修士学位論文

実験初期データを用いた ATLAS検出器カロリーメータの性能評価

東京大学 大学院 理学系研究科 物理学専攻 浅井研究室

鈴木 拓也

2009年1月8日

概 要

欧州原子核研究機構 (CERN) において建設された大型陽子 陽子衝突型加速器 (LHC) 実 験ではヒッグス粒子や超対称性粒子を始めとする新たな物理現象の発見が期待されている。こ れらの物理現象の探索において鍵となるのがジェットと消失エネルギーの測定であるため、こ れを精度良く測定できるかを評価する必要性があり、カロリーメータの性能評価は必要不可欠 である。

本論文では、実験初期のデータで特に生成断面積の大きいミニマムバイアス事象を用いて、 ATLAS 検出器のカロリーメータの性能を評価する。2008 年 9 月 19 日の事故により実データ が取れなかったため、本研究ではモンテカルロシミュレーションを用いてこれを評価する。

目 次

第1章	序論	2
第2章	LHC 加速器と ATLAS 検出器	5
2.1	LHC 加速器	5
2.2	ATLAS 検出器	7
	2.2.1 内部飛跡検出器	7
	2.2.2 カロリーメータ	9
	2.2.3 クラック 領域と不感物質	15
	2.2.4 マグネットシステム	15
	2.2.5 ミューオンシステム	17
	2.2.6 トリガー	18
第3章	シミュレーションと再構成	20
3.1	Full Simulation	20
	3.1.1 イベントフィルター	20
3.2	エネルギー較正	20
	3.2.1 H1 キャリブレーション	20
	3.2.2 クライオスタットの補正	21
3.3	クラスターアルゴリズム	21
	3.3.1 Sliding-Widow アルゴリズム	22
	3.3.2 トポロジカルクラスターアルゴリズム	22
3.4	ジェットアルゴリズム.................................	24
	3.4.1 コーンアルゴリズム	24
	3.4.2 K _T アルゴリズム	24
3.5	レプトンの再構成....................................	25
	3.5.1 電子の再構成	25
	3.5.2 ミューオンの再構成	26
3.6	消失横運動量	27
第4章	シングルπを用いたカロリーメータの評価	28
4.1	セルのノイズを落とした場合の π^{\pm} に対するカロリーメータの応答	28
4.2	セルのノイズを考慮した場合 π^{\pm} に対するカロリーメータの応答	33
4.3	π^0 に対するカロリーメータの応答	35
第5章	ミニマムバイアス事象を用いたカロリーメータの性能評価	37
5.1	ミニマムバイアス事象における π^{\pm} 、 π^{0} の分布	38
5.2	重複するトラック	39
5.3	$シングル \pi^{\pm}$ との比較	39

	5.4	重複する π^0 の評価	40
第	6章	まとめ	44
付	録 A	サジッタから p_T を求める方法	45
付	録 B	π^0 のカロリーメータ内で落とすエネルギーの割合の p_T 依存性	47
付	録 C	ミニマムバイアス事象における π^0 の重複確率	48
付	録 D	ミニマムバイアス事象における $E_{track}=0.7\sim 1.5 GeV$ に対する π^0 の重複エネルギー	49

図目次

1.1	物質中の電子・陽電子、光子の相互作用	2
1.2	電磁シャワー:電子・陽電子は光子を放射し、光子は電子・陽電子対を生成して	
	電磁シャワーは成長していく。	3
1.3	ハドロンシャワー:ハドロンシャワーは電磁相互作用による成分と強い相互用に	
	よる成分とで分けられる。ハドロン成分の中には電荷を持たないため検出され	
	ない成分も含まれる。	3
1.4	ハドロンシャワー中の検出されるエネルギーの割合	4
2.1	LHC 加速器	5
2.2	LHC 加速器の超伝導磁石	6
2.3	CMS	6
2.4	ALICE	6
2.5	LHC-B	6
2.6	ATLAS 検出器の全体像	7
2.7	内部飛跡検出器の全体像	8
2.8	ピクセル検出器、SCT、TRT の配置	8
2.9	ピクセル検出器の信号読み出し...............................	8
2.10	SCT のシリコンウエハ	9
2.11	バレル領域の TRT の X-Y 平面での切断面	9
2.12	ATLAS 検出器のカロリーメータ	10
2.13	PreSampler のモジュール	11
2.14	電磁カロリーメータのアコーディオン構造	11
2.15	タイルカロリーメータの構造.................................	12
2.16	タイルカロリーメータのモジュールの配置.........................	13
2.17	エンドキャップハドロンカロリーメータの構造	13
2.18	フォワードカロリーメータのモジュールの配置................	14
2.19	フォワードカロリーメータの構造	15
2.20	$\operatorname{PreSampler}$ と電磁カロリーメータの前方にある物質量の η の依存性	16
2.21	ATLAS 検出器のマグネットシステム	16
2.22	ATLAS 検出器の磁場の分布	16
2.23	ATLAS 検出器のミューオンスペクトロメータの全体像	17
2.24	ATLAS 検出器のミューオンスペクトロメータの z-R 断面図........	17
2.25	MDT のチューブの断面図	18
2.26	MDT の構造	18
2.27	CSC の構造	18
2.28	RPC の構造	19
2.29	TGC のギャップ	19

3.1	EM スケールとハドロニックスケールにおけるカロリメータ内のセルの全エネ	
	ルギー和...................................	21
3.2	Sliding-Window アルゴリズム	22
3.3	各カロリーメータモジュールのノイズの分布	23
3.4	ジェットの分割と結合...................................	24
3.5	コーンアルゴリズムと K_T アルゴリズム \ldots \ldots \ldots	25
3.6	γ 線と電子がフェイクとなるイベントの例 $\dots \dots \dots$	26
3.7	μ がフェイクとなるイベントの例	26
4.1	$E_{-+} = 2GeV$ の場合の $E_{track}/E\pi^{\pm}$ 分布	28
4.2	$\pi^{\pm} = 2 GeV$ の場合のカロリーメータの応答	29
4.3	バレル領域での $\pi^{\pm} = 2GeV$ シャワーの広がり	29
4.4	π^{\pm} の $\Delta R = 0.3$ からのエネルギーの漏れ	30
4.5	ギャップ領域での $\pi^{\pm} = 2 GeV$ シャワーの広がり	30
4.6	セルに落とされたエネルギーの和の η 依存性の分布	31
4.7	$E'_{loce} = E_{track} - \sum_{\Delta B < 0.3} w_{cell} E_{cell} \mathcal{O} \eta$ 依存性	31
4.8	バレル領域とギャップ領域におけるエネルギー損失の違い	32
4.9	バレル領域とギャップ領域におけるシャワーの広がり	33
4.10	セルに落とされたエネルギーの和の η 依存性の分布	33
4.11	ノイズ抑制によるエネルギー損失 (EM スケール)	34
4.12	ノイズ抑制によるエネルギー損失 (ハドロニックスケール)	34
4.13	バレル領域とギャップ領域における π^0 シャワーの広がり	35
4.14	カロリーメータ前方の不感物質による π^0 のエネルギー損失 \ldots \ldots	36
5.1	LHCにおける各プロセスの数刮断面積[5]	37
5.2	π^{\pm} π^{0} の n 分布	38
5.3	$K \times K \otimes T \to T$ トラックの入射位置と π^0 の ΛR 分布	38
5.4	トラック同十の PreSampler への入射位置の ΛB	39
5.5	シングル π^{\pm} とミニマムバイアス事象とのセルのエネルギー和の比較	39
5.6	カロリーメータ前方の不感物質中の π^0 の生成位置	40
5.7	トラックの入射位置から $\Delta R = 0.3$ 内の π^0 のエネルギー和	40
5.8	トラックから十分孤立したクラスター	41
5.9	トラックから $\Delta R = 0.3$ 内に γ のエネルギー和と孤立したセル	41
5.10	トラックのカロリーメータの入射位置から $\Delta R=0.3$ 内に γ が入射する確率	42
5.11	シングル π^{\pm} からの超過したエネルギーと予想される γ 線による重複エネルギー	
	分布	43
A 1		45
A.1	$\mathcal{T}\mathcal{Y}\mathcal{Y}\mathcal{Y} \ldots \ldots$	45
B.1	π^0 のカロリーメータ内で落とすエネルギーの割合の p_T 依存性	47
C.1	$E_{track} = 1$ 、2、5 GeV のカロリーメータの入射位置を中心に $\Delta R = 0.3$ 以内に γ 娘が重視する確率	10
		40
D.1	シングル π^{\pm} からの超過したエネルギーと予想される γ 線による重複エネルギー 分布 (\mathbf{E}_{n} = 0.7 × 1.5 CoV)	40
	$J_{1} \mu \left(E_{track} = 0.7 \sim 1.0 \text{GeV} \right) \dots $	49

表目次

2.1	LHC 加速器の主なパラメーター	6
2.2	ATLAS 検出器のカロリーメータの要求されているパフォーマンス	10

第1章 序論

ATLAS 実験ではエネルギーの測定にカロリーメータを用いる。しかし、粒子がカロリー メータに到達するまでに多くの物質を通過する必要がある。その結果、粒子は物質との相互作 用でエネルギーを失ってしまう。高いエネルギー(数 *GeV* 以上)を持った荷電粒子の物質中で の相互作用は様々で、入射する粒子の種類にも大きく依存している。

電子や γ 線の場合、図 1.1 のように基本的に電磁相互作用しかなく、100 MeV 以上のエネル ギーを持った電子、陽電子は Bremsstralhung で γ 線を放出、 γ 線は電子・陽電子の対生成が主 な反応となる。



