

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 31 日







# 目次

<b>第 1 章</b>	<b>序論</b>	<b>9</b>
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 . . . . .	11
1.3.1	ヒッグス粒子の精密測定 . . . . .	11
1.3.2	階層性問題 . . . . .	13
	超対称性理論 . . . . .	13
	余剰次元理論 . . . . .	13
1.3.3	その他の新物理 . . . . .	14
1.4	ILC の検出器 . . . . .	14
1.4.1	International Large Detector: ILD . . . . .	14
	崩壊点検出器 . . . . .	15
	中央飛跡検出器 . . . . .	15
	カロリメータ . . . . .	15
	ミューオン検出器 . . . . .	16
1.5	ILC のソフトウェア . . . . .	16
1.5.1	イベントジェネレータと検出器シミュレーション . . . . .	16
1.5.2	事象再構成 . . . . .	17
	Particle Flow Algorithm: PFA . . . . .	17
	飛跡再構成 . . . . .	17
	崩壊点検出 . . . . .	17
1.5.3	ジェットクラスタリング . . . . .	18
1.5.4	フレーバー識別 . . . . .	18
1.6	本研究の目的 . . . . .	18
<b>第 2 章</b>	<b>シリコンタングステン電磁カロリメータ</b>	<b>19</b>
2.1	入射粒子と物質の相互作用 . . . . .	19
2.1.1	荷電粒子 . . . . .	19

2.1.2	光子	19
2.1.3	ハドロン	20
2.2	シリコンタンダステン電磁カロリメータ SiW-ECAL	20
2.2.1	シリコン半導体検出器	20
2.2.2	SiW-ECAL の構造	21
2.3	読み出しシステム	21
2.3.1	SKIROC2A	21
	Fast shaper	21
	Slow shaper	21
2.3.2	FPGA	21
2.3.3	多層読み出しモジュール	21
2.4	技術プロトタイプ	21
<b>第 3 章</b>	<b>ビームテストによる評価実験</b>	<b>22</b>
3.1	CERN SPS	22
3.2	実験セットアップ	22
3.2.1	測定機器のセットアップ	22
3.2.2	EUDAQ による信号読み出し	22
3.3	実験結果	22
3.3.1	検出器応答	22
3.3.2	ペDESTAL	22
3.3.3	スクエアイベント	22
3.4	まとめと考察	22
<b>第 4 章</b>	<b>深層学習</b>	<b>23</b>
4.1	パーセプトロン	23
4.1.1	パーセプトロン	23
4.1.2	多層パーセプトロン	24
4.2	ニューラルネットワーク	24
4.2.1	活性化関数	24
4.2.2	誤差逆伝播法	24
4.2.3	バッチ処理	24
4.2.4	最適化	24
4.2.5	ディープニューラルネットワーク	24
4.3	グラフニューラルネットワーク	24
4.3.1	Graph Convolution Network (GCN)	24
	Spectral Graph Convolution	24

	Spatial Graph Convolution . . . . .	24
4.3.2	Graph Attention Network (GAT) . . . . .	24
4.3.3	グラフニューラルネットワークの応用 . . . . .	24
<b>第 5 章</b>	<b>深層学習を用いたジェットフレーバー識別</b>	<b>25</b>
5.1	ジェットフレーバー識別アルゴリズム . . . . .	26
5.1.1	事象再構成 . . . . .	26
5.2	イベントサンプル . . . . .	26
5.2.1	前処理 . . . . .	26
5.3	ディープニューラルネットワークによる実装 . . . . .	26
5.3.1	ネットワークの構造 . . . . .	26
5.3.2	ハイパーパラメータの最適化 . . . . .	26
5.3.3	学習結果 . . . . .	26
5.4	グラフニューラルネットワークによる実装 . . . . .	26
5.4.1	飛跡によるグラフデータセット . . . . .	26
5.4.2	ネットワークの構造 . . . . .	26
5.4.3	ハイパーパラメータの最適化 . . . . .	26
5.4.4	学習結果 . . . . .	26
5.5	LCFIPlus との比較 . . . . .	26
5.6	まとめと今後の展望 . . . . .	26
<b>第 6 章</b>	<b>まとめと今後の展望</b>	<b>27</b>
<b>付録 A</b>	<b>付録 A</b>	<b>28</b>

