

2021 年度 修士論文

深層学習を用いた ILC 崩壊点検出アルゴリズムの開発

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

後藤 輝一

指導教員 川越 清以

2020 年 12 月 14 日



概要

素粒子はそれが従う統計によって二種類に分類され、フェルミ統計に従う粒子をフェルミ粒子、ボース統計に従う粒子をボース粒子と呼ぶ。現時点で存在が知られているフェルミ粒子はクォークとレプトンとに分類される。一方、現時点で知られているボース素粒子には、素粒子間の相互作用を伝達するゲージ粒子と、素粒子に質量を与えるヒッグス機構に関連して現れるヒッグス粒子とがある。ゲージ粒子のうち、重力を媒介するとされる重力子は未発見である。素粒子の大きさは分かっておらず、大きさが無い（点粒子）とする理論と、非常に小さいがある大きさを持つとする理論がある。標準模型（標準理論）では素粒子には大きさが無い（点粒子）ものとして扱っており、現時点では実験結果と矛盾が生じていない。ただし、点粒子は空間が最小単位の存在しない無限に分割可能な連続体であることを前提としているが、標準模型で扱うスケールより 15 桁以上小さいスケール（プランク長スケール）においては、空間が連続的であるか離散的であるかは判明していない。離散的である場合には点粒子として扱えない。超弦理論においては全ての素粒子は有限の大きさを持つひもの振動状態であるとされる。我々が普段目にする物質は（微小な、あるいは大きさが無い）素粒子からできているにも関わらず、有限の大きさを持っている。それは、複数の素粒子が運動する有限の領域が、ハドロンや原子などの大きさを持つ粒子を構成することによる。素粒子のうちほとんどのものは、自然界に単独で安定的に存在しているわけではないので、宇宙線の観測や加速器による生成反応により発見・研究された。素粒子の様々な性質を実験で調べ、それを理論的に体系化していくこと、及び理論的に予言される素粒子を実験で探索していくことが、素粒子物理学の研究目的である。

目次

第 1 章	序論	9
1.1	標準模型	9
1.2	ILC 計画	10
1.3	ILC の物理	12
1.4	ILC の検出器 -International Large Detector (ILD)-	13
1.5	ILC のソフトウェアと事象再構成	13
1.5.1	ソフトウェア	15
1.5.2	飛跡の再構成	15
1.5.3	ジェットの再構成	16
1.6	本研究の目的	17
1.7	本論文の流れ	18
第 2 章	深層学習	19
2.1	機械学習と深層学習	20
2.2	パーセプトロン	20
2.2.1	単純パーセプトロン	20
2.2.2	多層パーセプトロン	20
2.3	ニューラルネットワーク	20
2.3.1	ニューラルネットワークの構造	20
2.3.2	ニューラルネットワークの学習	20
2.3.3	ディープニューラルネットワーク	20
2.4	リカレントニューラルネットワーク	20
2.4.1	リカレントニューラルネットワークの構造と学習	20
2.4.2	リカレントニューラルネットワークの問題点	20
2.4.3	長・短期記憶 (Long Short-Term Memory, LSTM)	20
2.5	Attention	20
2.5.1	エンコーダー・デコーダーモデル	20
2.5.2	Attention	20

2.6	ハイパーパラメータ	20
第 3 章	崩壊点検出の為のネットワーク	21
3.1	データ	21
3.1.1	データ全体の性質	21
3.1.2	飛跡の情報と前処理	21
3.2	深層学習を用いた崩壊点検出の実現	21
3.3	飛跡対についてのネットワーク	21
3.3.1	ネットワークの構造	21
3.3.2	ネットワークの学習と戦略	21
3.3.3	ネットワークの評価	21
3.4	任意の数の飛跡についてのネットワーク	21
3.4.1	ネットワークの構造	21
3.4.2	ネットワークの学習と戦略	21
3.4.3	ネットワークの評価	21
第 4 章	深層学習を用いた崩壊点検出	22
4.1	崩壊点検出アルゴリズム	22
4.2	崩壊点検出の最適化と評価	22
4.3	崩壊点検出の性能	22
第 5 章	現行の手法との比較	23
5.1	崩壊点検出単体での比較	23
5.2	フレーバータギングを含めた比較	23
第 6 章	まとめと今後の展望	24
付録 A	ソースコード	26
A.1	飛跡対についてのネットワーク	26
A.2	任意の数の飛跡についてのネットワーク	26
A.3	崩壊点の再構成	26
	参考文献	27

図目次

1.1	標準模型の素粒子	10
1.2	ILC の全体像	11
1.3	ILC 計画の今後	11
1.4	重心系エネルギーとヒッグス事象生成断面積の関係	12
1.5	International Large Detector (ILD)	14
1.6	Primary Vertex と Secondary Vertex の図示	16
1.7	深層学習によるジェットの再構成	18

