

令和元年6月11日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H03668

研究課題名(和文) 2ループ輻射補正計算システムの構築

研究課題名(英文) Study of computation system for 2-loop radiative correction

研究代表者

石川 正 (ISHIKAWA, Tadashi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・計算科学センター・准教授

研究者番号：90184481

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：2ループの電弱相互作用まで含んだ全てのダイアグラムについて計算するためのシステムを開発した。電弱相互作用の2ループではダイアグラムの数が増えしかもファイマン・ループ積分が多次元となり計算能力が必要になってきている。繰り込み理論を元に理論的定式化に基づいたプログラムの開発を行った。また計算精度を確認が必要であり、指数部ビットを増やした多倍長の計算を高速に実行できるシステムを構築した。我々はミュオン異常磁気能率の2ループ補正電弱相互作用について計算を遂行し成果を公表した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

素粒子物理学では実験の精密化により、理論予想も高次の補正まで含む必要がある。2ループの電弱相互作用に関しては、これまでは、近似による計算がなされてきたが、完全に計算するシステムは存在しない。ミュオン異常磁気能率は崩壊プロセスであるが、これを拡張して散乱過程まで計算する必要がある。ミュオン異常磁気能率の2ループ電弱相互補正をON-SHELL繰り込みで行ったのは初めてであった。

研究成果の概要(英文)：Numerical calculation of two-loop electroweak corrections to the muon anomalous magnetic moment ($g-2$) is done based on on-shell renormalization scheme and free quark model. Total 1780 two-loop diagrams and 70 one-loop diagrams composed of counterterms are calculated to get the renormalized quantity. As for the numerical calculation, we adopt the trapezoidal rule with double exponential method. Linear extrapolation method (LE) is introduced to regularize UV- and IR-divergences and to get finite values. Our numerical result is in agreement with the previous works given in Particle Data Group within errors. we develop an accelerator system with Field Programmable Gate Array boards on which processing elements with dedicated logic for quadruple/hexuple/octuple precision arithmetic operations are implemented. In addition, we also develop a programming interface designed for easy use of the system.

研究分野：素粒子計算物理

キーワード：素粒子論 輻射補正 ファインマン積分 多倍長計算 高性能計算

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

素粒子物理学では 2012 年のヒッグス粒子の発見により標準模型の精密な検証および標準模型を超える粒子を探索するという時代に突入した。電子・陽電子衝突型のリニアコライダの精密実験においてヒッグス粒子の精査により標準模型を超える理論の方向性が示されることが期待されている。更に標準模型を超える理論の探索のためには、標準模型の整合性についてより精密に調べなければならない。LEP-II 実験の最後の頃、電弱相互作用の高次補正として 1 ループの物理過程について計算を行ったが、高エネルギーのフロンティア領域では電弱相互作用の 1 ループの補正は小さいものではなく、更に摂動の次数を上げ 2 ループまで計算できるようにすることが精密物理のため必要不可欠である。

2. 研究の目的

2 ループの電弱相互作用高次補正計算に関しては、ゲージボゾン、フェルミオンと複数の質量があるため、崩壊物理過程、散乱物理過程などでは完全な計算はされていない。電弱相互作用の 2 ループではダイアグラムの数が増えしかもファイマン・ループ積分が多次元となり計算能力が必要になってきている。ダイアグラムの内線には種々の素粒子が出現するので、一般的に解析的に結果を求めるのは困難である。全てのダイアグラムについて計算するためのシステムを作り、電弱相互作用高次補正計算を遂行することが目的である。

3. 研究の方法

我々はミュオン異常磁気能率の 2 ループ補正電弱相互作用を具体的事例として取り上げた。2 ループダイアグラム 1780、カウンター項のある 1 ループダイアグラム 70 を生成し、次元正則化を用い、ファイマンループ積分に必要な有理式を数式処理にて求めファイマンループ積分の数値積分を行う。繰り込みは、OnShell 繰り込みを用いる。電弱相互作用においてはもっとも基本的な量と考えられているのは実験精度が高いフェルミ定数であり、従来の研究ではフェルミ定数と微細構造定数と Z 粒子の質量を基本として、繰り込まれた定式化を求める方法で計算されてきた。しかしながら LEP-II 実験以降、W 粒子の質量についても精度が高まり、フェルミ定数を使わず微細構造定数と Z 粒子および W 粒子の素粒子質量を基本量とした OnShell 繰り込み処方も適切となってきており、我々はこの処方を用いる。