# 

1.1	素粒子の標準模型（数値は質量 $[GeV/c^2]$ ） . . . . .	10
1.2	ILC の概略図 . . . . .	11
1.3	(左)ILC におけるヒッグス生成断面積。ヒッグス粒子の質量が $m_h = 125$ GeV であるとして、ZH 随伴生成、WW fusion、ZZ fusion をそれぞれ赤、青、緑線で示している。またこのとき電子・陽電子の偏極は、それぞれ電子が左巻き 90%、右巻き 10% の 80% であり、陽電子は左巻き 35%、右巻き 65% の 30% としている。(右)ZH 随伴生成、WW fusion、ZZ fusion におけるファインマンダイアグラム。 . . . .	12
1.4	標準理論におけるヒッグス粒子の質量と崩壊分岐比の関係 . . . . .	12
1.5	ILC250GeV における SM ヒッグス粒子の崩壊分岐比 . . . . .	12
1.6	ヒッグス粒子の質量補正となるフェルミオンループ . . . . .	13
1.7	(左) ILD (右) SiD の全体図 . . . . .	14
1.8	ILD の断面図 . . . . .	15

# 表目次

1.1	ジェットを占める各粒子と対応する検出器 . . . . .	17
-----	-------------------------------	----



# 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、グルーオン・光子・W ボソン・Z ボソンの 4 種類がある。クォークとグルーオンの相互作用である強い相互作用は、量子色力学に基づき  $SU(3)$  対称性をもつ。また、荷電粒子と光子の相互作用である電磁相互作用と W・Z ボソンを介する弱い相互作用は統一され電弱相互作用と呼ばれており、 $SU(2) \times U(1)$  対称

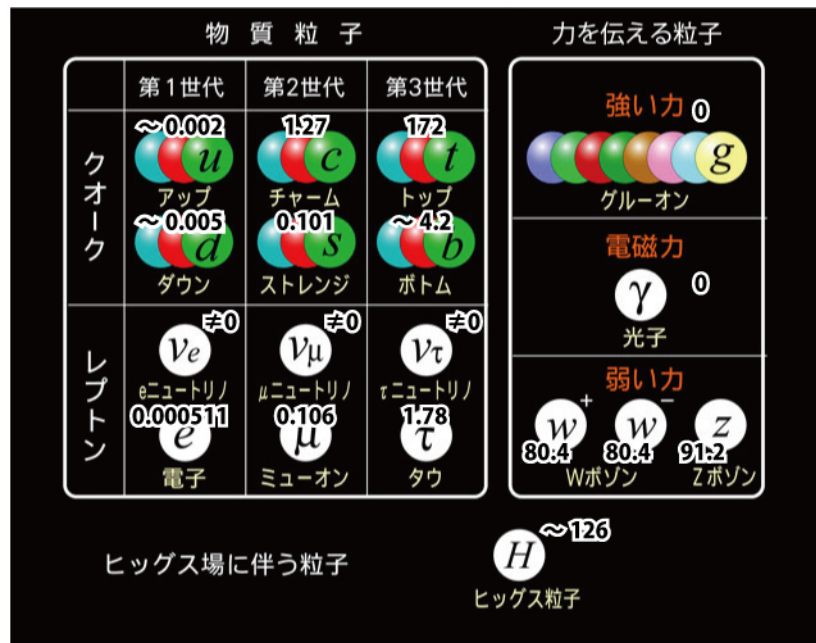


図 1.1: 素粒子の標準模型 (数値は質量  $[GeV/c^2]$ )

性をもつ。これに加えて重力相互作用が存在するが、他の 3 つの相互作用と比較して非常に弱く、標準模型では扱われない。

これらゲージ粒子はゲージ対称性を持っており質量は 0 である必要があるが、先述の  $W \cdot Z$  ボソンはそれぞれ  $80.4 \text{ GeV}/c^2$ 、 $91.2 \text{ GeV}/c^2$  の質量を持っている。標準理論ではこれを説明するためにヒッグス機構を導入し、ゲージ対称性が自発的に破れることで質量を獲得している。このヒッグス機構では真空中にスカラー場を導入しており、これとゲージ場との相互作用によって質量を持つことになるが、同時に場に対応する粒子としてヒッグス粒子の存在が必要となる。このヒッグス粒子は 2012 年 7 月に欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) における ATLAS、CMS 実験によって発見され、理論と実験との一致が確認された。本論文のテーマであるヒッグスファクトリーは、このヒッグス粒子を大量に生成することで、ヒッグス粒子の詳細な研究を目的としている。