表目次

1.1	ILD サブディテクターの詳細なパラメータ (バレル)	14
1.2	ILD サブディテクターの詳細なパラメータ (エンドキャップ)	14

第 1 章

序論

本章では、まず 1.1 節で素粒子の振る舞いを記述する理論である、標準模型 (Standard Model, SM) について紹介する。

次に 1.2 節にて、この標準模型や標準模型を超える物理 (Physics beyond the Standard Model, BSM) を探索するための国際線形加速器 (International Linear Collider, ILC) 計画についての説明を行う。そのような ILC が目指す物理について 1.3 節で述べる。また、ILC で使用される予定の検出器やソフトウェアに関する説明を 1.4 節と 1.5 節で行う。

更に本研究の目的について 1.6 節で、本論文の流れについて 1.7 節でそれぞれ述べ本論文の序論とする。

本章の作成にあたり、参考文献 [1, 2] を使用した。

1.1 標準模型

宇宙の誕生や、生物の発生と同様に、物質の起源は人類の根元的な問いの一つである。そのような物質の素となる粒子のことを素粒子といい、その素粒子の振る舞いを記述する理論を標準模型という。標準模型によると、素粒子はスピン半整数のフェルミ粒子とスピン整数のボース粒子に分類される。

フェルミ粒子は全てスピン $1/2$ の粒子で構成され、陽子や中性子などのハドロンを構成するクォークと電子やニュートリノなどのレプトンに分けられる。更に、クォークは電荷が $+2/3$ のアップクォーク系列と $-1/3$ のダウルクォーク系列に、レプトンは電荷が -1 の荷電レプトンと中性電荷の中性レプトン (ニュートリノ) に分けられる。また、それぞれ世代と呼ばれるものを構成し現在は 3 つの世代が確認されている。クォークの場合はアップクォーク u 、チャームクォーク c 、トップクォーク t 、ダウルクォーク d 、ストレンジクォーク s 、ボトムクォーク b が存在する。レプトンの場合は荷電レプトンとして、電子 e^- 、ミュー粒子 μ^- 、タウ粒子 τ^- 、中性レプトンとして、電子ニュートリノ ν_e 、ミューニュートリノ ν_μ 、タウニュートリノ ν_τ が存在している。これらの系列や世代間の違いをフレーバーと呼んでいる。

ボース粒子は基本的な四つの相互作用である、強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用、

重力相互作用の内、重力相互作用を除いた三つの相互作用をそれぞれ媒介するスピン 1 のゲージ粒子と、対称性を破り素粒子に質量を与えるスピン 0、中性電荷のヒッグス粒子 H で構成される。電磁相互作用を媒介する粒子として、中性電荷の光子 γ 、強い相互作用を媒介する粒子として、中性電荷のグルーオン g 、弱い相互作用を媒介する粒子として、電荷 ± 1 の W ボソン W^\pm 、中性電荷の Z ボソン Z が存在する。

更に素粒子には、質量やスピンが等しく電荷の正負のみが反転した反粒子が存在する。これら反粒子と通常の粒子が衝突すると対消滅が起こり、その質量が全てエネルギーへと変換される。一方、ある粒子の質量の二倍以上のエネルギーを生じさせた場合は対生成が起こり、その粒子と反粒子の対が生成されることがある。

以上の素粒子を標準模型の素粒子といい、一般に図 1.1 のように纏められている。

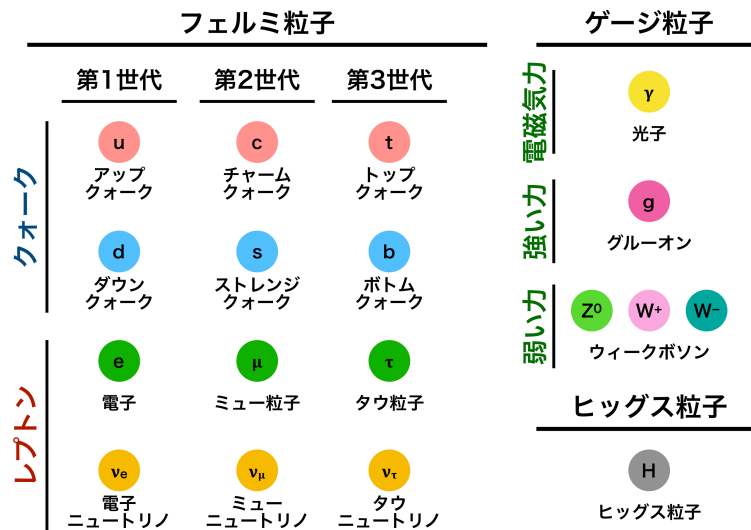


図 1.1: 標準模型の素粒子

標準模型は様々な実験で非常によく確かめられているが、ダークマターをはじめとする幾つかの物理現象を説明できていない。これらの標準模型で説明できない物理現象を BSM といい、現在は様々な実験施設で BSM の探索が行われている。次節の ILC 計画はそのような試みの一つである。

