

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 29 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	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 における検出器	14
1.4.1	International Large Detector: ILD	14
	崩壊点検出器	15
	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 における物理解析	16
1.5.1	Particle Flow Algorithm: PFA	16
1.5.2	ジェット再構成	17
1.6	本研究の目的	17
第 2 章	シリコンタングステン電磁カロリメータ	18
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	19
2.2	シリコンタングステン電磁カロリメータ SiW-ECAL	19
2.2.1	電磁カロリメータ	19
2.2.2	シリコン半導体検出器	19

2.2.3	SiW-ECAL の構造	19
2.3	読み出しシステム	19
2.3.1	SKIROC2A	19
	Fast shaper	19
	Slow shaper	19
2.3.2	FPGA	19
2.3.3	多層読み出しモジュール	19
2.4	技術プロトタイプ	19
第 3 章	ビームテストによる評価実験	20
3.1	CERN SPS	20
3.2	実験セットアップ	20
3.2.1	測定機器のセットアップ	20
3.2.2	EUDAQ による信号読み出し	20
3.3	実験結果	20
3.3.1	検出器応答	20
3.3.2	ペDESTAL	20
3.3.3	スクエアイベント	20
3.4	まとめと考察	20
第 4 章	深層学習	21
4.1	パーセプトロン	21
4.1.1	パーセプトロン	21
4.1.2	多層パーセプトロン	21
4.2	ニューラルネットワーク	21
4.2.1	活性化関数	21
4.2.2	誤差逆伝播法	21
4.2.3	バッチ処理	21
4.2.4	最適化	21
4.2.5	ディープニューラルネットワーク	21
4.3	グラフニューラルネットワーク	21
4.3.1	Graph Convolution Network (GCN)	21
	Spectral Graph Convolution	21
	Spatial Graph Convolution	21
4.3.2	Graph Attention Network (GAT)	21
4.3.3	グラフニューラルネットワークの応用	21
第 5 章	深層学習を用いたジェットフレーバー識別	22

5.1	ジェットフレーバー識別アルゴリズム	23
5.1.1	事象再構成	23
5.2	イベントサンプル	23
5.2.1	前処理	23
5.3	ディープニューラルネットワークによる実装	23
5.3.1	ネットワークの構造	23
5.3.2	ハイパーパラメータの最適化	23
5.3.3	学習結果	23
5.4	グラフニューラルネットワークによる実装	23
5.4.1	飛跡によるグラフデータセット	23
5.4.2	ネットワークの構造	23
5.4.3	ハイパーパラメータの最適化	23
5.4.4	学習結果	23
5.5	LCFIPlus との比較	23
5.6	まとめと今後の展望	23
第 6 章	まとめと今後の展望	24
付録 A	付録 A	25

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	16
-----	-------------------------------	----

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

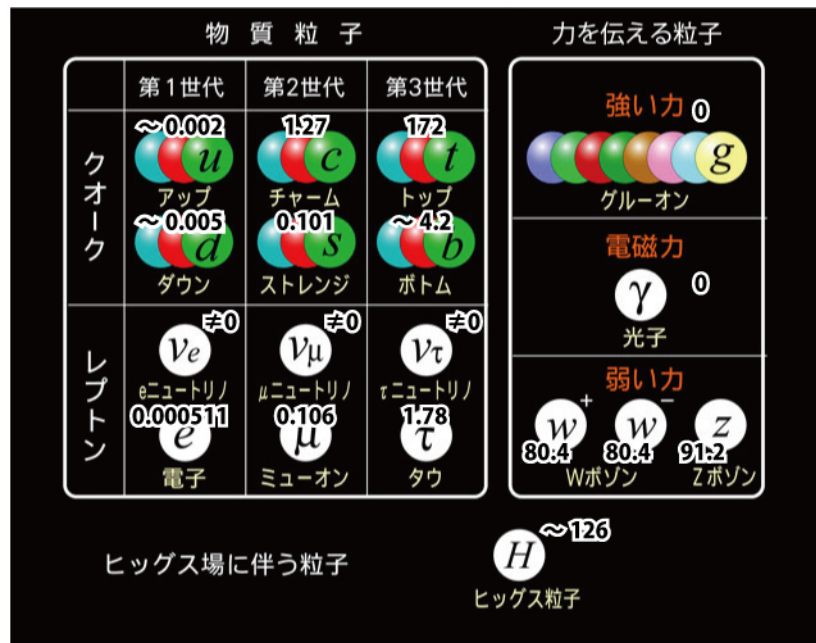


図 1.1: 素粒子の標準模型 (数値は質量 $[GeV/c^2]$)

