

筑波大学大学院博士前期課程

数理物質科学研究科修士論文

光子コンバージョン事象を用いた
ATLAS 内部飛跡検出器の物質量評価

松隈 恭子
(物理学専攻)

2010 年 2 月

筑波大学大学院博士前期課程

数理物質科学研究科修士論文

光子コンバージョン事象を用いた
ATLAS 内部飛跡検出器の物質量評価

松隈 恭子
(物理学専攻)

指導教員 金 信弘 印

概要

ATLAS 実験において、粒子の詳細な運動量を測定するために、内部飛跡検出器の物質量を評価することは不可欠である。検出器の物質構成は、シミュレーションで再現できるように組み込まれているが、本研究では実際のデータを用いて光子が物質量に応じて電子・陽電子対にコンバージョンする事象を使って、検出器内部の物質量の評価を行う。

光子の横方向運動量が 20 GeV と 2 GeV のシミュレーションサンプル、重心系エネルギー 900 GeV のシミュレーションサンプル (ミニマムバイアス) と実際の LHC の運転による衝突事象の実データ (ミニマムバイアス) を用い、光子コンバージョンの再構成を行った。

いずれも、ビームパイプ、3 層のピクセル検出器、SCT 検出器の最内層の位置に再構成したコンバージョン点が多く分布しているのが確認できた。横方向運動量 20 GeV、衝突事象のシミュレーションと実データでは 2 層目の SCT 検出器も確認できた。

光子の横方向運動量を限定した 2 つのシミュレーションサンプルを用いて、再構成の効率を求めた。再構成の効率はビームから動径方向の距離 R が小さいほど効率がよく、ビーム軸から遠ざかると次第に効率が落ちることを確認した。これは R が大きいところでコンバージョンが起きると、飛跡検出器でのヒット数が少なくなり、飛跡再構成の効率が落ちるためである。また、2 GeV のサンプルは 20 GeV に比べて、 R が小さいところで効率が落ちる。

コンバージョンにより対生成した電子や陽電子の制動放射による横方向運動量損失がコンバージョン点再構成の位置分解能を悪化させている。再構成した R の分解能は、20 GeV で約 5.5 mm、2 GeV で約 4.6 mm である。制動放射による運動量損失の少ないイベントでの R の分解能は、20 GeV で約 5.4 mm、2 GeV で約 4.2 mm である。

衝突事象のシミュレーションと実データを用いた再構成では、共にビームパイプの内側の範囲で、Dalitz 崩壊を確認できた。シミュレーションと実データのコンバージョン点分布を比較すると、シミュレーションではピクセル 1 層目で物質量をやや多めに評価している可能性がある。ただし、検出効率等の不確かさも評価して判定する必要がある。

目次

第 1 章	LHC と ATLAS 実験	1
1.1	LHC	1
1.1.1	LHC 加速器	3
1.2	ATLAS 検出器	4
1.2.1	座標系の定義	6
1.2.2	内部飛跡検出器	6
1.2.3	カロリメータ	11
1.2.4	μ 粒子検出器	15
1.2.5	電磁石システム	18
1.2.6	トリガーとデータ収集	19
第 2 章	ATLAS ソフトウェア	22
2.1	ATHENA フレームワーク	22
2.2	フルシミュレーション	24
2.3	飛跡再構成	25
第 3 章	光子コンバージョン再構成	26
3.1	光子コンバージョン	26
3.2	コンバージョン再構成アルゴリズム	27
3.3	事象選択	28
3.4	シミュレーションサンプルを用いた光子コンバージョン再構成	29
3.4.1	コンバージョン点再構成 ($P_t=20, 2$ GeV)	29
3.4.2	位置分解能	34
3.4.3	再構成効率	37
3.4.4	ミニマムバイアスサンプルによる再構成	38
3.5	実際の衝突事象を用いた光子コンバージョン再構成	42
第 4 章	結論と今後の課題	43
4.1	結論	43
4.2	今後の課題	43

目次

1.1	CERN 研究所	1
1.2	ATLAS での初衝突イベント (候補)	2
1.3	LHC 加速器	3
1.4	LHC リングの概観	4
1.5	ATLAS 検出器	5
1.6	内部飛跡検出器の概略図	7
1.7	各検出器の設置位置	7
1.8	内部飛跡検出器の物質分布	8
1.9	ピクセルモジュールとディスク	9
1.10	SCT モジュール	10
1.11	TRT 検出器	11
1.12	カロリメータ	12
1.13	電磁カロリメータの吸収層	12
1.14	電磁カロリメータの鳥瞰図	12
1.15	タイルカロリメータ	14
1.16	エンドキャップ部ハドロンカロリメータ	14
1.17	フォワード部カロリメータの全体像	15
1.18	フォワード部カロリメータの構造	15
1.19	μ 粒子検出器の配置	16
1.20	MDT 検出器の構造	17
1.21	TGC 検出器の構造	17
1.22	ソレノイド磁石の磁場分布	18
1.23	トロイド磁石の概略図	19
1.24	トロイド磁石の磁場分布	19
1.25	ATLAS トリガーシステムの概略図	20
2.1	イベントデータフロー	23
2.2	ATHENA オブジェクト図	23
2.3	フルシミュレーションの流れ	24
3.1	光子の線吸収係数	26
3.2	コンバージョン点の定義	28
3.3	χ^2/Ndf 分布	30
3.4	$ \Delta \cot \theta $ 分布	30

3.5	S 分布	31
3.6	$ \Delta Z $ 分布	32
3.7	コンバージョン点分布 (Photon Pt 20,2 GeV)	33
3.8	再構成点のずれ (R)	35
3.9	制動放射によるエネルギー損失が小さい粒子による再構成点のずれ (R)	35
3.10	R 方向位置分解能	36
3.11	再構成効率	37
3.12	ミニマムバイアスサンプル (900 GeV) における Photon Pt	38
3.13	TrtHTHit/TrtHit 分布	39
3.14	不変質量分布	39
3.15	コンバージョン点分布 (ミニマムバイアスサンプル)	40
3.16	ミニマムバイアスサンプルの再構成の位置精度	41
3.17	再構成点	41
3.18	コンバージョン点分布 (衝突事象)	42

表 目 次

1.1	LHC 加速器の主な仕様	2
1.2	内部粒子飛跡検出器の主な仕様	6
1.3	カロリメータの検出器領域と分割	13
2.1	飛跡の特徴とスコアに与える影響	25
3.1	Photon の横方向運動量による事象選択	32
3.2	ビームパイプと内部飛跡検出器バレル部の R 方向設置位置	34
3.3	ミニマムバイアスサンプル 事象選択	39

第1章 LHCとATLAS実験

1.1 LHC

LHC(Large Hadron Collider)とはスイス,ジュネーブ郊外のCERN研究所にある円周27kmの巨大な陽子陽子衝突型加速器である。(図1.1) LHCは2000年に実験を終了したLEP(Large Electron-Positron Collider)の地下トンネルを利用し,陽子を7TeVまで加速し互いに衝突させる。2008年9月に450 GeVでビームの周回に始めて成功した。その際電磁石間での超伝導線の接続不良により真空容器に穴があきヘリウムがトンネル内に漏れ出すという事故が起こり,修理や安全対策のため運転を停止していた。14ヵ月後の2009年11月に再稼働し,ビームの周回,そして入射エネルギー450 GeVでのビーム衝突に成功した。図1.2にATLAS検出器で観測された入射エネルギーでの初衝突イベント(候補)の様子を示す。今後はまず $2 \times 3.5 \text{ TeV}$ の衝突実験から始める予定である。

LHCは重心系エネルギー14TeV,ルミノシティは最大 $1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を目標としている。LHCの主なパラメータを表1.1に示す。

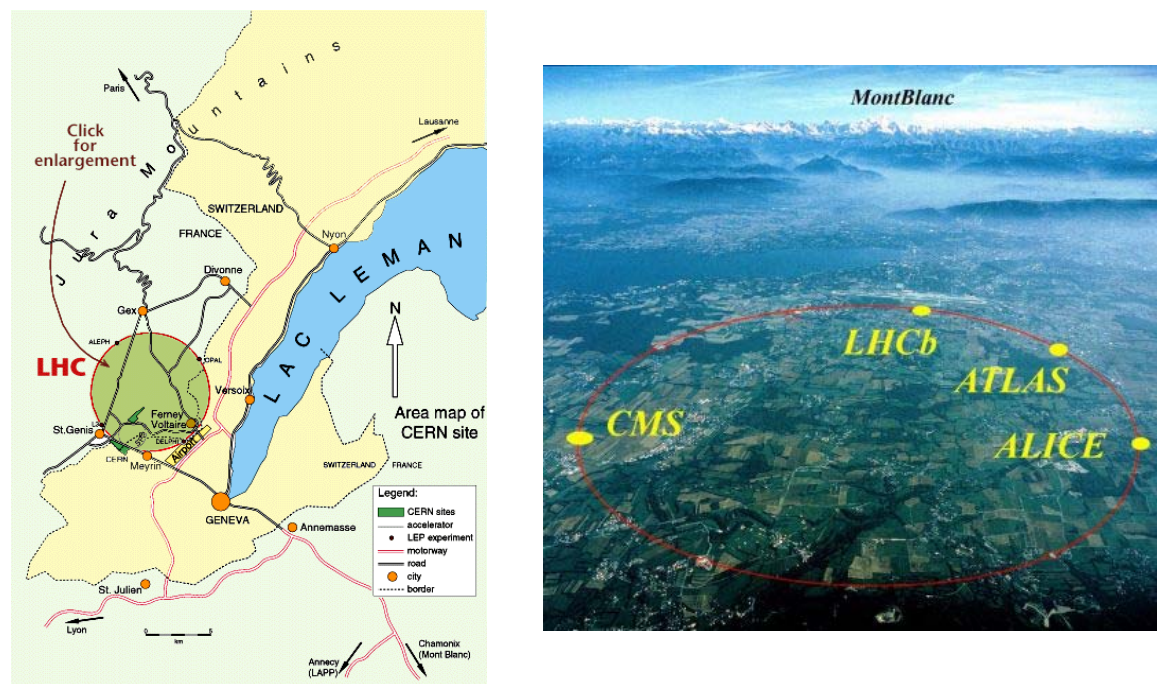


図 1.1: (左)CERN 研究所の位置. スイスとフランスの国境に位置する. (右)LHC の概観. 円形の赤線の下, 地下約 100m のトンネル内に LHC 加速器が設置されている. 黄色の点で示した場所にそれぞれ 4 つの検出器が設置されている.

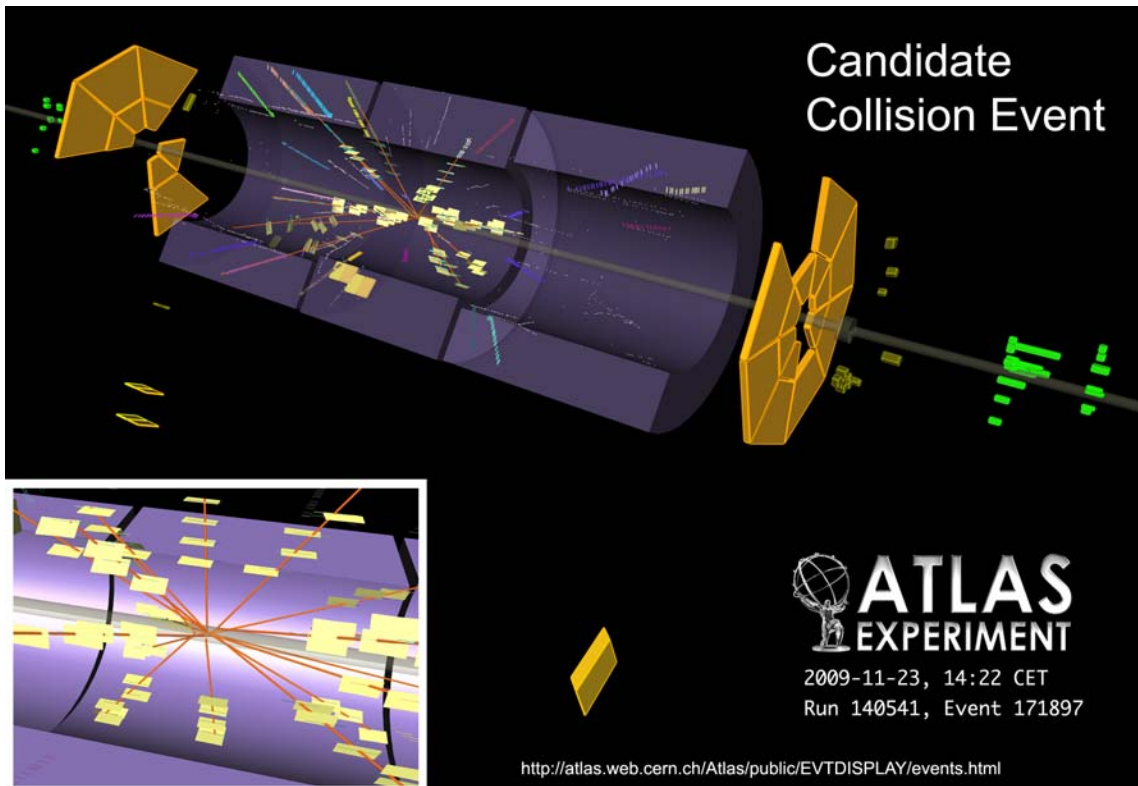


図 1.2: ATLAS 検出器で観測された初衝突イベントの候補 .