1.2 ILC 計画

ILC 計画とは、日本の東北にある北上山地に図 1.2 のような全長 20.5 km の国際線形加速器 (ILC) を建設する計画である。ILC 計画は国際共同研究であり、2013 年に出版された The Technical Design Report (TDR[3]) には 2400 人の研究者、48 ヶ国、392 の研究機関と大学のグループが著名している。また、技術開発はリニアコライダーコラボレーション (The Linear Collider Collaboration, LCC) によって推進され、LCC の活動は国際将来加速器委員

会 (The International Committee for Future Accelerator, ICFA) の下、リニアコライダー国際推進委員会 (Linear Collider Board, LCB) によって監督されている。2021 年現在、ILC 計画は準備段階へ向けて計画が進められており、ILC 準備研究所 (ILC Pre-Lab) の為の準備として ICFA は ILC の国際推進チーム (International Development Team, IDT) の設立を承認した。今後は LCC や LCB に代わり、この ILC 国際推進チームが ILC 計画の推進を行なっていく予定となっている。ILC 計画の今後の大まかな流れを図 1.3 に示す。

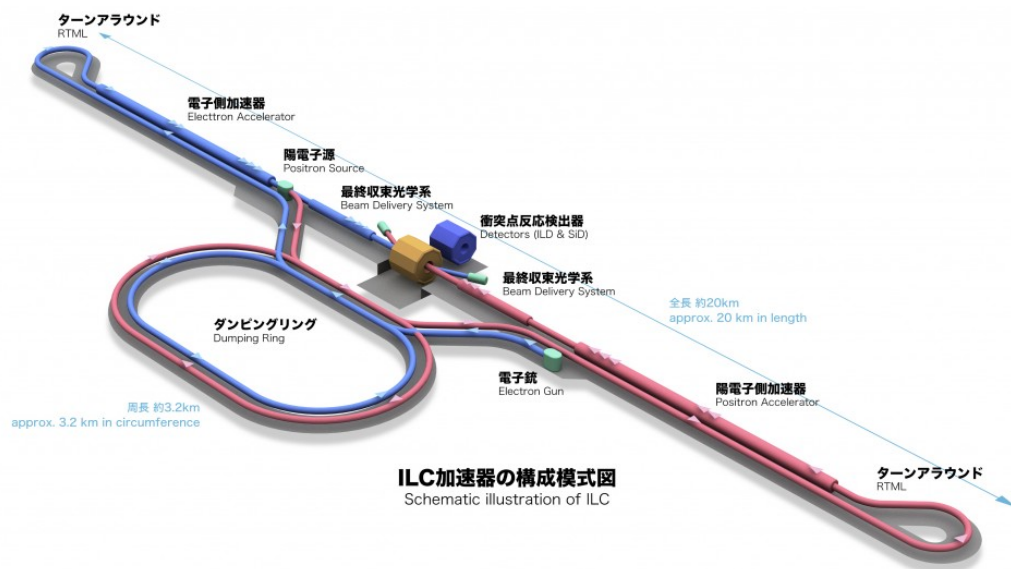


図 1.2: ILC の全体像 [4]

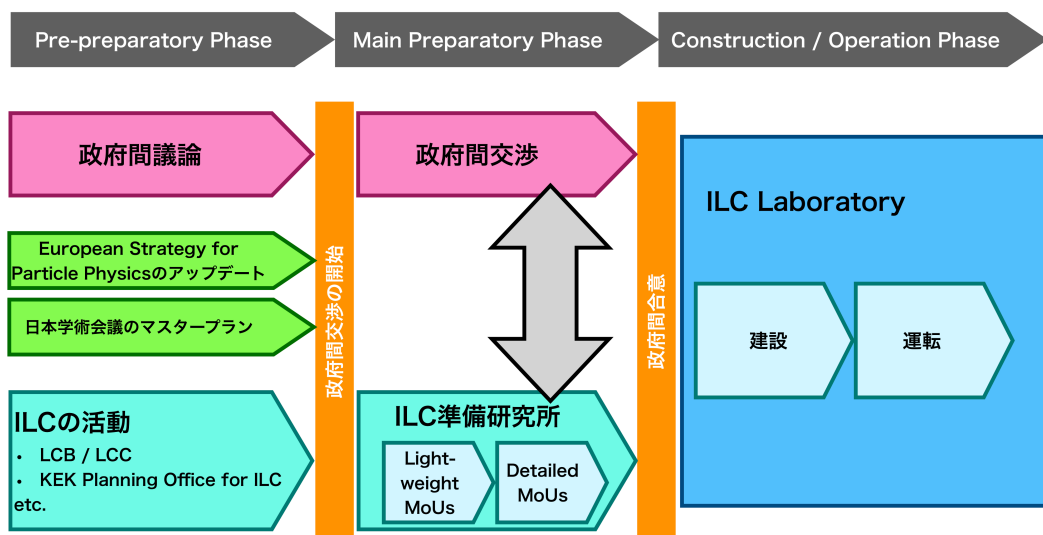


図 1.3: ILC 計画の今後 [5]