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。

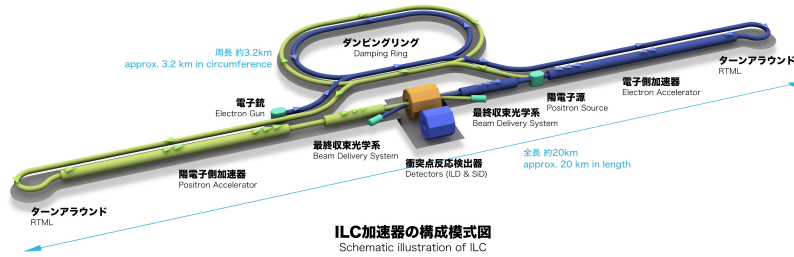


図 1.2: ILC の概略図

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

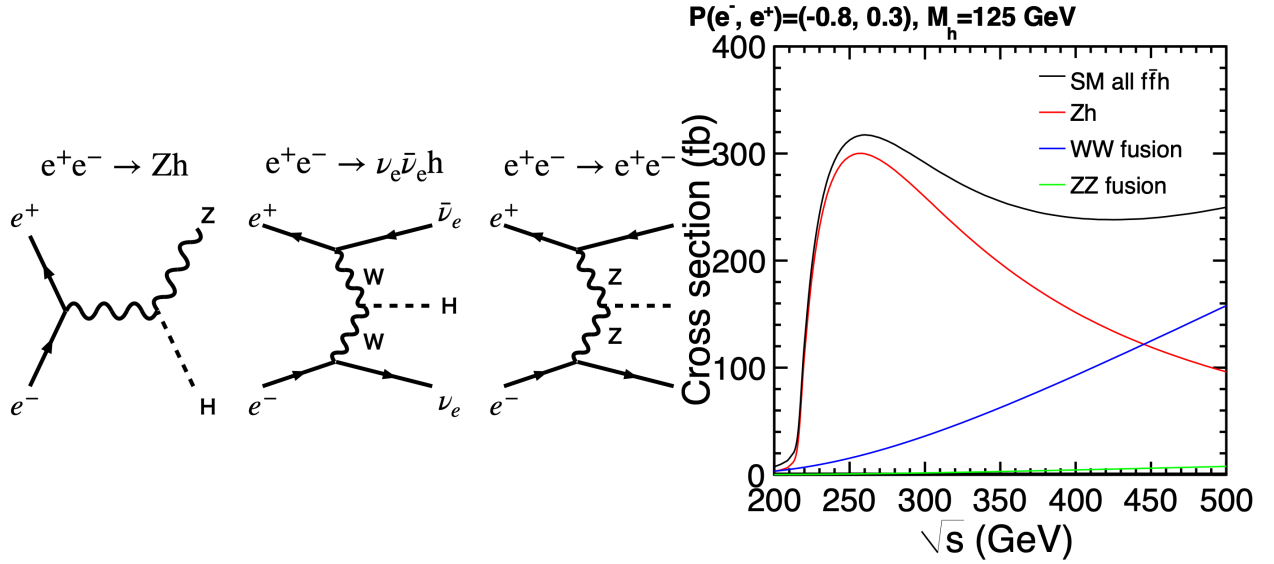


図 1.3: (左)ILC におけるヒッグス生成断面積。ヒッグス粒子の質量が $m_h = 125$ GeV であるとして、ZH 随伴生成、WW fusion、ZZ fusion をそれぞれ赤、青、緑線で示している。またこのとき電子・陽電子の偏極は、それぞれ電子が左巻き 90%、右巻き 10% の 80% であり、陽電子は左巻き 35%、右巻き 65% の 30% としている。(右)ZH 随伴生成、WW fusion、ZZ fusion におけるファインマンダイアグラム。

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。

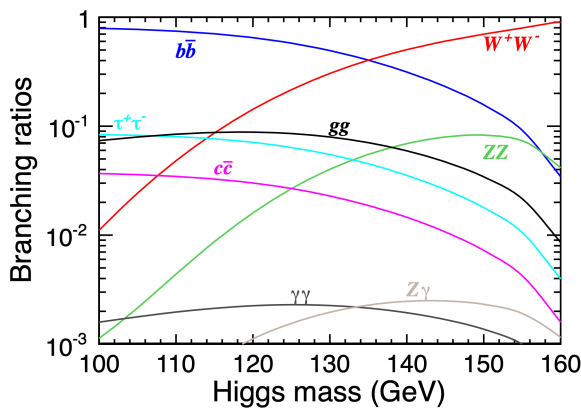


図 1.4: 標準理論におけるヒッグス粒子の質量と崩壊分岐比の関係

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ふ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。この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。

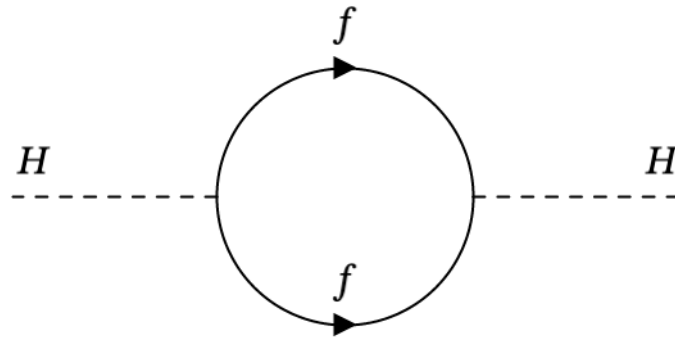


図 1.6: ヒッグス粒子の質量補正となるフェルミオンループ

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性があるが、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 350 GeV 以上ではトップクォークの質量を精密測定が可能であり、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。

