小さいという ことである。 逆に LHC で gluino しか見えない場合、*m*₀ の値は大きいということにな る。

 m_0 はSUSYのモデルを理解するために重要なパラメータである。gluinoの mass は 1TeV 程度であるということが予想されているため、LHCのでSUSY 粒子が発見された場合、興味がでるところは squark が gluino と同じ mass scale かどうかである。

LHC で予想されている SUSY 粒子の生成過程は図 4.1 の 3 つである。こ の内、gluino が生成する事象では squark の生成の有無に関わらず 3 本以上 のジェットが生成される事象になる。ATLAS 実験で SUSY 粒子の探索を行 う時は通常このような 3 本以上の事象を選ぶ (図 6.1)。一方、squark の対生 成の事象ではジェットは基本的に 2 本となる (図 6.2)。ただし、 $m(\tilde{g}) < m(\tilde{q})$ の場合の $\tilde{q} \rightarrow q\tilde{g}$ は multi-jet になる。

よって、Jetが3本以上の解析を行い、SUSY 粒子の発見があった場合、2jet の解析を行うことで squark の生成があったかどうかを判断することができる。



図 6.1: Multi-jet のイベント

図 6.2: 2jet となるイベント

6.2 イベントセレクション

6.2.1 multi-jet analysis のイベントセレクション

ここでは ATLAS で一般的に行われている SUSY 粒子探索のための説明 を行う。

 $m_{1/2}$ がTeVより大きくない限り、LHCでは gluinoの生成が多くATLASでは SUSY 粒子を探索するためにこのイベントを落とさないように multi-jet analysis を行っている。ATLAS での標準的な解析では、leptonの数によって 3 つのモードで研究を行うが、第2章で述べた通り、本研究ではその中でも特に多くのイベントが生成する Olepton モードと 1lepton モードの 2 つについて調べる。セレクションクライテリアは以下のようである。

Olepton モード

- 1. Jet の内、P_T > 50GeV を満たすものが3本以上存在する
- 2. 一番 *P*_T の高い Jet の *P*_T が 200GeV/c 以上
- 3. *E*T が 100GeV 以上
- 4. $E_T > 0.2 \times M_{eff}$
- 5. $S_T > 0.2$
- 6. Isolated electron または isolated muon の数が0個
- 7. P_T の高い3本のJetと E_T との $\Delta \phi$ が0.2以上離れていることを要求。

1lepton モード

- 1. Jet の内、P_T > 50GeV を満たすものが3本以上存在する
- 2. 一番 P_T の高い Jet の P_T が 100GeV/c 以上
- 3. *E*T が 100GeV 以上
- 4. $E_T > 0.2 \times M_{eff}$
- 5. $S_T > 0.2$
- 6. Isolated electron または isolated muon の数が1個
- 7. $M_T > 100 \text{GeV/c}^2 を要求。$

LSPが検出されないため、SUSY が生じるイベントは大きな missing energy が生じる。そのため、通常 SUSY 探索では $\mathcal{E}_T > 100$ GeV を要求している。 $\mathcal{E}_T > 0.2 \times M_{eff}$ は高い P_T を持った Jet が生じた時の resolution からくる 要請であり、Jet に比べしっかりとした missing E_T があるということを要 求している。

 S_T は図 4.6 にあるように QCD バックグラウンドを減らすための要求である。また、1lepton モードにおける M_T の要請は図 4.7 で示されているよに 100GeV 以上を要求することによって W + jet のバックグラウンドを大幅 に減らすことができる。

6.2.2 2jet analysis のイベントセレクション

本研究では 6.1 で述べた通り、squark pair の生成を確認することに焦点 をしぼっているので、Jet の本数をちょうど 2 本にしぼった。2 jet 解析のお いて lepton は multi-jet 解析と同様にとる。しかし、Jet に関しては、ちょう ど 2 本を要求するため、ISR(Initial State Radiation) のよる Jet を含むイベン トを落としたくない。図 6.3 に示すように、ISR による Jet はハードプロセ スによる Jet より大きな $|\eta|$ をもつ。よって Jet 定義として、 $|\eta| < 2.5 \rightarrow 1.5$ へ変更した。これにより、例えば、Bulk Region のイベントでは、ハード プロセスによって生じる Jet の ID efficiency は 98.5% → 86.4% に減少する が、ISR による Jet が入ってしまう確率は 70.2% → 52.2% へと減らすこと ができる。

また、 $\tilde{g}\tilde{g}$ 生成イベントであっても、Jet の P_T が低い、 $|\eta|$ の大きなところへ生成されるなどで Jet の ID がされず、2jet に見えてしまうイベントもある。このイベントに対しては、3 番目に P_T の高い Jet への Cut で対応し

た。図 6.4 は、残したい ISR を含む $\tilde{q}\tilde{q}$ 生成の 2jet イベント (黒) と上の理 由から 2jet となってしまった $\tilde{g}\tilde{g}$ 生成のイベント (青) の比較である。横軸 にとった値は $\frac{3rd Jet \circ P_T}{(1st Jet \circ P_T + 2nd Jet \circ P_T)}$ である。比較のため共に 100 イベン トになるように縦軸のスケールを変えている。 $\tilde{g}\tilde{g}$ 生成イベントの 3rd Jet の P_T は 1st Jet や 2nd Jet の P_T に遜色ないほどであるに対し、ISR によ る Jet は 1st Jet や 2nd Jet の P_T に比べかなり低いことがわかる。よって、 3rd Jet の扱いとして、3rd Jet の $P_T < 0.2 \times (1st Jet \circ P_T + 2nd Jet \circ P_T)$ とした。

