

修士学位論文
ILC実験におけるストリップ型カロリメータの
クラスタリングアルゴリズムの開発

神戸大学大学院 自然科学研究科
博士課程前期課程
物理学専攻
高エネルギー物理学研究室

044S116N
永曾 有亮

指導教官
川越清以

平成18年2月10日

概要

現在計画中の電子陽電子線形加速器実験においては、標準理論で予言されているにもかかわらずまだ見つかっていない最後の粒子であるヒッグス粒子の質量の精密測定が要求される。また、標準理論を超える物理の探索などさまざまな要求から極めて高性能な測定器が要求されている。

本研究では、多数ある測定器のなかでカロリメータと呼ばれる測定器に焦点をあてる。カロリメータとは、粒子のエネルギーを測定するものである。ILC 実験では、ジェット(発生粒子の束)のエネルギー分解能を $30\%/\sqrt{E}$ で測定する必要がある。ジェットのエネルギー分解能をよくする手法に PFA(Particle Flow Algorithm) というものがある。その手法では、荷電粒子はトラッカーで、中性粒子はカロリメータでエネルギーを測定する。これを実現するには、カロリメータ内にできたヒットとトラッカーとを 1 対 1 に対応付け、カロリメータのエネルギーのうち、荷電粒子起源のものを取り除く必要がある。そこで、カロリメータの構造を細分化する必要がある。

現在考えられているカロリメータとして、タングステンとシンチレータのサンプリング型カロリメータがある。検出体であるシンチレータは構造を選択することが可能である。シンチレータ部分はタイル型と 1cm 幅のストリップ型とが考えられており、本研究では、両者を比較し、より最適なストリップサイズを探索することを目標としている。

目次

第1章 序論	6
1.1 次世代線形加速器計画	6
1.2 次世代線形加速器の物理	8
1.3 測定器	10
第2章 カロリメータ	12
2.1 カロリメータの原理	12
2.2 カロリメータの構造	12
2.3 エネルギー分解能	12
2.4 カロリメータに要求される性能	13
2.4.1 カロリメータ前物質質量	13
2.4.2 1粒子エネルギー分解能	14
2.4.3 補償型カロリメータ	14
2.4.4 ジェットエネルギー分解能	15
第3章 PFA(Particle Flow Algorithm)	16
3.1 PFA	16
3.2 理想的なジェットのエネルギー分解能	16
3.3 現実上の問題点	17
3.3.1 $\sigma_{threshold}$ について	17
3.3.2 $\sigma_{efficiency}$ について	17
3.3.3 $\sigma_{confusion}$ について	17
3.4 GLD グループにおける PFA	18
3.5 グラニューラリティ	18
第4章 測定器シミュレーション	19
4.1 粒子と物質の相互作用のシミュレーション	19
4.2 Geant4	22
4.2.1 Geant4 とは何か	22
4.2.2 開発の歴史	22
4.2.3 Geant4 のしてくれること	22
4.2.4 Geant4 のしてくれないこと	23
4.2.5 Geant4 は C++ 言語で実装されている。	24
4.2.6 Geant4 ライブラリの使い方概説	24
4.2.7 測定器の構造 (Geometry) の作成	25
4.2.8 Primary Event Generator の作成	27
4.2.9 使用したい Physics Processes の指定	28

4.2.10	測定器応答のシミュレーション	30
4.2.11	Sensitive Detector	30
4.2.12	Hit	30
4.2.13	Digitizer とは	31
4.2.14	Geant4 の仕組み	31
4.2.15	Geant4 はどのように粒子をトランスポートするか	31
4.2.16	Geant4 シミュレーションの全体進行と階層構造	33
4.2.17	Run と RunManager	33
4.2.18	Event と EventManager	34
4.2.19	Track と TrackingManager	35
4.2.20	Step と SteppingManager	35
4.2.21	Trajectory について	36
4.2.22	User Interface と Graphics	36
4.3	シミュレーションのセットアップ	37
4.3.1	EMCAL	37
第 5 章	クラスタリング	40
5.1	イントロダクション	40
5.1.1	ヒットストリップの定義	40
5.1.2	隣接したヒットストリップの結合	41
5.1.3	クラスターの分離	43
5.1.4	x,y ストリップの対応付け	50
5.2	π^0 の考察	55
5.2.1	分離アルゴリズムを適用しない場合	55
5.2.2	分離アルゴリズムの方法 1 を適用した場合	62
5.2.3	分離アルゴリズムの方法 2 を適用した場合	68
第 6 章	結論と今後の展望	73
6.1	結論	73
6.2	今後の展望	73
6.2.1	ヒットストリップにおけるスレッショルドの設定	73
6.2.2	小さなクラスターの処理	73
6.2.3	ジェットに適用する	73
6.2.4	フルシミュレータに組み込む	73

目次

1.1	次世代電子陽電子線形加速器概念図	7
1.2	ファインマン図	8
1.3	ヒッグス粒子の崩壊分岐比	9
1.4	粒子の反応断面積とエネルギーの関係	10
1.5	次世代線形加速器用測定器	11
2.1	カロリメータの分解能とサンプリング数の関係	14
2.2		15
4.1	水中の 8MeV の positron の対消滅	21
4.2	作られた二次粒子のエネルギーが指定された range を走るだけの energy を持っていないとその粒子はトランスポートされない	29
4.3	粒子が現在いる場所の物質を考慮して、NILL を実際の距離 (Physical Interaction Length = PIL) に変換する	32
4.4	カロリメータ	38
4.5	x、y ストリップの配置	38
4.6	ストリップの断面図	38
5.1	横軸： μ の落としたエネルギー 縦軸：エントリー数上図：0~10GeV 下図：0~1GeV μ を 10GeV で入射させている	41
5.2	横軸：スレッシュホールド 縦軸：一番大きなクラスターがカロリメータに落ちた全エネルギーに占める割合	42
5.3	仮想的なイベント	43
5.4	(a) の概念図	43
5.5	(b) の概念図	44
5.6	(c) の概念図	44
5.7	(d) の概念図	44
5.8	結果	45
5.9	モリエル半径の検証	46
5.10	仮想的なイベント	47
5.11	仮想的なイベントを x、y 方向からみた様子	47
5.12	方法 1：1. 串の作成	47
5.13	方法 1：2. 串と層における交点の算出	48
5.14	方法 1：3. 串とヒットストリップとの距離を計算する	48
5.15	方法 1：4. 分離後のクラスター	48
5.16	ストリップサイズの大きい場合の仮想的なイベント	49
5.17	手順 1	49

5.18 手順 2	49
5.19 手順 3	49
5.20 ストリップサイズが大きく、クラスターの分離に方法 1 を適用した結果	50
5.21 方法 2 : 手順 3, 交点をストリップに射影	50
5.22 分配後の様子	51
5.23 方法 2 適用後	51
5.24 meanE と sigmaE の関係	52
5.25 x クラスターのエネルギーと x、y のクラスターの重心間の距離の相関	53
5.26 カロリメータに入射するときの $\gamma\gamma$ の距離	55
5.27 分離せずに再構成した π^0 の質量、1cm×1cm のタイル型カロリメータ	56
5.28 分離せずに再構成した π^0 の質量、1cm×5cm のストリップ型カロリメータ	57
5.29 分離せずに再構成した π^0 の質量、1cm×10cm のストリップ型カロリメータ	58
5.30 分離せずに再構成した π^0 の質量、1cm×20cm のストリップ型カロリメータ	59
5.31 上図：横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の平均値 下図：横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の分解能	61
5.32 方法 1 で再構成した π^0 の質量、1cm×1cm のタイル型カロリメータ	62
5.33 方法 1 で再構成した π^0 の質量、1cm×5cm のストリップ型カロリメータ	63
5.34 方法 1 で再構成した π^0 の質量、1cm×10cm のストリップ型カロリメータ	64
5.35 方法 1 で再構成した π^0 の質量、1cm×20cm のストリップ型カロリメータ	65
5.36 上図：横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の平均値 下図：横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の分解能	67
5.37 方法 2 で再構成した π^0 の質量、1cm×1cm のタイル型カロリメータ	68
5.38 方法 2 で再構成した π^0 の質量、1cm×5cm のストリップ型カロリメータ	69
5.39 方法 2 で再構成した π^0 の質量、1cm×10cm のストリップ型カロリメータ	70
5.40 方法 2 で再構成した π^0 の質量、1cm×20cm のストリップ型カロリメータ	71
5.41 上図：横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の平均値 下図：横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の分解能	72

第1章 序論

1.1 次世代線形加速器計画

高エネルギー物理学において標準模型のより高い精度での検証とそれを超える新粒子、新現象の発見・研究を行うために、よりエネルギーの高い加速器の建設が望まれている。現在稼動している最も高い重心系エネルギーをもつ加速器はアメリカのフェルミ国立研究所 (FNAL) の陽子反陽子衝突型加速器 TEVATRON で重心系エネルギーは、2TeV である。また、現在進行中の TeV 領域の素粒子実験計画はスイスの欧州原子核共同研究機構 (CERN) 大型陽子陽子衝突型加速器 LHC (2007 年実験開始予定) で、重心系エネルギーは 14TeV である。しかし、これらの加速器は構造をもったハドロン同士を衝突させるため粒子内で反応に寄与するパートンの持つエネルギーはその数分の 1 であり、また、その正味の衝突エネルギーを知ることは困難である。更に、反応にかかわらない残りのパートンが多くジェットを発生するためきれいに反応をとらえることが難しい。これら円形の加速器を用いる実験では、シンクロトロン放射によるエネルギー損失の少ない重い粒子を、高エネルギーに加速できるため、新粒子の発見など、エネルギーフロンティアを狙うのに適している。

一方、ハドロン加速器に対して、レプトン (ほとんどは電子、陽電子) 衝突型加速器においては、そのシンクロトロン放射によるエネルギー損失のため、達成できる重心系エネルギーはハドロン衝突型加速器には及ばないが、衝突する粒子が構造を持たない素粒子であるために、ほとんどのエネルギーが反応に使われ、ハドロン衝突時のような余分なジェットなどは発生せず、非常にきれいに反応を捕らえることが可能である。現在稼動中のレプトン衝突型加速器は、より高いルミノシティ、すなわち加速粒子数を多くすることで衝突粒子数を増やし、統計データ量を上げることに重点をおいて設計されており、測定精度の良い実験を行うことができる。例えば、B ファクトリーと呼ばれる日本の高エネルギー加速器研究機構の KEKB、アメリカの SLAC の PEP2 がある。それぞれの重心系エネルギーは 10GeV 程度と、低いエネルギーであるが、近年、B 中間子、反 B 中間子生成のルミノシティにおいては最高記録を次々と更新している。一方、レプトン衝突型加速器で達成できた最も高い重心系エネルギーは、CERN の LEP (Large Electron Positron Collider) と呼ばれる電子陽電子衝突型加速器による、210GeV であり、これは円形加速器での数値である。上述のように、電子陽電子の円形加速器ではシンクロトロン放射によるエネルギー損失が存在するため、円形加速器を用いて、LEP 以上の重心系エネルギーを達成するのは不可能に近く、今後の電子陽電子加速器は、粒子を直線的に加速する、線形加速器が主流になる。

図 1.1 は現在計画されている電子陽電子線形加速器の概念図である。現在の実験計画によれば、当初重心系エネルギー 300~500GeV での実験を行い、その後引き続き TeV 領域へのエネルギー増強をはかる計画である。

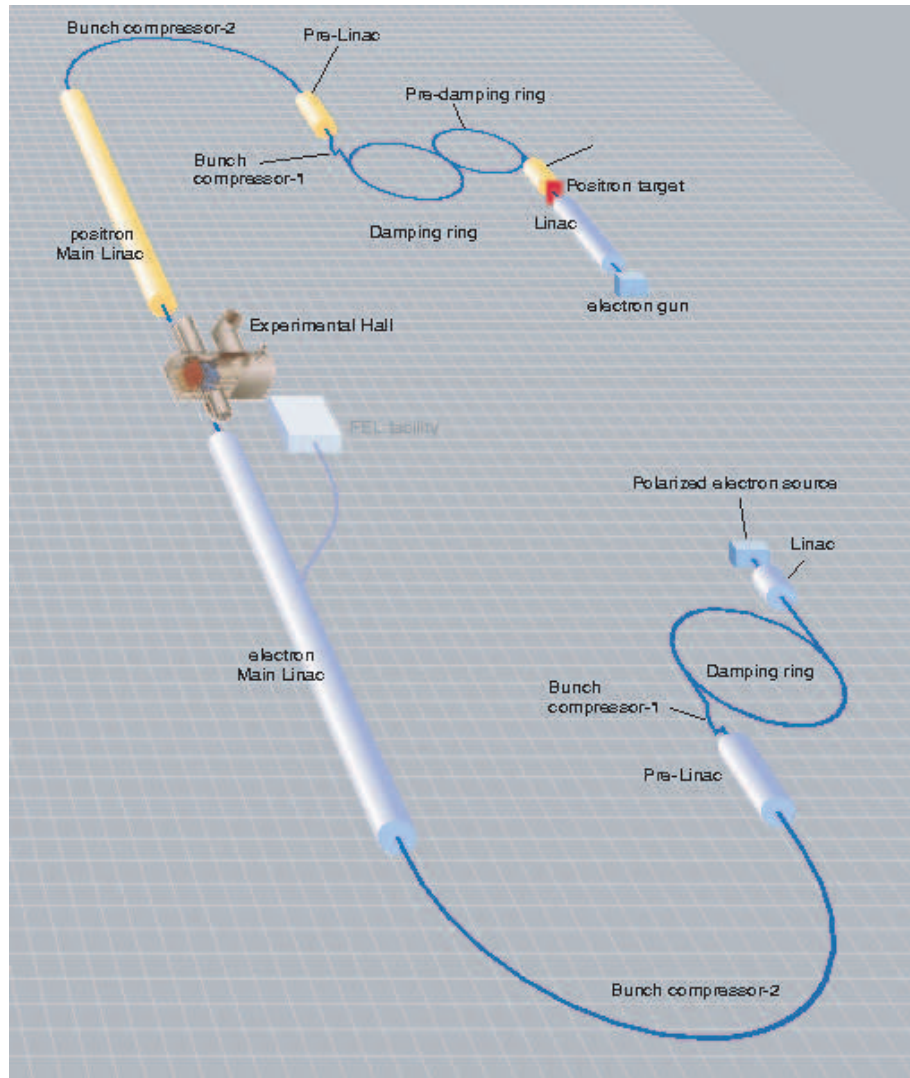


図 1.1: 現在計画中の次世代電子陽電子線形加速器の概念図。全長は 30km に及ぶ

1.2 次世代線形加速器の物理

次世代線形加速器計画ではエネルギーフロンティアと呼ばれる TeV エネルギーの領域に到達することによって、今までにない新しい物理現象を探索することを目的としている。電磁相互作用、弱い相互作用、強い相互作用を統一的に記述する素粒子の標準模型において、最後の未発見粒子である、ヒッグス粒子の発見、そしてそのヒッグス粒子やトップクォークの性質の詳細な研究がこの計画に求められている。現在のヒッグス粒子の質量の上限、下限は LEP 実験により、2003 年春時点で

$$116\text{GeV} < m_H < 211\text{GeV} (95\%C.L.) \quad (1.1)$$

である。

次世代線形加速器計画である、電子陽電子衝突型加速器でヒッグス粒子を生成する反応としては、

1. $e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0$
2. $e^+e^- \rightarrow \nu\bar{\nu} H^0$
3. $e^+e^- \rightarrow e^+e^- H^0$

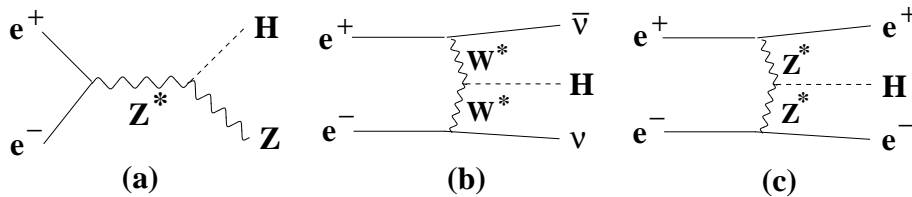


図 1.2: ヒッグス粒子生成過程のファインマン図

などがある。図 1.2 にそれらのファインマン図を示す。(b) と (c) の反応はフュージョン過程と呼ばれ、1TeV を超えるようなエネルギーで断面積が大きくなるので重いヒッグス粒子をさがすのに適している。これに対して (a) の反応は低いエネルギーで断面積が大きくなるので軽いヒッグス粒子の探索に適しており、LEP でもこの反応が用いられた。一方、ヒッグス粒子のフェルミオン、ウィークボソンとの結合はその質量に比例し、その崩壊の部分巾は

$$\Gamma(H^0 \rightarrow f\bar{f}) \propto \left(\frac{gm_f}{2m_W}\right)^2$$

$$\Gamma(H^0 \rightarrow V\bar{V}) \propto (gm_V)^2$$

となる。よってヒッグス粒子は運動力学的に許される範囲内で最も重い粒子への崩壊巾が大きい。しかし、ウィークボソン対への崩壊巾は b クォーク対への崩壊巾より大きいので 140GeV 以上では、仮想的な W 粒子を含めて、 $H^0 \rightarrow W^+W^-$ への崩壊巾が最も大きくなる。図 1.3 にヒッグス粒子の崩壊分岐比をヒッグス粒子の質量の関数として示す。

次に、次世代電子陽電子線形加速器計画でのヒッグス粒子の探索の方法について述べる。まずヒッグス粒子の質量が $2m_W$ より小さいときであるが、このときの生成過程は上で述べたように $e^+e^- \rightarrow Z^0 H^0$ であり、ヒッグス粒子は b クォークと反 b クォークに崩壊するので、その終状態は Z^0 粒子の崩壊モードによって

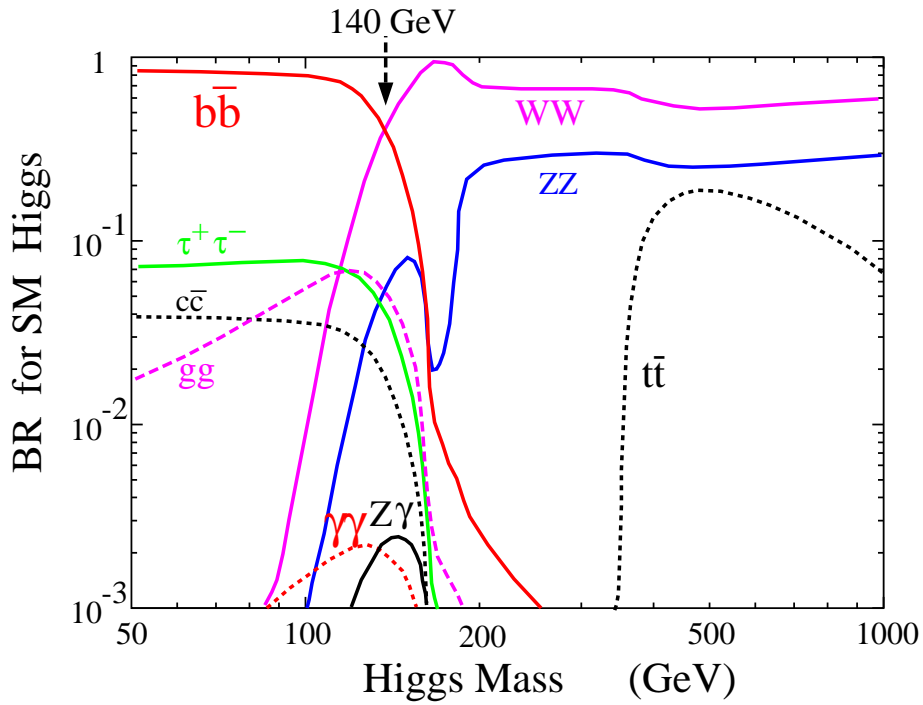


図 1.3: ヒッグス粒子の質量の関数として表したヒッグス粒子の崩壊分岐比

1. $\nu\bar{\nu}b\bar{b}$
2. $l^+l^-b\bar{b}$
3. $q\bar{q}b\bar{b}$

のように3つに分けられる。これらの場合に1の場合は四元運動量欠損、2では二つのレプトン、3の場合は二つのジェットの不变質量の分布にピークとなってヒッグス粒子はあらわれる。

このときの主なバックグラウンドは、

1. $e^+e^- \rightarrow Z^0Z^0$
2. $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$
3. $e^+e^- \rightarrow e\nu W$

であるが、このうち1、2は微分断面積が前方にピークを持ち、2と3はヒッグス粒子の崩壊過程の特徴であるbクォークを含んでいない。よって、中心部に発生した事象を選び、その事象に二つのbクォークをジェットを要求することにより、効率よくヒッグス粒子の事象を選ぶことができる。ヒッグス粒子の質量が $2m_W$ よりも重い場合、ヒッグス粒子は二つのW粒子に崩壊するのでその終状態の六つ、四つあるいは二つのジェットや残りのトラックから Z^0 粒子に一致する組み合わせをみつけて先ほどと同じようにしてヒッグス粒子を見つけることができる。

このようにしてヒッグス粒子が見つかったときにはその性質を詳しく調べることが次の課題となる。なかでも、見つかったヒッグス粒子が標準模型のそれか、最小超対称性粒子のそれかを調べる

ことは重要である。これはヒッグス粒子の全崩壊巾や、 $H^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 崩壊の崩壊分岐比を精密に測定することによって知ることができる可能性がある。

