



# Search for charged stable massive particles in 7TeV proton-proton collision data with the ATLAS detector at the LHC

Matthew George Lecore King

---

(Degree)

博士 (学術)

(Date of Degree)

2013-03-25

(Date of Publication)

2013-07-04

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

甲5710

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/D1005710>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



(別紙様式3)

論文内容の要旨

氏名

KING Matthew George Lecore

専攻

Department of Physics

論文題目 (外国語の場合は、その和訳を併記すること。)

Search for charged stable massive particles in 7TeV proton-proton collision data with the ATLAS detector at the LHC

(LHCアトラス測定器での7TeV陽子陽子衝突における重い安定荷電粒子の探索)

指導教員

藏重 久弥

This thesis describes the functionality and performance of MuonBetaRefit, an analysis package designed to measure the velocity of muon-like tracks at the ATLAS experiment on the LHC. Such velocity measurements allow for the identification of charged stable massive particles(SMPs) at ATLAS. SMPs are a common feature of some proposed extensions to the standard model of particle physics.

The standard model represents our current understanding of the constituents of matter and the nature of physical forces. Despite the many successes of the standard model, it does not yet provide a complete description of the universe. For example, the large difference in strength between the electroweak and gravitational force can only be obtained from the standard model with fine tuning of model parameters. This apparent difference between the fundamental forces is known as the hierarchy problem.

An extension to the standard model which addresses the hierarchy problem is supersymmetry(SUSY). Essentially, SUSY postulates the existence of super-partners of each particle in the standard model. The quantum corrections introduced by these particles lead to a more natural resolution of the hierarchy problem than fine tuning of parameters. Many searches for evidence of SUSY have been carried out over the last few decades.

Gauge Mediated SUSY Breaking(GMSB) is a SUSY model whose phenomenology is dictated by the nature of the next to lightest SUSY particle(NLSP). GMSB particles decay in a cascade down to the NLSP, which then decays into the lightest SUSY particle, the gravitino, which is undetectable. For a large portion of the parameter space not excluded by previous searches, the NLSP is the stau, the super-partner of the standard model tau lepton. The lifetime of the NLSP depends on model parameters and can be long enough to be measureable in particle detectors. If the lifetime is long enough for the NLSP to traverse the entire ATLAS detector before decaying, it will be detected as a muon-like SMP. Other particles produced in these events vary depending on the decay chain, but typically contain a mixture of hadronic jets and high energy leptons, both charged and neutral.

The LHC is the world's largest and most powerful particle accelerator and in 2011 produced  $5.61\text{fb}^{-1}$  of collision data at a centre of mass energy of 7TeV. The ATLAS experiment is one of two general purpose particle detectors on the LHC. It is designed to detect as many particles being produced in collision events as possible, measuring their energy and momentum. It is capable of quickly filtering events produced by the LHC using triggers that quickly select events with interesting characteristics.

The reconstruction software at ATLAS does not, as standard, measure particle velocity, however, some detector technologies make time measurements of sufficient resolution to allow the velocity to be calculated. Particularly, the ATLAS muon

spectrometer has both the necessary time resolution and distance from the interaction point to allow velocity to be calculated accurately.

Standard muon reconstruction at ATLAS uses an assumed particle velocity equal to the speed of light. This can lead to mis-reconstruction of measurements made in the muon spectrometer Monitored Drift Tube(MDT) detectors, where particle time of flight is necessary to calculate the drift radius and hence measurement position. MuonBetaRefit uses the standard ATLAS reconstruction algorithms to build muon-like tracks at different assumed velocities in the muon spectrometer. This allows SMP tracks to be reconstructed correctly as well as providing a measurement of particle velocity from the MDTs. Measurements made by the muon spectrometer Resistive Plate Chambers(RPC) are also included in the track and have sufficient time resolution to make velocity measurements. The track reconstructed in the muon spectrometer is then extrapolated to the interaction point. Measurements from the calorimeter can be added to this extrapolated track, providing additional time measurements. MuonBetaRefit is thus capable of, for each reconstructed track, providing velocity measurements from three independent detector technologies; the MDT, the RPC and the calorimeter. These technologies have velocity measurement resolutions of around 3%, 2% and 9%; respectively.