図 1.1:物質中の電子・陽電子、光子の相互作用 [1]: 左図は電子と陽電子の物質との相互作 用を示してある。横軸にエネルギー、縦軸に散乱微分断面積であり、高いエネルギー領域では Bremsstralhung が主な反応である。右図は光子の物質との相互作用を示してある。横軸にエネ ルギー、縦軸に散乱断面積であり、高いエネルギーではつい生成が主な反応である。ここで、 $\sigma_{p.e.}$ は光電効果、 $\sigma_{Rayleigh}$ はレイリー散乱、 $\sigma_{Compton}$ はコンプトン散乱、 κ_{nuc} は原子核場内 での対生成、 κ_e は電子の場内での対生成、 $\sigma_{g.d.r.}$ は光核反応を示している。

これらの反応が繰り返されることで電磁シャワーが成長し、カロリーメータ内でエネルギー を失っていく (図 1.2)。ここで、粒子が物質に入射して 1 回非弾性散乱を受けるまでの平均自 由行程のことを吸収長という。また電子が 1/eのエネルギーを失うのに必要な距離を放射長 $X_0(g\dot{c}m^{-2})$ で表し、横方向の広がりをモリエール半径 R_M という。どちらも吸収体の種類に 大きく依存しており、電磁カロリーメータを設計する上で、特に重要な量である。



図 1.2: 電磁シャワー: 電子・陽電子は光子を放射し、光子は電子・陽電子対を生成して電磁シャ ワーは成長していく。

電荷をもったハドロンの場合は電磁相互作用以外に強い相互作用も作用するため、やや複 雑になってしまう (図 1.3)。その結果、

- 電磁相互作用 (π^0 崩壊) による検出されるエネルギー
- 電磁相互作用以外 (π[±]、μ[±] など) による検出されるエネルギー
- 原子核の崩壊など (中性子など) による検出されないエネルギー
- ニュートリノによる検出されないエネルギー



図 1.3: ハドロンシャワー: ハドロンシャワーは電磁相互作用による成分と強い相互用による成分とで分けられる。ハドロン成分の中には電荷を持たないため検出されない成分も含まれる。

の4種類の異なる起源を持つエネルギーがあり、これらを全て考慮する必要性がある。電磁相互作用や荷電粒子による測定されるエネルギーは補正を必要としないが、検出されないエネルギーには補正が必要となる。そのためにカロリーメータのセル内で測定されたエネルギーに e/h ファクターをかけてハドロンのエネルギーを導出する。本研究ではエネルギー密度に依存した H1 キャリブレーションを用いている。図 1.4 にハドロンシャワーのエネルギーと実際に検出されないエネルギーと検出器されるエネルギーの割合をそれぞれ示す。測定するセルのエネルギー密度が大きい場合 e/h による補正は小さくなる。

以上のようにカロリーメータに到達するまでに粒子はカロリーメータ前方にある物質 (不感物質) により、そのエネルギーを失ってしまう。ATLAS 検出器の場合、不感物質の最も少ない 検出器中央部で 2*X*₀ 程度あり、無視できない量である。



図 1.4: ハドロンシャワー中の検出されるエネルギーの割合 [2]: 横軸にエネルギー密度、縦軸 にセル内に実際に落とされたエネルギーとの比をとっており、上図は検出されないエネルギー、 下図は電磁相互作用によって検出されるエネルギーの分布である。

また、不感物質よるエネルギー損失以外にもノイズを抑制する際に生じるエネルギー損失 もある。実験においてはエネルギーを測定する際に検出器のノイズの効果を抑えるため通常は クラスターアルゴリズムを用いるが、これによって *E*_{cell}/*σ*_{noise} が小さいセルを落としてしま うことで、実際に粒子がエネルギーを落としたセルを落としてしまう。

以上のようにハドロンのエネルギーを測定するとき、カロリーメータの前方にある不感物 質によるエネルギー損失、ノイズ抑制によって落とされるセルによるエネルギー損失、e/h ファ クターによる不定性を考慮する必要性がある。本論文では、LHC 実験において散乱断面積が特 に大きいミニマムバイアス事象を用いて、実験初期段階でできるカロリーメータ前方の不感物 質の評価法について述べる。ミニマムバイアス事象においては特に pT の低い粒子が多量に生 成されるため、上記した不定性の効果が問題となってくる。本研究では運動量分解能が高い内 部飛跡検出器によるトラッキングを用いた手法について論ずる。

しかし、実データで行う予定であったが、9月19日の事故によって実験が中止となってしまっ たため、本研究はモンテカルロシミュレーションを用いてこれを評価した。

第2章 LHC加速器とATLAS検出器

2.1 LHC 加速器

LHC(Large Hadron Collider)は、スイス、ジュネーブ郊外にある CERN(欧州原子核研究 機構)に建設された大型陽子-陽子衝突型加速器である。この加速器は以前の電子-陽電子衝突実 験 LEP(Large Electron Positron Collider)で用いられたトンネル内に設置されている。スイス とフランスをまたぐように地下 100m の深さに作られ、その円周は 27km である (図 2.1)。



図 2.1: LHC 加速器 [4]

LHC はハドロンコライダーであるため、シンクロトロン放射によるエネルギー損失が少ないため、高いエネルギーでの実験が可能で、8.4T の強力な超伝導磁石 (図 2.2)を用いて陽子を7TeVまで加速させ、14TeV の重心エネルギーを達成した。また 10³⁴cm⁻²s⁻¹ という非常に高いルミノシティーでの運転が可能である。陽子-陽子衝突実験では、実際に反応するのは陽子中のクォークやグルーオンであるため、実効的な衝突エネルギーは数 TeV 程度になってしまうものの、これは Tevatron(陽子-反陽子衝突実験)の約 10 倍のエネルギーに相当する。このような高いエネルギーとルミノシティーによって、LHC では、ヒッグス粒子や TeV 領域の超対称性粒子の探索が可能となり、またボトムクォークやトップクォークの精密測定なども可能である。その主なパラメータを表 2.1 に示す。



図 2.2: LHC 加速器の超伝導磁石 [4]

主リング周長	26.66 km
重心系エネルギー(陽子+陽子)	7.0TeV + 7.0TeV
デザインルミノシティ	$10^{34} cm^{-2} s^{-1}$
衝突頻度	40.08MHz
バンチ間隔	24.95 ns
1 バンチあたりの陽子数	10 ¹¹ 個
バンチの長さ	75mm
バンチ数	2835 個
バンチ衝突当たりの陽子衝突	23

表 2.1: LHC 加速器の主なパラメーター

LHC では、4つの衝突点があり、各点にそれぞれ ATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS 後述)、CMS(the Compact Muon Solenoid 図 2.3)、ALICE(A Large Ion Collider Experiment 図 2.4)、LHCb(the Large Hadron Collider beauty experiment 図 2.5) という検出器が設置されている。ATLAS と CMS は汎用検出器であり、ALICE は重イオン衝突実験で、LHCb は b 粒子の精密測定のための検出器である。



⊠ 2.3: CMS [3]

☑ 2.4: ALICE [3]

☑ 2.5: LHC-B [3]

2.2 ATLAS 検出器

ALTAS 検出器は直径 22m、長さ 44m の円筒形で、質量 7000t という巨大な汎用検出器で ある。検出器の内側から内部飛跡検出器、カロリーメータ、ミューオンシステムから構成され ており、内部飛跡検出器とカロリーメータの間には、ソレノイドマグネットがあり、またカロ リーメータとミューオンシステムの間には巨大な 2T のトロイダルマグネットが設置されてい る (図 2.6)。ATLAS 検出器は LHC の高いルミノシティーにおいても、高速かつ正確にデータ を処理する必要がある。



図 2.6: ATLAS 検出器の全体像 [4]

2.2.1 内部飛跡検出器

物理解析に必要な運動量分解能を満たすため、高い位置分解能が必要である。ATLAS 検 出器では、2Tの超伝導ソレノイドの内側に内部飛跡検出器が設置されている。この磁場によ り荷電粒子を曲げて、その曲率を測定することで運動量を求める。その構造は内側からピクセ ル検出器、シリコントラッカー (SCT)、遷移輻射トラッカー (TRT)の3つの検出器で構成さ れている (図 2.7)。

ピクセル検出器とSCT

ピクセル検出器とSCT は $|\eta^*| < 2.5$ の領域をカバーしている。ピクセル検出器は内部飛跡 検出器の最も内側に設置されている半導体検出器であり、バレル領域は 3 層の円筒状の、エン ドキャップ領域ではディスク状のモジュールがそれぞれ図 2.8 のように設置されている。一つ 一つのピクセルは $50 \times 400 \mu m^2$ のシリコン検出器であり、ステレオ読み出しではなく、2 次元 で読み出しを行っているので、LHC の高いイベントレートに対応している。ピクセルの一つ一 つに読み出しが付いている (図 2.9)。

 $^{{}^*\}eta$ は擬ラピディティと呼ばれ、ビーム軸と粒子のなす角を heta とすると $\eta = -\ln(an(heta/2))$ で定義される。



図 2.7: 内部飛跡検出器の全体像 [4]



図 2.8: ピクセル検出器、SCT、TRT の配置 [4]

SCT はピクセル検出器同様に半導体検出器で、シリコンウエアをバレル領域に円筒状に4 層、エンドキャップ領域にはディスク状に9層置かれている(図2.8)。シリコンウエ上には80µm 間隔にアルミニウムでできた読み出し用のストリップが768本走っている。SCT モジュールは この2枚のシリコンウエはにステレオ角40mradをつけることで30µm 程度で位置を測定する ことができる(図2.10)。