## 1.2 国際リニアコライダー計画: ILC

国際リニアコライダー (International Linear Collider: ILC) は、岩手県北上山地に建設が計画されている電子陽電子衝突型線形加速器である。(図 1.2) 全長 20km の線形加速器を用いて電子と陽電子を加速し、中央の Interaction Point (IP) で衝突させることで様々な粒子を生成し、これを解析することでヒッグス粒子を始めとする新物理を探索することを目的としている。また ILC は重心系エネルギー  $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$  での運転開始を予定しているが、線形加速部を延長することで最大 1 TeV までのアップグレードも可能になっている。

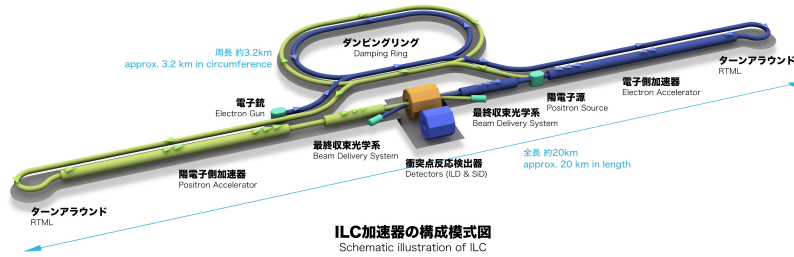


図 1.2: ILC の概略図

ヒッグス粒子を発見した LHC と比較して ILC には以下の 2 つの利点が存在する。1 つ目は LHC が複合粒子であるハドロンのコライダーであるのに対して、ILC はレプトンコライダーである点である。ILC では背景事象が少ないクリーンな環境で、ヒッグス粒子を始めとした網羅的な新物理探索が可能になっている。また、LHC では断面積を計算する上で QCD に基づく系統的な不確定性が存在するが、ILC では電弱相互作用のみについて考えることができるため、高精度な理論検証が可能になる。2 つ目は加速粒子である電子陽電子が粒子反粒子の関係にある点である。粒子反粒子が対消滅することで全エネルギーを目的粒子の生成に効率的に用いることができる。加えて全事象を記録しオフラインで事象選択を行うことができるため、トリガーレスで運転することが可能である。

## 1.3 ILC の物理

### 1.3.1 ヒッグス粒子の精密測定

1.1 節で述べた通り、ILC はヒッグスファクトリーとしての役割を期待されている。ヒッグスファクトリーでは、ヒッグス粒子と大量に生成し崩壊過程を精密測定することで、他の粒子との結合定数を測定し標準模型を検証することができる。ILC におけるヒッグス粒子の生成断面積は図??のようになっており、運転開始で予定している  $\sqrt{s} = 250 \text{ GeV}$  付近では、主に ZH 随伴生成過程の断面積が最大となる。この ZH 随伴生成過程では、反跳粒子である Z ボソンを正確に測定することでヒッグス粒子の質量を高い精度で再構成することができる。

また電子陽電子衝突によって生成されるヒッグス粒子は不安定であるため、質量の小さい 2 つの粒子に崩壊する。標準理論におけるヒッグス粒子の崩壊分岐比は図 1.4 のようになってお