重心系エネルギーの関数として電子陽電子衝突におけるさまざまな生成過程を図1.4に示す。

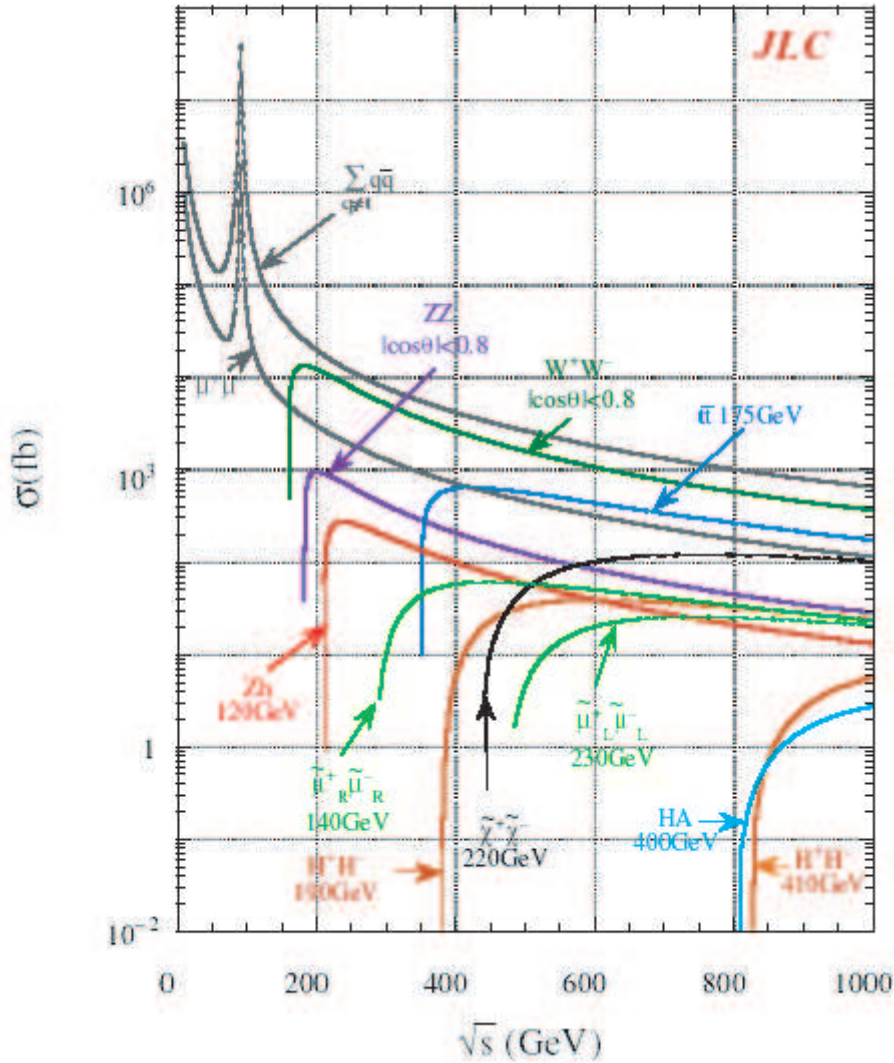


図 1.4: 粒子の反応断面積とエネルギーの関係

1.3 測定器

次世代線形加速器計画で設置が検討されている測定器は予想される様々な物理現象を正確に測定できるよう、高性能であることが要求される。特にZ粒子やW粒子のジェットを用いた質量再構成やbジェットの識別は重要である。また、予想外の物理現象が起きたときにも十分対応ができるように高い汎用性をもつことが要求される。次世代線形加速器での測定器はビーム衝突点に近いほうから以下のような検出器で構成されている。測定器の概念図を図1.5に示す。

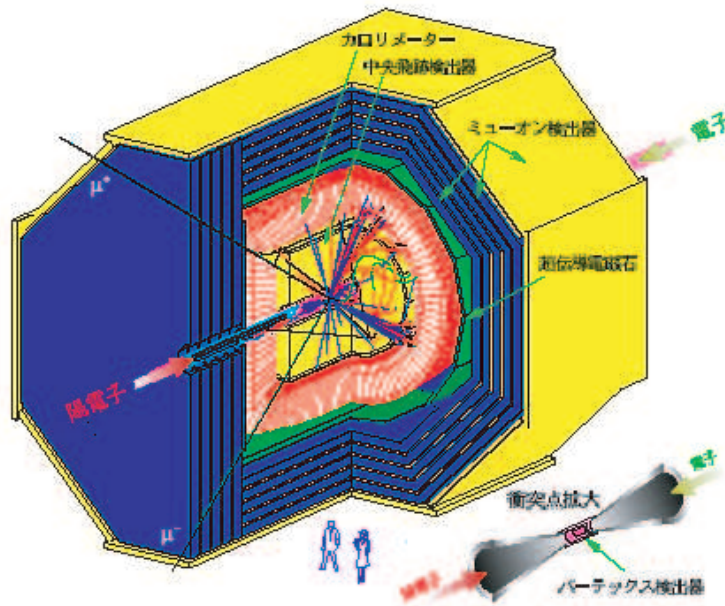


図 1.5: 測定器概念図

- バーテックス検出器：電子・陽電子の衝突点の極めて近傍に設置され、荷電粒子の飛跡を高い精度で測定する。これからD中間子やB中間子の崩壊点を見つけ、ジェットがbクォークやcクォークから発生したことを識別する。とくにbクォークの同定はヒッグス粒子探索において非常に重要である。また、バーテックス検出器に入射されるジェットは強くコリメートされ、粒子の密度が非常に高いため、入射位置を二次元的に読み出す必要がある。そこでバーテックス検出器は CCD（電荷結合素子）のような二次元分解能の高いモジュールが想定されている。
- 中心軌跡測定器：荷電粒子の飛跡を正確に測定し、その曲率から荷電粒子の運動量を測定する。以前は小型ジェットセル構造をもった、円筒形ドリフトチェンバーを想定していたが、現在は TPC(Time Projection Chamber) を基本デザインとして採用している。
- カロリメータ：粒子のエネルギーを測定する。本研究の主題であり、次章で詳しく記述する。
- ミューオン測定器： μ 粒子の同定を行う。 μ 粒子は質量が電子より重く、強い相互作用を起こさないため、他の粒子と違い測定器の最も外側まで達する。 μ 粒子の運動量は内側の中央飛跡測定器で精度よく測定される。そこで構成された μ 粒子の飛跡と μ 粒子測定器で測定された位置が一致するかを調べる。 μ 粒子は多くの場合、新粒子探索におけるもっとも明解な信号であるため、立体角をできるだけ広く覆うとともに、隙間のないように配置される。

第2章 カロリメータ

2.1 カロリメータの原理

カロリメータは入射粒子の全エネルギーをその測定器内で全て消費させることによって測定するためのものである。そのほかにも入射粒子の位置測定、粒子の同定を行うものである。入射粒子が電子、陽電子あるいは光子である場合、これらの粒子と物質との相互作用は、主として制動放射と電子陽電子対生成であり、これら二つの相互作用が交互に続いて起こる結果として、電子、陽電子、及び光子のカスケードシャワーが起こる。そのシャワーはそれらの粒子のエネルギーが臨界エネルギー E_c に近くなったところで初めて停止する。このようなシャワーの過程を電磁シャワーと呼び、電磁シャワーを引き起こす電子、陽電子、光子のエネルギーを測定するためのカロリメータを電磁カロリメータと呼ぶ。

一方入射粒子が荷電 π 粒子などのハドロン粒子である場合、その粒子は物質中において核子との弾性散乱や非弾性散乱を起こす。このような衝突反応においては、 π 粒子、K 粒子、陽子や中性子などからなる複数の二次粒子が放出され、これらの二次粒子が次の非弾性散乱を引き起こす。これらの粒子がイオン化や物質中の核子の結合を壊すことによりエネルギーを失っていくカスケード現象のことをハドロンシャワーと呼び、これらハドロンのエネルギーを測定するためのカロリメータをハドロンカロリメータと呼ぶ。

2.2 カロリメータの構造

カロリメータの構造は、入射粒子の全エネルギーを吸収するのに十分な厚さの吸収体と、吸収体の相互作用によって生成された二次粒子を検出する検出体からなる。吸収体として用いる物質にはそれ自身が信号を発するもの (NaI、CsI 等の無機シンチレータ、鉛ガラス等のチェレンコフ放射体) もある。これらによって均質な構造のカロリメータを製作することができる。この構造をもつカロリメータを全吸収型カロリメータと呼び、後述のサンプリング型よりエネルギー分解能は高いが、一般に高価である。

一方、吸収体と検出体に異なる物質を用いて、それぞれを交互に重ねた構造をもつカロリメータをサンプリングカロリメータと呼び、入射粒子のエネルギーの一部を信号として検出する。吸収体として用いる物質は鉄、鉛、タングステン、ウラニウム等があり、検出体としてはプラスチックシンチレータ、ガスや有機液体、液化希ガス、シリコンなどの半導体等が用いられる。サンプリング方式では実験の目的に合わせたカロリメータ構造のデザインが可能である。

2.3 エネルギー分解能

一般にカロリメータのエネルギー分解能は以下のように表す。

$$\frac{\sigma_E}{E} = a \oplus \frac{b}{E} \oplus \frac{c}{\sqrt{E}} \quad (2.1)$$

ここで、 $A \oplus B = \sqrt{A^2 + B^2}$ を表す。aは定数項 (Constant term) と呼ばれ、読み出しチャンネルごとのゲインの不均一性やカロリメータのエネルギーの洩れに起因する。bはノイズ項 (Noise term) と呼ばれ、読み出し回路等からのノイズによる寄与で入射エネルギーにかかわらず一定なので $1/E$ に比例する。そして c は統計項 (Statistical term) と呼ばれる。カロリメータの検出体として、シンチレータを用いる場合、統計項への寄与は大きく分けて以下の3つに分類でき、いずれも \sqrt{E} に比例する。

- σ_{int} : “intrinsic” な揺らぎ
- σ_{photo} : 検出される光電子数の揺らぎ
- σ_{samp} : “サンプリング” による揺らぎ

σ_{int} はカロリメータに入射したシャワーそれ自身の揺らぎである。 σ_{photo} は読み出しに光を用いる検出器の場合、そのデバイスなどで検出される光電子数の揺らぎで、

$$\frac{\sigma_{photo}}{E} = \frac{1}{\sqrt{N_{p.e.}}} \quad (2.2)$$

のように表される。ここで $N_{p.e.}$ はデバイスに検出される光電子数である。サンプリング型のカロリメータではシャワーを構成する荷電粒子が有感層でイオン化により損失したエネルギーのみを検出しているのでサンプリングによる揺らぎ σ_{samp} がエネルギー分解能に寄与を与える。

2.4 カロリメータに要求される性能

カロリメータの性能において重要なものを列挙すると、主に以下のとおりである。

- カロリメータ前物質質量
- 1粒子エネルギー分解能
- 補償の概念
- ジェットエネルギー分解能
- グラニュラリティ

2.4.1 カロリメータ前物質質量

どのような測定器に対しても、粒子がその測定器に入射する前に相互作用を起こすと、測定精度が悪化する。このため上流の測定器群では、極力物質質量を減らす努力がなされる。衝突型加速器実験におけるカロリメータでは上記理由により、荷電粒子の運動量測定に必要となるソレノイドコイルを、カロリメータの内側ではなく、その外側に置く必要がある。よって、カロリメータは強磁場中への設置が想定されている。シンチレーション光を用いるタイプのカロリメータにおいては、その微弱な光を読み出す光検出器が必要であるが、上記の理由のため強磁場中でも問題なく動作しなければならない。

2.4.2 1粒子エネルギー分解能

入射粒子のエネルギーを精度良く測定することは、カロリメータの基本中の基本と言える。前述のようにサンプリングカロリメータの場合、エネルギー分解能は主としてサンプリング揺らぎによって決まる。これはエネルギー分解能の統計項として現れる。統計項にはこの他に光子統計の揺らぎも効くが、通常カロリメータを設計する時には光子統計が性能を劣化させることが無いように注意して光学系を設計する。またエネルギー分解能の定数項についても同様に、これが性能を左右することが無いように細心の設計・調整をする。従って結果的にこのサンプリング揺らぎがカロリメータの性能の最重要因子になる。図 2.1 にパイオンに対するエネルギー分解能がサンプリングの細かさによってどのように変わっていくかを示す。これは鉛とプラスチックシンチレータをサンドイッチにしたモジュールのビームテストの結果で、[?] から転載した。これからわかるように、サンプリングが粗い時にはエネルギー分解能は鉛厚のルートにほぼ比例している。また鉛とプラスチックシンチレータで構成されるカロリメータの場合、サンプリングを細かくしていくと、30%弱の統計項が得られるだろうと推定される図 2.1。

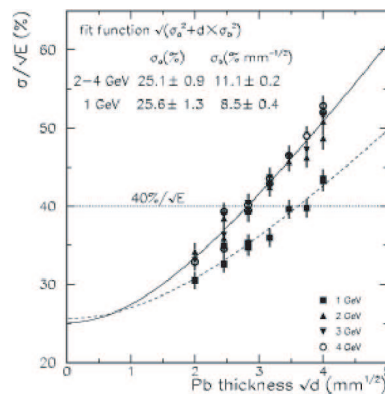


図 2.1: カロリメータの分解能とサンプリング数の関係

実際の次世代線形加速器実験に用いる場合は

- 電磁カロリメータ $\frac{15\%}{\sqrt{E}}$
- ハドロンカロリメータ $\frac{40\%}{\sqrt{E}}$

が要求されている。

2.4.3 補償型カロリメータ

一般にカロリメータから得られる信号は、電磁シャワーによるものに比べて、ハドロンシャワーによる信号のほうが小さい。これは、ハドロンシャワーにおいては、核破砕反応によって核の結合エネルギーの分だけエネルギーが消費されることや、中性子がエネルギーをもって逃げていくことによる。ハドロンシャワーにおいて、 π^0 粒子が生成されると、この π^0 粒子は電磁相互作用で、 10^{-16} 秒程度の寿命で二つの光子に崩壊し、電磁シャワーの形でカロリメータにエネルギーを落とす。よって、ハドロンシャワーには、電磁シャワーの成分と純粋なハドロン過程によるシャワーの

成分が含まれることになる。シャワー発達初期段階での π^0 粒子生成のふらつきはシャワー全体のエネルギーに大きなふらつきを引き起こす。従って、同じエネルギーの純ハドロンシャワーと電磁シャワーが同じエネルギーをカロリメータに落とすようにしておけば、 π^0 粒子生成のふらつきがエネルギー測定のみをひきおこさないようにできる。このように EM (電子、光子) とハドロンに対する応答の比 e/h が 1 であるようにしたカロリメータを補償型カロリメータと呼ぶ。 $e/h=1$ を実現するためには、以下のような方法が挙げられる。

- 吸収材に鉛等の重元素を用いることで、核反応でのエネルギー消費を減らす。
- 検出体に水素原子を多く含むプラスチックシンチレータ等を用いることによって、中性子のエネルギーを逃がさないようにする。
- 吸収材の比率を増やし、電磁シャワーが検出体に落とすエネルギーを減らすようにする。

2.4.4 ジェットエネルギー分解能

カロリメータの性能として、1 粒子エネルギー分解能を挙げたが、物理的に重要なイベントの多くは、複数の粒子が同時に生成されるジェットと呼ばれるイベントを伴う。次世代線形加速器実験で期待されるヒッグス粒子生成事象等もジェットを伴うものがほとんどのため、このジェットのエネルギー分解能もカロリメータにとって極めて重要な性能といえる。図 2.2 は、 $\nu\bar{\nu}W^+W^-$ 、 $\nu\bar{\nu}Z^0Z^0$ 生成に伴う 4jet イベントを用いたジェット質量再構成のシミュレーション結果である。上図は、ジェットエネルギー分解能 $60\%/\sqrt{E_{jet}}$ 、下図は、分解能 $30\%/\sqrt{E_{jet}}$ の場合の W^\pm 粒子 (80GeV)、 Z^0 粒子 (91GeV) の質量の分布を示している。ジェットエネルギー分解能が $30\%/\sqrt{E_{jet}}$ であれば 2 粒子の事象を分離して観測できることがわかる。

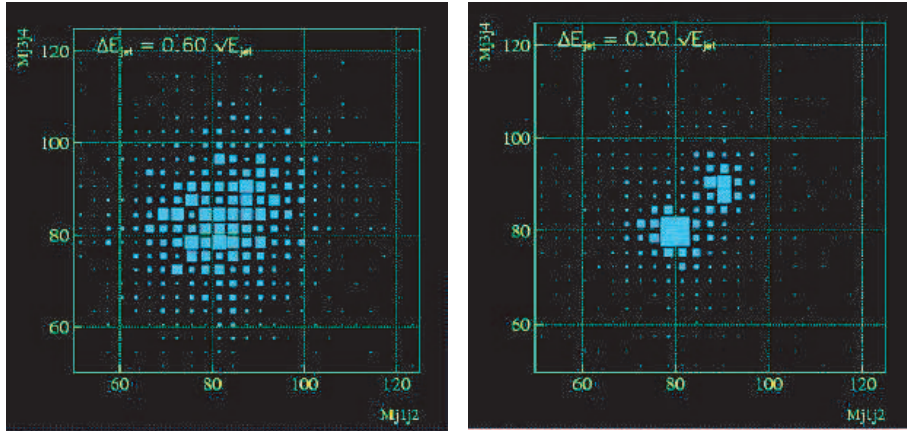


図 2.2:

第3章 PFA(Particle Flow Algorithm)

3.1 PFA

PFA とは、ジェットのエネルギー分解能をよくするための解析手法である。ジェットをジェットとして捉えるのではなく、ジェットを構成している粒子1つ1つを正確に把握する。

3.2 理想的なジェットのエネルギー分解能

先ほどの章で見たようにジェットのエネルギー分解能をあげると、衝突によって生成された粒子の質量がより正確にわかる。ILC 実験では、ヒッグス粒子の質量の精密測定、SUSY のような究極物理の探索を目指しているのでより高性能の分解能が要求される。

表に、それぞれの粒子を各測定器で測ったときの分解能等を示す。表を見てもわかるように、現在、ジェットのエネルギー分解能を一番よくする方法は荷電粒子はトラッカーで、中性粒子はカロリメータで測定することである。

$$E_{jet} = E_{chargedtrack} + E_{\gamma} + E_{neutralhadron} \quad (3.1)$$

粒子の種類	測定器	分解能	混入率
荷電粒子の分解能	トラッカー	$10^{-5} \times P_T$	65%
光子の分解能	カロリメータ	$\sim 12\% / \sqrt{E}$	26%
中性ハドロン分解能	カロリメータ	$\sim 45\% / \sqrt{E}$	9%

表 3.1: 分解能

ジェット中の粒子のエネルギーは相対論により以下のように記述される。

$$E^2 = m^2 + p^2 \quad (3.2)$$

ここで E は粒子のエネルギー、m は質量、p は運動量であり、自然単位系で表してある。また、それらの粒子は、そのほとんどが相対論的速度であるため以下の近似が可能である。

$$m \ll p \quad (3.3)$$

$$E \simeq p \quad (3.4)$$

ここで、一般にトラッキングチェンバーの分解能を、 $\frac{\sigma_p}{p}$ 、カロリメータの分解能を $\frac{\sigma_E}{E}$ としたとき、多くの場合 $\frac{\sigma_p}{p} \ll \frac{\sigma_E}{E}$ であることが知られているので、上記の近似より、

$$(\text{トラッキングチェンバーで測定された運動量}) = (\text{その粒子のエネルギー}) \quad (3.5)$$

とすることが可能である。

荷電粒子の場合にかぎり、上記の測定が可能であるが、生成されたジェット中にはもちろん中性粒子も含まれているので、中性粒子のエネルギーはカロリメータによって測定されなければならない。

そこで、荷電粒子をトラッカーで、その他の粒子をカロリメータで測定したときのジェットのエネルギー分解能は次の式で表せる。

$$\sigma_{jet}^2 = \sigma_{chargedparticle}^2 + \sigma_{\gamma}^2 + \sigma_{neutralhadron}^2 = (0.14)^2 E_{jet}$$

上の式より、エネルギー分解能は14% となり要求される分解能(30%) は十分満たしている。しかし、これは理想的な測定器があればの話である。

3.3 現実上の問題点

実際には、現実的な問題が入ってくる。これらには、表に示す3つの項目がある。

$$\sigma_{jet}^2 = \sigma_{chargedparticle}^2 + \sigma_{\gamma}^2 + \sigma_{neutralhadron}^2 + \sigma_{threshold}^2 + \sigma_{efficiency}^2 + \sigma_{confusion}^2$$

分解能	原因
$\sigma_{threshold}$	解析するときのエネルギーレスショルド
$\sigma_{efficiency}$	粒子の欠損
$\sigma_{confusion}$	カロリメータ内での粒子の混合

表 3.2: 現実問題ででてくる分解能

3.3.1 $\sigma_{threshold}$ について

$\sigma_{threshold}$ は、解析する段階で粒子の再構成するときに決めるレスショルドによるものである。実験では、非常に小さなエネルギーはノイズに埋もれてしまう。これによる影響が $\sigma_{threshold}$ に含まれている。

3.3.2 $\sigma_{efficiency}$ について

この項は、実験で測定することができない粒子によるものである。例えば、ヒッグスの崩壊によってニュートリノが出てくるときなどが考えられる。

3.3.3 $\sigma_{confusion}$ について

$\sigma_{confusion}$ の項は、カロリメータ内でのクラスターの混合によるものである。この項が、最も深刻で1番分解能に効く。PFA を適用するには、カロリメータで落ちたエネルギーを荷電粒子によるものと中性粒子によるものとに分ける必要がある。しかし、カロリメータの構造が荒いと複数の

粒子が作ったクラスターが重なって分離不可能になる。そこで、カロリメータをできるだけ細分化し、クラスターを1粒子によるものにした。この項が3つの中で1番分解能に影響する。本研究では、カロリメータを細分化し、 $\sigma_{confusion}$ をよくすることを目標にした。

3.4 GLDグループにおけるPFA

PFAを適用する1例としてGLDグループを取り上げる。GLDでは、以下の3つを適用することでPFAを実現しようとしている。

- 衝突点とカロリメータとの距離を離す
- 磁場をかける
- カロリメータを細かくする

これらのどれも $\sigma_{confusion}^2$ をよくするための工夫である。

3.5 グラニュラリティ

上述のように、実際の実験では1粒子が孤立してカロリメータに入射することは珍しく、多くの場合多数の粒子が近接したジェットとして入射する。これらの近接した多数の粒子を解きほぐして、1個1個の寄与に分解することによってParticle Flow Algorithmを適用でき、前述のジェットエネルギー分解能が威力を発揮する。この解きほぐしを精度よく行うためには、グラニュラリティと呼ばれる信号の読み出し単位の細かさが重要になる。また、グラニュラリティの細かさはトラックとクラスターの対応づけやバックグラウンドヒットの除去にも威力を発揮する。

グラニュラリティについて、タイルファイバー型カロリメータ（検出体としてタイル状のシンチレータを用い、タイルに埋め込まれたWLS（ウェーブレングスシフター）ファイバーにより読み出しを行うタイプ）で考えた場合、この読み出し単位の大きさは、横方向にはタイルの大きさで、奥行き方向には主として光検出器の諸特性で決まる。タイルの大きさを小さくすればするほどジェットの解きほぐし性能は明らかに良くなるが、以下の理由から限界がある。

- WLSファイバーの曲げ半径をあまり小さくできない。
- 応答の一様性が悪くなる。
- ファイバーの数、ひいては読み出しチャンネル数が多くなり、費用がかかる。

今までに作られてきた電磁カロリメータでは、10cm × 10cm程度のタイルサイズが大半であるが、次世代線形加速器計画のような超精密実験を目指す場合にはこれでは粗すぎると考えられている。奥行き方向の読み出し単位は、サンプリングカロリメータの場合、シンチレータのサイズを層単位で細かくすることができる。しかし現実にはそのようなことがなされた例はない。これは、それを実現するためには光検出器のチャンネル数が膨大になってしまい、費用もまた膨大になってしまうことが大きな理由である。加えて、タイル1枚からの光量は小さすぎて良いS/Nで測ることが難しいという理由もある。

最近の光検出器の急速な発展により、上記のような各層読み出しが夢ではなくなりつつある。現在光検出器の最有力候補としてスタディが行われて、SiPM、MPPCなどは、各層毎読み出しを可能とする感度、多チャンネル性、チャンネル単価を実現できると考えられている。