主リング長	26658.883 m
粒子	陽子 - 陽子
陽子ビームエネルギー	7.0 TeV
最高ルミノシティ	$1.0 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
バンチ間隔	25 nsec (40 MHz)
バンチ数	2808 バンチ
陽子数/バンチ	1.0×10^{11}
ビームエミッタンス	$3.75 \mu\text{m rad}$
RMS ビームサイズ	$16.7 \mu\text{m}$
RMS バンチ長さ	7.55 cm
超伝導双極電磁石	1232 台
双極電磁石長と磁場	14.2 m, 8.33 Tesla
ルミノシティ寿命	10 時間
シンクロトロン放射損失エネルギー	3.6 kW/ring

表 1.1: LHC 加速器の主な仕様

1.1.1 LHC 加速器

ビームは線形加速器 (LINAC) , ブースターで加速され Proton Synchrotron (PS) に入射される . PS で 26GeV/c まで加速した後 , Super Proton Synchrotron (SPS) で 450GeV/c まで加速され , LHC に入射される . 図 1.3 に LHC 加速器システムの全体像を示す . LHC は 8 つのアーケ部とそれらをつなぐ直線部で構成されている . 8 つの直線部のうち 4 つは粒子を加速する RF 空洞やビームダンプ , ビームハローを抑制する装置等が設置されている . 残りの 4 箇所にはビームの衝突点があり , 汎用型検出器の ATLAS , CMS , 重イオン実験用の ALICE , B ハドロン実験用の LHCb がそれぞれ設置されている .

CERN Accelerator Complex (operating or approved projects)

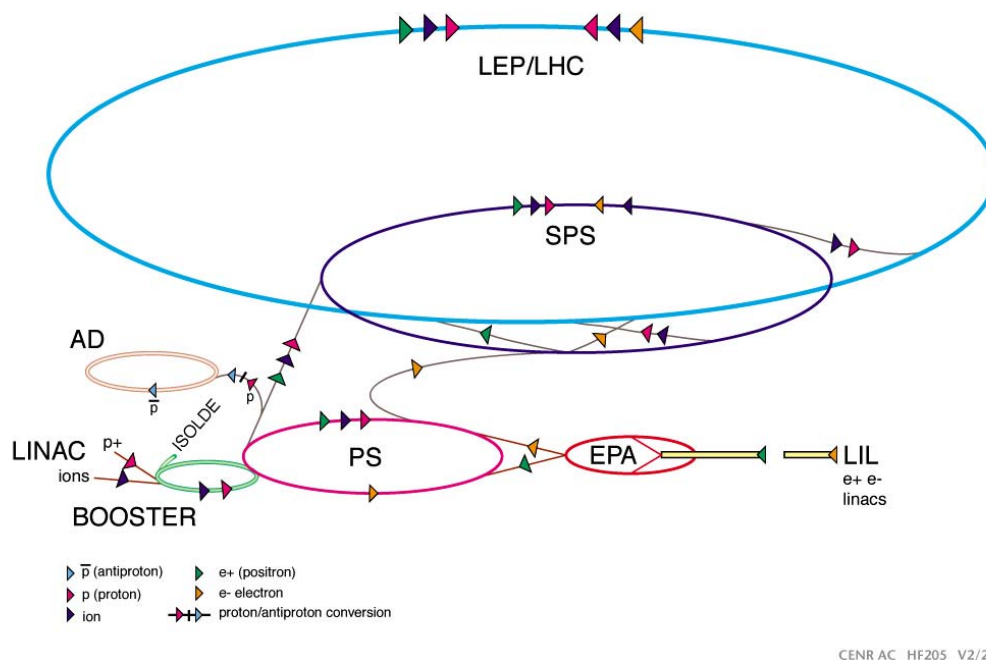


図 1.3: LHC 加速システムの全体像.

LHC 加速器は世界最高エネルギー , 高輝度を目指し設計されている . LHC 加速器を用いることで , さまざまな物理現象の観測を行うことができる . 主な研究を以下に挙げる .

- Higgs 粒子の探索 (質量の起源の探索)
 - 標準理論 Higgs 粒子の探索
 - 荷電 Higgs 粒子等を含んだ超対称性 Higgs 粒子の探索
 - Higgs 粒子の質量・生成断面積の測定
 - フェルミオン・ボソンと Higgs 粒子との結合定数の測定
 - Higgs 粒子のスピン・パリティの測定

- 標準理論を超える物理の探索
 - 超対称性粒子の探索
 - 余剰次元の探索
 - 新しいゲージボソンの探索
- 標準理論の検証
 - W ボソンやトップクォークの精密質量測定
 - B メソンを用いた CP 対称性の破れの測定

1.2 ATLAS 検出器

ATLAS 検出器は CERN 研究所のメインサイトに最も近い Point1 衝突点に設置された汎用型検出器である。(図 1.4,1.5) 直径約 22m, 長さ 46m の円筒型で, LHC に設置された 4 つの検出器中最も大きい。メインコントロールルームは地上にあり, 検出器や周辺のエレクトロニクスは地下 100m に設置されている。前述の通り, ATLAS 実験で期待される主な物理成果として, 質量の起源とされる Higgs 粒子の発見, 超対称性粒子の発見や隠れた余剰次元の発見等が挙げられる。

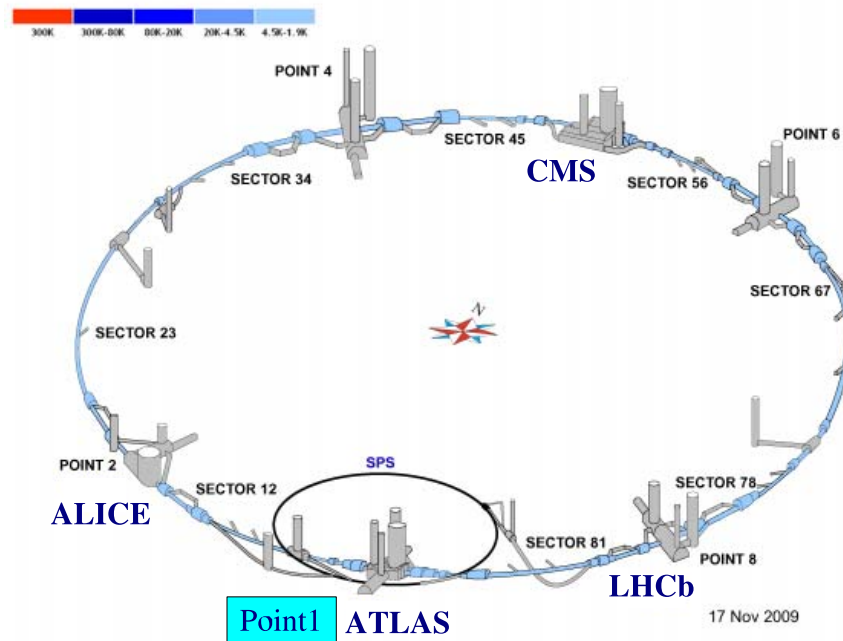


図 1.4: LHC リング上の検出器の配置。Point1 に ATLAS 検出器が設置されている。色は全 8 セクターが冷却され, 加速可能状態であることを示す。

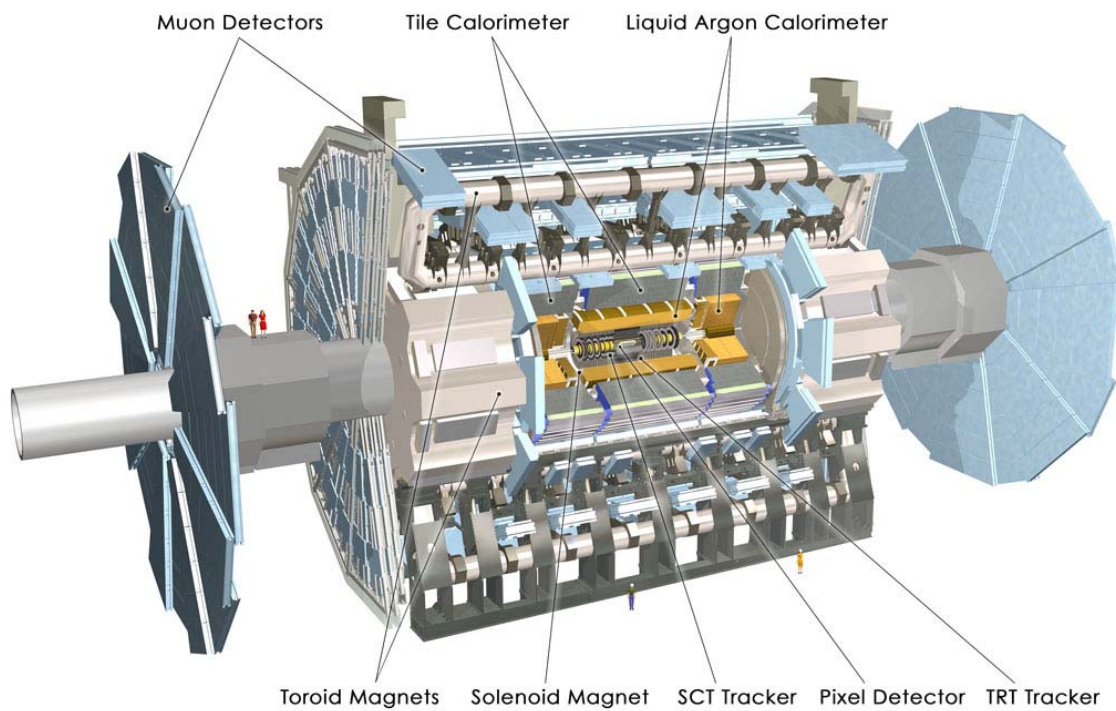


図 1.5: ATLAS 検出器の概観．内側から内部飛跡検出器，カロリメータ， μ 粒子検出器．またソレノイド磁石，トロイド磁石も設置されている．

1.2.1 座標系の定義

ATLAS 検出器の座標系は，リングの中心方向を "+x"，鉛直上向きを "+y"，加速器のリングを上方から見て反時計回りの方向を "+z" と定義している．z 方向がビーム軸方向である．ATLAS 検出器では，+z 側を A-side, -z 側を C-side と呼ぶ．

円筒座標系の場合 (r, ϕ, θ) を用いる．"r" は XY 平面上におけるビームパイプからの距離 (半径)，" ϕ " は x 軸からの方位角，" θ " は z 軸からの角度である．また，衝突型加速器では θ の代わりに擬ラピディティ η を用いることもある．

$$\eta = -\ln\left(\tan\frac{\theta}{2}\right) \quad (1.1)$$

以下，式 (1.1) の定義に従う．

1.2.2 内部飛跡検出器

ATLAS 検出器の最も内側に設置されている検出器が内部飛跡検出器である．内部飛跡検出器は 2T のソレノイド磁場中に設置されており，衝突によって生成された荷電粒子の飛跡を検出する．飛跡の曲率を測定することで粒子の運動量を求めることができる．また衝突点や二次崩壊点の再構成を行う．内部飛跡検出器は 3 種類の検出器で構成されている．ビーム軸に近い位置から，Silicon Pixel detector (ピクセル)，SemiConductor Tracker (SCT)，Transition Radiation Tracker (TRT) である．それぞれバレル部とエンドキャップ部に分かれている．内部飛跡検出器の主な仕様を表 1.2 に，概略図と各々の検出器の設置位置を図 1.6，1.7 にそれぞれ示す．

検出器	設置位置	検出器表面積 (m^2)	空間位置分解能 (μm)	チャンネル数 (10^6)	検出領域 (η)
Pixel	B layer	0.2	$r\phi=12, z=66$	16	± 2.5
	バレル部	1.4	$r\phi=12, z=66$	81	± 1.7
	エンドキャップ部	0.7	$r\phi=12, z=77$	43	1.7-2.5
SCT	バレル部	34.4	$r\phi=16, z=800$	3.2	± 1.4
	エンドキャップ部	26.7	$r\phi=16, z=800$	3.0	1.4-2.5
TRT	バレル部		170/ストロー	0.1	± 0.7
	エンドキャップ部		170/ストロー	0.32	0.7-2.5

