

修士論文

リニアコライダーに於ける  
クオークエネルギー再構成の研究

東北大学大学院理学研究科  
物理学専攻

藤川智暁

平成17年

## 概要

現在計画されている ILC (International Linear Collider) 実験計画は重心エネルギーが TeV 領域にまで到達する電子、陽電子衝突型実験を行うためのものであり、現在その実現に向けて世界各国で研究、開発が行われている。ILC では多数生成されるジェットイベントに対する精密な解析が必要とされ、その内の一つとしてジェットイベントのエネルギー分解能は高い精度が要求されている。本研究は ILC における検出器の候補の一つである GLD 検出器用のシミュレータを用い、ジェットイベントに対する精度の高いエネルギー分解能を実現するためのイベント再構成用アルゴリズム (PEA) の作成を目的としたものである。また本研究では、その性能評価のために主に  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント  $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$  を用いてテストを行った。

# 目次

|  |           |
|--|-----------|
| <b>第 1 章 Introduction</b>                | <b>7</b>  |
| 1.1 ILC 実験計画                             | 7         |
| 1.2 LC で期待される物理                          | 7         |
| 1.2.1 Higgs study                        | 8         |
| 1.2.2 Supersymmetry                      | 9         |
| 1.2.3 Top Quark Study                    | 9         |
| <b>第 2 章 ILC における物理解析</b>                | <b>11</b> |
| 2.1 GLD Detector                         | 11        |
| 2.1.1 Vertex Detector                    | 12        |
| 2.1.2 Intermediate Tracker               | 13        |
| 2.1.3 Time Projection Chamber            | 14        |
| 2.1.4 Calorimeter                        | 14        |
| 2.1.5 Muon Detector                      | 16        |
| 2.2 The Particle Flow Algorithm          | 17        |
| <b>第 3 章 The simulation tools</b>        | <b>20</b> |
| 3.1 Jupiter                              | 20        |
| 3.2 JSF                                  | 22        |
| 3.3 Uranus と Satellites                  | 22        |
| <b>第 4 章 The Particle Flow Algorithm</b> | <b>25</b> |
| 4.1 PFA の流れ                              | 25        |
| 4.2 MIP、IL 及びミュオンの再構成                    | 30        |
| 4.2.1 荷電ハドロンに対する MIP 部分及び IL の同定         | 30        |
| 4.2.2 ミュオンの再構成                           | 32        |
| 4.3 光子の再構成                               | 34        |
| 4.3.1 クラスタリング                            | 34        |
| 4.3.2 トラックとの距離の情報による PID                 | 40        |
| 4.3.3 シャワーの縦方向に関するエネルギーの情報による PID        | 40        |
| 4.3.4 ヒット数とエネルギーの相関による PID               | 44        |
| 4.3.5 TOF の情報による PID                     | 44        |
| 4.3.6 光子の再構成に関する結果                       | 45        |
| 4.4 電子の再構成                               | 46        |
| 4.5 荷電ハドロンの再構成                           | 47        |
| 4.6 中性ハドロンの再構成                           | 48        |

|                                    |           |
|------------------------------------|-----------|
| 4.6.1 クラスタリング . . . . .            | 48        |
| 4.6.2 Satellite hits の除去 . . . . . | 48        |
| 4.7 エネルギーキャリブレーション . . . . .       | 51        |
| 4.8 結果と考察 . . . . .                | 54        |
| <b>第 5 章 Summary</b>               | <b>57</b> |
| 付 録 A ジェットの環境下における各粒子のエネルギー        | 61        |
| 付 録 B 粒子の再構成の評価に関する効率、純度の定義        | 64        |
| 付 録 C カロリメータ内でのシャワー                | 66        |

# 目次

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1  | ヒッグス粒子の探索に用いられる反応   | 8  |
| 1.2  | ILCでの物理のターゲット   | 10 |
| 2.1  | GLD 検出器の概観  | 12 |
| 2.2  | VTX の構造図  | 13 |
| 2.3  | IT の構造図   | 14 |
| 2.4  | strip type の CAL の構造図   | 15 |
| 2.5  | $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}WW, \nu\bar{\nu}ZZ (W/Z \rightarrow jj)$ イベントにおける質量分布 | 18 |
| 2.6  | $Z \rightarrow q\bar{q}$ イベントにおけるトータルエネルギー分布の比較                                       | 19 |
| 3.1  | Jupiter における検出器の概要  | 21 |
| 3.2  | Jupiter におけるカロリメータのタワー構造  | 22 |
| 3.3  | Uranus 及び Satellites の関係図   | 24 |
| 4.1  | 3GeV の光子を真上に入射した時のシグナル  | 27 |
| 4.2  | 3GeV の $\pi^-$ を真上に入射した時のシグナル   | 28 |
| 4.3  | 3GeV の $K_L^0$ を真上に入射した時のシグナル   | 28 |
| 4.4  | $Z \rightarrow q\bar{q}$ イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) でのシグナル                  | 29 |
| 4.5  | IL ポジションの同定に関する例。サンプルイベントは運動量 3GeV/c の $\pi^-$ を真上に打ち込んだ時のもの。                         | 31 |
| 4.6  | IL ポジションの同定に関する誤差   | 32 |
| 4.7  | Small Clustering の概念図   | 35 |
| 4.8  | Jet-Finding-like clustering における $\theta_{ij}$ の定義                                    | 37 |
| 4.9  | ECAL 上の Small cluster に対するトラックとの距離の分布   | 40 |
| 4.10 | クラスターに対する平均のレイヤー ID   | 42 |
| 4.11 | トータルのエネルギーデポジットを最大にするレイヤー ID の分布  | 42 |
| 4.12 | <i>Gamma distribution function</i> によるフィッティングの $\chi^2/ndf$                           | 43 |
| 4.13 | カンニングクラスタリングによるヒット数とエネルギーの分布と ECAL の Small cluster の R/TOF の分布                        | 44 |
| 4.14 | Satellite hits と形式上の速さ  | 49 |
| 4.15 | Satellite hits とエネルギーデポジットの密度   | 50 |
| 4.16 | 光子に対するキャリブレーションファクター  | 52 |
| 4.17 | 中性ハドロンに対するキャリブレーションファクター  | 52 |
| 4.18 | $Z \rightarrow q\bar{q}$ イベントにおけるトータルエネルギー分布の比較                                       | 54 |
| A.1  | ジェット中における各粒子のトータルエネルギーの分布   | 62 |

|     |  |    |
|-----|--|----|
| A.2 | ジェット中における各粒子のエネルギーの分布 . . . . .                              | 63 |
| C.1 | Electromagnetic shower と <i>Gamma distribution</i> . . . . . | 66 |
| C.2 | カロリメータ内でのシャワーの典型図 . . . . .                                  | 68 |

# 表目次

|     |  |    |
|-----|--|----|
| 2.1 | 各ビームオプションに応じた VTX の半径 . . . . .                  | 13 |
| 4.1 | Small Clustering の効率及び純度 . . . . .               | 36 |
| 4.2 | 光子及び電子に対する Jet-Finding-like clustering の各種のパラメータ | 39 |
| 4.3 | シングルの光子に対する再構成の効率 . . . . .                      | 45 |
| 4.4 | 中性ハドロンに対する Jet-Finding-like clustering の各種のパラメータ | 48 |
| 5.1 | 各粒子の再構成に対する結果 . . . . .                          | 57 |
| A.1 | ジェットにおける生成粒子のエネルギー . . . . .                     | 61 |

# 第1章 Introduction

20世紀、様々な加速器施設での実験により素粒子物理学の世界では多くの目覚ましい発展があった。現在の素粒子物理学の世界において、グルーオン、光子、 $W$  及び  $Z$  といったゲージ粒子が相互作用の媒介をするという標準模型が、数多くの実験によりその正当性を確認されている。しかしながら標準模型を形作る重要な要素である、自発的対称性の破れを引き起こす実体であるヒッグス粒子は未だ発見されておらず、さらには標準模型を超える理論に対する手がかりをつかむためにも、更なるエネルギーフロンティアでの実験は必要不可欠と考えられている。

## 1.1 ILC 実験計画

これまでの所、電子、陽電子衝突型実験における最大重心系エネルギーは、CERN の LEP(Large Electron Positron Collider) で達成された  $210\text{GeV}$  であった。またハドロンコライダーに関して言えば、フェルミ国立研究所の TEVATRON ではその重心系エネルギーが  $1.96\text{TeV}$  にまで達し、さらに現在それを超える重心系エネルギーである  $14\text{TeV}$  を目標とする、新しい陽子、陽子衝突型加速器、LHC(Large Hadron Collider) が CERN で建設中である。

LHC では高いエネルギー領域での実験を可能にする一方で、陽子、陽子の衝突であるためにその反応は複雑で、素過程の厳密な測定は難しい。その一方で電子、陽電子衝突型加速器実験では、その反応は素過程そのものであり厳密な測定が可能となる。しかしながら、円形衝突型加速器ではシンクロトロン放射によるビームエネルギーの損失により、実質的には LEP での重心系エネルギーが限界であると考えられており、この問題の回避のために線形型加速器による実験は提案された。

International Linear Collider(ILC) 実験計画は、重心エネルギーとして  $1\text{TeV}$  以上を目標とする、エネルギーフロンティアの電子、陽電子衝突型加速器による実験計画である。ILC ではそのエネルギーフロンティアでの実験により、ヒッグス粒子の探索、まだ十分に研究が行われていない粒子であるトップクォークの精密計測、超対称性粒子の探索など、極めて多くの成果が期待されている。

## 1.2 LC で期待される物理

先に述べた通り、ILC では数々の物理的発見が期待されている。以下ではそれら期待されている物理について、幾つか例を挙げて簡単に紹介していくこととする<sup>1</sup>。

---

<sup>1</sup>詳細は [1] に詳しい。



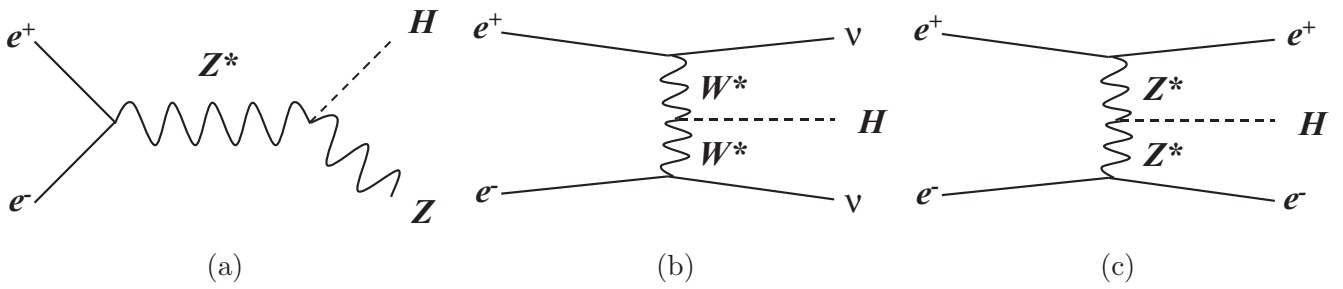


図 1.1: ヒッグス粒子の探索に用いられる反応。

### 1.2.1 Higgs study

ヒッグス場は標準理論においてその存在を予言されており、そのポテンシャルに起因した自発的対称性の破れによって粒子の質量を生成するものと考えられている。例えば繰り込み可能な最低次のヒッグスポテンシャル

$$V(\phi^2) = -\mu^2\phi^2 + \lambda\phi^4 \quad (1.2.1)$$

を仮定すると、このポテンシャルの最小値が  $\phi = 0$  から外れた点 ( $\equiv v/\sqrt{2}$ ) にあるために、低エネルギー領域では自発的対称性の破れが起こり粒子は質量を獲得する。この仮定におけるゲージボソンやフェルミオンの質量は  $m_W = \frac{1}{2}gv$ ,  $m_Z = \frac{1}{2}\sqrt{g^2 + g'^2}v$ ,  $m_f = \frac{y_f}{\sqrt{2}}v$ ,  $m_H = \sqrt{\lambda}v$  となる。ここで  $v \sim 246\text{GeV}$  であり、 $g, g'$  はそれぞれ  $SU(2), U(1)$  に対する結合定数、 $y_f$  はフェルミオン  $f$  に対する湯川結合定数であり、ヒッグスとの相互作用の強さがその粒子の質量を決定する形となる。

このように標準理論においてヒッグス機構は粒子に質量を与える本質的な機構であり、ヒッグス粒子の発見とその研究は標準理論、さらにはそれを越える理論 (超対称性理論など) にとって非常に重要な課題となっているが、今の所ヒッグス粒子の発見は成されていない。

ILC ではこのヒッグス粒子の発見が大きな目的の一つであり、この探索は図 1.1 のような反応を用いて行われる。特に上図 (a) のような Higgsstrahlung 反応は低エネルギーでのヒッグス粒子の生成に対する主要な反応となり、ILC の初期段階において利用されることとなる。この反応は  $Z$  の崩壊モードによって (1)  $q\bar{q}$  ( $\sim 70\%$ )、(2)  $\nu\bar{\nu}$  ( $\sim 20\%$ )、(3)  $\tau^+\tau^-$  ( $\sim 3\%$ )、(4)  $e^+e^-$  or  $\mu^+\mu^-$  ( $\sim 6\%$ ) の 4 つのモードに分類することができる。また標準理論の枠組みにおけるヒッグス粒子の崩壊に関しては、ヒッグス粒子の質量が  $140\text{GeV}$  以下の時は  $b\bar{b}$  へ、 $140\text{GeV}$  以上の時は  $W^*W$  への崩壊が主要な崩壊モードとなる。

これらの崩壊モードに対して、2 ジェット、またはニュートリノによる 4 元運動量欠損、またはレプトン対の不変質量に  $Z$  の不変質量 ( $= 91.2\text{GeV}$ ) を要求し、残りの 2 ジェットの不变質量を計算することによってヒッグスの探索は可能となる。またさらに (4) のモードはクリーンなモードであるため、ヒッグスの崩壊モードに無関係に (仮にヒッグスが測定不可能なモードに崩壊した場合でも) レプトン対を用いた質量欠損法によってヒッグスの質量の測定が可能となる。

## 1.2.2 Supersymmetry

標準理論を超える理論である超対称性理論 (SUSY) では、全ての粒子にスピンの 1/2 だけ異なるパートナー (超対称粒子) が存在することを要請する。この内最も軽い中性の超対称粒子 (LSP) は暗黒物質の有力候補とされ、非常に興味深いものとなっている。

超対称性理論を保証するためには少なくとも 1 つの超対称粒子の発見が必要不可欠となるが、ILC では (理論のモデルによらない方法で) この超対称粒子が少なくとも 1 つは見つかるだろうと考えられている。さらに超対称粒子が 1 つ見つければ、それはさらなる物理的発見への手がかりとなる。

しかしながら、実質的にはこの超対称性粒子の "発見" に関しては、その期待は LHC に寄せられており、ILC では "精密な" 測定を行うことが目的とされている。具体的には超対称粒子の質量、混合の精密測定、スピンやハイパーチャージといった量子数の測定、超対称性の破れ具合といったものが ILC での測定対象となる。また LHC によって超対称粒子の質量が分かれば、それは ILC におけるビームエネルギーの調整に対して大きな指針となり、逆に ILC での結果が LHC での解析に役立つこともあり、互いが互いに補足しあうことによって物理の発見に大きく役立つこととなる。

ILC での超対称粒子の解析は、具体的には例えばスレプトン (スタウ以外) の解析では、右巻きスレプトンのレプトンと LSP への崩壊、 $e^+e^- \rightarrow \tilde{l}_R^+ \tilde{l}_R^- \rightarrow l^+ \tilde{\chi}_1^0 l^- \tilde{\chi}_1^0$  が用いられることになる<sup>2</sup>。

## 1.2.3 Top Quark Study

トップクォークは標準理論のフェルミオンの中で 1 つだけその質量がずば抜けて大きく非常に特殊なものとなっており、CDF と D0 の結果によれば [2]

$$m_t = 174.3 \pm 3.2(stat.) \pm 4.0(syst.) \text{ GeV}/c^2 \quad (1.2.2)$$

となっている。これはつまりは標準理論におけるラグランジアンにおけるトップクォークの質量項が  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  対称性を最も大きく破っているということになり、フレーバー構造の起源を研究する上で、トップクォークの精密計測は重要なものとなる。具体的にはトップクォークの質量や崩壊幅 (相互作用) の精密測定が ILC でのターゲットとなる。

標準理論ではトップクォークの崩壊は  $b$ ,  $W$  への崩壊がほぼ 100% であると考えられており、理論的な予測ではその崩壊幅は 1.5 GeV 程度となっている。ILC ではトップクォークの崩壊幅の精密測定が可能となるため、その理論的予測からのずれが観測されれば、第 4 世代の存在や  $t \rightarrow bH^+$ ,  $t \rightarrow \tilde{t}\tilde{\chi}$  といった崩壊を示唆するものとなるかもしれない。

<sup>2</sup>これはニュートリノを含むような標準理論のプロセス ( $e^+e^- \rightarrow WW$ ,  $W \rightarrow l\bar{\nu}$ ) がバックグラウンドとなる。そのようなバックグラウンドは加速電子を偏極させることによって押さえられる。

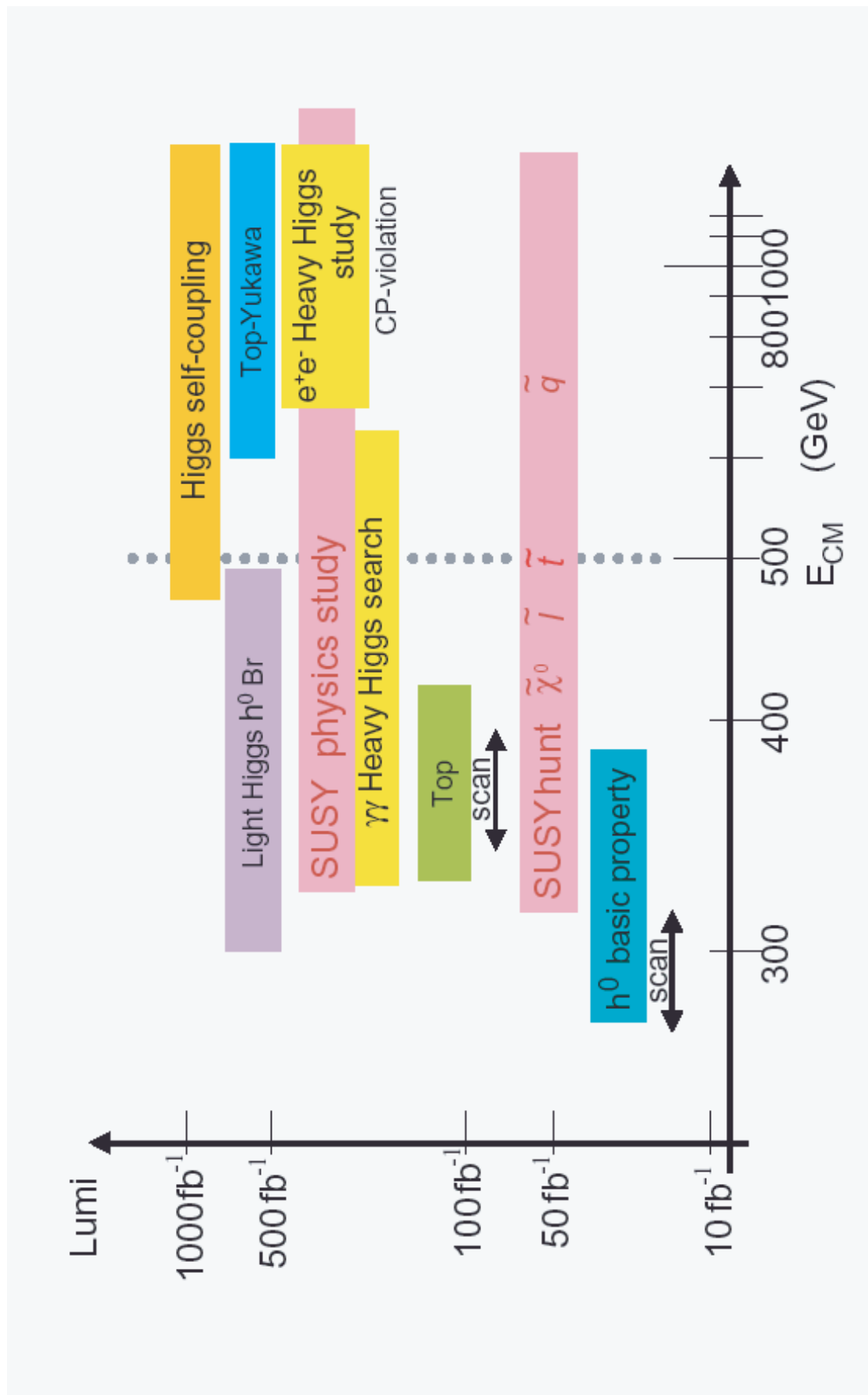


図 1.2: ILC での物理のターゲットと重心エネルギー。

## 第2章 ILCにおける物理解析

### 2.1 GLD Detector

電子、陽電子衝突実験である ILC では、LHC のようなハドロンコライダーに比べて、クリーンな反応を得ることが可能である。よって ILC と LHC との関係は、誤解を恐れずに言えば、「LHC は主に新しい物理を "発見" することを目的とし、ILC では "高精度の測定" を目的とする」ということが言える。そのため ILC では、その利点を最大限に引き出すような、精度の良い解析を行うことのできる測定器が要求され、その検出器の満足すべき性能としては以下のような事が挙げられている。

- $W$  と  $Z$  ボソンについて、それらの主要な崩壊モードである  $q\bar{q}$  の 2 ジェットイベントにおける質量分解能が、その崩壊幅 (2.5GeV と 2.0GeV) と同程度であること。つまりはそれらが分別可能であること。
- $b, c$  及び (可能ならば)  $s$  クォークの識別が高精度で可能であること。
- $e^+e^- \rightarrow ZH (Z \rightarrow \ell\bar{\ell})$  イベントに対する、質量欠損法によって得られるヒッグス粒子の質量分解能について、飛跡検出器の運動量分解能から来る影響が、ビームエネルギーの広がりからくる影響よりも十分小さいこと。また SUSY カスケードについてもレプトンの運動量計測が可能であるような、運動量計測可能域を実現すること。
- 超対称性粒子探索などのために、十分広い立体角を隙間無くおおい、運動量の損失を極力減らすこと。
- 各イベントの区別のため、各ビームバンチにおけるイベントを可能な限り区別できるような時間分解能を持つこと。

以上のような条件を満たすべく、GLD [3]、LDC [4]、SiD [5] といった検出器デザインが世界各国において検討されており、本研究ではこれら検出器デザインの一つである GLD 検出器に基づいて研究が行われている。GLD デザインの特徴は、荷電粒子の飛跡測定 (トラッキング) 及び中性粒子との分別を高精度で実現するため、大きいサイズでのガス飛跡検出器及びカロリメータを用い、磁場を (基本として) 3T とするというものである。GLD 検出器は Vertex Detector (VTX)、Intermediate Tracker (IT)、Time Projection Chamber (TPC)、Calorimeter (CAL)、Muon Detector などにより構成されており、以下においてそれら GLD 検出器における各パートについて簡単に述べる<sup>1</sup>。