第4章 測定器シミュレーション

この章の概説

この章では、まず粒子の測定器、つまり粒子と物質の相互作用をシミュレーションするとは何かを説明する。さらにその際に用いるツールキットである Geant4 について述べ、次に Geant4 を用いて作成される高エネルギー実験で用いられる測定器フルシミュレータについて説明する。

4.1 粒子と物質の相互作用のシミュレーション

高エネルギー実験に限らず粒子と物質の相互作用を検出する測定器シミュレータには一般的に次が求められる。

- 測定器の構造をプログラム内で組み立てることができる。
- モンテカルロ法に基づいた物質内での粒子の相互作用をシミュレートすることにより入射した粒子をプログラムが自動的に輸送できなければならない。

従って、物質内で粒子の相互作用をシミュレートする方法であるモンテカルロ法が測定器シミュレーションの核となる。

モンテカルロ法とは乱数を用いた統計サンプリングを何度も行なうことにより近似解を求める数学的手法である。

以下で粒子と物質の相互作用に関する、モンテカルロ法について基本的概念である「粒子が今この物質内にいるかに関わらず乱数を振ることができる」ということを説明する。

基本的概念

次を定義する。

- $P(x)$ 粒子が距離 x 進んだ後、物質と相互作用しない確率。
- $w dx$ 粒子が位置 x と $x + dx$ の間で物質と相互作用する確率。

ここで w は

$$w = N \cdot \sigma$$

である。 N は単位ボリウム内のターゲット粒子の数、 σ は相互作用の cross section である。

したがって、この定義から $P(x + dx)$ は粒子が位置 $x + dx$ で物質と相互作用しない確率であるから $P(x)$ と $w dx$ を用いて次のように表せる。

$$P(x + dx) = P(x)(1 - w dx)$$

ここで $1 - wdx$ は dx の間で粒子が物質と相互作用しない確率である。この微分方程式を解くと

$$P(x) = \exp(-wx)$$

となる。ここで $P(0) = 1$ とした。

相互作用の生成

位置 x から $x + dx$ 内で粒子が物質と相互作用する確率を $P_{int}(x)$ とすると上記により

$$P_{int}(x)dx = P(x)wdx$$

である。ここで $P_{int}(x)$ を PDF(Probability Density Function) と呼ぶ。一方、これの積分

$$\int_0^x P_{int}(x)dx = \int_0^x P(x)wdx = \int_0^x w \exp(-wx)dx = 1 - \exp(-wx)$$

を CDF(Cumulative Distribution Function) と呼ぶ。

ここで、

$$\eta = 1 - \exp(-wx)$$

となる。この η は $[0, 1]$ の一様乱数である。ここから

$$x = -\ln(1 - \eta)/w$$

となる。

異種混成の物質の中での粒子と物質の相互作用の生成

上記で

$$x = -\ln(1 - \eta)/w$$

となったがこの x は長さの次元を持ち物質に依存する。¹したがって粒子を物質内で輸送する際に物質に依存しない無作為抽出ができない。しかしながら、 w を左辺に移した

$$xw = -\ln(1 - \eta)$$

の右辺は物質には依存しない。したがって次のように平均自由行程 λ を定義する。

$$\lambda = \int xP(x)dx / \int P(x)dx = 1/w$$

したがって、この λ を用いて xw は

$$x/\lambda = -\ln(1 - \eta)$$

と書き直すことができる。よって平均自由行程 λ を単位とすることによって粒子がどの物質と相互作用しているのかに依存しない形で一様乱数を与えることができる。この $[x/\lambda]$ を Number of Mean Free Path(NMFP) と呼ぶ。

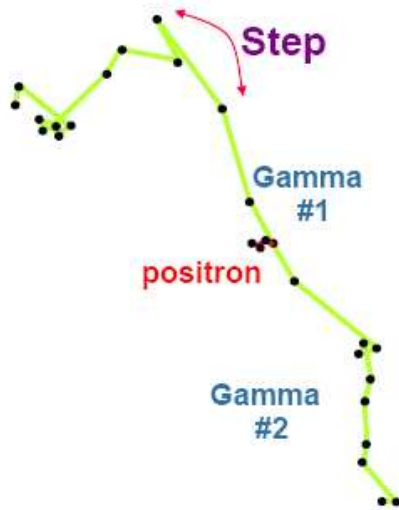


図 4.1: 水中の 8MeV の positron の対消滅

粒子輸送

粒子は段階的にステップ踏んで行くやりかた (stepwise manner) で輸送されていく。Step を図 4.1 に示す。

以下でこの粒子の輸送のされ方を説明する。²

1. step の最初で、粒子に関連付けられたそれぞれの物理プロセスに対する NMFP は物質に独立なやり方で無作為抽出される。
2. 現在粒子がいる位置の物質における cross-section を用いて NMFP を PL(Physical Length) に変換する
3. 最も短い PL を持つプロセスを step 長と決める。
4. 粒子を上で決められた step 長だけ粒子を輸送する。
5. 粒子が相互作用の後、生きていたら、もう一度 NMFP に対して乱数を振り 1. から繰り返す
6. もし粒子が相互作用で消滅したら、輸送は終了。

以上、粒子と物質の相互作用のシミュレーションにおける基礎概念を説明した。

これらの step-by-step な粒子の輸送法を用いて測定器のシミュレーションを行うツールキットとして Geant4 がある。我々 ILC 日本グループの測定器モンテカルロシミュレータもこの Geant4 をベースとして開発中である。以下の節では Geant4 について概略を説明する。

¹w は定義により物質に依存している。

²もう一度、詳しく Geant4 の仕組みを説明する箇所です。

4.2 Geant4

4.2.1 Geant4 とは何か

Geant4(**GE**ometry **ANd** **T**racking **4**) とは粒子と物質の相互作用をシミュレーションする汎用ソフトウェア・ツールキットである。高エネルギー物理学実験 (HEP, High Energy Physics) で使われる測定器の振る舞いをシミュレーションするのを第一義として開発されたが設計段階から、HEP 以外の分野での応用も考慮されていた。現在では宇宙、医療をはじめとする広い分野でも使用されている。

4.2.2 開発の歴史

Geant4 は国際共同研究として開発され、国際協力グループにより維持されている。以下に開発の歴史を示す。

1994年12月

日本と CERN が中心となり、世界 9 カ国から約 30 名の研究者が参加して R&D 開始した。

1998年12月

Geant4 version1.0 を世界公開、R&D 終了。

1999年4月

維持開発の世界共同グループ結成 (>100 名)。日本は中心メンバーである。

2005年2月

現在、version 4.7.0 である。年に 2 回の Public Releases (および必要に応じた minor patch release) がある。

4.2.3 Geant4 のしてくれること

Geant4 はシミュレーションしたい事象に含まれている粒子を、物質および外部電磁場との相互作用を考慮しつつ、次のいずれかの条件が成り立つまでトランスポート (輸送) する。

1. 運動エネルギーがゼロになるまで。
2. 相互作用により消滅するまで。
3. ユーザが指定するシミュレーション空間の境界 (世界の果て) に到達するまで。

さらに、粒子のトランスポートのさまざまな段階で、ユーザがシミュレーションに介在できる手段を提供してくれる。例えば、

- 測定器の有感部分に粒子が入ると、その時点での粒子の運動学情報を用いて、ユーザが任意のデータ処理を行える。
- 粒子をトランスポートする途中のステップで、ユーザが任意のデータ処理を行える。
- 一つの粒子のトランスポートの最初と最後に、ユーザが任意のデータ処理を行える。

等である。

また Geant4 は以下を提供している。

1. シミュレーションを対話的に或いはバッチ処理として実行する手法。
2. シミュレーション過程を各種グラフィック・ツールで可視化できる手段を提供する。
3. シミュレーションのチェック、デバッグ・ツールを提供する。

4.2.4 Geant4 のしてくれないこと

Geant4 がしてくれないことを以下に説明する。

必要最低限の情報はユーザが Geant4 に知らせなければならない。

ユーザーは粒子をトランスポートするにあたり、最低限必要となる以下の3つの情報を与えなければならない。

1. 測定器の構造情報
2. シミュレーションしたい事象に含まれる粒子の種類、始点と運動量ベクトル。
3. 粒子をトランスポートするにあたり、Geant4 が考慮すべき粒子および相互作用の種類。

さらに、シミュレーションを意味あるものにするには、以下の情報のいずれか或いは全てをユーザから与えられなければならない。

1. 外部電磁場がある場合、その分布情報。
2. 粒子トランスポートのさまざまな段階でユーザが行いたいデータ処理。

Geant4 はツールキットである。

一般的に使える実行可能なシミュレーションプログラムの提供はしてくれない。³Geant4 はツールキット⁴であり、ユーザは用意されているコンポーネントを使って自分で必要なシミュレーションプログラムを組み立てなければならない。具体的にはメインプログラムをユーザが書かなければならないということである。

³例題は多数ある。

⁴ツールキット、アプリケーション、フレームワークなどの用語については後述

正しいシミュレーション結果は自動的に与えられるわけではない。

ユーザは必ず、自分がどのような条件でシミュレーションをしているかを理解する必要がある。
例えば

- いくつかのパラメータ（例：Production Threshold）の調整が必要。
- Geant4 の用意している粒子相互作用のうち、適用範囲の正しいものを選択しているか。

等が挙げられる。

4.2.5 Geant4 は C++ 言語で実装されている。

Geant4 を使うのに最低、知らなければならないことは C++ 言語である。

なぜ C++ が使われているのか？

- FORTRAN で大規模ソフトウェアを開発することの反省から。
- オブジェクト指向言語はシミュレーションに向いている（後述）。
- C++ は他のオブジェクト指向言語と比較すると処理速度が優れている。
- 使用 community が大きく、多くの computing platform で使うことが可能。
- ANSI/ISO 標準言語である。

なぜオブジェクト指向言語を使うのか？

モンテカルロ・シミュレーションはシステムをモデル化し、その振る舞いを調べる。システムは実際には実体 (object) から構成されているので、その実体をオブジェクト指向言語で直接プログラムの object にマップするのは自然である。例えば、素粒子を「素粒子オブジェクトとして表現」、測定器を「測定器オブジェクトとして表現」などである。オブジェクト指向プログラム言語はもともシミュレーション言語として出発した。したがって、測定器シミュレーションのプログラム言語として使うのは自然である。

以上で Geant4 の概要を説明した。次節で Geant4 を用いたアプリケーションプログラムを作成する方法を見ていく。

4.2.6 Geant4 ライブラリの使い方概説

Geant4 でアプリケーションプログラムを実装するユーザは以下、最低 3 種類の情報を用意しなければならない。

1. 測定器の構造情報 (Geometry)。通常、一番時間がかかる作業である。
2. シミュレーションしたい事象 (Primary Event) に含まれる粒子の種類、始点と運動量ベクトル。

3. 粒子をトランスポートするにあたり、Geant4が考慮すべき粒子 (Particles) および相互作用の種類 (Physics Processes)。

これらをも Geant4 へ与る際の考え方を以下の節で説明する。

4.2.7 測定器の構造 (Geometry) の作成

測定器を構成する要素 (Volume) という考え方を説明する。

測定器の構造情報 (Geometry)

測定器はいろいろな構成要素からできており、Geant4 ではこの要素を Volume とよぶ。測定器のどの部分を一つの Volume として表現するかは、ユーザがシミュレーションで得たい結果を考慮して決めなければならない。測定器の全ての詳細構造を Geometry 定義に入れることは通常は避ける。シミュレーションに必要な最低限な Volume を見極め、それのみを定義する。これは通常一番時間がかかり、難しい作業である。

測定器の構造情報 (Geometry) の作成 (ステップ 1)

測定器を構成する要素、すなわち Volume を表現する第 1 ステップはその幾何学形状を定めることである。Geant4 は Volume の幾何学形状を指定するために以下の 3 種類の立体表現 (Solid) 手法を用意している。

1. 円球、円筒、直方体、台形体など様々な基本立体要素を組み合わせることによる表現。これを Constructed Solid Geometry (CSG) とよぶ。
2. 複数の CSG を用い引き算、足し算、ユニオンなどの論理操作を行うことで表現。これを、Boolean Operations とよぶ。
3. Volume を形作る全ての面を関数を用いて表現。これを Boundary Representation (BREPS) とよぶ

これらの solids 表現に ISO 世界標準 (ISO10303) の STEP 形式 (Standard for the Exchange of Product) を採用している。⁵ STEP を採用することで、CAD とのデータ交換が可能となっている。

⁵STEP (Standard for the Exchange Product data model) は、正式名称 ISO10303 (Product Data Representation and Exchange) と呼ばれる。STEP では製品データ (Product Data) の表現及びデータ交換のための標準規格を取り決めようとしており、製品のライフサイクル (設計、解析、製造、検査、利用、保守) 全般にわたり利用できるデータが含まれている。このデータの中には CAD の形状データなども含まれている。これらのデータは、STEP で規定している独自の言語 (Express) を使って表現し、CAD やその他のいろいろなアプリケーションから共通のデータを引き出せるようになる。CAD などのアプリケーションでは、STEP から提供される Express で記述されるツールを使って、機械的にデータを変換できるようになるため、異なる CAD システム間でデータのやりとりが行える。ただし、現実的にはいろいろな業種や業界により必要なデータの種類や構造が異なっているため、数多くのアプリケーションプロトコル (AP) という枠組みをつくり、業種別や作業別に規格を決めている。

それぞれの Solid 表現の特徴

それぞれの Solid 表現 (CSG, Boolean Operation, BREPS) の特徴を以下に挙げる。

1. CSG はもっとも基本的な solid 表現法。粒子の輸送計算が高速であるが、非常に変則的な形状の volume 表現には向かない。
2. Boolean Operation は粒子の輸送計算に時間がかかる。
3. BREPS はもっとも自由度の高い表現方法。ただし、粒子の輸送計算に時間がかかる。

測定器の構造情報 (Geometry) の作成 (ステップ 2)

ここまでで測定器の形状は作成できたので次に、測定器に物質情報を追加する。ここに Logical Volume という考え方がでてくる。ユーザーはそれぞれの Solid の情報とそれがどのような物質からできているかの情報を追加して Logical Volume とよばれているものを作る。物質の定義の仕方は Geant4 で用意された手法でユーザが行うが、よく使われる物質については定義例が豊富に用意されている。Logical Volume の特徴はそれがまだ空間的にはどこにも置かれていないということ。測定器が同一の形/サイズ/物質からなる要素を複数もっている場合、それらを個別に定義する必要はなく、一つの Logical Volume を共用することで表現できる。複雑な測定器を表現するにはプログラムサイズの観点からこの考えが非常に重要となる。

測定器の構造情報 (Geometry) の作成 (ステップ 3)

測定器を組上げる Physical Volume という考え方を説明する。Logical Volume をお互いに相対的に配置していくことで測定器を組み上げる。この時の出発点となるのが World Volume である。すべての Volume は World Volume 内に置かれる。World Volume に対して Logical Volume を配置すると、Physical Volume が作られる。Physical Volume とは基本的には Logical Volume の情報に、相対位置情報が追加されたものである。

Logical Volume を配置する基準として使えるものを以下に挙げる。⁶

1. World Volume (Physical Volume として必ず定義する)
2. 既に定義されている他の Physical Volume
3. 既に定義されている他の Logical Volume

配置の基準となる Volume を Mother Volume、配置された Volume を Daughter Volume とよぶ。Daughter Volume が置かれると、もとあった Mother Volume の物質は Daughter のものに置き換えられる。

⁶測定器の配置を表す PhysicalVolume の抽象クラスである G4VPhysicalVolume の継承クラスのコンストラクタに与える仮引数のこと。

測定器の構造情報 (Geometry) の作成 (その他の情報)

1. Logical Volume を配置するときの注意
Volume 同士がお互いに部分的にオーバーラップさせることは許されない。例外は Boolean Operation を使うときのみである。
2. 電磁場について
ユーザは測定器が電場/磁場を持つ場合、その分布情報を World Volume を基準に与える。必要に応じて、電場/磁場を任意の logical volume に対して与えることもできる。

4.2.8 Primary Event Generator の作成

Primary Event Generator とはユーザがシミュレーションしたい事象を発生させるものである。以下の情報を作る。

- 事象の発生点と発生時間
- 事象中に含まれる粒子 (通常複数個) の種類
- それぞれの粒子の momentum vector

標準で用意されている Primary Event Generator は

- ParticleGun とよばれる単一粒子の generator
- GeneralParticleSource とよばれる、2 または 3 次元に広がった粒子発生源を持つ generator
- 既存の FORTRAN で書かれた event generator との interface クラス、/HEPEVT/ common を介して PYTHIA, IsaJet 等とインターフェイス
- C++ で書かれた event generator との HepMC クラスを通したインターフェイス (例題として提供)

である。標準で用意されている Generator が目的に合わない場合、標準例題で用意されているコード例を用いてユーザが自作する。

取り扱うべき Particles の指定

1. Geant4 が用意している particle クラス
PDG⁷に掲載されている主な粒子 (数百種類)、およびシミュレーションにのみ用いる特殊な粒子 (例、Geantino⁸) が以下の 6 種類にグループ分けされて、前もって定義されている。
 - (a) Lepton
 - (b) Boson
 - (c) Meson
 - (d) ShortlivedParticle

⁷Particle Data Group

⁸何も相互作用しない仮想的な粒子

(e) Baryon

(f) Ion

ユーザは必ず使用する粒子の指定を行わなければならない。

2. Geant4 グループが標準例題で用意しているコード例にもとづいて、ユーザが必要に応じてそれを編集することで、使用する particles を指定すればよい。

4.2.9 使用したい Physics Processes の指定

Physics Processes とは particles が物質を通過する際に起こる相互作用を総称的に表したものである。Geant4 には Physics Processes として sub-keV 領域から PeV 領域までの粒子相互作用が以下の分類で用意されている。

- Electromagnetic processes
- Hadronic processes
- Decay processes
- その他
 - Transportation process など

取り扱うべき Processes の指定

Geant4 が用意している Physics Processes の種類は膨大である。ユーザは必ず使用する processes の指定を行わなければならない。Geant4 グループが標準例題で用意しているコード例にもとづいて、ユーザが必要に応じてそれを編集することで、使用する Physics Processes を指定する。

Particles と Processes の関係付け

ユーザが使用したい Particles と Physics Processes の指定を終了し、それを Geant4 に伝えると、Geant4 はそれぞれの Particle に対して、物理的に妥当な Physics Processes を関連付けてくれる (Applicability 情報)

Production Threshold (Cut Value) とは？

Physics Process により二次粒子 (Secondaries) が生成された場合、あるエネルギー以下の secondary particle はトランスポートされない。このエネルギー値を Production Threshold とよぶ。Geant4 はゼロ・エネルギーになるまで粒子をトランスポートするが、これは無限にゼロ・エネルギーに近い粒子を全てトランスポートすることではない。従って無限にゼロ・エネルギーに近い粒子までトランスポートしていると Geant4 の処理が遅くなる。⁹

⁹無限にゼロエネルギーに近い粒子を作ると Electromagnetic processes では赤外発散がおこる。赤外発散については本論文の範囲を超えるので述べない。

Production Threshold (Cut Value) の設定

cut value は stopping range (空間的長さ) で与える (例: 1mm)。photon の場合は absorption length で与える。Cut value を range cut よぶ場合もある。標準的には cut value は粒子に対して一つの値が設定される。全ての Physics Processes は secondaries を作る際にこの値を参照する。作られた二次粒子のエネルギーが指定された range を走るだけの energy を持っていないと、その粒子はトランスポートされない。トランスポートされない粒子の energy は生成された vertex 位置での energy loss として扱う。

これを図 4.2 に示す。

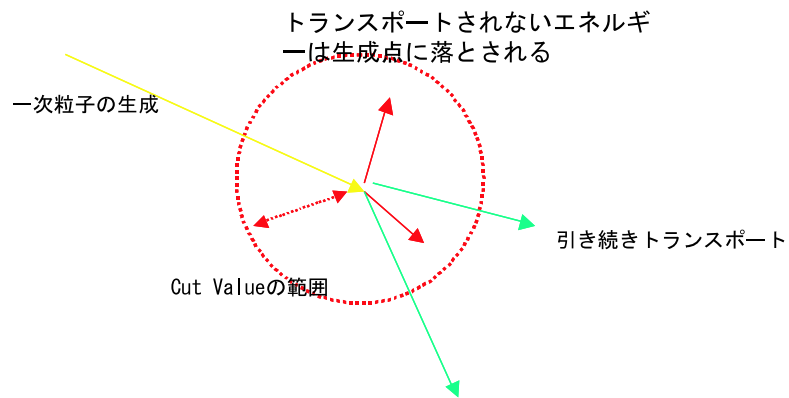


図 4.2: 作られた二次粒子のエネルギーが指定された range を走るだけの energy を持っていないとその粒子はトランスポートされない

ただし Production Threshold は無視される場合もある。physics process は必ず cut value を守らなければならないわけでない。以下例を挙げる。

1. pair creation

この場合、positron は zero energy でも必ず作られる。これは positron annihilation process を無視しないためである。

2. 境界領域の近くを走る粒子

単一粒子について一つの cut value が原則であるが、より自由度の高い設定もできる。

- Material ごと
- Logical volume ごと

ここまでで Geant4 に粒子をトランスポートさせるためにユーザーが知らなければならない最低の概念の説明を終えた。

4.2.10 測定器応答のシミュレーション

ユーザーがシミュレーションで実際にやりたいことは、Geant4 が粒子をトランスポートさせる過程に介入して、その粒子に対する測定器の応答をシミュレーションしたいということである。これを Geant4 で行うには、次の考え方を理解する必要がある。

1. Sensitive Detector
2. Hit
3. Digitizer

4.2.11 Sensitive Detector

一般的に測定器は粒子応答を観測する部分と (sensitive part) とそうでない部分 (in-sensitive part) に別れる。sensitive part を Geant4 は Sensitive Detector とよぶ。Sensitive Detector を指定するには Logical volume を単位として、それが sensitive であるか insensitive であるかを指定することができる。具体的には、ユーザーは Sensitive Detector オブジェクトをつくり、そのなかで粒子の運動学情報を使って Hit (次を参照) オブジェクトを作る手法を定義する。この Sensitive Detector オブジェクトで表現される機能を対応する Logical volume に付加する。

4.2.12 Hit

Hits とは

Hits とは Sensitive Detector 中の粒子がトランスポートされる際の各ステップでの粒子の状態のスナップショット情報である。スナップショット情報として記録したい内容はユーザーが独自に定義する。典型的な情報例としてはステップの前後での粒子の位置・時間情報、ステップの前後での粒子の運動量、ステップでのエネルギー損失などである。

HitsCollection とは

一つの事象内で、ある Sensitive Detector 中で作られた一連の Hits を一まとめにするオブジェクトである。例えば測定器 A と測定器 B が Sensitive であるとき、測定器 A と測定器 B で作られた Hits は別々の HitsCollection にまとめられる。

Hits をどの様に使うか（非常に単純な使用例）

- 一つの事象ごとに、作られた Hits Collections の内容を外部ファイルに書き出す。必ずしも、Hits ないし Hits Collections オブジェクトとして書き出す必要はない。（例、ROOT オブジェクトや Ntuple）
- Geant4 とは独立なユーザ・プログラムで外部ファイルから Hits の内容を読み込み、任意の処理をする。（例、ヒストグラムを作る、等）