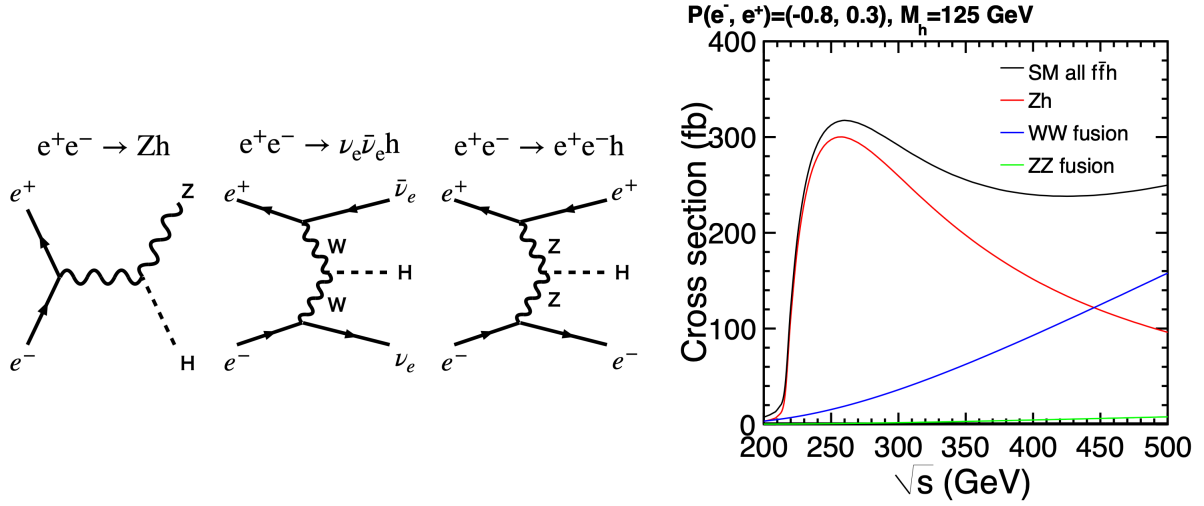


図 1.3: (左)ILC におけるヒッグス生成断面積。ヒッグス粒子の質量が  $m_h = 125$  GeV であるとして、ZH 随伴生成、WW fusion、ZZ fusion をそれぞれ赤、青、緑線で示している。またこのとき電子・陽電子の偏極は、それぞれ電子が左巻き 90%、右巻き 10% の 80% であり、陽電子は左巻き 35%、右巻き 65% の 30% としている。(右)ZH 随伴生成、WW fusion、ZZ fusion におけるファインマンダイアグラム。

り、ILC250 GeV における崩壊分岐比は表 1.5 のようになっている。この分岐比の測定精度は信号事象を S、背景事象を N とすると  $S/\sqrt{S+N}$  となり、背景事象の影響を十分低減させることができた場合には不定性を 1% 以下まで下げることができる。そのため、高い検出器性能と精度の高い事象再構成・解析手法が求められる。

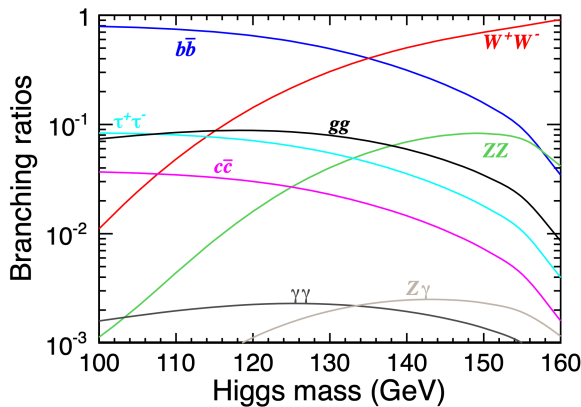


図 1.4: 標準理論におけるヒッグス粒子の質量と崩壊分岐比の関係

崩壊モード	崩壊分岐比
$b\bar{b}$	58.1%
$WW$	21.5%
$gg$	8.2%
$\tau^+\tau^-$	6.3%
$c\bar{c}$	2.9%
$ZZ$	2.6%
$\gamma\gamma$	0.2%

図 1.5: ILC250GeV における SM ヒッグス粒子の崩壊分岐比

### 1.3.2 階層性問題

ヒッグス粒子の質量は LHC によって  $125 \text{ GeV}/c^2$  と測定されている。しかしヒッグス粒子の質量は、繰り込みにおいて図 1.6 のような高次ダイアグラムから質量補正を受けることで発散してしまい、プランクスケール程度の質量を持ってしまうことが分かっている。そのため標準模型を超える新物理 (BSM) がないと仮定すると、質量の量子補正をキャンセルする解決策がなければ  $125 \text{ GeV}/c^2$  程度の質量を理論的に再現することができない。(ファインチューニング) これを回避するために、以下に挙げるような TeV スケールの超対称性理論や余剰次元理論など新物理によるシナリオが提案されている。これらシナリオにおけるヒッグス粒子との結合定数は標準理論における予測からズレることとなるため、ILC においてヒッグス粒子の精密測定を行うことの意義は大きい。

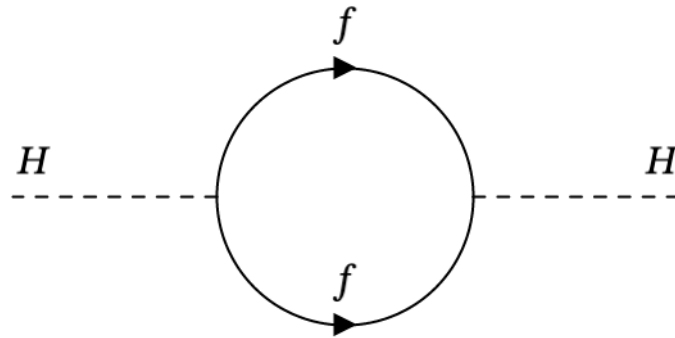


図 1.6: ヒッグス粒子の質量補正となるフェルミオンループ

#### 超対称性理論

超対称性理論 (Supersymmetry, SUSY) は、フェルミオンとボソンを交換する変換に対する不変性 (超対称性) を定義する理論である。またこの理論においては、標準模型におけるすべての粒子に対してスピンが  $1/2$  異なる超対称性パートナーが導入される。超対称性が完全である場合、標準模型粒子と質量や相互作用が同じである必要があるが、現段階では SUSY 粒子は発見に至っていない。しかし階層性問題においては、超対称性によりヒッグスボソンの質量補正に関する 2 次の発散をフェルミオンの寄与で打ち消し、対数による発散に落とすことができる。