The velocity measurements rely on the reliability of time measurements made by the detector, directly in the case of the RPC and calorimeter, indirectly in the case of the MDT. Additional time calibration was performed on each detector used to ensure the maximum velocity measurement accuracy possible. This is done using muons from  $Z \rightarrow \mu\mu$  events, with known velocity negligibly close to the speed of light. Each detector element was calibrated to a standard for that detector technology by calculating the average of times measured by that element over the entire 2011 run period. Each detector technology standard is then calibrated to the LHC clock on a run-by-run basis. Element calibration databases existed for the RPC and MDT but had to be constructed manually for the calorimeter. Databases for the run-by-run calibration had to be constructed manually for all detector technologies.

A search for SMPs was conducted in the framework of setting lower limits on the mass of the GMSB stau. The essence of this search was to calculate particle mass by measuring the velocity and momentum and test the results against predicted background for evidence of GMSB processes.

Events were selected from the 2011 data taking run at ATLAS using triggers for high momentum single muons and missing transverse energy. These two triggers were shown in simulations to have tagging efficiencies of around 80% on GMSB events. Tracks were reconstructed with MuonBetaRefit in these events and those with transverse momentum greater than 30GeV were selected. Each velocity measurement was checked for reliability by determining the number of time measurements it was

drawn from and whether these measurements were present throughout the whole track. Tracks with more than one reliable velocity measurement had the measurements combined into a single velocity measurement. These tracks were checked for velocity measurement consistency by comparing the individual reliable velocity measurements with the combined measurement. Any tracks with a velocity measurement more than  $2\sigma$  removed from the combined measurement were discarded. Remaining tracks were tagged as SMP candidates if all reliable velocity measurements were less than  $0.95c$ . SMP candidate tracks had their mass calculated and plotted.

The same procedure was applied to simulations of GMSB processes, resulting in a selection efficiency on stau tracks of around 35%.

Background was calculated in a data driven approach, by simulating random mismeasurement of velocity for each reliable velocity measurement. Reliable velocity measurement distributions for were obtained for each technology using muon tracks with transverse momentum greater than 10GeV. These distributions were split into regions of the detector with different velocity measurement resolution. Random mismeasurement of velocity in tracks can be simulated by converting these distributions into probability density functions(PDF) and drawing a velocity measurement at random.

Background tracks are created during the search for SMP candidates, immediately before checking for velocity measurement consistency. Any track with more than one reliable velocity measurement has 100 copies made with the same momentum vector, but all velocity measurements replaced with random values drawn from the appropriate PDFs. The tracks are then put through the same consistency and SMP candidate tests as the track with the true measured values, but when plotted are weighted appropriately.

The background present in searches for individual SMP candidate tracks is too great to draw any meaningful limits on GMSB cross sections. However, GMSB NLSPs are produced in pairs due to R-parity conservation. Searching for pairs of SMP candidates reduces the background far more than it does the signal and allows limits on the cross section to be drawn.

The limits set by this search exclude GMSB models with long live staus of mass lower than 260GeV over the whole parameter space considered. Staus lighter than 285GeV can also be excluded in some of the parameter space. By comparison, a recent study made by the SUSY SMP group at ATLAS excluded staus lighter than 285GeV over the whole parameter space and 300GeV in the areas this study excludes at 285GeV. This difference in limit setting strength can be partially attributed to the greater quantity of data usable by the SMP group. This study was limited by the availability of  $Z \rightarrow \mu\mu$  datasets needed to construct calibration databases.

This study sets limits on the cross sections of long lived GMSB staus using an implementation of standard ATLAS muon-reconstruction algorithms through MuonBetaRefit. The limits set are of comparable strength to those recently produced by the ATLAS SMP group, which uses dedicated SMP reconstruction software. MuonBetaRefit may be used in future searches for SMPs in the ATLAS muon spectrometer, including those predicted by models other than GMSB.