4.2.13 Digitizer とは

Digitizer とは Hits を用いて、測定器の応答（例えば、生データ形式）を Geant4 シミュレーションの枠組みの中で作り出すために用いる。しばしば、ユーザはこの枠組みを用いることはせずに、Hits の単純な使用例で示した手段で測定器の生データ形式を作り出している。Digitizer は絶対につかわなければならないというものではない。

4.2.14 Geant4 の仕組み

ここまでで Geant4 をツールキットとして用いて測定器シミュレータを組み上げるための概念の概略説明を終えた。以下では Geant4 の中の仕組みを見て行く。

4.2.15 Geant4 はどのように粒子をトランスポートするか

Geant4 は与えられた事象に含まれる一つ一つの粒子に対して、Step を切ってトランスポートして行く。これを Step Transportation Algorithm と呼ぶ。

Geant4 は Step をどのように決めるか

1. 一つの粒子をトランスポートするにあたり、まず最初に、Geant4 はその粒子が起こすことの可能な Physics Processes の一つ一つに対して、乱数を用いて相互作用が起こるまでの距離を Interaction Length 単位で決定する。粒子の運命はトランスポートを開始する段階で原則的に決まってしまう。ただし、粒子が相互作用をおこしても、その粒子が消滅しない場合（例えば、gamma が compton scattering した場合）には、改めて、その相互作用の運命付けを行う。例として Positron を考える。Positron は以下の Physics Processes を持つが、それぞれについて相互作用が起こるまでの距離（Number Of Interaction Length Left = NILL）を乱数で決める。

- Bremsstrahlung NILL = NILLb

- Ionisation $NILL = NILL_i$
 - Positron annihilation $NILL = NILL_p$
 - Transportation 粒子の現在位置から最も近い volume 境界までの距離 (例外)
2. 粒子が現在いる場所の物質を考慮して、NILL を実際の距離 (Physical Interaction Length = PIL) に変換する。
- これを図 4.3 に示す。

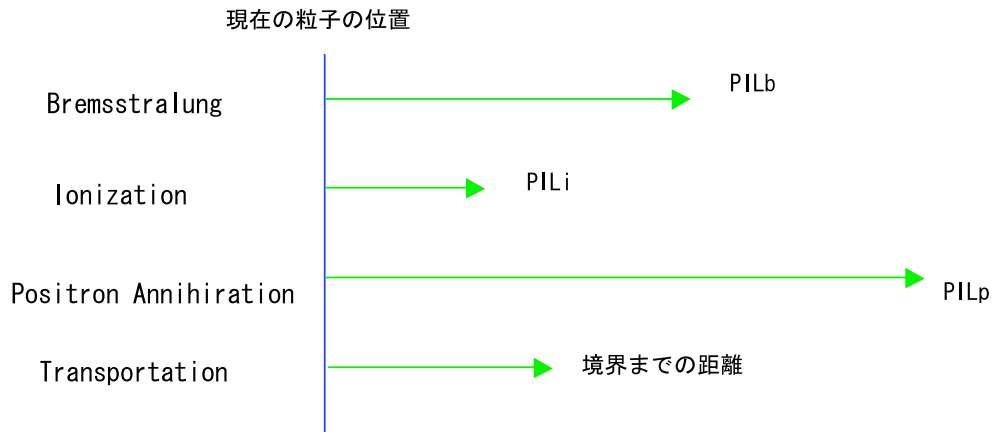


図 4.3: 粒子が現在いる場所の物質を考慮して、NILL を実際の距離 (Physical Interaction Length = PIL) に変換する

3. PIL の最小値をもつ PhysicsProcess が Step を決定する。上の例では Ionisation process
4. 決定された Step サイズだけ粒子をトランスポートさせる
5. この Step で二次粒子が発生した場合、それは Geant4 が所持しているスタックに一旦、保存され、後々、あらためてトランスポートされる
6. 粒子の持っている Physics Processes の全ての NILL をトランスポートした距離分だけ減らす
7. もし Step の終了後、粒子が Sensitive Volume 領域に入った場合、対応する Sensitive Detector をよぶ
8. 1. に戻る

4.2.16 Geant4 シミュレーションの全体進行と階層構造

Geant4 はシミュレーションの全体の進行を階層単位で進めていく。それぞれの階層にはマネージャとよばれるオブジェクトが存在し、その階層でのシミュレーションは階層マネージャが制御する。それぞれの階層で作られる情報は階層を表現する階層オブジェクトに保存される。それぞれの階層でユーザがシミュレーションの進行に介入できる手段が用意されている。¹⁰全体進行と階層マネージャ、そしてユーザ介入手段を表 4.2.16 にまとめる。以下これらを説明する。

階層オブジェクト	階層マネージャ	ユーザ介入手段
Run	RunManager	UserRunAction
↓	↓	↓
Event	EventManager	UserEventAction
↓	↓	↓
Track	TrackingManager	UserTrackingAction
↓	↓	↓
Step	SteppingManager	UserSteppingAction

4.2.17 Run と RunManager

Run とは

同一の測定器 Geometry, Physics Processes の組など、同一の条件の下で、決まった数だけの事象 (Events) をシミュレーションすることを一つの Run を実行するという。実験で一定の条件のもとに複数のデータを取得するのを ‘run’ とよぶのと同じ概念である。Run が持つ情報は

- Run number
- 処理すべき事象の総数

等である。

¹⁰ これらのマネージャは Singleton パターンで実装されている。デザインパターンについては後の節で簡単に述べている。

RunManager とは

一つの Run のシミュレーション全体を制御するシミュレーション進行の親分のようなものが RunManager である。例えば、Geant4 を用いた測定器シミュレーションはユーザが RunManager に対して beamOn ということで開始される。

RunManager の代表的な役割は

- ユーザから測定器 geometry 情報を受け取り、Geometry をプログラム内で使えるように初期化する。
- ユーザから使用する粒子と相互作用の情報を受け取り、それらを使うように初期化。
- ユーザが指定する Primary Event Generator からシミュレーションすべき事象を一つずつ受け取り、それを次の階層の EventManager にわたす
- Run に関する情報 (Run オブジェクト) の保持
- UserRunAction の受け付け

等である。

4.2.18 Event と EventManager

Event とは

例えば、衝突型加速器実験において衝突によって生成される全粒子 (Primary Particles) が一事象を構成する。Primary Particles が作る二次粒子も Event に含まれる。Event が持つ情報は

- Primary Particles の vertexes 運動量等の情報
- Hits 情報

等である。

EventManager とは

EventManager は一つの Event に含まれる全粒子のトランスポートを制御する。代表的な役割は

- Run Manager から一つの事象を受け取り、それに含まれる粒子を一つずつ、次の階層の TrackingManager にわたす。
- 相互作用でできた 2 次粒子を保持し、それも順次、TrackingManager にわたす。
- 粒子を TrackingManager にわたす順序の制御を担う。
- Event に関する情報 (Event オブジェクト) を保持する。
- UserEventAction の受け付け

等である。

4.2.19 Track と TrackingManager

Track とは

実験で実際に飛んでいる粒子を表す。したがって、その粒子の種類、ある瞬間の位置、運動量などの情報をもつ。Particle という名前を使わなかったのは、static な粒子情報 (PDG の情報) を保持するオブジェクトを Particle としている為である。¹¹

Track が持つ情報は

- PDG 情報 (ParticleDefinition オブジェクトをとおして)
- Step 後の Particle 位置情報
- Track の最初の Vertex 位置、運動量情報
- 全トラック長さ
- トレースし始めてから経過時間

等である。

TrackingManager とは

一つの Track を次のいずれかの条件を満たすまでトランスポートさせる。

- ゼロ・エネルギーになる
- 相互作用で消滅する
- world volume の端に到達するまでトランスポートする

代表的な役割は

- Event Manager から一つの Track を受け取る
- Track を一つの Step だけ進めることを次の階層の SteppingManager に命令する
- Track に関する情報 (Track オブジェクト) の保持
- UserTrackingAction の受け付け

等である。

4.2.20 Step と SteppingManager

Step とは

Step とは粒子トランスポートの最小単位。一つの Step の前後での粒子の物理情報を保持する。一つの Step の開始時点の情報は Pre-Step Point, 終了後の情報は Post-Step Point で保持する。

¹²

¹¹後に述べる Trajectory と混乱しない様注意する。

¹²前述の通り、Geant4 は Step が終了した際、そこが Sensitive Volume 領域であるなら対応する Sensitive Detector を呼ぶ構造になっている。Step が測定器間の境界を超えて新たな SensitiveDetector 領域に入った際には、それまで飛んでいた領域の情報は Post-Step Point が持っているのではなく Pre-StepPoint が保持している。したがって Volume の情報を得るには必ず Pre-Step Point に聞かなければならない。ここは間違い易いので注意すること。

SteppingManager とは

Track を一つの Step だけ進ませるのに必要な処理全体を制御する。代表的な役割として

- Tracking Manager からの命令を受け、その Track が起こす可能性のある相互作用と現在いる Volume の境界までの距離を考慮して Step の長さを決定する。
- 決定した Step 長だけ Track をトランスポートする。
- Step の終点が Sensitive Volume であれば対応する SensitiveDetector をよぶ。
- UserSteppingAction を受け付ける。

等がある。

4.2.21 Trajectory について

Trajectory とは

Track 及び Step は粒子トランスポートでの粒子の最新物理状態の情報のみを保持している。これに対して、Trajectory は粒子トランスポートの全履歴情報を Step 単位で保持している。Trajectory は結果的に膨大な情報を保持することになるので、ユーザーが明示的に要求しない限り Geant4 はそれを作らない。

Trajectory Point とは

一つの Trajectory は複数の Trajectory Points から成る。一つの Step のトランスポートが完了するたびに Step が持つ情報を Trajectory Point へ移す。Trajectory Point に何を保持させるかはユーザーが決める。

4.2.22 User Interface と Graphics

User Interface とは

Geant4 には様々なユーザ・コマンドが用意されており、それらを実行することでシミュレーションの条件を設定することができる。ユーザーコマンドはユーザが作るプログラム内から実行することもできるし、interactive mode でターミナルあるいはスクリプトからも実行できる。

Graphics

組み込んだ geometry が正しいかを確認する、あるいは、発生させた粒子の測定器内での振る舞いを観察するには、graphics は不可欠である。Geant4 では必要に応じて様々な graphics を使えるように作られている。仕様可能な主な graphics は以下のとおり。

- X11
- PostScript

- OpenGL/OpenInventor
- VRML
- DAWN

VisualizationManager が Graphics に関連する動作を制御する。

4.3 シミュレーションのセットアップ

今回の研究に使用したツール等のバージョンを示す。

表 4.1:

simulator	geant4 のバージョン 6.2
hadron physics list	LHEP
range cut	$1\mu\text{m}$

ジオメトリの配置とカロリメータの構成は以下の通り。

表 4.2: ジオメトリの配置

衝突点からのカロリメータまでの距離	2.1m
カロリメータの断面積	$2\text{m} \times 2\text{m} = 4\text{m}^2$

表 4.3: カロリメータの構成

calorimeter	構成	layers	radiation(interaction) length
EMCAL	W3mm+Sci2mm+Air1mm	30 layers	$26 X_0$
HDCAL	Pb20mm+Sci5mm+Air1mm	50 layers	$6 \lambda_I$

ストリップの命名と約束 本研究において、X 方向により細分化されたストリップを x ストリップ、Y 方向により細分化されたストリップを y ストリップという。本誌において、特に言及しなければ横方向を x 軸、縦方向を y 軸とする。図 4.3 に x、y ストリップの断面図を示す。

4.3.1 EMCAL

3 章で説明したように、 $\sigma_{confusion}$ を小さくするための方法のひとつに、電磁シャワーの広がりをお小さくすることがあげられる。そのために、EMCAL の吸収層にモリエル半径が小さいタンゲステン (W) を使用した。

モリエル半径とは、その半径内に電磁シャワーの落とすエネルギーの 90% が含まれるというものである。これは、カロリメータの物質質量により決まるものでタンゲステンはモリエル半径が非常に小さい重元素である。以後モリエル半径を R_M と書く。

シンチレータを検出体として使用することで比較的低コストで、構造のデザインを選択できる。 R_M を小さくするためにシンチレータも薄くする。(現在、2mm~3mm の厚さが考えられている)

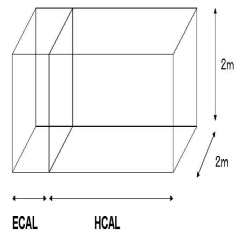


図 4.4: カロリメータ

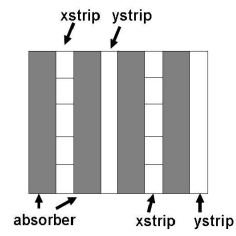


図 4.5: x、yストリップの配置

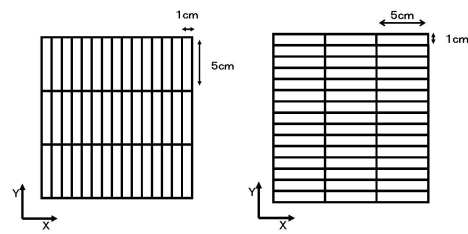


図 4.6: ストリップの断面図
左がxストリップ、右がyストリップ

検出体を細分化する方法として、今考えられているのはシンチレータを正方形のタイル状にして敷き詰める方法と、幅 1cm のストリップ状にして敷き詰める方法の 2 種類がある。

表 4.4: W, Fe, Pb の違い

物質	$R_M(\text{cm})$	$X_0(\text{g}/\text{cm}_2)$	$\lambda_I(\text{g}/\text{cm}_2)$
W	0.6909	6.76	185
Fe	12.5664	13.84	131.9
Pb	1.223	6.37	194

第5章 クラスタリング

5.1 イントロダクション

シンチレータをタイル状にする場合に、今考えられている最小のサイズは $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ である。シンチレータを $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ にすると読み出しチャンネルが膨大な数になりコストがかかる。これらを改善する方法として、 1cm 幅のストリップ($1\text{cm}\times 5\text{cm}\sim 20\text{cm}$)にする方法が考えられている。例えば、 $1\text{cm}\times 5\text{cm}$ のストリップを用いて $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ と同等の性能が出せれば、チャンネル数が5分の1になりコストが抑えられる。

よって、本研究では、自分のアルゴリズムを用いてストリップ型カロリメータと $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ のタイル型カロリメータとの比較を行った。また、最適なストリップのサイズを探求する。

3章で述べたように、ジェットのエネルギ分解能をよくするためにカロリメータ内の荷電粒子のエネルギと中性粒子のエネルギを分離する必要がある。そこで、カロリメータでのエネルギとカロリメータに入射する粒子とを1対1で対応づける必要がある。カロリメータの検出体を荒くすると、 $\sigma_{confusion}$ が悪くなり、対応がつけられなくなる。しかし、構造から決まる以上の性能を出せるように本研究ではクラスタリングアルゴリズムを考えた。

本研究では、クラスタリングを以下の手順で行った。また、クラスタリングをカロリメータからのヒット情報を基にして行った。

1. ヒットストリップの定義
2. 隣接したヒットストリップの結合
3. クラスタの分離
4. x , y クラスタの対応付け

以下では、これらが必要な理由とそれぞれの研究について報告する。

5.1.1 ヒットストリップの定義

ヒットストリップとは、本研究において荷電粒子が通過したとみなせるストリップのことである。実際の実験では荷電粒子がシンチレータを掠めた場合にも小さな信号を出す、これらはノイズに埋もれてしまう。またこの小さな信号をカットせずに使用すると、処理に時間がかかるので、無視できるくらい小さな信号はエネルギスレッシュホールドを設けることでカットし、残ったものをヒットストリップとした。

ヒットストリップのためのエネルギスレッシュホールドの設定 MIP¹がEMCALのシンチレータ(厚み 2mm)を通過するとどれくらいのエネルギを落とすか調べてみる。エネルギが 10GeV の μ を入射させ、ひとつのストリップにどれくらいのエネルギが落ちるかを図5.1に示す。

¹荷電粒子のエネルギがある程度よりも高くなると、電離損失は粒子の種類にもエネルギにもよらずほぼ一定になり物質によって多少の違いはあるが、大体 $1.5\sim 2.0\text{MeV}/g\text{cm}^{-2}$ となる。この状態の粒子を最小電離の粒子(MIP)という。

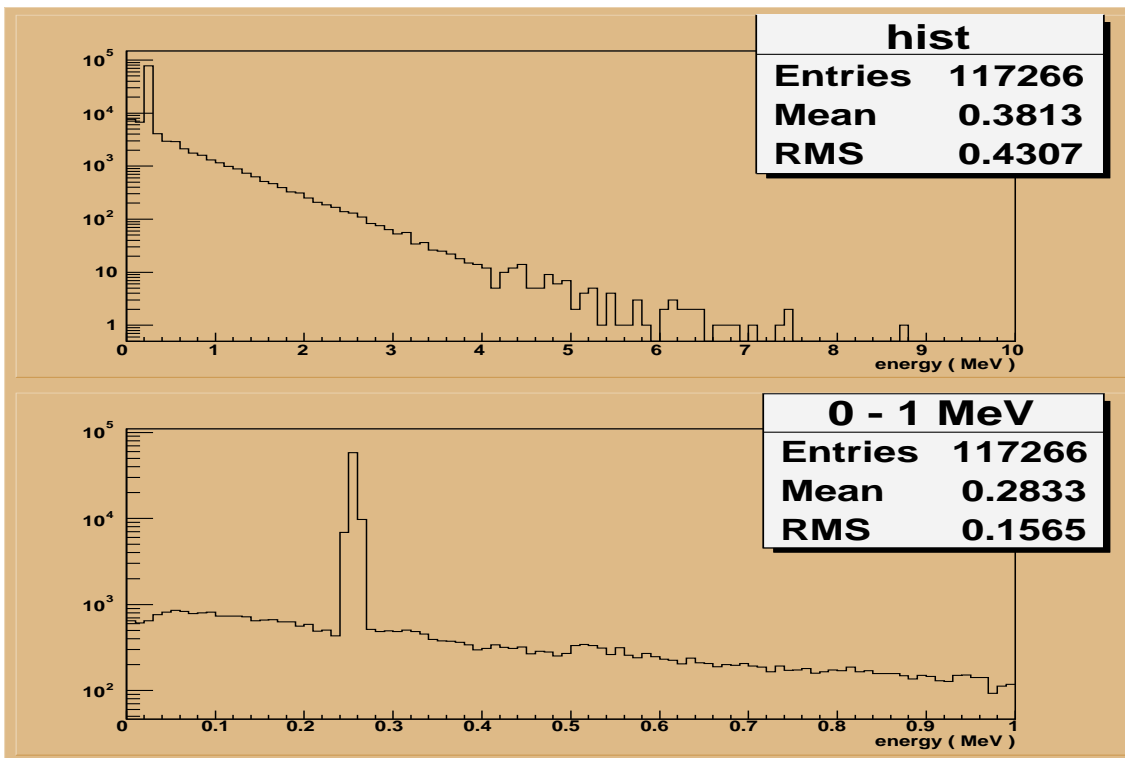


図 5.1: 横軸： μ の落としたエネルギー 縦軸：エントリー数 上図：0~10GeV 下図：0~1GeV μ を 10GeV で入射させている

図 5.1 より、MIP がシンチレータを通過すると約 0.25MeV のエネルギーを落とすことがわかる。これを参考にしてヒットストリップのエネルギースレッシュホールドを以下のように決定した。

エネルギースレッシュホールドは MIP が落とすエネルギーよりも小さくする必要がある。0~0.25MeV の間の最適な値を決めるために 1GeV と 10GeV の γ を別々に入射させ、スレッシュホールドによってどのようにクラスターのエネルギーが変化するか確かめた。

図 5.2 より、スレッシュホールドが 0.1MIP (0.025MeV) 以下のところまでがカロリメータの全エネルギーをほぼ網羅しているので 0.1MIP を今回のヒットストリップのエネルギースレッシュホールドとした。

5.1.2 隣接したヒットストリップの結合

隣接したヒットストリップの結合が必要な理由 1つの粒子がカロリメータに入射したとき様々な相互作用を起こし複数のヒットストリップを作る。トラッカーの情報とクラスターの情報を 1対1に関連付けするためにこれらの複数のヒットストリップをひとまとめにする(クラスターを作る)必要がある。

結合の仕方 本研究では、シンチレータをストリップにしているために x, y 層で構造が異なる。よって、 x, y 層別々に処理していく方法をとった。

どのように処理を行ったかについて以下に説明する。これらは、3次元的に行ったが、以下の説明は2次元で書いてある。

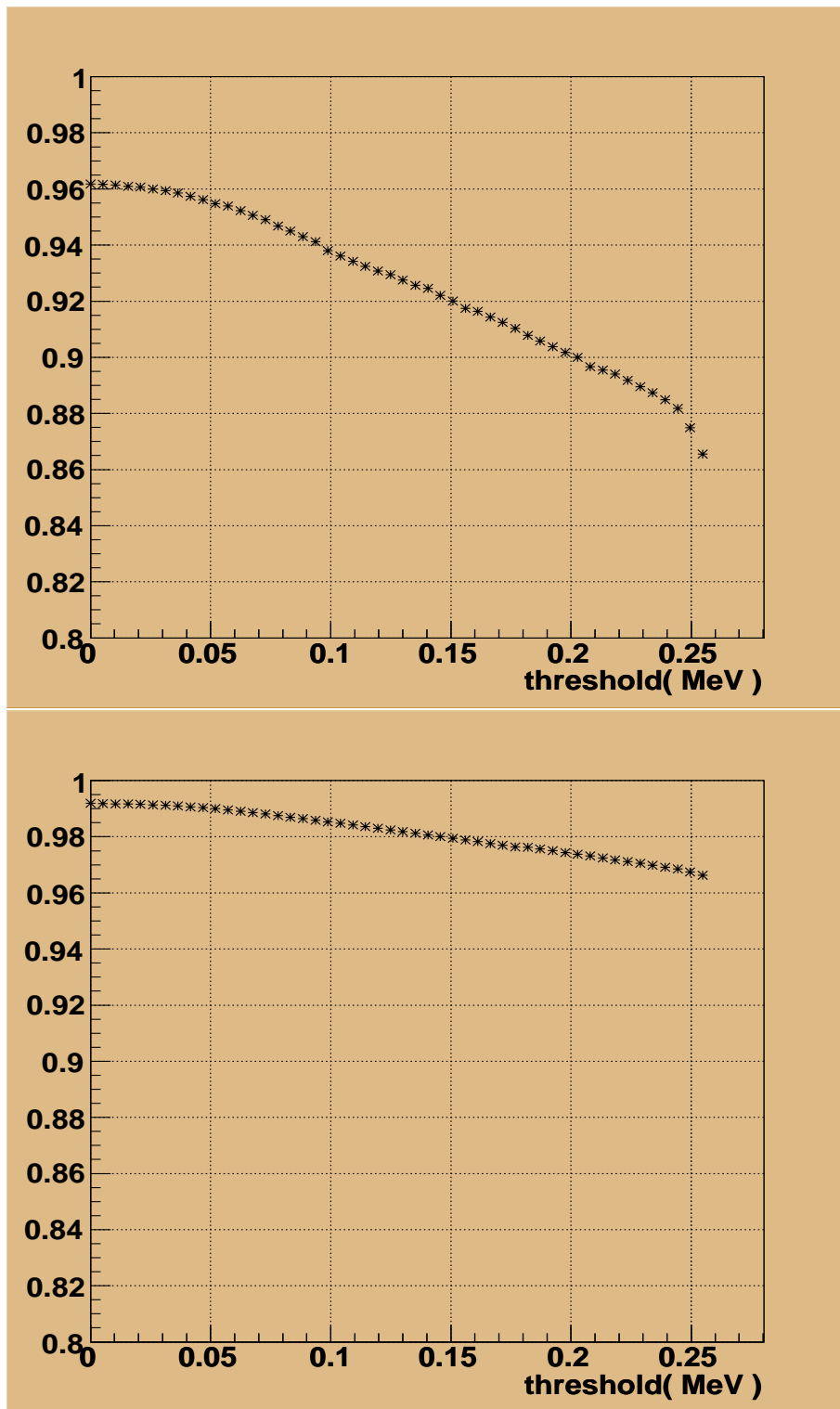


図 5.2: 横軸:スレッシュヨルド 縦軸:一番大きなクラスターがカロリメータに落ちた全エネルギーに占める割合

上図: $\gamma 1\text{GeV}$ 下図: $\gamma 10\text{GeV}$

- (a) 全ヒットストリップの中で1番エネルギーが落ちたヒットストリップを見つける
- (b) そのまわりを見て同じクラスターに属するヒットストリップがあるか確認する
- (c) まわりにヒットストリップがあった場合には、そのまわりも再帰的に調べる