 \mathbf{TRT}

TRT は、内部検出器の最も外側に設置されている (図 2.8)。荷電粒子が異なる誘電率を持つ物質の境界を通過するとき、遷移放射が発生する。放出される X 線はローレンツ因子 γ に比例するので、荷電粒子の識別も可能である。TRT はこの原理を利用したストローチューブ検



図 2.9: ピクセル検出器の信号読み出し [5]



図 2.10: SCT のシリコンウエハ [4]

出器である (図 2.11)。TRT はバレル領域に 73 層、エンドキャップ領域には 160 本のストロー からなる層が 32 層あり、図 2.8 のように配置されている。ストローの内部には Xe 70%、CO₂ 27%、O₂ 3%の混合ガスが封入されている。この Xe 混合ガスが X 線の吸収に優れており、安 定である。ストローチューブ間の隙間にはポリプロピレンの繊維が詰められている。

TRT の分解能は 130 μm であるが、層の数が多いため、連続飛跡が引ける。またヒットには Low Threshold Hit (0.2 ~ 5keV) と High Threshold Hit (6keV 以上) の 2 種類の Threshold が ある。電子は μ^{pm} や π^{\pm} より質量が軽いため遷移輻射が起こりやすく、High Threshold Hit が 相対的に多くなる。



図 2.11: バレル領域の TRT の X-Y 平面での切断面 [5]

2.2.2 カロリーメータ

ATLAS 検出器では、 $|\eta| < 5$ までの極めて広い領域に渡ってエネルギーを測定する。図 2.6 に ATLAS 検出器の全体像、表 2.2 に ATLAS カロリーメータの要求されているパフォーマン スを示す。



図 2.12: ATLAS 検出器のカロリーメータ [4]

検出器の種類	要求されたエネルギー分解能	カバー領域
電磁カロリーメータ	$rac{\sigma_E}{E} = rac{50\%}{\sqrt{E(GeV)}} \oplus 3\%$	$ \eta < 3.2$
ハドロンカロリーメータ		
バレル領域	$rac{\sigma_E}{E} = rac{50\%}{\sqrt{E(GeV)}} \oplus 3\%$	$ \eta < 3.2$
フォワード領域	$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{100\%}{\sqrt{E(GeV)}} \oplus 10\%$	$3.1 < \eta < 4.9$

表 2.2: ATLAS 検出器のカロリーメータの要求されているパフォーマンス

EM カロリーメータ

ATLAS 検出器の電磁カロリーメータはバレル領域 ($|\eta| < 1.475$) とエンドキャップ領域 ($1.375 < |\eta| < 3.2$) に分けられている。放射線耐性に優れた液体アルゴンを用いたサンプリン グカロリーメータであり、吸収体には鉛を用いている。ATLAS の電磁カロリーメータのエネ ルギー分解能電子に対しては

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(10.1 \pm 0.4)\,\%}{\sqrt{E\,(GeV)}} \oplus (0.2 \pm 0.1)\,\% \tag{2.1}$$

である。電磁カロリーメータはアコーディオン構造を採用することで ϕ 方向に対してモジュー ル間の隙間をなくしてある。カロリーメータに入射する前のシャワーの広がりを測定するため、 電磁カロリーメータの手前に厚さ11mmの PreSampler が設置されている (図 2.13)。そのグラ ニュラリティーは $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.025 \times 0.0982$ でシャワーのサンプリングを行う。この PreSampler も電磁カロリメータと同じように液体アルゴンで満たされており、この2つの装置は同じクラ



図 2.13: PreSampler のモジュール [6]

電磁カロリーメータは、Strip、Middle、Back の 3 層から成っている (図 2.14)。その物質量 は 0 < $|\eta|$ < 0.8 の領域では 22 から $30X_0^{\dagger}$ 、 0.8 < $|\eta|$ < 1.3 の領域では 24 から $33X_0$ ある。1 層 目の Strip は $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.0031 \times 0.0982 \ge \eta$ 方向に細かくセグメントされている。そのため、 高い位置分解能を実現することができる。また、 γ/π^0 の識別も可能である。2 層目の Middle においては、電磁シャワーの大部分のエネルギーが落とされる。 $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.025 \times 0.0245$ で $\eta \ge \phi$ を精度よく測定できる。3 層目の Back では、 $\Delta\eta \times \Delta\phi = 0.050 \times 0.0245$ のグラニュラ リティーで 2 層目からのエネルギーの漏れを測定し、ハドロンと高エネルギーの電磁シャワー との識別をする。



図 2.14: 電磁カロリーメータのアコーディオン構造 [4]

 $^{^{\}dagger}X_0$ は放射長 (Radiation length) であり、電子が物質中を通り抜けるときに、EM 相互作用によりエネルギー が 1/e に減る距離が $1X_0$ である。

ハドロンカロリーメータ

ハドロンカロリーメータは、バレル領域をタイルカロリーメータ、エンドキャップ領域を 電磁カロリーメータ同様の液体アルゴンを用いたサンプリングカロリーメータである。

タイルカロリーメータは3層に分けられたタイル状のシンチレータからなっており、鉄を吸収体に用いている (2.15)。これはバレル領域 ($|\eta| < 1.0$) とエクステンドバレル領域 ($0.8 < |\eta| < 1.7$)の2つの部分に分けられている。この2つの部分の間にはギャップがあるため、測定精度が落ちてしまう。そのエネルギー損失を見るためにギャップシンチレータが設置されている (図 2.16)。



図 2.15: タイルカロリーメータの構造 [4]

光電子増倍管はモジュールの上部に取り付けられている。

図 2.15 に示してあるように、タイルシンチレータの光はその両端に付いている波長変換 ファイバーによって、光をそれぞれ別々の光電子増倍管へと導いている。タイルカロリーメータのグラニュラリティーは $\Delta \eta \times \Delta \phi = 0.1 \times 0.1$ でその物質量は 11λ [‡]ある。そのエネルギー分解能は

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(56.4 \pm 0.4)\%}{\sqrt{E(GeV)}} \oplus (5.5 \pm 0.1)\%$$
(2.2)

である。

エンドキャップカロリーメータは液体アルゴンを用いたサンプリングカロリーメータで吸収体に銅を用いている (図 2.17)。グラニュラリティーは $|\eta| < 2.5$ で $\Delta \eta \times \Delta \phi = 0.1 \times 0.1$ で、それより大きい領域では 0.2×0.2 となっている。エネルギー分解能は

 $^{^{\}ddagger}\lambda$ は衝突長 (interaction length) であり、強い相互作用をする粒子が原子核に衝突するまでの平均自由行程である。



図 2.16: タイルカロリーメータのモジュールの配置 [4]

バレル領域とエクステンドバレル領域にはクラックがあり、ギャップシンチレータ $(\rm E1 \sim E4)$ が設置されている。



図 2.17: エンドキャップハドロンカロリーメータの構造 [4]

層が密な方が前方で、疎らな方が後方のモジュールである。破線は電極の位置を示す。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(70.6 \pm 1.5)\,\%}{\sqrt{E\,(GeV)}} \oplus (5.8 \pm 0.2)\,\% \tag{2.3}$$

である。

フォワードカロリーメータ

フォワードカロリーメータは $3.1 < |\eta| < 4.9$ のフォワード領域をカバーしている。この領域は常に強い放射線にさらされているため、液体アルゴンを用いている。フォワードカロリーメータはエンドキャップ領域の電磁カロリーメータとハドロンカロリーメータと同じクライオスタットに収まっている。その主な目的は後方にあるミューオンシステムのシールドの役割とフォワード領域におけるエネルギーの測定であり、3層のモジュールからなっている。1層目 (FCAL1) で電磁成分、2 と 3 層目 (FCAL2 と FCAL3) でハドロン成分を測定するため、吸収体にはそれぞれ銅とタングステンが用いられている (図 2.18)。



図 2.18: フォワードカロリーメータのモジュールの配置 [4]

3層のモジュールとその後方に銅のシールドが設置されており、エンドキャップカロリーメータ と同じクライオスタットに収まっている。

図 2.19 にその構造を示す。円筒状の穴に棒状の電極を差し込み、隙間を液体アルゴンで満たしている。また、図 2.19 には 1 層目のモジュールのモリエール半径 R_M [§]も示してある。 グラニュラリティーは $\Delta \eta \times \Delta \phi = 0.2 \times 0.2$ でエネルギー分解能については、FCAL1 のみで 電子のエネルギー分解能は

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(28.5 \pm 1.0)\,\%}{\sqrt{E\,(GeV)}} \oplus (3.5 \pm 0.1)\,\% \tag{2.4}$$

である。フォワードカロリーメータ全体の π のエネルギー分解能は

[§]*R_M* はモリエール半径であり、臨界エネルギーでの電磁シャワーの横方向の広がりを示す。



図 2.19: フォワードカロリーメータの構造 [4]: 緑はビームパイプ、オレンジは吸収体、赤は液体アルゴンを表しており、白は隙間を一定に保つための PEEK ファイバーである。また、ピンクはモリエール半径 (*R_M*)を表している。

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{(94.2 \pm 1.6)\,\%}{\sqrt{E\,(GeV)}} \oplus (7.5 \pm 0.4)\,\% \tag{2.5}$$

