

平成 21 年 5 月 30 日現在

研究種目：若手研究(スタートアップ)

研究期間：2007～2008

課題番号：19840013

研究課題名(和文)LHC・ATLAS 実験における超対称性粒子発見のための実験的研究

研究課題名(英文)Experimental study toward the discovery of supersymmetric particles with ATLAS at LHC

研究代表者

山本 真平 (YAMAMOTO SHIMPEI)

東京大学・素粒子物理国際研究センター・特任研究員

研究者番号：40451835

研究成果の概要：本研究ではLHC加速器を用いた超対称性粒子の早期発見を目指してATLAS実験に参加し、初期データを用いた検出器性能の理解・事象再構成法の改善および解析を推進してきた。加速器の故障により実験データを用いた検証は未だ行えていないが、特に超対称性事象の特徴的な信号である損失エネルギーの初期データを用いた検証法を確立した。また新たなカロリメータシミュレーションの開発・検証を行い、物理事象のシミュレーション時間をおよそ10倍改善し、高統計シミュレーションデータを用いた検出器性能の評価および物理解析を可能にした。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,350,000	0	1,350,000
2008年度	1,350,000	405,000	1,755,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	405,000	3,105,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：数理系科学

キーワード：ハドロンコライダー、超対称性、カロリメータ

1. 研究開始当初の背景

標準理論を越えた新しい素粒子物理の枠組を見つけることは現在の素粒子物理学における最重要課題であり、数多くの理論研究がなされてきた。特に超対称性を導入した理論には間接的ではあるがその正当性を示す実験的示唆が得られており、標準理論を越えた高いエネルギースケールでの素粒子の枠組が超対称性で記述できるならば、超対称性粒子は数TeV領域までに存在すると思われる。

LHC加速器を用い、14TeVの衝突エネルギーで陽子同士を衝突させ、その衝突反応を測定するATLAS実験はTeV領域の超対称性事象が初めて直接探索可能な実験である。ATLAS実験での超対称性物理の検証は素粒子物理学の究極の目標である大統一理論へとつながる最も直接的な研究になる。

2. 研究の目的

超対称性粒子発見を行う上において、横方向損失エネルギー(missing ET)の実験データを用いた評価、バックグラウンドの実験データを用いた評価、ハイレベル・トリガー開発やその効率の評価といった実験的な研究が必要不可欠である。理論研究やモデルの再構成などのこれまでの超対称性物理の研究を実験のレベルにまで高めることが重要である。現在 ATLAS 実験における各検出器やレベル1トリガーなどの設計・製作は終了しているが、ハイレベル・トリガーやエネルギーキャリブレーションなど検出器とオフライン解析を結ぶ重要な研究は今まに行われようとしている。12桁も異なる断面積の物理過程がある LHC 実験では物理過程を選択するこのトリガーの研究、また新しい物理現象探索のためには横方向損失エネルギーの測定はきわめて重要である。これまでの LHC での超対称性物理の研究は理論的な研究が先行していた。また探索領域におけるバックグラウンド量の評価についてはスケール依存性が高く、しかもマルチジェット事象であるために数多くのスケールが共存するため、モンテカルロ・シミュレーションのみで評価することは非常に難しいので実験データを用いた評価法の確立が必要である。

LHC 実験は強い相互作用を通じて生成されるグルーオンおよびスカラークォークを探索するため、モデル依存性なしで超対称性を直接探索できる唯一の実験である。横方向損失エネルギーの精密測定とコミッシング時における検証、また標準理論バックグラウンドの評価を柱として超対称性粒子の発見・その後の研究を LHC・ATLAS 実験にもたらすことを目指す。超対称性の発見は 1930 年代の反粒子の発見にも匹敵する大きな成果に成り得るものである。暗黒物質としての超対称性粒子、大統一理論における階層性問題、重力も含めた力の統一理論など、素粒子物理学・宇宙物理学においてこれまでにないインパクトと多大な発展をもたらす。この超対称性の発見の期待が極めて高い実験が LHC・ATLAS 検出器である。その成果は今後の物理学の発展にとっても重要な位置づけがされるものであり、その早期発見が望まれる。特にこれまでの研究によりグルーオン、スカラークォーク等の超対称性粒子は高い確率で TeV 付近に存在することが示唆されている。超対称性粒子の質量が 2 TeV あたりの高い値をもつ場合でもこれらの生成断面積は 20 fb であり、LHC 加速器の開始 1 年で得られるデータ量(積分ルミノシティ数 10 fb^{-1}) で発見することが可能である。