氏名	KING Matthew George Lecore		
論文 題目	Search for charged stable massive particles in 7TeV proton-proton collision data with the ATLAS detector at the LHC (LHCアトラス測定器での7TeV陽子陽子衝突における重い安定荷電粒子の探索)		
審査委員	区分	職名	氏名
	主査	教授	藏重 久弥
	副査	教授	播磨 尚朝 印
	副査	准教授	山崎 祐司
	副査		
副査			印
副査			印
要 旨			
<p>本論文は、スイス・ジュネーブの CERN 研究所で運転されている LHC 加速器での陽子衝突現象を観測するアトラス実験において、未知の準安定で重い荷電粒子を探索した結果およびその考察について述べたものである。特に、そこで探索感度を左右する重粒子の質量を再構成するためのアルゴリズムについて、著者が実際に運用・改良した部分を詳説し、その性能について詳しく論じている。</p> <p>第2章では、準安定で重い荷電粒子の存在が現在の素粒子物理学でなぜ期待されているかについて、理論的背景を論じるとともに、陽子散乱における生成過程とその特徴を述べている。現在の素粒子物理学は素粒子理論の標準模型でよく記述される。しかし、標準模型では重力とそれ以外の力の大きさの差を説明できないこと、暗黒物質を説明できないことなど様々な問題を抱えており、現在の実験で到達可能なエネルギーより高いエネルギー領域では、未知の粒子・相互作用を含む、標準模型を包含する別の理論によって記述されると考えられている。その代表である超対称性理論は、標準模型の全ての粒子に対してスピンの半整数異なる超対称粒子が存在するとする。これら超対称粒子の質量スペクトラムは様々なものが予言されているが、なかでももっとも軽い粒子群の質量差が小さいモデルは、暗黒物質となるもっとも軽い中性の超対称粒子とともに、それよりわずかに重い荷電超対称レプトンの存在を予言する。その質量差が非常に小さい場合は、荷電超対称レプトンの寿命が十分長くなり、検出器を貫通する性質がミュオン粒子に類似している。ミュオン検出器を用いてその飛跡をとらえて運動量を求め、さらに飛来時間からの速度測定とあわせて重粒子の質量を求めることで、重粒子を同定することができる。これら探索のバックグラウンドとなるのは、大量に発生する大きな運動量をもつ標準模型散乱過程からのミュオン粒子である。これらのことが論じられている。</p> <p>第3章では、この重粒子探索に用いた陽子衝突を実現する LHC 加速器、およびそれを観測する国際共同実験アトラスについて詳しく記述している。LHC 加速器については、特にこの探索に用いた 2011 年の衝突データの積算輝度について述べている。また、アトラス実験の検出器を詳説している。検出器は衝突点付近から内部飛跡検出器、カロリメータ、ミュオン検出器からなる。カロリメータは大量の物質で粒子を止め、その際のエネルギー損失から粒子のエネルギーを測定する。ミュオンおよびそれに類する重粒子はカロリメータを貫通し、ミュオン検出器を通過する。ミュオン検出器は内部飛跡検出器と同様磁場中に置かれており、粒子の曲がりから運動量を決定する。アトラス実験ではミュオンの運動量を精密に測定するためにミュオン検出器に注力しているが、その高精度飛跡測定のための検出器デザインについて、特にこのデータ解析に使用する RPC ミュオン飛跡検出器、MDT ミュオン飛跡検出器について詳しく述べている。また、これら検出器を用いた飛来時間測定の原理を説明し、最後に検出器のデータをリアルタイムで選別するトリガー装置、およびそこで使われている検出器信号について触れている。</p>			

氏名 KING Matthew George Lecore

第4章では、重粒子探索に用いた衝突データサンプルと衝突事象のシミュレーションサンプル、およびそれを取った条件（トリガー条件）について述べている。重粒子を生成する事象はミュオンに類似した荷電粒子の軌跡を検出器に残し、かつニュートリノが生成されやすいので横方向欠損運動量を生じる。これらの信号をトリガー条件に用いている。さらに、バックグラウンドとなる標準模型からのミュオンのサンプルを得るために、 $Z^0$  粒子がミュオン対に崩壊したものをを用いる。これらのことが記されている。