1.3 ILC の物理

ヒッグス粒子が 2012 年に欧州原子核研究機構 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider, LHC) で発見されて以降、ヒッグス粒子の性質について、より詳細な調査が行われている。ヒッグス粒子は標準模型の中で電弱相互作用の対称性を破り、素粒子に質量を与える役割を担っており、更に質量に結合するという特徴を持っている。このような性質からヒッグス粒子の振る舞いは標準模型によって詳細に決定される。したがって BSM によって標準模型の素粒子の振る舞いに変化が生じた場合、ヒッグス粒子はその影響を受けると予想されている。特にヒッグス粒子の結合定数は、そのような BSM の仮定によって異なった変化をする事が示唆されている。

ILC は、このヒッグス粒子の性質を詳細に調べる為のヒッグスファクトリーとしての役割を期待されている。LHC が陽子-陽子を衝突させる加速器であるのに対し、ILC は電子-陽電子を衝突させる加速器である。これは粒子と反粒子の関係となっており、ILC は LHC と比較して目的とする事象に対しエネルギーをより効率的に使うことができる。更に電子-陽電子衝突の場合は相互作用の関係から、背景事象が少ないという特徴を持っている。

ILC は $e^+e^- \rightarrow Zh$ 事象の反応断面積が最大となる重心系エネルギー $\sqrt{s} = 250$ GeV での運転開始 (ILC250) を予定している (図 1.4)。また、ILC には様々な物理目標を達成する為に多数のアップグレードオプションが存在し、重心系エネルギーについてはメインリニアックを延長することで 1 TeV までの拡張が可能である。

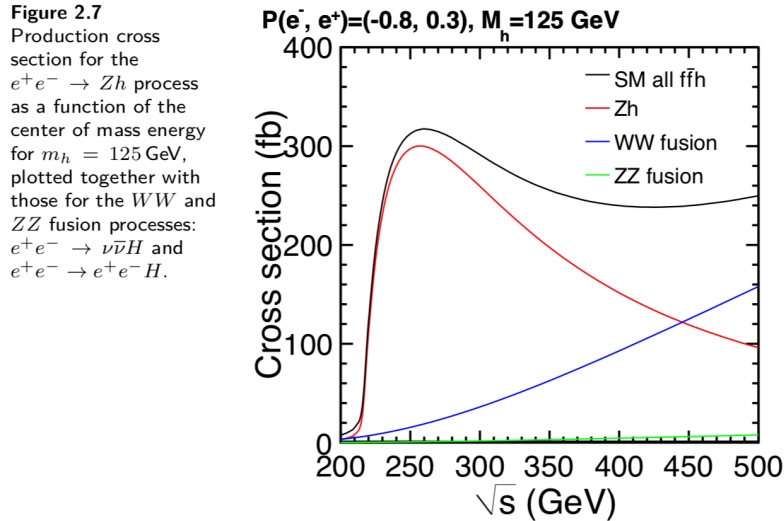


図 1.4: 重心系エネルギーとヒッグス事象生成断面積の関係 [6]。ヒッグス粒子の質量を 125 GeV とした時の $e^+e^- \rightarrow Zh$ 事象の生成断面積を赤線でプロットしている。また、 WW fusion $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}h$ 事象、 ZZ fusion $e^+e^- \rightarrow e^+e^-h$ 事象をそれぞれ青線、緑線で表現している。

$e^+e^- \rightarrow Zh$ 事象はヒッグス粒子の反跳粒子である Z 粒子の識別をすることによって、ヒッグス粒子の崩壊モードに寄らず事象を選別できるという点で非常に重要である。また、背景事

象である $e^+e^- \rightarrow Z\gamma$ や $e^+e^- \rightarrow ZZ$ に関してもよく理解されており、電弱相互作用の計算によって 0.1 % 程度に抑えることができる [1]。この反跳粒子を使用した解析では $e^+e^- \rightarrow Zh$ 事象の全断面積を得ることができ、絶対正規化されたヒッグス粒子の結合定数やヒッグス粒子のエキゾチック崩壊についての測定が可能となる。

$e^+e^- \rightarrow Zh$ 事象での終状態の Z 粒子は、レプトン対 ($Z \rightarrow l^+l^-$) またはクォーク対 ($Z \rightarrow q\bar{q}$) に崩壊する。レプトン対にはおよそ 30% 程度の割合で崩壊し、クォーク対には残りの 70% 程度の割合で崩壊する為、統計量を大きくするという点でクォーク対をより精度よく識別することは非常に重要である。これらのクォーク対はエネルギー効率のために、それぞれ真空中でクォークの粒子反粒子対を生成・結合しハドロンとなる。この過程で生成されたクォークも同様にハドロンを形成するため、初めのクォーク対のそれぞれの進行方向には多数のハドロン粒子が生成されることとなる。これをジェットといい、 Z 粒子を始めとする様々な粒子のクォークへの崩壊は、このジェットを用いて識別される。このジェットの再構成については、1.5.3 項にて説明する。