#### 余剰次元理論

余剰次元理論とは、四次元時空以外にも次元があるとする理論である。この理論では時空間の次元数を増やすことで、増えた次元のゲージ場にヒッグス場の起源を求める。この場合にはゲージ不変性により、繰り込みの発散が現れないため階層性問題に対応できる。

### 1.3.3 その他の新物理

上にあげた階層性問題に関する物理に加え、WIMP (Weakly Interacting Massive Particle) など暗黒物質に関する未解決問題に対して探索が可能である。さらに、重心系エネルギー 350GeV 以上ではトップクォークの質量を精密測定や電弱相互作用の精密検証が可能であり、ILC の実現やそのアップグレードを通して宇宙の謎に迫る大発見を期待することができる。

## 1.4 ILC の検出器

ILC の検出器 (図 1.7) には、日本の国々が中心となって開発が進められている International Large Detector (ILD) と、米国が中心となって開発が進められている Silicon Detector (SiD) の二つのコンセプトが提案されており、ILC ではこれら 2 つの検出器が IP を共有できるように push-pull 方式を採用している。また ILD、SiD とともに後述の Particle Flow Algorithm (PFA) という事象再構成アルゴリズムに沿って最適化されている。

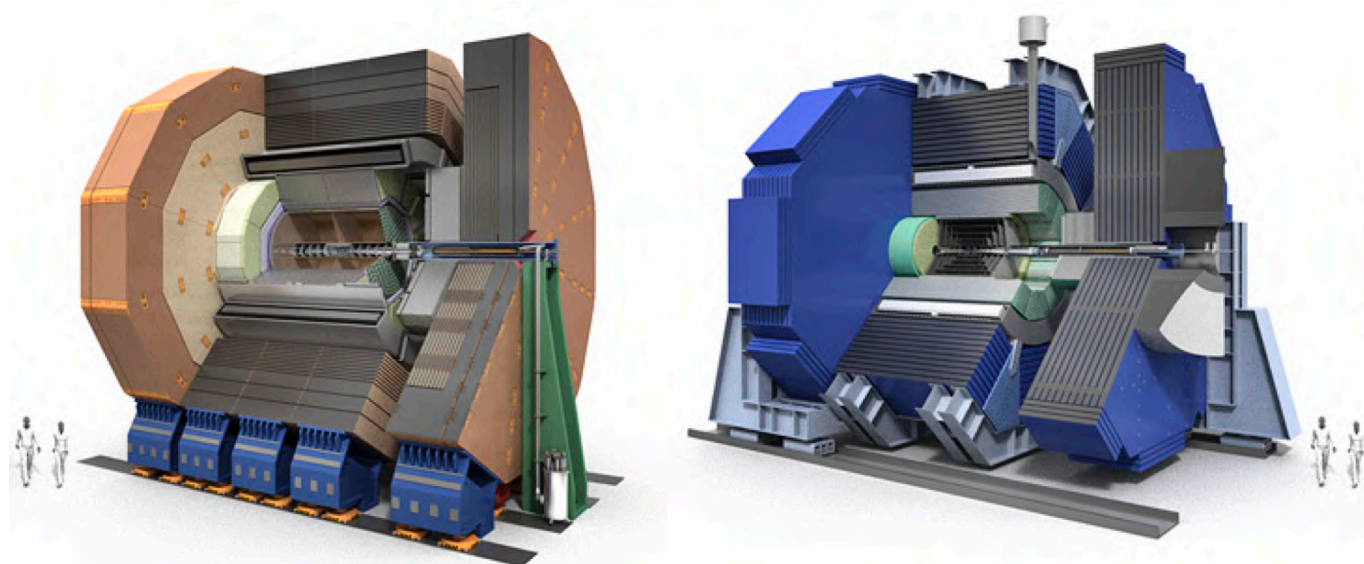


図 1.7: (左) ILD (右) SiD の全体図

### 1.4.1 International Large Detector: ILD

ILD は内側から順に崩壊点検出器、飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、ミューオン検出器で構成されている。カロリメータとミューオン検出器の間には 3.5T のソレノイドコイルが設置されている。図 1.8 に断面図を記す。



