

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 19 日現在

機関番号：32206

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22740155

研究課題名(和文) GPGPU技術の素粒子現象論研究への応用

研究課題名(英文) Investigate the application of the GPGPU technology to research of particle physics.

## 研究代表者

岡村 直利 (Okamura, Naotoshi)

国際医療福祉大学・保健医療学部・講師

研究者番号：40402812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：新しい数値計算技術であるGPGPU技術が素粒子現象論、特にLHC実験に関係する研究に必要な生成散乱断面積を計算するシステムの高速化に応用可能か検証することをめざし、標準模型に含まれる全粒子を含んだ生成散乱断面積を、GPU上で計算するためのサブルーチン集HEGET(HELAS Evaluation with GPU Enhanced Technology)を作成した。

HEGETをGPU上でモンテカルロ積分を行うプログラムと合わせて使うことで、従来のシステムと同精度のまま、プログラムの開始から終了までの時間を、多数のjetを含む場合を除いて、遅くても約10倍、最大で100倍程度の高速化を実現した。

研究成果の概要(英文)：We investigate the applicability of the GPGPU (General Purpose computing on Graphics Processing Unit) technology to improve the computation time for the research of particle physics, LHC physics, by taking advantage of GPU parallel processing capability.

We develop the HEGET (HELAS Evaluation with GPU Enhanced Technology) subroutines for fast calculations of the helicity amplitude for general Standard Model processes. All the cross section computed by HEGET/gBASES, where gBASES is the GPU version of the Monte Carlo integration program, are found to agree with those computed by CPU within the expected numerical accuracy. The performance of the HEGET/gBASES system is over a factor of 10 faster than CPU system. Especially, the computation time for the simple processes with GPU is about 100 times faster than that with CPU. On the other hand, GPU system cannot improve the computation time for the processes with the highest number of jets.

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：素粒子(理論) 加速器物理 計算機シミュレーション

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 2009 年中に欧州原子核研究機構 (CERN) において大型ハドロン加速器 (LHC) の本格運用が始まる。LHC 実験の目的は素粒子標準模型の根幹である電弱ゲージ対称性の自発的破れを担う Higgs 粒子の発見や、超対称性に代表される標準模型を超えた物理現象の観測である。これらの発見・観測は素粒子物理学ばかりでなく、宇宙創成の物理にも関係するものであり、我々が新たな自然観を構築するための歴史的な契機となりえる。

(2) LHC 実験で観測される全事象の中から、既知事象に比べ非常に稀な事象である Higgs 粒子や超対称粒子に由来する新事象を特定するためには、実際の実験データと計算機を用いて得たシミュレーション結果を比較し、既知理論では説明できない事象を抽出することからはじまる。その抽出には、実際のデータを用いてシミュレータを逐次改良しながら、繰り返し既知理論に由来する事象をシミュレータで生成し、その計算結果と実際のデータを比較することで初めて可能となる。この逐次改良には膨大な数値計算を行う必要があるため、グリッドコンピューティングシステムなどの大規模な計算システムが開発されてきた。しかし、これらのシステムは理論研究者などの小グループが気軽に利用できるシステムでなく、個人で利用できる安価なシステムが研究の多様性の確保の為に必要とされている。

(3) 一方で、計算機技術の進展に目を向けると、超並列演算を得意とする GPU (グラフィックス描画用プロセッサ) をグラフィック描画だけではなく、汎用的に用いる技術 (GPGPU 技術) が開発され、学術計算をはじめ様々な分野で応用され始めている。GPGPU 技術は安価に導入できる計算機技術のため、個人レベルで高速なシステムを構築するのに向いている。この新しい計算機技術を素粒子現象論研究、特に LHC 実験から得られた実験データの解析や、素粒子現象論の研究者による理論研究に導入できれば、従来の手法を大きく転換する可能性がある。