Olepton モードと 1lpeton モードの 2 つのモードについて研究をする。 セレクションクライテリアは以下の通りである。

Olepton モード

- 1. Jet の内、 $P_T > 50$ GeV を満たすものがちょうど2本
- 2. 3本目の Jet が存在した場合、3rd Jet の P_T は 0.2 × (1st Jet P_T + 2nd Jet P_T) より小さいとする
- 3. 一番 Pt の高い Jet の PT が 200GeV/c 以上
- 4. *E_T*が100GeV以上
- 5. $E_T > 0.2 \times M_{eff}$
- 6. $S_T > 0.2$
- 7. Isolated electron または isolated muon の数が0個
- 8. P_T の高い2本のJetと E_T との $\Delta \phi$ が0.2以上離れていることを要求。

1lepton モード

- 1. Jet の内、 $P_T > 50$ GeV を満たすものがちょうど2本
- 2. 3本目の Jet が存在した場合、3rd Jet の P_T は 0.2 × (1st Jet P_T + 2nd Jet P_T) より小さいとする
- 3. 一番 Pt の高い Jet の P_T が 100GeV/c 以上
- 4. **E**_T が 100GeV 以上
- 5. $E_T > 0.2 \times M_{eff}$
- 6. $S_T > 0.2$
- 7. Isolated electron または isolated muon の数が1個
- 8. $M_T > 100 GeV/c^2$ を要求。

第6章 2jet analysis



図 6.3: ISR Jet(黒) とハードプロセス のよる Jet(赤)の eta の比較

図 6.4: ISR を含む *q̃q* 生成の 2jet イベ ントと *g̃g* 生成の 2jet イベントの比較

以上のセレクションを通過したイベントは図 6.5, 図 6.6 に示す通り、 $\tilde{g}\tilde{g}$ の生成にはほとんど感度を持たない。Bulk Region において、2jet 解析の Olepton モードのセレクションを通過したイベントは $\tilde{q}\tilde{q}$ 生成が 71%、 $\tilde{g}\tilde{q}$ 生成が 28% と $\tilde{g}\tilde{g}$ の生成には sensitivity がないことがわかる。1lepton モー ドでも同様に $\tilde{g}\tilde{g}$ 生成には感度を持たず、 $\tilde{q}\tilde{q}$ 生成が 67%、 $\tilde{g}\tilde{q}$ 生成が 31% である。





図 6.5: Olepton モードの \mathcal{E}_T 分布、 $\tilde{q}\tilde{q}$ 生成(赤)、 $\tilde{q}\tilde{g}$ 生成(青)、 $\tilde{g}\tilde{g}$ 生成(緑)、 塗り潰しは BG

図 6.6: 1lepton モードの \mathcal{E}_T 分布、 $\tilde{q}\tilde{q}$ 生成(赤)、 $\tilde{q}\tilde{g}$ 生成(青)、 $\tilde{g}\tilde{g}$ 生成(緑)、 塗り潰しは BG

6.3 SignificanceのmET cut 特性

ここでは 2jet 解析の発見能力について述べる。 *Signal* を (実験データ) – (*BG*) とし、

$$Significance = \frac{Signal}{\sqrt{BG}}$$
(6.2)

で*Significance*を定義する。ATLASでは、*Signal* > 10かつ*Significance* > 5の場合に発見可能であると定義している。後に cross-section を求めると

きに検出効率という値を使うが、実際の解析ではこの値は1つに決められるため、 $m(\tilde{q})$ によって検出効率が変化するのは好ましくない。よって、 missing $E_T cut$ を変えながら Significance を求める。以下にイベントセレク ション後の $E_T cut$ 毎の発見能力の変化を示す。



図 6.7: \mathbb{E}_T cut 毎の Significance (0 lepton モード)

図 6.8: \mathbb{E}_T cut 毎の Significance (1 lepton モード)

図 6.7,図 6.8 は重心系エネルギー 10TeV、積算ルミノシティ10fb⁻¹ での 2jet 解析の発見能力を \mathbb{F}_T Cut 毎の Significance を表したものである。 m_0 を変えた sample 毎についてプロットしている。 m_0 が大きくなり、squark が重くなるにつれ \mathbb{F}_T cut を大きくした方が Significance が良くなることが わかる。

Olepton モードと 1lepton モードを比較すると、Olepton モードの方 Significance がよい。これは Olepton モードはシグナル、バックグラウンドシグナ ル共に増えるが、バックグラウンドがルートでしか効かないためである。

6.4 発見能力

図 6.7,図 6.8 から、Significance を求める時の最終的な \mathbb{E}_T カットを以下 のように決めた。 2jet no lepton モードでは、

> $m(\tilde{q}) < 700 \text{GeV} \dots E_T > 350 \text{GeV}$ $700 < m(\tilde{q}) < 800 \text{GeV} \dots E_T > 400 \text{GeV}$ $m(\tilde{q}) > 800 \text{GeV} \dots E_T > 500 \text{GeV}$

2jet one lepton モードでは、

とした。

m(q)毎の発見能力を図 6.9,図 6.10 に示す。



図 6.9: 発見能力 (0 lepton モード)

図 6.10: 発見能力 (1 lepton モード)