第5章では、本論文の主題である重粒子の質量の測定方法について述べている。ミュオン検出器や中央飛跡検出器で測定した運動量と測定した速度の情報を合わせれば、相対論的粒子の質量を計算でき、重粒子の質量を同定できるが、運動量の測定には十分な精度があるので、時間の測定精度が質量の測定精度をほぼ決定する。よって、飛来時間を正確に求めることが質量の精度、ひいては発見感度を高める。飛来時間はカロリメータ、RPC検出器、MDT検出器で求めるが、このうちカロリメータとRPCでは粒子通過の検出信号のタイミングから直接飛来時間が求められる。ただしその際に検出器の時間測定が加速器の衝突時間に対してずれると飛行時間を間違えるため、精密な時間の較正を行った。また、MDT検出器は粒子の飛来時間に応じて検出器のヒットパターンが変わることを利用して、仮定した最も確からしい飛行時間を間接的に求める。そのアルゴリズムにもMDTの時間較正を組み込んだ。また検出器の性質に起因する飛行時間の誤測定が大きな検出器の領域を詳細に調べ、誤認識の多い領域を排除して信頼できる測定のみを使用することとした。これらの改良をおこなった飛行時間測定の性能を評価するため、2ミュオンサンプルを用いて光速で走るミュオンを速度の遅い粒子（光速の95%以下）とする確率を求め、シミュレーションと比較した。検出器シミュレーションが検出器の時間信号を正確に再現するのは困難であるが、実際若干のずれがあることを指摘し、次章の重粒子探索では速度の誤測定の確率分布関数を2ミュオンのデータから導いたものとするべきであることを論じた。最後にこれら3つの検出器の情報を組み合わせ、3つの飛行速度の測定値が無矛盾な粒子を選ぶことにより、ミュオンが重粒子と誤認識される確率を大幅に減らせることを示した。

第6章では、前章で述べた重粒子同定アルゴリズムを用いてアトラス実験における2011年のLHC衝突データから未知の重粒子を探索した結果について述べている。前章で述べた通り、バックグラウンドは実データのミュオンを用いて見積もった。重粒子候補を1つ含む事象を用いた探索ではバックグラウンドの量が多く、新粒子発見の感度が低いことを示した。一方重粒子が2つ見つかることを要求する場合には、ミュオンが重粒子に誤認識される確率を0.01%に減らせることを示した。特に重い質量の領域(> 100GeV)では、超対称性を仮定した場合に新粒子の事象選別効率を10-20%に維持しながら、バックグラウンドの期待値が1を大きく下回らせることに成功し、もし重粒子事象が見つければほぼ必ず新粒子からの信号であるという状態までバックグラウンドを抑えることができた。2011年のデータではこのような重粒子は発見されなかった。実データを用いても残るバックグラウンドの不定性を見積り、生成断面積の上限を求めた。また、重粒子が超対称性レプトンであると仮定した場合の質量の下限値を求めた。下限値はアトラス実験で他の手法を用いた解析と比較され、ほぼ同じ感度があることを示した。

第7章では、これらの結果を総括した。

以上のように、この論文は、アトラス実験のミュオン検出器およびカロリメータを用いて重荷電粒子の速度を測定するアルゴリズムを2011年のデータに適用し、その結果を用いて重粒子を探索し、生成断面積の上限を求めたものである。このアルゴリズムを実際に運用するに当たっては検出器の時間較正が重要であるが、その手法を確立し、検出器の時間測定性能をほぼ限界まで引き出した。またその時間較正をどこまで行えば十分な性能が出るのかを考察し論文としてまとめることで、今後増加する同様のデータ解析に明快な指針を与えた。また、この手法が、類似するがより複雑な手法を用いたアトラス実験のデータ解析と比較して同等の性能を持っていることを生成断面積の上限値測定で示した。この上限値はこれまでの実験に対して有意に大きく、重粒子の探索に新たな制限を与えた。

よって、学位申請者の Matthew King George Lecore は、博士（学術）の学位を得る資格があると認める。