3. 研究の方法

(1)横方向損失エネルギー測定法の検証

di-jet 事象などにおいて横方向エネルギーはバランスしているため、原理的には missing ET は検出されない。しかし実際のカリメータ検出器におけるエネルギー測定では不感物質によるエネルギーロス、カリメータの継ぎ目、また検出器の動作不良チャンネル等の効果によって単純にエネルギーを足し合わせても偽りの missing ET が観測されてしまうとともに、その測定には大きな系統誤差が生じる。コミッシングではこのような検出器の効果を理解し、missing ET 再構成におけるジェットの方向によるエネルギー補正の手法を確立する。陽子・陽子非弾性散乱事象は断面積が大きく、低ルミノシティのビームでも多数の事象が観測される。この事象を用いて missing ET の再構成能力を評価する。観測された性能と期待される性能からのずれを詳細に研究し、検出器が測定に与える影響・問題を調べる

また missing ET の再構成精度は物理過程に依存するが、一般的にその分解能に対する主要な寄与はカリメータの可視エネルギーのスカラ和(SumET)の有限な分解能による統計的な効果として記述できる。さらにカリメータの誤ったエネルギースケールは missing ET 測定におけるスケールのずれ、またはオフセットとして影響をおよぼす。このような missing ET 測定に対する一般的な性能評価を W ボソンがミュー粒子+ニュートリノへ崩壊する事象を用いて行なう。W ボソン崩壊事象の横質量が示す特徴的な分布(Figure 1)の広がりやピーク位置の情報を用いて観測される missing ET の分解能やオフセットを測定し、シミュレーションから期待される性能が達成できていることを検証する。

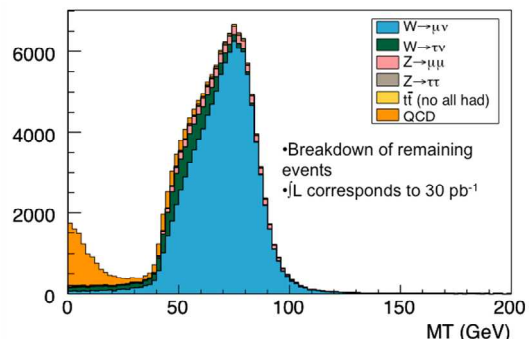


Figure 1: $W \rightarrow \mu$ 候補事象の再構成された横質量分布。

(2) 新しいカロリメータシミュレーションの研究開発

実験開始に向けてこれまでの検出器シミュレーションにとって代わる新しいシミュレーションの必要性がある。高エネルギー実験ではデータの理解のために検出器シミュレーション・Geant 4を用いることが一般的である。しかしLHC加速器での高エネルギー反応では数多くの高エネルギー粒子・ジェットが生成されるため、Geant 4のように粒子ごとに検出器内でのすべての反応をシミュレートしていく枠組みでは膨大なCPU時間を費やす。特に多重の反応を繰り返してエネルギーを落としていくカロリメータ検出器シミュレーションの実行時間は深刻な問題となっており、有限のコンピュータ資源では物理解析に必要な統計量のシミュレーションデータを準備することが難しい。そこでGeant 4の電子・光子およびハドロンのカロリメータ内での反応によるエネルギー損失およびシャワー形状をパラメータ化し、シミュレーション実行時間を大幅に改善するとともに単純なファストシミュレーションでは再現できない検出器効果も再現する。

4. 研究成果

(1) $W \rightarrow \mu \nu$ 事象の観測にはWボソンのその他の崩壊過程やZボソン崩壊、QCDやtopペア生成事象がバックグラウンドとして混入する。これらのバックグラウンド事象はFigure 1のように $W \rightarrow \mu \nu$ の横質量(MT)分布を不鮮明にする。そこでMT-SumETの2次元分布を用いてモンテカルロシミュレーションにより準備したシグナルおよびバックグラウンド過程のMT-SumETテンプレートと比較することにより、バックグラウンド混入率と同時にMissing ETの分解能およびエネルギースケールを測定できることを示した。