以上の手順を、ヒットストリップがなくなるまで続ける。(d)

これらの手順について以下に詳細を示す。

図5.3に示すような仮想的なイベントがあったときに、これらの手順によってどのようにクラスターが作られるかを示す。

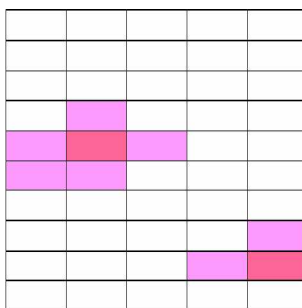
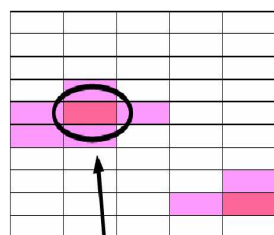


図 5.3: 仮想的なイベント



1番エネルギーが落ちたストリップ

図 5.4: (a) の概念図

カロリメータにあるヒットストリップの中で1番エネルギーが落ちたヒットストリップを見つける。

結果 これらの手順を終えると図5.8のようになる。

モリエル半径についての考察 クラスタリングにおける注目する範囲を決めるためにモリエル半径について調べた。図5.9は、エネルギーの異なる γ を入射させたときにシャワーの広がりを見たものである。 R_M が入射粒子のエネルギーによらず物質のみに依存するから、ヒストグラムから確認できる。

5.1.3 クラスターの分離

必要な理由 $\sigma_{confusion}$ を良くするための方法である。ジェットがカロリメータに入射したとき、多数の粒子のシャワーが重なってカロリメータ内にできたクラスター数と入射粒子との数がこと

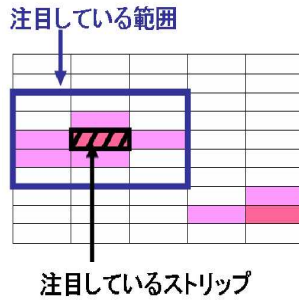


図 5.5: (b) の概念図

手順 (a) で見つけたヒットストリップに注目する。このヒットストリップのまわりにある範囲を設けて、この範囲内にあればこの注目しているヒットストリップと同じクラスターに属しているとみなす。本研究では、この値を $2R_M$ としたが、これは可変のパラメータである。

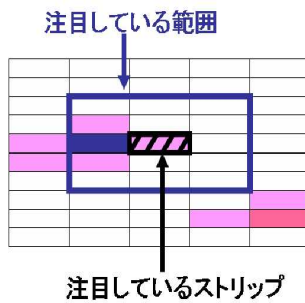


図 5.6: (c) の概念図

手順 (c) の範囲にあるヒットストリップに対しても同じ処理を再帰的に行う。

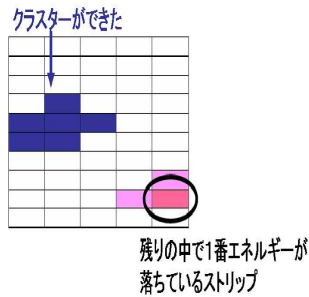


図 5.7: (d) の概念図

手順 (c) が終わった段階では、図の青で示されたように隣接するヒットストリップは同じのクラスターに属しているとみなされる。あとは、手順 (a),(b),(c) をヒットストリップがすべてなんらかのクラスターにまとめられるまで続ける。

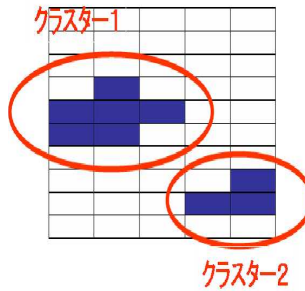


図 5.8: 結果

なってしまう。よって、シャワーを分離して入射粒子の数とクラスターの数を同じにしたい。また、荷電粒子と中性粒子の混合を少なくするためにもクラスターの分離が必要となる。

さらに、1cm×1cm のタイル型に比べ、1cm×5cm のストリップ型を用いるとシャワーの重なりが増える。だから、クラスターの分離がより意味を持つようになる。

クラスターを分離する方法

方法1 各層におけるヒットストリップのうちピークのことをピークストリップと呼ぶことにする。以下の4つの手順から成り立っている。

1. ピークストリップを奥行き方向につなげてクラスターの軸 (以後、串と呼ぶ) を作る。
2. その軸と各層との交点を算出する。
3. 分離したい方の層のクラスターに属するヒットストリップそれぞれと串との距離を計算する。
4. 交点とヒットストリップとの距離の近い方を、その軸に振り分けていく。

以下に、より詳細な説明を書く。

図 5.10 に示す仮想的なイベントを考える。x ストリップでは1つのクラスターとなり、y ストリップでは2つのクラスターとなる。このクラスターのエネルギーを x、y の1次元に射影すると図 5.11 のようになる。これを、分離アルゴリズムの方法1で分離していく。

以上の手順により、2つのクラスターに分離することが可能となる。しかし、図 5.16 に示すようなイベントがしたとき、方法1で解析すると、図 5.20 に示すような振り分けになり、2本の串が存在しているにもかかわらずクラスターがひとつと認識されてしまう。

そこで、このような問題を解決する方法として方法2を考えた。以下は、方法2の詳細を示す。

方法2 方法1と手順2まで同じで、それ以降が異なる。串と各層との交点を求め(図 5.18)、その交点をヒットストリップに垂直に射影する(図 5.21)。そして、エネルギーをそこに集中させる。方法2が方法1と最も異なる点は、1本のストリップに落ちたエネルギーを分割するところである。

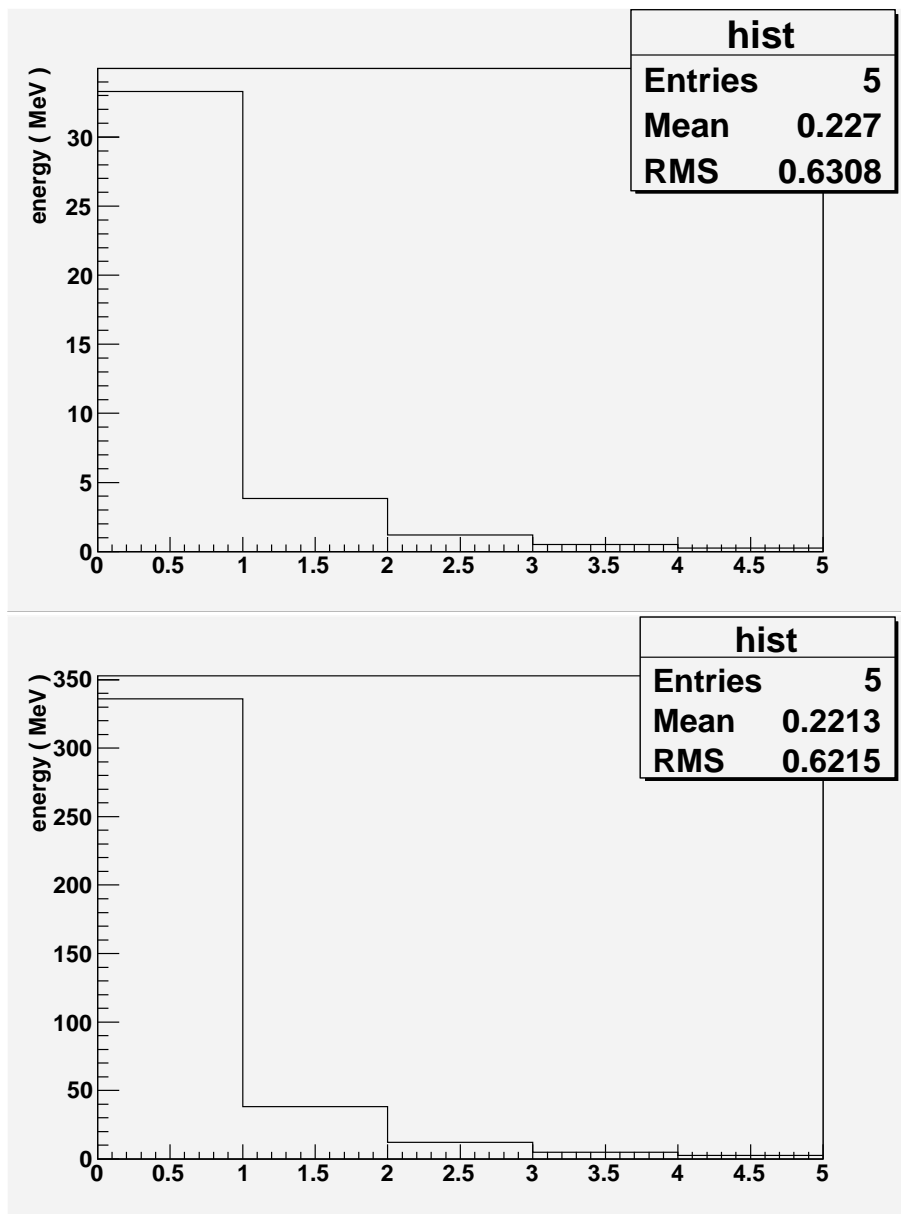


図 5.9: モリエル半径の検証
 横軸 : シャワーの中心からの距離 (mm)
 縦軸 : deposit energy (MeV)

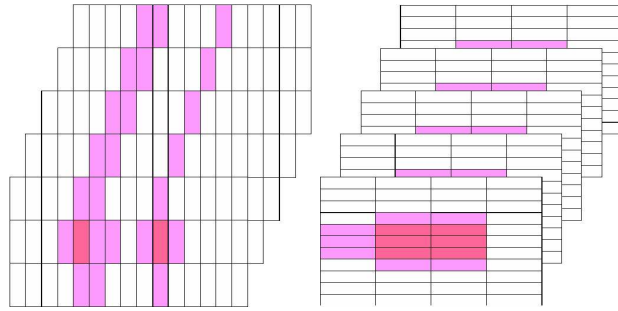


図 5.10: 仮想的なイベント
 x ストリップ、 y ストリップのヒットストリップを別々に表した図

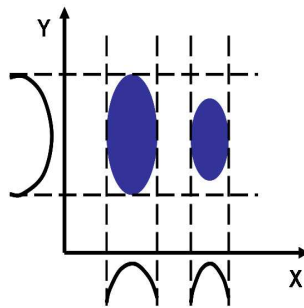


図 5.11: 仮想的なイベントを x 、 y 方向からみた様子
 図 5.10 の仮想的なイベントに対してクラスターのエネルギーを x 、 y 方向に射影した様子

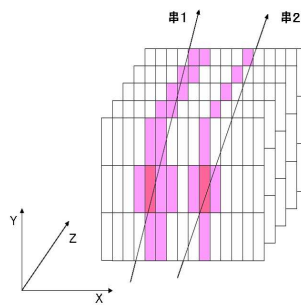


図 5.12: 方法 1 : 1. 串の作成
 図 5.10 より、 x ストリップの情報を使うと y ストリップを 2 つのクラスターに分けることが可能となる。そこで、 x ストリップのピークストリップを z 方向に繋げていき、それらに最小 2 乗法を使うことでこのように 2 本の串ができる。

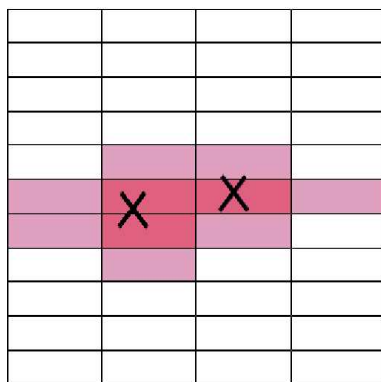


図 5.13: 方法 1 : 2. 串と層における交点の算出
串と y ストリップの層との交点を求めると、ここに×で示す交点ができる。

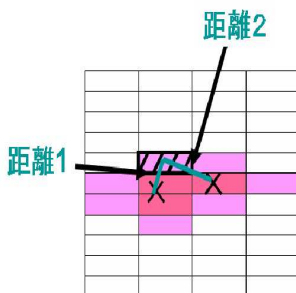


図 5.14: 方法 1 : 3. 串とヒットストリップとの距離を計算する
串と注目しているヒットストリップとの距離を計算する。この場合は、2本の串との距離をそれぞれ計算する。この計算を、この層にあるヒットストリップに対してすべて行う。

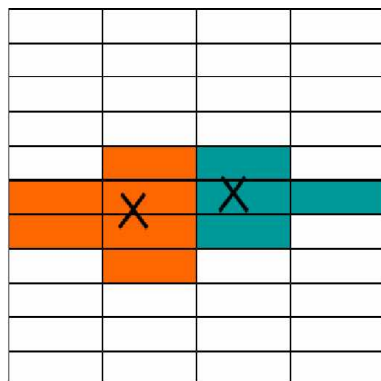


図 5.15: 方法 1 : 4. 分離後のクラスター
ヒットストリップを距離の近い方の串に肉付け (振り分け) し終わった様子。

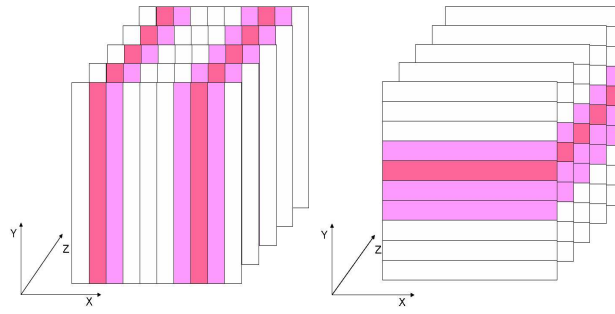


図 5.16: ストリップサイズの大きい場合の仮想的なイベント

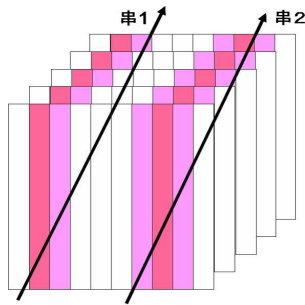


図 5.17: 手順 1



図 5.18: 手順 2



図 5.19: 手順 3

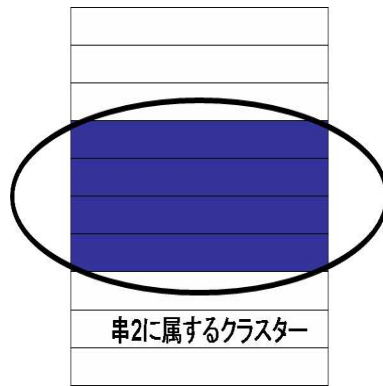


図 5.20: ストリップサイズが大きく、クラスターの分離に方法 1 を適用した結果
ヒットストリップと串との距離でのみ判断しているため、片方の串に全エネルギーを取られる結
果となる。



図 5.21: 方法 2 : 手順 3. 交点をストリップに射影

図 5.22 より、ヒットストリップのエネルギーを分配する。分配する方法は、串のもとになった
2つのクラスターのエネルギーを E_1 、 E_2 、ヒットストリップのエネルギーを e_{hit} 、分離後の2つ
のエネルギーを e_1 、 e_2 とすると

$$e_1 = e_{hit} \times \frac{E_1}{E_1 + E_2}$$

$$e_2 = e_{hit} \times \frac{E_2}{E_1 + E_2}$$

となる。

方法 2 を適用することで大きなサイズのストリップに対して方法 1 より改善される。

5.1.4 x, y ストリップの対応付け

次に、複数のクラスターが x, y のストリップにできた場合どのクラスター同士がペアになるか
考える必要がある。そこで、次のような χ^2 を定義し、 χ^2 が小さくなるように x, y の対応付けを
行った。

$$\chi^2 = \left(\frac{E_x - E_y}{\sigma_{E_x - E_y}} \right)^2 + \left(\frac{X_x - X_y}{\sigma_{X_x - X_y}} \right)^2 + \left(\frac{Y_x - Y_y}{\sigma_{Y_x - Y_y}} \right)^2 + \left(\frac{Z_x - Z_y}{\sigma_{Z_x - Z_y}} \right)^2$$

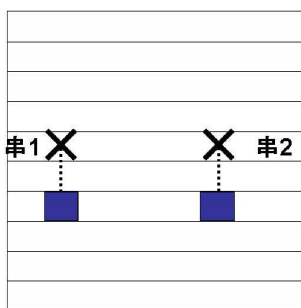


図 5.22: 分配後の様子
射影されたところに、注目しているヒットストリップのエネルギーを分配する。

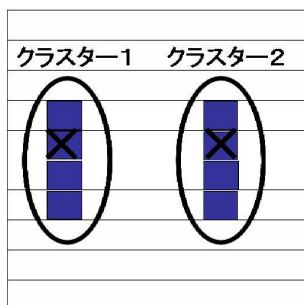


図 5.23: 方法2適用後

変数名	意味
E_x	x ストリップでのクラスターのエネルギー
E_y	y ストリップでのクラスターのエネルギー
X_x	x ストリップでの x 座標
X_y	x ストリップでの y 座標

表 5.1: 命名規則

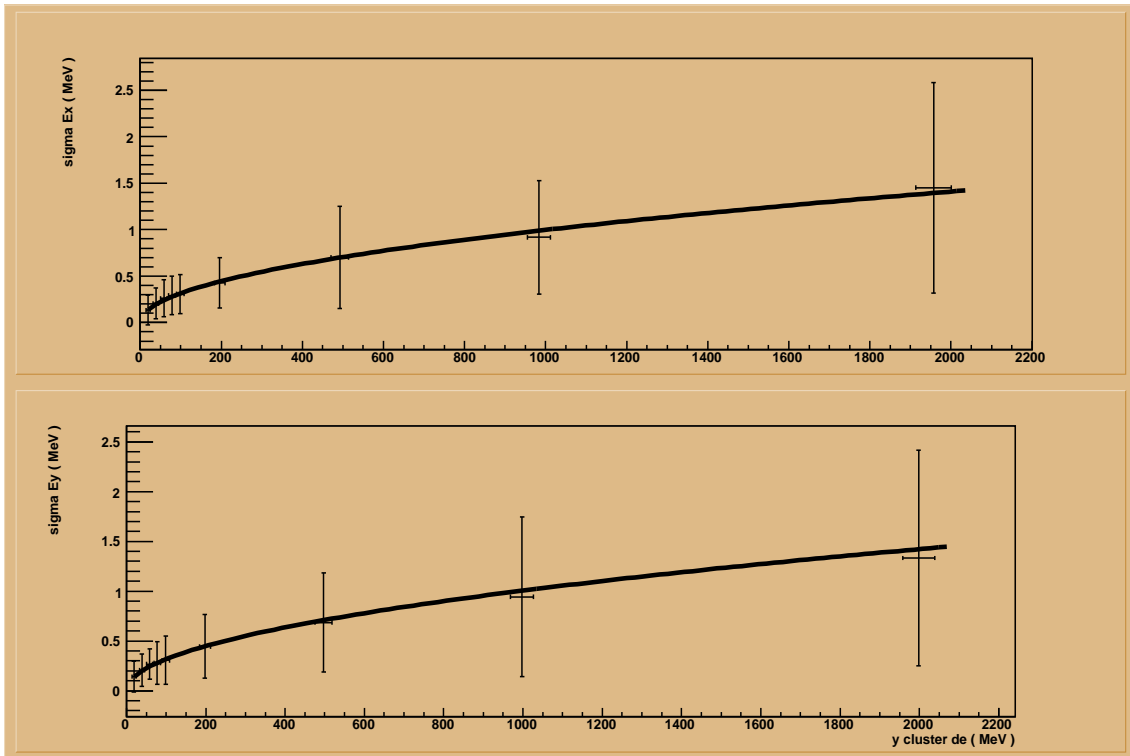


図 5.24: meanE と sigmaE の関係

上図 横軸：x 層のクラスタのエネルギーの mean(MeV) 縦軸：x 層のクラスタのエネルギーの sigma(MeV) 下図 横軸：y 層のクラスタのエネルギーの mean(MeV) 縦軸：y 層のクラスタのエネルギーの sigma(MeV) 1cm×1cm のタイル型のカロリメータに γ を入射させた

