

2022 年度 修士論文

電子陽電子ヒッグスファクトリーのための
ジェット測定技術の研究

九州大学大学院 理学府 物理学専攻
粒子物理学分野 素粒子実験研究室

尾上 友紀

指導教員 末原 大幹 川越 清以

2022 年 12 月 28 日



目次

| | | |
|--------------|---------------------------------------------|-----------|
| 第 1 章 | 序論 | 9 |
| 1.1 | 素粒子標準理論 | 9 |
| 1.2 | 国際リニアコライダー計画: ILC | 10 |
| 1.3 | ILC の物理 | 10 |
| 1.3.1 | 新物理探索 | 10 |
| 1.4 | ILC における検出器 | 10 |
| 1.4.1 | Particle Flow Algorithm: PFA | 10 |
| 1.4.2 | International Large Detector: ILD | 10 |
| | 飛跡検出器 | 10 |
| | 電磁カロリメータ | 10 |
| | ハドロンカロリメータ | 10 |
| | ミューオン検出器 | 10 |
| 1.5 | ILC における物理解析 | 10 |
| 1.5.1 | 事象再構成 | 10 |
| 1.6 | 本研究の目的 | 10 |
| 第 2 章 | シリコンタングステン電磁カロリメータ | 11 |
| 2.1 | 入射粒子と物質の相互作用 | 12 |
| 2.1.1 | 荷電粒子 | 12 |
| 2.1.2 | 光子 | 12 |
| 2.1.3 | ハドロン | 12 |
| 2.2 | シリコンタングステン電磁カロリメータ SiW-ECAL | 12 |
| 2.2.1 | 電磁カロリメータ | 12 |
| 2.2.2 | シリコン半導体検出器 | 12 |
| 2.2.3 | SiW-ECAL の構造 | 12 |
| 2.3 | 読み出しシステム | 12 |
| 2.3.1 | SKIROC2A | 12 |
| | Fast shaper | 12 |

| | | |
|--------------|-------------------------------------------|-----------|
| | Slow shaper | 12 |
| 2.3.2 | FPGA | 12 |
| 2.3.3 | 多層読み出しモジュール | 12 |
| 2.4 | 技術プロトタイプ | 12 |
| 第 3 章 | ビームテストによる評価実験 | 13 |
| 3.1 | CERN SPS | 13 |
| 3.2 | 実験セットアップ | 13 |
| 3.2.1 | 測定機器のセットアップ | 13 |
| 3.2.2 | EUDAQ による信号読み出し | 13 |
| 3.3 | 実験結果 | 13 |
| 3.3.1 | 検出器応答 | 13 |
| 3.3.2 | ペDESTAL | 13 |
| 3.3.3 | スクエアイベント | 13 |
| 3.4 | まとめと考察 | 13 |
| 第 4 章 | 深層学習 | 14 |
| 4.1 | パーセプトロン | 14 |
| 4.1.1 | パーセプトロン | 14 |
| 4.1.2 | 多層パーセプトロン | 14 |
| 4.2 | ニューラルネットワーク | 14 |
| 4.2.1 | 活性化関数 | 14 |
| 4.2.2 | 誤差逆伝播法 | 14 |
| 4.2.3 | バッチ処理 | 14 |
| 4.2.4 | 最適化 | 14 |
| 4.2.5 | ディープニューラルネットワーク | 14 |
| 4.3 | グラフニューラルネットワーク | 14 |
| 4.3.1 | Graph Convolution Network (GCN) | 14 |
| | Spectral Graph Convolution | 14 |
| | Spatial Graph Convolution | 14 |
| 4.3.2 | Graph Attention Network (GAT) | 14 |
| 4.3.3 | グラフニューラルネットワークの応用 | 14 |
| 第 5 章 | 深層学習を用いたジェットフレーバー識別 | 15 |
| 5.1 | ジェットフレーバー識別アルゴリズム | 16 |
| 5.1.1 | 事象再構成 | 16 |
| 5.2 | イベントサンプル | 16 |
| 5.2.1 | 前処理 | 16 |