<sup>1</sup>現在は未だ検出器デザインに関する評価及び最適化の段階であり、以下に述べるデザインはこの先変更される可能性も十分にあり得る。

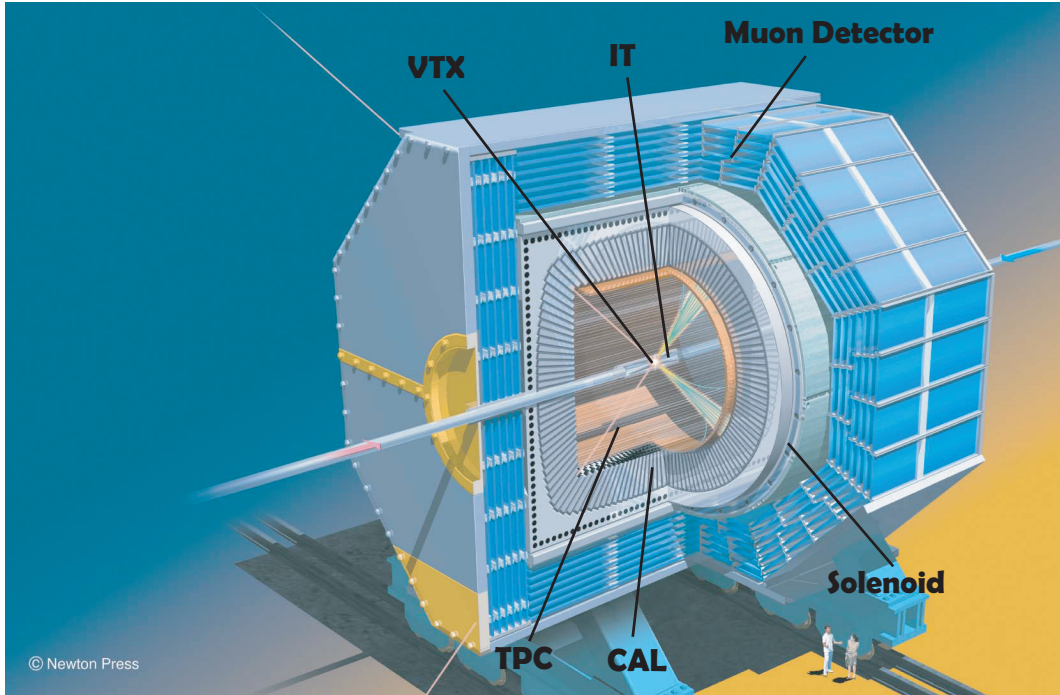


図 2.1: GLD 検出器の概観

### 2.1.1 Vertex Detector

検出器の中で最内層に位置する Vertex Detector の主な役割は、 $B$  中間子や  $D$  中間子の崩壊点を測定することにより、 $b$  クォークや  $c$  クォークの同定を行うことであり、ILC での impact parameter resolution<sup>2</sup> の目標値は、 $\sigma = 5 \oplus 10/(p\beta \sin^{\frac{3}{2}}\theta) \mu\text{m}$  である<sup>3</sup>。

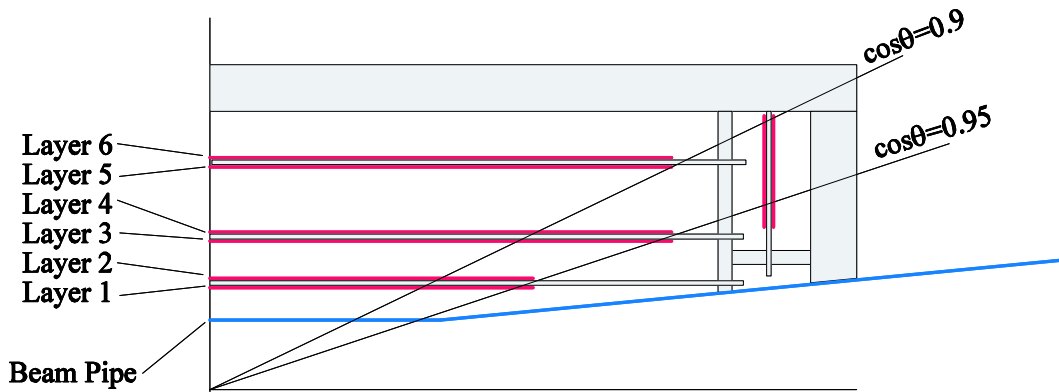
現在考えられている構造は 2 次元読み出し可能なピクセル型の Si-FPCCD (Fine Pixel CCD) であり、そのピクセルサイズは約  $5 \mu\text{m}$  で、位置分解能は  $2.0 \mu\text{m}$  程度である。VTX はそれら FPCCD 構造を持った 2 層 1 組  $\times$  3 層の形で構成され、各レイヤーの厚みは 2 層合わせて  $80 \mu\text{m}$  であり、それらの置かれる半径は (基本的に)  $20, 22, 39, 41, 58, 60 \text{ mm}$  となっている。(最適な最内レイヤーの半径は、ビームのパラメータに依存して変わってくる (表 2.1)。各ビームのパラメータに関しては [6] を参照のこと。) またビーム軸に垂直な面にも VTX (Forward Disk) を置き、 $\theta$  の小さい方向をカバーするようになっている (図 2.2)。

<sup>2</sup>impact parameter resolution とは、トラックと  $e^+e^-$  の衝突点 (Interaction Point, IP) との間の、 $z$  や  $r-\phi$  方向に関する距離の事である。

<sup>3</sup>impact parameter resolution を評価する式として  $\sigma = \sigma_1 \oplus \frac{C_1}{p\beta} \sqrt{\frac{C_2}{\sin^3\theta}}$  という式がよく用いられる。ここで  $\sigma_1, C_1, C_2$  は定数項であり、 $p, \beta, \theta$  はそれぞれ、荷電粒子の運動量、速さ、ビーム軸からの角度である。

表 2.1: VTX の第 1 層の半径。ここで  $R_{Be}$  は、 $B_e$  ビームパイプの半径を表す。

| $E_{cm}$ | Option          | B(T) | $R_{Be}$ (mm) | $R_{VTX}$ (mm) | $Z_{VTX}$ (mm) |
|----------|-----------------|------|---------------|----------------|----------------|
| 500GeV   | Nominal         | 3    | 12.5          | 16.6           | 52.4           |
|          |                 | 4    | 11            | 14.9           | 52.4           |
|          | 5               | 9.5  | 13.2          | 42.0           |                |
|          | High Luminosity | 3    | 18.5          | 24.1           | 75.4           |
|          |                 | 4    | 15.5          | 20.2           | 63.6           |
| 1TeV     | Nominal         | 5    | 14            | 18.4           | 57.6           |
|          |                 | 3    | 13            | 17.3           | 54.7           |
|          |                 | 3    | 20.5          | 25.8           | 80.5           |
|          | High Lum-A1     | 3    | 15            | 19.4           | 61.1           |
|          | High Lum-A2     | 3    | 13.5          | 17.8           | 56.1           |



Y. Sugimoto (KEK)

図 2.2: VTX の構造図

### 2.1.2 Intermediate Tracker

Intermediate Tracker は、VTX と TPC によるトラッキングを補完して運動量分解能を向上させるために、VTX と TPC の間の領域に置かれる。IT は各層の両面に  $z$  及び  $r-\phi$  方向に沿った Si-ストリップ型検出器を持つような構造になっており、ビーム軸に巻きつくような形で配置される Barrel IT(BIT)4 層と、ビーム軸に垂直な面上に配置される Forward IT(FIT)7 層によって形成される (図 2.3)。プロトタイプにおけるストリップピッチは 50 (100)  $\mu\text{m}$ 、ストリップの幅は 9  $\mu\text{m}$  であり、位置分解能は 10 ~ 20  $\mu\text{m}$  程度である。



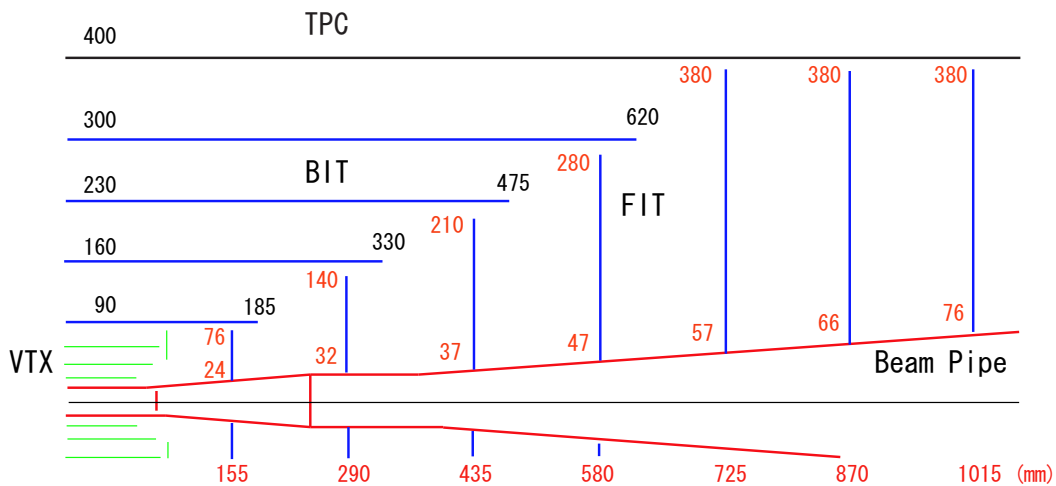


図 2.3: IT の構造図

### 2.1.3 Time Projection Chamber

Time Projection Chamber は、2 次元的に敷き詰められたパッドに垂直に高電場（及び磁場）をかけ、さらにその中にガスを充満させたものである。TPC 中を荷電粒子が通ると、荷電粒子の通過によって作られた電離電子は電子なだれとなってパッドへと向かい、それがシグナルとして計測される。その情報は測定パッドによる 2 次元の空間情報、及び電子のドリフトにかかる時間情報とによって 3 次元の位置情報へと変換され、それを解析することによって、荷電粒子の運動量を計測することが可能となる。ここで電場と平行にかけられた磁場は、電離電子が拡散するのを防ぐ役割を担っている。

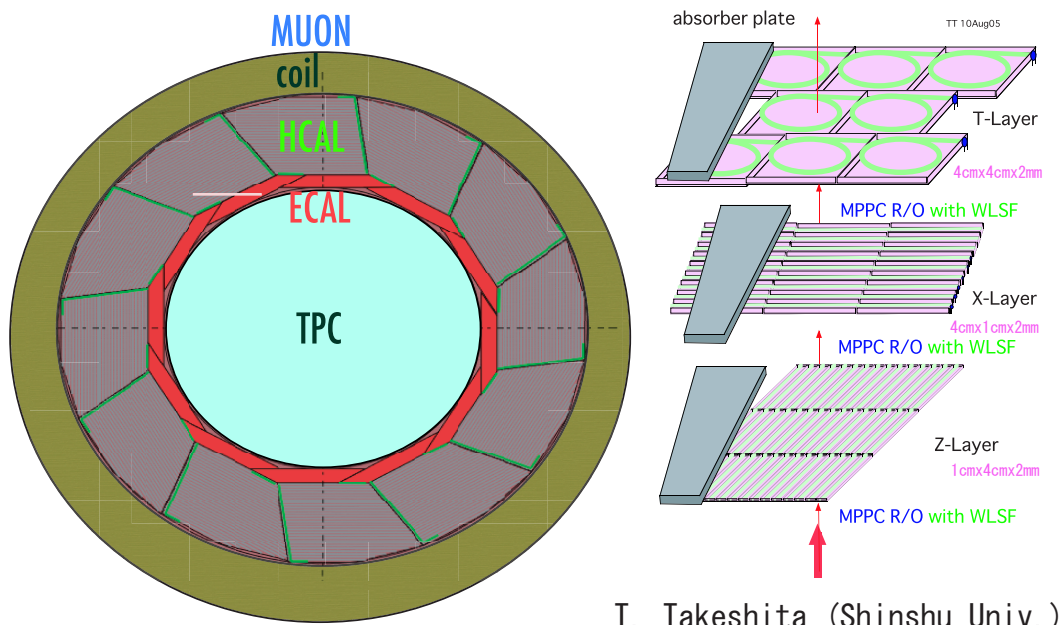
また TPC によって測定された運動量の情報は、同じく TPC によって測定される  $dE/dx$  の情報と合わせることで、PID ( $\pi^\pm/K^\pm/p/e^\pm$  などの区別) にも利用可能となる [7]。

GLD での TPC に関する目標は、98 ~ 99% 程度の tracking efficiency が得られることや  $dE/dx$  の分解能が 5% 以下であることなどであるが、どれぐらいの運動量分解能が ILC で必要になってくるのかということも含めて、バックグラウンドの効果についての研究やシグナルの読み出し方法をどうするかなど、現在も様々な点についての検討がなされている。

### 2.1.4 Calorimeter

カロリメータの役割は中性粒子のエネルギーと方向の測定である<sup>4</sup>。そのためカロリメータでは、(ミューオンなどを除く) 生成粒子がカロリメータの中でシャワーを起こして、そのエネルギーのほとんど全てをカロリメータ内で落とすのに十分な物質(吸収層)を置き、そのエネルギーデポジットの一部を測定することによって、粒子の実際のエネルギーを推測できるように設計されている。(具体的には、物質量の大き

<sup>4</sup>荷電粒子に関しては、そのエネルギー(運動量)を飛跡検出器によってカロリメータよりも良い精度で測定することが可能である。



T. Takeshita (Shinshu Univ.)

図 2.4: strip type の CAL の構造図

い物質で構成された吸収層と、シグナルの測定のための測定層を交互に配置することによってカロリメータは構成されている。) )

またカロリメータでは光子と中性ハドロンとの物質中での反応の違い (シャワーの違い) を考慮して、内側に Electro-Magnetic Calorimeter (ECAL) を置き、その外側に Hadron Calorimeter (HCAL) を置くような設計になっている。

ILC のカロリメータに要求されることは基本的に 2 つあり、

1. 各粒子によるシグナルを分離することができること。
2. 再構成されたカロリメータの各クラスター (粒子ごとのヒット郡) に対して、元のエネルギーを精度良く再現できること。

である。

1 については、カロリメータに対して high granularity やシャワーを分離するに足るサイズ (半径)、さらには ECAL の吸収層に Molière 半径の小さい物質を要求するといったことであり、一方 2 については、カロリメータの吸収層を薄くすることや compensation<sup>5</sup>を持たせることを要求するといったことである。

図 2.4 は現在考えられている GLD におけるカロリメータのデザインの 1 つである。このデザインでは ECAL の吸収層は各レイヤーあたり厚さ 0.3 cm のタングステンであり、測定層は 1 cm × 4cm × 2mm のストリップタイプのシンチレータである。一方

<sup>5</sup>ハドロンシャワーは電子や光子の起こすシャワーと異なり、カロリメータのエネルギーキャリアレーションはより複雑となる。一般に同じエネルギーの電子とハドロン ( $\pi^\pm$ ) を入射しても、カロリメータ上でのトータルエネルギーデポジットはそれら間で異なり、その比 ( $e/\pi$  ratio と呼ばれるもの) は 1 より大きくなる。それが 1 より大きいようなカロリメータではハドロンに対するエネルギーキャリアレーションが難しいため、それを 1 に近づけるための所作を行い  $e/\pi$  ratio がほぼ 1 となるようにする。そのような  $e/\pi$  ratio がほぼ 1 であるようなカロリメータを Compensation Calorimeter という。



HCAL は吸収層を厚さ 2 cm の鉛とし、測定層を 1 cm × 20cm × 5mm のストリップタイプシンチレータとしたものである。またカロリメータの内径は 210 cm、外径は 250 cm 程度で、Z 方向（ビーム軸方向）に対する長さは内側で 270 cm、外側で 420 cm 程度である。

ただしカロリメータのデザインに関してはその形（8 角形、12 角形など）の問題も含めて多数の候補があり、最終的な結論はまだ出されていない。またカロリメータのデザインに関しては本研究の本題である PFA に特に大きな影響を及ぼすため、そのデザインの最適化のために、PFA との兼ね合いを考慮した上での議論がこれからも成されていくものである。

### 2.1.5 Muon Detector

Muon Detector の役割は、その名の示す通りミューオンの再構成である。ミューオンはその性質からカロリメータを突き抜けてその外側まで到達することが多く、カロリメータの外側にある Muon Detector のシグナルと、飛跡検出器から得られたトラックをつなげることによりミューオン ID を行うことが可能となる。ただしこれに関しては、飛跡検出器によって再構成されたトラックとの連結が可能であればそれでよい。ため、Muon Detector は GLD 検出器の全体設計に対してそれ程強い制限を加えるようなものではない。現在考えられている GLD での Muon Detector の構造としては、鉄と棒状のシンチレータを交互に置いたデザインが候補として挙げられている。

## 2.2 The Particle Flow Algorithm

ILCにおける物理の研究という観点において、ジェットイベントのエネルギー及び方向の分解能の向上ということは非常に重要な課題である<sup>6</sup>。ここでジェットのエネルギー分解能を定量的に評価するため、ジェットのエネルギー分解能を評価する際によく用いられる関係式、 $\Delta E/E = \alpha/\sqrt{E}$  ( $E$ はGeV単位) という式における $\alpha$ という値を用いて分解能の評価を行うものとする、ILCにおけるこの $\alpha$ の目標値は30%程度とされている。しかしながら、仮にカロリメータにおけるエナジーデポジットを単にキャリブレーションを取って使用しただけでは、 $\alpha$ の値は60~70%程度<sup>7</sup>にしか満たない。

Particle Flow Algorithm(PFA)はそういった問題を解決するために考えられた手法の一つで、過去にLEP [8] やSLD [9] 実験において使用されてきたものである<sup>8</sup>。PFAというのは、要約すると「各粒子により生じたシグナル(ヒット)をそれぞれ個々の粒子ごとに再構成し、再構成されたカロリメータのヒット群(クラスター)に対して、荷電粒子のものに関してはカロリメータの情報を使わずに飛跡検出器の情報を使うようにし(ただし電子に関しては、エネルギーはカロリメータの情報から再構成し、方向に関しては飛跡検出器から求められるものを使う)、中性粒子に関してはカロリメータの情報を使うようにする」というものである。

この方法を用いると、

- 飛跡検出器の分解能はカロリメータに比べてずっと良い
- ILCで予想されているジェットイベントでは、ジェットの持つエネルギーの内訳はおおよそ65%が荷電粒子、26%が光子、9%が中性ハドロンであると考えられており、ほとんどは荷電粒子(荷電ハドロン)である

という事実と照らし合わせてみても、ジェットのエネルギー分解能はカロリメータのみを用いた時に比べて格段に向上することが予想される。実際ECAL、HCALそれぞれに10%及び40%の(確率的要因からなる)エネルギー分解能を仮定し<sup>9</sup>、加えて平均的な飛跡検出器の性能を仮定した下で計算を行うと、完全に理想的なPFAの下では $\alpha$ の値は14%程度になる。(しかしながら実際の実験においては、解析段階での誤差や検出器のアクセプタンスの問題などがあり、このような理想的な解析を行うことはできない。)

エネルギー分解能を決める因子を、それぞれの相関を無視した形で簡単に書くと、

$$\sigma^2 = \sigma_{X^\pm}^2 + \sigma_\gamma^2 + \sigma_{h^0}^2 + \sigma_{\text{confusion}}^2 + \sigma_{\text{threshold}}^2 \quad (2.2.1)$$

<sup>6</sup>例として、 $e^+ + e^- \rightarrow W^+W^-\nu\nu$  と  $e^+e^- \rightarrow ZZ\nu\nu$  というイベントが挙げられるが(ZH イベントのバックグラウンドとなり得る) これは kinematics fit を用いることができず、これらのイベントを区別するには良いエネルギー分解能が必要となってくる(図 2.5)

<sup>7</sup>当然この値はキャリブレーションの手法に大いに依存しているが、キャリブレーションの行い方自体、本来粒子種やエネルギーに依存した形で行った方がよく、その点から見ても各粒子を1つ1つ再構成していくPFAの手法は有効なものである。

<sup>8</sup>LEP 実験での $\alpha$ の値は約60%である。

<sup>9</sup>ここでは簡単のため、ECALの対象を光子、HCALの対象を中性ハドロンのみとしている。

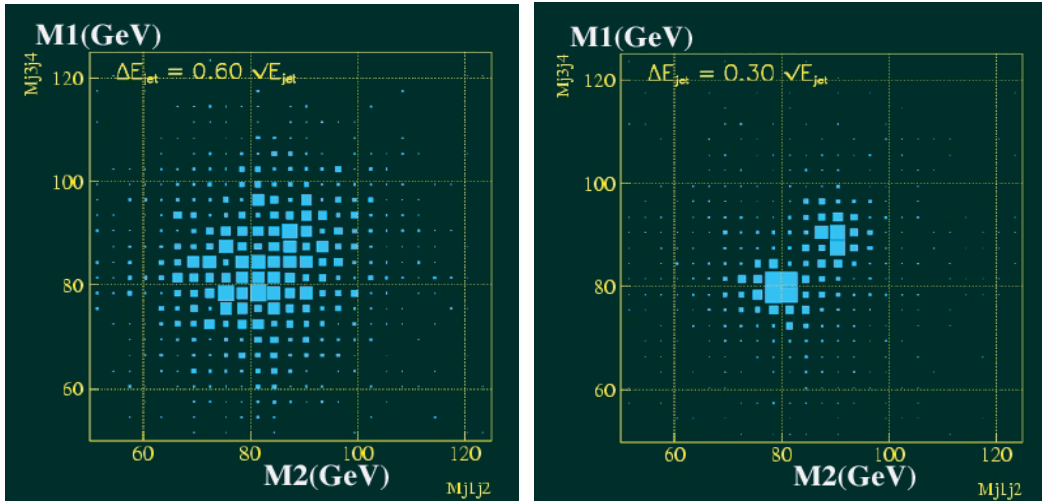


図 2.5:  $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu}WW, \nu\bar{\nu}ZZ$  ( $W/Z \rightarrow jj$ ) イベントにおける質量分布。左右の図は、それぞれエネルギー分解能が  $\alpha = 0.6$  と  $0.3$  を仮定した時の結果を表す。この図より、 $\alpha = 0.6$  では  $W$  と  $Z$  の分離が難しく、 $\alpha = 0.3$  ではそれが可能であることが見て取れる。

などと書ける。ここで  $\sigma_{X^\pm}$ 、 $\sigma_\gamma$ 、 $\sigma_{h^0}$  はそれぞれ荷電粒子、光子、中性ハドロンに対するエネルギー分解能であり<sup>10</sup>、先程の  $\alpha = 0.14$  という値はこの3つの項に起因するものである。また  $\sigma_{\text{confusion}}$  は再構成時におけるシグナル(ヒット)の混同に起因する項、 $\sigma_{\text{threshold}}$  は検出器のアクセプタンスなどから来る項であり、(エネルギー分解能という見地においては) 検出器を最適化するということは、これらの項(特に最後の2つの項)を最小にするとということに他ならない。

図 2.6 に、 $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) におけるカロリメータの情報のみを用いた時及び Monte-Carlo truth の情報をカンニングして PFA を行った場合に関するトータルエネルギーの結果の分布を示す<sup>11</sup>。この結果が示す通り、PFA を用いた解析というものは極めて有効なものであり、その PFA パッケージの開発及び発展というものが、本研究における目的である。

<sup>10</sup> 荷電粒子に対するエネルギー分解能は飛跡検出器を用いて求められるため、 $\sigma_{X^\pm}$  は他の項に比べて無視できる程度である。

<sup>11</sup> ここでのカンニングを用いた PFA による解析では飛跡検出器内で荷電粒子が崩壊した場合の処理や粒子ごとのエネルギーキャリアレーションなど細部についての考察はしておらず、より完全な解析の下ではより良い分解能を得られることが知られている。その他、 $\alpha$  を  $0.14$  から悪くする要因は何かという事など、PFA 及び検出器の最適化についてのカンニングを用いた研究も、総研大の山本澄江氏らによって成されている [10]。またカロリメータのみの情報から計算したトータルエネルギーの平均が大きいのは、低エネルギー領域では荷電ハドロンと中性ハドロンとの間でキャリアレーションファクターが異なってくるため。