表 1.2: 内部粒子飛跡検出器の主な仕様．

式 1.2 に示した通り，飛跡の曲率半径 ρ から粒子の横方向運動量を決定する．

$$\frac{m\vec{v}^2}{\rho} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad \Rightarrow \quad P_T [\text{GeV}/c] = 0.3B\rho [\text{Tm}] \quad (1.2)$$

q は荷電粒子の電荷， v は速度， B は磁速密度を表す．

曲率半径は各検出器のヒットポイントをフィットして得られる．そのため，各検出器の位置分解能が横方向運動量の測定分解能を決定する．また，一般に横方向運動量が大きくなると曲率半径が大きくなり， P_T の測定精度は悪くなる．

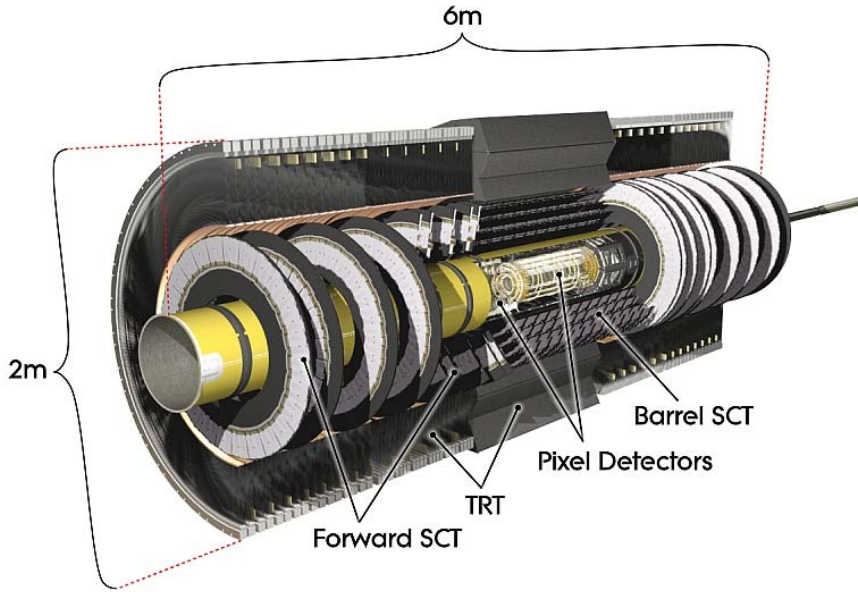


図 1.6: 内部飛跡検出器の概略図．内側から，ピクセル検出器，SCT 検出器，TRT 検出器．各検出器はバレル部およびエンドキャップ部から構成される．

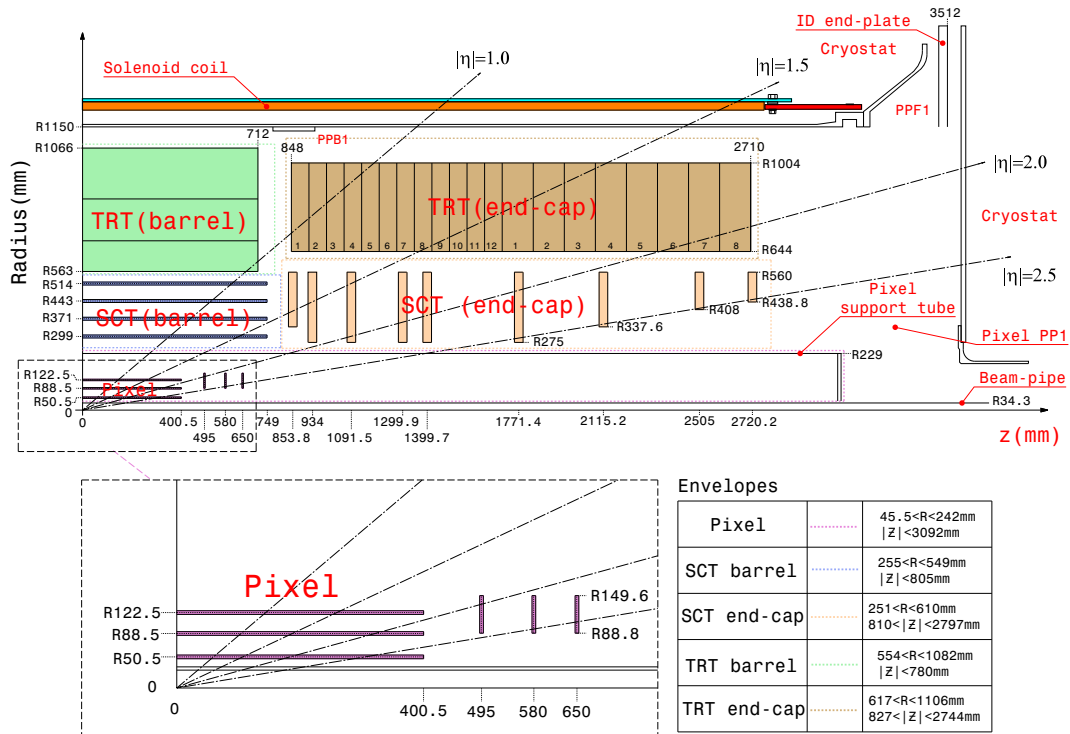


図 1.7: 各検出器の設置位置．内部飛跡検出器をビーム軸と平行に切ったときの 1/4 を示す．

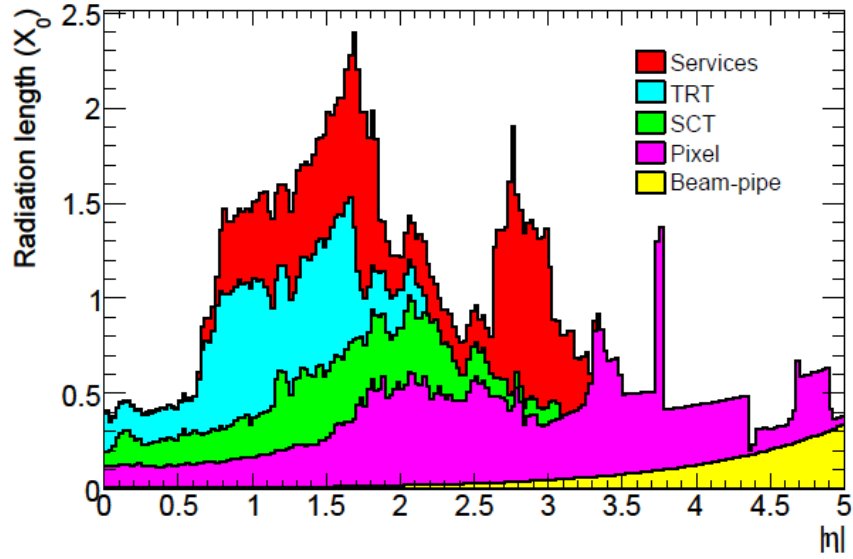


図 1.8: 内部飛跡検出器の物質質量分布 . η の関数として表している . 物質質量は放射長単位である .

内部飛跡検出器の基本的な性能として, 運動量分解能 (式 1.3), 動径方向インパクトパラメータ分解能 (式 1.4), ビーム軸方向インパクトパラメータ分解能 (式 1.5) を示す . これらはシミュレーションによって見積もられている .

$$\sigma(1/P_T) = 0.00036 \oplus \frac{0.013}{P_T \sqrt{\sin \theta}} \text{ (GeV}^{-1} \text{ c)} \quad (1.3)$$

$$\sigma(d_0) = 12 \oplus \frac{88}{P_T \sqrt{\sin \theta}} \text{ (}\mu\text{m)} \quad (1.4)$$

$$\sigma(z_0) = 96 \oplus \frac{160}{P_T \sqrt{\sin \theta}} \text{ (}\mu\text{m)} \quad (1.5)$$

ただし, \oplus は, 自乗和の平方根を表す .

内部飛跡検出器はカロリメータの内側に設置されるため, 可能な限り物質質量を少なくする必要がある . 内側には, 荷電粒子の崩壊点再構成の要求精度や高い飛跡密度から, 位置分解能に優れたシリコン検出器 (ピクセル, SCT) が採用された . 一方, 物質質量を抑えるため, 外側は物質質量の小さいガス検出器 (TRT) が使用されている . 理想的に, $z=0$ 付近で生成された荷電粒子は 3 層のピクセル検出器, 8 層の SCT 検出器, 36 本の TRT に飛跡を残す . 図 1.8 に内部飛跡検出器の物質質量分布を示す . 物質質量は放射長単位で表している . η が 0.8~1.8 の範囲に物質質量の多い領域が見られるが, これはバレル部の読みだしケーブル等がこの領域に存在するためである .

ピクセル検出器

ピクセル検出器は衝突点に最も近い位置に設置されている。ピクセル検出器の役割は衝突点と2次崩壊点の再構成である。またBハドロンや τ レプトンの様な寿命の短い粒子の識別を行う。

ピクセル検出器はバレル部とエンドキャップ部に分かれている。バレル部は、ビーム軸から50mmの地点に取り外しが可能なB layerが置かれ、89mm、123mmの地点に常設の2層が設置されている。エンドキャップ部は、 $z=\pm 495$ mm、 ± 580 mm、 ± 650 mmの地点に3層ずつ設置されている。

ピクセル検出器の各モジュールの有感領域の大きさは 16.4×60.8 mm²で47232のピクセルを有し、16の読みだしチップにより信号を得る。一つのピクセルのサイズは 50×400 μm^2 ($\phi \times z$ 方向)である。ノイズの低いエレクトロニクスを用い、放射線損傷により収集電荷が減少しても十分大きな信号雑音比が得られるように設計されている。また、ピクセルサイズが小さく、バルクが薄いことから、放射線損傷による暗電流の増加が少ない。このため、放射線耐性が非常に高く、 5×10^{14} neutrons/cm²の放射線に耐え得る構造になっている。ピクセルモジュールとエンドキャップのディスクを図1.9に示す。

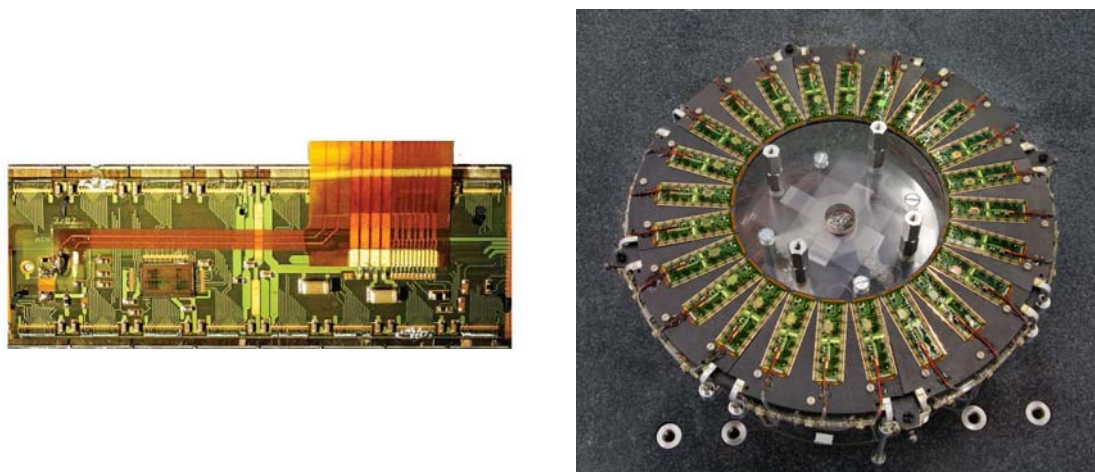


図 1.9: ピクセルモジュールとエンドキャップのディスク。(左)pixelモジュールの写真。(右)エンドキャップ部のディスク。反対側にも放射状にモジュールが並び全 ϕ 領域をカバーしている。

SCT 検出器

SCT 検出器は、ピクセル検出器の外側に設置されている。SCT 検出器の役割はピクセル検出器とともにインパクトパラメータを精度よく再構成し、 $r - \phi$ 方向の優れた位置分解能を利用して荷電粒子の横方向運動量を精度よく測定することである。TRT 飛跡とピクセルヒットとを対応づけることで、飛跡再構成の高速化に役立つ。

SCT 検出器もピクセル検出器と同様にバレル部とエンドキャップ部に分かれている。バレル部は4層からなっており、それぞれビーム軸から299mm、371mm、443mm、514mmの地点に設置されている。エンドキャップ部は、両サイドにそれぞれ9層ずつ、 $z=\pm 853$ ~ 2720 mmの地点に設置されている。

SCT 検出器は、半導体を用いたマイクロストリップ型検出器であり、デジタル読みだしを用いている。パレル部、エンドキャップ部のモジュールを図 1.10 に示す。パレル部のモジュールは $6 \times 6\text{cm}^2$ の高純度シリコンセンサー 4 枚がベースボードを挟む形で表裏に取り付けられた構造である。センサーには $80\mu\text{m}$ 間隔で 768 本のストリップ電極が形成されており、表裏のセンサーのストリップは互いに 40 mrad で交差している。そのため、粒子の通過位置を 2 次元で読み出すことができる。エンドキャップ部のモジュールも同様に 2 次元読みだしを行う。4 種類 (Outer, Middle, Short-Middle, Inner) の大きさのモジュールがあり、それぞれ大きさによって $54 \sim 90\mu\text{m}$ のストリップ間隔がとられている。