| | | |
|-------|--------------------------------|----|
| 5.3 | ディープニューラルネットワークによる実装 | 16 |
| 5.3.1 | ネットワークの構造 | 16 |
| 5.3.2 | ハイパーパラメータの最適化 | 16 |
| 5.3.3 | 学習結果 | 16 |
| 5.4 | グラフニューラルネットワークによる実装 | 16 |
| 5.4.1 | 飛跡によるグラフデータセット | 16 |
| 5.4.2 | ネットワークの構造 | 16 |
| 5.4.3 | ハイパーパラメータの最適化 | 16 |
| 5.4.4 | 学習結果 | 16 |
| 5.5 | LCFIPlus との比較 | 16 |
| 5.6 | まとめと今後の展望 | 16 |
| 第 6 章 | まとめと今後の展望 | 17 |
| 付録 A | 付録 A | 18 |

図目次

| | | |
|-----|--------------------|---|
| 1.1 | 素粒子の標準模型 | 9 |
|-----|--------------------|---|

表目次

第 1 章

序論

本章では、はじめに 1.1 節で素粒子とそれらに働く相互作用を説明する標準模型 (The Standard Model, SM) について述べる。そして 1.2 節にて将来の電子陽電子ヒッグスファクトリーである、国際リニアコライダー計画 (International Linear Collider, ILC) の概要に触れたのち、1.3 節で ILC が探索する物理、1.4 節で ILC のについて述べる。

1.1 素粒子標準理論

素粒子とは、物質を構成している究極要素をさす名称である。そして素粒子物理学は、それら構成要素とその間に働く相互作用の性質を解明する学問である。現代の素粒子物理学では、すべての現象を説明するための基本的な枠組みとして図 1.1 のような標準模型を掲げており、これは現時点の実験データと高い精度で一致することが確認されている。

標準理論は、主に次に挙げる 2 つの公理に沿って記述されている。1 つ目に、物質の究極要素である素粒子はクォークとレプトンというスピン $1/2$ のフェルミオンである。2 つ目に、素粒子の相互作用はゲージ粒子によって記述され、標準理論における相互作用は電磁相互作用・弱い相互作用・強い相互作用の 3 つである。

物質の化学的性質を失わない最小単位は分子であり、分子はさらに原子の組み合わせによって構成されている。そして原子は原子核と電子によって構成されており、原子核は陽子と中性子のような核子からなっている。この核子を構成するものがクォークであり、標準模型においては 6 種類存在する。また同様に素粒子であり、核力のような強い相互作用をしないものをレプトンと呼び、同様に 6 種類存在する。クォーク・レプトンともに 3 つの世代と 2 つの電荷タイプをもっており、世代の高い粒子ほど重いいため弱い相互作用により低い世代のクォークへと崩壊する。

素粒子の相互作用を媒介するスピン 1 のゲージ粒子には、フォトン・W ボソン、Z ボソン、グルーオンの 4 種類がある。このうち電磁相互作用と弱い相互作用は統一され電弱相互作用と呼ばれており、