## 2. 研究の目的

(1) 本研究の目的は、新しい数値計算技術である GPGPU 技術が、素粒子現象論、特に LHC 実験に関係する研究に必要な素粒子生成事象をシミュレートする数値計算システムの高速化に応用可能か検証することである。

(2) 高速化可能であれば、これまでの CPU を用いた計算と比較して、どの程度高速化できるのか、また、その計算精度はどの程度か等を明らかにする。

(3) 研究を進める際に得られた、技術情報や成果物を公開し、GPGPU 技術の応用促進を図

る。また技術情報の提供等により、素粒子現象論分野以外への波及効果も企図する。

## 3. 研究の方法

(1) 最も開発環境が整備されている NVIDIA 社の GPU に対応する開発環境である CUDA 環境を用いて研究・開発を遂行する。

(2) CUDA 環境が利用できる複数の OS に環境を整え、より広い環境下で GPGPU 技術の応用可能性を検証すると共に、情報提供を行い、利用促進を図る。

(3) CUDA は NVIDIA 社製の GPU 専用の開発環境である。より多くの環境で、GPGPU 技術の成果が利用できるように、GPU を含めた many core system の統一開発言語である、OpenCL を用いた研究・開発を行う。

## 4. 研究成果

(1) 申請時に投稿していた QED (量子電磁気学) や QCD (量子色力学) に基づいた粒子生成散乱断面積を、GPU を用いて高速計算するシステムについての論文を完成させた。その後、標準模型に含まれる全粒子を含んだ粒子生成散乱断面積を、GPU 上で計算するためのサブルーチン集 HEGET (HELAS Evaluation with GPU Enhanced Technology) を完成させた。GPU 上でモンテカルロ積分を行うプログラム (gBASES) を HEGET と合わせて使い、下記の様々なプロセスについて生成散乱断面積等について計算を行い、その計算精度や速度向上率を検証した。

- a.  $W/Z + n\text{-jets}$  ( $n \leq 4$ )
- b.  $WW/WZ/ZZ + n\text{-jets}$  ( $n \leq 3$ )
- c.  $t\text{-quark pair} + n\text{-jets}$  ( $n \leq 3$ )
- d.  $HW/HZ + n\text{-jets}$  ( $n \leq 3$ )
- e.  $H+t\text{-quark pair} + n\text{-jets}$  ( $n \leq 2$ )
- f.  $H^k + (n-k)\text{-jets via WBF}$  ( $k \leq 3, n \leq 5$ )

a, b. において、 $W, Z$  は  $W, Z$ -ボソンを示し、本研究では、これらの粒子がレプトン (電子、 $\mu$  粒子、ニュートリノ) に崩壊する場合についてのみ計算を行った。また、d. 以降の  $H$  は Higgs 粒子を示し、本研究では質量を 125 GeV と仮定し、 $\tau$  粒子と反  $\tau$  粒子のペアに崩壊する場合 (崩壊比を 0.0405 と仮定) についてのみ計算を行った。c. と e. のプロセスで生成された  $t\text{-quark}$  とその反粒子のペア ( $t\text{-quark pair}$ ) は、それぞれ  $b\text{-quark}$  やその反粒子と荷電レプトンとニュートリノのペアに崩壊する場合 ( $t \rightarrow b \mu^+ \nu_\mu$  等) についてのみ計算を行った。上記プロセスで生成された重いボゾンや Higgs 粒子、 $t\text{-quark}$  ペアには本来なら様々な粒子への崩壊モードが存在するが、本研究の目的が、標準模型に含まれる粒子の生成・崩壊パターンの解析ではなく、本研究課題で作成した HEGET ルーチンの計算精度や GPU を使用した時の高速化率の測定であるため、重要な崩壊モードだけを使って計算精度の確認や計算速度の測定を行った。同様に

Higgs 粒子の自己相互作用に関係するルーチンを確認するために、f. の weak-boson fusion(WBF)プロセスについても計算を行った。なお、すべての計算はCPU上でもGPU上でも倍精度で行っている。詳しい開発環境等は(7)を参照。