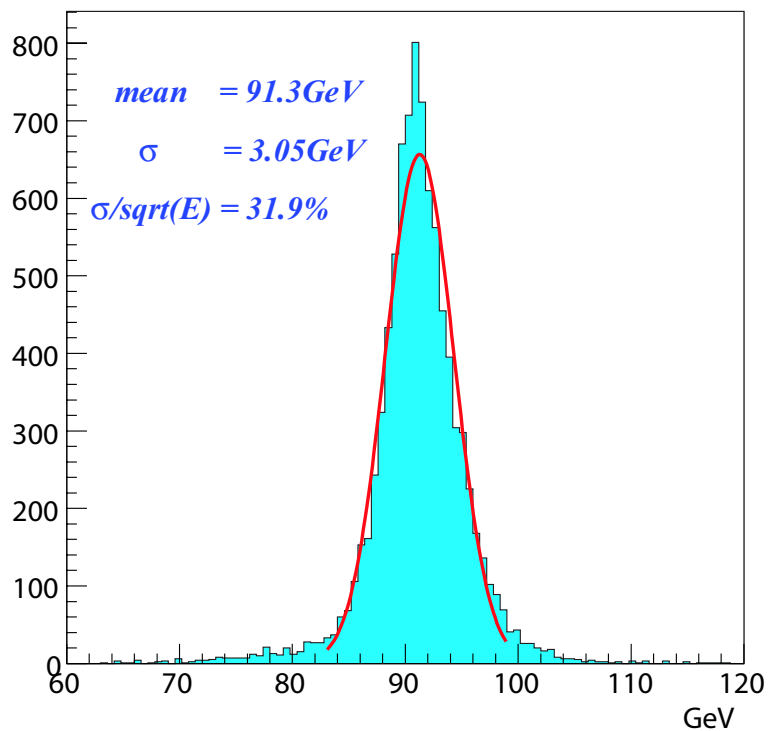
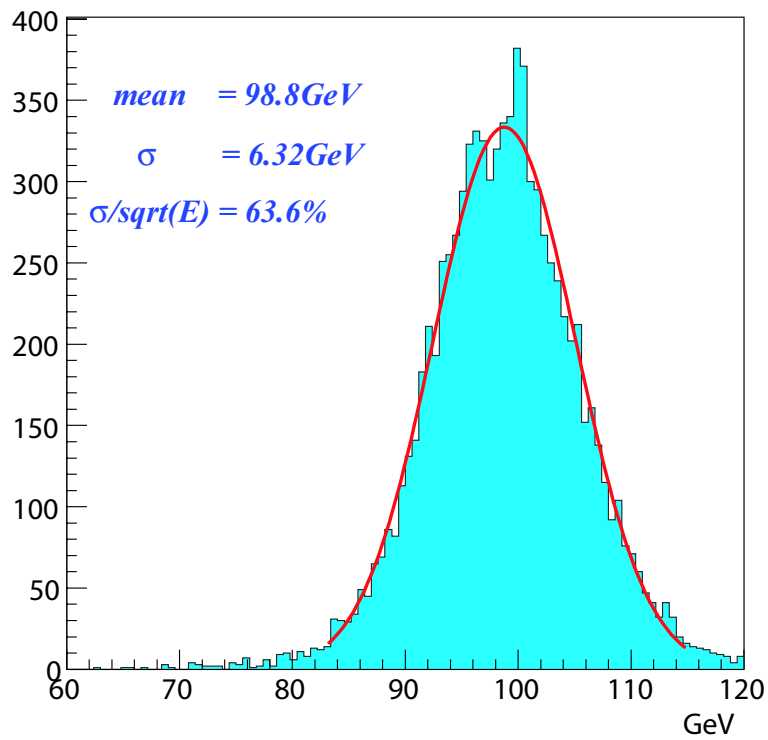


図 2.6:  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2 GeV$ ) に関するトータルエネルギーの分布の比較。  
 カロリメータの情報のみを用いた場合 (上) とカニング PFA を用いた場合 (下)。  
 ニュートリノなどのミッシングエネルギーは両方の分布にカニングにより加えられている。

## 第3章 The simulation tools

この章では、本研究において我々が用いたシミュレーションパッケージについての紹介をする<sup>1</sup>。ILCのためのソフトウェア開発は各ディテクターコンセプトグループごとに行われているが、本研究で用いたものは GLD コンセプトグループにより開発中のものである。また PFA パッケージ自体は、以下に紹介する Uranus 及び Satellites の中に含まれるものである。

### 3.1 Jupiter

Jupiter [12] とは”JLC<sup>2</sup> Unified Particle Interaction and Tracking EmulatoR”の略で、GLD 検出器のための GEANT4 [13] ベースのフルシミュレータである。

ここではクラス構造などプログラムに関する詳細については触れないが、現在 Jupiter に実装されているもののうち、PFA に特に影響のあるいくつかの点について以下にまとめる。

- IR 周り (ビームパイプ等)、VTX、IT、TPC、CAL、ソレノイドコイル等は既の実装されているが、理想的な構造 (例えば IT は円筒型である) であったり、現在の GLD のデザインとは異なっている部分もある。
- カロリメータはタワー構造をしており、それぞれのタワーは衝突点 (IP) の方向を向いている (図 3.2)。(現在のデザインではカロリメータとしてストリップタイプのものが考えられており、これは現在の Jupiter のデザインとは異なるものである<sup>3</sup>。)
- Jupiter におけるカロリメータのタイルサイズは、デフォルトでは ECAL が 4 cm × 4 cm、HCAL が 12 cm × 12 cm となっているが、このサイズを小さくすることはインプットパラメータを変えることにより可能である。

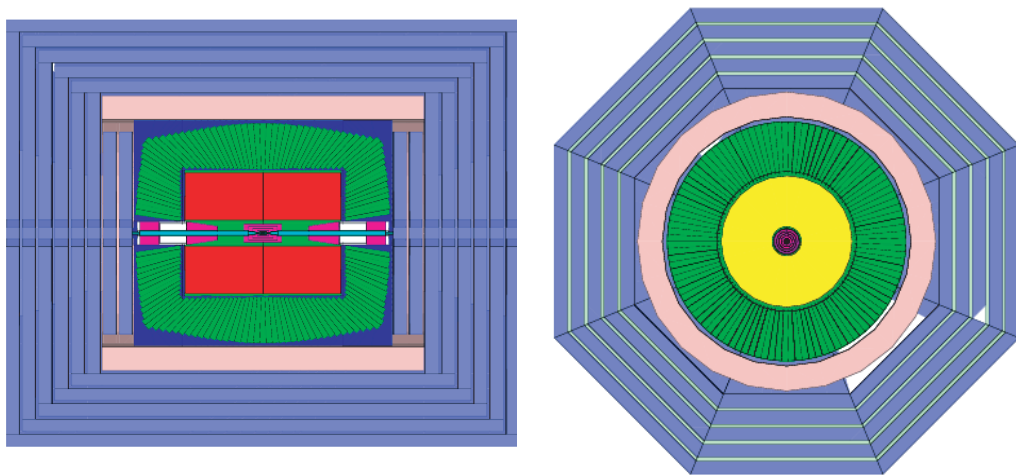
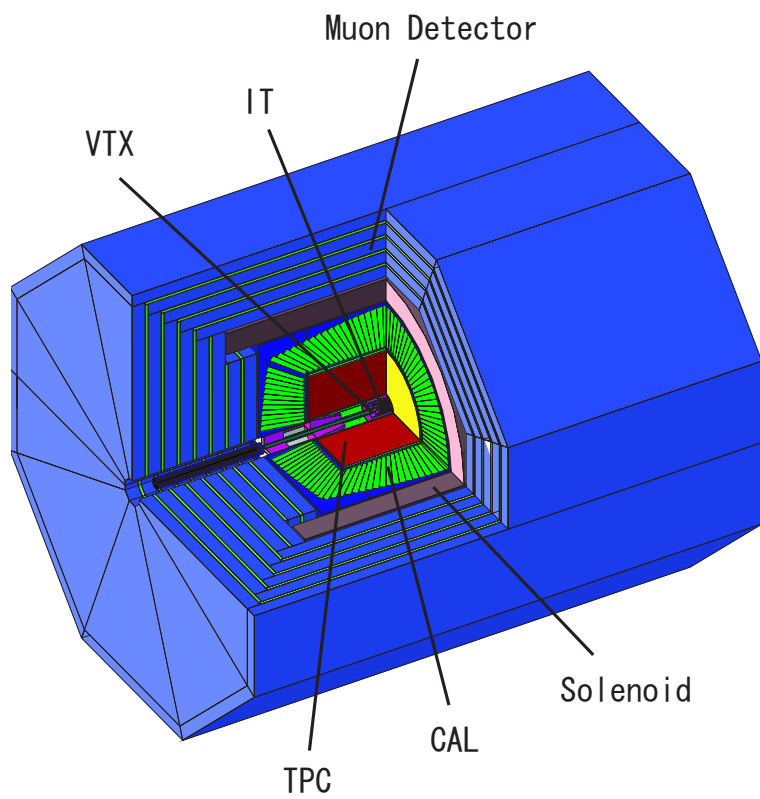
本論文における PFA の研究は、主としてこれら Jupiter におけるデフォルトのタイルサイズを使用して行ったものである。

---

<sup>1</sup>ここで紹介する LC 用ソフトウェア群は現在も開発中のものであり、最新版のパッケージに関しては、JLCCVS [11] にて配布されている。

<sup>2</sup>JLC とは、GLD グループにおける、LC 実験計画の旧称である。

<sup>3</sup>ストリップタイプのカロリメータの Jupiter への実装作業は、既に信州大の川上氏によっておおよそ成されており、現在は動作テストが成されている段階である。



H. Ono (Niigata Univ.)

図 3.1: Jupiter における検出器の概観

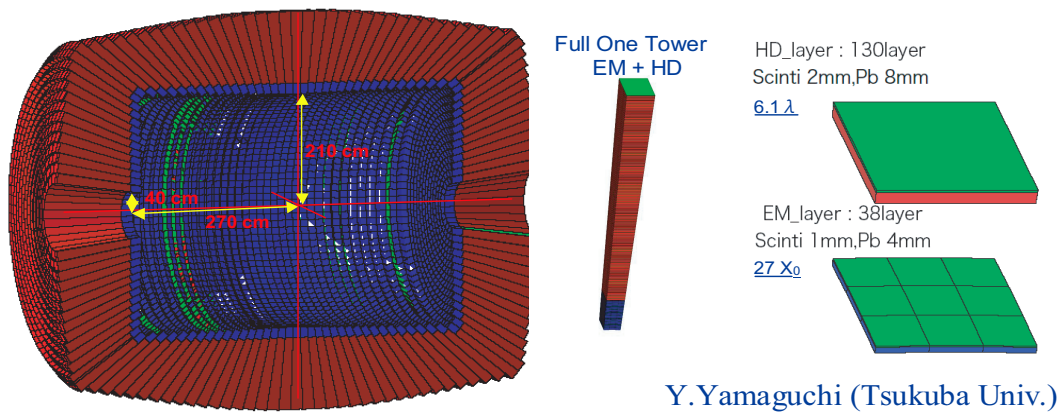


図 3.2: Jupiter におけるカロリメータのタワー構造

### 3.2 JSF

JSF [14] とは、”JLC Study Framework” の略であり、KEK 宮本彰也氏作成の、ROOT [15] ベースの HEP データ解析用のクラスパッケージである。JSF では各検出器単位などでの解析コードをモジュール化して扱うようになっており、以下に紹介する Uranus や Satellites は JSF をベースにして開発が行われている。また JSF では PYTHIA ジェネレータ [16] や Jupiter を扱うことができ、フルシミュレータを用いた解析シミュレーションにも適した仕様となっている。

### 3.3 Uranus と Satellites

Uranus(Unified Reconstruction and ANalysis Utility Set) と Satellites [17] は JSF ベースのデータ解析パッケージである。それらはそれぞれ実際のデータ解析用、Monte-Carlo データ解析用に開発されており、故に Satellites は Uranus の持つクラスを継承した形で書かれている<sup>4</sup>。

現在 PFA 用のコードはこの Satellites 内に実装されており、実際にシミュレーション上で PFA をテストする流れとしては、

- JSF から (PYTHIA 及び) Jupiter を呼び、イベントを作成して、検出器内でのシグナルを残したファイル (root 形式) を作成する。
- JSF で Uranus 及び Satellites を呼び、Satellites 内にある IO(Input/Output module set) が Jupiter のアウトプットデータをそれぞれの検出器パートに振分け、その Monte-Carlo Exact Hit を格納する。その後 Metis(Monte-Carlo Exact hits To Intermediate Simulated outputs) によって (各検出器パートでの) シグナルの smearing や、再構成を行う。

という形になっている。

<sup>4</sup>現在は開発、テスト段階であるため、本来 Uranus に記述されるべき部分が Satellites に書かれているということもある。



ここで Satellites におけるカロリメータのヒット情報の取り扱いについて述べておくと、時間情報に関しては  $\sigma = 1.3 \text{ nsec}$  の *Gaussian distribution* による smearing が行われているが（エネルギー依存性などは考慮されていない）、位置情報についての smearing は行われていないというのが現状である。また各セル内でのヒットによるエネルギーデポジットはそれぞれのセル内でマージされている。本研究ではそのセルごとにマージされたシグナルを用いており、故に各セルごとのヒット情報は、時間情報を除いて全て正確に分かるという条件下で行われている。



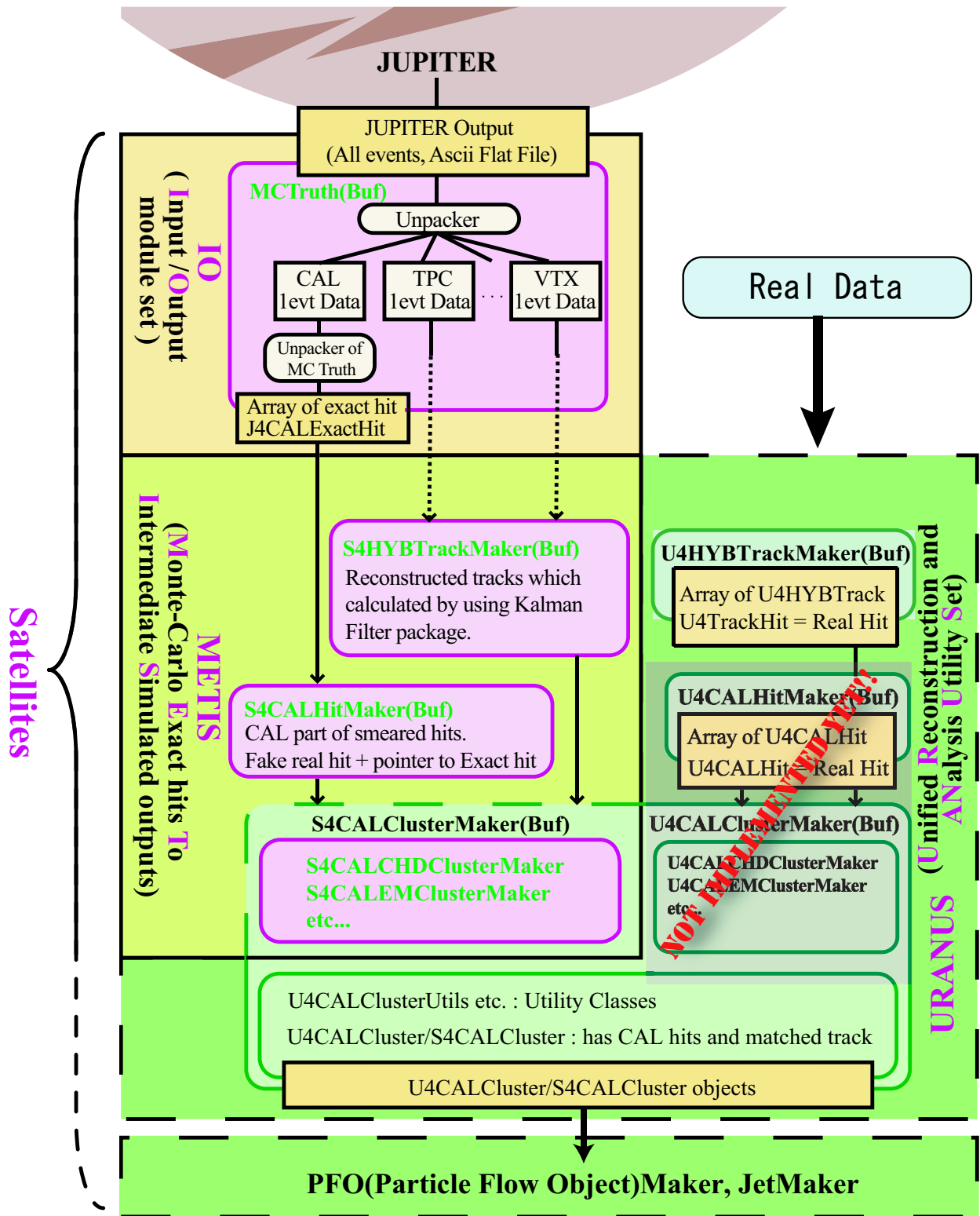


図 3.3: Uranus 及び Satellites の関係図

## 第4章 The Particle Flow Algorithm

### 4.1 PFAの流れ

この節では、現段階における我々の PFA の大まかな流れについての説明をする<sup>1</sup>。現段階での我々の PFA の手順を書き下すと、

1. 飛跡検出器による荷電粒子のトラッキング
2. MIP シグナル及びインタラクションレイヤー (IL<sup>2</sup>の同定)
3. ミューオンの再構成
4. 光子の再構成
5. 電子 (及び陽電子) の再構成
6. 荷電ハドロンの再構成
7. 中性ハドロンの再構成
8. Satellite hits の除去

となっている。

PFA (を含めた物理解析) の中でまずはじめに行われることは、飛跡検出器のシグナルを用いた荷電粒子のトラッキングである。これについては筑波大の山口敦氏らが中心となり、Uranus 及び Satellites 上での解析ツールの開発が行われている。トラッキングでは、まず飛跡検出器のうち最も外側にある Main Tracker(TPC) から、各層でのシグナルを Kalman Filter [18] を用いてフィッティングを行いながら順に内側へと繋げていき、最終的に最内層である VTX の第 1 層まで繋げる。その後逆に外側へと戻りながら、フィッティングの精度をより高いものへとするためにトラッキングの再評価をしていく (smoothing)<sup>3</sup>。ここではトラッキングに関してこれ以上の詳細には触れないが、現段階での開発の進行状況としては、Kalman Filter パッケージは開発済みであるがトラックファインディングアルゴリズム<sup>4</sup>は研究中であり、故に現在の

<sup>1</sup>現段階での我々の PFA では、Jupiter に実装されているようなタワー構造のカロリメータを仮定している。当然ながら PFA は検出器の設計に大きく依存するものであり、ストリップ構造のカロリメータや、タワー構造であってもセルサイズや内径の違いなどによって、解析の手法は変わってくる。

<sup>2</sup>IL (インタラクションレイヤー) とは、カロリメータ内での (荷電ハドロンに対する) シャワーの始点のことである。これはインタラクションポイントと呼ぶべきかもしれないが、ビームの衝突点 (IP) との区別のため、こう呼ぶことにしている。

<sup>3</sup>現段階では、smoothing アルゴリズムはまだ実装されていない。

<sup>4</sup>どのシグナルがどのトラックに対応しているか (どのシグナル同士が対応しているか) を決めるアルゴリズム。

Satellites ではトラックファインディングをカンニングによって行い、Kalman Fitting を通して Helix parameters<sup>5</sup>を計算するという形になっている。現在我々の研究において用いているトラックはそれによって得られたトラックであり、半ば理想的なトラックと呼べる。しかしながら、トラックの運動量に関する分解能はトラックファインディングを行った場合でもカロリメータのものよりずっと良いはずであり、またトラックの効率も十分高いはずなので、それ自体はそれ程問題とはならない。また補足だが、ここで再構成されたトラックの情報は以降の PFA において幾度か利用されており、PFA において大きな役割を担っている。

次に行うことは、MIP シグナル及び IL の同定である。PFA においてはより確からしい(分かりやすい)ものからカロリメータ内でのヒットを除去していくということが重要であるが、MIP シグナルの同定をはじめに行うのには、同時に IL を同定することにより、後の荷電ハドロンの再構成を有利に行うことができるという利点もある。

MIP シグナルの同定の後、ミュオン検出器によるシグナルと、再構成された MIP シグナルとのマッチングを取ることににより、ミュオンシグナルの再構成を行う。ただし現在の我々の PFA においては、Satellites のミュオン検出器の部分に関する実装作業が終わっていないことなどにより、ミュオンの再構成は Monte-Carlo truth の情報をカンニングすることにより行われている。

MIP 及びミュオンの再構成の後、光子と電子の再構成を行う。先程述べたように、光子によるジェットエネルギーへの寄与は 20% 程度と大きく、また光子によるシグナルはハドロンのシグナルと大きく異なるため、この段階でどれだけよく光子の再構成を行えるかということは、PFA の評価を決める大きな鍵となってくる。また光子と電子によるシグナルの違いは、電子によるシグナルは本来トラックの情報も持っており、トラック・クラスターマッチングを行った際に、電子に関してのみよくマッチするという点だけであるため、電子に関してはこちらで一緒に再構成を行ってしまう。

次にハドロンの再構成を行う。ハドロンに関しては図 4.2 ~ 4.4 から分かるように、カロリメータ内でシャワーは広がり、シャワーの中心から離れた所にも多くのヒットを作るため、そのクラスタリングは困難である<sup>6</sup>。故に荷電ハドロンのクラスタリングはトラック情報(または少なくとも IL ポジションの情報)を使った方が良く、荷電ハドロンの再構成は中性ハドロンのクラスタリングよりも先に行う。そして荷電ハドロンの再構成の後に残ったクラスターは、全て中性ハドロンとして扱われる。

最後に Satellite hits の除去を行う。Satellite hit とは(ハドロン粒子の)シャワー内の粒子の反跳などにより、元々の粒子の飛跡方向から大きく外れた部分に作られるヒットのことである。これらのヒットを正しい形でクラスタリングすることは難しく、またそのエネルギーの寄与は、一般にクラスターの全エネルギーに対して小さいので、ここでそれらのヒット(または真のクラスターのごく一部分のみから形成されたクラ

<sup>5</sup>螺旋運動を表す 5 つのパラメータ。

<sup>6</sup>そのため光子の再構成をハドロンの再構成より先に行う。

スター)を捨て、解析の対象から外す<sup>7</sup>。

以上が現在の PFA における大まかな流れである。以後の節では、再構成の際の効率なども含め、各パートに関してより詳細に見ていくものとする。また、図 4.1 ~ 4.4 に 3GeV の光子、 $\pi^+$ 、 $K_L^0$  を入射した時及び  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) でのシグナルの例を示す。なおこの図でのタイルサイズは Jupiter のデフォルトのタイルサイズ (ECAL : 4 cm  $\times$  4 cm, HCAL : 12 cm  $\times$  12 cm) が用いられている。

なおこの章における以降の文では、サンプルイベントとして基本的に  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) を用いており、特に記述が無い場合はこのイベントを基にクラスタリングの評価などを行っているものとする。

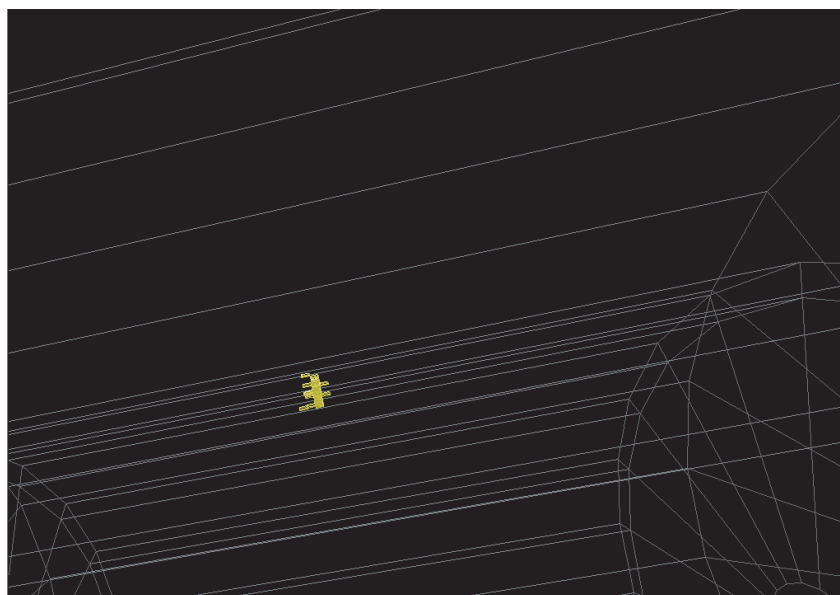


図 4.1: 3GeV の光子を真上に入射した時のシグナル

<sup>7</sup>この段階で残っているクラスターは全て中性ハドロンのものであるため、Satellite hits の除去作業は、中性ハドロンクラスターの候補に対して行われる。また本来の意味とは異なるが、シャワーが拡がり、コアの部分から遠いため荷電ハドロンクラスターの一部としてみなされなかったヒットに対しても、この段階で捨てられることになる。