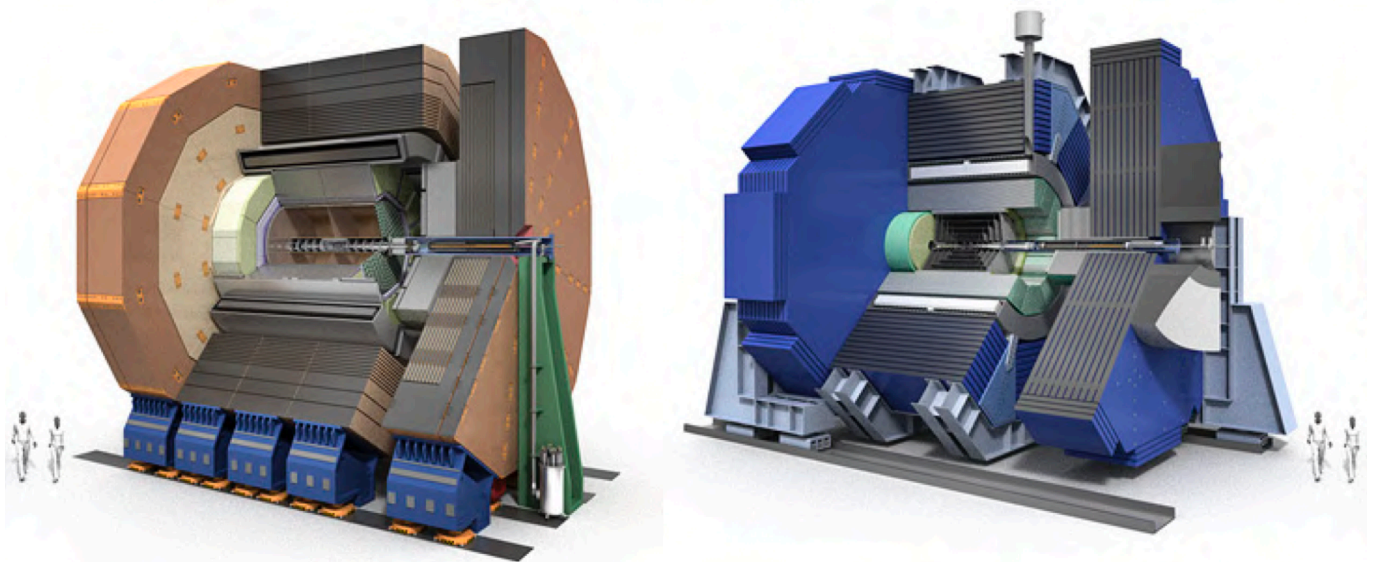


図 1.7: (左) ILD (右) SiD の全体図

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 3.5 T 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。

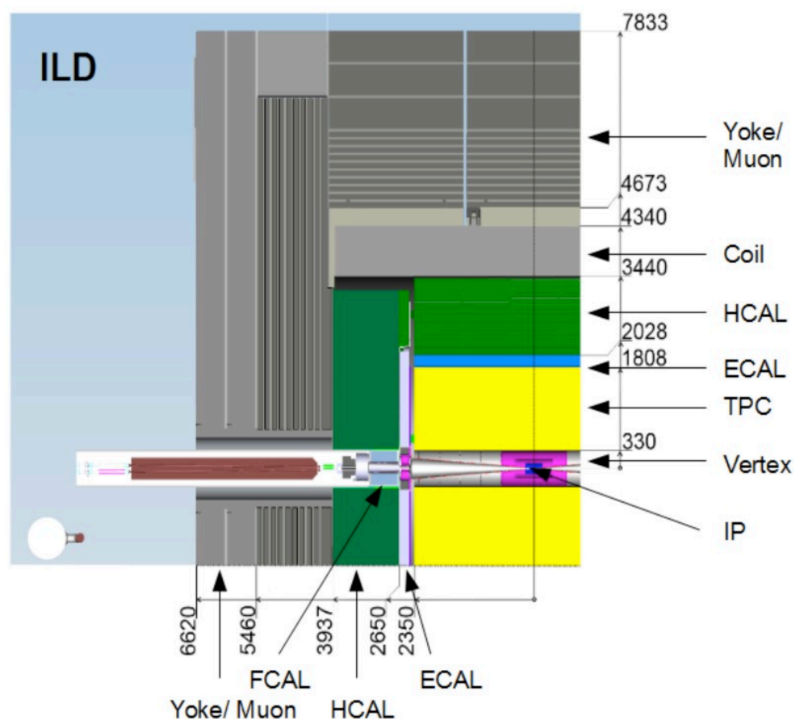


図 1.8: ILC の断面図

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粒子の飛跡を測定する。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 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。

飛跡検出器

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 はガス検出器であり、荷電粒子が通過した際にガス内に生じる電離電子を電極間にか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を測定し、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る。

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の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 の物理解析

1.5.1 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
荷電粒子	飛跡検出器
光子	ECAL
中性ハドロン	HCAL
ニュートリノ	-

表 1.1: ジェットを占める各粒子と対応する検出器

1.5.2 ジェット再構成

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