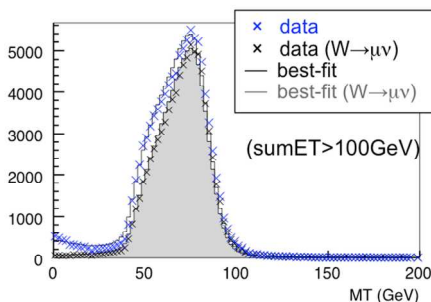


Figure 3: (偽)データおよびFittingにより得られた横質量分布。

検出器シミュレーションにより生成した偽データを用いて解析を行なった結果をFigure 2に示した。得られたMissing ET測定における分解能およびカロリメータの可

視エネルギーを数10 GeV以上も高エネルギーまで測定可能であることが示された。Figure 2は、この結果を示す。

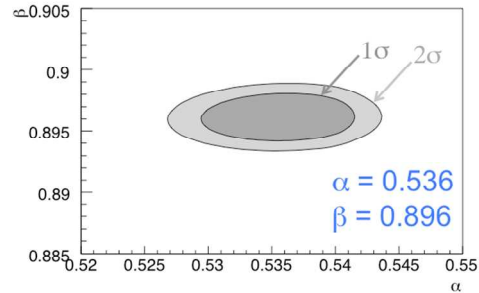


Figure 2: Fittingにより得られたMissing ETの測定分解能およびカロリメータ可視エネルギーのスケール。

さらに、LHC実験ではTeVエネルギーを越えるジェットも生成され、有限の確率でカロリメータ内にハドロンシャワーがすべて含まれないことがある。これによってジェットエネルギー測定に大きな誤差を生むとともに大きく誤ったmissing ETが観測されてしまう。そこでカロリメータ外側のミュオンスペクトロメータのヒット情報を用いてシャワーリークの補正法を開発・検証し、高エネルギージェットのエネルギー分解能の改善に成功した(Figure 4)。

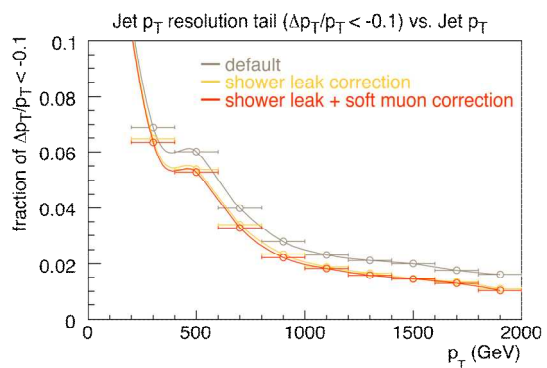


Figure 4: ジェットのエネルギー分解能。

(2) Geant 4にかわってシャワーをパラメータ化したカロリメータシミュレーションを実装することにより、モンテカルロ事象生成にかかるCPU時間を10倍以上改善

することに成功した。また QCD 事象等を用いて再構成されたジェットのシャワー形状や missing ET 分布、またその分解能や検出器位置依存性等が Geant4 シミュレーションをよく再現し、実用に耐えうるものであることを示した。今後この新しいシミュレーションを用いて大量のデータを生成し、超対称性粒子探索の準備解析を遂行するとともに信頼性のあるシミュレーションデータを得られるように改善を行っていく。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 3件)

1. G.Aad, S.Yamamoto 他 2644 人 2569 番目(ATLAS Collaboration), "Expected Performance of the ATLAS Experiment: Detector, Trigger and Physics", CERN-OPEN-2008-020, (2009), 査読有
2. G.Aad, S.Yamamoto 他 2919 人 2840 番目(ATLAS Collaboration), "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider", JINST, 3, S08003, (2008), 査読有
3. S.Yamamoto 他 ATLAS Collaboration, "Strategy for early SUSY searches at ATLAS", The proceedings of 15th International Conference on Supersymmetry and the Unification of Fundamental Interactions, hep-ex/07103953, (2007), 査読無

[学会発表](計 1件)

1. 山本 真平, 「ATLAS 実験初期における損失エネルギー・ジェットの測定能力の理解とその改善」, 日本物理学会(第64回年次大会)、30aSB-5、2009年3月、立教大学

6. 研究組織

(1)研究代表者

山本 真平 (YAMAMOTO SHIMPEI)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・
特任研究員
研究者番号：40451835

(2)研究分担者

(3)連携研究者