図 1.10: SCT パレルモジュール, エンドキャップモジュールの写真。(左) パレル SCT モジュール。写真横方向にストリップが走っている。(右) エンドキャップ SCT モジュール。左から Outer, Middle, Inner。写真縦方向にストリップが走っている。

TRT 検出器

TRT 検出器は、内部飛跡検出器の最も外側に設置されている。ピクセル、SCT 検出器とは違いストロー型のガスチューブ検出器である。TRT は、荷電粒子が誘電率の異なる物質の境界を通過する際に放出する X 線によって、電子をハドロンから見分けることができる。

TRT 検出器もパレル部とエンドキャップ部に分かれている。図 1.11 に TRT 検出器のパレル部とエンドキャップ部の写真をそれぞれ示す。パレル部は、約 50000 本のチューブがビーム軸と平行な方向に並べられている。ビーム軸から 554mm から 1082mm の地点に全 36 層で構成されて、 $|\eta| < 0.7$ の領域を覆っている。エンドキャップ部は、両サイドにそれぞれ 160000 本のチューブがビーム軸から放射状に並べられている。

TRT のドリフトチューブは、太さ 4mm のチューブに直径 $30\mu\text{m}$ のタングステンワイヤーが張られており、チューブ内にキセノン、二酸化炭素、酸素が 70:27:3 で混合されたガスが充填されている。TRT 検出器では、荷電粒子が通過した時に生じる電離電子のドリフト時間を測定することにより、 $170\mu\text{m}$ の位置分解能を得る。また、一定のヒット占有率 (Occupancy) に抑えるために、パレル部は $z=0$ を境にして z 軸方向正と負で分割されており、各々端から信号を読み出す。エンドキャップ部は放射状に並んだ外周の端から読み出しを行う。

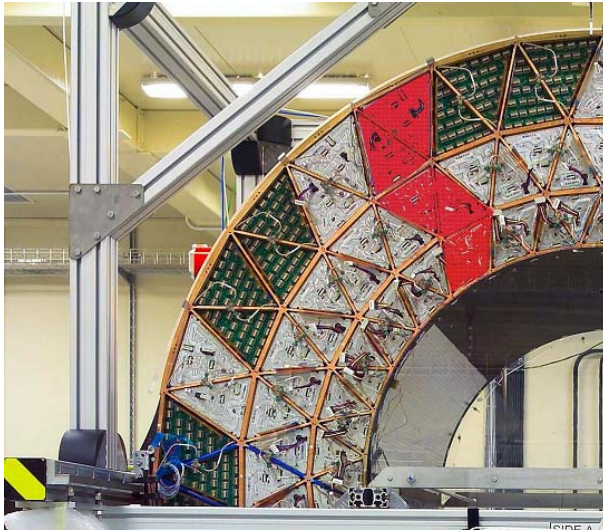


図 1.11: TRT 検出器 . (左) バレル部の 4 分の 1 の写真 . 内側から 3 層 , また動径方向に各 32 モジュールに分かれている . (右) エンドキャップ部の写真 . 放射状にチューブがすき間なく並べられている .

1.2.3 カロリメータ

カロリメータは粒子のエネルギーを測定する検出器である . また , 電子光子ジェットを区別する役割もある . ATLAS 検出器には , 電磁カロリメータとハドロンカロリメータの 2 種類が設置されている . 図 1.12 にカロリメータの全体像 , 表 1.3 にカロリメータの種類と設置位置を示す . 電磁カロリメータでは電子や光子のエネルギーを測定し , ハドロンカロリメータではハドロン粒子のエネルギーを測定する . 全方位角をすき間なく覆うことで , 検出器を通り抜けるニュートリノの横方向エネルギーを消失エネルギー E_T として検出することができる .

電磁カロリメータ

ATLAS 検出器における電磁カロリメータは , 吸収層に鉛 , サンプリング層に液体アルゴンを用いたサンプリング型カロリメータである . 吸収層はアコーディオン型をしており , 検出器後方から信号を読みだしている . このような構造をとることで , 検出器の不感領域を少なくできるように工夫されている . (図 1.13) 動径方向の分割は , プレサンプル 3 層のサンプリング層で構成されている . 電磁カロリメータの鳥瞰図を図 1.14 に示す .

電磁カロリメータは , バレル部 ($|\eta| < 1.475$) とエンドキャップ部 ($1.375 < |\eta| < 3.2$) から構成されている . バレル部では , 内層のソレノイドとクライオスタットを共有することで , カロリメータ前面までの物質量を抑えている . カロリメータの放射長は , バレル部で $24X_0$, エンドキャップ部で $26X_0$ である .

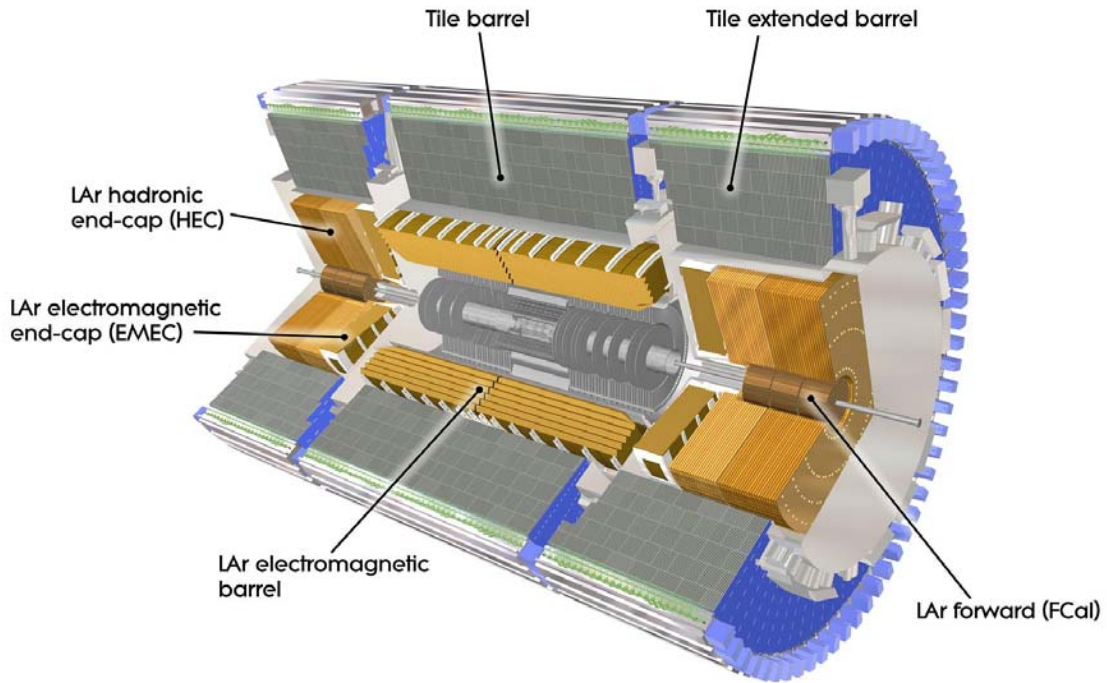


図 1.12: カロリメータの全体像 . バレル部電磁カロリメータ, エンドキャップ部カロリメータ (EMEC), バレル部ハドロンカロリメータ, エンドキャップ部ハドロンカロリメータ (HEC), フォワード部カロリメータ (FCal) で構成される .

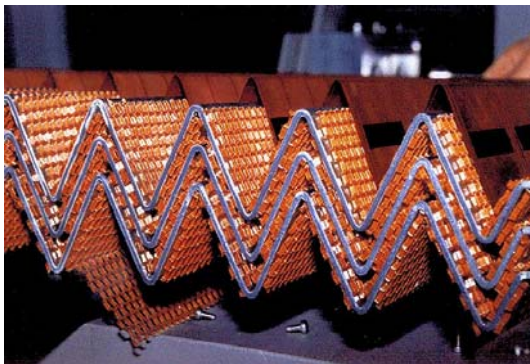


図 1.13: アコーディオン型の吸収層 . 不感領域を少なく抑えるためこのような形をとっている .

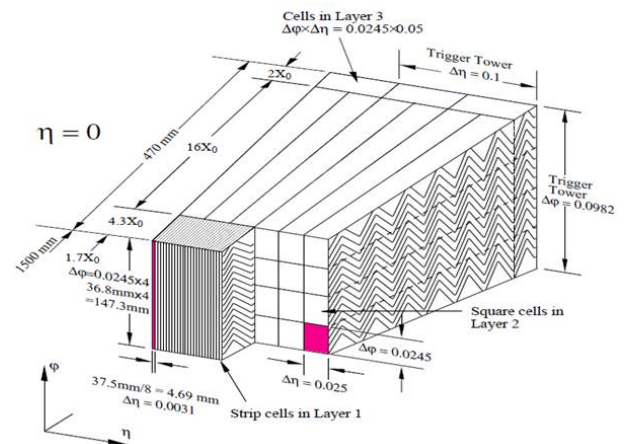


図 1.14: 電磁カロリメータの鳥瞰図 (バレル部) .

電磁カロリメータ	バレル部	エンドキャップ部
検出器領域	$ \eta < 1.475$	$1.375 < \eta < 3.2$
動径方向分割	3層	3層 $1.5 < \eta < 2.5$ 2層 $1.375 < \eta < 1.5$ $2.5 < \eta < 3.2$
$R\phi - \eta$ 分割 ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)		
第1層	0.003×0.1	0.025×0.1 $1.375 < \eta < 1.5$ 0.003×0.1 $1.5 < \eta < 1.8$ 0.004×0.1 $1.8 < \eta < 2.0$ 0.006×0.1 $2.0 < \eta < 2.5$ 0.1×0.1 $2.5 < \eta < 3.2$
第2層	0.025×0.025	0.025×0.025 $1.375 < \eta < 2.5$ 0.1×0.1 $2.5 < \eta < 3.2$
第3層	0.05×0.025	0.05×0.025 $1.5 < \eta < 2.5$
プレサンブラ	バレル部	エンドキャップ部
検出器領域	$ \eta < 1.52$	$1.5 < \eta < 1.8$
動径方向分割	1層	1層
$R\phi - \eta$ 分割 ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)	0.025×0.1	0.025×0.1
タイルカロリメータ	バレル部	拡張バレル部
検出器領域	$ \eta < 1.0$	$0.8 < \eta < 1.7$
動径方向分割	3層	3層
$R\phi - \eta$ 分割 ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)		
第1層 第2層	0.1×0.1	0.1×0.1
第3層	0.2×0.1	0.2×0.1
ハドロンエンドキャップカロリメータ (HEC)		エンドキャップ部
検出器領域		$1.5 < \eta < 3.2$
動径方向分割		3層
$R\phi - \eta$ 分割 ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)		0.1×0.1 $1.5 < \eta < 2.5$ 0.2×0.2 $2.5 < \eta < 3.2$
フォワード部カロリメータ (FCal)		フォワード部
検出器領域		$3.1 < \eta < 4.9$
動径方向分割		3層
$R\phi - \eta$ 分割 ($\Delta\eta \times \Delta\phi$)		0.2×0.2

表 1.3: カロリメータの検出器領域と分割 .