(2) HEGET/gBASES システムの生成散乱断面積の計算精度を確認するために、HEGET 設計の基礎となった、CPU 上で同様の計算を行うサブルーチン集 HELAS (HELicity Amplitude Subroutines) と、gBASES と同じアルゴリズムを持ち、CPU 上で動作するモンテカルロ積分プログラム BASES を用いて上記プロセスの計算を行った。またイベントシミュレータとして広く利用されている MadGraph (Ver. 5) を用いても同様の生成散乱断面積の計算を行い二重の確認を行った。これら旧来から使われている CPU 上のシステムの計算結果と HEGET/gBASES システムの計算結果は多くの場合、数値計算の誤差の範囲で一致した。特に HEGET/gBASES システムと HELAS/BASES システムは、その基本となる部分が同じであるため、計算した全プロセスについて計算結果は誤差の範囲で良い一致を示した。その一方で MadGraph の計算結果と HEGET/gBASES の結果を比較すると、終状態の jet 数が多いプロセスでは、数値計算の結果に僅かな差異がみられる時もあった。この差異は HEGET/gBASES システムと MadGraph の間だけではなく、HELAS/BASES と MadGraph の結果の間にもあることから、それぞれのシステムに含まれるモンテカルロ積分のアルゴリズム部分に起因する差異であると思われる。しかし、その差異を大きなものではなく、実用上大きな問題にはならないと思われる。これらの結果から、本研究の成果物である、HEGET/gBASES システムは、これまで利用されてきた、CPU 上の計算システム (HELAS/BASES, MadGraph) と同等の計算結果を同精度で出すシステムであると言える。

(3) HEGET/gBASES システムの基本的な計算アルゴリズム等は CPU 上で動作する HELAS/BASES システムと同じである。そこで、本研究ではアルゴリズムによる速度差ではなく、CPU で動作するシステムと GPU で動作するシステムの速度差を測定する為に、HEGET/gBASES システムと HELAS/BASES システムの 2 システムの計算時間を比較することで高速化率を求めた。CPU と GPU の計算速度を比較する際に、同じ計算を CPU と GPU のそれぞれに実行させた際の計算時間だけを計測し高速化率を算出する場合もあるが、本研究では、より実用に近い状態での高速化率を知る為に、CPU/GPU 共に、プログラムの開始から終了までの総時間、つまり HEGET/gBASES システムでは GPU で計算を開始するまでの CPU での準備時間や GPU での計算終了後の CPU での処理時間なども含めて時間計測を行

い、その比率から高速化率を求めることとした。

① 全体的に、高速化率は計算すべきプロセスの複雑さ、つまり、寄与するファインマンダイアグラムの数や QCD に由来する因子計算が煩雑になるほど低下した。GPGPU 技術の特性として、GPU での計算前に GPU 上のメモリーに計算に必要な情報を転送したり、計算後に GPU での計算結果を CPU に転送したりする必要があるため、全計算時間を基準に高速化率を測定した場合、計算対象によっては、CPU-GPU 間の情報転送に時間がかかり、GPU による計算の高速化分が償却され、全体として高速化されない場合がある。しかし、本研究では、単純なプロセスほど GPU での高速化率が高くなったことから、本研究の対象となる計算が、メモリー転送等を少なくし、GPU での高速化の恩恵を得やすい、GPGPU 技術向きの計算であることが分かった。

② GPU のハードウェア的特性上、GPU 上で一度に計算できる量に制限がある。そのため、複雑な生成散乱断面積 (例:  $uu \rightarrow Z+uu+gg$ ) を計算する際には、GPU 上で実行するプログラムを複数のプログラムに分割し、計算を行う必要があった。このようなプログラムの分割を行った場合、他の分割を必要としない類似のプロセスと比較して、高速化率が低下することが分かった。例えば、上記に例として挙げた  $uu \rightarrow Z+uu+gg$  は、他の  $Z+4jets$  プロセスが 10 倍以上の高速化を実現している中、5 倍程度の高速化にとどまった。分割による低速化は今後の技術革新によって GPU 上で一度に計算できる量が増えれば、改善されると思われる。