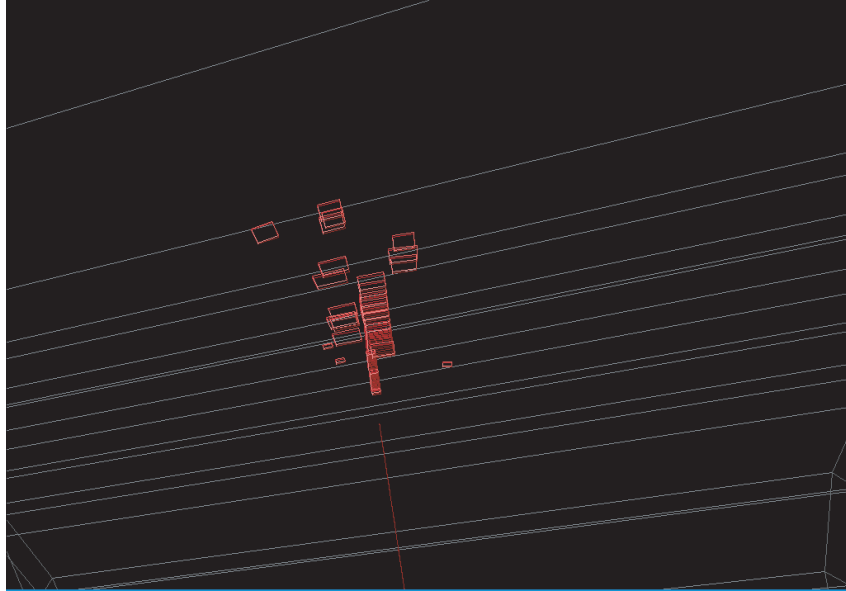


図 4.2: 3GeV の  $\pi^-$  を真上に入射した時のシグナル

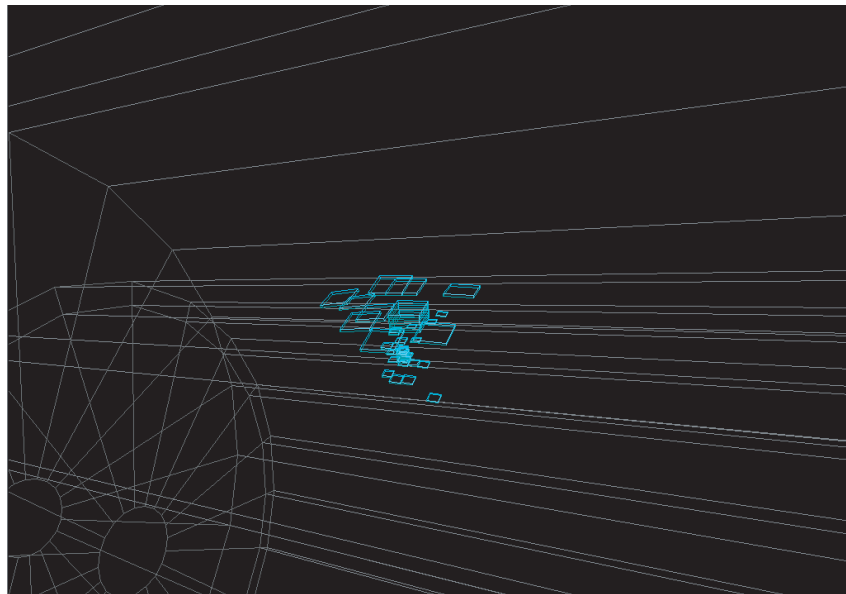


図 4.3: 3GeV の  $K_L^0$  を真上に入射した時のシグナル

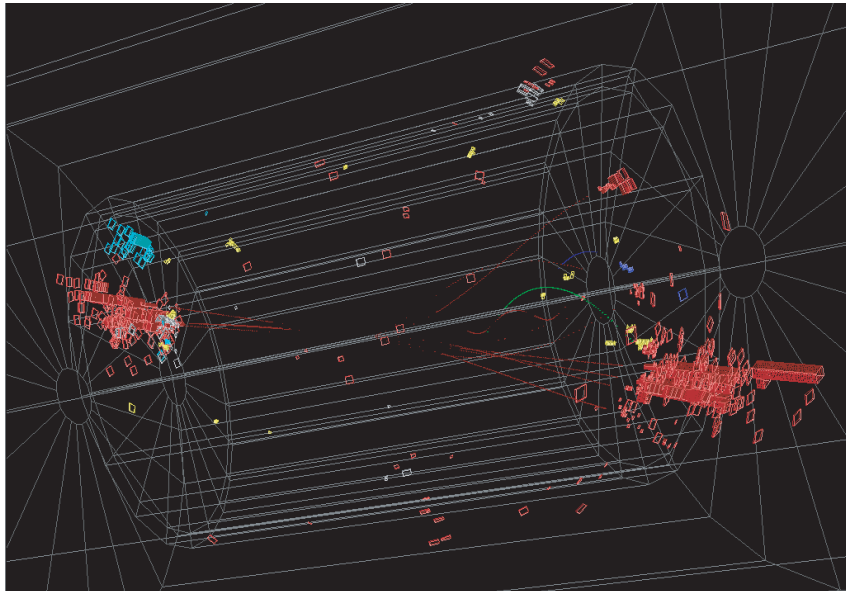
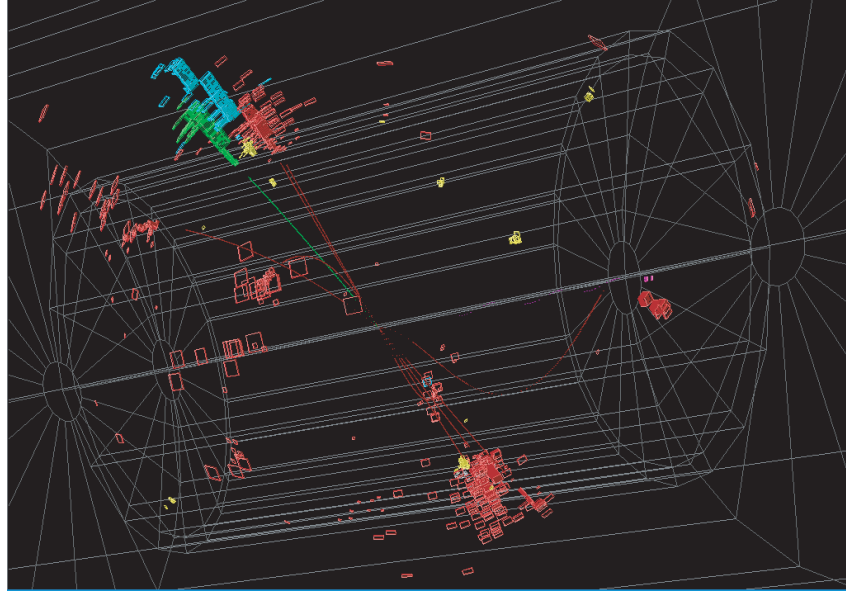


図 4.4:  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) でのシグナル。赤は  $\pi^\pm$ 、黄緑は  $K^\pm$ 、灰色は  $K_L^0$ 、水色は中性子、黄色は光子。一般に上のようなイベントでは再構成は難しくないが、下のような荷電ハドロンのシグナルと中性ハドロンのシグナルが重なっているような場合には、再構成は難しくなる。

## 4.2 MIP、IL 及びミュオンの再構成

先の節で述べたように、トラッキングの後まず始めに行うことは MIP 及び IL の同定である。ここではその方法についてより詳細に述べていくものとする。

### 4.2.1 荷電ハドロンに対する MIP 部分及び IL の同定

まずは荷電ハドロンに対する MIP シグナルの部分の同定について述べる。ここで荷電ハドロンに対して MIP 部分、及び IL ポジションを同定することの目的は、シャワーの始点を知ることにより後の荷電ハドロンのクラスタリングを有利に進めることである。具体的には、例えばコーン領域を仮定してクラスタリングを行う（コーン領域内に入るヒットを集めて1つのクラスターとみなす）場合、コーンの頂点をカロリメータの内側とトラックとの交点に置くよりも、IL ポジションに置いた方が結果は良くなるはずであるし、その他の方法でクラスタリングを行うにしても、MIP 部分を知ることによりクラスタリングが改善されるということはたくさんある。また MIP 部分に対して Bethe-Bloch の式を適用することにより、飛跡検出器から得られたトラックの情報にカロリメータ内のエネルギーデポジットに対する考慮を加えることが可能となり、それによってトラックとクラスターとのマッチングの精度を向上させることも可能となると考えられる。

以上のような理由、及び MIP シグナルのシャワーとの区別の容易さから、PFA においてまず始めに MIP 部分の同定を行うという手法は一般的によく取られている。またそれは我々の PFA の手法においても例外ではない。

現在我々が行っている MIP 部分の同定方法（IL ポジションの同定方法）は、以下のようにになっている<sup>8</sup>。

1. トラックのうちで運動量が  $1\text{GeV}/c$  以上のものに対して Helix parameters からトラックの飛跡を推測し、トラックの延長線上からの距離が  $R$  以下の所にあるヒットを集めていく。ここで  $R$  は、ヒットが ECAL にある時は  $6\text{ cm}$ 、HCAL にある時は  $20\text{ cm}$  としている。
2. 1 で使用したトラックとカロリメータの内側との交点を求める。その点から 1 で集められた各ヒットに対する距離を求め、さらに求められた距離に対して各ヒットのエネルギーデポジットで重みを取ったヒストグラムを作成する。（現在はピン幅を  $0.5\text{ cm}$  とし、 $100\text{cm}$  までをサンプリングの範囲としている。）
3. 2 で作成したヒストグラムを用いて、距離の近いものに対応する方のピンから、エネルギーデポジットのあるピンについてのみ順に見ていき、解析をしていく。始めに整数  $A=B=C=0$  としておき、トータルのエネルギーデポジットが  $700\text{keV}$  以

<sup>8</sup>現在行っているこの方法に対して、エネルギーデポジットの代わりにトラックからの距離の 2 乗の分布を作成し、その大きさを見て MIP の部分を判断するというような、シャワーの広がり情報を用いた方法なども考えられる。しかし ECAL のタイルサイズが  $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$  の時、電子によるシャワーのほとんどが 1,2 セル内に収まってしまい MIP との区別が難しくなるため、現在そのような方法は取られていない。しかしながら将来的に試してみる価値はある手法であると考えられる。



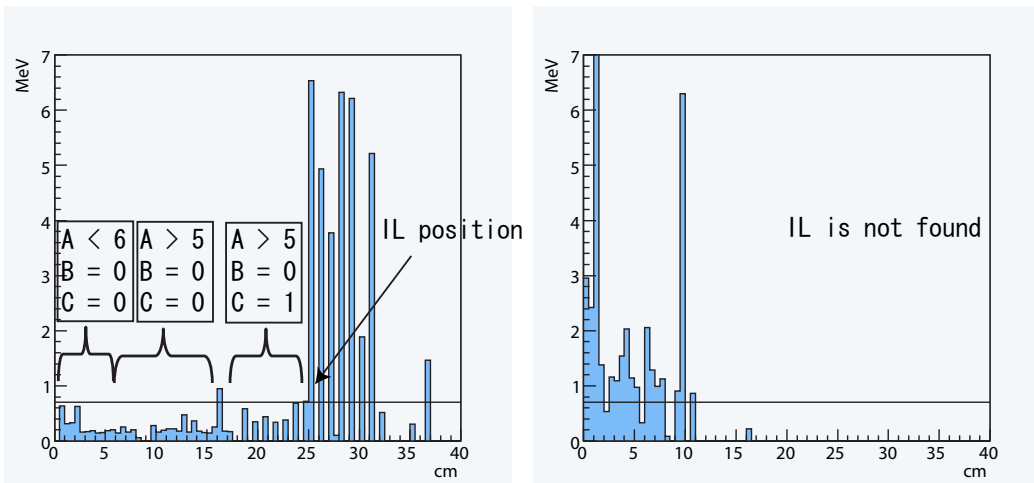


図 4.5: IL ポジションの同定に関する例。サンプルイベントは運動量  $3\text{GeV}/c$  の  $\pi^-$  を真上に打ち込んだ時のもの。

下ならば A に 1 を足し、さらに B を 0 にする。逆に  $700\text{keV}$  以上なら B と C に 1 を足す。

4. A が 6 以上かつ B が 3 以上になったら解析を終わる。終了した段階で、そのピンの 3 つ前のピン（ただし 3 つ前のピンにエネルギーデポジットが無い場合はその前のピン）に含まれるヒットに対して、エネルギーで重みを取った平均の位置を計算し、そこを IL ポジションとする。さらにそれより手前のピンに含まれるヒットは、そのトラックによる MIP 部分のシグナルとみなす。また A,B に対する条件が満たされる前に C が 8 以上になった場合は、IL が見つからなかったものとして解析を終わる（図 4.5 参照）。

ここで  $1\text{GeV}$  以上の荷電ハドロンの MIP によるエネルギーデポジットは、シンチレータ内で  $0.5\text{ cm}$  あたり  $200 \sim 300\text{keV}$  程度である。

この方法を用いると、シングル  $\pi^-$  ( $p = 3\text{GeV}/c$ ) を真上に打ち込んだ際に IL ポジションを同定できる効率は、 $1\text{keVt}$  のデータを基にすると  $50\%$ 程度となっている。

またこの IL ポジションの同定方法に関する評価のため、カンニングによって IL ポジションを同定したものとこの方法によって得られた IL ポジションとの間の距離を調べると、図 4.6 のようになる。ここでカンニングによる IL ポジションの同定とは、Monte-Carlo truth の情報をカンニングして得られたトラック ID（各粒子の ID）を用いたものである。具体的には、飛跡検出器で再構成されたトラックを構成するヒットの持つトラック ID をまず調べ、それと同じトラック ID を持つ粒子によるカロリメータ内でのヒット<sup>9</sup>を集め、そのうちで TOF の値が最も大きいものを探し、そのヒットの場所を IL ポジションとしたものである。

この図によれば、IL ポジションが見つかった時におけるその位置の誤差は  $4 \sim 10\text{ cm}$  程度となっている。ここでこの誤差はセルサイズに大きく依存し、この図 4.6 に見え

<sup>9</sup>ここでのヒットとはカロリメータのセル内でマージする前のヒットのことで、つまりは Monte-Carlo truth 情報におけるヒットである。（セルサイズが無限小の場合に対応する。）



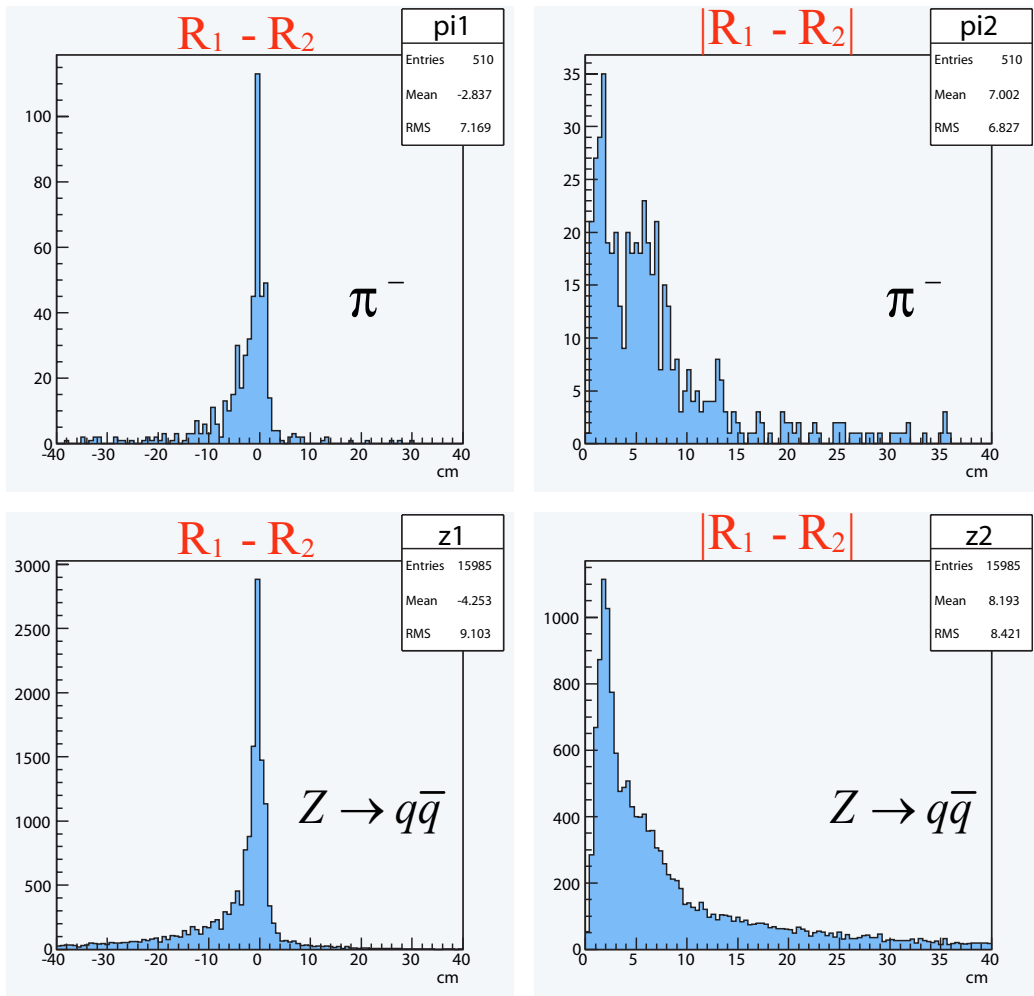


図 4.6: IL ポジションの同定に関する誤差。上二つは 3GeV の  $\pi^-$  を真上に打ち込んだ時のもので、下二つは  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) によるもの。また左二つは、再構成された IL ポジションとカンニングによる IL ポジションに関して、IP からの距離の差を取ったもので、右二つは二つの IL ポジション間の距離。

る誤差 4 cm のあたりに見られる山は、ECAL のセルサイズに起因するものである。

#### 4.2.2 ミューオンの再構成

現在の段階では、ミューオンによるカロリメータでのヒットのクラスタリング及びトラックとのマッチングは、Monte-Carlo truth の情報を用いたカンニングによって行われている<sup>10</sup>。よってこの節では、ミューオンの再構成の方法として将来用いられ

<sup>10</sup>現在はまだミューオン検出器が Jupiter 及び Satellites 内に実装されていないため、カンニングによってミューオンの再構成を行っている。しかしミューオンのジェット全体のエネルギーに対する寄与は小さく、またシグナルも線のようなため再構成はそれ程難しくないと考えられ、ミューオンの再構成がカンニングで行われているということに関しては、最終的なジェットのエネルギー分解能の結果などにはほとんど影響を及ぼさないと考えられる。

るだろう標準的なものについて触れるに留まることとする。

ミュオン再構成の際始めに行われることは、恐らくミュオン検出器でのシグナルの再構成ということになる。それはミュオン検出器にシグナルを残す粒子はほとんどミュオンだけであるということから他ならず、また仮に高エネルギーのハドロンがそのシャワーのテール部分をミュオン検出器に残したとしても、手前のカロリメータでのシグナルを見たりそのシグナル自体の違いを考慮すれば、それらを区別することは容易に可能となる。故にカロリメータでのシグナルの再構成を先に考えるよりも、まずミュオン検出器でのシグナルに対するクラスタリングを先に行い、それを飛跡検出器でのシグナルとつないでからカロリメータでのシグナルの再構成を行っていく方が妥当であると考えられる。

ミュオン検出器内でのシグナルの再構成として使用される手法は、まずミュオン検出器内でのトラッキングによりシグナルのクラスタリングを行い、その後飛跡検出器によって再構成されたトラックとのマッチングを行う方法か、もしくはまず飛跡検出器によって再構成されたトラックを用いてミュオン検出器内のシグナルとのマッチングを行い、それを基にミュオン検出器内でのクラスタリングを行う方法ということになると考えられる。どちらの場合にせよ、その後それを基にしてその間にあるカロリメータ内でのシグナルを順につなげていき、そうすればそれだけでミュオンの再構成は終わることとなる。

ミュオン関係の問題については、現在 Jupiter 内へのミュオン検出器の実装作業自体も含め、新潟大学小野裕明氏によって精力的に研究が進められている。しかしながらミュオン検出器の大きさ故に（内径 4.5 m 程度）、3GeV 程度以下のミュオンではその再構成が難しくなるという問題も出てくるようであり、そういったことも含め今後研究を行っていかねばならない対象である。

## 4.3 光子の再構成

MIP やミュオンなどの再構成の後、我々の PFA では光子及び電子の再構成を行う。本来可能ならば、この段階で全ての粒子に対して "粒子種に依存しない"かつ "ほぼ完全な"クラスタリングを "カロリメータの情報のみを用いて"行い、その後光子及び電子によるクラスターを選び出し、残ったクラスターに関してトラックとのマッチングを見ることにより荷電ハドロンと中性ハドロンとに分ける(もしくはトラックマッチングの後に光子、電子を選ぶ)というのが理想的である。しかしながらそのためには、シャワーの分岐を追いカロリメータ内でのトラッキングを行うようなクラスタリングか、またはそれに近い水準での正確なクラスタリングが必要となってくる。しかしながら図 4.1 ~ 4.4 からも分かるように、タイルサイズが ECAL : 4 cm × 4 cm, HCAL : 12 cm × 12 cm の場合、シャワーの枝を追っていくような方法を行うことは難しく、また後に示す Jet-Finding-like のクラスタリングのような、シャワーの広がり角度を使っていくような方法も不十分であるため<sup>11</sup>、本研究ではそのような方法は取らず、クラスタリングの手法は光子及び電子、荷電ハドロン、中性ハドロンに対してそれぞれ違うものを用い、また PFA としての順序も先に示したような形になっている。

### 4.3.1 クラスタリング

現在我々は光子及び電子に対する 2 通りのクラスタリングの方法を持っている。しかしながらそれらにおける性能に大差は無く、そのどちらを(または他の方法を)選ぶのが良いかについては、検出器のデザインやジェットのエネルギーに関する依存性ということも含めて、現在の所それに対する回答は得られていない。そこでここではそれら両方の方法について紹介していくこととする。

#### Small Clustering + 円筒型クラスタリング

まず Small Clustering と円筒型領域を用いたマーキングを用いたクラスタリングについて紹介する<sup>12</sup>。この方法では以下に示す Small Clustering により生成された small cluster を基に、さらにそれらを円筒型領域を用いてマーキングすることによって一連のクラスタリングを行っている。

まず Small Clustering について紹介するが、この Small Clustering の方法とは、単純に隣り合うヒットを結合していくというものである。しかしながら、このクラスタリングの手法はそのアルゴリズムの単純さ故に、シャワーが重なるとそのシグナルの起源となる粒子が異なるもの同士までをも 1 つにしてしまうという問題が生じる。そこで我々は以下のような手順を取っている。

<sup>11</sup>Jet-Finding-like のクラスタリングの効率(付録 B 参照)は  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) の環境下で平均 65% 程度である。(ただしこれについてのパラメータの最適化はされておらず、この結果は幾つか試した内で純度が現在の我々の結果(90%程度)と一致するようにした時のもの。)

<sup>12</sup>本来の思想としては、Small Clustering は粒子種に関わらず、この後に行われる各粒子の再構成のための足がかり的なものとして作られたものだが、今の所ハドロンの再構成に関しては small cluster を用いることによる明確な利点は得られていない。そのため現在 small cluster は、光子及び電子の再構成のためにのみ用いられている。