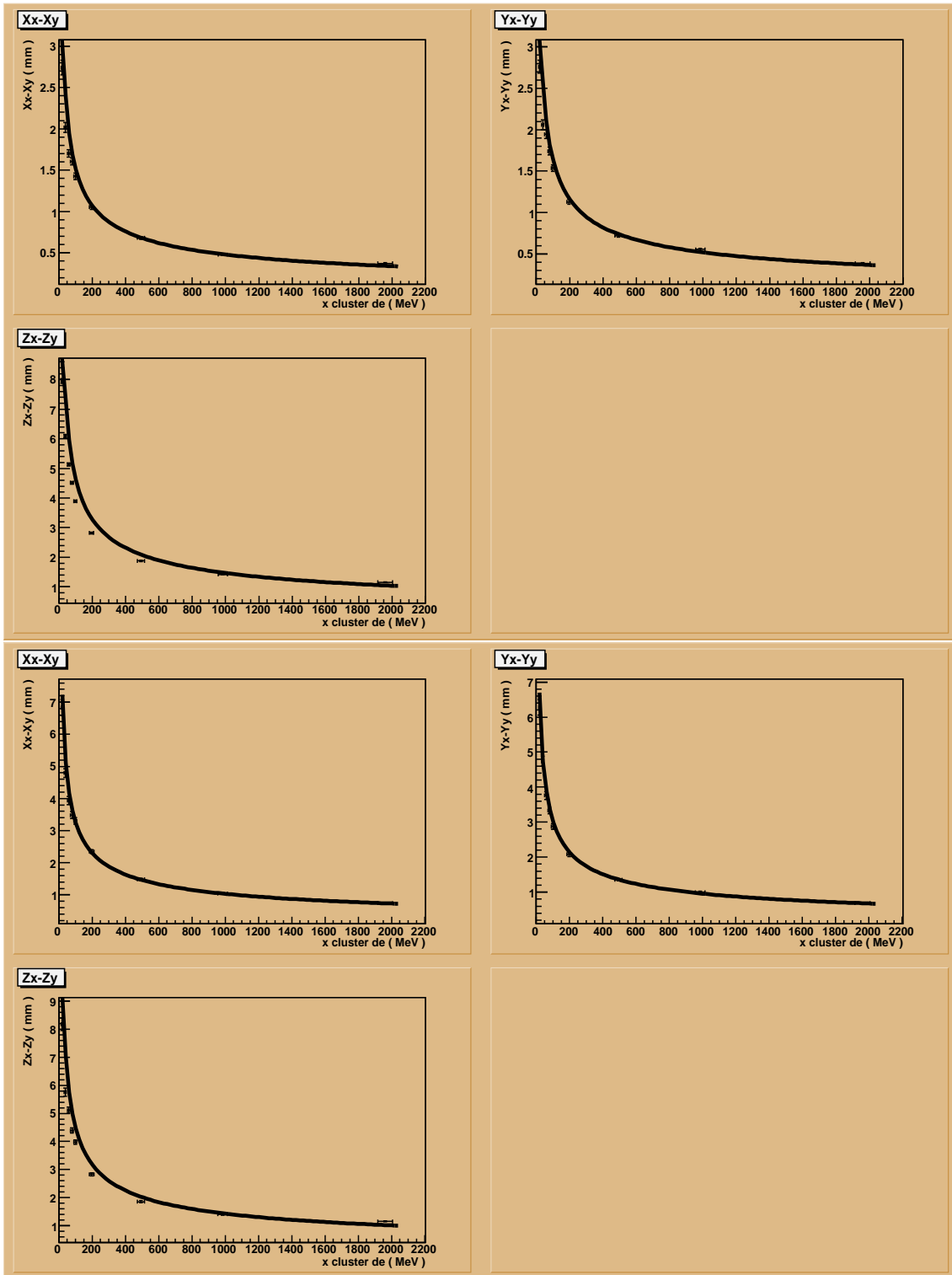


図 5.25: x クラスターのエネルギーと x、y のクラスターの重心間の距離の相関
 上図 シンチレータのサイズが 1cm×1cm 下図 シンチレータのサイズが 1cm×5cm

図 5.24 は、クラスターのエネルギーにおける、mean と sigma の関係である。これらのグラフより σ の値は以下ようになる。

σ	value
$\sigma_{E_x - E_y}$	$0.031 \times (\sqrt{E_x + E_y})$
$\sigma_{X_x - X_y}$	$30.48 / \sqrt{E_x}$
$\sigma_{Y_x - Y_y}$	$28.54 / \sqrt{E_x}$
$\sigma_{Z_x - Z_y}$	$37.26 / \sqrt{E_x}$

表 5.2: σ の値

5.2 π^0 の考察

今までのアルゴリズムを検証するために π^0 を使用する。 π^0 はすぐに崩壊し $\gamma\gamma$ になるので、カロリメータ内では2つのクラスターになるはずである。従って、アルゴリズムを検証する方法として次の2つのことを確認する。

1. 2つのメインクラスターができる
2. 2つのメインクラスターから不変質量を組んだ結果が π^0 の質量 (約 135MeV) になる

ここで、入射エネルギーを大きくすると、 $\gamma\gamma$ の角度が狭くなる。

入射エネルギーと角度には以下のような関係がある。

カロリメータと衝突点の距離を R 、 π^0 の質量を m_{π^0} 、 π^0 の初期運動量を p_{π^0} 、カロリメータに入射したときの $\gamma\gamma$ の距離を Δx とする。図 5.2 より、

$$\Delta x \simeq R\theta \simeq 2.1m \times m_{\pi^0} / p_{\pi^0}$$

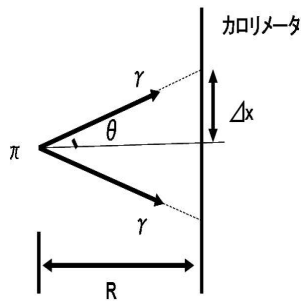


図 5.26: カロリメータに入射するときの $\gamma\gamma$ の距離

また、 π^0 の不変質量は、以下のように表せる。ここで、添え字の 1, 2 の数字はカロリメータ内のできたクラスターに対応する。また、 E 、 P はクラスターのエネルギーから算出したものである。

$$m_{\pi^0}^2 = (E_1 + E_2)^2 - (\vec{P}_1 + \vec{P}_2)^2$$

5.2.1 分離アルゴリズムを適用しない場合

分離をせずに普遍質量を組んだ結果を以下に示す。以下の図は、ストリップサイズを変えたときと、 π^0 の入射エネルギーを変えたときの様子を示している。特に、言及しなければ、図の左上から右に 1GeV, 2GeV, 5GeV, 7GeV, 10GeV, 15GeV の入射エネルギーの π^0 を入射させたものとする。また、横軸は再構成した π^0 の不変質量 (単位は MeV) を表している。さらに、各ヒストグラムは 1000 イベントを入射させたときに、 x 、 y とともにエネルギーの大きい 2つのクラスターを選んできて、 x 、 y の対応付けができたもののみを使用している。

図 5.27~ 図 5.30 に、分離アルゴリズムを適用しない場合の π^0 の不変質量の再構成した結果を示す。135MeV のあたりにピークがきているものは、きちんと 2 クラスターと認識して不変質量の再構成に成功したものだともみなせる。どのストリップにおいても 5GeV までは、不変質量が組めている。

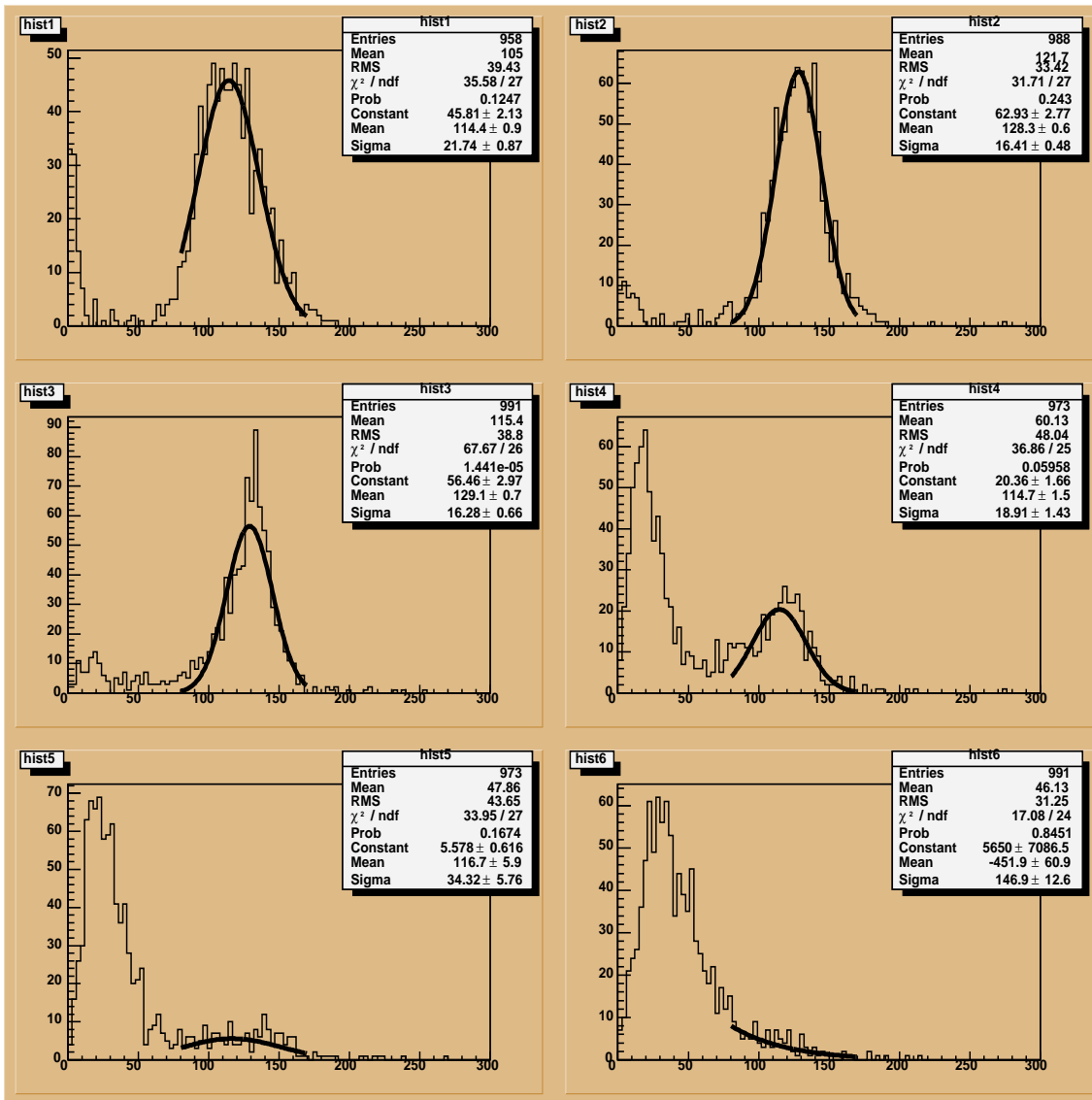


図 5.27: 分離せずに再構成した π^0 の質量、1cm×1cm のタイル型カロリメータ

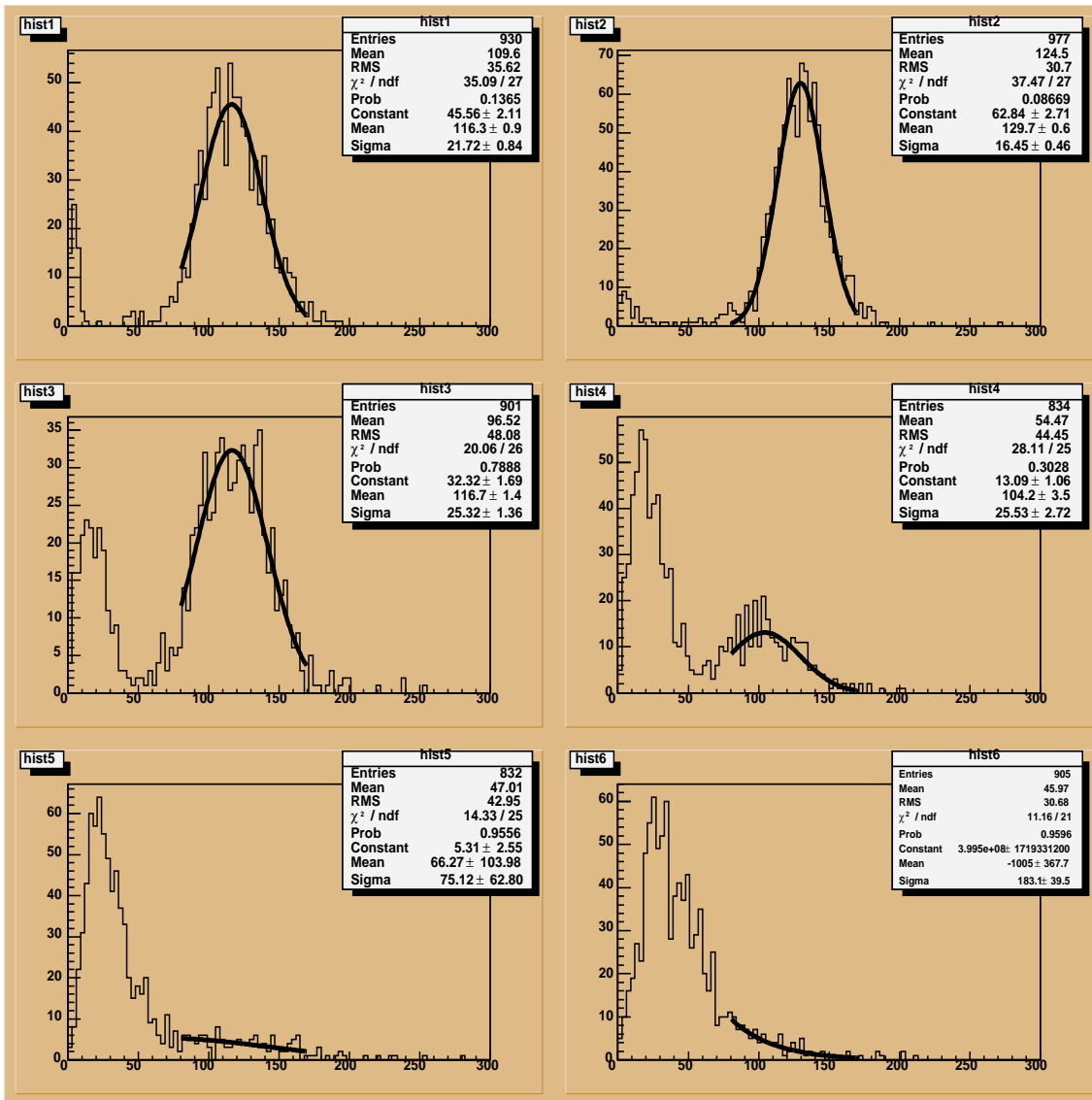


図 5.28: 分離せずに再構成した π^0 の質量、1cm×5cm のストリップ型カロリメータ

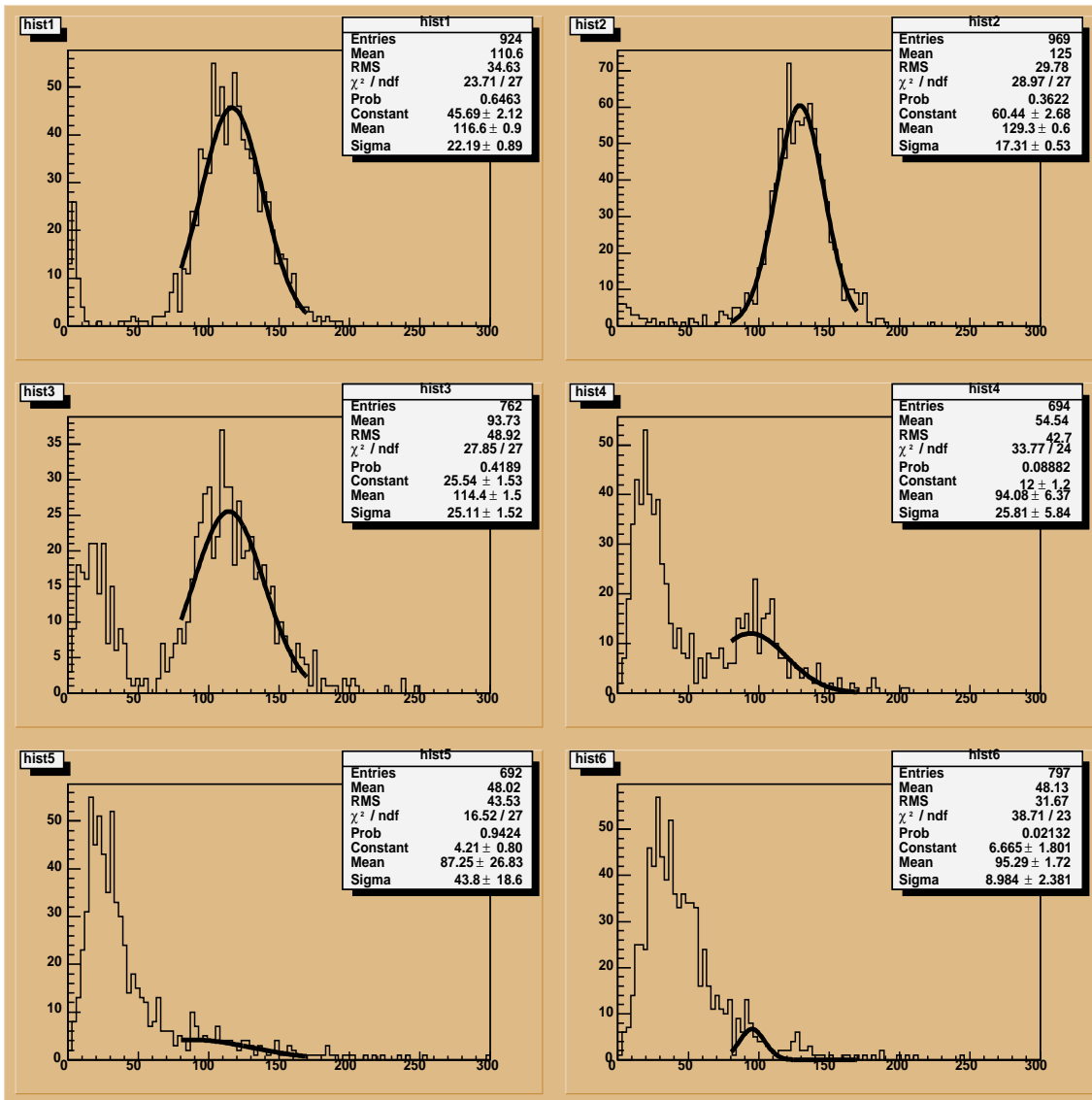


図 5.29: 分離せずに再構成した π^0 の質量、1cm×10cm のストリップ型カロリメータ

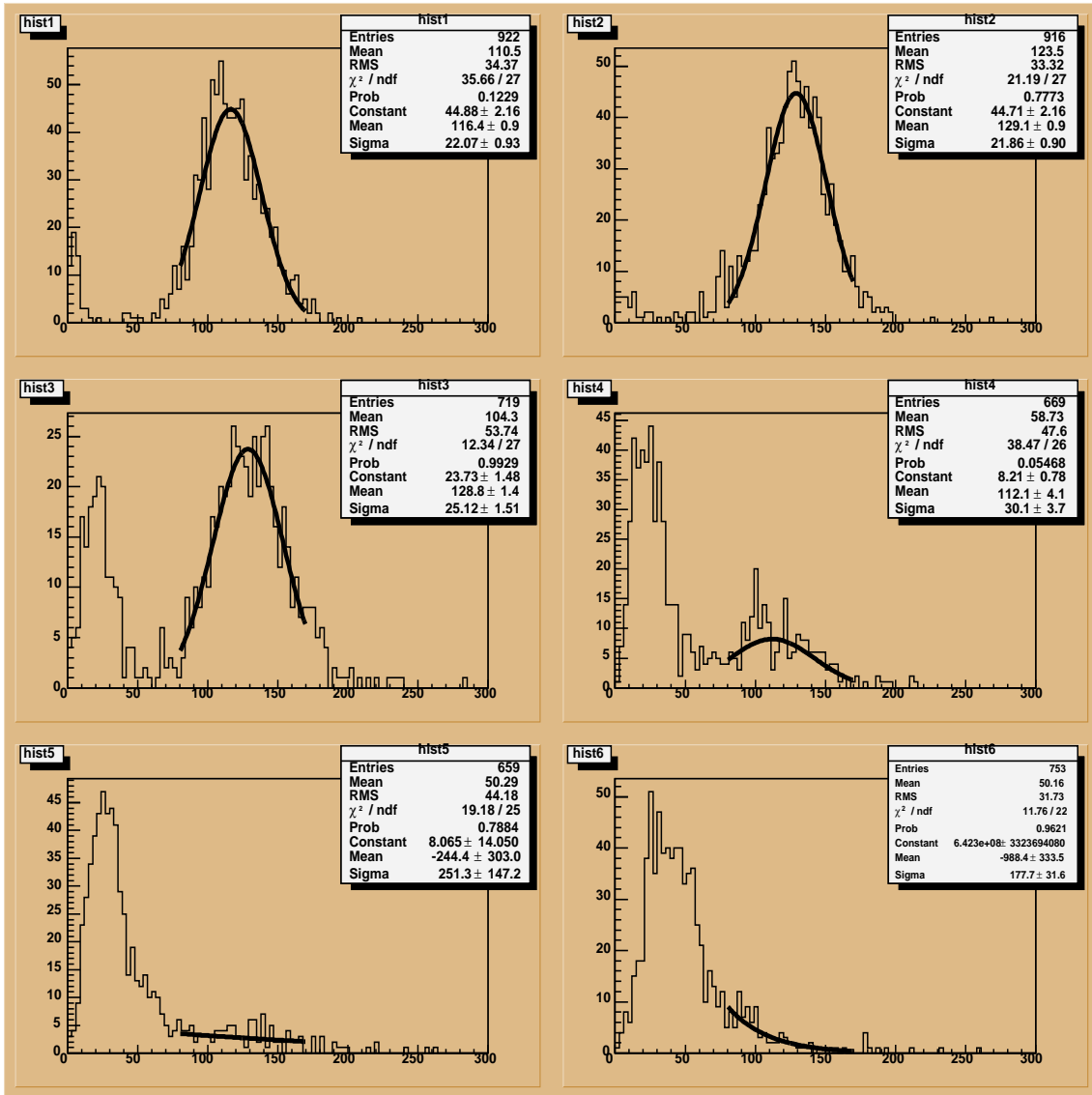


図 5.30: 分離せずに再構成した π^0 の質量、1cm×20cm のストリップ型カロリメータ

しかし、7GeV 以上になると、全タイプのカロリメータで再構成後の質量のピークがかなり低いところに出ていて、再構成に失敗している。この原因は、 2γ をきちんと認識できていないものによる。

図 5.31 に分離を適用しない場合の結果をのせる。10,15GeV は各イベントで再構成できていないので、図 5.31 には載っていない。図 5.31 より、再構成した不変質量の平均値はストリップによって差がないが、分解能は $1\text{cm}\times 1\text{cm}$ タイルが一番いい結果になっている。

