

平成22年 4月15日現在

研究種目：基盤研究（C）  
 研究期間：2005～2007  
 課題番号：17540281  
 研究課題名（和文） 超対称模型散乱振幅自動生成プログラムの作製とコライダー物理への  
 応用  
 研究課題名（英文） Development of an automatic amplitude generation program for  
 supersymmetric theories and its application to collider physics.  
 研究代表者  
 萩原 薫 (HAGIWARA KAORU)  
 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授  
 研究者番号：50189461

## 研究成果の概要：

本研究ではその目的とする散乱振幅自動生成プログラム MadGraph を超対称性を持つ素粒子模型に対応可能なプログラム (Super-MadGraph) に発展させ、それを用い LHC での超対称性粒子生成過程についてシグナルとバックグラウンドの評価を行った。Super-MadGraph を本研究で導入したワークステーション (madgraph.kek.jp) 上にて公開し、さらに KEK において Super-MadGraph を中心として HELAS/MadGraph/MadEvent を用いた新しい物理の研究についての講習会を行い、国内外からの多くの参加者を得ることが出来た。さらに LHC およびリニアコライダーで超対称性粒子が生成されその崩壊生成物として終状態にタウ粒子を含むプロセスの研究に Super-MadGraph を用い、このプログラムの有用性を示すことができた。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	1,400,000	0	1,400,000
2006年度	600,000	0	600,000
2007年度	600,000	180,000	780,000
2008年度			
年度			
総計	2,600,000	180,000	2,780,000

## 研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学 素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：散乱振幅の自動生成、MadGraph、HELAS、超対称性、ゲージボゾンフュージョン、LHC、リニアコライダー

## 1. 研究開始当初の背景

将来のコライダー実験で必要となる、多粒子生成断面積の効率的計算の為にヘリシティー振幅の数値的計算が有効であることは、萩原の1986年から1989年にかけての3論文 (K.Hagiwara 他, Nucl. Phys. B274, 1-32, 1986; B288, 782-788, 1987; B313, 560-594, 1989) で指摘され、その方針に従って、1991年にヘリシティー振幅計算のためのフォートランサブルーティンパッケージ HELAS

(H.Murayama, I.Watanabe, K.Hagiwara, KEK report 91--11) を作製した。1990年代の前半に、将来のリニアコライダーで必要となる多くの標準模型過程の断面積の計算が、HELAS を用いて実施された。わが国に於けるリニアコライダー物理の研究は、HELAS の利用によってその基礎が築かれたと言っても過言ではない。

1992年の夏に、日米夏期実習交流事業によって、当時米国ウイスコンシン大学大学院生

であった Tim Stelzer が KEK (現高エネルギー加速器研究機構) に1ヶ月半滞在し、萩原のもとで HELAS の使い方を学んだ。彼は帰国後、HELAS を用いた散乱振幅の自動生成プログラムを完成し (T.Stelzer and W.F.Long, *Comput. Phys. Commun.* 81, 357-371, 1994)、MadGraph と名付けた。MadGraph によって生成された HELAS プログラムは、散乱振幅の計算を高速で実行するため、この後現在に至るまで、あらゆる標準模型過程の計算に利用されている。2002年には、事象生成プログラム MadEvent (T.Stelzer and F.Maltoni, *JHEP* 0302: 027, 2003) も完成し、多くの実験家にも利用されるようになった。

一方、超対称性模型に関する研究は、萩原の最近 10 年間の研究の基幹をなすもので、MadGraph を超対称性模型に対応させる為に必要な、新しい HELAS サブルーティンを KEK の神前純一と共同で作製し、MadGraph を駆使するユーザー、マックスプランク研究所のハイゼンベルグフェロー Tilman Plehn とロチェスター大学助教授の Dave Rainwater 両氏との準備研究を進めてきた。全ての相互作用項の系統的な計算には、超対称性模型の輻射効果を考察するために、萩原とお茶の水女子大学助教授のチョーギョルが定式化したラグランジュアンを用いる。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、高速散乱振幅自動生成プログラム MadGraph を超対称性を持つ素粒子模型に対応可能なプログラムに発展させ、LHC と将来のリニアコライダーの物理に応用することである。