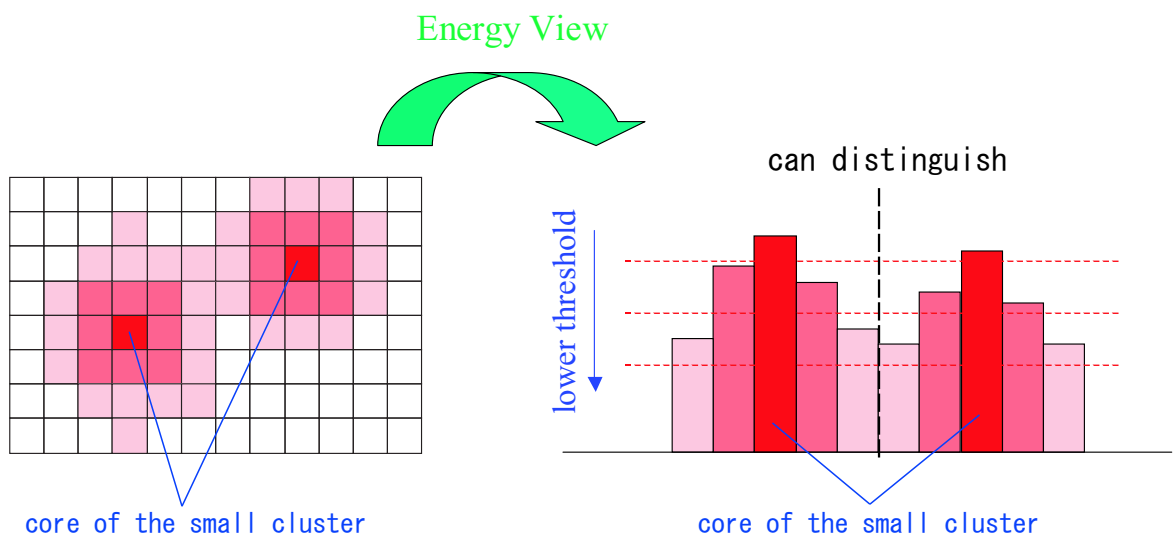


図 4.7: Small Clustering の概念図。

1. 各ヒットをそのエネルギーデポジットの大きい順に並び替える。
2. 高めのエネルギー敷値を設定する。
3. エネルギー敷居値を超えないヒットをクラスタリングの対象から外す。
4. ヒットの中で最もエネルギーデポジットの高いものを探して、それをコアとする。
5. コアに隣接するヒットをつなげていく。ただし斜めに隣接するものに関してはつなげない。(横または縦のみ)
6. 残ったヒットに対して 4 と 5 を繰り返す。
7. 敷居値を下げて 3 から 6 を繰り返す。

ただし ECAL のヒットと HCAL のヒットは区別してクラスタリングを行っている。

この方法についての概念図を図 4.7 に示す。 $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$  の  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベントを例に取れば、このような手順を取らずに単純に隣合うヒットを結合していった時、光子に対するクラスタリングの純度 (付録 B 参照) が約 89% であるのに対し、この方法を用いると純度は 96% 程度まで上昇する (表 4.1 参照。光子によるクラスタの純度がトータルのもとは比べて悪いのは、 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$  の 2 光子が時々マージしてしまっているため)。一方でクラスタリングの効率については当然ながら下がることになるが、Small Clustering はあくまでこの後の最終的なクラスタリングのための指標となるクラスタを作ることを目的としており、この段階でのクラスタリングの効率はそれ程重要とはならない。

光子や電子の場合カロリメータ内で作られるシャワーは細く、そのヒットは連続的なものとなりやすい。またシャワーのできる位置はハドロンの場合と異なり、カロリメータの内側からそう遠くない位置となる傾向がある。さらに ECAL のタイルサイズ

表 4.1: Small Clustering の効率及び純度 (ECAL のみ)。括弧の中は対象となるクラスターの種類を表す。また結果は  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) に対するもので、タイルサイズに Jupiter のデフォルトの値を用いた時のもの。

|                      | $\varepsilon$ (all) | $\varepsilon$ (photon) | purity (all) | purity (photon) |
|----------------------|---------------------|------------------------|--------------|-----------------|
| w/o energy threshold | 52                  | 80                     | 94           | 89              |
| w/ energy threshold  | 30                  | 48                     | 98           | 96              |

は (それらを考慮して) 小さく設計されているため、シャワーが重なり合うことは少ない。故に光子や電子に関しては、この方法により純度を落とすことなくある程度の大きさまでクラスタリングをすることが可能となっているのである。

Small Clustering により small cluster を生成した後、円筒型領域を用いたマーキングを行う。ただしここでは、マーキングと共に "光子らしいクラスターの選別" (後述) を同時に行っている。その方法は、

1. small cluster の内、平均の TOF が  $16\text{nsec}$  ( $ct \gtrsim 480\text{ cm}$ ) のものを除く。
2. ECAL の中からヒットの数が 5 以上で、なおかつ最もエネルギーデポジットの大きい small cluster を探す。
3. IP から 2 で見つかった small cluster (mother small cluster と呼ぶ) の位置の方向へ直線を引き、それを軸とし、さらに中心を mother small cluster の位置とするような半径  $5.7\text{ cm}$ 、高さ  $30\text{ cm}$  の円筒領域を仮定する。その円筒領域内で small cluster を集め、マーキングして 1 つの新しいクラスターとする。
4. 3 で作られたクラスターに対して、後述する方法によって光子らしいクラスターを選別する。ここで光子らしいと判断されたクラスター (small cluster 群) に関しては、それを光子によるクラスターと見てこの後の再構成の対象から外す。逆にもしここで光子らしくないと判断された場合、3 で生成されたクラスターを small cluster にばらし、mother small cluster だけを光子の再構成の対象 (光子によるシグナルとしての候補) から外す<sup>13</sup>。
5. 2 から 4 を繰り返す。

となっている。

このクラスタリングの方法を用いた時における、正しく再構成された光子クラスター<sup>14</sup>に関するクラスタリングの効率は約 93% であり、クラスタリングの純度は 95% 程度である。

<sup>13</sup>ここで光子のシグナルの候補から外された mother small cluster は、後のハドロン等の再構成の際の対象とはなり得る。

<sup>14</sup>光子だと判断されたクラスターの中で、本当にそのクラスターのエネルギーデポジットのほとんどが光子起源によるクラスター。

## Jet-Finding-like clustering

光子、電子に対するもう1つのクラスタリングの方法は、Alexei Respereza (Desy) によって提唱されている方法で、Jet-Finding アルゴリズムに近いものである。この方法もクラスタリングとそれによってできたクラスタのマーキングという2つの作業に大別できるため、それらを分けて説明していくこととする。

まずクラスタリングについてだが、その手順は以下のようなものとなっている。

1. カロリメータ内でのヒットを、IP からの距離が近いものから順に並び替える。
2. 最も上にある (最も IP に近い) ヒットを、新しいクラスタの seed ヒットとする。
3. まだクラスタに属していないヒットの内、最も上にあるヒット ( $h_j$  とする) を取ってくる。
4. 既にクラスタに属しているヒット  $h_i$  ( $i < j$ ) に対して、 $h_j$  との距離  $R_{ij}$  を計算する。
5.  $R_{ij} < R_{cut}$  の時、seed を基にして計算した弧の長さ  $d_{ij}$  (図 4.8 参照) を計算する。
6. 全ての  $i < j$  なる  $i$  に対して  $d_{ij}$  を計算し、その中で  $d_{ij} < d_{cut}$  を満たし、なおかつ  $d_{ij}$  を最小にするものを探す。
7. 6 で対応するヒットが見つかった場合、ヒット  $h_j$  をその  $d_{ij}$  を最小にしたヒット  $h_i$  の属するクラスタに加える。

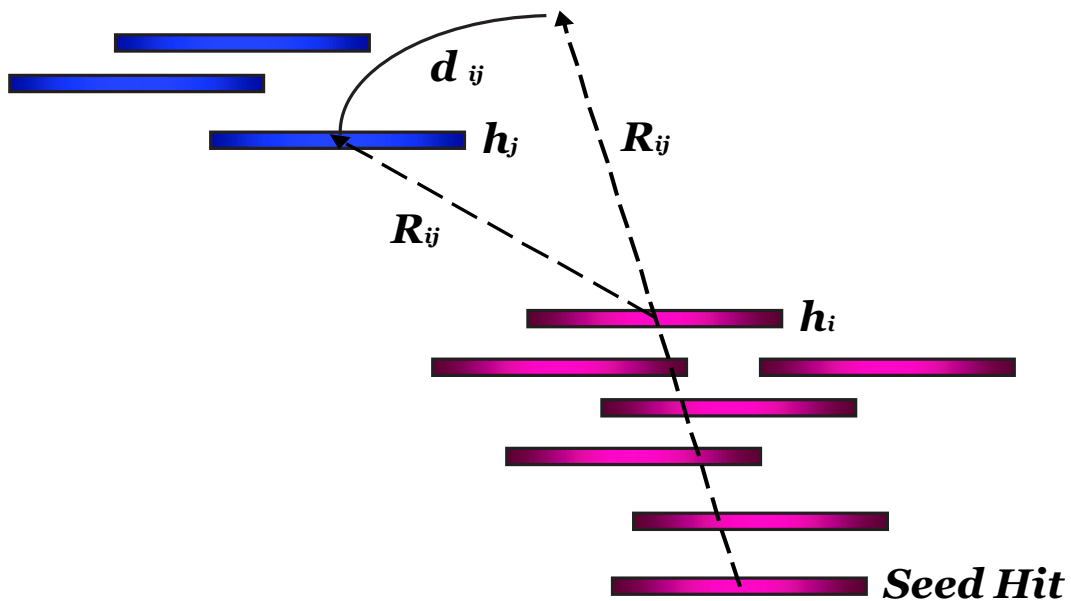


図 4.8: Jet-Finding-like clustering における  $d_{ij}$  の定義。

8. この段階で  $h_j$  がクラスターに属しておらず、なおかつ  $R_{\text{cut}} < R_{\text{max}}$  ならば  $R_{\text{cut}} = R_{\text{cut}} + dR$  として、3~8 を繰り返す。
9. この段階でも  $h_j$  に対応するクラスターが見つからない場合、 $h_j$  を新しいクラスターの seed ヒットとする。
10. 次のヒット  $h_{j+1}$  に対して 3~9 を行い、同じことをヒットがなくなるまで行う。

次にできたクラスターのマーキングについてだが、その手順は以下のようになっている。

1. クラスターのうちで、ヒットの数が  $N_{\text{min}}$  よりも小さいもの (グループ A) とそうでないもの (グループ B) とに分ける。
2. グループ A の各クラスター ( $C_A^i, i = 1 \sim n$ ) に対して、それぞれのうちで IP から最も遠いヒット ( $h_{\text{far}}^i$ ) と最も近いヒット ( $h_{\text{near}}^i$ ) を探す。
3. グループ B のクラスター ( $C_B^j, j = 1 \sim m$ ) に含まれる全ヒットのうちで  $h_{\text{far}}^i$  よりも IP から遠い位置にあるヒットに対して、それぞれ  $h_{\text{far}}^i$  からの距離を計算し、それらのうちで最小のもの  $R_{\text{fwd}}^{ij}$  を探す。
4. 同じく、グループ B のクラスターに含まれる全ヒットのうちで  $h_{\text{near}}^i$  よりも IP から近い位置にあるヒットに対して、それぞれ  $h_{\text{near}}^i$  からの距離を計算し、それらのうちで最小のもの  $R_{\text{back}}^{ij'}$  を探す。
5.  $R_{\text{fwd}}^{ij} < R_{\text{fwd}}$  かつ  $R_{\text{back}}^{ij'} < R_{\text{back}}$  の時は、 $R_{\text{fwd}}^{ij}$  と  $R_{\text{back}}^{ij'}$  とを比較し、より小さいほうに対応するクラスター ( $C^j$  or  $C^{j'}$ ) に  $C_A^i$  を加える。 $R_{\text{fwd}}^{ij} < R_{\text{fwd}}$  のみを満たす時は  $C^j$  に、 $R_{\text{back}}^{ij'} < R_{\text{back}}$  のみを満たす時は  $C^{j'}$  に  $C_A^i$  を加える。どちらも満たさない時は  $C_A^i$  をそのままグループ B に加える。
6. 2 ~ 5 を全ての  $i = 1 \sim n$  に対して行う。最終的にグループ B にあるクラスターをマーキング後のクラスターとみなす。

ここまでの段階では、small clustering の場合と同様 ECAL と HCAL を区別してクラスタリングを行っている。またクラスタリング及びマーキングにおける各パラメータの値は表 4.2 のようになっており、マーキングにおける  $N_{\text{min}}$  に関しては、ここでは 15 としている。

さらにここで (改めて記述はしないが)、Jet-Finding-like clustering を用いた場合においても ECAL のクラスターと HCAL のクラスターをマーキングするために、small clustering の時と同じく円筒型領域を用いてマーキングを行っている (円筒の半径は 4 cm、高さは 30 cm)<sup>15</sup>。この Jet-Finding-like clustering を用いて光子の再構成を行った時の、正しく再構成された光子クラスターに関するクラスタリングの効率は約

<sup>15</sup>これは Small Clustering を用いた時とは異なり、単に ECAL のクラスターと HCAL のクラスターをマーキングさせるためのものであり、これによってクラスタリングの効率が大きく変わることはない。実際ここで円筒型クラスタリングを行わなかったとしても、光子に対するクラスタリングの効率は 96% 程度にもなる。



表 4.2: 光子及び電子に対する Jet-Finding-like clustering の各種のパラメータ。  $R_{\min}$  は  $R_{\text{cut}}$  に対する初期値、  $n\text{steps}$  は  $n\text{steps} = (R_{\max} - R_{\min})/dR$  を表す。また  $R_{\min}$  などの単位は全て cm である。

|      | clustering |            |                  |                 | merging          |                   |
|------|------------|------------|------------------|-----------------|------------------|-------------------|
|      | $R_{\min}$ | $R_{\max}$ | $d_{\text{cut}}$ | $n\text{steps}$ | $R_{\text{fwd}}$ | $R_{\text{back}}$ |
| ECAL | 2.0        | 5.7        | 5.3              | 5               | 5.0              | 10.0              |
| HCAL | 10.0       | 40.0       | 12.0             | 5               | 10.0             | 50.0              |

98%であり、その純度は94%程度である。ここで純度が Small Clustering を用いた時と比べて悪いのは、主に  $\pi^0$  起源の2光子が1つのクラスターとして扱われてしまうことが増えるためであると考えられる。

seed ヒットを基にした角度をクラスタリングの情報源としているこの方法は、CAL の中ですぐにシャワーを起こし、またシャワーがあまり広がらないような光子や電子に対して極めて有効な方法に思える。しかし ECAL のタイルサイズが  $4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$  の時<sup>16</sup>、図 4.1 から分かるように、シャワーのほとんどはタイル1, 2個の範囲に収まってしまったためにこの方法はあまり意味を成さない。よって先の単純な Small Clustering とそれを基にした円筒型クラスタリングを行ったものと比べても、CPU 時間的なことを考えるとあまり有益ではない。しかしタイルサイズが小さい条件下では、クラスタリングの効率を落とすことなく、密接した  $\pi^0$  起源の2光子をうまく分離することができるなどの効果が期待される。(ただしエネルギーデポジションの濃淡を考慮するような、多少の補正は必要かもしれない。)

またこの方法は本来光子のクラスタリングということに関わらず、全体的なクラスタリングとしても使えるようなアルゴリズムであり、実際我々の PFA でも中性ハドロン<sup>17</sup>のクラスタリングに関しては現在この方法を用いている(ただしカットなどのパラメータはここでのものとは異なる)。

以上、光子及び電子に対するクラスタリングについて述べた。この後にはここで作られたクラスターに対して、その特徴を調べることにより光子らしいクラスターのみを選びしていくということが行われる。現在光子の PID のために使用している情報は3種類に分類することができ、以下ではその方法(PIDの方法)について順に説明していくこととする。ただし先ほども述べたように光子のセレクションは円筒型クラスタリングを行うのと同様に行われ、以下の条件を満たさない場合は円筒型クラスタリングのコアとなった mother cluster を光子シグナルの候補から外すということを行っている。

<sup>16</sup>鉛の Molière 半径は 2 cm 程度である。

<sup>17</sup>荷電ハドロンに対してはこの方法を用いるよりもトラックの情報を基にしたクラスタリングを行う方が純度が同じ時のクラスタリングの効率が高く、中性ハドロン<sup>17</sup>のクラスタリングに対してのみこの方法は用いられている。ただし IL ポジションに関する考慮をこの方法に加えることによってクラスタリングの効率を上げることが可能であると予想されるが、それについてはまだ研究が成されていない。



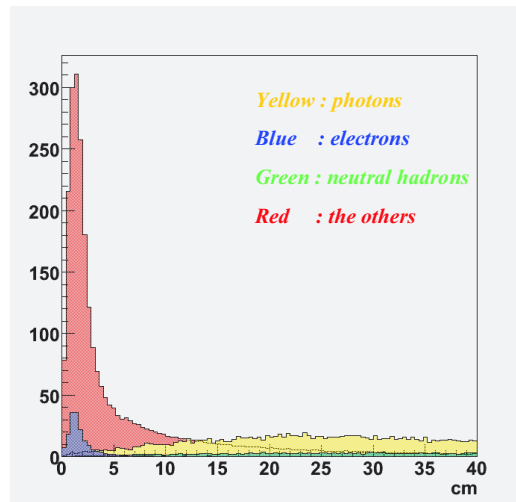


図 4.9: ECAL 上の Small cluster に対するトラックとの距離の分布

#### 4.3.2 トラックとの距離の情報による PID

ここではまず、以下に述べる光子の PID のための情報の中で最も単純で、なおかつ最も強力なものと呼べるクラスターとトラックとの距離の情報について見ていくこととする。

このセレクションにおいて使用しているのは、対象としているクラスターと飛跡検出器によって再構成されたトラックの内最も近いものとの間での距離である。その方法は単純に再構成された各トラックをカロリメータ上へと伸ばしていき、それによってクラスターとトラックとの距離を予測してその中で最小となるものを探すというだけであるが、光子の再構成において最大のバックグラウンドとなり得るものは荷電ハドロンであるため、この単純な方法によって多くのバックグラウンドを除外することが可能となる。

またこの方法はその単純さ故に CPU 時間がほとんどかからず、一番最初に大まかに使用するカットとしても利用できるものである<sup>18</sup>。ただしこの情報はジェットのエネルギーやセルサイズに依存する点が少なくないため、その点には注意が必要となる。

#### 4.3.3 シャワーの縦方向に関するエネルギーの情報による PID

光子、電子の作るシャワーはハドロンのもとは全く異なった特徴を示す（付録 C）。具体的には光子、電子のシャワーはカロリメータに入ってからすぐにでき始め、またハドロンのシャワーに比べて細く短いまとまったものとなるということである。そのためシャワーの縦方向に関する性質を見ることにより、かなりの確率でハドロンのクラスターを除外することが可能となる。これは PFA における光子（及び電子）のセレクションにおいて最も一般的に使われている情報であり、実質的に Electromagnetic shower と Hadronic shower を区別するために最も重要な情報であるといえる。

このシャワーの縦方向に関するエネルギーデポジットの情報を用いたハドロンクラス

<sup>18</sup>例えば 4 cm でカットを入れるとバックグラウンドを 52%落とし、光子を 98%残せる。

ターの除外の方法にはいろいろと考えられるため、ここでは現在実際に使用している3つについて述べる<sup>19</sup>。

### 平均の深さ

まずクラスターに対する、カロリメータ内側表面からの平均の深さの情報について述べる。これは単純にクラスター内のヒットに対するレイヤー ID を調べ、各ヒットに対するエネルギーデポジットで重みをつけた平均のレイヤー ID (～深さ) を見たものである。図 4.10 に各粒子に対するこの平均のレイヤー ID の分布を示す。この図の示す通り、光子によるものとハドロンによるものとはその違いが見て取れる。またこれを見る際に縦方向のシャワーの広がりに対する RMS も同時に調べられているが、平均値をセレクションに利用する場合、同時に RMS を見ることによる利点は特に見られていない。

### エネルギーデポジットが最大のレイヤー

次にクラスター(シャワー)における最大のエネルギーデポジットをもつレイヤーの情報について述べる。ここではまずクラスターのヒットをレイヤーごとに見ていき、それぞれのレイヤーごとにエネルギーデポジットの和を取る。そしてそのレイヤーの中で最もエネルギーデポジットの和が大きいレイヤーを探し、それによって光子によるクラスターとそうでないものとを分けるというものである。この結果は光子に対しては先の平均のレイヤー ID を見たものと大して変わらないものとなるが、IL ポジションが ECAL の外面近くにある荷電ハドロンクラスターなども考慮して、平均レイヤーを見る方法の補助として使用されている。

### *Gamma distribution function* によるフィッティング

最後にクラスターのエネルギーデポジットを *Gamma distribution function* でフィッティングする方法について述べる。この方法ではまず光子の候補のクラスターに対して各レイヤーごとのエネルギーデポジットの和<sup>20</sup>を計算し、それを *Gamma distribution function* でフィッティングする。そしてその  $\chi^2$  の値を基にして光子らしいクラスターを選び出すというものである。

図 4.12 に  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント及びシングルトラックテストにおける  $\chi^2$  の結果を示す。この図が示すように運動量の小さい場合では特にハドロンとの区別が難しく、またシャワーに対する確率的変動のために  $\chi^2$  の分布にテールを持ち易いため、何かしらの考慮が必要と考えられるものである。

<sup>19</sup>シャワーの横方向の情報については 4 cm × 4 cm のセルサイズのデザイン上ではその使用が難しいため、現在は使用していない。

<sup>20</sup>実際には確率的変動を考慮して、前後を含めた 3 レイヤーの和の平均を取っている。

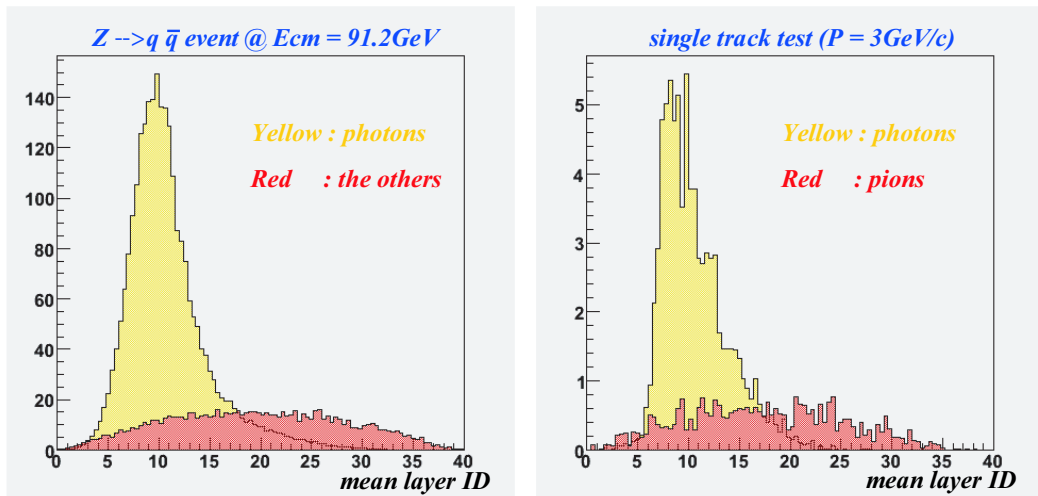


図 4.10: クラスタに対する平均のレイヤー ID を光子クラスタの候補 (ECAL にある mother (small) cluster を中心として円筒型クラスタリングを行ったクラスタ) に対して見たもの。ただし  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベントのものに関しては、トラックとの距離が 4 cm より大きいものに対してのみ見ている。