これを解決するために、まず分離の方法 1 を適用してみる。

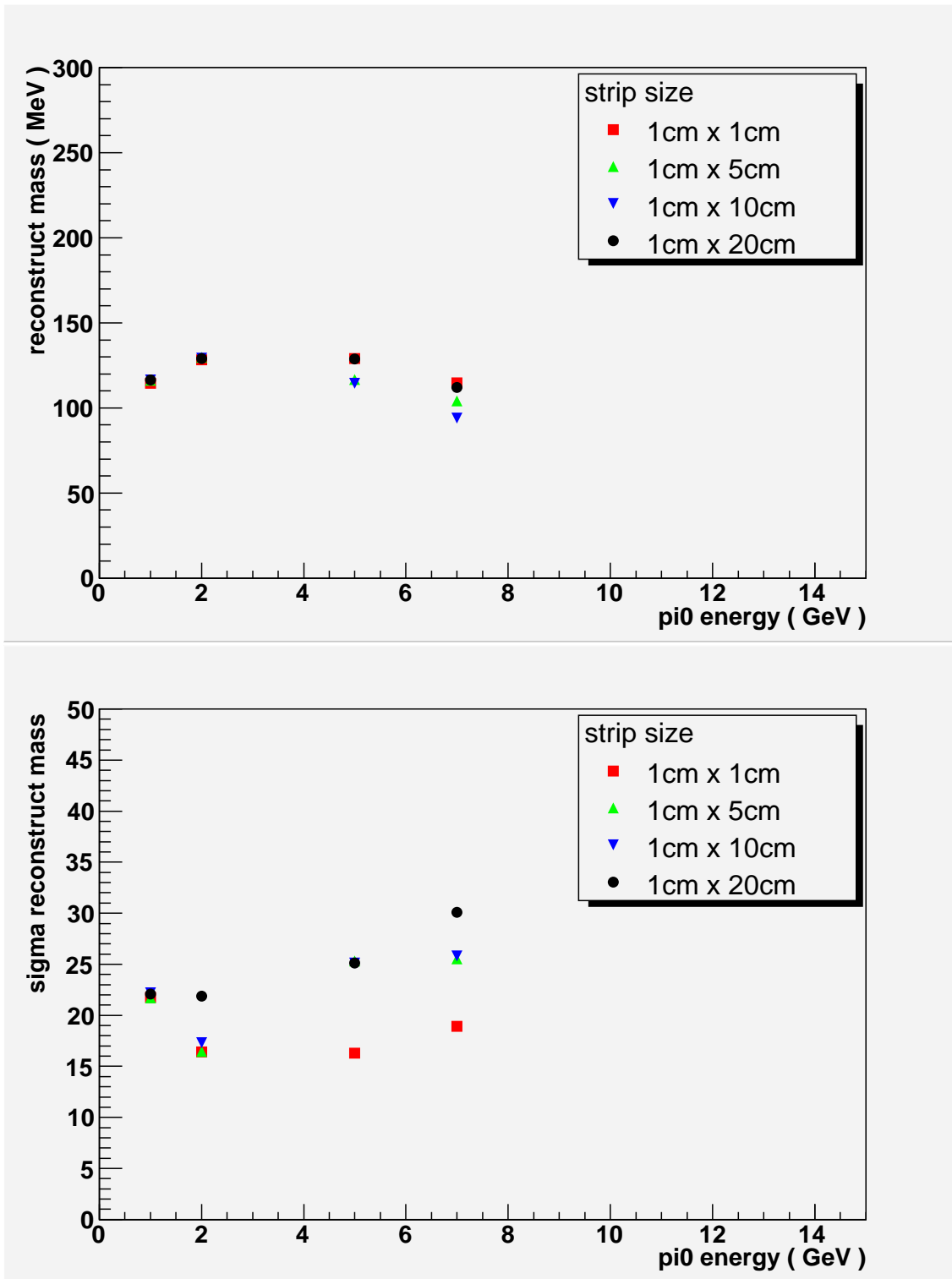


図 5.31: 上図: 横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の平均値 下図: 横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の分解能

5.2.2 分離アルゴリズムの方法1を適用した場合

ここでは、 x 、 y のストリップで小さなクラスター(エネルギーが2 MeV以下のもの)をカットしている。

次に、分離の方法1を適用する。

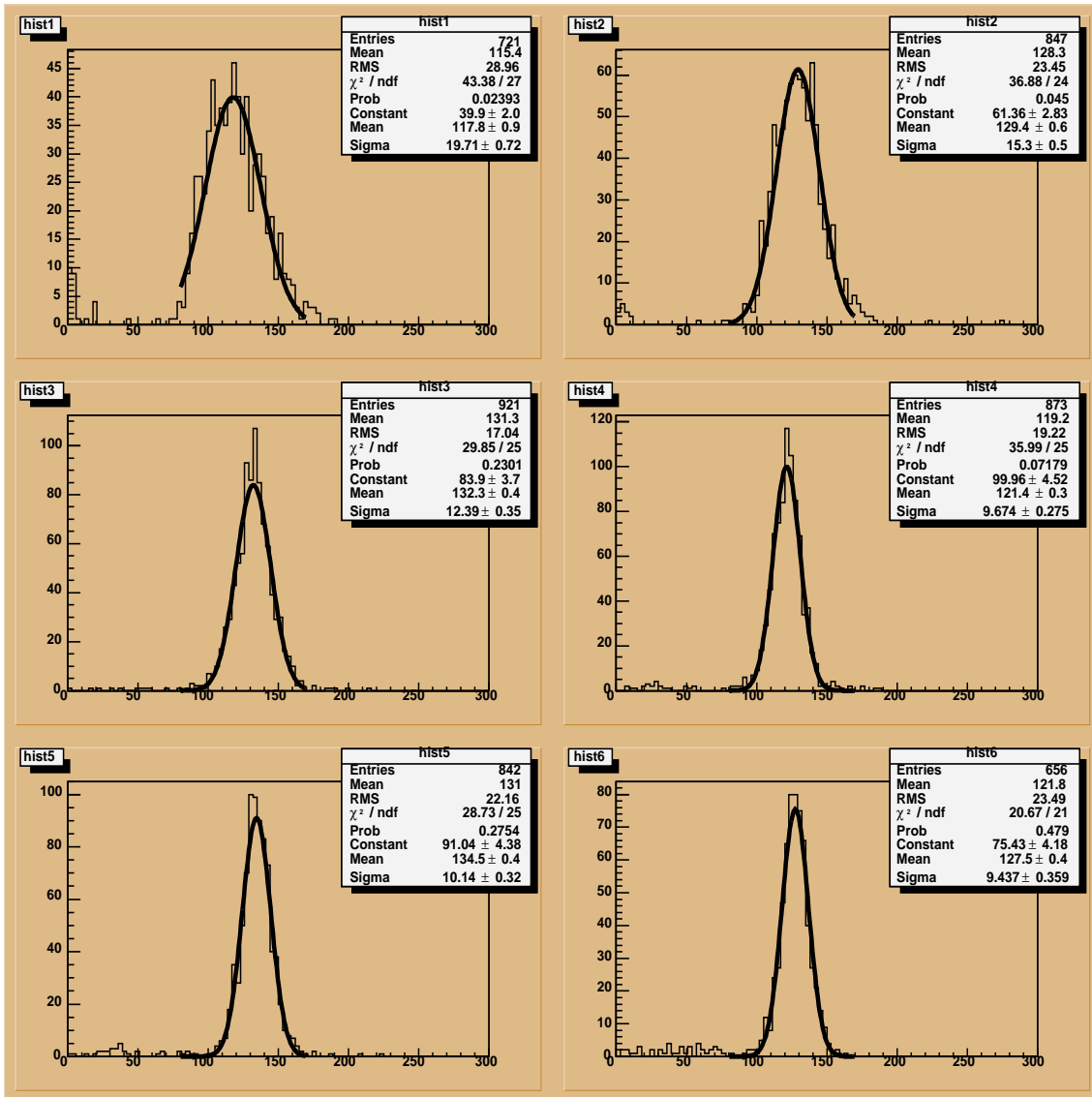


図 5.32: 方法1で再構成した π^0 の質量、1cm×1cm のタイル型カロリメータ

図 5.27、図 5.28 と図 5.32、図 5.33 を比較する。すると、1cm×1cm、5cm のストリップ型カロリメータにおいて 5,7,10,15GeV の入射エネルギーでも再構成に成功するイベント数が大幅に増えた。これは、135MeV のあたりにピークがはっきりと見られるようになったことからわかる。

1cm×10cm のストリップ型カロリメータにおいては、図 5.29 と図 5.34 を比較すると、5,7GeV ではきれいな 135MeV のあたりにピークがきていることがわかる。しかし、10,15GeV になるとピークが見えてはいるが、本来くるべきところにピークがきていない。この原因については現在調査中である。

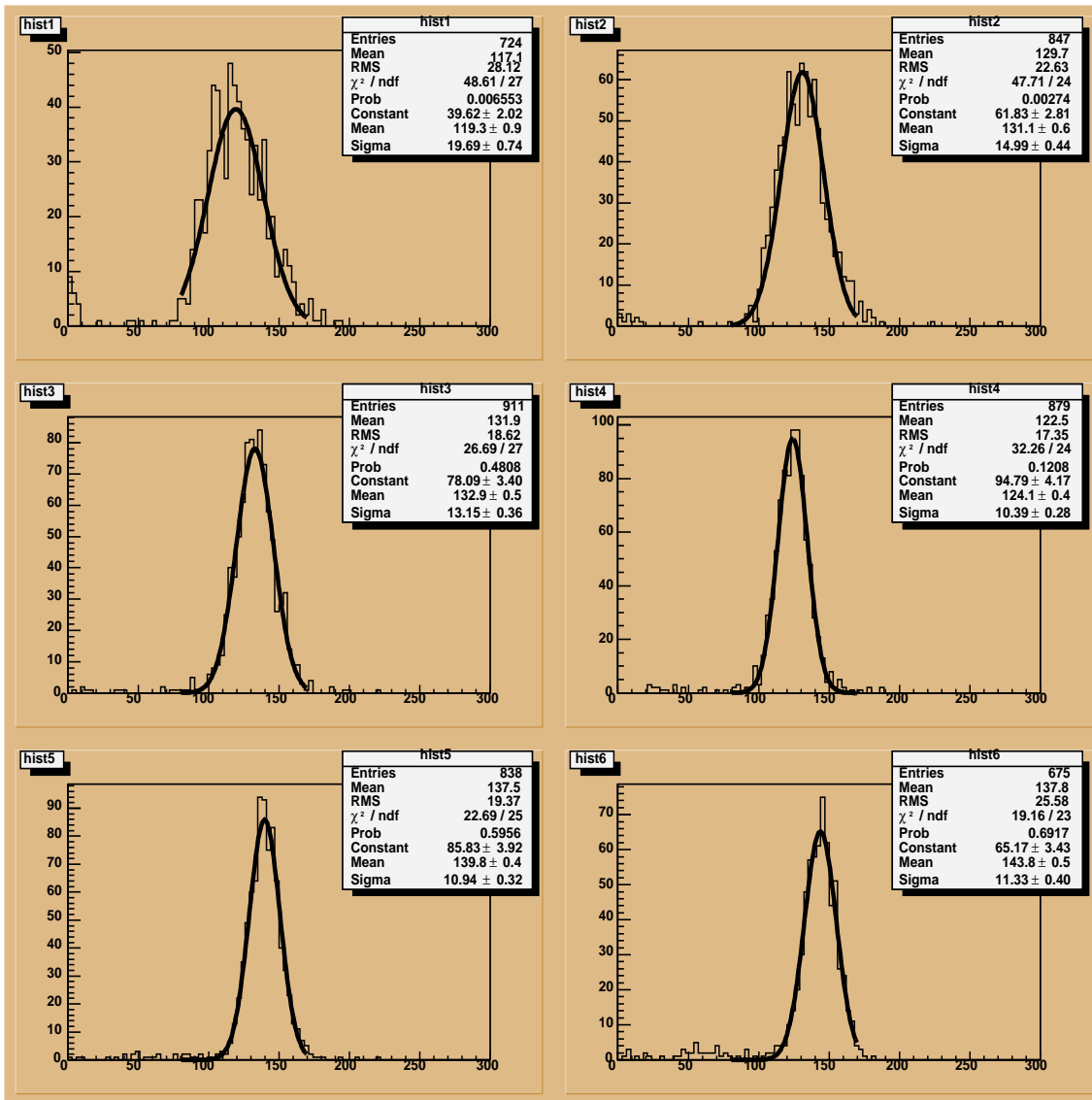


図 5.33: 方法 1 で再構成した π^0 の質量、1cm \times 5cm のストリップ型カロリメータ

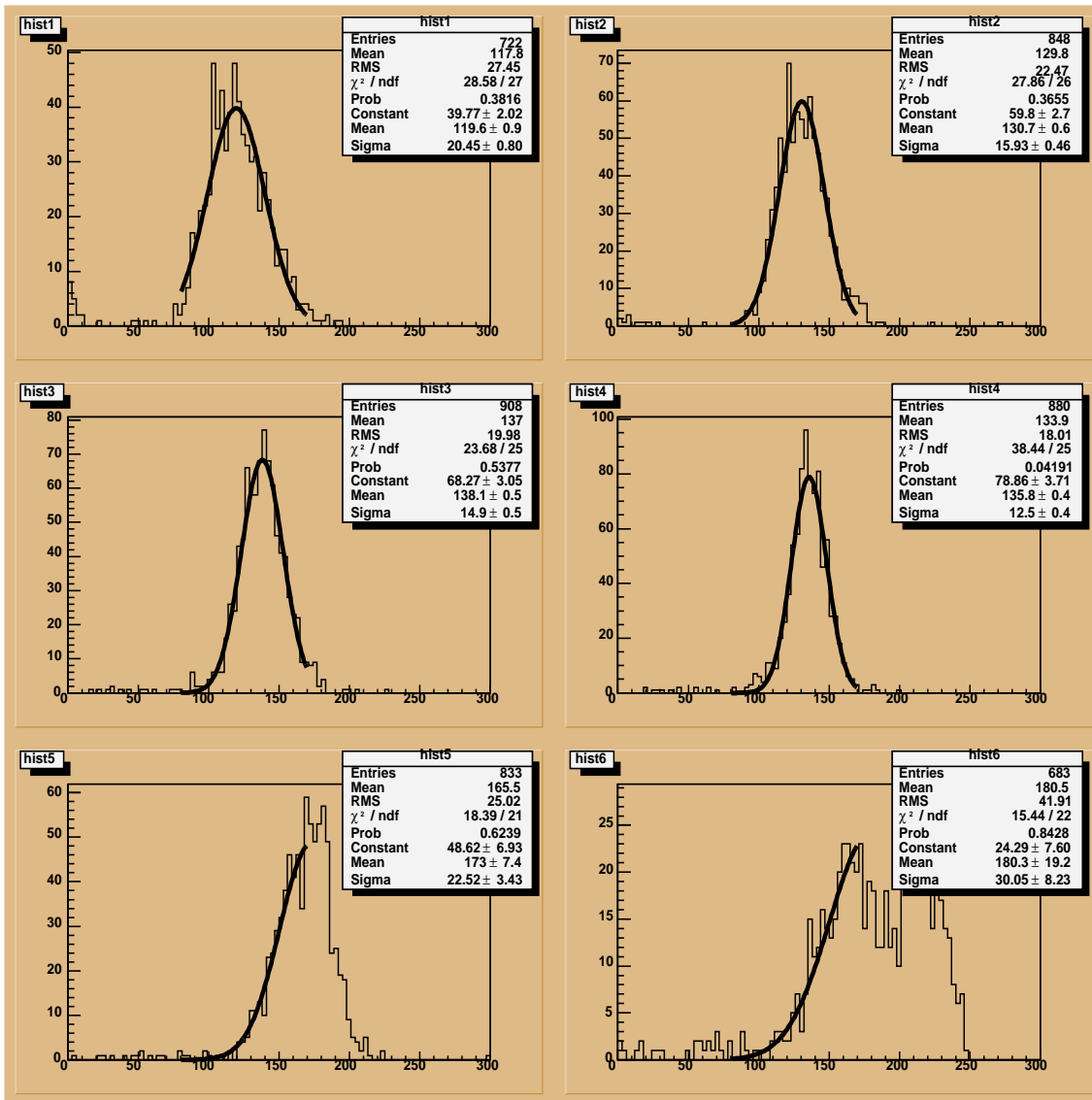


図 5.34: 方法1で再構成した π^0 の質量、1cm×10cm のストリップ型カロリメータ

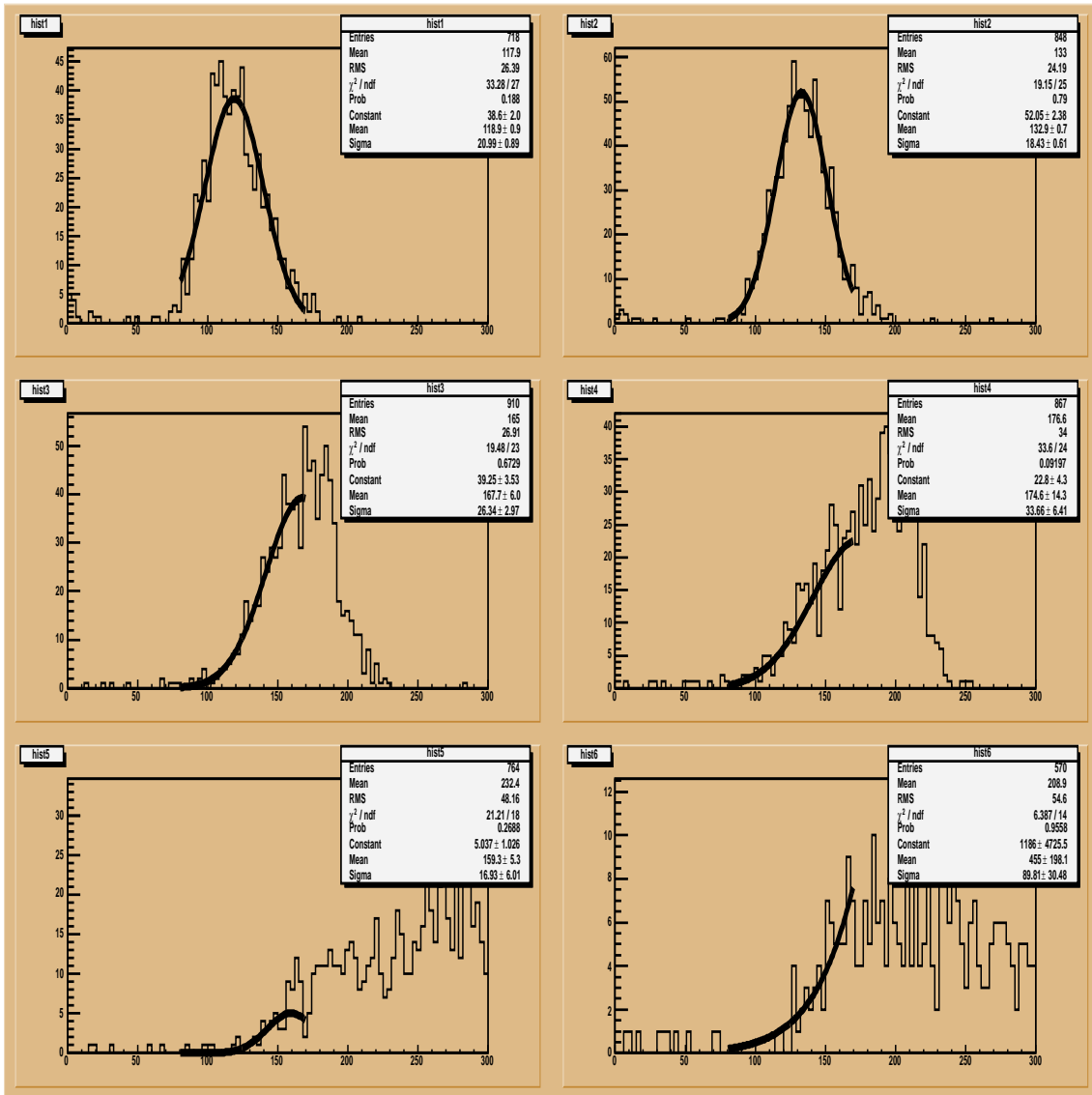


図 5.35: 方法1で再構成した π^0 の質量、1cm×20cm のストリップ型カロリメータ

1cm×20cm のストリップ型カロリメータにおいては、図 5.30 と図 5.35 を比較する。5,7,10,15GeV の入射エネルギーで、図 5.30 に見えていたダブルピークが消え、1つのピークになった。分離することで、 x 、 y ともに2つのメインクラスターを作れたことによる。しかし、ピークが実際の質量よりも大きな値に出ていて、これも今後の研究課題である。

図 5.31 と図 5.36 を比較すると分離前には再構成できなかった1 イベントを再構成できるようになった。

次に、方法 2 を適用する。

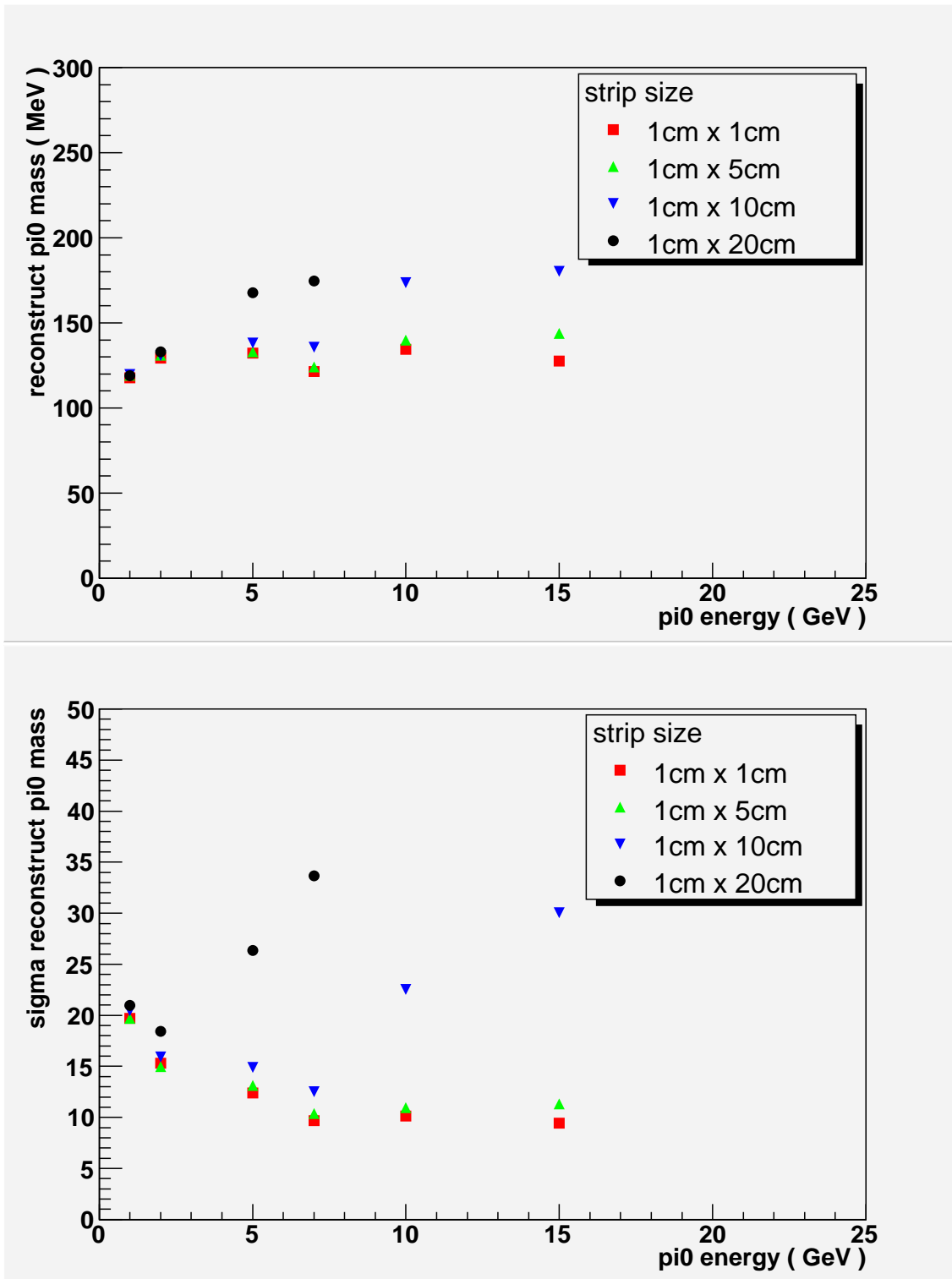


図 5.36: 上図: 横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の平均値 下図: 横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の分解能