エネルギー分解能は

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{10\%}{\sqrt{E}} \oplus 0.7\%$$

と見積もられている．一般的に，電磁カロリメータはシャワーにより生成された電子数からエネルギーを見積もる．そのため，エネルギーが大きい程電子数の揺らぎが小さくなり，分解能は良くなる．

ハドロンカロリメータ

ATLAS 検出器におけるハドロンカロリメータは，バレル部のタイルカロリメータとエンドキャップ部の液体アルゴンカロリメータの 2 種類で構成される．

バレル部 ($|\eta| < 1.7$) は鉄の吸収層とタイル状シンチレータ，および波長変換ファイバからなるタイルカロリメータである．タイルの設置方向をハドロン入射方向と平行にし，タイル両脇に取り付けた波長変換ファイバを介して，シンチレーション光を光電子増倍管に導く．(図 1.15) このような構造をとることで，不感領域を少なくすることができる．バレル部カロリメータの平均原子核相互作用長 (Nuclear Interaction Length, λ) は，約 11λ である．ハドロンカロリメータは $|\eta|$ が大きくなるほど高い放射線耐性を求められる．そ

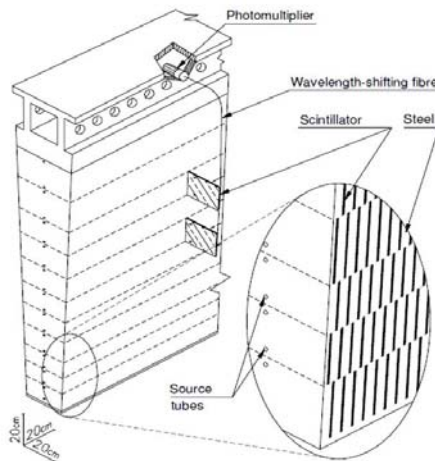


図 1.15: タイルカロリメータの構造．シンチレータと鉄のタイルが交互にならんでおり，シンチレータと光電子増倍管が波長変換ファイバでつながれている．

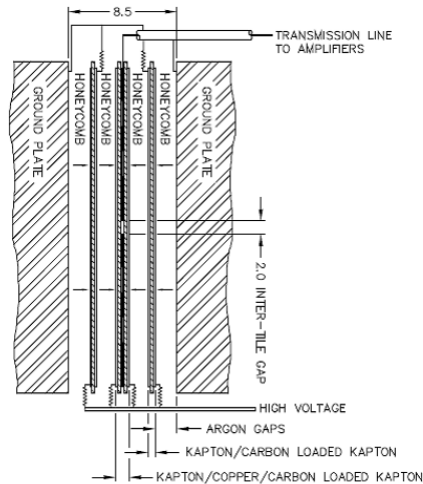


図 1.16: エンドキャップ部ハドロンカロリメータの読みだし部分の外略図．プレート間の 8.5mm に収められている．

のためエンドキャップ部ではバレル部とは異なり，放射線耐性がよい液体アルゴンカロリメータが用いられている．吸収体は銅が使用されており，吸収体の間に 3 層の電極を平行に設置し，中央の電極から読みだしを行う．(図 1.16) この構造は，カロリメータのセル当たりの静電容量を小さくするために用いられている．

ATLAS 検出器では，ビーム軸に非常に近いフォワード部 ($3.1 < |\eta| < 4.9$) にもカロリメータが設置されている．これは，消失エネルギー E_T を測定するために，全立体角を覆

う必要があるためである．フォワード部カロリメータは3層からなる液体アルゴンカロリメータである．第1層の吸収体には銅，第2層・第3層の吸収体にはタングステンが用いられている．これは，入射粒子の密度が非常に高い領域に設置されるため，粒子の広がりを可能な限り小さくする必要があるためである．サンプリング層の液体アルゴン内では，入射粒子により電離された正イオンの影響により電場が大きく歪められてしまう．そのため，サンプリング層の間隔を0.5mm以下にする．図1.17にフォワード部カロリメータの全体像を，図1.18に構造写真を示す．

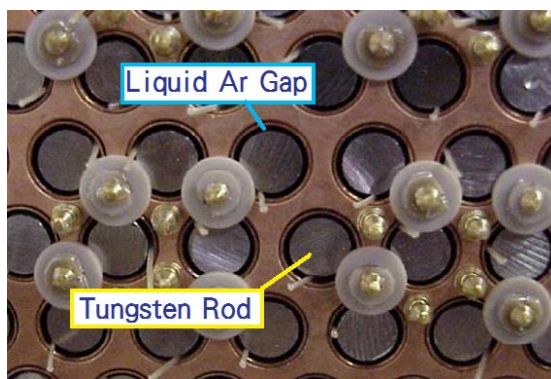


図 1.18: フォワード部カロリメータの構造写真．

図 1.17: フォワード部カロリメータ
1層の全体像．

ハドロンカロリメータの分解能は

$$\frac{\sigma_E}{E} \approx \frac{50\%}{\sqrt{E}} \oplus 3\%$$

と見積もられている．電磁シャワーよりも複雑な発展をするハドロンシャワーは，ハドロン成分と電磁シャワー成分がシャワー毎に異なる割合で混ざっている．そのため，エネルギー分解能は電磁カロリメータに比べて悪くなる．

1.2.4 μ 粒子検出器

μ 粒子検出器は，カロリメータを通過してきた荷電粒子 (主に μ 粒子) の運動量測定と，レベル1トリガーへの信号を与えることを目的としている．ATLAS 検出器の μ 粒子検出器は4種類あり，飛跡検出器である MDT 検出器 (Monitored Drift Tube)，CSC 検出器 (Cathode Strip Chamber) と，トリガーチェンバーである RPC 検出器 (Resistive Plate Chamber)，TGC 検出器 (Thin Gap Chamber) から構成されている．図 1.19 に μ 粒子検出器の配置を示す．

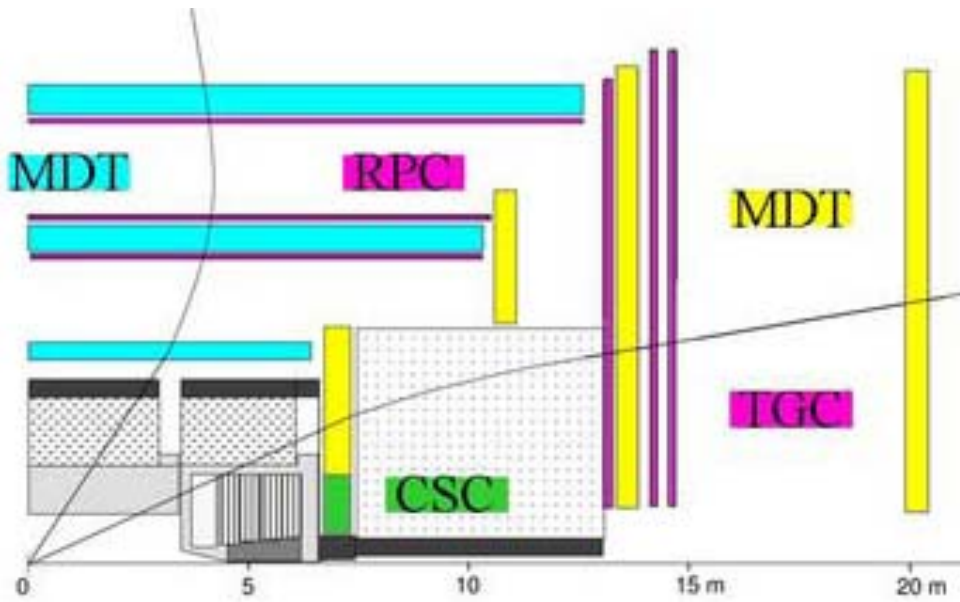


図 1.19: μ 粒子検出器の配置 .

μ 粒子飛跡検出器

MDT 検出器は、バレル部 ($|\eta| < 1.0$) とエンドキャップ部 ($1.0 < |\eta| < 2.4$) のトロイド磁石の内側および外側に全 3 層設置されており、 μ 粒子の運動量測定を行う。運動量は第 1 層、第 3 層のヒット位置を直線で結んだ線から第 2 層のヒット位置の差分を測定し、計算することができる。MDT 検出器は、厚さ $400\mu\text{m}$ 直径 30mm のアルミニウム製チューブを積層した形をとっている。チューブの中心には芯線として、直径 $50\mu\text{m}$ の金メッキされた W-Re ワイヤーが張られている。また、チューブ内にはアルゴンと二酸化炭素を 93:7 で混合した不燃性ガスを満たす。3kV の電位差を与えて運転し、ドリフトタイムは最大で 500ns 、時間分解能は 300ps であり、1 本当りでの位置分解能は $80\mu\text{m}$ を達成している。MDT 検出器には、レーザーを利用したワイヤー位置監視装置が各モジュールに搭載されている。これにより、約 $15\mu\text{m}$ の精度で自身のずれを検出することができる。図 1.20 に MDT 検出器の構造を示す。

エンドキャップ部の粒子密度の高い領域 ($2.0 < |\eta| < 2.7$) の μ 粒子飛跡検出器として、CSC 検出器が用いられている。CSC 検出器は、カソード読みだし型の比例計数管である。4 層のガス電離層から構成されており、アルゴンと二酸化炭素を 80:20 で混合したガスが用いられている。その中央には、直径 $30\mu\text{m}$ のアノードワイヤーが 2.5mm 間隔で張られている。カソード部には、 5.6mm 間隔で読みだしストリップが張られる。CSC 検出器の位置分解能は、 $60\mu\text{m}$ を達成している。

トリガーチェンバー

トリガーチェンバーには、バレル部 ($|\eta| < 1.05$) に RPC 検出器、エンドキャップ部 ($1.05 < |\eta| < 2.7$) に TGC 検出器が設置されている。 μ 粒子トリガーチェンバーには、

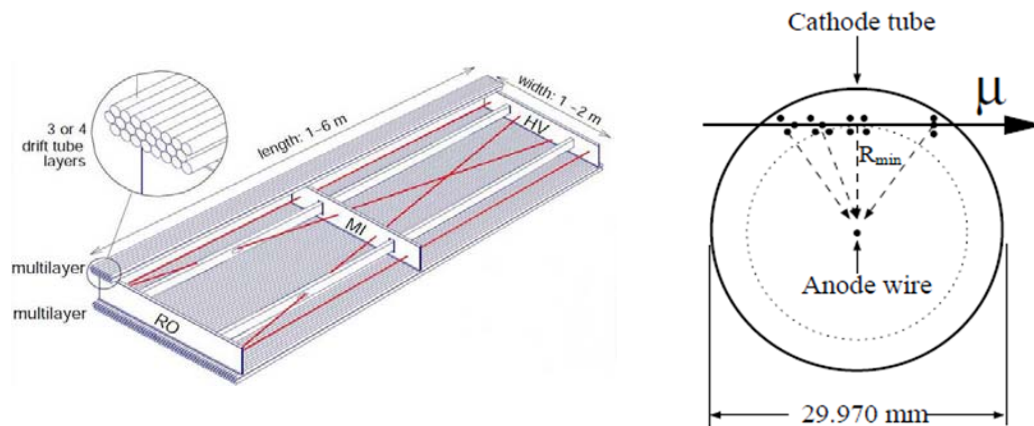


図 1.20: MDT 検出器の構造 . (左)MDT モジュール . ドリフトチューブが積層されている . (右)ドリフトチューブ . Al チューブの中心にアノードワイヤーが張られている .

バンチ間隔 (25ns) を同定できる高速な読みだしが可能であることが要求される . この要求を満たすため , トリガー用の検出器が用意された .

RPC 検出器は , 2 枚の平行板を用いたガスチェンバーである . 電離層には , $C_2H_2F_4$, $Iso-C_4H_{10}$, SF_6 が 94.7:5:0.3 で混合された気体を用いられるデジタル読みだしであり , 約 30mm 間隔で設置されるストリップから信号が読み出される . 位置分解能は 1cm , 時間分解能は 1ns である .

TGC 検出器は高粒子密度に耐え , 位置測定精度にも優れた薄型マルチワイヤー比例計数管である . 電離層には , 二酸化炭素と $n-C_5H_{12}$ が 55:45 で混合された気体を使用している . 電離層は 2 枚の板に挟み込まれており , 中央には金メッキした直径 $50\mu m$ のタングステンワイヤーが , 動径方向と垂直に 1.8mm 間隔で張られており , 板を挟んだ逆側には , ワイヤーに直行する方向に銅のストリップが並べられている . (図 1.21) このチェンバーを 3 層重ねて使い , ノイズによる信号を小さくする . 印加電圧を 3.1kV にすることで , 時間分解能は 25ns より十分に小さくなり , 99% 以上の検出効率を得られる .

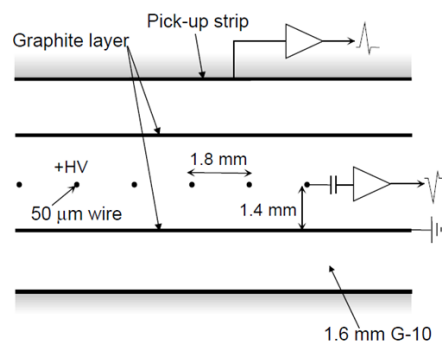


図 1.21: TGC 検出器の構造 . 2 枚の板の間の電離層に混合ガスが満たされており , 中心にワイヤーが張られている .