である。

2.2.3 クラック領域と不感物質

前節で述べたようにバレル領域とエンドキャップ領域のつなぎ目の部分ではカロリーメータ が完全に途切れている。この領域をクラック領域と呼び、カロリーメータの前方に設置されて いる内部飛跡検出器のケーブルなどがある。ここでは、特に物質量が多く粒子はカロリーメー タに到達するまでに多くの物質があるので、大きなエネルギー損失が起こってしまう。そのた めこの領域の粒子のエネルギー測定は精度が悪くなってしまう。図 2.20 には、PreSampler と カロリーメータの手前にある物質量を X₀ を単位にして示してある。バレル領域の主な不感物 質は内部飛跡検出器、ソレノイド磁石とカロリーメータが収まっているクライオスタットの壁 である。

2.2.4 マグネットシステム

トラックの運動量を測定するため、ATLAS 検出器には中央のソレノイド磁石、バレルと エンドキャップのトロイダル磁石の3つから成っており、いずれも超伝導磁石である。その構 造を図2.21に示す。ソレノイド磁石は内部飛跡検出器と電磁カロリーメータの間に設置されて あり、2Tの磁場を供給している。トロイダル磁石は8つのコイルがハドロンカロリーメータの 外側に設置されており、ミューオンの運動量を測定することを目的としている。ビーム軸に対 して8回対称になるように配置されている。その強さはバレル領域で0.5T、エンドキャップ領 域で1Tを供給しているが、均一ではない(図2.22)。



図 2.20: PreSampler と電磁カロリーメータの前方にある物質量の η の依存性 [4]



図 2.21: ATLAS 検出器のマグネットシステム [4]



図 2.22: ATLAS 検出器の磁場の分布 [7]

2.2.5 ミューオンシステム

ミューオンは物質の透過力が高いため、電子、 γ 線やハドロンと異なり、カロリーメータ で止まることなく通り抜けてくるため検出器の最も外側で検出することができる。ATLAS 検 出器のミューオンスペクトロメータはハドロンカロリーメータの外側に設置されており、運動 量を測定用に MDT (Monitored Drift Tube)、CSC (Cathode Strip Chamber)、トリガー用に RPC (Resistive Plate Chamber)、TGC (Thin Gap Chamber) の4つの検出器によって構成さ れている (図 2.23、2.24)。これらによって、3*GeV* から 3*TeV* までのミューオンの測定ができ る。



図 2.23: ATLAS 検出器のミューオンスペクトロメータの全体像 [4]



図 2.24: ATLAS 検出器のミューオンスペクトロメータの z-R 断面図 [4]

下側中央の白抜き青線の四角はエンドキャップ部のトロイダル磁石、バレル領域の緑の部分と エンドキャップ領域の水色の部分が MDT、黄色の部分が CSC を示している。バレル領域の MDT の周囲に RPC、エンドキャップ領域の紫の部分が TGC を示している。

MDT は $|\eta| < 2.7$ (最も内側の層は $|\eta| < 2$)の領域をカバーしており、図 2.25 のようにド

リフトチューブ (図 2.26) が 3 から 4 層を成し、1 個のモジュールあたり上下に取り付けられて いる。ドリフトチューブには *Ar*93%、*CO*27%、以下の混合ガスが封入されており、ミューオ ンが透過する際に電離した電子がワイヤーに到達するまでのドリフト時間からトラックの位置 が決定する。最大ドリフト時間は 700*ns* で位置分解能は 80µm である。



図 2.25: MDT のチューブの断面図 [4]

CSC はミューオンの測定を妨げる中性子に対する感度が低いため、 $2 < |\eta| < 2.7$ の領域 で放射線が強い MDT の 1 層目の代わりに配置されているカソード読み出しの多線式比例係数 箱である (図 2.27)。Ar80%、 $CO_220\%$ の混合ガスが封入されており、ドリフト時間 40ns で位 置分解能は $60\mu m$ である。

RPC は $|\eta| < 1.05$ のバレル領域をカバーしている。2 枚のベークライトの板を平行に配置し、 その間に $C_2H_2F_494.7\%$ 、 $Iso - C_4H105\%$ 、 $SF_60.3\%$ の混合ガスを封入し、そこに 4.9kV/mmの電場を印加している (図 2.28)。

TGC は $1.05 < |\eta| < 2.7$ のエンドキャップ領域をカバーしている。アノードワイヤーとカ ソード面のギャップがワイヤー間隔の 1.8mm よりも狭い 1.4mm になっている多線式比例係数 箱である (図 2.29)。この狭いギャップによりドリフト時間が短くなり、高い時間分解能を可能 にしている。



図 2.27: CSC の構造 [4]

2.2.6 トリガー

ATLAS 実験では最高ルミノシティ時には 40*MHz* のバンチ衝突毎に 24 個の陽子-陽子衝 突が起こる。ATLAS 実験ではレベル 1 トリガーと 2 段階のハイヤーレベルトリガーを用いて データの収集レートを 200*Hz* 程度まで落とす。

図 2.26: MDT の構造 [4]



図 2.28: RPC の構造 [4]

図 2.29: TGC のギャップ [4]

レベル1トリガー

レベル1トリガー (L1)の目的は40*MHz*のイベントレートを75*kHz*に落とすことである。 ミューオンシステムとカロリーメータの信号が用いられており、内部飛跡検出器の情報は用い られていない。ミューオンの情報についてはミューオンスペクトロメータ内のトリガーチェン バーの情報、カロリーメータの情報についてはグラニュラリティーを粗くしたものが用いられ ており、中央トリガー処理装置 (Central Trigger Processor, CTP) に送られる。CTP は集めら れた情報をもとに、レベル1アクセプト (L1 Accept, L1A) 信号を生成し、Timing, Trigger and Control (TTC) システムによって、各検出器のフロントエンドに送られる。各検出器では、パ イプラインメモリーに 2.5*µs* 以前のデータを保持できるように設計されているので、衝突から 2*µs* 以内に処理した L1A 信号が各検出器まで送られる。

ハイヤーレベルトリガー

L1 がハードウェアシステムなのに対してハイヤーレベルトリガーはソフトウェアシステムである。ハイヤーレベルトリガーはレベル 2 トリガー (L2) とイベントフィルター (EF) の 2 段階で構成されている。

L2 ではイベントレートを 75kHz から 3.5kHz まで下げるが、高速化のために検出器全体で なく、L1 で選定した RoI(Region of Interest) という領域だけの情報で判定する。最後の EF で は、検出器全体の情報からイベントを再構成し、イベントを選別して 200Hz を書き出す。

第3章 シミュレーションと再構成

3.1 Full Simulation

Full Simulation の行程は4つに分けられる。

- Event Generation
 Pythia[8] などのジェネレーターを用いて、粒子の4元運動量を生成する。この段階でイベントフィルターをかける。
- Geant4 Simulation ジェネレータで生成された粒子が検出器内でどれだけのエネルギーを落とすかを計算す る。 $\gamma \rightarrow e^+e^-$ の conversion もこの段階でシミュレーションされる。
- Digitization
 Geant4 Simulation で計算された検出器内で落とされたエネルギーをもとに検出器からの
 出力をシミュレーションする。
- Reconstruction
 検出器からの情報を用いてジェット、電子、ミューオン、消失横運動量などのオブジェクトを再構成、計算する。

3.1.1 イベントフィルター

Full Simulation は Geant4 を利用してシミュレーションを行うため、膨大な計算量を行う 必要としている。そこで、必要とされるイベントだけを取り出すためにイベントフィルターを かける。

3.2 エネルギー較正

3.2.1 H1 キャリブレーション

前述したように ATLAS 検出器の電磁カロリーメータは液体アルゴンを用いたサンプリン グカロリーメータである。電子と光子による電磁シャワーのエネルギーを測定する場合は電磁 相互作用だけを考えればよく、またシャワーがあまり広がらないので、シミュレーションによ る再現も容易である。実験では次式のように容易にエネルギーを求める。

$$E = C < Q > \tag{3.1}$$

ここで、Qは測定された電荷で、Cは定数である。このようにして求めたエネルギースケールを EM スケールという。しかし、 π^{\pm} や K^{\pm} のような電荷を持ったハドロンは物質中で電磁相

互作用以外に強い相互作用によって電荷を持たないハドロンがシャワー内に含まれる。ハドロンのエネルギーを測定する場合、その効果を補正する必要がある。ここでは H1 キャリブレーションを用いる。この手法はセル内のエネルギー密度に依存したウェイト wを EM スケールで求めたエネルギー E にかけ、ハドロンスケールのエネルギー E'を導出する。

$$E' = wE \tag{3.2}$$

$$w = c_1 exp(-c_2 \frac{E}{V}) + c_3 \tag{3.3}$$

このようにセル内のエネルギー密度が大きいということはセル内の電磁相互作用による効果 が大きいということなので、ウェイト $w \to 1(c_3 \approx 1)$ となる。逆に、エネルギー密度が小さい セルに対してはハドロンによる効果が大きいので、ウェイトw > 1となる。以上のようにして、 測定エネルギーを EM スケールからハドロニックスケールに直す (図 3.1)。



図 3.1: EM スケールとハドロニックスケールにおけるカロリメータ内のセルの全エネルギー 和: シミュレーションによってされた $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ の π^{\pm} に対する EM スケールとハドロンス ケールにおけるカロリメータ内のセルの全エネルギーの和

3.2.2 クライオスタットの補正

電磁カロリーメータとタイルカロリーメータの間には低温保持装置であるクライオスタットが設置されている。ここでのエネルギー損失を *E*cryo とすると、

$$E_{cryo} = w \times \sqrt{E_{EM2} \times E_{tile1}} \tag{3.4}$$

で計算されている。ここで、 E_{EM2} と E_{tile1} はそれぞれ電磁カロリーメータの第3層目とタイルカロリーメータの第1層目で測定されたエネルギーである。クライオスタットでのエネルギー損失は E_{EM2} と E_{tile1} に比例すると期待されているため、上記の式で補正を行っている。