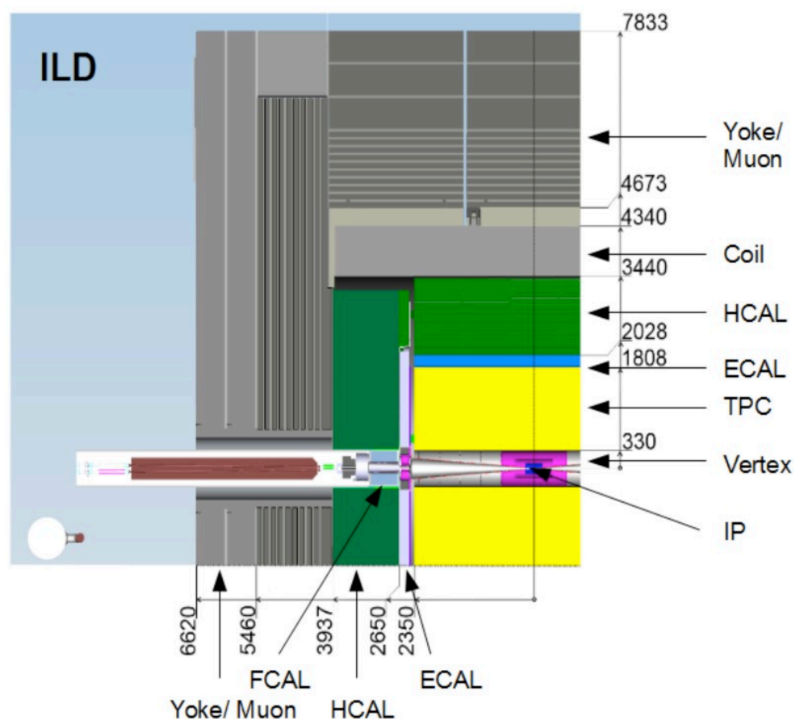


図 1.8: ILC の断面図

### 崩壊点検出器

崩壊点検出器は、IP に最も近い場所に置かれる検出器であり、シリコンピクセルセンサーによって高い分解能で荷電粒子の生成点を測定する。飛跡の高精度な測定によって、短寿命粒子の崩壊点を高精度に再構成することができ、ILC では小型化や高速読み出しに向けて CMOS センサー、DEPFET、Fine Pitch CCD、SOI など様々な技術候補が研究されている。

### 中央飛跡検出器

中央飛跡検出器は崩壊点検出器の外側に位置しており、Time Projection Chamber (TPC) とその周囲に設置されるシリコン検出器のハイブリッドで構成されている。TPC は大型のガスチェンバーであり、荷電粒子の通過でガス内に生じる電離電子を電極間にはけられた電場によってドリフトし、ドリフト時間などの情報をもとに飛跡を 3 次元的に再構成する検出器である。また荷電粒子の飛跡を再構成することで運動量の測定や、信号の大きさからエネルギー損失を測定することができ、粒子識別において重要な役割を果たす。

### カロリメータ

カロリメータは入射粒子のエネルギーを測定するための検出器で、ILD では内側から電磁カロリメータ (ECAL)、ハドロンカロリメータ (HCAL) によって構成されており、またビーム軸方向に対して前方カロリメータ (FCAL) が設置される。これら ILC のカロリメータには

サンプリング型カロリメータが提案されており、シャワーを起こすための吸収層と生成されたシャワー内の粒子のエネルギーを測定する検出層が交互に組み合わさった構造となっている。

電磁カロリメータは主に電磁シャワー内の光子のエネルギーを測定するために利用される。ILD では後述の PFA のためジェット内の粒子を分離できる高精細なカロリメータが必要とされており、吸収層には物質質量が大きい放射長が短く、モリエール半径の小さいタングステンが検討されている。また、検出層には読み出しセルが高精細なシリコン検出器を用いるシリコン電磁カロリメータ (SiECAL) やシンチレータストリップを用いるシンチレータカロリメータ (ScECAL) が提案されている。

ハドロンカロリメータは中性ハドロンエネルギーを測定するための検出器である。HCAL は ECAL に比べ大型であるため吸収層には鉄が用いられ、検出層には 3cm 角の SiPM タイルを用いてシンチレーション光を検出するアナログカロリメータ (AHCAL) と、1cm 角のセルを RPC を用いてバイナリ信号で読み出すデジタルカロリメータ (SDHCAL) の 2 つが提案されている。