(1) 高速散乱振幅自動生成プログラム MadGraph を超対称性を持つ素粒子模型に対応可能なプログラムに発展させ、LHC と将来のリニアコライダーの物理に応用する。計画初年度に、最小超対称性標準模型 (MSSM) の最も主要な部分 (スカラーの4点相互作用を除いた部分) のプログラムを完成させ、試験版を公開し、且つ、LHC の物理に対する具体的な適用の検討を開始する。その後のプログラム作製作業は、まず非常に軽い (質量 1~GeV 以下の) グラヴィティーノが LSP (最小質量超対称性粒子) である模型、次に数十 GeV 以上の質量のグラヴィティーノが LSP である模型に拡張する。コライダーの物理への応用としては、計画当初から、既成の超対称性模型断面積自動生成プログラムでは効率的な計算が難しい考えられる重要過程、LHC に於ける弱ゲージボソンフュージョン過程でのカラー荷電を持たない超対称性粒子対生成シグナルとそのバック

クグラウンドの評価を行う。続けて、将来のリニアコライダーに於ける物理への応用を検討し、将来計画の作製に寄与する。スカラーの4点相互作用を含む完全版の作製、Rパリティを破る模型への対応は、物理的緊急度がより低いと判断し、上記主要目標の達成後に、取り組む。

(2) 研究を開始した 2005 年当時、ヒッグスボソンの発見と新しい物理の探索を目的とした LHC 実験が 2007 年度中に開始され、2008 年度には最初の物理的結果が得られることが期待されていた。最も有望な新しい物理の候補が、TeV 領域での超対称性を持つ標準模型であり、多くの研究者が、その現象論的帰結、特に将来のコライダーでのシグナルとバックグラウンドの評価を考察している。一方、LHC を含む将来の最高エネルギーコライダー実験では、対生成が期待される数百 GeV 質量の超対称性粒子それぞれが、クォーク、レプトン、ゲージボソンに崩壊するため、バックグラウンドは多数のクォーク、レプトン、ゲージボソンを生成する標準模型過程であり、その評価のためには、多体生成断面積の計算が不可欠である。この目的のために、多くの断面積自動生成プログラムが作製され、それらの比較検討作業が進められている。本研究計画で拡張発展の基礎となる MadGraph は、高速標準模型散乱振幅自動生成プログラムとして、LHC での8グルオンジェット生成過程等の記録を持つ優秀なプログラムで、その基幹部分に、研究代表者の萩原がその作製を指導したサブルーティンパッケージ、HELAS が採用されている。MadGraph を超対称性模型に対応した Super-MadGraph に発展させることで、バックグラウンドとシグナルを同一の高速プログラムで評価できるようになり、実験データと理論的予想との照合作業が効率化される。また、最適シグナルとして超対称性粒子対の他に、クォーク対或はレプトン対が生成されるゲージボソンフュージョン過程の様に、既存の超対称性模型散乱振幅自動生成プログラムでは計算時間がかかりすぎる過程の、効率的解析が可能になる。

(3) HELAS は KEK 理論部で生まれ、KEK で理論的研修を受けた米国の大学院生がその博士論文として、自動計算プログラム MadGraph に組み込んだことで、世界中で使用されるようになった。一方、やはり KEK 理論部で生まれ、継続的に育成されてきた散乱振幅自動生成プログラム GRACE も、この分野での日本発の重要な貢献に数えられる。ツリー近似での散乱振幅の高速計算に特化した MadGraph に対し、GRACE は輻射補正まで含めた自動計算を目指すなど、多

くの独特な機能を持ったプログラムであり、特に、電子陽電子衝突での超対称性粒子対生成過程の網羅的な計算等、最先端の成果をあげている。本研究計画で Super-MadGraph による超対称性標準模型の振幅が得られれば、高速計算を始める前に、GRACE によるチェックを行うことが可能となる等、細部に渡って完全に独立で且つ適用範囲の異なる2個の散乱振幅自動生成プログラムを有することの利点が数多く現れることが期待される。

### 3. 研究の方法

(1) 計画初年度に、最小超対称性標準模型(MSSM)の最も主要な部分(スカラーの4点相互作用を除いた部分)のプログラムを完成させ、試験版を公開し、且つ、LHCの物理に対する具体的な適用の検討を開始する。まず、萩原とお茶の水女子大のチョー(Gi-Chol Cho)との共同研究で準備された最小標準模型ラグランジュアンの全ての相互作用項を、MadGraph 形式に変換する作業を上記主要部分について完成せる。同時に、Super-MadGraph 用に改良された HELAS III パッケージを完成させ、そのマニュアルをウェブ上で公開する。