3.3 クラスターアルゴリズム

電子やジェットはカロリーメータ内でシャワーを起こし、ある程度の広がりを持ってしま うため、再構成を行う際にはエネルギーが落とされたセルをうまく組み合わせてクラスターと いう集合体を作る。クラスターアルゴリズムには2種類のものがある。大きさが決まっている Sliding-Window アルゴリズムと大きさが特に決まっていないトポロジカルアルゴリズムがあ り、それぞれ電子の再構成とジェットの再構成に用いられている。

3.3.1 Sliding-Widow アルゴリズム

Sliding-Window アルゴリズムでは電子、 γ 線のエネルギーを見るために EM クラスターを構成する。まず、カロリーメータを層ごとに $\eta - \phi$ 平面に対して、 $\Delta \eta \times \Delta \phi = 0.025 \times 0.025$ のグリッド状に細かく刻み、各セグメント内のエネルギーを全て足し合わせた Tower を構成する。このとき、セルが複数個の Tower にまたがっているときは面積比分のウェイトをかける。図 3.2 青い正方形を $\eta - \phi$ 平面上を 5×5 の大きさの Window でスキャンする。このとき以下の条件を満たすものをクラスター候補とする。

- Δη 方向に ±1 ずらしたとき (??の緑の方向)、Δφ 方向に ±1 ずらしたとき (図 3.2 の赤の 方向) エネルギーが減少する。
- Tower の E_T の和が $E_T > 3GeV$ を満たす。

また 2×2 のセグメントが重なっている場合はより大きな E_T を持ったクラスター候補を残す。 最後に 3×3 のセグメント内 (図 3.2の黄色の部分) でそのクラスターの重心を計算する。



図 3.2: Sliding-Window アルゴリズム

3.3.2 トポロジカルクラスターアルゴリズム

トポロジカルクラスターアルゴリズムはセルのノイズ σ_{noise} と比較して十分大きなエネル ギーを持っているセルの集合体を作ることでノイズの効果を押さえている。ここで、ノイズは 検出器のエレクトロニクス起源の σ_{elec} とイベントのパイルアップ (イベントレートが高い LHC では、前のイベントの信号が重なってしまうことがある) 起源の $\sigma_{pile-up}$ がある。実際の実験 では、

$$\sigma_{noise} = \sigma_{elec} \oplus \sigma_{pile-up} \tag{3.5}$$

を考える必要があるが、本研究ではパイルアップの効果を無視して、

$$\sigma_{noise} = \sigma_{elec} \tag{3.6}$$

としてある (ここで σ_{elec} はルミノシティが 0 の時のノイズの分布の RMS である)。図 3.3 に は、各カロリーメータモジュールのエレクトロニクス起源とパイルアップをとりいれた場合の ノイズの分布を示してある。

トポロジカルクラスターアルゴリズムでは、

- $\frac{|E_{cell}|}{\sigma_{noise}} > t_{seed}$ を満たすセルを seed cell とし、proto-cluster を構成する。
- seed セルに隣接している $\frac{|E_{cell}|}{\sigma_{noise}} > t_{neighbor}$ を満たすセルを neighbor cell として protocluster に加える。ここで neighbor cell が複数個の proto-cluster で共有している場合はこ れらの proto-cluster を結合する。
- $\frac{|E_{cell}|}{\sigma_{noise}} > t_{cell}$ を満たす隣接しているセルを加えていく。ここでセルが複数この proto-cluster に共有されている場合は最も影響を与えている proto-cluster に取り入れられる。

ATLAS 実験では通常 $t_{seed} = 4$ 、 $t_{neighbor} = 2$ 、 $t_{cell} = 0$ としており、ノイズの分布が対称的 であることからエネルギーの絶対値をとってノイズの効果が打ち消し合うと考えている。



図 3.3: 各力ロリーメータモジュールのノイズの分布 [11]: 左図は σ_{elec} 、右図は $\sigma_{elec} \oplus \sigma_{pile-up}$ の場合の分布である。



図 3.4: ジェットの分割と結合: 左図のように重なっている領域のエネルギーが 50% 以下なら 2 つのジェットを分け、右図のように 50% 以上なら結合させる。

3.4 ジェットアルゴリズム

ジェットアルゴリズムの目的は互いに近い粒子を束ねて、ジェットを構成し、その運動量 を計算することである。ATLAS 実験ではコーンアルゴリズムと K_T アルゴリズムの2種類が ある。

3.4.1 コーンアルゴリズム

コーンアルゴリズムでは以下のようにジェットを再構成する。

- シードセルとして $E_T > 2GeV$ のものを選ぶ。
- コーン $(\Delta R = \sqrt{\Delta \eta^2 + \Delta \phi^2})$ 内にあるセル内に落とされたエネルギーを足し合わせて ジェットのエネルギーにしている。ATLAS 実験では、 $\Delta R = 0.4 \ge 0.7$ の2種類が使われている。
- 2つのジェットが重なった場合、重なり合っている領域に属するセルのエネルギーを足し 合わせる。その合計が一方のジェットのエネルギーの 50% 以下なら 2 つのジェットを分 け、50% 以上なら 2 つのジェットを結合させる (図 3.4)。

3.4.2 *K*_T アルゴリズム

K_Tアルゴリズムでは以下のようにジェットの再構成をする。

- それぞれのクラスターにおいて、 $d_{ii}^2 = p_{T,i}^2$ $d_{ij}^2 = min(P_{T,i}^2, P_{T,j}^2) \times \Delta R_{i,j}^2$ を求める。
- *d_{min}*を見つけ、もし*d_{min}* = *d_{ii}* ならそのクラスターをジェットとし、*d_{min}* = *d_{ij}* なら*i* と *j* のクラスターを結合する。
- 全部のクラスターについて繰り返す。

以上のように *K_T* アルゴリズムはコーンアルゴリズムと異なって、クラスターを次々と結 合させていくことでジェットを再構成していくので、ジェットの形や大きさは決まっていない (図 3.5)。



図 3.5: 黄色の四角は Tower あるいはセルを表している。四角の集合体はクラスターを表している。コーンアルゴリズムはコーンの大きさを決めてジェットを構成するのに対して、*K_T*アルゴリズムはクラスターのある規則に従って結合してジェットを構成している。

3.5 レプトンの再構成

3.5.1 電子の再構成

電磁シャワーの広がりは小さいので、Sliding-Window アルゴリズム (3.3 参照) を用いて電磁クラスターを作る。電子の再構成は電磁クラスターに対して以下のカットをかけることによって行われている。

- ハドロンカロリーメータの漏れがない。 電子はほとんどのエネルギーを電磁カロリーメータ (物質量は $22X_0$) に落とすので、ハ ドロンカロリーメータのエネルギーへの漏れがないことを要求する。電磁カロリーメー タの 2 層目の 3×7 セルの E_T を E_T^{EM2} 、ハドロンカロリーメータの 1 層目の E_T を E_T^{H1} として、 E_T^{H1}/E_T^{EM2} がある閾値以下であることを要求する。
- シャワーのシェイプが細い。 電磁シャワーはハドロンシャワーと比較すると細いので、シャワーのシェイプが細いこ とを要求する。シャワーのシェイプは電磁カロリーメータの2層目の $\Delta\eta \times \Delta\phi = 3 \times 7$ セルと7×7セルの E_T 比とし、閾値を超えないことを要求する。
- トラックとのマッチング トラックが電磁クラスターの近くにあり、さらにE/pが1に近いことを要求する。デフォ ルトでは、E/pが0.7~4を要求している。これは π^{\pm} と区別するためである。 π^{\pm} は電磁 カロリーメータにエネルギーの一部しか落とさないため、E/pは1よりも小さくなる。
- Isolation

ジェットと区別するため、電子の周りに落とされたエネルギーがないことを要求する。b/cのセミレプトニック崩壊から出た電子や π^0 のダリッツ崩壊 ($\pi^0 \rightarrow e^- e^+ \gamma$)による電子は周りにハドロンからのエネルギーがために、Isolationを要求することで区別することができる。

 γ 線が対生成で e^-e^+ を作り、その片方がソフトだった場合や、 $\pi^\pm \ge \pi^0$ からの γ 線がたまたま同じ方向に飛び、E/p が1に近かった場合などにフェイクとして間違って同定される (図 3.6)。フェイクでジェットを電子と間違って同定する確率は 10^{-4} である。



図 3.6: γ線と電子がフェイクとなるイベントの例: 黄色の部分は TRT、緑色の部分は EM カ ロリメー、オレンジ色の部分はハドロンカロリメータ、青の板状の部分はミューオン検出器を 表す。

3.5.2 ミューオンの再構成

ミューオンの質量は約100*MeV* であり、電子よりも200倍も重い。ミューオンのシンクロトロン放射は1/m⁴ に比例するため、ミューオンはカロリーメータを最小電離で通過し、カロリーメータの外側ににあるミューオンシステムでトラックが観測される。ミューオンの再構成はミューオンスペクトロメータと内部飛跡検出器のトラックのマッチングによって行われる。よって、ミューオンは Isolation を要求しなくても、再構成が行えるが、b/c のセミレプトニック崩壊から出たミューオンと区別するためには、Isolation の要求が必要である。

ミューオンのフェイクとしては π^{\pm} がカロリーメータを素通りしてしまう punch through や π^{\pm} がカロリーメータの前で崩壊してミューオンを出す decay in flight がある (図 3.7)。フェイ クでジェットをミューオンに間違って同定してしまう確率もおよそ 10^{-4} となる。