③ 以下、(1)で列挙したプロセスごとに高速化率を簡単にまとめていく。

a.  $W/Z + n-jets$  ( $n \leq 4$ ): 終状態に jet がないプロセス ( $n=0$ ) では、高速化率は約 100 倍程度あったが、終状態に jet を 4 本含む場合 ( $n=4$ )、単一の GPU プログラムで計算できるプロセスでは約 10 倍の高速化となったが、上述した GPU 上で実行するプログラムを複数に分割しなければならぬ複雑なプロセスでは 5 倍程度の高速化に留まった。ここで、同じ jet 数ながら、GPU プログラムの分割の有無がでてくるのは、jet を発生させる終状態の粒子がクォークかグルーオンかで GPU プログラムの分割の有無が決まるためである。

b.  $WW/WZ/ZZ + n-jets$  ( $n \leq 3$ ): 終状態に jet がないプロセス ( $n=0$ ) では、高速化率は約 60 倍程度であった。一方、3jets のプロセスでは単一の GPU プログラムで計算が終わる場合には、約 10 倍程度の高速化率となったが、GPU 上でのプログラムを分割する必要がある場合には  $WW+3jets$  のプロセスで 5 倍程度、 $WZ/ZZ+3jets$  では 8 倍程度の高速化となった。

c. t-quark pair + n-jets ( $n \leq 3$ ): jet を伴わずに、t-quark ペアだけが生成される場合 ( $n=0$ ) は約 90 倍の高速化が実現できたが、3jets を伴うプロセスの場合、GPU 上で実行するプログラムを分割する必要があり、高速化率は 5 倍程度にとどまった。

d. HW/HZ + n-jets ( $n \leq 3$ ): これらのプロセスは、a. として挙げたプロセス (W/Z + n-jets) の終状態にある W/Z ボゾンから Higgs 粒子が放出されたプロセスである物理的にはみなせる。そのため、高速化率も a. のプロセスとほぼ同じで、 $n=0$  の時に約 90 倍、 $n=3$  の時には約 20 倍程度の高速化となった。

e. H+t-quark pair + n-jets ( $n \leq 2$ ): jet が無い場合 ( $n=0$ ) では 70 倍程度の高速化となるが、2jets の場合には、GPU プログラムを分割しないプロセスでは 20 倍程度、分割が必要なプロセスでは約 10 倍の高速化率であった。

f.  $H^k + (n-k)$ -jets via WBF ( $k \leq 3, n \leq 5$ ): WBF (Weak Boson Fusion) プロセスによって Higgs 粒子が 1 つ生成され ( $k=1$ )、さらに、jet が 2 本ある ( $n=2$ ) 最も単純なプロセスでは、70 倍以上の高速化が達成できた。また、Higgs 粒子 1 個と jet が 4 本生成される場合には 30 倍程度高速になった。Higgs 粒子 2 つと jet が 2 本生成されるプロセスでは、70 倍以上、3jets では約 50 倍の高速化率となった。Higgs 粒子が 3 個と jet が 2 本生成されるプロセスは、生成散乱断面積が小さいが、スカラー粒子の 4 点結合を計算するルーチンに問題がないか確認するために、計算を行った。GPU での計算結果は HESLA/BASES と誤差の範囲で一致する一方で、計算速度が 50 倍程度高速化することを確認した。

④ 計算結果をまとめると、本研究の成果物である HEGET/gBASES システムを用いると、新しい数値計算技術である GPGPU 技術が、素粒子現象論、特に LHC 実験の結果解析に必要な素粒子生成事象をシミュレートする数値計算システムを高速化することができ、その高速化率は最大で 100 倍程度、遅くても GPU 上で実行するプログラムを分割する必要がない場合には 10 倍程度、分割が必要な場合でも 5 倍程度高速化可能であることが分かった。