ファイマンループ積分に関しては直接数値積分を行う方法を用いる。次元正則のパラメータをそのまま数値的に保持して、発散部分、有限部分を数値的に取り出す方法と発散部分を数式処理で取り出し、有限化された数値積分を行う方法を用いている。更にカウンター項と組み合わせ発散を相殺させて簡約化する方法でも検査を行う。

一般的にはファイマン・ループ積分は特異性のある積分であり、またゲージ相殺による数値相殺が激しい。このため既存の商用演算器で使われている決められた指数部、仮数部の表現では足りず、指数部および仮数部ビットを増やした多倍長の計算による検証が必要であり、加えて計算の高速化が必要であるので、任意のビット幅をもつ演算器を構成できる FPGA (field-programmable gate array) というデバイスを用いた多倍長計算を高速に行うことができる専用システムを構築する。

4. 研究成果

ミュオン異常磁気能率の 2 ループ補正電弱相互作用の計算を行い、既存の近似式でフェルミ定数と微細構造定数と Z 粒子の質量を基本とするスキームの計算と誤差内で一致した。1 ループ補正だけでは、既存のスキームと我々のスキームとでは数%の違いがある。既存のスキームの 1 ループと言われる計算は、我々の OnShell スキームからすると、高次補正が含まれているが、1 ループと 2 ループを足し合わせるとほぼ一致することが確認され、この結果は Phys.Rev.D に掲載された。

数値計算の検証にあたっては、我々はラグランジアンにゲージ固定項に非線形ゲージを導入し、非線形ゲージのパラメータを数値的に変化させ、紫外発散部分を含め不変であることを確認している。赤外発散に関しては、次元正則方法と光子に微量質量を与えて計算する 2 つの方法で、赤外発散部分の相殺を確認した。これらの 2 つの方法では物理量となる有限部分もダイアグラム毎に異なるが、関係するダイアグラムについて足し合わせると有限な結果は一致することを確認した。

ミュオン異常磁気能率の 2 ループ補正電弱相互作用の場合、ミュオンとゲージボゾンの質量の 2 乗の比の約 6 桁の数値相殺が多く発生する。場合によっては 3 乗で相殺する場合もあり、この場合は約 9 桁の相殺になる。我々の計算方法では、計算すべきファイマンループ積分はとても簡単な有理式であるが、端点に特異性がある 5 次元積分を高精度に求める必要があり、高性能計算の資源に加えて、検証のための高精度に演算できる専用システムが必要であることを再確認した。

ミュオン異常磁気能率の高精度測定実験は 50 年以上前から行われてきており、現在標準模型とズレがあると認識されている地上でできる実験であり、現在米国フェルミ研究所で行われている。この実験では 2 ループ補正電弱相互作用の効果は、強い相互作用の効果より小さいものであり理論と実験との相違が電弱相互作用の効果のオーダーのものである。より電弱相互作用の効果鮮明にするには、LEP-II 実験において電弱相互作用を担う W 粒子の精査を行ったときと同じように更に高エネルギーの電子陽電子衝突であるレプトンコライダによる実験が不可欠である。それにより、ヒッグス粒子およびヒッグス粒子とゲージ粒子との結合などの詳細な解明が可能となるであろう。

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 8 件)

Numerical calculation of the full two-loop electroweak corrections to muon (g-2)
Tadashi Ishikawa, Nobuya Nakazawa and Yoshiaki Yasui
Phys.Rev. D99 (2019) 073004
doi:10.1103/PhysRevD.99.073004

Automatic calculation of 2-loop ELWK corrections to muon (g-2)
Tadashi Ishikawa, Nobuya Nakazawa and Yoshiaki Yasui
Journal of Physics: Conference Series, 920, 012009 (2017)
doi:10.1088/1742-6596/920/1/012009

Numerical integration and extrapolation for finite and UV-divergent 3-loop Feynman integrals
E de Doncker, F Yuasa, K Kato and T Ishikawa
Journal of Physics: Conference Series, 920, 012005 (2017)
doi:10.1088/1742-6596/920/1/012005

Regularization with Numerical Extrapolation for Finite and UV-Divergent Loop Integrals
E de Doncker, F Yuasa, K Kato, T Ishikawa, J Kapenga, O Olagbemi
Computer Physics Communications, 224, 164-185(2018).
doi:10.1016/j.cpc.2017.11.001

