

## 課題名 (和文) マルチループファインマン積分の高精度計算

## 課題名 (英文) High-precision Calculation of Multi-loop Feynman Integrals

代表者氏名 中里直人

所属 会津大学

### 1. 研究目的

ヒッグス粒子の発見後、高エネルギー物理学実験におけるエネルギーフロンティアでの精密測定により標準理論の限界への挑戦が続けられている。理論においても精密な予測値が求められ、摂動法による高次補正を含めた精密計算の必要性が増してきている。摂動法ではファインマン則に従って散乱振幅を計算するが、高次補正計算ではループを含むファインマングラフも対象となり、マルチループのファインマン積分が現れる。

将来の高エネルギー物理学実験では、0.1%の理論精度が要求されている。これを達成するために、高次補正計算に現れるマルチループのファインマン積分の計算法の研究が世界で進められている。高次補正計算に必要なマルチループ積分には様々な内線の質量/外線運動量が出現するため現状では解析的に求めることは困難である。

本研究の目的は、多様なトポロジーを持つファインマングラフの積分を高速に精度よく数値計算する方法を開発することである。高次補正計算では、ファインマングラフの数とグラフあたりの計算量が著しく増加するが、GPU を使って高速に大量に計算できるようにする。Miyabi-G/Pegasus による量産計算が可能になれば、世界の高エネルギー物理学実験での物理解析等に必要とされる理論予測値を与えることができるようになる。

### 2. 研究成果の内容

#### (1) DE 積分法による 3 ループ 2 点ファインマン積分の運動量依存性の検証

プロダクトランに先立ち、まずは、以下の計算コードの改善を行った。

##### (a) 領域分割化

DE 変換は端点特異性に有効である。積分領域内に強い特異性がある場合、その場所で分割することで計算精度を改善できる。問題となる積分変数を特定し、その変数に対して積分領域の分割するコードを作成、計算精度の問題でこれまで計算が困難だった閾値(非物理領域と物理領域の境界)での積分値を得ることができた。

##### (b) コードの最適化

ファインマン積分で用いる変数変換には任意性がある。最適な変換法の調査を行い、さらに共通項の括りだしと積和形式の表現により全体の計算量の削減を行った。その結果、分割コードでは計算すべき領域の数が増えるために計算量が増加するにもかかわらず、計算時間を半分に削減することができた。

#### (2) 物理領域にも対応可能な QMC 積分法を用いたコード開発

これまでに 3 ループ・4 ループ 2 点ファインマン積分の非物理領域、内線質量固定 QMC 積分法は実装している。入射運動量を変えられるようなコードを開発し、運動量依存性を確認した。

#### (3) 並列計算コンパイラ Goose のアップデート

並列計算コンパイラ Goose はアクセラレータに対応するために、OpenCL API を利用したコードを生成する。Miyabi-G のシステムでは OpenCL がサポートされていないため、Goose をアップデートし CUDA API で同等のコードを生成するようにした。OpenCL/CUDA を両方サポートしている Pegasus 等で動作検証し、計算結果が等価であることを確認した。

### 3. 学際共同利用プログラムが果たした役割と意義

学際共同利用プログラムにより本プロジェクトでは最大 256GPU(Miyabi-G),

32GPU(Pegasus)をMPI 並列で利用することができた。これにより、従来では困難であった次元あたり 257 グリッドの 7 次元積分のファインマンループ積分計算を実行し、計算精度の向上を達成した。

さらに、条件を変えた計算を短時間で実行できたため、積分領域内の詳細な解析が可能となり、計算手法の改善に向けた具体的指針を得ることができた。

#### 4. 今後の展望

(1) DE 積分法による 3 ループ 2 点ファインマン積分の運動量依存性の計算

(2) QMC 積分法によるファインマン積分の計算

物理領域に適応可能な QMC 積分法を用いて、紫外発散を有する 3 ループ 2 点(内線数 6)のファインマン積分のプロダクト計算を行う。

(3) 並列計算コンパイラ Goose の HIP API 対応アップデート

新規システムである Sirius での性能評価をするために、OpenCL での検証に加えて、HIP API 対応コードの生成ができるようにアップデートし、HIP/CUDA/OpenCL の各 API での計算の検証をおこない、さらに性能評価を行う。

#### 5. 成果発表

(1) 学術論文

[1] “Numerical Evaluation of 3-Loop “Baseball” and “Running Shirt” Feynman Diagrams using GPU-Accelerated QMC Integration and Extrapolation, based on Sector Decomposition”, E. de Doncker, H. Daisaka, T. Ishikawa, K. Kato, N. Nakasato, and F. Yuasa, ICCSA 2026, accepted

(2) 学会発表

[2] “任意の質量をもつ 3 ループ自己エネルギーのファインマン積分の計算”、台坂博、石川正、湯浅富久子、中里直人、日本物理学会第 80 回年次大会(2025 年 9 月)

[3] “ファインマン積分の数値解法”、湯浅富久子、E. de Doncker、石川正、加藤潔、台坂博、中里直人、日本物理学会第 80 回年次大会(2025 年 9 月)

(3) その他

[4] “Methods for Expansion of 3-Loop 2-Point Feynman Integrals”, E. de Doncker, F. Yuasa, T. Ishikawa, K. Kato, Computational Science and Its Applications – ICCSA 2025: Istanbul, Turkey, June 30 – July 3, 2025, Proceedings, Part V pp 20-30, [https://doi.org/10.1007/978-3-031-97606-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-97606-3_2)

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*		
		当初配分	移行*	一般利用による追加
Pegasus	○	5000		
Miyabi-G	○	32950		
Miyabi-C				
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 *バジェット移行を行った場合、「+2000」「-1000」のように記入				