赤で表した点は 2jet 解析での各 squark mass における発見能力、黒で表し た点は multi-jet 解析での各 squark mass の発見能力である。まず、multi-jet 解析は squark の質量が重くなったとしても、Olepton モード、1lepton モー ド共に十分な Significance がある。これは、 $\tilde{q}\tilde{q}$ 生成だけでなく $\tilde{g}\tilde{q}$ 生成や $\tilde{g}\tilde{g}$ 生成に対しても感度をもっているためである。一方、2jet 解析は前節で 述べたように、 $\tilde{q}\tilde{q}$ 生成に対して感度が強いため、squark の質量が大きく なるにつれ、Significance は著しく悪化する。

multi-jet 解析で SUSY 粒子を発見した場合、2jet 解析で SUSY-like な粒子 の発見があれば、 \tilde{g}, \tilde{q} 両方が発見されている可能性が高い。また、multi-jet 解析で SUSY 粒子が発見されるが、2jet 解析でない場合、 \tilde{q} の質量が重い ということが考えられる。2jet 解析でどの程度の質量の squark まで見える かというと、 $m(\tilde{q}) = 1$ TeV 付近までは 95%CL で squark の示唆ができるこ とがわかる。

6.5 バックグラウンド

ここでは、各モードのバックグラウンドについて説明する。 図 6.11 は重心系エネルギー 10TeV、ルミノシティー 10fb⁻¹ における 2jet 解析の 0lepton モードにおけるバックグラウンドの分布である。図 6.11 に よると、バックグラウンドは Z + jets と W + jets がメインである。0lepton モードでは、20GeV 以上、 $|\eta| < 2.5$ の *Isolated lepton* を 0 個と要求してい

る。そのため、Z + jets は Z → $v\bar{v}$ というプロセスである。また、W + jets は W → *l* v だが、*l* が τ であった場合は $\tau \rightarrow l(e/\mu) + v \circ l$ が大きな *P*_T を持っていない限り Olepton モードとなる。また、e または u であった場 合でも、 $P_T < 20$ GeV や $|\eta| > 2.5$ であった場合は 0lepton モードとなる。 Olepton モードでの W + jets のバックグラウンドの内、 $W \rightarrow l \nu o l m \tau$ であるため Olepton モードとなるイベントは 48%、1 は e または u だが、 $P_T < 20 \text{GeV}$ または $|\eta| > 2.5$ であるため Olepton モードとなるイベントは 52%であった。



図 6.11: Olepton モードにおけるバッ 図 6.12: 1lepton モードにおけるバッ クグラウンドの **E**T 分布

クグラウンドの Er 分布

図 6.12 は重心系エネルギー 10TeV、ルミノシティー 10fb⁻¹ における 2jet 解析の 1lepton モードにおけるバックグラウンドの分布である。1lepton モー ドでは 20GeV 以上、|η| < 2.5 の Isolatedle pton を 1 個要求しているため、 メインのバックグラウンドは $t\bar{t}$ + jets と W + jets となるがさらに詳しくは 7.1節で述べる。

バックグラウンドの不定性 6.6

6.6.1 バックグラウンドの不定性

本来、バックグラウンドは real data を用いて評価する。評価方法につい ては第7章で述べる。本研究では MC を使用し、バックグラウンドを見積 もっている。MC でのバックグラウンドはそのパラメータの設定に不定性 が生じる。そのためどの程度の不定性が生じるかをパラメータを変更し見 積もる必要がある。本研究ではオリジナルサンプルに対してパラメータを 変更したサンプルを使用し、分布を比較した。

• Renormalization スケール

強い相互作用のゲージ結合定数 $\alpha_s(Q^2)$ は最低次で、

$$\alpha_s(Q^2) = \frac{\alpha_s(\mu^2)}{1 + \alpha_s(\mu^2)\frac{\beta_0}{4\pi}\ln(\frac{Q^2}{\mu^2})}$$
(6.3)

$$\beta_0 = (11 - \frac{2}{3}n_f) \tag{6.4}$$

で与えられ、エネルギーに依存している。これはどこかのスケール で規格化しなければならない。このスケールを Renormalization ス ケールという。図 6.13 のように、 α_s は $Q^2 \rightarrow \infty$ で 0(漸近的自由)、 $Q^2 \rightarrow 0$ で発散する (閉じ込め)。オリジナルのサンプルに対して renormalization スケールを半分にしたサンプルを使用した。

• Factorization スケール

ME から PS に切り替える P_T スケールを Factorization スケールという。つまり、Factorization スケールより大きな P_T 領域のパートンは ME で生成し、小さな領域のパートンは PS で生成する (図 6.14)。Factorization スケールは任意に設定するため誤差として扱う。本研究では、オリジナルでは $Mw^2+\sum P_T^2$ of jet を用いているが、mean of P_T^2 of jets と小さくしたサンプルを使用した。

5.2.6 節の P_T 、 ΔR の値は我々が手で入れているため、これらにも不定 性がある。それぞれ以下のように振ったサンプルを用いて誤差を考えた。

- パートンの P_T カット オリジナルではパートンレベルでの P_T カットは 40GeV と設定され ているが、15GeV にしたサンプルを使用。
- パートンの ΔR カット オリジナルではパートンレベルでの jet の間の ΔR は 0.7 以上で設定 されているが、0.35 以上のサンプルを使用。

その他 PDF による不定性も考える。

• PDF の不定性





図 6.14: Factorization スケール

図 6.13: α_sのエネルギー依存性

表 6.1, 表 6.2 は 0lepton モード (\mathbb{E}_T cut = 400)、1lepton モード (\mathbb{E}_T cut = 300) におけるオリジナルのサンプルに対する各パラメータを変更した場合の誤差を示した表である。