Adaptive Integration and Singular Boundary Transformations.
Elise de Doncker, Fukuko Yuasa, Tadashi Ishikawa, John Kapenga and Fola Olagbemi
Procedia Computer Science, 80, 1428-1438(2016)
doi:10.1016/j.procs.2016.05.462

High Performance and Increased Precision Techniques for Feynman Loop Integrals. ¥¥
K. Kato, E.de Doncker, T.Ishikawa, J. Kapenga, O. Olagabemi and F. Yuasa
Journal of Physics:Conference Series, 762 (2016) 012070.
doi:10.1088/1742-6596/762/1/012070

多倍長精度積分計算を加速させる専用システム GRAPE9-MPX の開発とその応用
台坂 博・中里直人・石川 正・湯浅富久子・似鳥啓吾
電子情報通信学会 信学技報 IEICE Technical Report 116 (2016)13-18.

Feynman 4-loop 積分のチューニングとアクセラレータを使用した高速化
濱口 信行,石川 正,湯浅 富久子
情報処理学会研究報告 2015-HPC-152 No.15 (2015).

[学会発表](計 22 件)

マルチスケール・マルチループのファインマン積分の数値計算
湯浅富久子, 加藤 潔, 石川 正, 台坂 博, 中里直人, Elise de Docker
日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年) 2019 年 3 月 15 日

電弱理論におけるミュオン異常磁気能率の 2 ループ補正数値計算
石川 正, 中澤宣也, 安井良彰
日本物理学会第 74 回年次大会 (2019 年) 2019 年 3 月 15 日

ファインマン積分の数値計算法: DCM による電弱高次補正計算 II
湯浅富久子, 台坂 博, Elise de Doncker, 石川 正, 加藤 潔, 中里直人
日本物理学会 2018 年秋季大会 信州大学松本キャンパス 2018 年 9 月 14 日

ファインマン積分の数値計算法: GRAPE9-MPX と PEZY-SC よる多倍長精度計算の高速化とアプリケーション II
台坂 博, 中里直人, 石川 正, 湯浅富久子, 加藤 潔, 似鳥啓吾
日本物理学会 2018 年秋季大会 信州大学松本キャンパス 2018 年 9 月 14 日

電弱理論におけるミュオン異常磁気能率の 2 ループ補正計算

石川 正, 中澤宣也, 安井良彰
日本物理学会 2018 年秋季大会 信州大学松本キャンパス 2018 年 9 月 14 日

ファインマン積分の数値計算法: DCM による電弱高次補正計算
湯浅富久子, 加藤 潔, 石川 正, 台坂 博, 中里直人
日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス 2018 年 3 月 22 日

ファインマン積分の数値計算法: GRAPE9-MPX と PEZY-SC による多倍長精度計算の高速化とアプリケーション
台坂 博, 中里直人, 石川 正, 湯浅富久子, 加藤 潔, 似鳥啓吾
日本物理学会 第 73 回年次大会, 東京理科大学 野田キャンパス 2018 年 3 月 22 日

電弱理論におけるミュオン異常磁気能率の 2 ループ補正計算の自動化 II
石川 正, 中澤宣也, 安井良彰
日本物理学会 2017 年秋季大会 宇都宮大学 峰キャンパス 2017 年 9 月

数値計算法とその高次輻射補正への応用
加藤 潔, 台坂 博, 石川 正, 中里直人, 湯浅富久子
日本物理学会 2017 年秋季大会 宇都宮大学 峰キャンパス 2017 年 9 月

メニーコアプロセッサによる多倍長精度数値積分の性能評価
中里 直人, 台坂 博, 石川 正, 湯浅 富久子, 似鳥 啓吾
日本応用数理学会 2017 年度 年会 武蔵野大学有明キャンパス 2017 年 9 月

素粒子物理学における多倍長計算
石川 正
第 5 回 大規模並列数値計算技術に関する研究集会 --- 多倍長計算と精度保証 ---
Fifth Workshop on Largescale Parallel Numerical Computing Technology (LSPANC 2017)
理化学研究所計算科学研究機構 (神戸) 2017 年 3 月 27 日