1.4 ILC の検出器 -International Large Detector (ILD)-

ILC では Silicon Detector (SiD) と International Large Detector (ILD) 二つの検出器コンセプトが検討されている。本研究は ILD のデータを用いている為、本節では ILD について簡単な解説を行う。ただし、本研究の基本的な発想はそのような検出器の違いに寄らず使用することができる。

ILD はヒッグス粒子や電弱相互作用の物理からの要求値を満たすように設計され、また後述する Particle Flow (1.5.2 項) によって最適化されている。また ILD は様々なサブディテクターによって構成され、ビームの衝突点 (図??の右下) を包む様に内側から順に、Vertex Detector (VTX)、Silicon Internal Tracker (SIT)、Time Projection Chamber (TPC)、Electromagnetic Calorimeter (ECAL)、Hadron Calorimeter (HCAL)、Iron Yoke (Muon) が並んでいる。また、HCAL と Iron Yoke の間には Solenoid Coil があり、3.5T の磁場をかけている。ILD では、VTX や SIT、TPC を用いて荷電粒子の飛跡を測定し、ECAL によって電子や光子、HCAL によってハドロン粒子のエネルギーを測定する。

衝突点の前方方向には、Forward Tracking Detector (FTD)、Luminosity Calorimeter (LumiCAL)、LHCAL、Beam Calorimeter (BeamCAL) が並んでいる。それぞれのサブディテクターの詳細については表 1.1 と表 1.2 にまとめる。

1.5 ILC のソフトウェアと事象再構成

ここでは ILC で使用されるソフトウェアと事象再構成について述べる。事象再構成とは、加速器実験によって得られるデータから飛跡やジェットなどの物理情報を再構成するアルゴリズムである。そのような再構成は電子-陽電子の衝突毎に行われ、この衝突一回分の事を事象

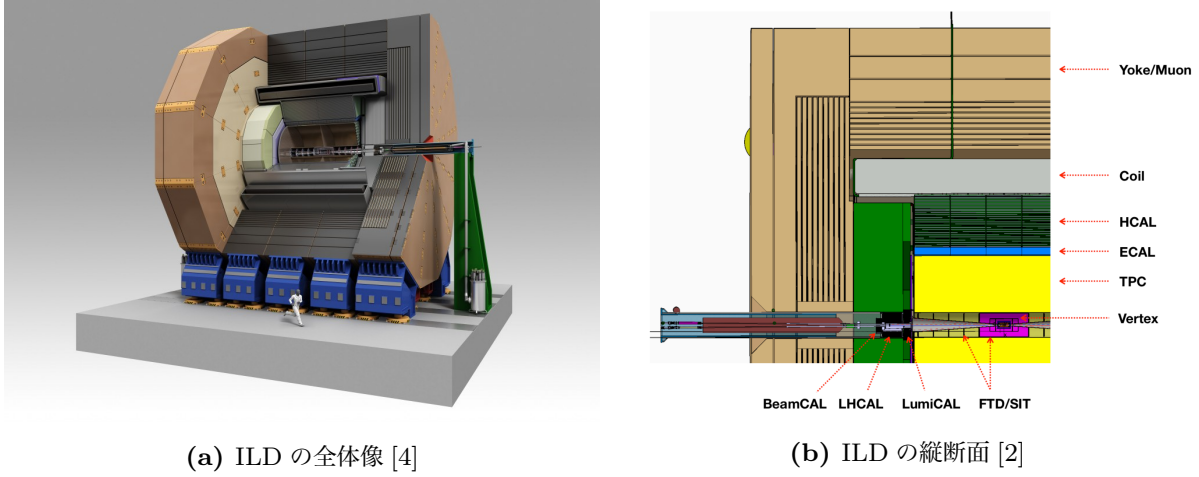


図 1.5: International Large Detector (ILD)

	r_{in} [mm]	r_{out} [mm]	z_{max} [mm]	要素技術
VTX	16	60	125	シリコンピクセルセンサー
SIT	153	303	644	シリコンピクセルセンサー
TPC	329	1770	2350	マイクロパターンガス検出器
SET	1773	1776	2300	シリコンストリップセンサー
ECAL	1805	2028	2350	吸収層: タングステン センサー: シリコン/シンチレーター
HCAL	2058	3345	2350	吸収層: スチール センサー: シンチレーター/RPC ガス
Coil	3425	4175	3872	
Muon	4450	7755	4047	センサー: シンチレーター

表 1.1: ILD サブディテクターの詳細なパラメータ (バレル) [2]

	z_{min} [mm]	z_{max} [mm]	r_{in} [mm]	r_{out} [mm]	要素技術
FTD	220	371		153	シリコンピクセルセンサー
	645	2212		300	シリコンストリップセンサー
ECAL	2411	2635	250	2096	吸収層: タングステン センサー: シリコン/シンチレーター
HCAL	2650	3937	350	3226	吸収層: スチール センサー: シンチレーター/RPC ガス
Muon	4072	6712	350	7716	センサー: シンチレーター
BeamCAL	3115	3315	18	140	吸収層: タングステン GaAs 読み出し
LumiCAL	2412	2541	84	194	吸収層: タングステン センサー: シリコン
LHCAL	2680	3160	130	315	吸収層: タングステン