バックグラウンドの不定性の扱い方を例として、Olepton モード $\mathcal{E}_T cut =$ 400GeV における計算を以下に示す。Olepton モードのバックグラウンドは W + jets とZ + jets が主であったためこの2プロセスのみを扱った。オリジ ナルのイベント数は W + jets が 116±39events、Z + jets が 91±15events、 Renormalization スケールを 0.5 倍にしたサンプルの場合、W + jets のイベ ントは 112±29events、Z + jets は 173±13events である。Renormalization スケールを 0.5 倍すると cross-section は大きくなる。実際、図 6.15 のよ うに Renormalization スケールを 0.5 倍したサンプルがオリジナルサンプ ルより大きな分布になる。しかし、*high missingET* 領域では統計量が少な い。これは、Olepton モードになる W + jets プロセスは lepton の P_T が小 さいか、 $|\eta|$ の大きなものであったことから、 \mathcal{E}_T の小さいイベントが多い からであると考えられる。よって、 \mathcal{E}_T の高い領域は cross-section が変化 しても影響が少なかったと考えられる。また、W + jets に関しては統計的 に不十分であったということも考えられる。

バックグラウンド全体の統計誤差は20%程度であった。バックグラウン ド全体の誤差として、主要なバックグラウンドのW+ *jets* とZ+ *jets* の足 し合わせを使う。Renormalization スケールによるバックグラウンド全体 のイベント数は285events である。オリジナルのサンプルは206events な ので、renormalization スケールを0.5 倍にしたサンプルによるバックグラ ウンドの不定性は+40% 程度であると算出できる。同様に factorization ス ケールのサンプルによる不定性は+7%、*low* P_T サンプルによる不定性は 9%、 ΔR *cut* のサンプルによる不定性は-15% となる。PDF によるバック グラウンドの不定性は 5%程度であった。以上から、バックグラウンド全体に最も影響を及ぼすものは Renormalization スケールを 0.5 倍にしたもので約 +40%の増える可能性があることがわかる。もし、バックグラウンドが+40%増えたと考えた場合、Significance はどの程度の値になるのかを図 6.16 に示す。+40%増えたことにより 2jet 解析による significance は青の点から赤へと変化する。例えば、 $m(\tilde{q}) = 767 \text{GeV}$ の点では significance が 21 から 10 へと悪化していることがわかる。この significance に対して 5 以上を要求すると $m(\tilde{q}) = 793 \text{GeV}$ の点は発見可能とは言えなくなる。よってバックグラウンドの不定性を考慮した場合、2jet 解析の Olepton モードではおよそ 770 GeV の squark の発見が言える。

また、1lepton モードについてはモンテカルロの統計が支配的な誤差となるが、最大 100%程度の不定性が見積もられた。

Olepton モード

*E***_T** *cut* **= 400GeV におけるバックグラウンドの不定性は 40%**

1lepton モード

E_Tcut = 300GeV におけるバックグラウンドの不定性は 100%

表 6.1: バックグラウンドの不定性 (0 lepton モード missingErcut = 400)

| | $W + jets(events/10fb^{-1})$ | $Z + jets(events/10fb^{-1})$ | 全体 (events/10fb ⁻¹) |
|----------------------|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| オリジナルサンプル | 116 ± 39 | 91 ± 15 | 206 ± 42 |
| Renormalization スケール | 112 ± 29 | 173 ± 13 | 285 ± 32 |
| Factorization スケール | 101 ± 26 | 120 ± 10 | 221 ± 28 |
| Low P_T | 60 ± 51 | 164 ± 38 | 224 ± 64 |
| Δ R | 70 ± 23 | 104 ± 10 | 175 ± 25 |

表 6.2: バックグラウンドの不定性 (1lepton モード *missingE_T cut* = 300)

| | $W + jets(events/10fb^{-1})$ | $t\bar{t}(\text{events}/10\text{fb}^{-1})$ | 全体 (events/10fb ⁻¹) |
|----------------------|------------------------------|--|---------------------------------|
| オリジナルサンプル | 16 ± 8 | 19 ± 7 | 35 ± 10 |
| Renormalization スケール | 38 ± 18 | 30 ± 7 | 68 ± 19 |
| Factorization スケール | 22 ± 10 | - | - |
| Low P_T | 3 ± 3 | 31 ± 17 | 34 ± 19 |
| ΔR | 28 ± 17 | 17 ± 3 | 45 ± 17 |



図 6.15: W + jets:オリジナルサンプル(黒) と Renormalization サンプル(赤) の \mathbb{E}_T 分布



図 6.16: squark mass 毎の significance、バックグラウンドの不定性を考慮 に入れる前(青)に対し+40%バックグラウンドを増やすと *m*(*q̃*) = 793GeV では *significance* < 5 となる

第7章 バックグラウンドの評価

前章でも述べたが、本来バックグラウンドは我々が評価する。当然、シ グナルが生じた付近のバックグラウンドを正確に見積もることが重要にな る。

本章では Olepton モードと 1lepton モードのバックグラウンドの特徴を考察 し、その評価方法を述べる。その際、1lepton モードでの評価方法を利用し て Olepton モードの評価を行うため、1lepton モードの評価から説明する。