1.2.5 電磁石システム

ATLAS 検出器には、ソレノイド磁石とトロイド磁石の2種類の電磁石が設置されている。ソレノイド磁石は、内部飛跡検出器での荷電粒子の運動量測定のために利用される。トロイド磁石は、 μ 粒子検出器における μ 粒子の運動量測定に利用される。

ソレノイド磁石

ソレノイド磁石は、内部飛跡検出器の外側に設置される超電導磁石である。内部飛跡検出器に 2T の磁場をかけている。磁場の分布を図 1.22 に示す。この磁場により曲げられた荷電粒子の曲率を測定することで、運動量を決定することができる。カロリメータの内側に設置するため、物質量を可能な限り小さくする必要がある。そのため、高強度のアルミ合金を使用し、また、クライオスタットを電磁カロリメータと共有している。その結果、物質量は $0.66X_0$ に抑えられている。

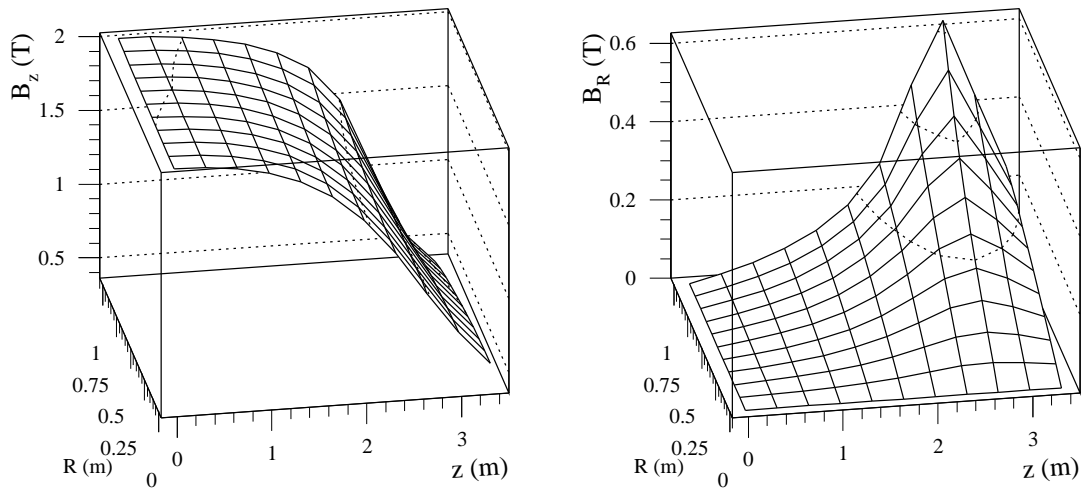


図 1.22: ソレノイド磁石による磁場分布。

トロイド磁石

トロイド磁石は、バレル部およびエンドキャップ部に取り付けられる空芯超電導トロイド磁石である。ソレノイド磁石とは磁場の方向が異なっており、荷電粒子を θ 方向に変化させる。バレル部トロイド磁石は長さ 23m、外径の 8 つの空芯超電導コイルから構成されており、2-6Tm 程度の磁場を形成する。エンドキャップ部は、8 個のコイルがバレル部トロイドの内側に設置され 4-8Tm 程度の磁場を形成することができる。トロイド磁石の概略図を図 1.23 に、磁場分布を図 1.24 に示す。

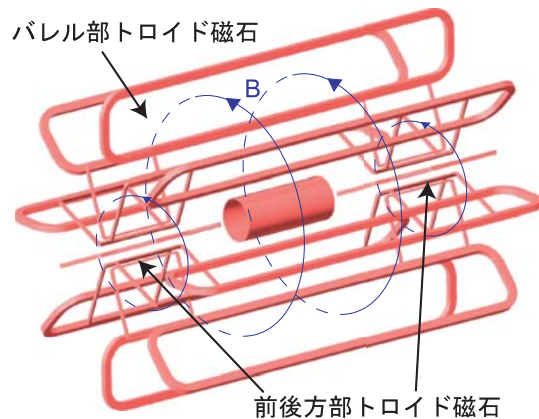


図 1.23: トロイド磁石の概略図.

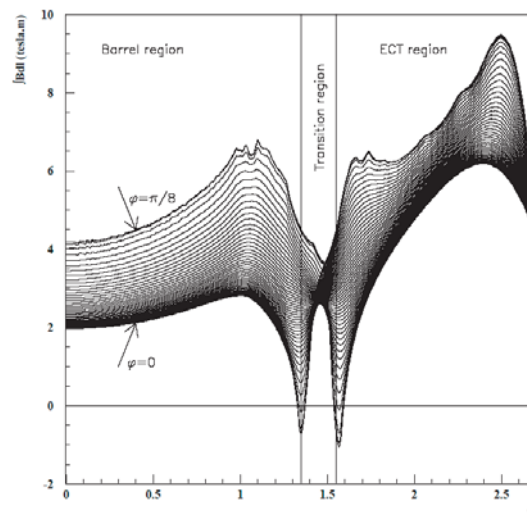


図 1.24: トロイド磁石の磁場分布. トロイド磁場は非常に複雑になっており, バレル部とエンドキャップ部の境界では, 磁場が逆向きになる領域も存在する.

1.2.6 トリガーとデータ収集

LHC 加速器におけるバンチ衝突間隔は 40MHz(25ns) であり, バンチ衝突ごとに平均 24 個の陽子衝突が起こる. そのため衝突の起こる頻度は約 1GHz に達し, このデータを全て取得し保存することはできない. 各事象のデータサイズを 1MB 程度, データ収集レートを 200Hz 程度まで下げるため, ATLAS では 3 つのトリガーシステムを用いている. (図 1.25)

レベル 1 トリガー

レベル 1 トリガーは, ハードウェア上でのトリガーであり, 40MHz のイベントレートを 75kHz(最大 100kHz) まで落す. カロリメータおよび μ 粒子トリガーチェンバーからの信号をもとに, Central Trigger Processor(CTP) はバンチ衝突より $1\mu\text{s}$ 以内に判定を行う. CTP から送られるレベル 1 トリガー信号は $2.5\mu\text{s}$ 以内に各検出器に到達する. トリガー信号と共に, トリガー信号を生成した領域 Regions of interest(ROI) の情報も送られる. 各検出器はレベル 1 トリガーの判定がなされるまでパイプラインにデータを保存している.

ハイレベルトリガー

レベル 2 トリガーは, レベル 1 トリガーで 75kHz まで落されたイベントレートを 2kHz に落すためのトリガーである. レベル 1 トリガーの情報に加え, 内部飛跡検出器からの位置情報を用いる. レベル 1 トリガーで選定された ROI の情報を用い, トリガーの判定が行われる. レベル 2 トリガー信号は, Data Flow Manager(DFM) に渡される.

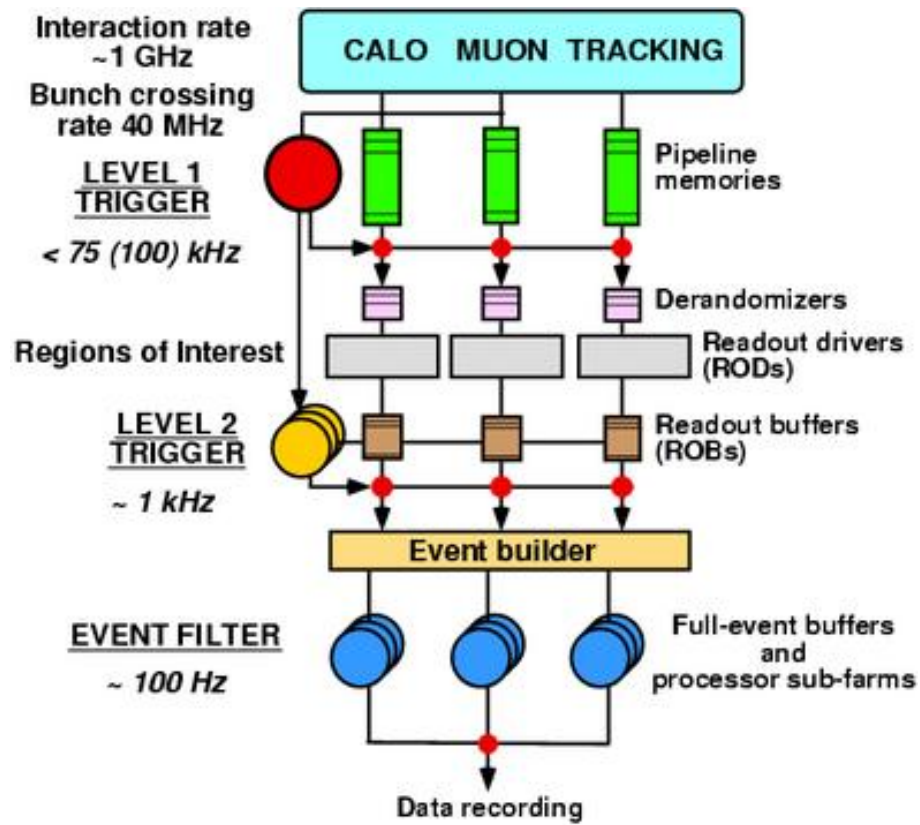


図 1.25: ATLAS トリガーシステムの概略図 . 3 段階に分かれており , 最終的に 200Hz 程度までデータ収集レートを落す .

イベントフィルター

レベル3トリガーは、レベル2トリガーで2kHzまで落されたイベントレートを最終的に200Hzまで落すためのソフトウェアトリガーである。イベントビルダーにより全ての検出器からの情報を一つの事象にまとめたデータに対してイベント再構成を行う。DFMからデータを受け取り1600台のPC群によりトリガー判定が行われる。ここでトリガーがアクセプトとなった時に、トリガーのために作られた情報をイベントの生データとともにディスクに保存する。データサイズは320MB/secとなる。

第2章 ATLASソフトウェア

ATLAS 実験におけるソフトウェアプログラムは、ATHENA と呼ばれるフレームワークにまとめられている。フレームワークが与えられているため、ユーザーは自分が必要なものを供給することで解析を行うことができる。これには測定データの解析用プログラム、また、シミュレーション用プログラムも含まれている。

2.1 ATHENA フレームワーク

ATHENA は Gaudi と呼ばれる、LHCb 実験のために開発されたフレームワークを、ATLAS 実験用に発展拡張させたものである。

ATHENA はそのアプリケーションの枠組の中にユーザーが自由にコードを書き加え、実行することができる。それぞれのアプリケーションはライブラリにまとめられており、共有ライブラリとしてロードされて実行される。

ATHENA は、3つのレベルのインターフェースを持っており、それぞれ Service(サービス)、AlgTool(アルゴリズムツール)、Algorithm(アルゴリズム) と呼ばれる。ユーザーはフレームワークに必要な部分をアルゴリズムやサービスの形で加えることで、必要な機能を実現する。

サービスは、実行されるプログラム全体の中で一度だけ呼び出され、常時用いられる機能を提供する。ExtSvc マネージャにより実行される。

アルゴリズムツールは、実行されるプログラム全体または、イベントの中で複数回実行される。

アルゴリズムは、プロセスされるイベント毎に実行される。データを扱うシミュレーションやリコンストラクションなどのプロセスがアルゴリズムとして定義されている。アルゴリズムはアプリケーションマネージャによって実行される。アルゴリズムは、一般にイベント毎にデータを Transient Event Store (TES) と呼ばれる一時保管場所から引出し、計算を行う。また、この結果を再び TES に書き込む作業も行う。さらに、アルゴリズムによって書き込まれた結果を、別のアルゴリズムが TES から引出し、計算、書き込みを行う。個々のアルゴリズムは TES のデータに対して演算を行うため、アルゴリズム同士の複雑な依存関係はない。図 2.1 にデータの流れを示す。

データの引出しおよび書き込みは、図 2.2 の ATHENA のオブジェクト図にあるように ATHENA の中の StoreGateSvc と呼ばれるサービスにより提供されている。また、個々のアルゴリズムは、じっさいには様々なアルゴリズムツールを用いることにより実現されている。

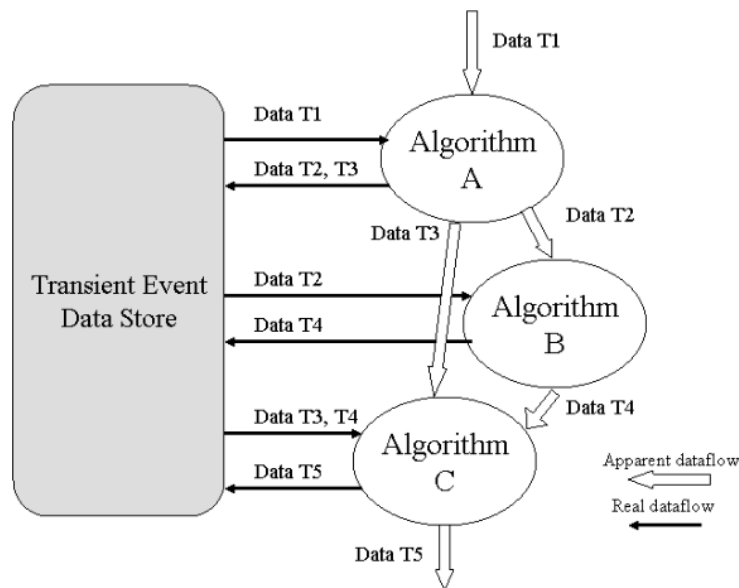


図 2.1: イベントデータフロー．論理的には白抜き矢印が示すようにいくつかのアルゴリズムをデータが流れていくが，実際は黒矢印で示した通り，その都度 StoreGateSvc を通して行われる．