図 3.7: µ がフェイクとなるイベントの例。

3.6 消失横運動量

消失横運動量の計算にはセルを使う。x 方向、y 方向の消失エネルギーを \mathcal{F}_X 、 \mathcal{F}_Y とする と、消失横運動量 \mathcal{F}_T は

で表わされる。 $\mathbb{E}_X \ge \mathbb{E}_Y$ は以下のように表わされる。

$$E_{X,Y} = -\left(\sum E_{X,Y}^{cell} + \sum E_{X,Y}^{cryostat} + \sum E_{X,Y}^{muon}\right)$$
(3.8)

右辺第1項はノイズの2_{のnoise}の閾値を超えたセルのエネルギーを足したものである。セル のエネルギーは第3.2.1節で述べたH1キャリブレーションで補正してある。第2項はクライオ スタットの補正である。第3項はミューオンのエネルギーである。ミューオンはカロリーメー タを最小電離で通過するためカロリーメータのセル内にほとんど落とさないので、セルとは別 にエネルギーを足す必要がある。

第4章 シングルπを用いたカロリーメータの 評価

ATLAS 実験において低エネルギー粒子のトラックの運動量分解能が良いので、これを用いてカロリーメータの性能を評価する。ここでは、シングル π[±] ビームを用いてカロリーメータの応答を確認し、カロリーメータの前方にある不感物質の効果とノイズの効果を評価する。

4.1 セルのノイズを落とした場合の π^{\pm} に対するカロリーメータの応答

LHC においてトラックを残す粒子の大多数は π^{\pm} であり、これらは内部飛跡検出器内の磁場によって曲げられる。トラッキングから π^{\pm} の運動量を測定し、カロリーメータにおける到達点を磁場の計算から求める。ここで、トラックを作る粒子は π^{\pm} (質量 $m_{\pi^{\pm}} = 140 MeV$) なので、次式のようにトラックのエネルギーを定義できる。

$$E_{track} = \sqrt{|\boldsymbol{p}_{track}|^2 + m_{\pi^{\pm}}^2} \tag{4.1}$$

図 4.1 に $E_{track}/E_{\pi^{\pm}}$ の布を示してある。 $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ に対する $E_{track}/E_{\pi^{\pm}}$ は 1.005 でエネ ルギー分解能は $\sigma = 0.1$ である。



図 4.1: $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ の場合の $E_{track}/E\pi^{\pm}$ 分布

前述したようにハドロンは物質中でシャワーを起こす。ここではノイズを無くしたシングル π^{\pm} を用いて π^{\pm} に対するカロリーメータの応答を確認する。図 4.2 には、トラッキングによっ て測定された η と EM スケールおよびハドロニックスケールでのカロリーメータ全体のセル内 に落とされたエネルギーの和を示している。ノイズを無くしたサンプルを用いているため、実 際にシャワーによってエネルギーが落とされたセルのみを測定している。 $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ の場合、 実際に検出されているエネルギーは約 60% であるが、e/h をかけてハドロニックスケールに補



図 4.2: $\pi^{\pm} = 2GeV$ の場合のカロリーメータの応答: $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ の場合の EM スケール (黒) とハドロニックスケール (赤) のカロリーメータの応答とトラックの η の依存性。

正したことによって 90% まで再現している。不感物質によるエネルギー損失は約 10% 程度で ある。

実際の衝突の際には多くの粒子が生成されるので、その他の粒子との重複を避けるためにある大きさのコーンを定義して、その中に落とされたエネルギーを見る必要がある。トラッキングからカロリーメータの入射位置を求め、その点を中心に ΔR 内に落としたエネルギーとカロリーメータ全体に落としたエネルギーとの比を図 4.3 に示した。図 4.3 では不感物質が少ないバレル領域 $(0.1 < |\eta| < 0.5)$ に入射した π^{\pm} について示してある。



図 4.3: バレル領域での $\pi^{\pm} = 2GeV$ シャワーの広がり:赤いプロットは各 η ビン毎の平均値を示している。エネルギーはハドロニックスケールに補正されており、特に不感物質が少ないバレル領域 $(0.1 < |\eta| < 0.5)$ に入射したトラックについての観測であり、ハドロンシャワーの広がりは大きく、 $\Delta R = 1.0$ と比較的広いコーンでもカロリーメータに落とされた全エネルギーを検出することはできない。

ここで $\Delta R = 0.3$ のとき、 ΔR 内のセルのエネルギーは約 80% である。そのエネルギー損失 の原因は ΔR 外のエネルギー漏れである。図 4.4 に広がりの小さいシャワーと大きいシャワー の様子を示す。

同様にギャップ領域 (1.2 < $|\eta|$ < 1.6) に入射した π^{\pm} に対するカロリーメータの応答を確認する。第 2.2.3 節で述べたようにこの領域は不感物質の量が特に多い。 π^{\pm} は物質との相互作用によってバレル領域に入射したものよりも広がってしまう。そのため、コーンの大きさが $\Delta R = 0.3$ のとき、コーンからのエネルギーの漏れは大きくなってしまう (図 4.5)。



図 4.4: π^{\pm} の $\Delta R = 0.3$ からのエネルギーの漏れ ($E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$): 電磁カロリーメータの第 2 層においてエネルギーが落とされたセル (青) とトラッキングから導出したヒット (赤) を示してある。



図 4.5: ギャップ領域での $\pi^{\pm} = 2GeV$ シャワーの広がり: エネルギーはハドロニックスケール に補正されており、特に不感物質が少ないバレル領域 ($1.2 < |\eta| < 1.6$) に入射したトラックに ついての観測であり、バレル領域に入射した場合よりシャワーは広がっている。物質量が多い 領域では E_{loss} が大きくなっていることが確認できる。

この広がりによるエネルギー損失を図 4.6 に示す。不感物質の量が比較的少ないバレル領域 ではシャワーの漏れによるエネルギー損失は 10% 以下に抑えることができるが、ギャップ領域 では物質との相互作用によりシャワーの広がりが大きくなり、エネルギー損失は約 20% 程度ま でになる。

ここで、不感物質とシャワーの漏れによるエネルギー損失は EM スケールとハドロニックス ケールとでそれぞれ E_{loss} 、 E'_{loss} とすると、

$$E_{loss} = E_{track} - \sum_{in\Delta R} E_{cell}$$
(4.2)

$$E_{loss}' = E_{track} - \sum_{in\Delta R} w_{cell} E_{cell}$$

$$\tag{4.3}$$

とすることができる。 w_{cell} は H1 キャリブレーションでのセルにかけられる e/h ファクター である。 $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ のときのカロリーメータで測定されたハドロニックスケールでのエネル ギーのときの E'_{loss} 分布の η 依存性を図 4.7 に示す。



図 4.6: セルに落とされたエネルギーの和の η 依存性の分布

赤いプロットはカロリーメータ全体のセルのエネルギーの和、青いプロットはトラックのヒットから $\Delta R < 0.3$ 内にあるカロリーメータのセルのエネルギーの和、黒いプロットはその差を示している。物質量が多い領域ではシャワーが広がってしまうので、コーンからのエネルギー漏れが大きくなってしまう。



図 4.7: $E'_{loss} = E_{track} - \sum_{\Delta R < 0.3} w_{cell} E_{cell}$ の η 依存性: 赤いプロットはそれぞれの η 領域における平均値を示してある。

図 4.7 において、 $E'_{loss}/E_{track} = 1$ は π^{\pm} がカロリーメータに到達できないことを示している。特にギャップ領域ではそのような粒子が多い。図 4.8 には E = 2GeVの π^{\pm} を用いた時のバレル領域とギャップ領域でのエネルギー損失の違いを示してある。



図 4.8: バレル領域とギャップ領域におけるエネルギー損失の違い: 左図は EM スケール、右図 はハドロニックスケールの場合である。ギャップ領域では、*E*_{loss}/*E*_{track} = 1 は前方の不感物質 で全エネルギーを失ってしまったことを示している。

4.2 セルのノイズを考慮した場合 π^{\pm} に対するカロリーメータの応答

この節では前節に続いて、シングル π[±] サンプルを用いる。ノイズを取り入れたサンプル を用いてノイズの効果を評価する。ノイズを最も効果的に抑えることができるトポロジカルク ラスター (第 3.3 節)を用いて、クラスターを構成しているセルを集め、そのエネルギーの和を 測定する。

図 4.9 には前節同様にシャワーの広がりを確認する。バレル領域とギャップ領域における Δ*R* とそのコーン内のエネルギーの和との相関を示してある。クラスターアルゴリズムを用いるこ とで、カロリーメータで検出されるエネルギーは 10% 減少する。



図 4.9: バレル領域とギャップ領域におけるシャワーの広がり: 左図はバレル領域、右図はギャップ領域の場合である。どちらの場合でもクラスターアルゴリズムを用いたことによるエネルギー 損失は 10% 程度である。

観測されたエネルギーとトラックの η の依存性を評価する。図 4.10 は $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ 、 $\Delta R = 0.3$ について示している。ノイズを抑えたことによって生じるエネルギー損失はバレル 領域で 10%、ギャップ領域で 20% 程度である。



図 4.10: セルに落とされたエネルギーの和の η 依存性の分布: $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ 、 $\Delta R = 0.3$ とした ときのカロリーメータで観測されるエネルギーとトラックの η の依存性を示している。赤いプ ロットはノイズがない場合、青いプロットはノイズの効果を取り入れてクラスターアルゴリズ ムを用いた場合を示している。黒いプロットはノイズがないときとあるときとの差を示してい る。バレル領域では 10%、ギャップ領域では 20% のエネルギー損失がある。