ファインマン積分の数値計算法: 特異性と変数変換の最適化
台坂 博, 中里直人, 石川 正, 湯浅富久子, 加藤 潔, 似鳥啓吾
日本物理学会 第 72 回年次大会, 大阪大学 豊中キャンパス (2017/3/17)

多倍長精度積分計算を加速させる専用システム GRAPE9-MPX の開発とその応用
台坂 博, 中里直人, 石川 正, 湯浅富久子, 似鳥啓吾
電子情報通信学会 リコンフィギャラブルシステム研究会、慶應義塾大学 (2017/1)

Automatic calculation of two-loop ELWK corrections to Muon ($g-2$)
N. Nakazawa, T. Ishikawa, Y. Yasui
4th Computational Particle Physics Workshop, Oct 2016
IPC 生産性国際交流センター (神奈川)

素粒子反応の自動計算にむけて: 1-loop 4 点テンソル積分の完全数値的な取り扱い
湯浅富久子, 石川 正, 加藤 潔, 台坂 博, 中里直人
日本物理学会 2016 年秋季大会 宮崎大学 木花キャンパス 2016 年 9 月

素粒子反応の自動計算にむけて: 多倍長精度計算システムによる 2-loop 4 点積分の計算
台坂 博, 中里直人, 石川 正, 湯浅富久子, 加藤 潔, 似鳥啓吾
日本物理学会 2016 年秋季大会 宮崎大学 木花キャンパス 2016 年 9 月

多倍長精度積分計算を加速させる専用システムの開発とその応用 II
台坂 博, 中里 直人, 石川 正, 湯浅 富久子, 似鳥 啓吾
日本応用数理学会 2016 年度 年会、北九州国際会議場 2016 年 9 月

A development of an accelerator board dedicated for multi-precision arithmetic operations and its application to Feynman loop integrals II
Hiroshi DAISAKA, Naohito NAKASATO, Tadashi ISHIKAWA, Fukuko YUASA, Keigo NITADORI
ACAT2017, 21-25 August 2017 University of Washington, Seattle

Direct numerical computation and its application to the higher-order radiative corrections
K Kato, E de Doncker, T Ishikawa and F Yuasa

ACAT2017, 21-25 August 2017 University of Washington, Seattle

電弱理論におけるミュオン異常磁気能率の2ループ補正計算の自動化

安井良彰, 石川 正, 中澤宣也

日本物理学会 第71回年次大会 東北学院大学 泉キャンパス 2016年3月

- ⑳ GRAPE9-MPX によるファインマン・ループ積分の計算：任意の質量をもつ 2-loop 4点積分

台坂 博, 中里直人, 石川 正, 湯浅富久子, 似鳥啓吾

日本物理学会 第71回年次大会 東北学院大学 泉キャンパス 2016年3月

- ㉑ 完全数値的手法によるマルチループ積分の計算手法 II

湯浅富久子, 石川 正, 加藤 潔, 台坂 博, 中里直人

日本物理学会 第71回年次大会 東北学院大学 泉キャンパス 2016年3月

〔図書〕(計 2 件)

物理学実験用の小型スパコンの世界-今どき浮動小数点演算ワールド-

中里直人, 台坂 博, 石川 正

「interface」2017年4月号、CQ出版社

多ビット浮動小数点演算 CPU の 100 倍も可能！ -小型 FPGA スパコンの勘どころ-

中里直人, 台坂 博, 石川 正

「interface」2017年3月号、CQ出版社

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

出願年：

国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：

発明者：

権利者：

種類：

番号：

取得年：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：加藤 潔

ローマ字氏名：KATO, kiyoshi

所属研究機関名：工学院大学

部局名：教育推進機構

職名：教授

研究者番号(8桁)：50152707

研究分担者氏名：安井 良彰

ローマ字氏名：YASUI, yoshiaki

所属研究機関名：東京経営短期大学

部局名：経営総合学科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：50389839

研究分担者氏名：台坂 博

ローマ字氏名：DAISAKA, hiroshi

所属研究機関名：一橋大学

部局名：大学院商学研究科

職名：教授

研究者番号（8桁）：80399295

(2)研究協力者

研究協力者氏名：中澤 宣也

ローマ字氏名：NAKAZAWA, nobuya

研究協力者氏名：湯浅 富久子

ローマ字氏名：YUASA, fukuko

研究協力者氏名：中里 直人

ローマ字氏名：NAKASATO, naohito

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。