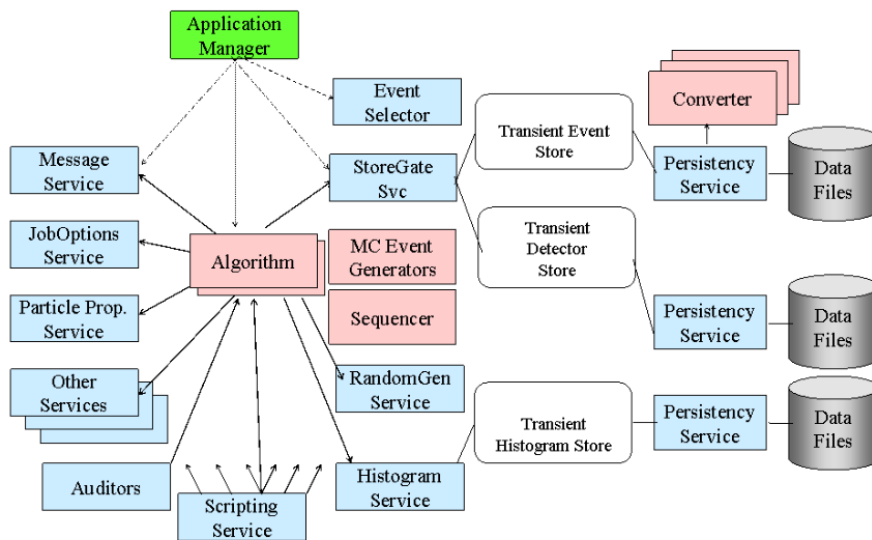


図 2.2: ATHENA の仕組みを表したオブジェクト図．プログラム全体の流れはアプリケーションマネージャが統括する．初期化やイベントループ等，その都度アルゴリズムを呼び出す．

2.2 フルシミュレーション

本研究では、フルシミュレーションによって作成されたモンテカルロサンプルを使用する。フルシミュレーションにより、ATLAS 検出器での個々の粒子の振る舞いを計算することで、実際の加速器による実験に近い環境での物理事象の情報を得ることができる。ただし、フルシミュレーションでデータを作成するためには膨大な時間がかかる。

フルシミュレーションは、Generation, Simulation, Digitization, Reconstruction の4つに大別することができる。

- Generation(イベント生成シミュレーション)
イベントジェネレータで衝突点での粒子を生成する。
- Simulation(検出器シミュレーション)
生成された粒子が ATLAS 検出器に落とすエネルギーを計算する。
- Digitization(検出器応答シミュレーション)
ATLAS 検出器に落としたエネルギーに対して、検出器の応答をシミュレーションして Digit に保存。
- Reconstruction(リコンストラクション)
Digit を元に粒子の飛跡、運動量、エネルギーを再構成して ESD に保存。

図 2.3 にフルシミュレーションの流れを示す。

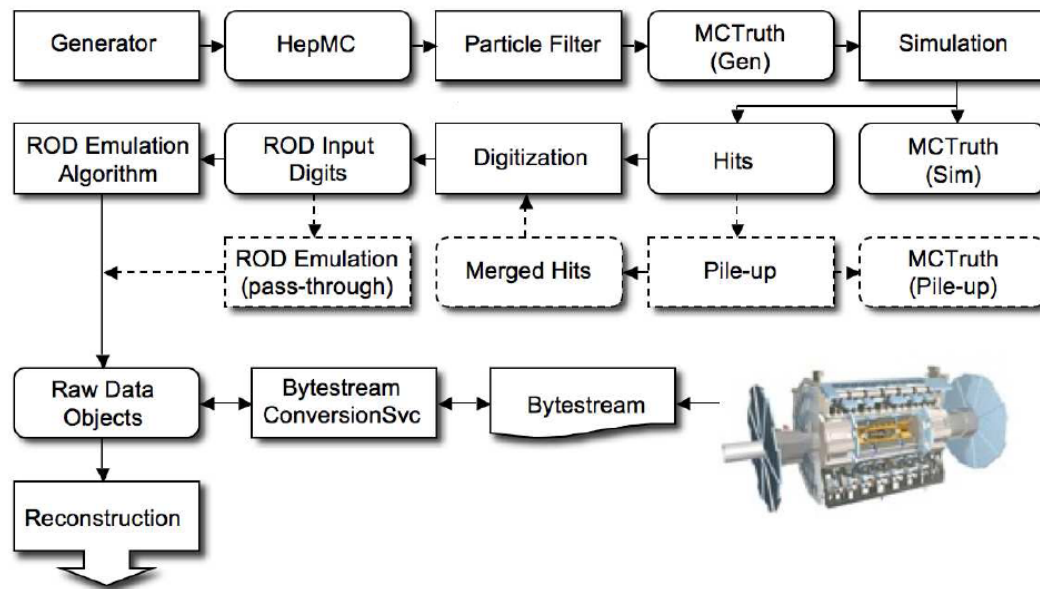


図 2.3: ATLAS におけるフルシミュレーションの流れ。四角で囲まれた部分がアルゴリズム，丸角で囲まれた部分が演算結果のデータを表す。点線部分は必須ではない。

2.3 飛跡再構成

本研究では，フルシミュレーションで作成された ESD データから飛跡の情報を取り出し，解析を行う．飛跡の情報が再構成されるアルゴリズムについて以下に述べる．

飛跡再構成にはビーム軸に近い内側から粒子の飛跡を探す Inside-out Track Reconstruction と，外側から飛跡を探す Outside-in Track Reconstruction がある．内部飛跡検出器を用いた飛跡再構成においては，両者とも実装されており，初期設定は Inside-out 方式が用いられている．Inside-out 方式は，ピクセルと SCT により飛跡再構成の種を探し，TRT へと外挿する方法である．

Inside-out Track Reconstruction は，ピクセル，SCT の二つのシリコン検出器による粒子検出位置から出発する．この粒子検出位置を 3 次元座標で表現するオブジェクトをスペースポイント (SpacePoint) と呼ぶ．ピクセル検出器は，セルの位置からモジュール上の 2 次元のヒット情報を得られる．そのため，モジュールのローカル座標から，ATLAS 検出器全体のグローバル座標へと変換することにより，スペースポイントが得られる．SCT 検出器では，1 つのモジュールの表裏両方のセンサーにおけるクラスター情報から，その交点を求めることで，ローカル座標での 2 次元ヒット情報が得られる．これをグローバル座標に変換することでスペースポイントが得られる．

得られたスペースポイントを用いて飛跡の種を探し，その種から飛跡候補を探す．3 層のピクセル検出器のスペースポイントの全ての組合せを飛跡の種として考える．次に，この種を用いて飛跡を探す．ここではクラスターを考える．種となる飛跡候補の延長線上にあるクラスターを追加情報とする．ここでは多くの飛跡候補ができる．そのため，TRT も含めた飛跡へと外挿する前に，本物の飛跡と検出器のノイズによる偽の飛跡 (Fake) を見分ける必要がある．個々の飛跡に対して尤度関数 (likelihood function) を用いて本物らしさを定義する．そのため，再フィットを行い， χ^2/DoF (Degrees of freedom) を求める．また，モジュールにヒットが無い場合にペナルティを課すなどして，ヒットポイントの多くあるものに優位性を与える．このように飛跡毎にスコアをつけ，順位を決める．表 2.1 に飛跡の特徴とスコアに与える影響を示す．閾値を越えられなかった飛跡候補は破棄される．

飛跡の特徴	検出器	トラックスコアへの影響
B layer hole	pixel	大ペナルティ
Layer hole	pixel	ペナルティ
Sensor hole	SCT	小ペナルティ
Layer hole	SCT	大ペナルティ

表 2.1: 飛跡の特徴とスコアに与える影響．

その後，TRT へと飛跡候補を外挿する．シリコン検出器から外挿される飛跡に TRT でのヒットの有無を確認し，再フィットを行い，ここでもスコアをつける．

シリコン検出器のみの飛跡と，TRT も含んだ飛跡のスコアを比較し，TRT を含んだ飛跡の方が良いとされた時に限り，内挿した飛跡であるという情報を付加した上で保存する．

第3章 光子コンバージョン再構成

ATLAS 実験において、詳細な運動量を測定するためには、内部飛跡検出器の物質量を評価することは不可欠である。しかし検出器内部にある複雑なケーブルなどを、全てシミュレーションで再現することは難しい。そこで、光子コンバージョンという事象を用いて、検出器内部の物質量の評価を行う。

3.1 光子コンバージョン

光子は、物質中を通過する際に物質と様々な形で相互作用を起こす。物質との相互作用は主として、光電効果、コンプトン効果、電子対生成の三つの過程がある。光子のエネルギーとそれぞれの過程の吸収係数の関係を図 3.1 に示す。

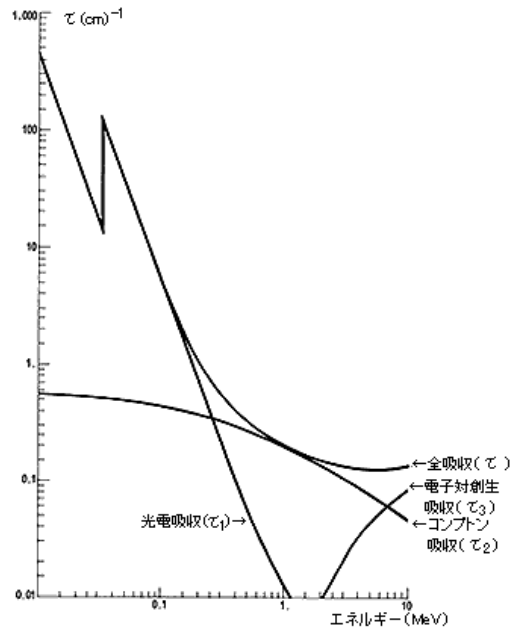


図 3.1: 光子の線吸収係数。光電効果、コンプトン効果、電子対生成による吸収係数を表す。ここでは NaI の吸収係数を示す。

光子コンバージョンは、エネルギーの高い光子 (γ 線) が原子核と相互作用し、電子・陽電子対を生成する事象である。具体的には、光子のエネルギーが電子の質量エネルギー¹

¹ $mc^2 = 0.5110041$ MeV

の2倍を超えると、電子・陽電子対が発生する。つまり、光子のエネルギーは少なくとも 1.022 MeV 以上が要求される。ただし、物質が存在しない所ではエネルギーの条件を満たしていても、光子コンバージョンは起こらない。これは、光子単独ではエネルギー保存則と運動量保存則を同時に満たすことができないためである。原子核の近傍で、電子または陽電子は原子核による散乱を受け、運動量を得ることにより2つの保存則を同時に満たすことが可能になる。原子核1個あたりの断面積は、 $h\nu \gg mc^2$ で式 (3.1) のように書ける。

$$\sigma_p(\text{cm}^2) \approx \frac{Z^2}{137} r_e^2 \left(\frac{28}{9} \log \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{2}{27} \right) \quad (3.1)$$

ただし、 Z は物質の原子番号、 r_e は電子半径である。これより、原子番号の大きい物質ほど光子コンバージョンを起こしやすいことがわかる。物質 1 g/cm^2 あたりで光子コンバージョンを起こす確率は式 (3.2) となる。

$$\begin{aligned} \cong \frac{N}{A} \cdot \sigma_p(\text{cm}^2) &= \frac{NZ^2}{A \cdot 137} r_e^2 \left(\frac{28}{9} \log \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{2}{27} \right) \\ &= \frac{1}{X_p} \end{aligned} \quad (3.2)$$

ここで X_p は、物質中を光子が X_p だけ走る間に反応により $1/e$ の個数に減少するということを意味する。 X_p は radiation length X_0 と以下の様な関係になっている。

$$X_0 \approx \frac{7}{9} X_p$$

3.2 コンバージョン再構成アルゴリズム

光子コンバージョンが起きると、電子・陽電子対は空間のある一点から生じる。この点がコンバージョン点である。

コンバージョン点を再構成するために、まず、一つのイベント内で異なる電荷をもつ飛跡対をつくり、それぞれの飛跡を延長する。磁場中で荷電粒子は、曲率半径 $\rho[\text{m}]$ の円運動をする。 ρ はソレノイド磁場中では以下の式で表される。

$$\rho[\text{m}] = \frac{Pt [\text{GeV}/c]}{0.3 \times B[\text{T}]} \quad (3.3)$$

ここで、 $Pt[\text{GeV}/c]$ は粒子の横方向運動量、 $B[\text{T}]$ は内部飛跡検出器にかかる磁場である。延長した二つの飛跡が、一点で交わった点をコンバージョン点として決定する。ここで、理想的には飛跡はある一点で接するはずであるが、有限な位置分解能のため実際に粒子が残した飛跡を完全に再構成することは難しく、多少のずれが生じる。飛跡を XY 平面上に射影した図を、図 3.2 に示す。二つの円の中心間の距離を L 、それぞれの半径を ρ_+ 、 ρ_- とするとき、以下の様に距離 S を定義する。これは、2本の飛跡が平行になる位置での飛跡間の距離を表す。

$$S = L - \rho_+ - \rho_-$$

S は飛跡を延長してできる円 (磁場がかかっているため電荷を持つ粒子の飛跡を延長すると円を描く) の中心間に位置する。また、この距離 S 上の一点をコンバージョン点として

決定する．コンバージョン点は， S をそれぞれの円の半径で内分する点とする．これにより，コンバージョン点候補の R 方向の位置が決まる．ここで， R 方向でコンバージョン点に最も近い飛跡上の点の Z 位置をそれぞれ求め，2 点の中間点をコンバージョン点候補の Z 方向の位置として決定する．