### ミューオン検出器

ミューオン検出器はその名の通りミューオンを検出する検出器である。ミューオンは他の検出器と相互作用を起こさないため IP から遠い検出器の最も外側に設置されており、RPC チェンバーと SiPM シンチレータストリップの両方が検討されている。

## 1.5 ILC のソフトウェア

### 1.5.1 イベントジェネレータと検出器シミュレーション

ILC をはじめとする線型加速器には「iLCSoft」というソフトウェアフレームワークが開発されており、検出器シミュレーションから事象再構成までを実行することができる。iLCSoft 内では専用の LCIO フォーマットを使用し、C++ アプリケーションフレームワークである Marlin によって運用され、検出器のジオメトリなど検出器記述には DD4hep というツールキットを使用するという点で統一されている。

ILC は将来実験計画であるため、現在実験データは存在しないがシミュレーションによって検出器応答や新物理探索など研究が可能であり、本論文における研究で使用するデータもシミュレーションデータである。シミュレーションにおいてはまず、モンテカルロ (Monte Carlo, MC) 法に基づく wizard というイベントジェネレータを用いて、標準理論や様々な理論を背景とした目的のイベントを背景信号とともに生成する。生成されたイベントに対して Geant4 をベースとした検出器シミュレーションを実行し、粒子から検出器ヒットデータが生成される。



### 1.5.2 事象再構成

前節までで生成された検出器ヒットをもとに、粒子のエネルギーや飛跡を推定する事象再構成が行われる。

#### Particle Flow Algorithm: PFA

ILC の電子陽電子衝突で生じる粒子は、ジェットの終状態で検出される。このジェットのエネルギーは粒子識別や事象再構成において重要であり、ILC ではジェットエネルギー分解能  $\sigma_E/E = 30\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$  を目指している。これを達成するために導入されているアルゴリズムが Particle Flow Algorithm (PFA) である。PFA はジェット内の粒子をその種類ごとに最適な検出器でエネルギー測定を行うことでジェットエネルギー分解能を向上させる手法であり、ジェット中に含まれる主な粒子の種類とそれに対応する検出器について表 1.1 に示す。

崩壊モード	崩壊分岐比	ジェット内のエネルギー割合
荷電粒子	飛跡検出器	62%
光子	ECAL	27%
中性ハドロン	HCAL	10%
ニュートリノ	-	1%

表 1.1: ジェットを占める各粒子と対応する検出器

#### 飛跡再構成

多数の飛跡を含むジェットは各検出器を通過するため、検出器ヒットをもとにフィッティングを行うことで飛跡は再構成することができる。特に崩壊点検出器では主に飛跡の方向情報を、中央飛跡検出器では運動量や時間情報を取得し、様々なパターン認識アルゴリズムを有する MarlinTrk によって再構成される。ここで再構成された飛跡をもとに、さらに高次の再構成が行われる。

#### 崩壊点検出

ジェットは IP で生成された粒子が崩壊を繰り返し、多くの飛跡を残すことで再構成される。この粒子が崩壊する点を崩壊点 (Vertex) と呼び、特に IP を primary vertex、そこで生成された粒子の一次崩壊点を secondary vertex と呼ぶ。崩壊点検出アルゴリズムでは、2 本以上の飛跡の交点をフィッティングすることで再構成している。iLCSoft においては崩壊点検出からフレーバー識別までを LCFIPlus というフレームワークで実行することができる。

### 1.5.3 ジェットクラスタリング

ジェットクラスタリングでは、再構成された崩壊点をもとに全飛跡に対してクラスタリングを行う。

### 1.5.4 フレーバー識別

崩壊点の情報や飛跡の情報など 20 程度の物理量をもとに、多変量解析によってジェットの親粒子のフレーバー識別が行われる。LCFIPlus では ROOT の TMVA パッケージを使用して、従来の機械学習手法である Boosted Decision Trees (BDTs) を用いて識別が行われている。

## 1.6 本研究の目的

本研究の目的は、電子陽電子ヒッグスファクトリーである ILC におけるジェット測定技術の開発である。またその中でも、シリコンタングステン電磁カロリメータの開発・性能評価、フレーバー識別アルゴリズムの開発の 2 つのテーマで研究を行った。

シリコンタングステン電磁カロリメータには

## 第 2 章

# シリコンタングステン電磁カロリメータ

本章では、カロリメータの検出原理やシリコンタングステン検出器の検出原理と読み出し方法、また ASIC の設計性能や Si W- ECAL の読み出し方法、現在の技術プロトタイプについて説明する。