7.1 1 lepton モード

 $m(\tilde{q}) \sim 665 GeV$ での 1lepton モードの missing E_T 分布を図 7.1 に示す。



図 7.1: 1lepton モードの E_T 分布

1lepton モードでは P_T の高い Isolated lepton を1本と大きな \mathbb{E}_T を要求 するため、tīと W + jet がメインのバックグラウンドとなる。tī は tī → $b\bar{b}W^+W^- \rightarrow b\bar{b}lvq\bar{q}$ プロセスがバックグラウンドとして残る。また、tī → lvlv プロセスは lepton が2 個であるが、そのうちの1本が P_T が低いまたは $|\eta| > 2.5 または、Jet とのオーバーラップによって lepton と ID できなかった$ イベントも 1lepton モードのバックグラウンドとしてなり得る。その割合は、*lvqq*が7%、*lvlv*が93%である。これは*lvqq*のイベントは図7.2のよう $に <math>M_T$ を組むと M_W にうまく組むことができるため、 $M_T > 100$ GeV でその 多くが落とされるからである。また、W + jetsプロセスは $W \rightarrow lv(l = e, \mu)$ がバックグラウンドとなる。

 $E_T > 250 \text{GeV}$ でのバックグラウンドの内訳は $t\bar{t} + jets$ が 24%、W + jets が 60%、Z + jets が 16% である。



図 7.2: 1lepton モードにおける $t\bar{t}$ イベントの M_T 分布、黒が $t\bar{t} \rightarrow lv lv$ 、赤 が lv qq

7.1.1 *M_T* 法について

 M_T 法とは search の Key にした missing E_T と相関のない Transverse mass(M_T) の大小で 2 つの Region に分け、Signal の生じる領域の BG を見積もる手 法である。multi-jet の 1lepton モードの解析では通常、この評価方法で BG を見積もる。

図 7.3 に M_T 法の概略図を示す。横軸を missing E_T 、縦軸を M_T に取って いる。 M_T の違う 2 つの領域において missing E_T 分布は数の違いはあれ、 相似形となっているはずであるという考えから BG の多い M_T の小さな領 域から Signal Region である M_T の大きい領域の BG を評価する方法であ る。

1lepton モードでは Signal Region は $M_T > 100$ GeV を要求する。図 7.3 で

は D の領域を B の領域から評価する。なお、規格化定数は SUSY シグナルの影響の少ない A と C の領域から求める。

$$D = \frac{C}{A} \times B$$



図 7.3: *M_T*法

図 7.4,7.5 は 2jet one lepton モードにおける M_T Cut をかける前の W + jetサンプルと SUSY サンプルの M_T 分布である。W+jet は M_W でヤコビア ンピークを作り $M_T > 100$ で急激に落ちる分布であるのに対し、SUSY シ グナルは平坦な分布を示している。このため $M_T < 100$ GeV をコントロー ルサンプルとすることにより SUSY シグナルの影響を抑えることができ、 統計数も増えるため統計誤差を小さくすることができる。



図 7.4: W+jet の *M*_T分布

図 7.5: SUSY シグナルの *M*_T 分布

7.1.2 BGの評価

前節のように M_T < 100GeV でコントロールサンプルを取る。



図 7.6: 1lepton モードにおけるコントロールサンプルの構成

図7.6 はコントロールサンプルのそれぞれのバックグラウンドの*missingE*_T 分布である。赤がW + jets、青が $t\bar{t}$ 、緑がZ + jetsである。 $E_T > 250 \text{GeV}$ におけるバックグラウンドの内訳はW + jetsが90%、 $t\bar{t}$ が9%、Z + jetsが1% とほぼW + jetsで構成される。

規格化定数は missingE_T の 100 ~ 150GeV で行った。100 < E_T < 150 におけるコントロールサンプルは 17,084events、実バックグラウンドは 1,176events であるので、0.06884 をコントロールサンプル全体に掛けた。 図 7.7, 図 7.8 は評価後の missingE_T 分布と M_{eff} 分布である。実バックグ ラウンド(青)を評価バックグラウンド(赤)でうまく評価できているように 見える。実際は missingE_T 分布において実バックグラウンドがややハード な分布をとる。これはコントロールサンプルの構成がほぼ W + jets であっ たのに対し、実バックグラウンドでは $t\bar{t} \rightarrow lvlv \ge v \ge 2$ つ放出するものが 含まれるためである。effective mass > 600GeV におけるイベント数は、 評価バックグラウンドが 248.2 ± 12.0、実バックグラウンドは 241.6 ± 35.1 とよく一致している。



図 7.7: 1lepton モードの BG 評価 (missingE_T)

図 7.8: 1lepton モードの BG 評価 (effective mass)

7.2 0 lepton mode

 $m(\tilde{q}) \sim 665 \text{GeV}$ での 0 lepton モードの $missingE_T$ は図 7.9 のような分布 になる。



図 7.9: Olepton モードにおける **E**_T 分布

0 lepton モードでは、ハード jet と large \mathbb{E}_T 、*Isolated lepton* を 0 本と要求 するため、 $Z \rightarrow vv$ がバックグラウンドとして選ばれる。また、図 7.9 では W + jets も選ばれている。これは $W \rightarrow lv$ のlが e,μ で P_T が20GeV 以下ま たは $|\eta| > 2.5$ で lepton として ID できないイベントであるか、lが τ でハド ロニックまたは P_T の低い e,μ に崩壊したイベントである。 $\mathbb{E}_T > 350GeV$ におけるバックグラウンドの割合は W + jets が 43%、Z + jets が 43% で 同数ずつである。