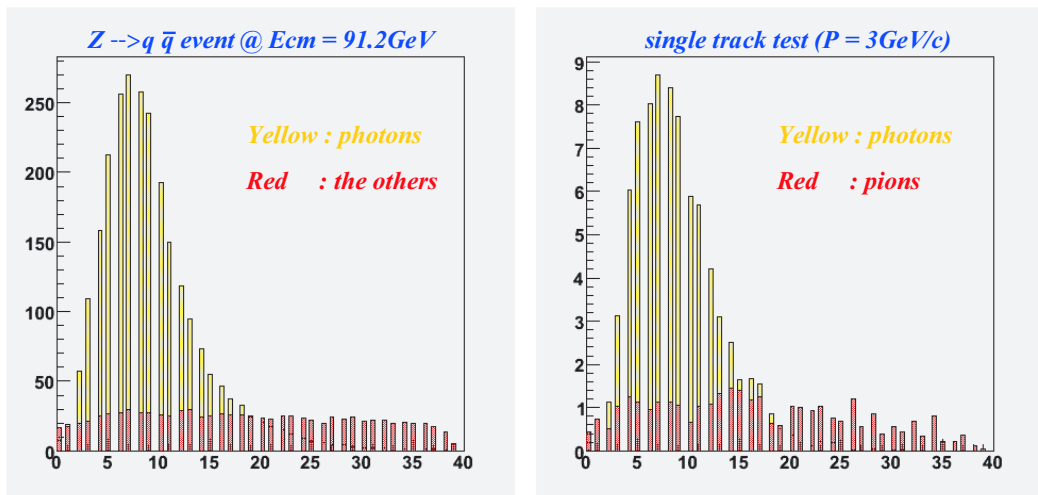


図 4.11: トータルのエネルギーデポジットを最大にするレイヤー ID の分布。上の図と同様、 $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベントのものに関しては、トラックとの距離が 4 cm より大きいものに対してのみ見ている。

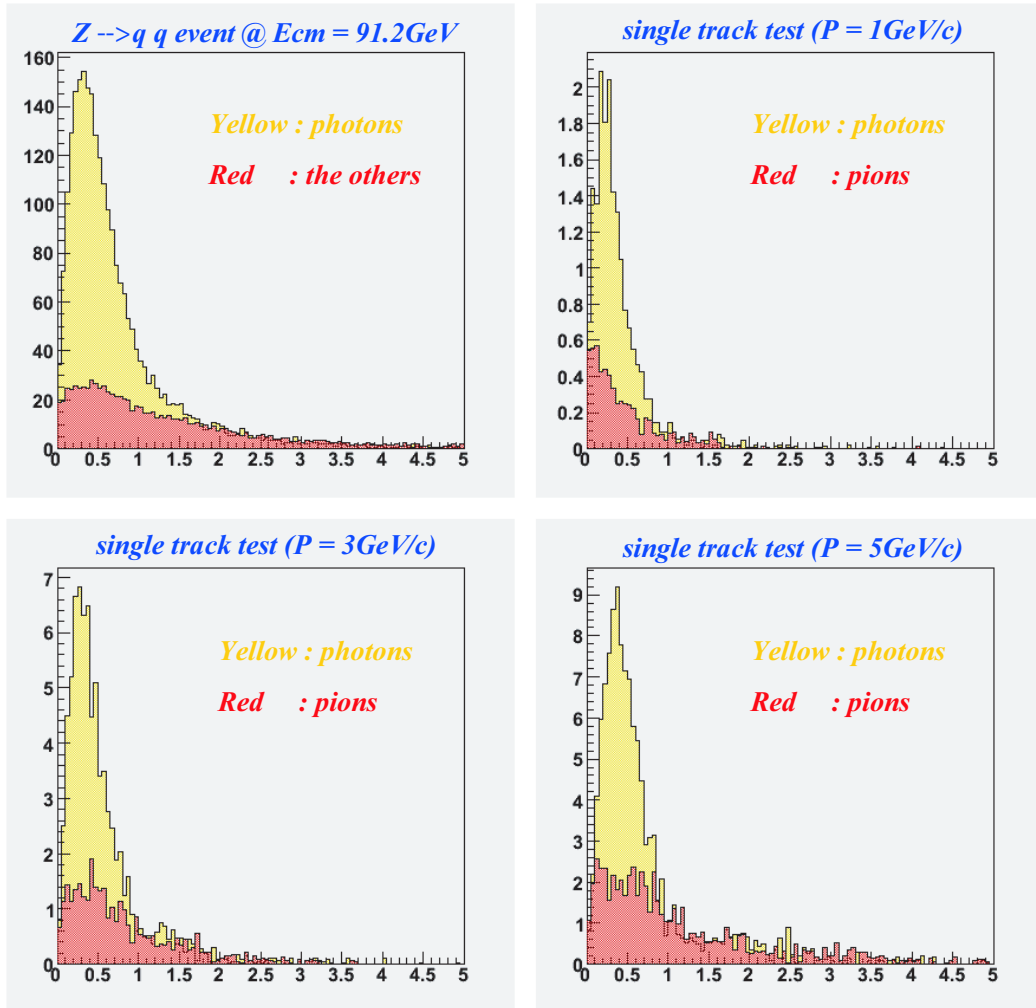


図 4.12: *Gamma distribution function* によるフィッティングの  $\chi^2/ndf$ 。ただし  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベントではトラックとの距離が 4 cm 以上のもののみ選んでいる。

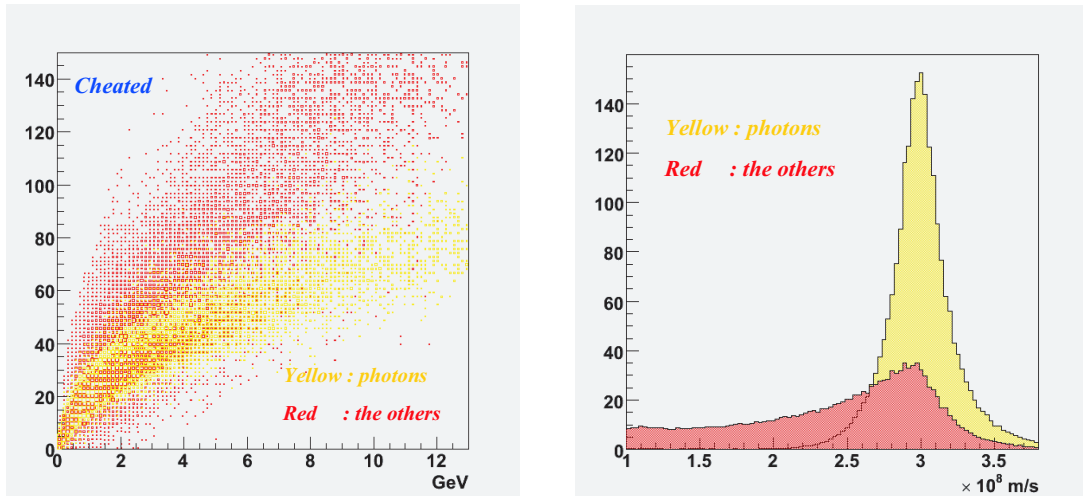


図 4.13: 左はカンニングクラスタリングによるクラスターに対するヒット数とエネルギーの分布。ただしクラスターは平均のレイヤー ID が 30 以下 (ECAL の約 3/4 の深さ以下) かつトラックとの距離が 4 cm 以上のもののみ選んでいる。右は ECAL の Small cluster の R/TOF の分布。トラックとの距離が 4 cm 以上のもののみ選んでいる。

#### 4.3.4 ヒット数とエネルギーの相関による PID

次にクラスターに対するヒット数とエネルギーの相関の情報について述べる。図 4.13 が示すように、(ECAL 内における) クラスターに対するヒットの数とクラスターのエネルギー (エナジーデポジット) との相関は光子とハドロンで異なる<sup>21</sup>。そのためこの相関を見ることによりハドロンと光子との区別が可能となっている。

しかしこれについてはハドロンクラスターに対するクラスタリングの効率がある程度高いことを要求するため、現在はそれ程効果のあるセレクションの方法とはなっていない。

#### 4.3.5 TOF の情報による PID

最後に TOF を使った光子のセレクションについて述べる<sup>22</sup>。この方法ではクラスターに対する平均の TOF の情報から形式上の速さ (= R/TOF) を計算し、それを用いて光子とその他のものとの区別を行う。これによって磁場により何度も回転させられた運動量の小さい荷電粒子、運動量が小さく遅い中性子、Satellite hits などを取り除くことが可能となる。

またこれに関しては、先に述べたように円筒型クラスタリングを行う際に TOF でカットを入れることにより、光子クラスターを探す前のクラスタリングの段階で、ある程度余計なヒットを取り除くことを可能としている。

<sup>21</sup>実際にはどちらもクラスターに対するヒット数 (~ クラスターの長さ) は  $\ln E$  に比例するような形になるが、10 数 GeV 以下のエネルギー領域では光子は  $\ln E$  に、ハドロンは  $E$  に比例するような形となって見える。

<sup>22</sup>先の章で述べたが、現在 Satellites ではカロリメータの各セルごとの TOF の情報を  $\sigma = 1.3$  nsec の Gaussian distribution によって smear している。

#### 4.3.6 光子の再構成に関する結果

現在の所以上のような情報を用いて光子クラスターを選択を行っている。しかしながら現在はこれらのカットを Likelihood Ratio やニューラルネットワークなどといった方法を用いて使用しているわけではなく、全てのセレクションにおけるカットは”and”の条件下で使用されている<sup>23</sup>。またそれらのカットパラメータは、例えば平均のレイヤー ID が 17.5(～ECAL の半分の深さ) 以上のものは全てハドロンクラスターとみなすなど、エネルギーの考慮などは全くされていないものである。それ故に今後光子の PID に関するより系統的な手法を確立する必要があるが、それについてはまだちゃんとした研究が成されていない。

現在の PFA における光子の再構成ではクラスタリングの手法として基本的に Small Clustering と円筒型クラスタリングをあわせたものを用いており、それと上記の情報を用いた光子クラスターのセレクションの結果、光子の再構成に関する効率は約 85%で、純度は 92%程度となっている<sup>24</sup>。またシングル光子に対する再構成の効率は表 4.3 のようになっている。現在のクラスタリングの手法及び光子クラスターのセレクションの方法では、カットの値にエネルギー依存性を持たせていないために運動量が 5GeV/c 程度以上では光子の再構成の効率が落ちるが、それ以下では再構成の効率に関してエネルギー依存性は特に見られない。

表 4.3: シングルの光子に対する再構成の効率

| $p$ (GeV/c)                    | 0.5 | 0.7 | 1.0 | 3.0 | 5.0 | 10.0 | 30.0 |
|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| Small Clustering 形式            | 94  | 93  | 93  | 94  | 91  | 84   | 82   |
| Jet-Finding-like clustering 形式 | 95  | 94  | 95  | 91  | 89  | 86   | 80   |

<sup>23</sup>ただし *Gamma distribution function* によるフィッティングでは運動量の小さい粒子の区別は難しいため、クラスターのヒットの数が多いものに関してはこれを用い、小さいものに対してはこれを用いず他のカットパラメータを変えたものを適用するという事は行っている。

<sup>24</sup>Jet-Finding-like clustering を用いた時は効率が約 84%で、純度は約 94%となる。



## 4.4 電子の再構成

現在の所電子の再構成を行うアルゴリズムはまだ Satellites に実装されてはならず<sup>25</sup>、次に行われる荷電ハドロンの再構成の際、荷電ハドロンの区別をせずに再構成が行われている。そこでここでは電子の再構成に関する、将来における方針について述べることにする。

- クラスタリングについては、そのシャワーの類似性から基本的には光子のそれと同じものが用いられることとなる。また PID に関しても光子のセレクションとほとんど同じものを使用することができるが、幾つか使用できないもの、逆に電子に対してのみ使用が可能となるものもある。
- シャワーの縦方向の性質（さらには横方向の性質）は光子のそれと同じものとなるため、*Gamma distribution function* でのフィッティングなど、同じものが使えるはずである。一方で光子との区別という意味で、シャワーの始点に対するカロリメータの内側からの距離を利用した区別が可能かもしれないが、カロリメータの内側が吸収層から始まる以上、これは難しいと思われる。
- トラックとクラスターとの距離に関する情報だが、光子がトラックとの距離が遠いものの方が多いのに対して、電子に関してはトラックとの距離は近いものの方が多くなる。むしろ荷電ハドロンの場合と比べても、シャワーの細さなどの性質、及び ECAL のタイルサイズが小さいことにより、トラックとの距離は特に近いものが多くなり、光子とは逆の意味でトラックとの距離の情報は電子のセレクションに使用することが可能である。
- 荷電ハドロンの区別ということで、10GeV 程度以下の電子に対しては TPC における  $dE/dx$  の情報を使うことが可能だと思われる。また電子はハドロンの比べてカロリメータによるエネルギー分解能がよく、さらにキャリアレーションファクターはハドロンのものとは異なるので、（特に ECAL でのクラスターだけを選ぶ場合には）クラスターのエネルギーとトラックの運動量とを比較することにより荷電ハドロンの区別が可能と考えられる。
- エネルギーキャリアレーションに関しては、電子についてはトラックの情報を使わずにカロリメータの情報によってエネルギーを評価する。ただし電子の飛跡の方向に関しては、飛跡検出器の情報によって評価することとなる。

以上が電子の再構成に関するおおまかな展望であるが、残念ながら実際にシミュレーションを行ってみてからでなければ、このパートをどうするかについての詳細は決めることができない。

<sup>25</sup>電子によるジェットのエネルギーに対する寄与が非常に小さいため、電子の再構成に関する研究は後回しとなっている。



## 4.5 荷電ハドロンの再構成

この節では荷電ハドロンの再構成の方法について説明する。

まず本来ならばこの段階以前に電子によるカロリメータ内でのヒット及びトラックは取り除かれているはずであるため、残っているトラックは全て荷電ハドラ起源のものとして仮定する。またクラスタリングに関しては先に述べたようにトラックの情報を大きく用いた方法を取っている。その方法とは単純にトラックの周りにチューブ領域を仮定したもので、

1. トラックを運動量の大きいものから順に並び替える。
2. 各トラックの周りにおけるヒットに対して、トラックとの距離が  $R$  以下のヒットをそのトラックから来たヒットとみなし、そのトラックに対応したクラスタに追加する。
3. もし集められたヒットによるエネルギー  $E_{cls}$  ( エナジーデポジットの値から大雑把な形でキャリブレーションを取って予測したもの ) が、トラックの運動量から推測されるエネルギー  $E_{trk}$  ( 質量は  $\pi^\pm$  のものを仮定 ) に対して  $E_{cls} > (1 + 2\sigma)E_{trk}$  となっていたら、そのトラックに関してはそれ以上クラスタリング ( マージング ) を行わないものとし、その他のものに対しては  $R < R_{max}$  ならば  $R = R + dR$  として再び 2 を行う。ここで  $\sigma$  はカロリメータの分解能を仮定したもので、現在は  $40\% \times \sqrt{E_{trk}}$  としている。

というものであり、 $dR$  などの値は、 $R$  の初期値が  $1\text{ cm}$  ( ECAL ) 及び  $4\text{ cm}$  ( HCAL )、 $dR$  が  $1\text{ cm}$  ( ECAL ) 及び  $2\text{ cm}$  ( HCAL )、 $R_{max}$  が  $20\text{ cm}$  ( ECAL ) 及び  $40\text{ cm}$  ( HCAL ) としている。またこの方法によって正しく再構成されたクラスタに対するクラスタリングの効率は約  $85\%$ 、純度は  $91\%$  程度であり、また再構成の効率は約  $84\%$ 、純度は  $92\%$  程度である。

この方法では、"カロリメータの情報 ( のみ ) を用いたシャワーの枝に対するトラックング" や "IL ポジションを考慮したクラスタリング" は行っていない。前者に関しては、先に述べたように Jupiter のデフォルトとして使用してきたカロリメータのセルサイズではカロリメータの情報のみを用いたハドロンのクラスタリングは難しく、少なくともシャワーの中心となる部分や IL ポジションをトラック情報を用いて探し、その後うまくクラスタリングを行う必要があると考えられるため、現在はそのような方法を取っていない。また後者に関して、前の段階で見つかった IL ポジションに対して、単純なコーン領域を IL ポジションから仮定した方法などが試されているが、チューブ領域を用いたものに比べてクラスタリングの効率が下がることによる弊害のほうが大きいなど、あまりよい結果は得られていない<sup>26</sup>。

よって現段階では単純なチューブ領域を用いた方法以上のものは見つかっていないが、そういった方法は未だ研究段階であり、これからさらに詳細で技巧的な方法について研究を重ねていく必要がある。

<sup>26</sup> バックスキャタリングなどの効果からか、もしくは既に光子がある程度抜かれているためにチューブ領域のものに比べてあまり利点が無いということからなのかなど、考えられることは幾つかあるがその原因はまだ詳しく調べられていない。

## 4.6 中性ハドロンの再構成

ミュオン、光子、電子、荷電ハドロンと再構成を行ったあと、その段階でカロリメータ上に残ったシグナルは、基本的に中性ハドロンのものとみなされる。よって本来この段階で行われることはクラスタリング（及びエネルギーキャリブレーション）だけとなるが、実際にここまで我々が行ってきたような再構成を行っていくと、各パートでの再構成の不完全さから、中性ハドロン以外のシグナル（特に荷電ハドロンのシグナル）も多く残っている。故にここでは残ったヒットに対するクラスタリングのみならず、Satellite hits を除去することも行っている。（これはつまりそれらを荷電ハドロン起源のシグナルとみなすことと同値である。）それによって中性ハドロンによる Satellite hits も除去されることになるが、ほとんどの Satellite hits の起源が荷電ハドロンのものであること、また中性ハドロンのクラスターに対するコアの部分さえ残っていればキャリブレーションの手法によってある程度の調節が可能となることも考えられるため<sup>27</sup>、ここで Satellite hits の除去を行っている。ただし当然のことだがここでのこの作業はあまり推奨できるものではなく、これ以前のパートでの効率などを上げられるのならばその方が良い。

### 4.6.1 クラスタリング

まず中性ハドロンのクラスタリングの手法についてだが、現在ここでは先の光子の再構成の際に紹介した Jet-Finding-like clustering を用いている。その際に用いているパラメータは以下ようになっており、またマーキングにおける  $N_{\min}$  に関しては 25 としている。

表 4.4: 中性ハドロンに対する Jet-Finding-like clustering の各種のパラメータ。  $R_{\min}$  などの単位は全て cm。

|      | clustering |            |                  |        | merging          |                   |
|------|------------|------------|------------------|--------|------------------|-------------------|
|      | $R_{\min}$ | $R_{\max}$ | $d_{\text{cut}}$ | nsteps | $R_{\text{fwd}}$ | $R_{\text{back}}$ |
| ECAL | 2.0        | 14.0       | 8.0              | 5      | 5.0              | 10.0              |
| HCAL | 10.0       | 50.0       | 12.0             | 5      | 15.0             | 50.0              |

この方法を用いた時における、（Satellite hits 除去後の）正しく再構成された中性ハドロンクラスターに関するクラスタリングの効率は約 63%、純度は 93%程度である。

### 4.6.2 Satellite hits の除去

以下では Satellite hits の除去の方法について説明していく。繰り返しになるがここで行われる Satellite hits の除去はあくまで補助的なものであり、これ以前の再構成及びクラスタリングの効率を十分上げることができたならば、この作業はほとんど必要ないものとなる。またこの作業は特に強く “再構成の失敗を相殺する” 危険性を含ん

<sup>27</sup>ただし Satellite hits の除去によって生じた中性ハドロン起源のヒットの取りこぼしの割合にエネルギー依存性などがない場合に限る。

であり、重心エネルギーや物理イベントに対する依存性に対して細心の注意を払わなければならないものでもある。しかしながら現実には完全なクラスタリングは不可能なため、少なくともこのような補正は必要となってくると考えられ、現在試作的な形ではあるが Satellite hits の除去作業がここでされている。

現在 Satellite hits の分離のために使用しているものは、各クラスターに対する平均の TOF の情報と、クラスターの周りで計算したエネルギーデポジットの密度の情報である。以下でそれについて説明していくこととする。

## TOF の情報

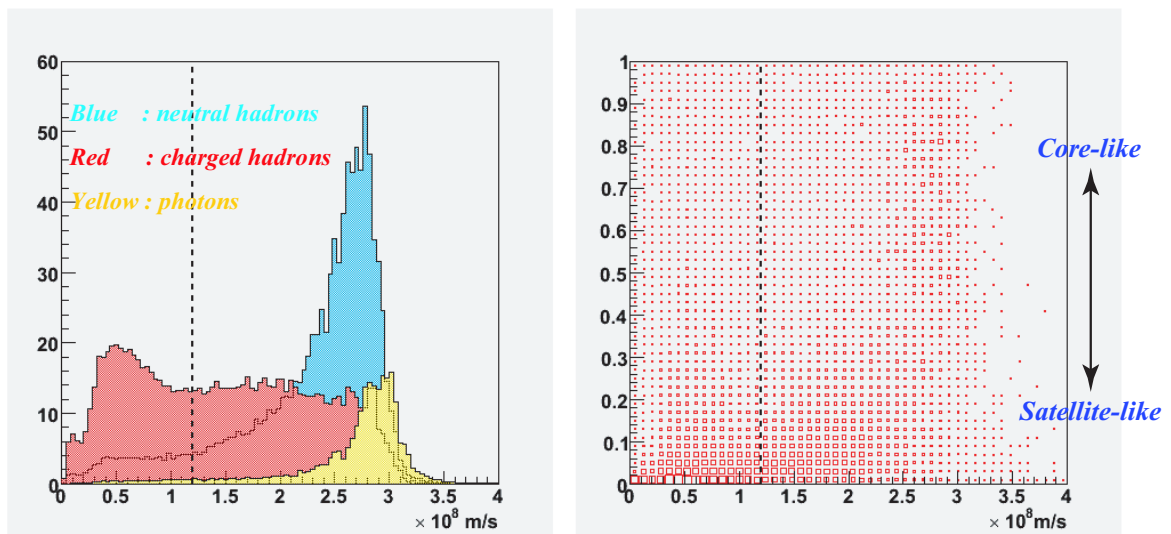


図 4.14: 各クラスターに対する形式上の速さの分布（左）と、荷電ハドロンに対するクラスタリングの効率と形式上の速さの相関の分布。

TOF の情報を使うのは一般に Satellite hits が持つ TOF の値がクラスターのコアの部分に比べて大きいからである<sup>28</sup>。図 4.14 に示すのはこの段階（荷電ハドロン再構成が終わり、さらに残っているヒットに対するクラスタリングが終わった段階）でのクラスターに対する、TOF から計算した形式上の粒子の速さ (=  $R/\text{TOF}$ ) のヒストグラムである。この図からも分かるようにこの段階で残っている荷電ハドロン起源のヒットのほとんどは TOF の大きな値を持ったヒット（コアから外れた所にあるヒット）であり、その量は中性ハドロンのもよりも大きい。

現在はこの速さの情報を見ることにより、速さが  $1.2 \times 10^8 \text{ m/s}$  以下となるものを Satellite hits としてカットしている。これによって残っている荷電ハドロンシグナルの内の約 42% を取り除くことができ、また約 10% の中性ハドロンが落とされることになる<sup>29</sup>。

<sup>28</sup>ただし運動量の小さい中性子など TOF の値が大きいコアを持つクラスターもある。

<sup>29</sup>これ以前の段階（荷電ハドロン再構成の後）で残っているシグナルは、全荷電ハドロンシグナルの内の約 15%、全光子シグナルの内の約 12%、全中性ハドロンシグナルの内の約 76% である。

## エネルギー密度の情報

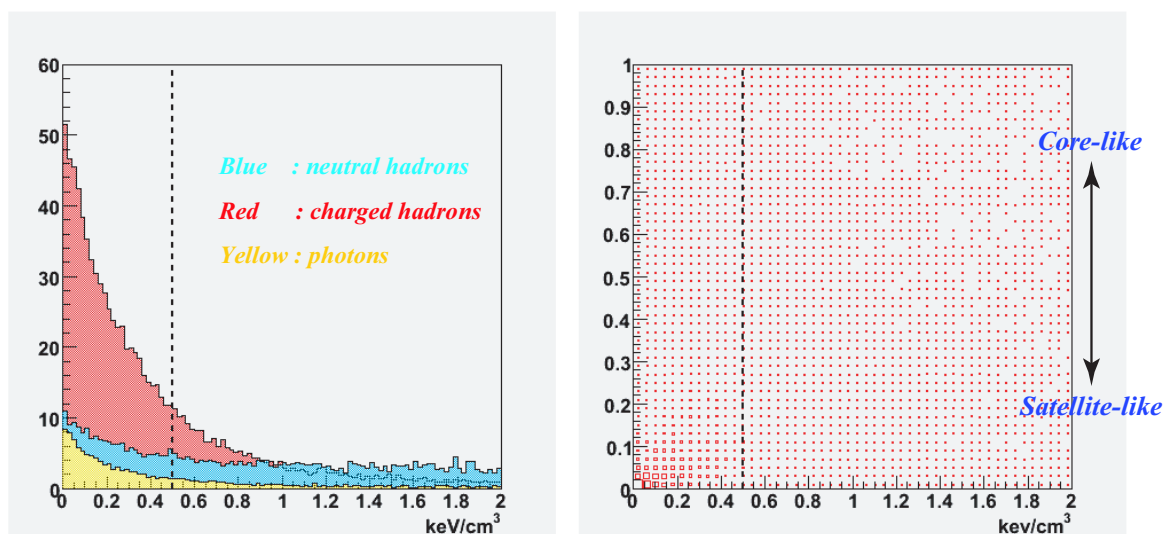


図 4.15: 各クラスターに対するエネルギーデポジットの密度の分布（左）と、荷電ハドロンに対するクラスタリングの効率とエネルギーデポジットの密度の相関の分布。ここで中性ハドロンに対するエネルギーデポジットの密度分布は約  $20\text{keV}/\text{cm}^3$  まで続いている。

