

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月17日現在

機関番号：82118
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2008～2012
 課題番号：20340064
 研究課題名（和文） LHCでの新しい物理発見に向けた散乱振幅自動生成プログラムの開発
 研究課題名（英文） Development of automatic amplitude generation program for new physics discovery at the LHC
 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（和文）：本研究では欧州原子核研究機構のLHC加速器の実験による新しい物理の発見を確実に実現するための物理解析ツールを開発した。グラフィックス・プロセッシング・ユニットの利用で多重ジェット生成過程を含む物理現象のシミュレーションの二桁近い高速化が実現され新しい物理現象に対するバックグラウンドの推定の高速化と精密化が可能となった。開発中のパートンシャワーとの接続により更なる精密なシミュレーションが期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study we developed physics analysis tools that contribute to the discovery of new physics at the LHC of CERN. By the use of graphics processing unit (GPU) we have achieved the improvement of the performance of the event generation program by two orders of magnitude. It makes possible more precise estimate of backgrounds from the standard model processes to new physics. Parton shower program currently under development is expected to improve the accuracy of the simulation further.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2009年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2010年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2011年度	2,800,000	840,000	3,640,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：素粒子物理学

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：素粒子物理学、素粒子論、素粒子実験、LHC、シミュレーション、GPU、国際情報交換（欧州）

1. 研究開始当初の背景

新しい物理の発見が期待される欧州原子核研究機構(CERN)でLHC加速器による実験開始を控え大量のデータ量による高い統計量に対応するため、物理プロセスシミュレーションの精度を高めることにより物理解析の精度を上げる必要性が認識されていた。そのため当時すでに広く利用されていた物理シミュレーションソフトである

MadGraph とその基幹ソフト HELAS を新しい物理に対応させるために発展させ、さらに並列計算システムを利用して高速化することで、より広い新しい物理モデルをカバーし、大量のデータ解析に対応するシステムの構築を目指した。

2. 研究の目的

本研究の目的は、2009年度に実験が開始さ

れた欧州原子核研究機構(CERNのLHC加速器で観測される新しい物理のシグナルとバックグラウンドの高速シミュレータを開発して、LHC 実験グループと全世界の素粒子研究者の用に供することである。その実現のため本研究は以下の5項目の実現を目指した。

- (1) LHC 加速器で行われる実験で期待される新しい物理のシグナルとそれに対するバックグラウンドのシミュレーションを高速に行うシステムを開発する。
- (2) 多様な新しい物理の可能性に対応するため、新しい HELAS サブルーチンを作成し、対応する MadGraph のアップグレードを国際協力で達成する。
- (3) シミュレーションプログラムを並列計算システムにより高速化する。
- (4) LHC 実験データを用いたソフトのチューニングのためにパートンシャワーとの接続を自動化する。また素過程に関するコードの最適化によって更なる高速計算を達成する。
- (5) すべての成果を適宜公開し、ATLAS/CMS 両実験と全世界の理論家の用に供する。

3. 研究の方法

本研究計画は以下の方法で遂行された。

- (1) 研究計画開始当初はシミュレーションの高速化のための並列計算システムとして通常の複数の CPU の利用に依る並列バッチシステムが想定されていたが、新たに高度の並列化が可能なグラフィック出力用半導体(GPU)を利用したシステムの開発へ発展させた。GPU 上で実行可能な物理現象のシミュレーションのためのソフトウェア(散乱振幅の計算、位相区間の生成、モンテカルロ積分とそれによる事象生成など)が開発された。
- (2) 新しい物理発見にとって重要な多重ジェット生成を含む事象のシミュレーションのために不可欠であるパートンシャワーとの接続の自動化を目指した。並行して多重ジェット生成過程のアルゴリズムの改良作業を行った。
- (3) 主要な新しい物理モデルに対応する新粒子と新相互作用のパッケージの整備、新しい物理モデルに対応するため主要な新しい物理モデルに対する新粒子と新相互作用のための HELAS および GPU 上の散乱振幅計算パッケージである HEGET のサブルーチン・関数を開発し MadGraph によるシミュレーションを可能にした。
- (4) すべての成果は学会発表、および論文として発表した。また開発されたソフトウェアについてはウェブを通じ全世界への公開を行った。

4. 研究成果

本研究の主な成果については以下の様にま

とめられる。

(1) 並列計算システムを利用した高速シミュレーションシステムの開発は、LHC 実験解析でも広く利用されている MadGraph をベースとして、安価で高い並列性が実現可能な GPU のシミュレーション計算への利用を可能としたことにより、従来システムに比較して計算効率を飛躍的に高めることに成功した。これらの高速計算を逐次改良型モンテカルロ積分として実施することで、LHC における効率の高い事象生成プログラムを実現する