(2) この作業を進めつつ、準備が完了した相互作用項を含む超対称性粒子生成反応の散乱振幅を試験版の Super-MadGraph を使用して求め、LHCでの実験を想定したシミュレーションを開始する。最初のシミュレーション課題として、ゲージボソン融合過程に於ける全てのカラーを持たない超対称性粒子対(チャージノ対、チャージノ・ニュートラリーノ対、ニュートラリーノ対)全ての生成断面積を求め、その物理と、LHCでの観測可能性を議論する。

(3) 本研究計画の唯一の設備品目である高性能ワークステーションは、計画の初年度のできるだけ早い時期に導入して、HELAS III パッケージと Super-MadGraph の試験版とをインストールし、開発準備作業への活用を開始する。HELAS III 部分については、その初年度中の公開を目指すため、UPS 電源装置と RAID ハードディスク装置を初年度に購入する。UPS 電源装置は、停電等のトラブルを極力避けるために必要であり、RAID 機能を備えたネットワークストレージを導入することによって定期的な自動バックアップを行ない、ハードディスクトラブルによるデータの破壊、および喪失に対処する必要がある。

(4) 上記のインストール作業の為、萩原と神前が米国 Illinois 大学の Stelzer 教授を

訪ね、詳細な打ち合わせをする。この為の外国出張旅費を確保する。

### 4. 研究成果

本研究の目的は、高速散乱振幅自動生成プログラム MadGraph を超対称性を持つ素粒子模型に対応可能なプログラムに発展させ、LHCと将来のリニアコライダーの物理に応用することである。

(1) まず、最小超対称性標準模型(MSSM)の最も主要な部分(スカラーの4点相互作用を除いた部分)のプログラムを完成させ、試験版を公開し、且つ、LHCの物理に対する具体的な適用の検討を開始することを目指した。物理に関する研究は計画以上のスピードで順調に達成された。まず、主要項を全て含んだ Super-MadGraph の試験版が完成し、それをを用いてLHCに於ける弱ゲージボソン融合過程でのカラー荷電を持たない超対称性粒子対生成シグナルとそのバックグラウンドの評価を完成させた。結果は、投稿論文として、専門誌 Physical Review D に掲載された[雑誌論文3]。

また、同様の性能を有する他の独立なプログラム、Sharpa と Whizzard との定量的な比較を行った論文を完成させ、それも専門誌 Physical Review D に掲載された[雑誌論文4]。

LHCの物理への応用に関する上記2論文が計画よりも早く完成したのは、この物理に関する国際的関心の高さによる、国際競争の成果である。

(2) 一方、本科学研究費を使用して購入した高性能ワークステーション(madgraph.kek.jp)への Super-MadGraph の移植が計画初年度の末に成功した。

(3) 2006年10月18日から27日までの10日間、KEKに於て、HELAS と MadGraph、そして散乱事象生成プログラム MadEvent の講習会を開催した(<http://madgraph.kek.jp/KEK/Workshops/School-2006/index.html>)。新しい物理模型をユーザー自身が MadGraph に導入できる枠組みを準備している、ベルギーの Louvin 大学、Maltoni 教授のグループの大学院生、M.Herquet 氏、MadEvent とパートンシャワープログラム Pythia を用いてLHCでの多ジェット過程のシミュレーションを行っている米国 SLAC の J.Alawall 博士、そして、LHC での弱ボソン衝突過程に対する量子色力学の輻射補正研究の若手研究者ドイツ Karlsruhe 大学の B.Jaeger 氏の3名を講師として招き、萩原、神前と合わせて5名の講師による集中講義を、20数名の大学院生と