5.2.3 分離アルゴリズムの方法2を適用した場合

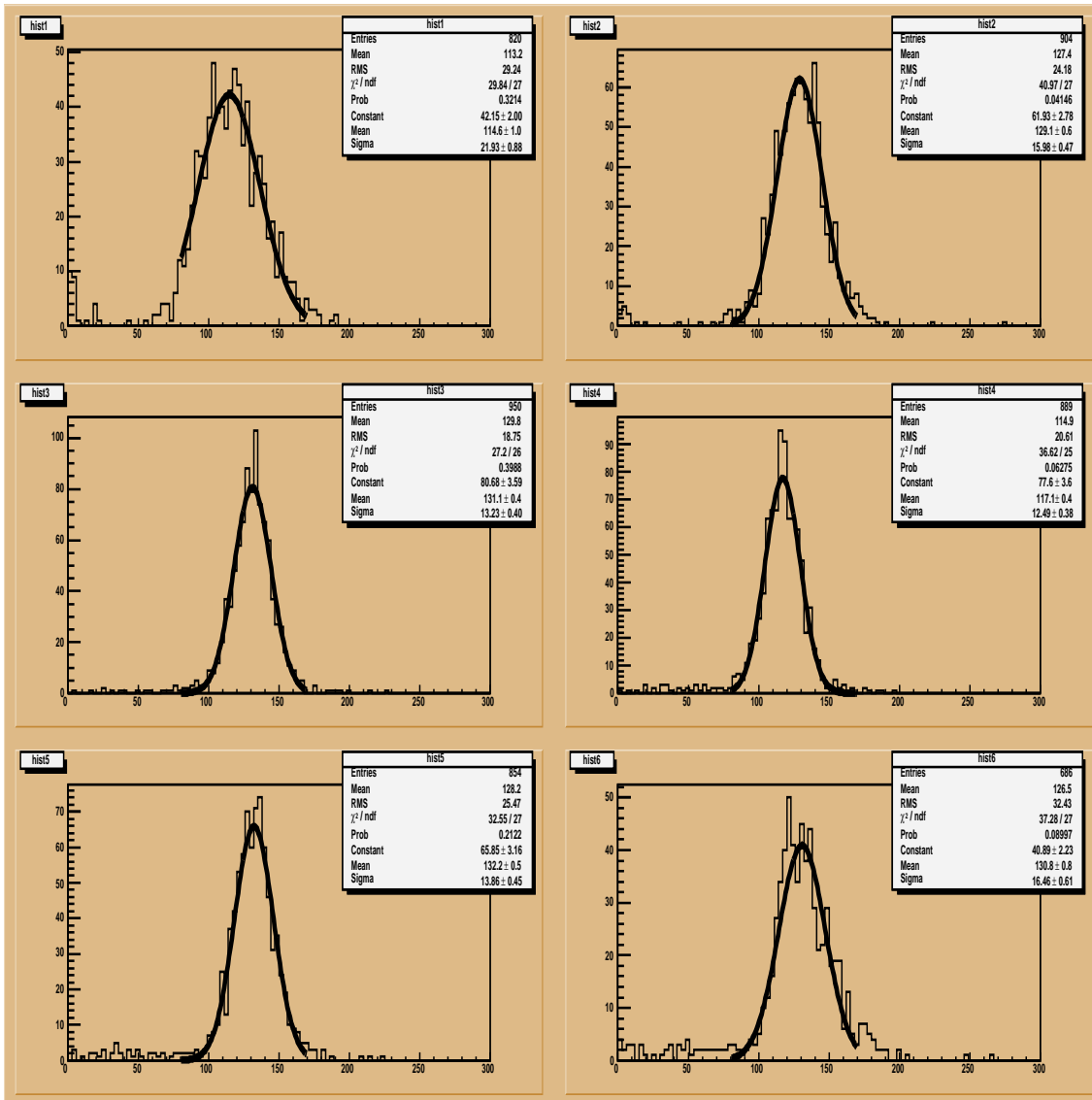


図 5.37: 方法2で再構成した π^0 の質量、1cm×1cmのタイル型カロリメータ

1cm×10cmのストリップ型カロリメータにおいて、図5.34と図5.39を比較する。10,15GeVの入射エネルギーにおいて、方法1よりも正しく再構成できているイベントが増えている。しかし、図5.39の10,15GeVの入射エネルギーで、再構成後の質量がエネルギーの大きい方にテイルをひいている。この原因の特定は現在できておらず今後の課題である。

1cm×20cmのストリップ型カロリメータにおいても同様のことが言える。

図5.41より、再構成した質量の平均値がストリップによらないことがわかる。また、方法1に比べて再構成した質量の分解能においても最もすぐれている。

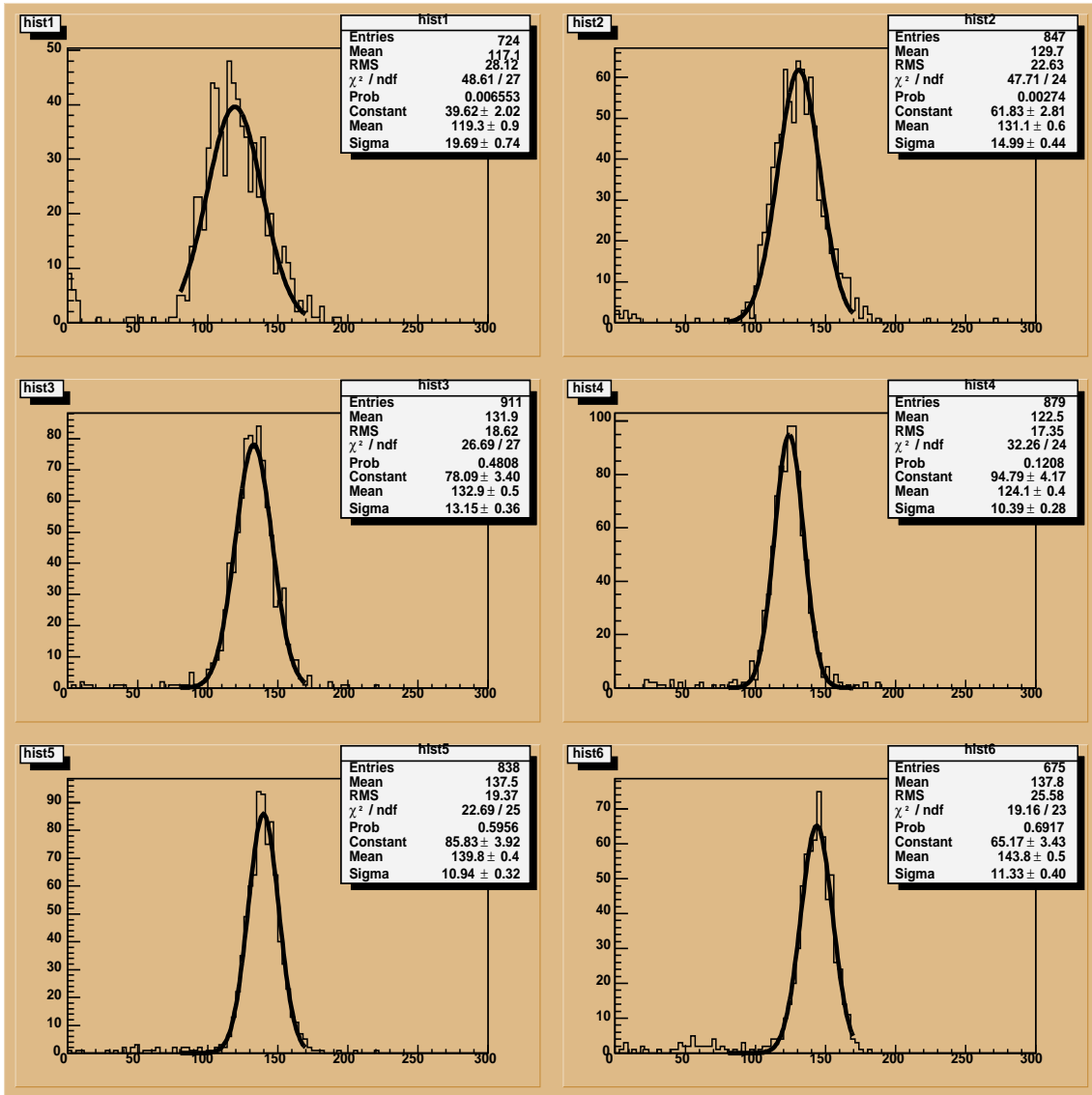


図 5.38: 方法 2 で再構成した π^0 の質量、1cm×5cm のストリップ型カロリメータ

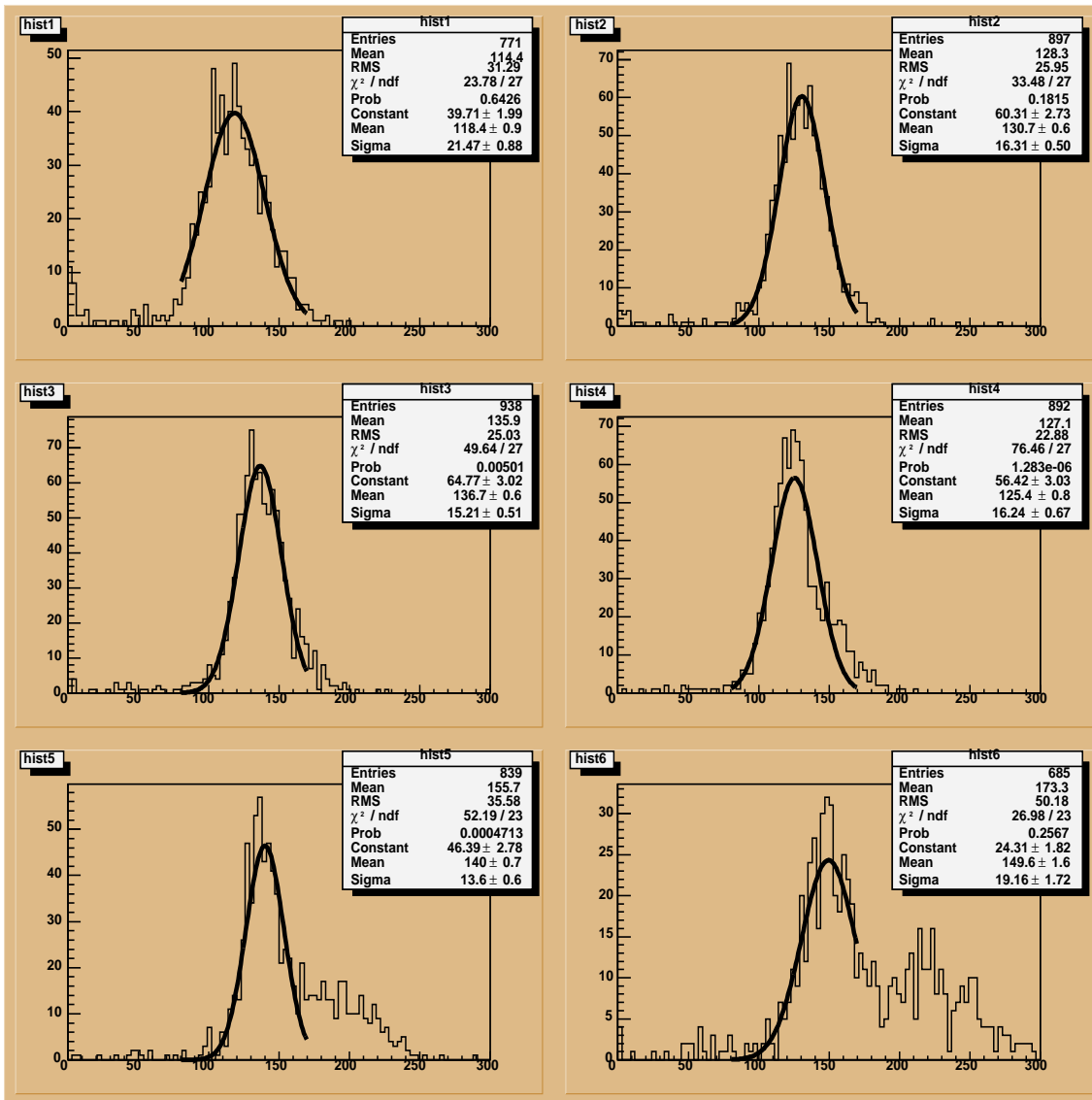


図 5.39: 方法 2 で再構成した π^0 の質量、1cm×10cm のストリップ型カロリメータ

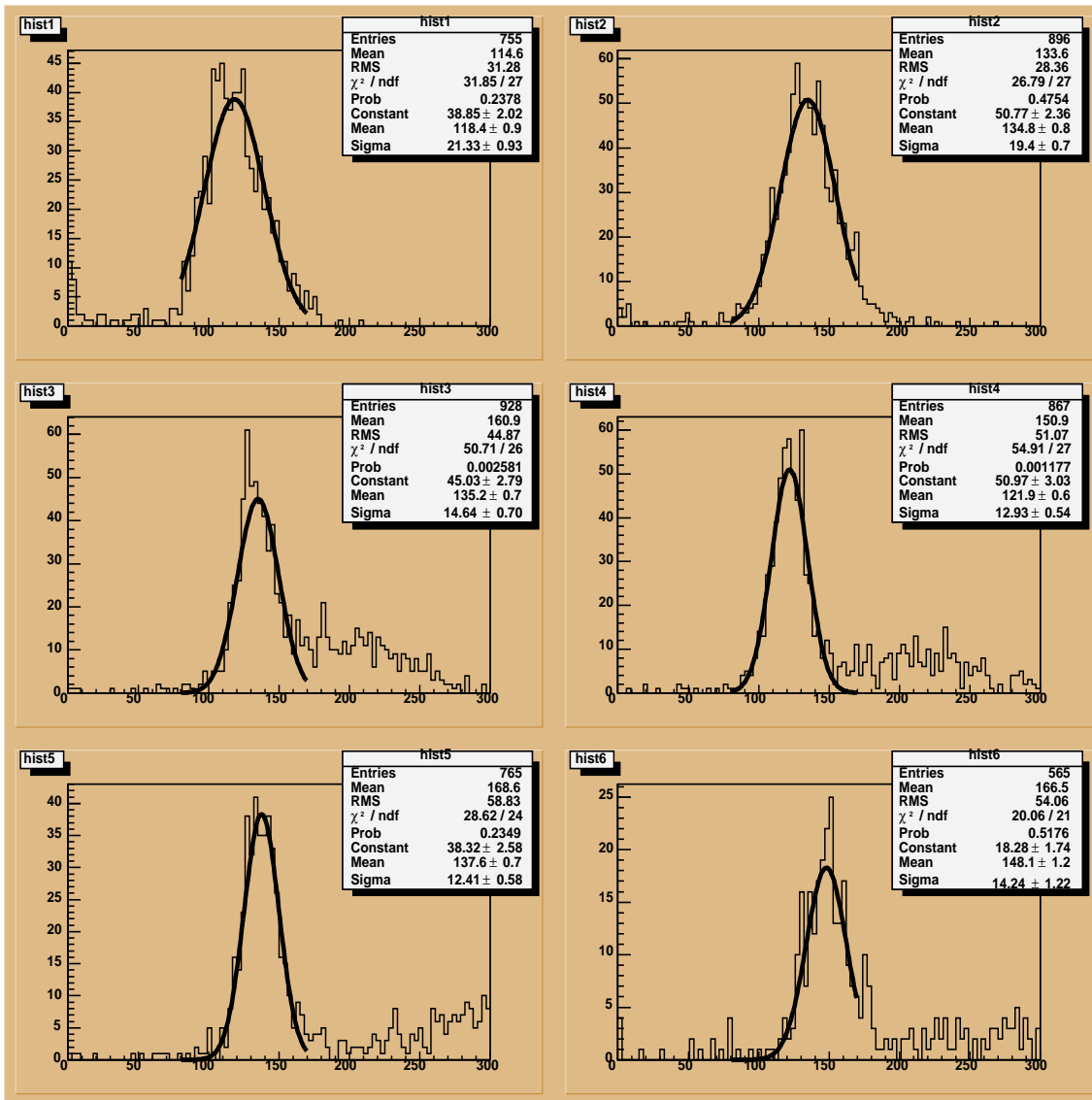


図 5.40: 方法 2 で再構成した π^0 の質量、1cm×20cm のストリップ型カロリメータ

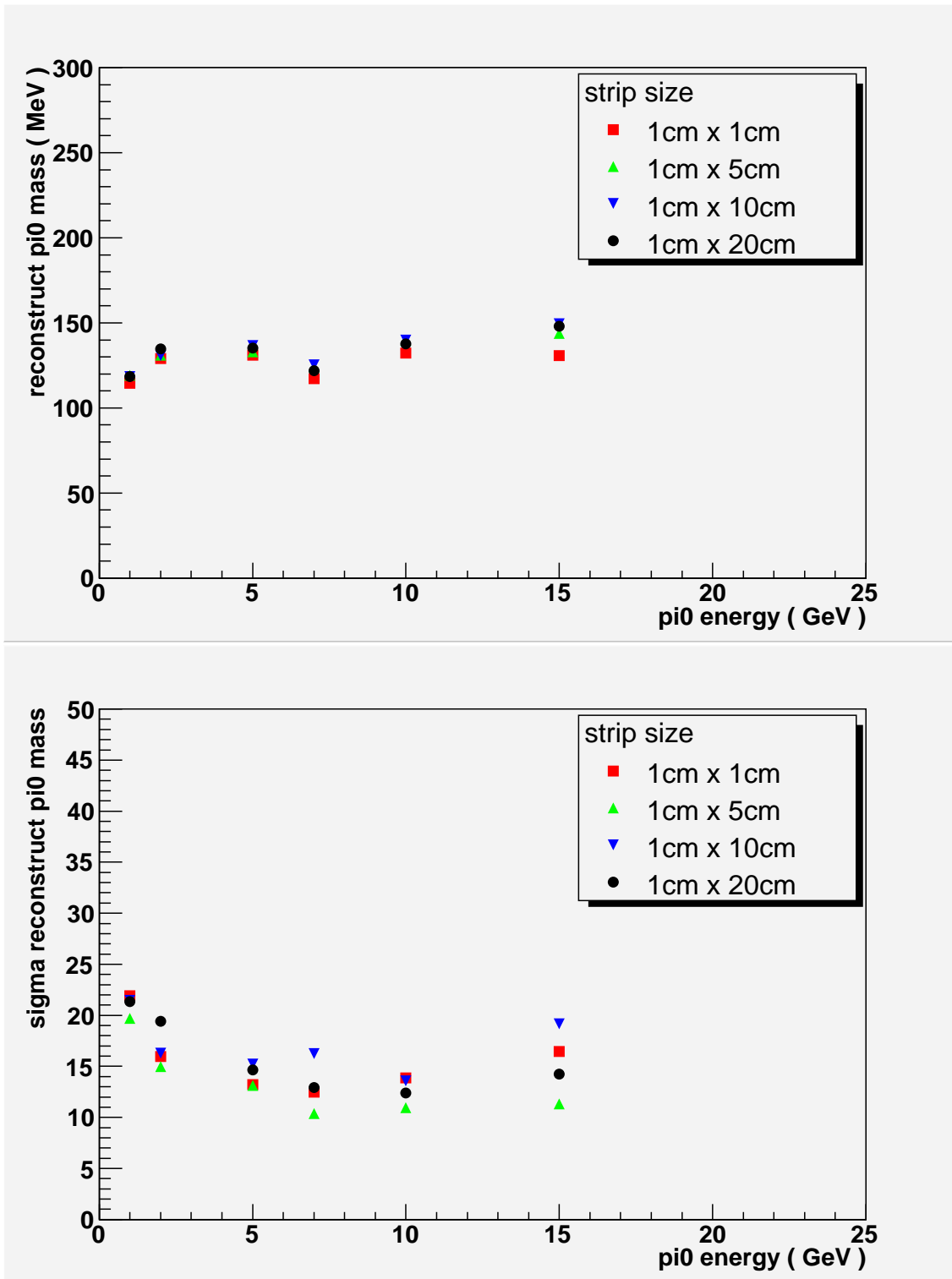


図 5.41: 上図: 横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の平均値 下図: 横軸 入射エネルギー 縦軸 再構成した質量の分解能

第6章 結論と今後の展望

6.1 結論

本研究では、ストリップ型カロリメータにおけるクラスタリングアルゴリズムの開発を行った。また、最適なストリップサイズを探索するために様々なストリップ型カロリメータを試した。 π^0 を使用し、普遍質量がどの程度組めるを研究した。

異なるクラスタ分離のアルゴリズムを使用し、入射エネルギーのことなる π^0 に対して研究をした。その結果、再構成した普遍質量の平均値がストリップのサイズに依存しなくなり、分解能の点においても方法2がもっとも優れていることがわかった。

6.2 今後の展望

6.2.1 ヒットストリップにおけるスレッシュホールドの設定

ヒットストリップにおけるエネルギー・スレッシュホールドを本研究では、EMCALのみを用いて決定しているが、今後は、ハドロン部分も考慮に入れる必要があるのでより適切なスレッシュホールドを考える必要がある。

6.2.2 小さなクラスタの処理

小さなクラスタを π^0 のスタディで単にカットしてるが、今後は適切なスレッシュホールドを設けるか、メインクラスタに加える等の処理が必要になる。

6.2.3 ジェットに適用する

ジェットを扱って実際にどれくらいのエネルギー分解能が実現できるか行おう。これには、ハドロン部分の研究が必要になる。

6.2.4 フルシミュレータに組み込む

フルシミュレータに適用してみる。本実験は、プロトタイプを用いているので次のステップとしてフルシミュレータに組み込んでみて実際の実験では分解能がどこまでよくなるか結果を出す。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、適切な助言および指導を下さった川越清以先生に深く感謝します。また、信州大・筑波大・新潟大・高エネルギー加速器研究機構のスタッフおよび研究生の皆様にも多くの助言をいただきました。特に、田村 勇樹氏、大町 千尋氏、林 晋氏には多大なサポートをしていただきありがとうございました。

関連図書

- [1] <http://wwwasd.web.cern.ch/wwwasd/geant4/geant4.html>
- [2] 中村龍平著 『次世代線形加速器実験の為に電磁カロリメータの開発研究』 2005 神戸大学
- [3] 岸本晋著 『次世代線形加速器実験用測定器シミュレータの開発』 2005 神戸大学
- [4] <http://alcp2005.colorado.edu:8080/alcp2005/program/detector/PFA/>