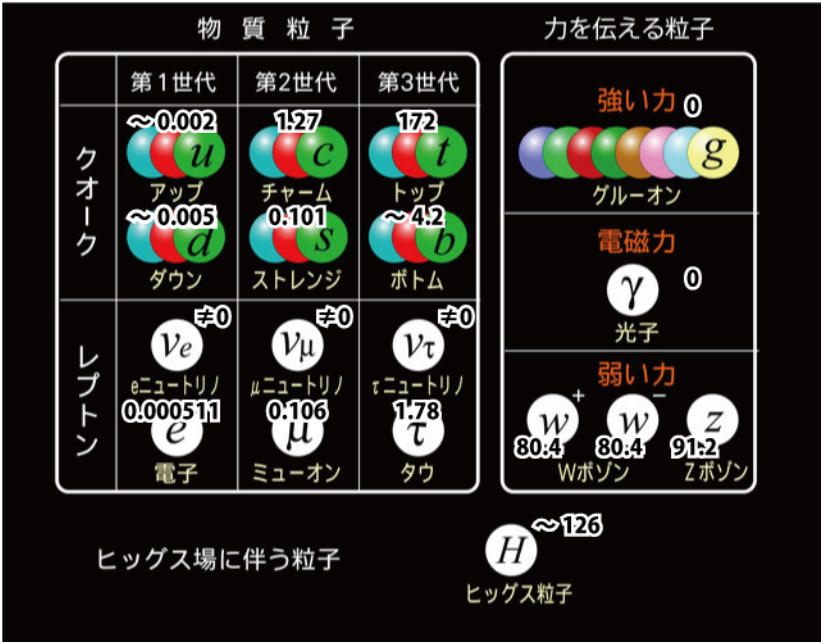


図 1.1: 素粒子の標準模型

標準模型は物質を構成する粒子であるフェルミオンと力を媒介する粒子であるボソンから構成される。またフェルミオンは、陽子や中性子を構成する 6 種類のクォークと電子やニュートリノなどのレプトンに大きく分けられる。クォーク、レプトンはそれぞれ電荷によって 2 つに分けられ、さらに世代によって 3 つに分けられる。

1.2 国際リニアコライダー計画: ILC

1.3 ILC の物理

1.3.1 新物理探索

1.4 ILC における検出器

1.4.1 Particle Flow Algorithm: PFA

1.4.2 International Large Detector: ILD

飛跡検出器

電磁カロリメータ

ハドロンカロリメータ

ミューオン検出器

1.5 ILC における物理解析

1.5.1 事象再構成

1.6 本研究の目的

第 2 章

シリコンタングステン電磁カロリメータ

実験装置はこんな感じだよ。

2.1 入射粒子と物質の相互作用

2.1.1 荷電粒子

2.1.2 光子

2.1.3 ハドロン

2.2 シリコンタングステン電磁カロリメータ SiW-ECAL

2.2.1 電磁カロリメータ

2.2.2 シリコン半導体検出器

2.2.3 SiW-ECAL の構造

2.3 読み出しシステム

2.3.1 SKIROC2A

Fast shaper

Slow shaper

2.3.2 FPGA

2.3.3 多層読み出しモジュール

2.4 技術プロトタイプ

第 3 章

ビームテストによる評価実験

シミュレーションはシミュレーション。

3.1 CERN SPS

3.2 実験セットアップ

3.2.1 測定機器のセットアップ

3.2.2 EUDAQ による信号読み出し

3.3 実験結果

3.3.1 検出器応答

3.3.2 ペDESTAL

3.3.3 スクエアイベント

3.4 まとめと考察

第 4 章

深層学習

4.1 パーセプトロン

4.1.1 パーセプトロン

4.1.2 多層パーセプトロン

4.2 ニューラルネットワーク

4.2.1 活性化関数

4.2.2 誤差逆伝播法

4.2.3 バッチ処理

4.2.4 最適化

4.2.5 ディープニューラルネットワーク

4.3 グラフニューラルネットワーク

4.3.1 Graph Convolution Network (GCN)

Spectral Graph Convolution

Spatial Graph Convolution

4.3.2 Graph Attention Network (GAT)

4.3.3 グラフニューラルネットワークの応用

第 5 章

深層学習を用いたジェットフレーバー識別

5.1 ジェットフレーバー識別アルゴリズム

5.1.1 事象再構成

5.2 イベントサンプル

5.2.1 前処理

5.3 ディープニューラルネットワークによる実装

5.3.1 ネットワークの構造

5.3.2 ハイパーパラメータの最適化

5.3.3 学習結果

5.4 グラフニューラルネットワークによる実装

5.4.1 飛跡によるグラフデータセット

5.4.2 ネットワークの構造

5.4.3 ハイパーパラメータの最適化

5.4.4 学習結果

5.5 LCFIPlus との比較

5.6 まとめと今後の展望

第 6 章

まとめと今後の展望

こんな感じで作ってください。

付録 A

付録 A

謝辭