図 4.11、4.12 にはそれぞれ EM スケールとハドロニックスケールでのバレル領域とギャッ

プ領域における $\sum E_{cell}/E_{track}$ の分布を示している。ノイズ抑制の効果は特に $\sum E_{cell}/E_{track}$ が小さい領域で特に効いているため、クラスターアルゴリズムを用いるとエネルギー損失が生じてしまう。結果的にギャップ領域では不感物質によるエネルギー損失と ΔR コーンからのエネルギーの漏れによって $\sum E_{cell}/E_{track}$ が小さく、ノイズ抑制の効果は特に大きくなる。



図 4.11: ノイズ抑制によるエネルギー損失 (EM スケール)



図 4.12: ノイズ抑制によるエネルギー損失 (ハドロニックスケール): $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ 、 $\Delta R = 0.3$ とした時のノイズがある場合とない場合との比較しており、青いプロットがノイズがある場合、赤いプロットがノイズがない場合を示している。また左図はバレル領域、右図はギャップ領域の場合である。図 4.11、4.12 はそれぞれ EM スケールとハドロニックスケールを示している。

4.3 π^0 に対するカロリーメータの応答

この節では π^0 に対するカロリーメータの応答を評価する。前節と同様に π^0 のシャワーの 広がりと ΔR コーン内のエネルギーを測定する。ここでもクラスターアルゴリズムを用いて、 クラスターを構成するセルのエネルギー和を計算する。 π^0 は $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ に崩壊するので、これ を EM スケールで測定する。

図 4.13 には π^0 の広がりを確認するために $\sum_{in\Delta R} E_{cell}/E_{\pi^0}$ と ΔR の相関を示す。バレル領域とギャップ領域どちらでも $\Delta R = 0.3$ 程度の広がりしかないが、 γ 線は物質と電磁相互作用するため物質量が多いの多いギャップ領域では特にエネルギー損失が大きい。ここでは $E_{\pi^0} = 1.5 \sim 2.5 GeV$ の π^0 を用いており、バレル領域では元の π^0 の 80%、ギャップ領域では 50% 程度のエネルギーしかカロリーメータで検出できない。



図 4.13: バレル領域とギャップ領域における π^0 シャワーの広がり: $E_{\pi^0} = 1.5 \sim 2.5 GeV$ の π^0 をもちいる。横軸には ΔR 、縦軸には $\sum_{in\Delta R} E_{cell}/E_{\pi^0}$ をとっている。左図はバレル領域、右 図はギャップ領域の場合である。バレル領域では 80%、ギャップ領域では 50% のエネルギーが 検出される。

また、 $E_{\pi^0} = 1.5 \sim 2.5 GeV$ の π^0 のカロリーメータ前方でのエネルギー損失と η の依存性を図 4.14 を示す。 π^0 の不感物質によるエネルギー損失については次のように定義する。

$$E_{loss} = E_{\pi^0} - \sum_{\Delta R < 0.3} E_{cell} \tag{4.4}$$

 π^0 のコーンの広がりは $\Delta R = 0.3$ 程度であり、電子より物質の透過力が大きいのでエネル ギーが低くてもバレル領域なら十分カロリーメータに到達する。前節のようにミニマムバイア ス事象において π^{\pm} のエネルギーを $\Delta R = 0.3$ のコーンを用いて測定するとき、 π^0 による重複 が起きてしまう。 π^0 は電磁相互作用しかせず、これに e/h ファクターをかけてしまうと、 π^{\pm} のエネルギーを大きく過大評価してしまう。



図 4.14: カロリーメータ前方の不感物質による π^0 のエネルギー損失: π^0 のエネルギー損失は $E_{loss} = E_{\pi^0} - \sum_{\Delta R < 0.3} E_{cell}$ で定義している。用いている π^0 は $E_{\pi^0} = 1.5 \sim 2.5 GeV$ のエネル ギーで、コーンの大きさは $\Delta R = 0.3$ である。物質量が多いギャップ領域やエンドキャップ領域 ではエネルギー損失は特に大きい。

第5章 ミニマムバイアス事象を用いたカロリー メータの性能評価

ミニマムバイアス事象とは2つの陽子が非弾性散乱をする比較的 P_T の低い粒子 (主に π^{\pm} 、 π^0)が生成される反応である。図 5.1 に LHC における様々なプロセスの生成散乱断面積を示してある。ミニマムバイアスは約70mb 程度ある。



図 5.1: LHC における各プロセスの散乱断面積 [5]

5.1 ミニマムバイアス事象における π^{\pm} 、 π^{0} の分布

図 5.2 には、 $\pi^{\pm} \ge \pi^{0}$ の η 分布を示してある。 π^{\pm} 、 π^{0} のスピンは0、アイソスピンはそれ ぞれ ± 1 、0 なので、同じ分布をしており、 π^{\pm} の方が π^{0} アイソスピンの違いより 2 倍生成さ れる。



図 5.2: π^{\pm} 、 π^0 の η 分布

ミニマムバイアス事象では、 π^{\pm} は荷電粒子であるため、トラックを作るが、 π^{0} の寿命は 8.4×10⁻¹⁷ 秒で $\gamma\gamma$ に崩壊し、電荷をもたないためトラックを作らない。また、 γ 線は純粋な 電磁相互作用しかしない。前節で用いた手法をもちいる場合、この π^{0} との重複を取り除く必 要がある。ジェネレータの情報を用いて、 π^{\pm} と π^{0} の ΔR を確認する (図 5.3)。



図 5.3: トラックの入射位置と π^0 の ΔR 分布

5.2 重複するトラック

第4節と同様の手法でカロリーメータ内に落とされたエネルギーを評価する。 π^{\pm} のシャワーの広がりは図 4.3 に示したが、カロリーメータ全体で落とされたエネルギーのうち $\Delta R = 0.3$ のコーン内には 70% 程度、 $\Delta R = 0.7$ のコーン内には 90% 程度が含まれている。トラック同士の PreSampler への入射位置の ΔR を図 5.4 に示す。



図 5.4: トラック同士の PreSampler への入射位置の ΔR

5.3 シングル *π*[±] との比較

図 5.5 には 4 章で得たシングル π^{\pm} の結果とミニマムバイアス事象を用いたときのセルの エネルギー和を示す。シングル π^{\pm} のエネルギーは $E_{\pi^{\pm}} = 2GeV$ 、ミニマムバイアス事象に対 しては $E_{track} = 1.5 \sim 2.5 GeV$ のトラックについて評価した。ミニマムバイアス事象を用いる と、 π^{0} のシャワーと重複した γ 線による大きな超過が見られる。



図 5.5: シングル π[±] とミニマムバイアス事象とのセルのエネルギー和の比較: 赤いプロットは シングル π[±]、青いプロットはミニマムバイアス事象を用いたときのセルのエネルギー和を示 している。ミニマムバイアス事象に見られる大きな超過は重複した γ 線によるものである。

5.4 重複する π^0 の評価

 π^0 は衝突点以外にカロリーメータの前方にある不感物質と相互作用することでも生成する。図 5.6 には不感物質中で生成された π^0 の分布を示している。



図 5.6: カロリーメータ前方の不感物質中の $\pi^0(p_T > 1 GeV)$ の生成位置。

衝突点から生成された π^0 と不感物質中で生成された π^0 がカロリーメータに与える影響を確認する。図 5.7 にはトラックの入射位置から $\Delta R = 0.3$ 内の π^0 のエネルギー和を示している。 ジェネレータ情報から衝突点からの π^0 のエネルギーととこれに不感物質中との相互作用によって生成された π^0 のエネルギーを加えた場合について示している。このような π^0 の重複もあるが、その効果は比較的小さい。



図 5.7: トラックの入射位置から $\Delta R = 0.3$ 内の π^0 のエネルギー和: 横軸はエネルギー和を示しており、赤いプロットは陽子-陽子衝突によって生成された π^0 のエネルギー和、青いプロットはこれに物質との相互作用によって生成された π^0 のエネルギーを加えたものを示している。

トラックの付近の γ 線の効果を見るため、図 5.8 のようにトラックから十分離れたクラス ターを用いる。 π^0 や γ 線はトラックを作らないので、トラックから十分離れたクラスターを γ 線によって作られたものとする。

純粋な γ のシャワーによるエネルギーをとるために次の条件を要求する。

- $E_{cell} > 4\sigma_{noise}$ を満たすクラスターを構成しているセルを中心として選ぶ。
- 中心のセルから $\Delta R = 0.3$ 以内にあり、かつトラックから $\Delta R = 0.7$ 以上離れているセルのエネルギーを足し合わせる。もし DeltaR = 0.7 以内のセルが含まれてしまった場合は



図 5.8: トラックから十分孤立したクラスター:赤い線はトラック、緑の線は π^0 や γ 線、黄色の部分はクラスターを表している。ミニマムバイアス事象においてクラスターは主に π^{\pm} 、 π^0 から作られ、またはこれらが重複してしまう場合もある。

これを落とす。

• 電磁シャワーの広がりは比較的小さいので、

$$0 < \frac{\sum_{\Delta R < 0.1} E_{cell}}{\sum_{\Delta R < 0.3} E_{cell}} < 1$$
$$0 < \frac{\sum_{\Delta R < 0.3} E_{cell}}{\sum_{\Delta R < 0.5} E_{cell}} < 1$$