表 1.2: ILD サブディテクターの詳細なパラメータ (エンドキャップ) [2]

という。

ILC のソフトウェアは iLCSoft[?] と呼ばれるソフトウェアエコシステムにまとめられている。

ILC における事象再構成は、トラッキングや Particle Flow といった 1.5.2. 粒子の再構成と、更にそれらによって再構成された粒子を使った 1.5.3. ジェットの再構成に区分できる。ILC ではジェットの再構成は崩壊点検出、ジェットクラスタリング、フレーバータギングという行程で行われる。これらジェットの再構成は iLCSoft 内の LCFIPlus[?] が使用されている。

1.5.1 ソフトウェア

ILC は実際の実験データを取得できないため、本研究で使用するデータは全てシミュレーションデータである。シミュレーションデータは標準模型と BSM を用いて、モンテカルロ (Monte Carlo, MC) 法によって生成されており、シミュレーションにおける検出器の情報は DD4hep[?, ?] という検出器記述の為のツールキットによって提供されている。それらのシミュレーションデータは LCIO と呼ばれる階層型の Event Data Model (EDM) によって管理されている。LCIO では、MC 情報から事象の生データ、デジタル化、解析や後述する再構成に至るまでが紐づけられており、階層的に取り扱うことができる。

ILC のソフトウェアは二つの検出器コンセプト (ILD, SiD) で共通しており、前述したように現在は iLCSoft というソフトウェアエコシステムによって統括されている。提供されている API の言語は C++・java・Fortran である。

それらソフトウェアモジュールは Marlin[?] という C++ アプリケーションフレームワークによって運用されており、プロセッサと呼ばれるモジュールを作成・組み込むことにより、様々な再構成・解析アルゴリズムを簡単に別のモジュールへ置き換えることができる。また、データの入出力は LCIO、ROOT フォーマットによって行われる。

1.5.2 飛跡の再構成

飛跡の再構成は、シミュレーションされた検出器のデータから、粒子 (飛跡) を再構成するトラッキングと、そのようにして得られた個々のトラッキング検出器 (VTX, SIT, TPC など) の飛跡や粒子についての情報を繋ぎ合わせ、より高精度の粒子情報を提供する Particle Flow という手順によって行われる。

トラッキングでは Kalman-Filter が使用され、まず荷電粒子の軌跡をパターン認識を用いて再構成し、次にそれらの軌跡について運動学的な物理量をフィッティングによって抽出している。ILD において異なるサブディテクターのトラッキングは異なるアルゴリズムが使用されている。

トラッキングによって運動学的な物理量を得られるのは荷電粒子のみである。中性粒子は VXD や TPC に飛跡を残さない為、他のサブディテクターを用いた再構成が必要である。このように粒子の性質によって、再構成を行うべき最適なサブディテクターは異なる。ILC に

おける粒子種毎の最適な測定手法や再構成手法の選択は、Particle Flow によって提供されている。Particle Flow では荷電粒子をトラッキング検出器によって測定し、光子や中性ハドロンの再構成をそれぞれ ECAL や HCAL で行う。これらの再構成について、iLCSoft では PandoraPFA と呼ばれるアルゴリズムが使用されている。このアルゴリズムでは、まずカロリメータのヒットをクラスター化し、それらクラスターとトラッキング情報を関連づけ粒子識別を行っている。

以上が飛跡の再構成である。飛跡の再構成では、検出器で得られた情報から粒子を再構成するまでを行なっている。実際には、注目すべき物理事象は前述したジェットのような特徴的なシグネチャを残す為、次項のジェットの再構成による更なる事象再構成が必要である。

1.5.3 ジェットの再構成

事象中に生じたクォークは 1.3 節で述べたようにジェットを形成する。ジェットには多数の粒子（飛跡）が含まれ、それら多数の粒子の親となる粒子が崩壊した点を崩壊点（Vertex）という。特に、ハドロンのような準安定な親粒子の崩壊点の事を Secondary Vertex といい、電子-陽電子の衝突点を Primary Vertex という（図 1.6）。ジェットの再構成では、まずこの崩壊点を崩壊点検出（Vertex Finder）を用いて探索し、そのようにして得られた崩壊点を用いてジェット中の粒子を分離するジェットクラスタリング（Jet Clustering）が行われ、そのジェット中の飛跡から崩壊した準安定な親粒子のクォーク・フレーバーを識別するフレーバータギング（Flavor Tagging）が行われる。