博士研究員、が聴講した。この講習会の参加者が、今後のLHCの物理研究の中心メンバーになることを期待している。

(4) 本研究の主軸は、この新しいプログラム Super-MadGraph を用いて、LHCと将来のリニアコライダーでの超対称性粒子探索の物理を検討することである。LHCの物理については、超対称性粒子対が生成され、それぞれがカスケード的に崩壊する過程の最後に、タウレプトンが現れる場合に、超対称性のシグナルを得ることができることを示した [雑誌論文5]。終状態にタウレプトンが現れるシナリオは、宇宙の暗黒物質が超対称性粒子である場合に予想されるので、我々のプログラムを有効利用することによって、LHCで暗黒物質を同定する可能性を示す研究である。次に、将来のリニアコライダー実験で、観測可能な崩壊粒子の分布を用いて、対生成された超対称性粒子のスピンを同定することが可能であることを示した [雑誌論文6]。新粒子のスピン同定こそが、超対称性の検証の鍵であり、この研究も高く評価されている。本研究によって完成した新プログラム SuperMadGraph の成功は、LHCに於ける新しい物理の効果を散乱振幅自動生成プログラムを用いてシミュレートする、という大きな潮流の先駆となった。

#### 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 6 件)

1. S.Y.Choi, K.Hagiwara, Y.G.Kim, K.Mawatari, P.M.Zerwas, “tau polarization in SUSY cascade decays”, Physics Letters, B648, 207-212, 2007, 査読有
2. S.Y.Choi, K.Hagiwara, H.-U. Martyn, K.Mawatari, P.M.Zerwas, “Spin Analysis of Supersymmetric Particles”, European Physical Journal, C51, 753-774, 2007, 査読有
3. J.A.Aguilar-Saavedra et al., “Supersymmetry parameter analysis: SPA convention and project”, European Physical Journal, C46, 43-60, 2006, 査読有
4. K.Hagiwara, K.Mawatari, D.Rainwater, T.Stelzer, “Correlated decays of pair-produced scalar taus”, Physical Review, D73:075010, 2006, 査読有
5. G.-C. Cho, K.Hagiwara, J.Kanzaki, T.Plehn, D.Rainwater, T.Telzer, “Weak boson fusion production of supersymmetric particles at the CERN

LHC”, Physical Review, D73:054002, 2006, 査読有

6. K.Hagiwara, F.Krauss, T.Ohl, T.Plehn, D.Rainwater, J.Reuter, S.Schumann, “Supersymmetry simulations with off-shell effects for CERN LHC and LC”, Physical Review, D73:055005, 2006, 査読有

[学会発表] (計 7 件)

\*著者先頭が登壇者、下線が本研究組織メンバー

1. 神前純一、浅井祥仁、田中純一「ATLAS 実験における ttH ( $H \rightarrow \gamma\gamma$ ) プロセスを用いた Higgs 粒子の性質の測定について」日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 26 日、近畿大学
2. 曹基哲、萩原薫、松本悠、野村大輔「Supersymmetric Standard Model and Precision experiments」日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 23 日、近畿大学
3. 神前純一、浅井祥仁、田中純一「ATLAS 実験における ttH ( $\rightarrow \gamma\gamma$ ) プロセスを用いた top 湯川結合定数の測定について」日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学
4. 曹基哲、萩原薫、野村大輔、松本悠「The MSSM confronts the precision electroweak data and muon  $g-2$ 」日本物理学会第 62 回年次大会、2007 年 9 月 24 日、北海道大学
5. 神前純一、兼田充、小林富雄、浅井祥仁、田中純一「ATLAS 実験における W ボゾン対への崩壊過程における Higgs 粒子の性質の決定」日本物理学会 2007 年春季大会、2007 年 3 月 27 日、首都大学東京
6. 萩原薫「LHC 前夜の素粒子論」日本物理学会 2007 年春季大会・招待講演、2007 年 3 月 25 日、首都大学東京
7. 松本悠、萩原薫「リニアコライダーにおける Higgs と Vector Boson の anomalous coupling の測定」日本物理学会第 61 回年次大会、2006 年 3 月 27 日、松山大学

[その他]

本研究の成果であるソフトウェア、及び研究会等の情報は以下のウェブにまとめられている。

<http://madgraph.kek.jp/KEK/index.html>

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

萩原 薫 (HAGIWARA KAORU)  
高エネルギー加速器研究機構  
素粒子原子核研究所・教授  
研究者番号: 50189461

(2)研究分担者

神前 純一 (KANZAKI JUNICHI)

高エネルギー加速器研究機構

素粒子原子核研究所・講師

研究者番号: 60169787