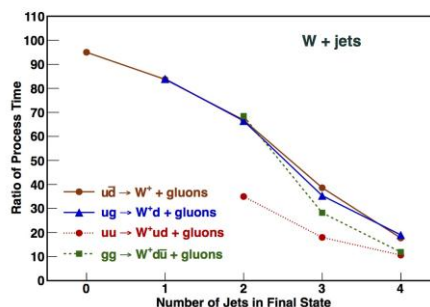


図 1 GPU による W ボゾンとジェット生成過程の計算時間

の改善

ことが可能となった。

図 1 は W ボゾンに 4 ジェットまでの生成過程が含まれる場合の断面積の計算に GPU を利用した場合にどれくらいの計算効率の改善が得られるかを示したもので、従来の CPU を利用した計算に比較し、10 倍から 100 倍の計算効率の改善が可能となった。事象生成プログラムについても GPU の高い並列性を活用することで同様に生成効率の大きな改良が実現された。

(2) LHC の初期の多重ジェット生成データを用いて散乱振幅とパートンシャワーの接続を自動化し、主な素過程のソフトウェアコードの最適化等により、更なる高速計算を実現するという目標に関しては、様々なパートンシャワープログラムを検討した結果、摂動 QCD の様々な不定性を評価できる新しいパートンシャワーを独自に開発する必要性が明らかとなった。基礎的な研究は、共同研究者である KEK の外国人研究員、Kirilin 博士が中心となり行われ、さらに(1)の成果として実現した逐次改良型モンテカルロ積分法による物理過程生成断面積の高速計算に接続するための、コンパクトで高効率、且つ GPU 上での演算が可能な新しいパートンシャワーを開発された。この研究の中核を担っていた Kirilin 博士が 2011 年度中にドイツのミュンヘン工科大学に着任されたため、研究開発は電子メールやビデオ会議を駆使して進められた。

以上、(1)および(2)の成果の応用として、テヴァトロンに於けるトップクォーク対生成の全後方非対称性に対するバックグラウンド

の計算を行った。W ボソンと最低 4 ジェット生成を含む素過程がバックグラウンドとなり、GPU による高速計算の利点が発揮された。成果は、共同研究者の高江洲義太郎博士により、国際会議「QCD12」で発表された。

(3) 素粒子の標準理論を越える新しい物理模型に基づく新たな散乱振幅の計算パッケージを HELAS をベースとして作成し、高速シミュレーションシステムの付属ライブラリーとするという目標については、重いスピン 2 粒子およびスピン 3/2 粒子、特にグラビティオンを含む散乱振幅の計算の自動化が達成された。これによりグラビティオンが最小質量超対称性粒子となる多くの模型のシミュレーションが可能となった。

以上、本研究計画で達成された、標準模型及び新しい物理模型の高速シミュレーション機構は、散乱振幅計算に関してはすでにテスト段階を終了し、一般の研究者が利用する計算センターの実証段階に達している。数十個の GPU クラスタを基幹とした計算センターは科学研究費の範囲で作ることができるため、物理解析の多様性を確保することができる。日本で開発された新たな基幹技術なので、最初の実証施設を国内に設置したい。

(4) すべての成果は学会発表、および論文として発表された。今後も引き続き研究成果を積極的に発表する。また本研究を通じ開発されたソフトウェアについては <http://madgraph.kek.jp/KEK/> 上で公開されており、ウェブを通じ全世界の研究者の用に供されている。

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 19 件)

- ① K. Hagiwara, "Null radiation zone at the LHC" *Phys.Rev. D* 87(2013)14021, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevD.87.014021
- ② K. Hagiwara, "On the W+4jets background to the top quark asymmetry Kaoru Hagiwara at the Tevatron", *Nucl.Phys.Proc.Suppl.* 234(2013)93-96,
DOI:10.1016/j.nuclphysbps.2012.11.022
- ③ K. Hagiwara, "Properties of 125 GeV Higgs boson in non-decoupling MSSM scenarios", *JHEP* 1210(2012)002, 査読有
DOI:10.1007/JHEP10(2012)002
- ④ K. Hagiwara, "Diquark contribution to Top quark charge asymmetry at the Tevatron and LHC" *JHEP* 1302(2013)100, 査読有