適当な領域を定めてエネルギーデポジットの密度を計算すると、一般に Satellite hits の周りではその値は小さい。またこの段階では既に荷電ハドロンのシグナルにおけるコアの部分はそのほとんどが取り除かれているため、荷電ハドロンの Satellite に対しては特にそれは顕著となる。図 4.15 に示すのは荷電ハドロンの再構成後に残っている各クラスターに対して、その周りに半径 20 cm の領域を仮定してサンプリングを行い、その中でエネルギーデポジットの密度を計算した時の各粒子種に対する分布である。

現在はこの情報を見ることにより、エネルギーデポジットの密度が  $0.5\text{keV}/\text{cm}^3$  以下となるものを Satellite hits としてカットしている。(TOF でのカットを仮定しない時、) これによって残っている荷電ハドロンシグナルの内の約 64% を取り除くことができ、またそれに伴って約 17% の中性ハドロンが落とされることになる。

これら速さとエネルギーデポジットの密度の情報を用いて Satellite hits と思われるものを取り除くと、荷電ハドロンの再構成の後の段階で残っているシグナルの内、約 70% の荷電ハドロンシグナル及び約 19% の中性ハドロンシグナルが捨てられることとなる。これはエネルギーに換算すると、トータルのエネルギー 91.2GeV 中、荷電ハドロンの再構成に対する不完全さから来るエネルギーのダブルカウントを約 5.7GeV 除き、逆に加えられるべき中性ハドロンのシグナルのうち約 1.7GeV が失われたということに相当する。

## 4.7 エネルギーキャリアレーション

エネルギーキャリアレーションに関しては、粒子をそれぞれ再構成するたびにその都度行っており、最後にまとめて行っているというわけではない。しかし多少込み入った点もあるため、ここで節を改めて説明していくこととする。

先に説明したとおり、基本的には粒子（ジェット）のエネルギーの再構成をする際には、荷電粒子には飛跡検出器によるトラックの情報を用い、中性粒子に対してはカロリメータの情報を用いる。ここで粒子がカロリメータ上に落とすエネルギーデポジットと入射粒子の真のエネルギーとの間の関係を決める係数であるキャリアレーションファクターは、粒子のエネルギー、入射角度、粒子種、ECAL にシグナルを残したか HCAL にシグナルを残したかということや、さらにはハドロンの場合ではシャワーの形状によって一般に異なってくるのだが、PFA では各粒子ごとに再構成を行っているため、それら（及びPFA 自体のパフォーマンス）を考慮した形でのエネルギーキャリアレーションが可能となる。

よって本来の PFA では、可能ならばそれらを考慮した上でのエネルギーキャリアレーションを行い、それによってよりよいエネルギー分解能を得られるようにする。しかしながら現状の我々の PFA では、中性ハドロンに対してのクラスタリングの効率が低いために中性ハドロンに対してそういったことを考慮する段階に至っておらず、また光子（及び電子）に関してはキャリアレーションファクターはエネルギーや角度に対する依存性はほとんどない。故に現状ではキャリアレーションファクターは ECAL のヒットに対しては 51.4、HCAL のヒットに対しては 41.7 という定数を用いているだけであり<sup>30</sup>、また荷電粒子に対しては全て  $\pi^\pm$  の質量を仮定してエネルギーを導出している。しかしエネルギー依存性（及び角度依存性など）を持たせたエネルギーキャリアレーションを行うことはエネルギー分解能を向上させる大きな要因の一つであるので、以下ではカンニングによってクラスタリングを行ったものを例にキャリアレーションファクターに対するエネルギー依存性について幾つか考察していくこととする。

### 光子のエネルギーキャリアレーション

図 4.16 に光子クラスターに対するキャリアレーションファクター<sup>31</sup>と、クラスターのエネルギーデポジットに対する相関図を示す。この図から、光子（及び電子）に対するキャリアレーションファクターには大きなエネルギー依存性が見られず、キャリアレーションファクターとして 50 程度の定数を用いることが妥当であることが見て取れる。

なお実際の PFA において光子のキャリアレーションファクター（及びそのエネルギー依存性）を決める際には、クラスタリングの効率がどれくらいか、クラスターのコアとくっつくことができなかつた小さいクラスターを捨てるのか、それとも全て使

<sup>30</sup>ECAL でのエネルギーデポジットが  $E_{\text{ECAL}}$ 、HCAL でのエネルギーデポジットが  $E_{\text{HCAL}}$  であるクラスターに対して、そのクラスターのエネルギーを  $E = 51.4E_{\text{ECAL}} + 41.7E_{\text{HCAL}}$  として評価しているということ。この値は別に行われているカンニング PFA で使われているので、デフォルト値としてこの値を採用している。

<sup>31</sup>TPC の外側を通過する段階で持っていたエネルギー（真のエネルギー）をクラスターの持つエネルギーデポジットで割ったもの。



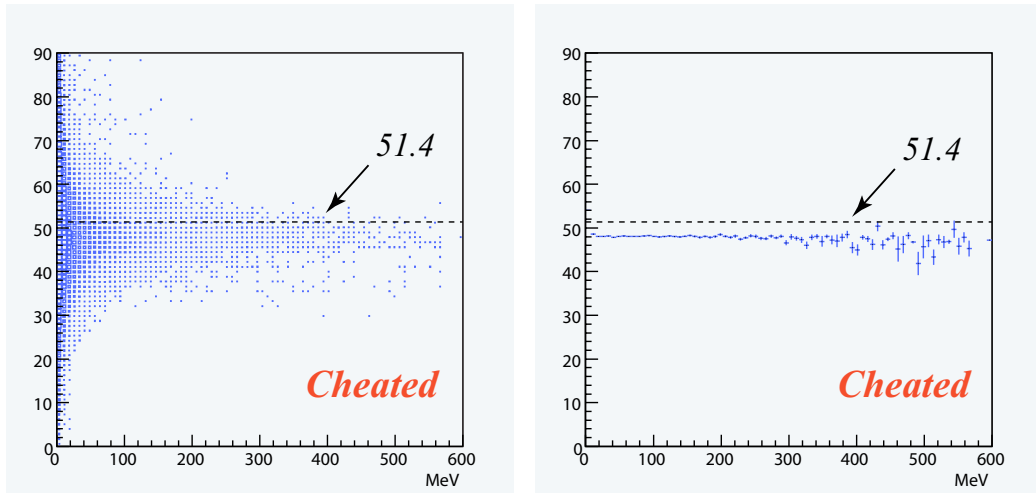


図 4.16: 光子に対するキャリブレーションファクターを入射粒子のエネルギーをカンニングすることにより求め、クラスタのエネルギーデポジットとの相関を取ったヒストグラム(左)と、その profile 図(右)。クラスタリング及びPIDに関してはカンニングPFAを適用した。(ECAL シグナルとHCAL シグナルの区別はしていない)

うのか、などを考慮に入れて決めなければならない。

#### 中性ハドロンのエネルギーキャリブレーション

中性ハドロンに対するキャリブレーションファクターに関しては光子のように単純な形とはならず、特にクラスタのエネルギーデポジットが 40MeV 程度以下(粒子のエネルギーが 2GeV 程度以下)ではそのエネルギー依存性は大きい。図からも分かるが、多くの中性ハドロンのエネルギーデポジットは 40MeV 以下となるため、この依存性は無視できるものではない。

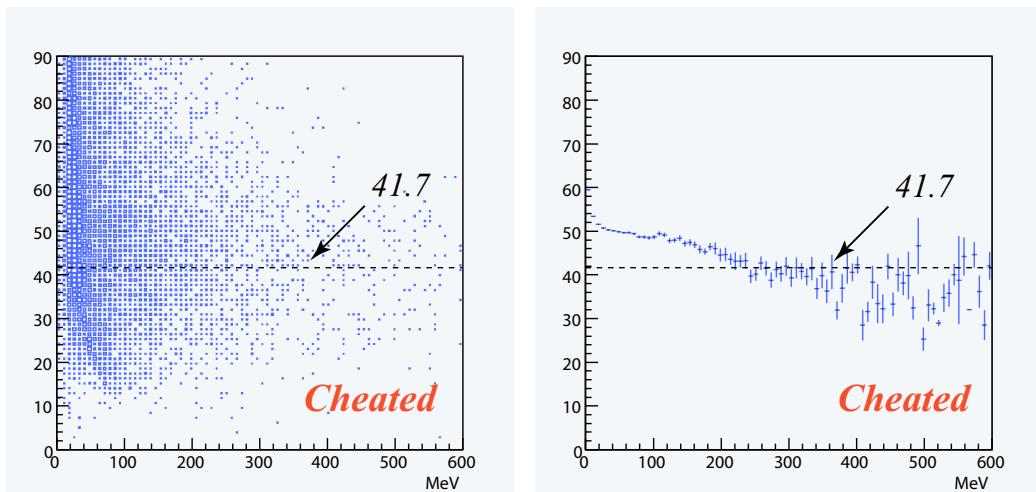


図 4.17: 中性ハドロンに対するキャリブレーションファクターとクラスタのエネルギーデポジットとの相関図。右図は左図の profile を取ったもの。

中性ハドロンのクラスタリングは難しく、またそのシャワー生成過程についても統

計的な揺らぎが大きいために、キャリブレーションファクターの研究は複雑かつPFA依存性が大きい<sup>32</sup>。故に現在の我々のPFAでは、中性ハドロンのエネルギーに対するキャリブレーションの研究を行うといった段階には至っていない。

#### 荷電ハドロンのエネルギー再構成

ここまでに何度か言及してきたとおり、荷電ハドロンのエネルギー再構成は飛跡検出器によるトラックの情報を用いて行う。基本的には $\pi^\pm$ の質量である $140 \text{ MeV}/c^2$ を仮定してエネルギーの導出を行うが、陽子の質量が $1 \text{ GeV}/c^2$ と大きいことなども考えると、可能ならば $\pi^\pm, K^\pm, p^\pm$ を区別した形でエネルギーの計算を行いたいという気がしてくる。これに関してはTPCによるそれらの粒子の識別可能性にかかってくるが、現在シミュレーション上でのそういった研究は成されておらず、荷電ハドロンの質量には全て $140 \text{ MeV}/c^2$ が仮定されている。しかし将来的にはこれを考慮することになるかもしれない。

---

<sup>32</sup>Satellite hits の処理をどうするかなどということに依存するため



## 4.8 結果と考察

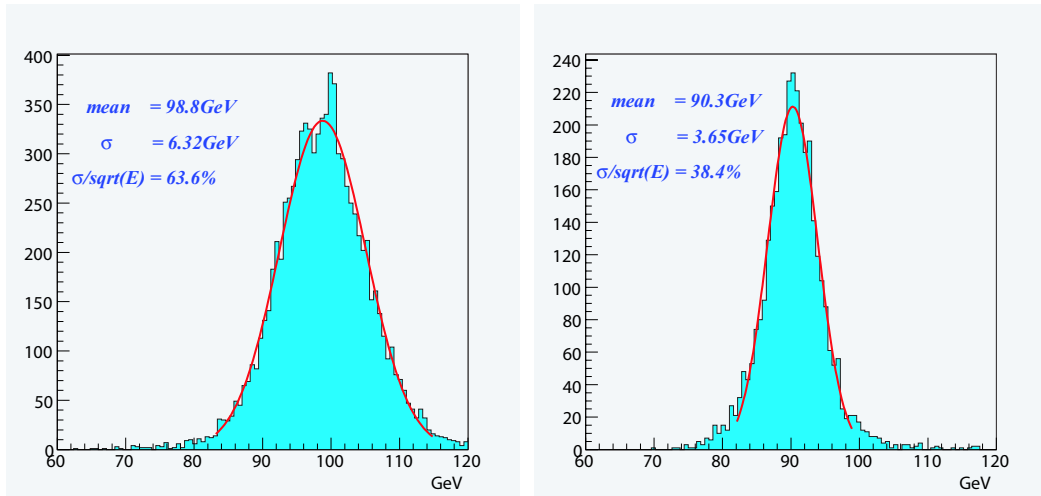


図 4.18:  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) に関するトータルエネルギーの分布の比較。カロリメータの情報のみを用いた場合 (左) と PFA を用いた場合 (右)。ニュートリノなどのミッシングエネルギーは両方にカンニングにより加えられている。

現在における PFA の性能を見るため、 $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) を例に取って、再構成されたジェットのエネルギーをカロリメータのみを用いた場合と比べてみる (図 4.18)。PFA によって導き出された 2 ジェットのトータルエネルギーは  $90.3 \pm 3.7\text{GeV}$  であり、その分解能は約  $38\%/\sqrt{E}$  である。これはもともとのカロリメータのみの情報を使った時の分解能である  $60 \sim 70\%/\sqrt{E}$  よりは改善されているものの、目標とされている  $30\%/\sqrt{E}$  には到達していない。また各パート (光子の再構成、荷電ハドロン再構成など) における再構成、クラスタリングに対する効率、純度共に十分といえる性能ではなく、各パートごとの研究もさらに進めていかなければならない (当然その結果が PFA 全体での性能の向上につながる)。

そこで現在の我々の PFA に対するまとめとして、以下にその性能及び問題点について述べることにする。

### 光子の再構成に関する結果と考察

現段階での光子のクラスタリングに対する効率及び純度は、Small clustering を用いた時には約 93% 及び 95% であり、Jet-Finding-like clustering を用いた時には約 98% 及び 94% である。

問題点としては

1. small clusteri ベースのクラスタリングではその効率が低く、Jet-Finding-like ベースのクラスタリングでは純度が下がり、また光子同士のマージが起こりやすい。特に重心エネルギーを上げるなどした時に問題が生じやすい。
2. 現在は PID のための幾つかのカットをそれぞれ独立に行っているため、Likelihood

Ratio やニューラルネットワークなどのパラメータ全体を見る手法を取る必要がある。

3. エネルギー依存性を持たせなければならないカットにエネルギー依存性を持たせていないなど、微調整の済んでいない部分がある。

などが挙げられる。

1 に関しては、small cluster ベースの場合に、円筒型クラスタリングの手法にエネルギー依存性を持たせることや、その他取りこぼしのヒットや分割されたクラスタの補正を行うなどの処理が必要と考えられる。またクラスタリングに関して、クラスタの混合を防ぐためには光子のクラスタリングの手法(カットパラメータ)をハドロンのもとの別にした方がよいのは事実だが、一方で光子クラスタを探す際にはハドロンに対しても正しくクラスタリングが行われていたほうが当然それらのクラスタを区別しやすい。このことに対してどう対処するかも、最適化を行わなければならないものの一つである。

またカロリメータのデザインがストリップの場合、タイルサイズが小さい場合、吸収層がタングステン<sup>33</sup>の場合などで考えられる手法(クラスタリングの方法及びシャワーの横方向の情報など)が大きく変わるため検出器(カロリメータ)のデザインを変えた場合での研究も必要である。

#### ハドロンの再構成に関する結果と考察

現在の荷電ハドロンに対するクラスタリングの効率は約 85%、純度は 91%程度であり、また再構成の効率は約 84%、純度は 92%程度である。ただし実質的に荷電ハドロンのシグナルとして扱われることになる Satellite hits を含めると、荷電ハドロンのトータルとしての再構成の効率は約 95%、純度は 89%程度となる。一方で中性ハドロンに対しては、クラスタリングの効率は約 63%、純度は 93%程度であり、再構成の効率は約 62%、純度は 62%程度である。

ハドロンの再構成に関する最大の問題はクラスタリングの問題である。荷電ハドロン、中性ハドロンの両方について、クラスタリングの効率及び純度が低い。また IL ポジションの使用法やバックスキヤタリングの考慮、さらには Satellite hits の扱いなど、研究すべき課題は多い。

#### 現在の PFA 全般に関する考察

現在の PFA の性能は目標を達成していないため、各パートに対しての性能の向上を目指すことはもちろんだが、その他のことで行われなければならないこともたくさんある。

1. 重心エネルギーが異なるイベントでのテストをし、PFA の性能に対する重心エネルギー依存性を無くすこと。

<sup>33</sup>タングステンの Molière 半径は約 1.5 cm。

2. 他のカロリメータデザインに対する PFA の開発及びテスト。また可能ならば他の研究グループ (LDC, SiD) における検出器デザインを用いたテスト。
3. Jet Reconstruction を行い、実際に  $ZH$  イベントなどで質量を組んでみること<sup>34</sup>。そういったことを基に、実際に予測される物理に対する測定可能性について言及できるような状態にすること。
4. ミューオン、電子の再構成用アルゴリズムの実装、及び粒子種、エネルギー依存性を持たせたエネルギーキャリブレーションの研究

これらはどれも非常に重要なものであるが、まずは Jet Reconstruction Algorithm を組み込んだ形に持っていき、その後の研究において実際に質量分解能を見られる形にすることは重要だろう。また重心エネルギー依存性の問題についても、PFA の全体としての性能を知る意味で重要な課題である。

---

<sup>34</sup>Jet Reconstruction Algorithm パッケージは既にできており、実際カンニング PFA の研究では既に使用されている。

## 第5章 Summary

本研究では ILC 実験のための再構成アルゴリズムである PFA の開発を目的とし、GLD 検出器用フルシミュレータである Jupiter を用いてその研究を行った。現段階での一つの結果として  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) に対するトータルエネルギーの分解能を見た所、その結果は約  $38\%/\sqrt{E}$  というものであった。

また各粒子種別の再構成の効率及び純度は表 5.1 にある通りである。ここで  $\varepsilon$  は各粒子種別に見たカロリメータ内での真の全シグナルに対して、それらが PFA によって再構成された粒子の中にどういった割合で含まれているかを表したものである。(例えば *photon* の行の  $\varepsilon_{\text{photon}}$  は光子の再構成に関する効率を表し、同じ行の  $\varepsilon_{\text{CHD}}$  は荷電ハドロンによる全シグナルの内  $\varepsilon_{\text{CHD}}\%$  のシグナルが光子クラスターとして間違っ  
て扱われているということを示す。) また  $p$  は再構成された各粒子種別に見た純度及び contamination の割合である。

表 5.1: 各粒子の再構成に対する結果。

| cluster type           | $\varepsilon_{\text{photon}}$ | $\varepsilon_{\text{CHD}}$ | $\varepsilon_{\text{NHD}}$ | $P_{\text{photon}}$ | $P_{\text{CHD}}$ | $P_{\text{NHD}}$ |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------|------------------|------------------|
| <i>photon</i>          | 85                            | 0.71                       | 8.5                        | 92                  | 2.3              | 5.1              |
| <i>CHD</i>             | 4.6                           | 84                         | 15                         | 1.7                 | 92               | 3.2              |
| <i>NHD</i>             | 6.3                           | 4.5                        | 62                         | 11                  | 24               | 62               |
| <i>Satellite</i>       | 3.9                           | 11                         | 14                         | 9.1                 | 71               | 19               |
| <i>CHD + Satellite</i> | 8.5                           | 95                         | 30                         | 2.7                 | 89               | 5.4              |

## 関連図書

- [1] K.Abe *et al.* [ACFA Linear Collider Working Group Collaboration], "Particle physics experiments at JLC", arXiv:[hep-ph/0109166](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0109166).
- [2] CDF and D0 Collaborations, Talk given at *14th Rencontres de Physique de la Valle d'Aoste: Results and Perspectives in Particle Physics*, La Thuile, Valle d'Aoste, Italy, 27 Feb-4 Mar 2000 ([hep-ex/0005030](https://arxiv.org/abs/hep-ex/0005030)).
- [3] <http://ilcphys.kek.jp/gld/>
- [4] <http://www.ilcldc.org/>
- [5] <http://www-sid.slac.stanford.edu/>
- [6] <http://acfahep.kek.jp/subg/ir/cain21e/in/500.parameter.htm>  
<http://acfahep.kek.jp/subg/ir/cain21e/in/1000.parameter.htm>
- [7] D. R. Nygren and J. N. Marix, "The Time Projection Chamber", *Phys. Today* **31**, 46 (1978).
- [8] <http://sl-div.web.cern.ch/sl>
- [9] <http://www-sld.slac.stanford.edu/sldwww/sld-working.html>
- [10] <http://agenda.kek.jp/askArchive.php?base=agenda&categ=a05292&id=a05292s3t8/transparencies>
- [11] <http://jlccvs.kek.jp/>
- [12] <http://www-jlc.kek.jp/hoshina/cdc/geant4/doc/JupiterManual.ps>
- [13] <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [14] <http://www-jlc.kek.jp/subg/offl/jsf/>
- [15] <http://root.cern.ch/>
- [16] <http://www.thep.lu.se/torbjorn/Pythia.html>
- [17] [http://acfahep.kek.jp/subg/sim/simtools/htmldoc/JSFMain\\_Index.html](http://acfahep.kek.jp/subg/sim/simtools/htmldoc/JSFMain_Index.html)
- [18] R. E. Kalman, *J. Basic Eng.* **82**(1961) 34.  
R. Frühwirth, *Nucl. Instr. and Meth.* **A262** (1987) 444.  
E. J. Wolin and L. L. Ho, *Nucl. Instr. and Meth.* **A219** (1993) 493.  
P.Astier *et al.*, *Nucl. Instr. and Meth.* **A450** (2000) 138.

[19] E. Longo and I. Sestili, Nucl. Instrum. Methods **128**, 283 (1975).