### 2.1 入射粒子と物質の相互作用

素粒子実験で捉えたい素粒子やハドロンは、粒子と物質との相互作用によって捉えることができる。本節では入射粒子の種類ごとに物質との相互作用について述べる。

#### 2.1.1 荷電粒子

荷電粒子は物質を通過するとき、物質中の原子が持つ電子との非弾性散乱、あるいは原子核との弾性散乱を起こす。これによって荷電粒子はエネルギーを失う、あるいは進行方向を変える。物質中の原子をイオン化し、エネルギーを失う。電離によるエネルギー損失は、Bethe-Bloch の式に従う。(記入途中)

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[ \ln\left(\frac{2m_e \gamma^2 v^2 W_{max}}{I^2}\right) - 2\beta^2 - \delta 2\frac{C}{Z} \right] \quad (2.1)$$

#### 2.1.2 光子

中性粒子である光子は電離を起こさず、よって連続的に飛跡を検出することはできない。光子の相互作用としては図??に示す光電効果、コンプトン散乱、電子陽電子対生成の 3 つが主に挙げられる。光電効果とは、光が物質に当たることで光の持っていたエネルギーが物質の電子に与えられ、励起された電子が飛び出す現象である。コンプトン散乱は入射光子と原子核に束縛されている電子との弾性散乱であり、電子陽電子対生成過程では原子のクーロン場におい

て入射光子が消失し電子陽電子を生成する。光子のエネルギーによってこれらの反応確率は異なり、図??に光子のエネルギーに対する各反応の確率を示す。中でも約 10MeV 以上の光子においては電子陽電子生成反応が主要なプロセスであり、ILC のような高エネルギーにおいては電子陽電子対生成が重要である。光子は測定器で直接検出出来ないが、このプロセスにより電子陽電子に変換することで、上述の電離により検出ができるようになる。物質中での光子の飛程は前述の  $X_0$  を用いると、約  $9/7 X_0$  である。重い物質中に入射した光子は、電子陽電子に変換し、それらが制動輻射で光子を発生させる。このプロセスが繰り返されることで電子・光子数が指数関数的に増加していき、これを電磁シャワーと呼ぶ。電磁シャワー発展するにつれ各粒子のエネルギーは低下していき、10 MeV を下回ると電子陽電子生成が不可能になり、シャワーは収束する。シャワー中に生成する電子・陽電子の数は元の光子のエネルギーに比例するため、これらを Minimum Ionization Particle (MIP) と見なし、シャワー中に設置したセンサーに残すエネルギーの和をとることで元の粒子のエネルギーを測定できる。

### 2.1.3 ハドロン

ハドロンは、原子核と衝突して非弾性散乱することで複数のハドロンを生成する。これが連鎖的に起きると電磁シャワーと同様のシャワーが起き、これをハドロンシャワーと呼ぶ。ハドロンの相互作用長は電子や光子と比べ非常に長く、ハドロンをカロリメータで測定するには多くの物質が必要となる。また非弾性散乱では破碎された物質の質量も反応に寄与するためシャワーの統計ゆらぎは更に大きくなる。従ってハドロンシャワーのエネルギー分解能は非常に悪くなってしまう。

## 2.2 シリコンタンングステン電磁カロリメータ SiW-ECAL

### 2.2.1 シリコン半導体検出器

シリコン半導体検出器は、半導体を用いた放射線検出器のうちシリコンを用いた検出器である。基本構造は、板状のシリコン半導体の片面に P 型半導体、もう片面に N 型半導体を形成しており、逆バイアス電圧をかけることで、内部に空乏層と呼ばれる伝導体にキャリアがない層を形成する。空乏層に荷電粒子が入射すると、飛跡に沿ってシリコン原子が電離し、電子正孔対が生成される。電子正孔対は空乏層内の電界によって運ばれるため電流が発生し、それを測定することで入射した荷電粒子のエネルギー損失を測定することができる。シリコンでは 1 つの電子ホール対を生成するのに約 3.6 eV のエネルギー損失が必要であり、センサーの有効厚を約 300nm とすると、MIP の通過により生成される電子対は約 24000, 電荷にして 3.8fC 程度となる。シリコン半導体検出器は、時間応答性がはやくエネルギー分解能が優れているため、ILC では飛跡検出器とカロリメータにおいて使用されている。

### 2.2.2 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

深層学習とは機械学習手法の一つであり、以下に基本原理について述べる。

#### 4.1.1 パーセプトロン

パーセプトロンは、複数の信号を入力として受け取り一つの信号を出力するアルゴリズムである。バイナリー信号を受け取ったパーセプトロンは単純な論理回路を通して出力される。

### 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