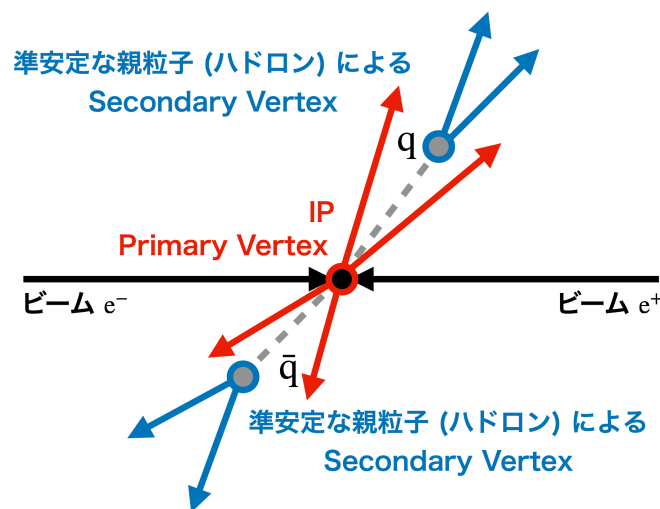


図 1.6: Primary Vertex と Secondary Vertex の図示。左右から電子・陽電子ビームが入射され、図中央で衝突したと仮定している。灰色の破線は準安定なハドロンを表現しており、赤線の飛跡と共に IP (Primary Vertex) から生じている。ハドロンは更に図右上と左下で崩壊し、Secondary Vertex を残す。青線はこの Secondary Vertex 由来の飛跡である。

崩壊点検出では、二本以上の飛跡について交点を求めるフィッティングを用いている。この時、フィッティングの健全性は χ^2 値によって把握している。

まず Primary Vertex の再構成を Tear-Down 法によって行う。具体的には予想されるビームスポットと事象中の全飛跡についてフィッティングを行い、 χ^2 値が一定以下になるまで χ^2 値への寄与が大きい飛跡を一本ずつ取り除くことによって、残った飛跡を Primary Vertex 由来であると判定している。次に Secondary Vertex の再構成を Build-Up 法によって行う。ここでは、Primary Vertex に含まれていない飛跡について、二本の飛跡 (飛跡対) の全ての組み合わせを作りフィッティングを行う。そのようにして得られた χ^2 値と運動量の方向、不変質量などをカットベースに判定し、Secondary Vertex についての飛跡対を選別する。更に、この飛跡対について飛跡を加えていくことで Secondary Vertex を再構成している。

崩壊点検出で得られた崩壊点を用いて、ジェットクラスタリングが行われる。ジェットクラスタリングでは Durham アルゴリズム [?] を使用し、事象中の中性粒子を含めたより多くの情報を用いてジェット中の粒子をクラスター化している。

また、そのようにクラスター化されたジェット中の粒子についてフレーバータギングが行われる。フレーバータギングでは Boosted Decision Trees (BDTs) を用いて親粒子のフレーバーを識別している。

以上がジェットの再構成である。様々な物理解析において、ジェットの個数やそのフレーバーの識別は信号事象と背景事象の区別や物理解析などに使用されている。したがって、ジェットの再構成の性能向上はあらゆる物理解析の性能向上と直結していると言える。

1.6 本研究の目的

本研究の目的は、深層学習を使用して 1.5.3 項で紹介した崩壊点検出を開発・改善することである。ILC では現在 LCFIPlus 内の崩壊点検出が使用されているが、Primary Vertex や Secondary Vertex の選別に人が定めた閾値が多く含まれており、カットベースな評価が行われている。このような人が定めた閾値は最適ではなく、何らかの情報を欠損してしまっている可能性がある。本研究では深層学習を用いたパターン認識の技術から、新しい崩壊点検出アルゴリズムを提案しより柔軟な識別を行うことを目標とする。

また、この研究は深層学習を用いて事象再構成を改善していくプロジェクトの一つである。最終的には概念図 1.7 に示すように、全ての事象再構成アルゴリズムを深層学習や機械学習に置き換えることを目指している。これまで ILC の事象再構成ではあまり深層学習は使われておらず、特に崩壊点検出に関しては本研究が殆ど初めての試みである。

したがって、本研究のソフトウェア開発としての目的は、LCFIPlus への導入や次世代の LCFIPlus への深層学習実装における起点となる事である。ここでは、深層学習の実装・構築から iLCSoft への導入を行い、ILC 研究における深層学習導入の先駆けとなることを目指す。