## acknowledgements

本研究は 2005 年度において、ACFA シミュレーショングループでの開発研究の一環として行ったものです。本研究において多くの方にご指導、ご協力を頂きました。この場をお借りして、心よりの感謝の意を表させていただきます。

まず第一に山本均先生には本研究の機会を与えて頂くと共に、理論や実験に関するご指導をして頂いたこと、幾つものカンファレンスへ参加させて頂いたことなど、多くの点においてお世話になりました。山口晃先生には RPC 実験でのご指導や、修士論文に関して多くのアドバイスを頂きました。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の宮本彰也氏、藤井恵介氏には、毎週のミーティングや KEK で作業を行う際など、特にソフトウェアに関することについての多くのご助力を頂きました。東京大学の山下了先生には、PFA に関する基礎知識やアドバイスだけでなく、東京大学で共同研究を行うに際してのサポートなど、多方面においてお世話になりました。また KEK の杉本康博氏、信州大学の竹下透先生にはミーティングなどの機会において多くのアドバイスを頂きました。長嶺忠先生には東北大学でのシステムの面などで大変お世話になりました。また長谷川琢哉先生には物理実験に関する技術についてのご指導を頂きました。東京大学の吉岡瑞樹さんには、共同研究を行う中でのアドバイスや東京での生活面などで多分にお世話になりました。筑波大学の松永浩之さんには Snowmass や ECFA において、特に生活面でお世話になりました。また acfa-sim-j のメンバーである元新潟大学の Allister Sanchez さん、新潟大学の小野裕明さん、KEK は総合研究大学院大学の山本澄江さん、筑波大学の山口敦君、山口佳博君には、GLD のシミュレーションにおける数多くの功績と助言により、大変お世話になりました。

ここに再度皆様に感謝の意を表させていただきます。本当にありがとうございました。



## 付録A ジェットの環境下における各粒子のエネルギー

PFA においてジェットによって生成される粒子がどんなものであるのかを知っておくことは極めて重要なこととなる。故にこの節では  $Z \rightarrow q\bar{q}$  イベント ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) を例に取って、クォークジェットにおけるジェットを構成する粒子について簡単にまとめることとする (表 A、図 A.1、A.2)。また参考のため各生成粒子の平均エネルギーを各生成粒子のエネルギーで重みをつけて計算した結果 (図 A.2 において各粒子のエネルギーで重みをつけた場合の平均値) を述べておくと、ミューオンが 9.85 GeV、電子が 9.25 GeV、光子が 4.40 GeV、 $\pi^\pm$  が 6.46 GeV、 $K^\pm$  が 9.53 GeV、 $p^\pm$  が 8.57 GeV、中性子が 8.35 GeV、 $K_L^0$  が 9.29 GeV、その他の粒子が 9.39 GeV である。なおこの節における結果は、全て PYTHIA によって計算されたものである。

表 A.1:  $Z \rightarrow q\bar{q}$  ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) のクォークジェットにおける生成粒子のエネルギー。

|                           | $\mu^\pm$ | $e^\pm$ | $\gamma$ | $\pi^\pm$ | $K^\pm$ | $p^\pm$ | $n$  | $K_L^0$ | <i>the others</i> |
|---------------------------|-----------|---------|----------|-----------|---------|---------|------|---------|-------------------|
| Mean total energy (GeV)   | 0.69      | 0.86    | 23.51    | 39.02     | 10.19   | 5.41    | 5.08 | 4.84    | 1.57              |
| Energy fraction (%)       | 0.76      | 0.94    | 25.78    | 42.79     | 11.17   | 5.93    | 5.57 | 5.31    | 1.72              |
| Mean partile energy (GeV) | 5.18      | 0.91    | 0.74     | 2.08      | 3.73    | 3.94    | 3.87 | 3.68    | 4.58              |

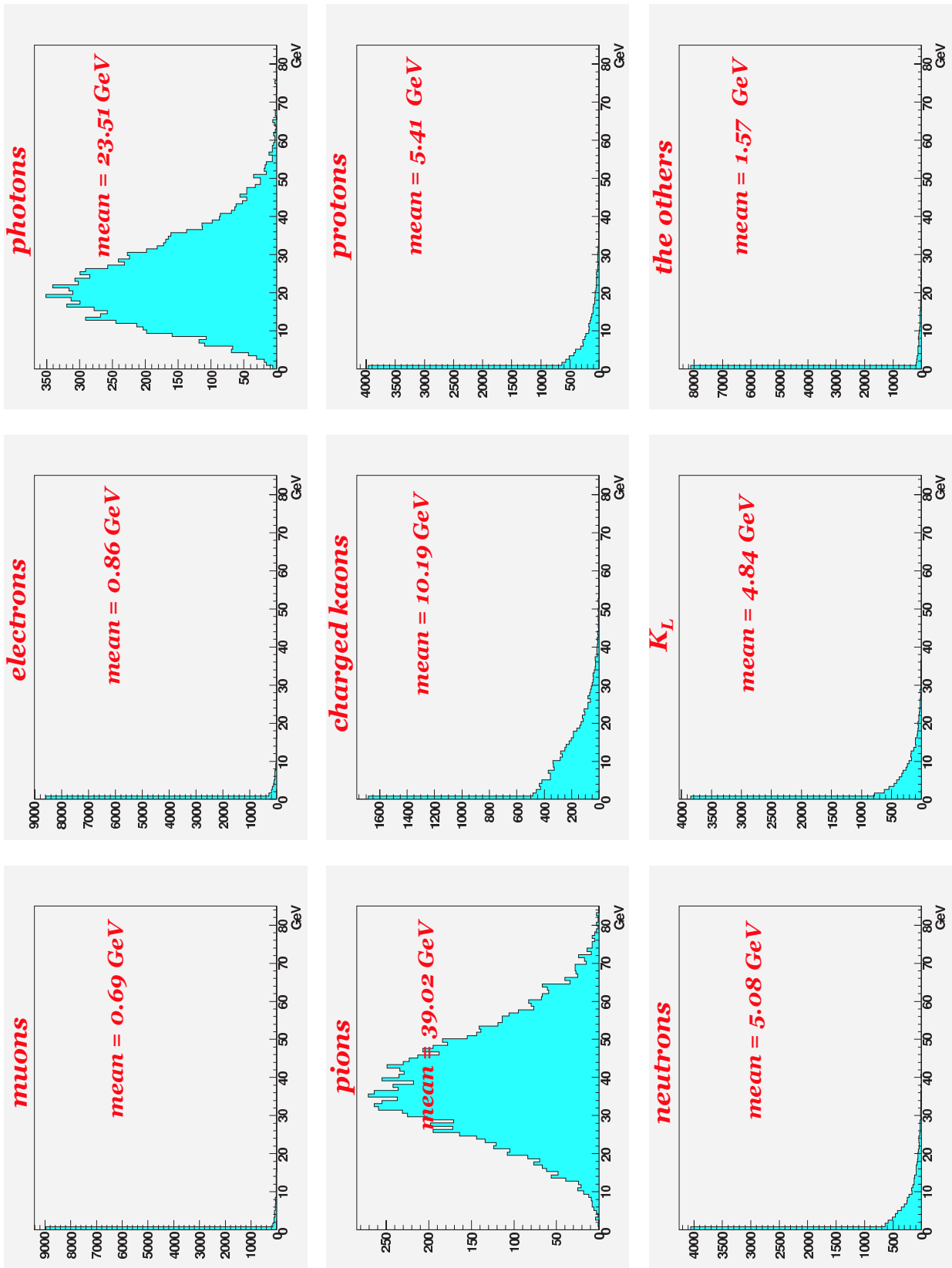


図 A.1:  $Z \rightarrow q\bar{q}$  ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) のクォークジェットにおける、それぞれの粒子種ごとのトータルエネルギーの分布。ジェットのトータルエネルギー (91.2 GeV) 中、 $\pi^\pm$  (荷電ハドロン) と光子がほとんどのエネルギーを占める。

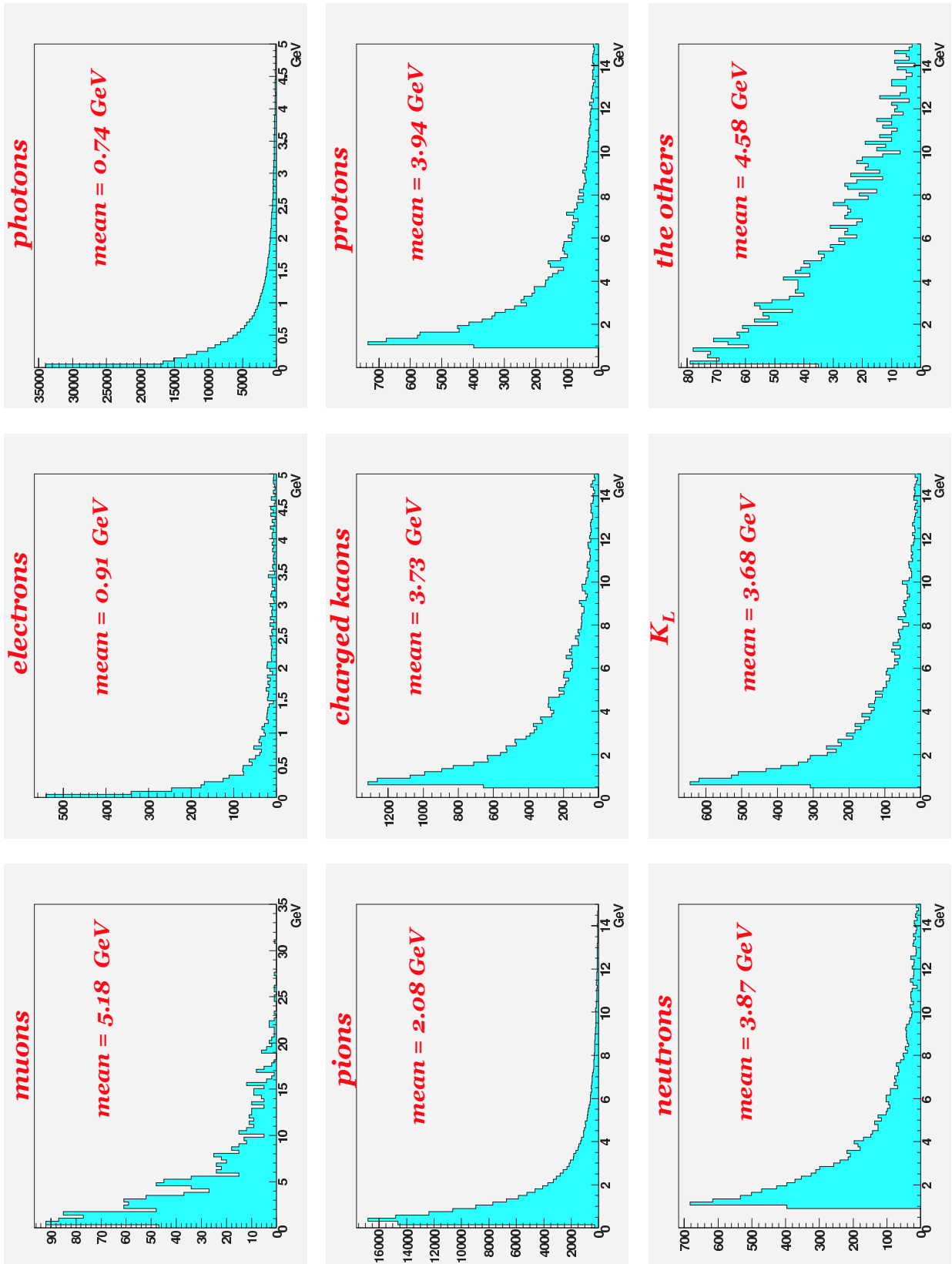


図 A.2:  $Z \rightarrow q\bar{q}$  ( $\sqrt{s} = 91.2\text{GeV}$ ) のクォークジェットにおける各粒子の持つエネルギーの分布。ほとんどの粒子は数 GeV 以下のエネルギーを持つ。

## 付録B 粒子の再構成の評価に関する効率、純度の定義

本論分において、カロリメータ内でのクラスタリングや粒子の再構成の評価に関して、効率や純度といったものを使用してきた。この節においてそれらに関する我々の定義を明確化しておくこととする。

まず全般に言えることとなるが、アルゴリズムの評価をする際に我々は Monte-Carlo truth の情報をカンニングしている。具体的に使用しているものは Satellites の中で TPCPostHit と呼ばれるものの情報で<sup>1</sup>、その名の通り粒子が TPC の外側を通った際の（エネルギーデポジットの有無とは関係のない）粒子のヒットであり、エネルギーや粒子種などの情報を保持している。例えばカンニング PFA と呼んでいるものはこの TPCPostHit の ID を基に、ID が同じものを集めることによりクラスタリングを行い、そして荷電ハドロンのクラスタに関してはカロリメータでの情報を捨てるなどの処理を行っている。

またこの TPCPostHit の ID を用いてカンニングを行う場合、ヒットは Monte-Carlo 上の ExactHit、つまりカロリメータのセル内でマージする前のヒットを使用している。そのためカロリメータの中でシャワーが重なった場合でも純度などの評価を正しく行うことができる。

それを踏まえ、以下に我々のクラスタリングの効率などの定義を説明していく。

### クラスタリングの効率

まずクラスタリングの効率、つまりある入射粒子に対して、その粒子がカロリメータ内に作ったヒットの内、どれだけのものを正しく 1 つのクラスタの中にまとめることができたかの評価法について説明していく。

一般にクラスタは様々な TPCPostHitID を持ったヒットの集まりで構成されており、クラスタリングの効率の評価のためにはシングルトラックイベントでテストを行うか、もしくは何かしらの形で各クラスタがどの粒子に対応するのかを定義する必要がある。前者については、単純にクラスタリングによりどれだけのヒットを集められたかをエネルギーデポジットを用いた形で評価してやればよいということであるが、一方でジェットイベントなどの場合、後者の方法をとる必要がある。

我々がジェット環境下でのクラスタリングの効率の評価を行う場合、まずそのクラスタに含まれるヒットを TPCPostHitID で分別していき、その中で最もエネルギーデポジットの寄与の大きいものを探す。そしてその TPCPostHitID ( $\equiv i$ ) を持つ ExactHit

<sup>1</sup>TPCPostHit を持たない粒子も稀にあり、そのような粒子に関しては CALPreHit（カロリメータの内側での情報を持つ）を使用している。

によるエネルギーデポジットを対象としているクラスターの中で足しあげる ( $\equiv E_{\text{part}}^{\text{max}}$ )。一方で再構成されたクラスターとは関係なくカロリメータ内で TPCPostHitID が  $i$  である ExactHit を集め、そのエネルギーデポジットの総和を取る ( $\equiv E_{\text{total}}$ )。そしてこの時、このクラスターに対するクラスタリングの効率を  $E_{\text{part}}^{\text{max}}/E_{\text{total}}$  としている。

また全体としてのクラスタリングの効率の平均を評価する際には、このようにして得られた効率に各クラスターの  $E_{\text{part}}^{\text{max}}$  で重みをつけて評価を行っており、さらに再構成後のクラスターに対して  $\equiv E_{\text{part}}^{\text{max}}$  の起源となった粒子種が再構成によって予測された粒子種と一致している時、(クラスタリングの効率などは度外視して) そのクラスターは正しく再構成された (正しくタグされた) と考えることとしている。

### クラスタリングの純度

我々のクラスタリングに関する純度の定義は、先程の  $E_{\text{part}}^{\text{max}}$  を用いて  $E_{\text{part}}^{\text{max}}/E_{\text{cls}}$  としている。ここで  $E_{\text{cls}}$  はクラスターを持つトータルのエネルギーデポジットである。ただし全体としての平均を見る際には、 $E_{\text{cls}}$  で重みをつけて評価をする。

### 粒子の再構成に対する効率

粒子の再構成に対する効率では、まずイベント毎に各粒子種 (光子、荷電ハドロン、中性ハドロン等) のカロリメータ内でのトータルのエネルギーデポジットを計算する ( $\equiv E_{\text{true}}^i$ , where  $i = \gamma, \text{CHD}, \text{NHD}, \mu^\pm, e^\pm$ )。ここで CHD は  $(\pi^\pm, K^\pm, p^\pm)$ 、NHD は  $(n, K_L^0)$  のみそう呼ぶこととしている。一方で実際に再構成した光子、荷電ハドロン、中性ハドロン (及び ミューオン、電子) と思われるクラスターに対して、それぞれ正しく再構成されているヒットのみを取り出し、それに対するエネルギーデポジットの和 ( $\equiv E_{\text{recon}}^i$ ) を計算する。そして各イベントにおける各粒子に対する再構成の効率を  $E_{\text{recon}}^i/E_{\text{true}}^i$  によって定義する。また複数のイベントで平均を見るときは、各イベントでの各粒子種によるエネルギーの全体への寄与を考慮するため、 $E_{\text{true}}^i$  で重みを取る。

### 粒子の再構成に対する純度

粒子の再構成に対する純度の定義は、先程の  $E_{\text{recon}}^i$  を用いて  $E_{\text{recon}}^i/E_{\text{totcls}}^i$  としている。ここで  $E_{\text{totcls}}^i$  は、粒子種  $i$  として再構成されたクラスター群のエネルギーデポジットの総和を、各イベント毎に見たものである。また複数のイベントで平均を見るときは  $E_{\text{totcls}}^i$  で重みを取っている。

## 付録C カロリメータ内でのシャワー

PFA においてカロリメータ内でのシャワーの性質を知っておくことは非常に重要である。そのためこの節において簡単にその特徴をまとめておくこととする。

### Electromagnetic Shower

高エネルギーの光子及び電子が物質中を通過すると、pair production 及び bremsstrahlung が次々と起こることによってシャワーが生ずる。このシャワーを Electromagnetic Shower という。

このシャワーによるエネルギーデポジット（または電子数）をシャワーの縦方向に沿って見ていくと、平均的には

$$\frac{dE}{dt} = E_0 b \frac{(bt)^{a-1} e^{-bt}}{\Gamma(a)} \quad (\text{C.0.1})$$

という式に良く合い（図 C.1）、この式は *Gamma distribution function* と呼ばれている [19]。ここで  $t = x/X_0$  は radiation length を単位とした入射点からの深さであり、 $E_0$  は入射粒子のエネルギーである。

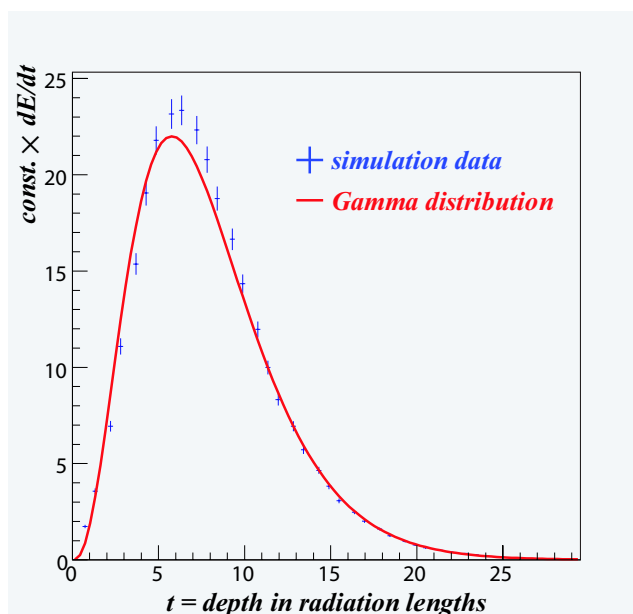


図 C.1: 5GeV の光子のシャワーの縦方向に対する平均のエネルギーデポジットと *Gamma distribution*。

また  $dE/dt$  が最大となる点である  $t_{\max} = (a - 1)/b$  に関して、入射エネルギーが 1GeV から 100GeV 程度で、また通過する物質の  $Z$  が炭素からウランの範囲内にあるようなものならば、

$$t_{\max} = (a - 1)/b = 1.0 \times (\ln y + C_j), \quad j = \gamma, e \quad (\text{C.0.2})$$

という式によく合うことが知られている。ここで  $y$  は  $y = E_0/E_c$  ( $E_c \sim 800 \text{ MeV}/(Z+1.2)$ , critical energy,  $|dE/dx|_{\text{brems}} = |dE/dx|_{\text{ionization}}$  となるような  $E$ ) であり、 $C_\gamma = +0.5$ ,  $C_e = -0.5$  程度である。

また  $b$  に関して、これは一般には粒子の入射エネルギーや通過する物質に依存するものだが、おおよそ 0.5 程度となることが知られている。

次にシャワーの横方向に関する性質についてだが、これにはよく Molière 半径というものが用いられる。Molière 半径は各  $w_j$  の重量比を持つ物質  $j$  ( $j = 1 \sim n$ ) の混合物中において、各物質の radiation length, critical energy (in Rossi definition,  $|dE/dx|_{\text{brems}} \sim E/X_0$  となるような  $E$ ) を用いて、

$$\frac{1}{R_M} = \frac{1}{E_s} \sum_{j=1}^n \frac{w_j E_{c_j}}{X_j} \quad (\text{C.0.3})$$

( $E_s = \sqrt{4\pi/\alpha} m_e c^2 \sim 21 \text{ MeV}$ , scale energy) で与えられるもので、平均的に見るとこの半径の円筒領域の中にシャワーのエネルギーの内約 90% が収まり、また  $3.5R_M$  の中に約 99% のエネルギーが収まる。

## Hadronic Shower

高エネルギーのハドロンは核子と反応し、それが連続的に起こることによりシャワーを形成する。これを Hadronic shower という。これについては未だ正確な理解は成されていないが、ここでは一般に知られていることを以下に挙げることにする。なお補足だが、ハドロンの interaction length は高エネルギー（数 100MeV 以上の領域）ではエネルギーによらずほぼ一定である。

- Hadronic shower における粒子の生成では、 $\langle P_t \rangle \sim 0.35 \text{ GeV}/c$  の粒子（ほとんどが  $\pi$  と核子）を生成し、1 回の反応で元の粒子のエネルギーの半分程がその生成に利用される。またその生成粒子の数はあまりエネルギーに依存しないが、確率的な変動は大きい。
- 2 次粒子における  $\pi^0$  の割合は、粒子のエネルギーが数 GeV から数 100GeV の領域でおおよそ  $0.1 \times \ln(E)$  (GeV) となる。
- バックスキャタリング、 $\mu$ 、 $\nu$ 、遅い中性子の生成、核に対する励起や核破砕などが無視できない確率で起こり、それによって検出できない分のエネルギーが生じることになる。



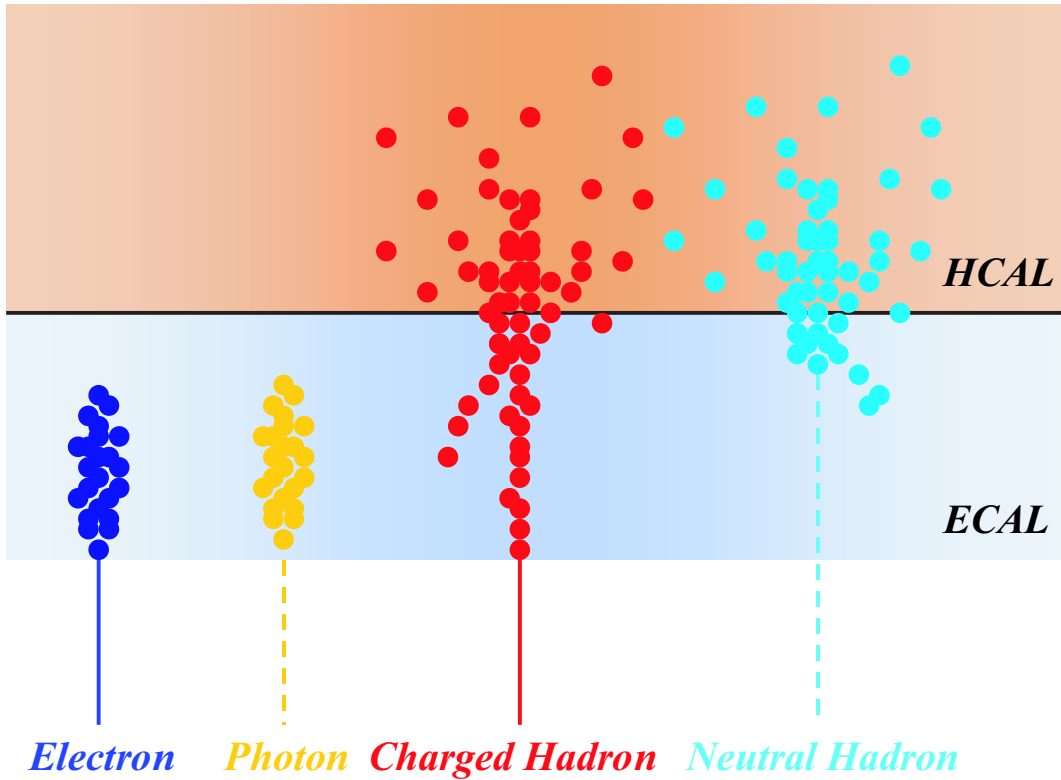


図 C.2: カロリメータ内でのシャワーの典型図。

またシャワーの縦方向の性質に関して、シャワーが最大になるのは深さが

$$l_{max} \sim [0.6 \ln(E) - 0.2]\lambda \quad (\text{C.0.4})$$

(E は GeV 単位、 $\lambda$  は interaction length) 程度の所であり、またシャワーの内 95%は

$$l_{95\%} \sim l_{max} + 4E^{0.15}\lambda \quad (\text{C.0.5})$$

以内の部分に入る。

一方横方向に関して、シャワーの内 95%は

$$R_{95\%} \sim \lambda \quad (\text{C.0.6})$$

の領域に含まれる。

以上が大まかな Hadronic shower の性質である。しかし Hadronic shower に関しては、その過程に確率的な変動が大きく、またその理解も完全には成されていないため、その解析には Electromagnetic shower にはない難しさが伴うこととなる。さらにもっと言えばフルシミュレータによる解析の結果自体、完全に信頼のおけるものとは言えず、そのシミュレーションには注意が必要となる。