Olepton モードでは、lepton を要求しないため M_T を定義することがで きない。よって、1lepton モードのように同じように M_T の大小で評価す るということはできない。しかし、1lepton モードで選んだコントロール サンプルはほぼ W + jets で構成されていたため、Olepton モードにおける W + jet と Z + jets を評価するためのコントロールサンプルとなり得る。 よって、コントロールサンプルとして通常の 2jet no lepton モードのセレク ションクライテリア同様 high P_T jets, \mathcal{E}_T 等を要求し、その後に lepton を 1 本、 $M_T < 100$ GeV を要求する。これによって得られたコントロールサン プルは図 7.10 のような構成となる。 $t\bar{t}(\bar{t})$ や Z + jets(緑) が low missing E_T 領域に分布されるが、high missing E_T 領域ではほとんど W + jets(赤) が選 ばれていることがわかる。



図 7.10: Olepton モードコントロールサンプルの構成

上によって得たコントロールサンプルで評価を行う。評価バックグラウ ンドと実バックグラウンドの比較は図 7.11 に示された通りである。青が 実バックグラウンド、赤が評価バックグラウンドだが、実バックグラウン ドがハードな分布になっており、このままではうまく評価できないことが わかる。



図 7.11: 評価した分布 (赤) とバックグラウンド (青)の *ET*分布、評価した 分布はバックグラウンドよりソフトな分布になる。

プロセス毎にコントロールサンプルとバックグラウンドの \mathbb{E}_T を図 7.12, 図 7.13 に示す。コントロールサンプルはバックグラウンドのW + jets に 対してはうまく評価できるが、Z + jets に対しては $Z \rightarrow v\bar{v}$ により \mathbb{E}_T が ソフトにな分布をとる。 $W \rightarrow lv$ から $Z \rightarrow vv$ を評価するためには lepton の P_T を \mathbb{E}_T を置き換えればよい (図 7.14)。



図 7.12: Olepton モード、Signal Region における W + jets の $missingE_T$ g 分布 (青) とコントロールサンプルの W + jets の E_T 分布



図 7.13: Olepton モード、Signal Region における Z + jets の $missingE_T$ 分布 (青) とコントロールサンプルの W + jets の E_T 分布



図 7.14: Olepton モード、 $W \rightarrow l\nu(\pi)$ の1を ν と置き換えることによって $Z \rightarrow \nu\nu(青)$ を評価できる。

実際はW + jets とZ + jets の混ざり合っているため、lepton を全てvに置き換えてしまうと E_T 分布はコントロールサンプルがハードな分布になる。つまり、コントロールサンプルの lepton の一部をv と置き換えることによって Signal Region の E_T 分布を評価できる。

7.2.1 BGの評価

前節で述べた通り、コントロールサンプルを補正し、実バックグラウンドを評価する。その手法は、コントロールサンプルの $W \rightarrow l + v$ の leptonを missing E_T にするということであった。

図 7.15 は実バックグラウンドにおける lepton(赤) と neutrino(緑) の P_T 分 布である。lepton の P_T の平均値は 15GeV である。コントロールサンプル はこの lepton の P_T 分を残し、残りを missing E_T に書き換える (図 7.16 が 概略図)。



図 7.15: 実バックグラウンドの lepton(赤) と v(禄)の P_T 分布、lepton は平均 恒は 15GeV の P_T をもっている。



図 7.16: コントロールサンプルの補正方法、lepton の P_T を 15GeV まで下 げることで Olepton モードを再現する。

補正前後の E_T 分布は図 7.17 のようになる。lepton をvに置き換えたため、補正前(赤)に対して補正後はハードな分布になる。補正後の E_T 分布を使用し、実バックグラウンドを評価し直す。なお、規格化定数は missing E_T の 150 ~ 250 GeV で計算した。図 7.18 は改めて評価した評価バックグラウンド(赤)と実バックグラウンド(青)である。



図 7.17: コントロールサンプルの \mathbb{E}_T 分布 の変化、lepton をv と置き換えため、補正前(黒)に対して補正後(赤)がハードな分布。



図 7.18: 評価後の **E**_T分布、赤が実バックグラウンド、青が評価バックグラウンド

▶_T > 350GeV でのイベント数はコントロールサンプルによる評価バッ クグラウンドが982±185 に対し、実バックグラウンドは831±93 で統計 誤差の範囲でうまく評価ができていることがわかる。

この評価で、lepton の *P_T* を 15GeV だけ残したが、この値も手で入れて いる。次に、実バックグラウンドと MC のバックグラウンドの sharp が変 らないということを信じて評価する方法 (MC 法) を紹介する。なお、ここ では重心系エネルギー 14TeV 積算ルミノシティ1fb⁻¹ で評価した。

まず、実 data と MC のバックグラウンドを用意するが、今回は実 data を オリジナルのサンプル、MC のバックグラウンドを renormalization スケー ルを半分にしたバックグラウンドサンプルを使用した。評価方法は、MC と実 data の sharp が同じと考え、MC と実 data の比を求める。この比を用 いて、MC の Signal Region のバックグラウンドから実バックグラウンド の Signal Region のバックグラウンドを評価する (図 7.19)。