とする。

 電磁カロリーメータの2層目ですべてのエネルギーを落としてしまうとして、3層目以降 にエネルギーの漏れがない。

図 5.9 には、ジェネレータ情報から π^{\pm} のカロリーメータの入射位置から $\Delta R = 0.3$ 以内に π^{0} があるときの π^{0} のエネルギー和と上記の条件を満たしたセルの集合のエネルギー和を示し ている。



図 5.9: トラックから $\Delta R = 0.3$ 内に γ のエネルギー和と孤立したセル:赤い線はトラック、緑の線は π^0 や γ 線、黄色の部分はクラスターを表している。ミニマムバイアス事象においてクラスターは主に π^{\pm} 、 π^0 から作られ、またはこれらが重複してしまう場合もある。

またジェネレータ情報から、トラックと γ が $\Delta R = 0.3$ 以内に重複する確率を図 5.10を示す。 ここでほとんどの γ 線は衝突点で生成された $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ によって生じたものである。図 5.10 よりこの確率はどの η 領域に対してもに一定である。



図 5.10: トラックのカロリーメータの入射位置から $\Delta R = 0.3$ 内に γ が入射する確率

 $< E_{\pi^{\pm}} > \mathbf{c} \ \pi^{\pm} \ \mathbf{i} \ \mathbf{j}$ カロリーメータに落とすエネルギーの平均、 $\sum_{\Delta R < 0.3} E_{cell} \mathbf{c}$ トラックの入射位置から $\Delta R = 0.3$ 以内のセルのエネルギー和、 $< E_{\pi^0} > \mathbf{c} \ \pi^0$ のカロリーメータの応答とすると、

$$\langle E_{\pi^{\pm}} \rangle = \sum_{\Delta R=0.3} E_{cell} - \langle E_{\pi^0} \rangle$$
 (5.1)

となる。ここで < E_{π^0} > は図 5.8、5.10 から、

$$\langle E_{\pi^0} \rangle = \sum_{\Delta R=0.3} E_{isolated \ cell} - P_{\pi^0}$$

$$(5.2)$$

と求めることができる。図 5.10 から P_{π^0} は一定であるので、統計が多いバレル領域について 分布を規格化して求めることができる。

$$P_{\pi^0} = \frac{\langle \sum E_{cell} \rangle_{minbias} - \langle \sum E_{cell} \rangle_{single\pi^{\pm}}}{\langle E_{\pi^0} \rangle}$$
(5.3)

以上を用いて π^0 の重複によるエネルギーを図 5.11 に示す。これはシングル π^{\pm} からの超過 したエネルギー分布 (EM スケール)をよく再現している。

ミニマムバイアス事象から、図 5.11 で予想されている重複エネルギーを引くことで EM ス ケールでの π^{\pm} の分布が再現される。



図 5.11: シングル π^{\pm} からの超過したエネルギーと予想される γ 線による重複エネルギー分布: 赤いプロットは予想される < E_{π^0} > 分布、青いプロットは図 5.5 で示したミニマムバイアス事 象とシングル π^{\pm} との分布の差を示してある。 $E_{track} = 1.5 \sim 2.5 GeV$ である。

第6章 まとめ

ATLAS 検出器の高い運動量分解能を持つトラッキングを用いることでカロリーメータの 性能を評価をすることを示した。シングル π^{\pm} のデータを基準にしているが、ミニマムバイア ス事象中にはトラックを作る π^{\pm} とトラックを作らない π^{0} が主な生成粒子である。トラックは すべて π^{\pm} によって作られたものと仮定し、重複する π^{0} の効果はトラックから十分孤立したセ ルを用いることで予想でき、トラックと π^{0} の重複する確率はほぼ一定であるので、統計が多 い領域を用いて規格化することができる。これは EM スケールでのシングル π^{\pm} の分布をよく 再現している。

付録A サジッタから p_T を求める方法

 ρ を曲率半径 [m]、
 Bを磁場 [T]、
 Lを測定間隔 [m] とすると、サジッタは A.4 式によって 表わされる (図 A.1)。



図 A.1: サジッタ: 図中の赤い曲線は、荷電粒子の軌跡を表す。ATLAS では、荷電粒子の運動 量はサジッタ (図中の s) を用いて測定される。サジッタは運動量の逆数に比例するため、サジッ タの値から粒子の運動量を求めることが出来る。

$$p_T[GeV/c] = 0.3B\rho[T \cdot m] \tag{A.1}$$

$$\frac{L}{2\rho} = \qquad \sin\frac{\theta}{2} \sim \frac{\theta}{2} \tag{A.2}$$

$$\Delta p_T = p_T \sin\theta \sim 0.3LB \tag{A.3}$$

$$s = \rho \left(1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \sim \rho \frac{\theta^2}{8}$$
$$= \frac{0.3}{8} \frac{L^2 B}{p_T}$$
(A.4)

上式からサジッタは *p*_T の逆数に比例する。

次に3点のみの測定を考える。3点の座標をそれぞれ x_1 、 x_2 、 x_3 とすると、サジッタは以下の式で与えられる。

$$s = x_2 - \frac{x_1 + x_3}{2} \tag{A.5}$$

ここで、 x_1 、 x_2 、 x_3 の誤差関数を $\sigma(x)$ とすると、

$$\Delta\left(\frac{1}{p_T}\right) = \frac{8}{0.3 \cdot BL^2} \sqrt{\sigma(x)^2 + \frac{1}{4}\sigma(x)^2 + \frac{1}{4}\sigma(x)^2} \\ = \frac{8}{0.3 \cdot BL^2} \sqrt{\frac{3}{2}}\sigma(x)$$
(A.6)

となる。すなわち、サジッタの誤差関数がガウシアンならば、 $1/p_T$ の誤差関数がガウシアンになる。

検出器の位置分解能を $\sigma(x)$ とすると、 p_T の誤差測定の p_T 依存性は、

$$\frac{\sigma_{p_T}}{p_T} = \sqrt{\frac{3}{2}} \sigma_x \frac{8p_T}{0.3BL^2} \tag{A.7}$$

となり、 p_T が大きいほど分解能が悪くなる。

付録B π^0 のカロリーメータ内で落とすエネル ギーの割合の p_T 依存性



図 B.1: π^0 のカロリーメータ内で落とすエネルギーの割合の p_T 依存性

付 録 C ミニマムバイアス事象における π⁰ の重 複確率

 $E_{track} = 1$ 、2、5GeVのカロリーメータの入射位置を中心に $\Delta R = 0.3$ 以内に γ 線が重複 する確率を図 C.1 に示す。トラックの周辺に γ 線が重複する確率はどの η 領域に対しても一定 である。



図 C.1: $E_{track} = 1$ 、2、5GeVのカロリーメータの入射位置を中心に $\Delta R = 0.3$ 以内に γ 線が 重複する確率

付録D ミニマムバイアス事象における $E_{track} = 0.7 \sim 1.5 GeV$ に対する π^0 の重 複エネルギー

 $E_{track} = 0.7 \sim 1.5 GeV$ に対する π^0 の重複エネルギーについて図 D.1 に示す。



図 D.1: シングル π^{\pm} からの超過したエネルギーと予想される γ 線による重複エネルギー分布: 赤いプロットは予想される < E_{π^0} > 分布、青いプロットは図 5.5 で示したミニマムバイアス事 象とシングル π^{\pm} との分布の差を示してある。 $E_{track} = 0.7 \sim 1.5 GeV$ である。

参考文献

- [1] particle data group http://ccwww.kek.jp/pdg/
- [2] C. Issever et al., Nucl. Instr. and Meth. A 545 (2005) 803.
- [3] LHC homepage http://lhc.web.cern.ch/lhc/
- [4] ATLAS Collaboration "The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider"
- [5] 浅井祥仁 『LHC のための SUSY 講座 2008 年版』
- [6] PRESAMPLER Pictures http://lpsc.in2p3.fr/atlas/Pictures.html
- [7] ATLAS Magnetic Field https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/Atlas/MagneticField
- [8] Pythia Homepage http://home.thep.lu.se/ torbjorn/Pythia.html
- [9] CERN/LHCC/99-14 "ATLAS Detector and Phisics Performance Technical Design Report Volume1", ATLAS TDR 14, 25 MAY 1999.
- [10] CERN/LHCC/99-15 "ATLAS Detector and Phisics Performance Technical Design Report Volume2", ATLAS TDR 15, 25 MAY 1999.
- [11] ATL-LARG-PUB-2008-002 "Calorimeter Clustering Algorithms: Description and Performance"

謝辞

本研究を行うにあたり様々な指導や助言をして下さった浅井祥仁准教授と小林富雄教授に 深く感謝します。またこのテーマで研究する機会を与えていただいたことを大変感謝します。

金谷奈央子助教には解析やソフトウェアなど様々な面でお世話になりました。ATLAS 解析 グループの方々からは有益なアドバイスを沢山いただきました。本当にありがとうございました。

真下哲郎准教授、上田郁夫助教、田中純一助教、磯部忠昭特任助教、山本真平博士には、東京と CERN で研究を円滑に行う上での計算機の環境を整えていただきました。また ATLAS-JAPAN グループの皆様にはいろいろなアドバイスをしていただきました。どうもありがとうございま した。

同期である秋元銀河、東裕也君、山崎高幸君、金賀史彦君、結束晃平君、平山翔君、生出秀 行君、末廣徹君、白雪さん、金子大輔君、大録誠広君、山中隆志君のおかげで有意義な研究生 活を過ごすことができました。また多くの先輩・後輩の皆様にもいろいろお世話になりました。 ありがとうございました。

秘書の湯野栄子さん,安蒜律子さん、塩田雅子さん、片岡直子さんには大変お世話になりました。本当にありがとうございました。