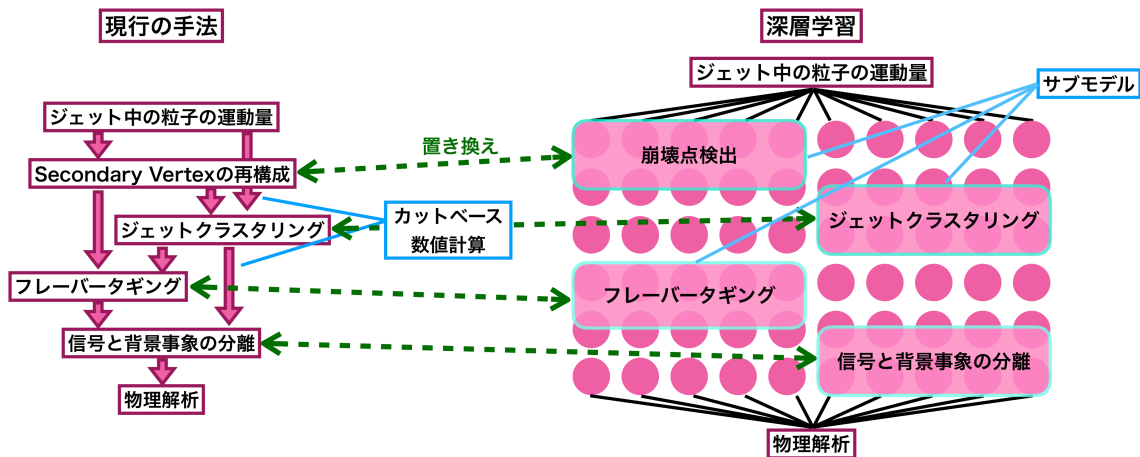


図 1.7: 深層学習によるジェットの再構成。図左は現行の手法、図右は目標としている深層学習を用いた再構成手法の概念図である。現行の手法では多くの場合、数値計算やそこから得られる変数に閾値を課してカットベースな評価が行われている。現在は深層学習への置き換えの第一段階として、それぞれの役割に特化したサブモデルと入れ替えを行い性能の改善を図っている。

1.7 本論文の流れ

本章と 2 章は本論文の導入である。

2 章では本論文の核となる技術である深層学習について解説を行う。ここでは、本研究を理解する為に必要な技術領域や背景理論について簡潔な導入を行い、3 章以降では、この 2 章の内容を前提とした議論を行う。ただし深層学習に関しての種々のテクニックについては経験則によるものが多いため、本研究で利用したものについては 2 章では説明せず、3 章で述べる。また、具体的な実装に関しても同様に 2 章では記載せず、付録 A にまとめる事とする。

3 章と 4 章、5 章は本論文の本題である。

3 章では本研究で使用するデータと作成した深層学習のネットワークについて、その構造の解説や評価を行う。また、深層学習を使用した崩壊点検出についての発想や計算環境に関しても 3 章で述べる。

4 章では 3 章で作成したネットワークを用いた崩壊点検出について、アルゴリズムや各種最適化、簡単な評価を行う。

5 章ではその様にして得られた崩壊点検出と、LCFIPlus で使用されている現行の崩壊点検出との比較について述べる。

6 章は本論文の結論である。ここでは、本研究をまとめると共に今後の展望について述べる。

第 2 章

深層学習

2.1 機械学習と深層学習

2.2 パーセプトロン

2.2.1 単純パーセプトロン

2.2.2 多層パーセプトロン

2.3 ニューラルネットワーク

2.3.1 ニューラルネットワークの構造

2.3.2 ニューラルネットワークの学習

2.3.3 ディープニューラルネットワーク

2.4 リカレントニューラルネットワーク

2.4.1 リカレントニューラルネットワークの構造と学習

2.4.2 リカレントニューラルネットワークの問題点

2.4.3 長・短期記憶 (Long Short-Term Memory, LSTM)

2.5 Attention

2.5.1 エンコーダー・デコーダーモデル

2.5.2 Attention

2.6 ハイパーパラメータ

第 3 章

崩壊点検出の為のネットワーク

3.1 データ

3.1.1 データ全体の性質

3.1.2 飛跡の情報と前処理

3.2 深層学習を用いた崩壊点検出の実現

3.3 飛跡対についてのネットワーク

3.3.1 ネットワークの構造

3.3.2 ネットワークの学習と戦略

3.3.3 ネットワークの評価

3.4 任意の数の飛跡についてのネットワーク

3.4.1 ネットワークの構造

3.4.2 ネットワークの学習と戦略

3.4.3 ネットワークの評価

第 4 章

深層学習を用いた崩壊点検出

4.1 崩壊点検出アルゴリズム

4.2 崩壊点検出の最適化と評価

4.3 崩壊点検出の性能

第 5 章

現行の手法との比較

5.1 崩壊点検出単体での比較

5.2 フレーバータギングを含めた比較

第 6 章

まとめと今後の展望

謝辭

付録 A

ソースコード

A.1 飛跡対についてのネットワーク

A.2 任意の数の飛跡についてのネットワーク

A.3 崩壊点の再構成

参考文献

- [1] P. Bambade *et al.*, The international linear collider: A global project, 2019, 1903.01629.
- [2] T. I. Collaboration, International large detector: Interim design report, 2020, 2003.01116.
- [3] T. Behnke *et al.*, The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 1: Executive Summary, (2013), 1306.6327, See also <http://www.linearcollider.org/ILC/TDR> . The full list of contributing institutes is inside the Report. %%CITATION = arXiv : 1306.6327;%%
- [4] Ilc photo gallery, <http://ilcgallery.com/>.
- [5] **KEK International Working Group**, K. Desch *et al.*, Recommendations on ILC Project Implementation, (2019).
- [6] H. Baer *et al.*, The International Linear Collider Technical Design Report - Volume 2: Physics, (2013), 1306.6352, See also <http://www.linearcollider.org/ILC/TDR> . The full list of signatories is inside the Report. %%CITATION = arXiv : 1306.6352;%%