(4) 国際会議として “GPU in High Energy Physics<sup>i</sup>” が開催されるなど、GPGPU 技術は今後、素粒子現象論研究に活用されるようになると思われる。このような流れの中で本研究は GPGPU 技術を素粒子現象論研究に応用する先駆的研究の 1 つとなった。今後、本研究を行う上で得られた論文として発表した、GPGPU 技術の活用手法や、研究結果、成果物は様々な方面で活用されていくと期待して

いる。

(5) 本研究の成果物 (HEGET) は、本研究でも使用した、MadGraph のような、計算したい粒子反応・生成プロセスを指定すると、自動的に実行プログラムを組みあげ、計算を行う自動シミュレーションシステム等に組み込まれていくものと期待している。

(6) 本研究では NVIDIA 社の開発環境 CUDA を使って研究を行った。今後は AMD 社などの他社の GPU や、より一般的な many core system で本研究成果と同等の数値計算システムを構築できるように、GPU 等の many core system の統一開発言語である、OpenCL 環境を用いたシステムの開発が必要であると思われる。

(7) 研究に使用したシステム・開発環境の一覧を以下に掲載する。

① GPU (Tesla C2075)

CUDA core 数	448
Global memory 量	5.4GB
Constant memory 量	64kB
Shared memory/block	48kB
Register/block	32768
Clock rate	1.15GHz

② CPU (Intel Core i7)

Clock rate	2.67GHz
Cache size	8192kB
Memory	6GB

③ 開発環境

CUDA compiler	Rel 4.2 (V0.2.1221)
CUDA driver	Ver 4.2
CUDA Runtime	Ver 4.2
gcc	4.4.5 (RedHat4.4.5-2)
OS	Fedora 13 (64bit)

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 1 件)

- ① “Fast computation of MadGraph amplitudes on graphics processing unit (GPU)”, K. Hagiwara, J. Kanzaki, Q. Li, N. Okamura, T. Stelzer, Eur.Phys.J. C73 (2013) 2608 (査読あり), DOI: 10.1140/epjc/s10052-013-2608-2

[学会発表] (計 6 件)

- ① “GPU を利用した高速事象生成システムの開発”, 岡村直利, 神前純一 (登壇者), 萩原薫, 日本物理学会 春の総会 関西学院大学, 2012 年 3 月 26 日.
- ② “Fast computation of MadGraph amplitudes on GPU”, N. Okamura, KIAS phenomenology workshop, KIAS, Seoul, Korea, Nov. 18, 2011.

- ③ “GPUによる簡易型測定器シミュレーションプログラムの高速化”, 岡村直利, 神前純一(登壇者), 萩原薫, 日本物理学会 秋の分科会 弘前大学 2011年9月16日.
- ④ “Fast computation of MadGraph amplitudes on GPU” N. Okamura, 2011 IPMU-YITP School and Workshop on Monte Carlo Tools for LHC, 京都大学 基礎物理学研究所, Sept. 9, 2011.
- ⑤ “GPUの利用による高速事象生成”, 岡村直利, 神前純一(登壇者), 萩原薫, 日本物理学会 春の総会 新潟大学 2011年3月25日.
- ⑥ “GPUを用いた高エネルギー実験用ソフトウェアの高速化”, 岡村直利, 神前純一(登壇者), 萩原薫, 日本物理学会 秋の分科会 九州工業大学 2010年9月14日.

〔図書〕(計 0件)

なし

〔産業財産権〕

○出願状況(計 0件)

なし

○取得状況(計 0件)

なし

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.tppl.iuhw.ac.jp/> (申請中)

現在 <http://j1003.iuhw.ac.jp:40080/>にて仮運用中

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡村 直利 (OKAMURA, Naotoshi)

国際医療福祉大学 保健医療学部 放射線・情報科学科 講師

研究者番号: 40402812

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

---

<sup>i</sup> <http://www.pi.infn.it/gpu2014>