図 7.19: MC 法、MC と data の sharp が同じと考え normalization factor を 抽出する。

図7.20はMCのバックグラウンドと実dataのOleptonモードのコントロー ルサンプル Cut をし、比較をした \mathbb{F}_T 分布である。factor は $\mathbb{F}_T < 150$ GeV 領域のイベント数によって決めた。この場合、data(青)は95events、MC(赤) は117events であるため、MCのOleptonモードバックグラウンドに対し、 0.81の factorをかけ、dataのOleptonモードのバックグラウンドを評価す る。図7.21は上の方法によって評価したバックグラウンド(赤)とOlepton モードの実バックグラウンド(青)である。 $\mathbb{F}_T > 400$ GeVにおけるイベン ト数は評価バックグラウンドが26.0±1.9、実バックグラウンドは28.0±3.1 と \mathbb{F}_T の高い領域では一致している。低い領域で一致していないが、これ は、MC サンプルとして使用したサンプルが renormalization スケールを変 えたものとであるからだと考えられる。6.6.1 節で Olepton モードの時に W + jets プロセスは E_T が比較的小さいイベントが多く、renormalization スケールの変化による高 E_T 領域の cross-section への影響が少ないと述べ た。これにより、MC サンプル (赤)の W + jets プロセスの E_T がソフトに なり、高 E_T 領域において data と MC のバックグラウンドの構成が変った ためであると考えられる。Olepton モードのバックグラウンドで W + jets は 無視できないため、この影響があったと考えられる。高 E_T 領域でのバッ クグラウンドの構成は data では W + jets が 56%、Z + jets が 42% に対し、 MC では W + jets が 38%、Z + jets が 60% と Z + jets が多くなるという結 果になった。



図 7.20: data(青) と MC(赤) のバックグラウンドそれぞれに 0lepton モード のコントロールサンプルになるように cut をかけ、factor を決める。



図 7.21: Olepton モードにおける data(青) と評価したバックグラウンド(赤)

第8章 cross-sectionの見積もり

実際の解析では、data と見積もったバックグラウンドから、新しい物理 となるイベントの情報を得る。

本章では、mSUGRA モデルでの SUSY 粒子が存在した場合、前章で見積 もったバックグラウンドから、squark の cross-section を見積もる。

$$\sigma \times Branch = \frac{N_{ecxess}}{\epsilon \times L} \tag{8.1}$$

式 (8.1) は excess の数とルミノシティL、検出効率から cross-section を求める式である。

2jet 解析で得られる excess の数 (N_{excess}) と検出効率 (ϵ) と積算ルミノシ ティ(L) から得られる cross-section と squark の cross-section から 2jet 解析 が squark に対しての感度があることを示す。



図 8.1: 評価バックグラウンドとデータの Er分布

図 8.1 は $m(\tilde{q}) = 767$ GeV の点における Olepton モードの E_T 分布である。 赤が M_T 法によって評価したバックグラウンド、黒はこの点の Signal と BG を足した分布である。黒から赤の分布を差し引いたものが excess の数 となる。

表 8.1 に Olepton モードにおける検出効率を表す。第6章で Olepton モードで 2jet 解析が squark の示唆ができる質量までで表している。ここから Olepton モードにおける検出効率 $\epsilon = 0.0765 \pm 0.00763$ と決定した。

| $m(\tilde{q})$ | $m(\tilde{g})$ | 検出効率 |
|----------------|----------------|--------|
| 660 | 719 | 0.112 |
| 665 | 720 | 0.0974 |
| 722 | 729 | 0.0663 |
| 743 | 732 | 0.0636 |
| 767 | 735 | 0.0460 |

表 8.1: Olepton モード:検出効率

 $E_T > 400 \text{GeV}$ における excess の数 N_{excess} は 556 ± 205、検出効率 ϵ は 第 3 章で用意したサンプルの内 $m_0 = 50$ から 2jet no lepton 解析で squark が示唆できる $m_0 = 450$ までの検出効率から $\epsilon = 0.0765 \pm 0.0076$ とした。 これらから (8.1) 式より、見積もった cross-section は $\sigma(\tilde{q}, \tilde{q}) = 0.73 \pm 0.28$ と なり、サンプルの cross-section(1.0pb) とエラーの範囲内で一致している。 表 8.2 に見積もった各サンプルの $\tilde{q}\tilde{q}$ 生成の cross-section をまとめる。

| $m(\tilde{q})$ | $m(\tilde{g})$ | 検出効率 | N _{excess} | cross-section(pb) |
|----------------|----------------|----------------------|---------------------|-------------------|
| 660 | 719 | 0.0765 ± 0.00763 | 2446 ± 454 | 3.00 ± 0.78 |
| 665 | 720 | 0.0765 ± 0.00763 | 2125 ± 451 | 2.58 ± 0.76 |
| 722 | 729 | 0.0765 ± 0.00763 | 917 ± 246 | 1.31 ± 0.30 |
| 743 | 732 | 0.0765 ± 0.00763 | 766 ± 245 | 1.12 ± 0.29 |
| 767 | 735 | 0.0765 ± 0.00763 | 469 ± 243 | 0.73 ± 0.28 |

表 8.2: Olepton モード:cross-section の算出

各サンプルの cross-section の見積もりを図 8.2 に示す。Olepton モードと 同様に 1lepton モードにおいても見積もった cross-section を表 8.3 にまと め、算出した cross-section を図 8.3 に示す。

| Processing Control () () | | | | |
|----------------------------|----------------|----------------------|---------------|-------------------|
| $m(\tilde{q})$ | $m(\tilde{g})$ | 検出効率 | Nexcess | cross-section(pb) |
| 660 | 719 | 0.0181 ± 0.00627 | 609 ± 117 | 3.37 ± 1.33 |
| 665 | 720 | 0.0181 ± 0.00627 | 296 ± 109 | 1.64 ± 0.83 |
| 722 | 729 | 0.0181 ± 0.00627 | 160 ± 104 | 0.88 ± 0.65 |
| 743 | 732 | 0.0181 ± 0.00627 | 195 ± 105 | 1.08 ± 0.69 |
| 767 | 735 | 0.0181 ± 0.00627 | 187 ± 104 | 1.03 ± 0.68 |