DOI:10.1007/JHEP02(2013)100

- ⑤ G.C. Cho, K.Hagiwara, Y.Matsumoto, D.Nomura, "The MSSM confronts precision electroweak data and the muon g-2", *JHEP* 1111(2011)068, 査読有
DOI:10.1007/JHEP11(2011)068
- ⑥ K. Hagiwara, R. Liao, A.D. Martin, D. Nomura, T. Teubner, "g-2 of the muon and alpha at mZ re-evaluated using new precise data", *J.Phys. G* 38(2011)085003, 査読有
DOI: 10.1088/0954-3899/38/8/085003
- ⑦ P. de Aquino, K. Hagiwara, Q. Li, F. Maltoni, "Simulating graviton production at hadron colliders", *JHEP* 1106(2011)132, 査読有
DOI:10.1007/JHEP06(2011)132
- ⑧ J.Kanzaki, "Monte Carlo integration on GPU", *Eur.Phys.J. C* 71(2011)1559, 査読有
DOI:10.1140/epjc/s10052-011-1559-8
<http://madgraph.kek.jp/KEK/>
- ⑨ K. Hagiwara, K. Mawatari, Y. Takaesu, "HELAS and MadGraph with spin-3/2 particles", *Eur.Phys.J. C* 71(2011)1529, 査読有
DOI:10.1140/epjc/s10052-010-1529-6
<http://madgraph.kek.jp/KEK/>
- ⑩ K. Hagiwara, J. Kanzaki, N. Okamura, D. Rainwater, T. Stelzer, "Calculation of HELAS amplitudes for QCD processes using graphics processing unit (GPU)", *Eur.Phys.J. C* 70(2010)513-524, 査読有
DOI:10.1140/epjc/s10052-010-1465-5
- ⑪ K. Hagiwara, J. Kanzaki, N. Okamura, D. Rainwater, T. Stelzer, "Fast calculation of HELAS amplitudes using graphics processing unit (GPU)", *Eur.Phys.J. C* 66(2010)477-492, 査読有
DOI:10.1140/epjc/s10052-010-1276-8
- ⑫ K.Hagiwara, H.Yokoya, "Bound-state effects on gluino-pair production at hadron colliders", *JHEP* 0910(2009)049, 査読有
DOI:10.1088/1126-6708/2009/10/049
- ⑬ K.Hagiwara, Q.Li, K.Mawatar, "Jet angular correlation in vector-boson fusion processes at hadron colliders", *JHEP* 0907(2009)101, 査読有
DOI:10.1088/1126-6708/2009/07/101
- ⑭ S.Dutta, K.Hagiwara, Y.Matsumoto, "Measuring Higgs-Vector boson Couplings at Linear e+e- Collider", *Phys.Rev. D* 78(2008)115016, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevD.78.115016
- ⑮ K. Hagiwara, Q. Li, J. Kanzaki, K.

Mawatari, "HELAS and MadGraph/MadEvent with spin-2 particles", Eur.Phys.J. C56(2008) 435-447, 査読有
DOI:10.1140/epjc/s10052-008-0663-x
<http://madgraph.kek.jp/KEK/>

- ⑩ K.Hagiwara, Y.Sumino, H.Yokoya, "Bound-state Effects on Top Quark Production at Hadron Colliders", Phys.Lett. B666(2008)71-76, 査読有
DOI:10.1016/j.physletb.2008.07.006
- ⑪ A.Bredenstein, K.Hagiwara, B.Jager, "Mixed QCD-electroweak contributions to Higgs-plus-dijet production at the LHC", Phys.Rev. D77(2008)073004, 査読有
DOI:10.1103/PhysRevD.77.073004
- ⑫ K. Hagiwara, P. Konar, Q. Li, K.Mawatari, D.Zeppenfeld, "Graviton production with 2 jets at the LHC in large extra dimensions", JHEP 0804(2008)019, 査読有
DOI:10.1088/1126-6708/2008/04/019
- ⑬ S. Dutta, K. Hagiwara, Q. S. Yan, K.Yoshida, "Constraints on the electroweak chiral Lagrangian from the precision data", Nucl.Phys. B790(2008)111-137, 査読有
DOI:10.1016/j.nuclphysb.2007.08.017

[学会発表] (計 17 件)

- ① 神前純一 「Coherent Branching Algorithm に基づくパートンシャワープログラムの開発」日本物理学会 2013 年年次大会、2013 年 3 月 26 日、広島大学
- ② Kaoru Hagiwara, "Introduction to Hadron Collider Physics" 25th Spring School on Particles and Fields 2012 (招待講演) 2012 年 4 月 5 日～2012 年 4 月 8 日 国立台湾大学 (台湾)
- ③ Y. Takaesu, "W+4 jets background for the top forward-backward asymmetry at Tevatron", QCD 12, 16th International QCD Conference, 2012 年 7 月 2 日、Montpellier (フランス)
- ④ 神前純一 「GPU を利用した高速事象生成システムの開発」日本物理学会第 67 回年年次大会、2011 年 3 月 26 日、関西学院大
- ⑤ 高江洲義太郎 「散乱振幅自動計算プログラム Madgraph への gravitino の実装およびその現象論」日本物理学会第 65 回年年次大会、2010 年 3 月 22 日、岡山大学
- ⑥ 神前純一 「LHC 実験」KEK 理論研究会 (招待講演)、2010 年 2 月 19 日、KEK
- ⑦ 岡村直利 「GPU を用いた散乱振幅計算の高速化 1」日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 12 日、甲南大学

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

神前 純一 (KANZAKI JUNICHI)

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・講師
研究者番号：60169787