表 8.3: 1lepton モード:cross-section の算出





図 8.2: Olepton モードにおける crosssection の見積もり

図 8.3: 1lepton モードにおける crosssection の見積もり

第9章 まとめ

本論文では ATLAS 実験初期のデータを用いた SUSY 探索ので SUSY 粒 子が発見された時に、squark が gluino と同じ mass scale かを調べるため に、squark に焦点を絞り重心系エネルギー 10TeV、ルミノシティ10fb⁻¹の squark の発見能力を見積もった。また real data のバックグラウンドの評価 の手法について述べた。

モンテカルロの不定性の評価

モンテカルロシミュレーションにはさまざまなパラメータによる誤差 があり、Olepton モードでは +40% 程度の不定性があることがわかった。 1lepton モードでは統計による誤差が支配的となるが、最大 100% 程度の パラメータによる不定性があることがわかった。

バックグラウンドの評価

llepton モードでは $W+jets \ge t\bar{t}$ が主なバックグラウンドとなる。 $Transverse\ mass(M_T)$ の大小によって2つのサンプルに分け、 $M_T < 100$ GeVのサンプルから $M_T > 100$ GeVのサンプルを見積もった。Olepton モードではW + jets $\ge Z + jets$ が主なバックグラウンドとなる。コントロールサンプルとしてlleptonの時と同様に lepton を1つ要求し、 $M_T < 100$ GeVを用いてOlepton モードのバックグラウンドを評価した。leptonの補正を行うことによってうまく評価ができることがわかった。

squark の発見能力

Bulk region のサンプルを基に m_0 を変えることで squark の質量を変化さ せ発見能力を見積もった。2jet 解析では $m(\tilde{q}) = 850$ GeV 程度の squark の発 見能力があると考える。また、第7章で Olepton モードではバックグラウン ドに最大+40%の不定性があることがわかり、バックグラウンドを+40%増 やした場合、2jet 解析での squark の発見能力は $m(\tilde{q}) = 770$ GeV 程度にな ることがわかった。

付録A

A.1 Jet のエネルギースケールについて

Jet のエネルギースケールを5%シフトさせた場合の結果の違いをみる。





ケールを 5%大きくした場合の Olepton モードにおける ET 分布

図 A.1: BG の Jet のエネルギース 図 A.2: BG の Jet のエネルギース ケールを 5%小さくした場合の Olepton モードにおける ET 分布

図 A.1、図 A.2 は Jet のエネルギースケールを 5% シフトした場合の BG の E_T 分布である。+5% の場合、E_T > 350GeV において +4.1% 程度のず れがみられ、-5%の場合は-5.7%程度のずれがみられる。また Signal に ついて Jet のエネルギースケールを 5% シフトした場合の Er 分布を図 A.3, 図 A.4 に示す。Signal の場合、Jet のエネルギースケールの影響は +5% 側 で+4.5%、-5% 側で-4.7% 程度影響する。これらの影響は Significance の 系統誤差に ±2% 程度の誤差をもたらす。



図 A.3: Signal の Jet のエネルギース ケールを 5%大きくした場合の Olepton モードにおける *E*_T 分布

図 A.4: Signal の Jet のエネルギース ケールを 5%小さくした場合の Olepton モードにおける E_T 分布

参考文献

- The ATLAS Collaboration, G Aad et al. 2008 The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider
- [2] LHC homepage *http//lhc.web.cern.ch/lhc*
- [3] ATLAS japan homepage http://atlas.kek.jp/
- [4] Asai's lecture note http://www.icepp.s.utokyo.ac.jp/asai/Lecture/main.htm
- [5] CERN Document Server http://cdsweb.cern.ch/
- [6] ATLAS SUSY WG http://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/SUSYWorkingGroup

謝辞

本研究を行うにあたり、指導、助言をして下さった浅井祥仁准教授に心 より感謝いたします。また、小林富雄教授にはこの様なすばらしい研究を する機会をいただき心から感謝しております。

また、研究を円滑に進められるように計算機の環境を整えてくださった 真下哲郎准教授、上田郁夫氏に深く感謝しております。解析においては、 片岡洋介氏には、解析用のデータの準備をしていただき、さらに SUSY の 解析の基礎から数多くのご指導を頂きました。本当にありがとうございま した。金谷奈央子助教、田中純一助教には、squark のイベントの ID の仕 方、イベントの作成の仕方、lepton の isolation の仕方等、解析手法につい てたくさんの助言を頂きました。大変感謝しております。

難波俊雄助教には、入学当初から、実験の基礎など多くの指導をして頂 き、大変感謝しております。

同期である、石田明君、岡村淳一君、田川智博君、橋本マーク無三四君、 越前谷陽佑君、高橋武士君、村瀬拓郎君のおかげで有意義な研究生活を過 ごすことができました。また研究室の先輩、後輩方にも大変お世話になり ました。ありがとうございました。

また、教務、事務、ICEPP 秘書の方々にも大変お世話になりました。あ りがとうごさいました。