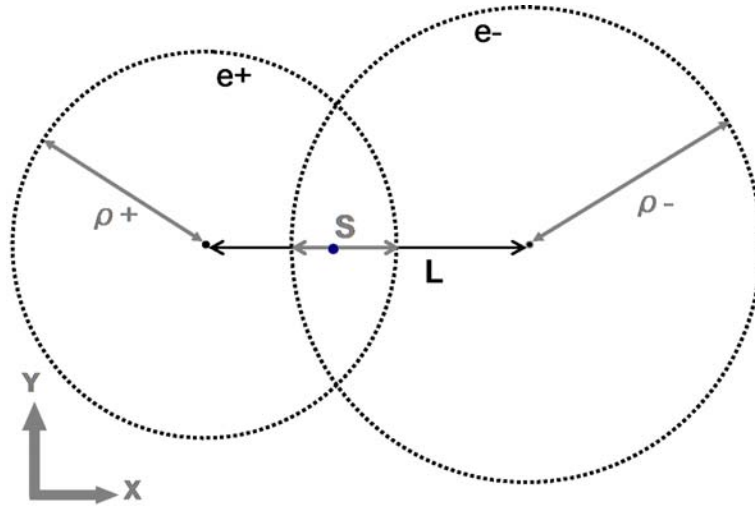


図 3.2: コンバージョン点の定義．内部飛跡検出器内には 2T の磁場がかかっているため，飛跡を延長するとその運動量に応じた大きさの円を描く．XY 平面上に飛跡を射影したときにそれぞれが平行になる位置での距離を S とする．また S を半径の比で内分する点をコンバージョン点候補とする．

3.3 事象選択

- Track selection
 - track fit χ^2/Ndf
飛跡再構成の精度を要求する．
- Track pair selection
 - track pair with oppsite charges
コンバージョンによって電子 (負電荷)，陽電子 (正電荷) が生じるため，符号の異なる 2 本の飛跡で対をつくる．
 - polar angle ($|\Delta \cot \theta|$)
光子コンバージョンによって発生する電子対のなす角は小さいため，二つの飛跡は vertex においてほぼ平行である．そのためコンバージョン点において，2 つの飛跡の 方向 (ビーム軸と飛跡のなす角) の角度の差が小さいことを要求する．

- Minimum distance (S)
理想的には 2 つの飛跡は 1 点で重なるはずである．前節で定義した S (図 3.2) が小さいことを要求する．
- distance in Z ($|\Delta Z|$)
 XY 平面 (R 方向) の情報から決定したコンバージョン点に最も近い，飛跡上の点の Z 方向の差が小さいことを要求する．

3.4 シミュレーションサンプルを用いた光子コンバージョン再構成

フルシミュレーションによって作成された，シミュレーションサンプルを用いてコンバージョン点の再構成を行う．始めに，光子の横方向運動量 P_t が 20 GeV, 2 GeV のイベントをそれぞれ用いて再構成を行い， R 方向の位置分解能と再構成効率を評価する．また，重心系エネルギー 900 GeV での衝突実事象を評価するため，同じく 900 GeV のミニマムバイアスシミュレーションサンプルを用い，再構成を行う．

3.4.1 コンバージョン点再構成 ($P_t=20, 2$ GeV)

シミュレーションサンプルの中から，横方向運動量 $P_t=20$ GeV, 2 GeV の Photon を選択する．さらに，コンバージョンが 1 回/event かつ 2 tracks/event であるイベントを選択し，それぞれ再構成を行った．ここで，飛跡として認識される粒子は $P_t \geq 500$ MeV であるため，コンバージョンにより生じた 2 粒子の横方向運動量の真の値がともに 500 MeV 以上であるイベントを選択する．さらに，内部飛跡検出器でカバーできる領域は， $R < 1066$ mm, $|\eta| < 2.5$ であるため，真のコンバージョン点が $R < 800$ mm かつ $|\eta| < 2.1$ の範囲であるイベントを選択する．

ただし，内部飛跡検出器内において，SCT 検出器の 2 層目以降でコンバージョンが起き，電子，陽電子対が発生すると，その飛跡をピクセルや SCT でトラッキングすることは難しく，TRT でのヒット情報をもとにトラッキングすることになる．しかし，TRT はピクセル，SCT に比べ空間分解能が劣る．そのため， R の大きい位置でのコンバージョンの再構成は， R の小さい位置でのものに比べ，位置分解能が大きく劣る．そのため，ここでは $R < 400$ mm に限ってコンバージョン再構成について述べる．

前節で述べた通り，track fit χ^2/Ndf , $|\Delta \cot \theta|$, S , $|\Delta Z|$ の 4 つのパラメータについてカットを決定する．20 GeV, 2 GeV でそれぞれカットの値を調整した．2 GeV のサンプルについては，対をつくる 2 つの飛跡のピクセルでの hit 数によって 3 通りに分けカットを決定した．図 3.3 に track fit χ^2/Ndf 分布，図 3.4 に track fit χ^2/Ndf のカットを加えた $|\Delta \cot \theta|$ 分布，図 3.5 に $|\Delta \cot \theta|$ のカットを加えた S 分布，図 3.6 に S のカットを加えた $|\Delta Z|$ 分布を示す．また，表 3.1 にそれぞれのカット値を示す．track fit χ^2/Ndf は飛跡一つ一つに対して，残りの 3 つは異符号の飛跡対をつくり，その飛跡対に対するカットである．

以上の事象選択により再構成したコンバージョン点の R 方向分布を図 3.7 に示す． P_t 20 GeV, 2 GeV とともに，シミュレーションによる真のコンバージョン点分布をピンクで，再構成した分布を黒の実線で示す．

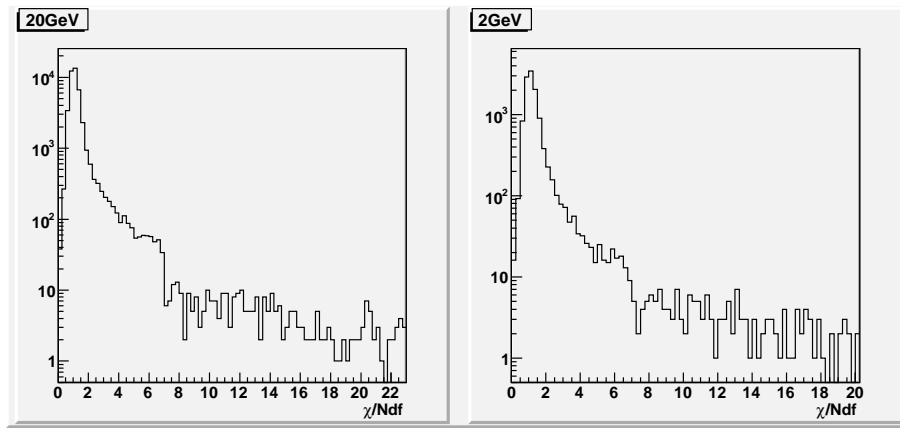


図 3.3: χ^2/Ndf 分布 . 選択した全イベントを含む . (左) 20 GeV . (右) 2 GeV

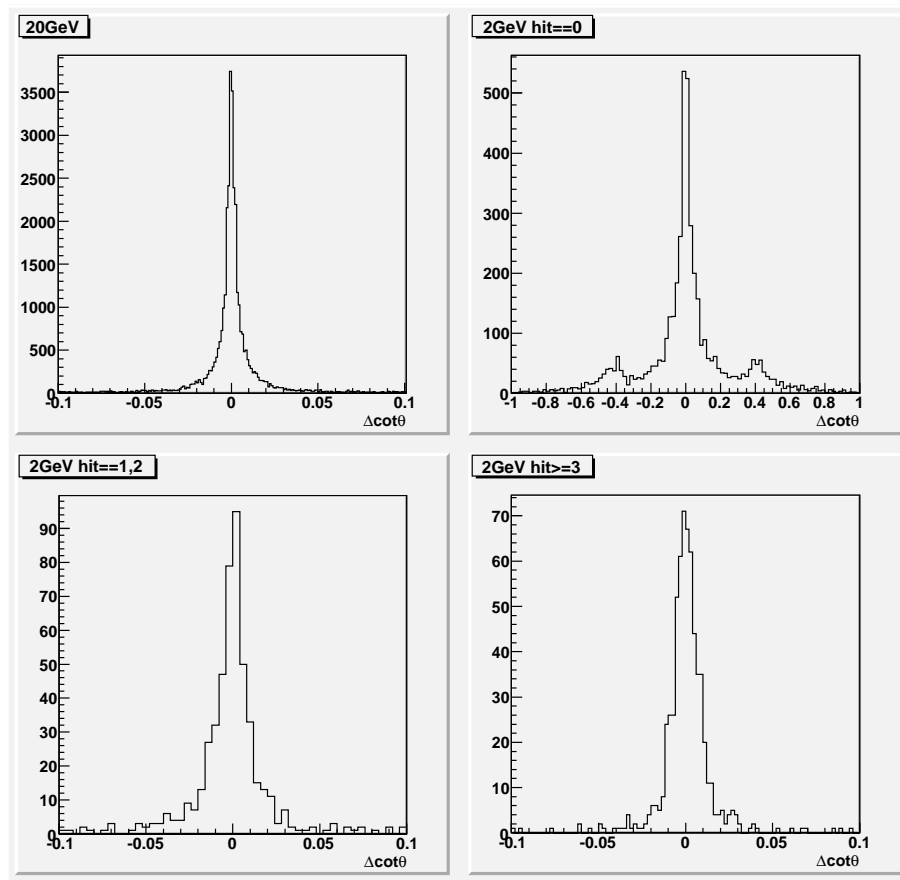


図 3.4: $|\Delta \cot \theta|$ 分布 . χ^2/Ndf でカットしている . (左上) 20 GeV . (右上) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 0 . $|\Delta \cot \theta|=0.4$ 付近のピークは TRT のヒット情報に基づく飛跡のためである . (左下) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 1 または 2 . (右下) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 3 以上 .

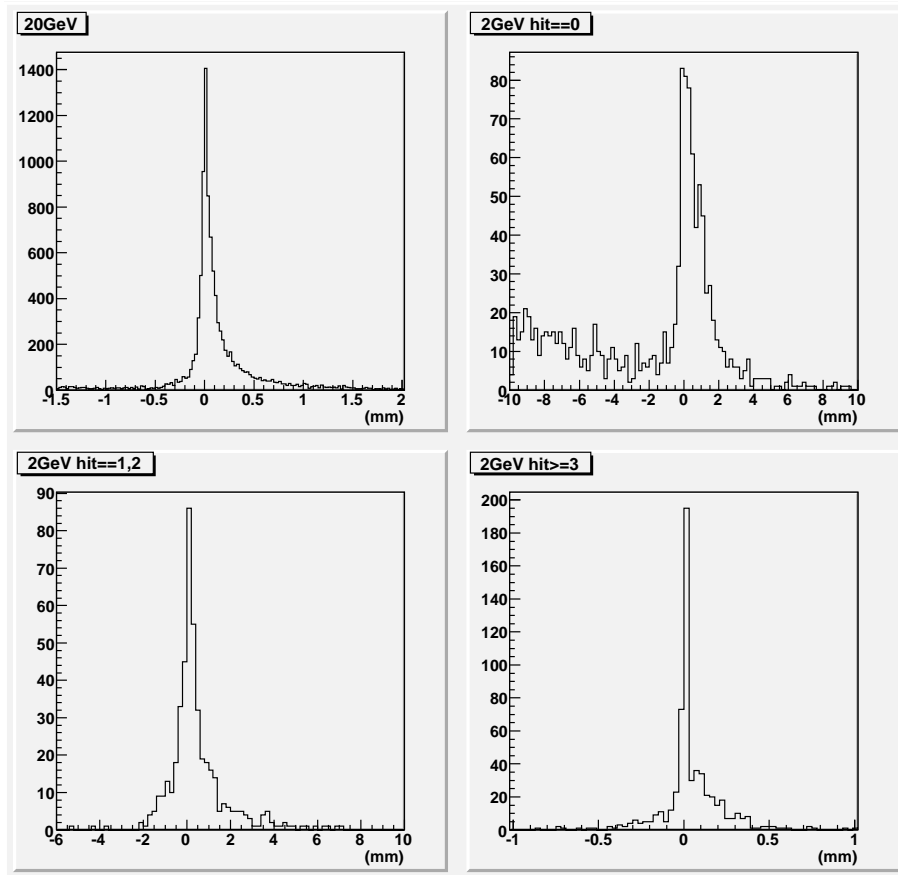


図 3.5: S 分布 . χ/Ndf , $|\Delta \cot \theta|$ でカットしている . (左上) 20 GeV . (右上) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 0 . $S < -4$ mm が多くなっているのは , TRT のヒット情報に基づく飛跡のためである . (左下) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 1 または 2 . (右下) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 3 以上 .

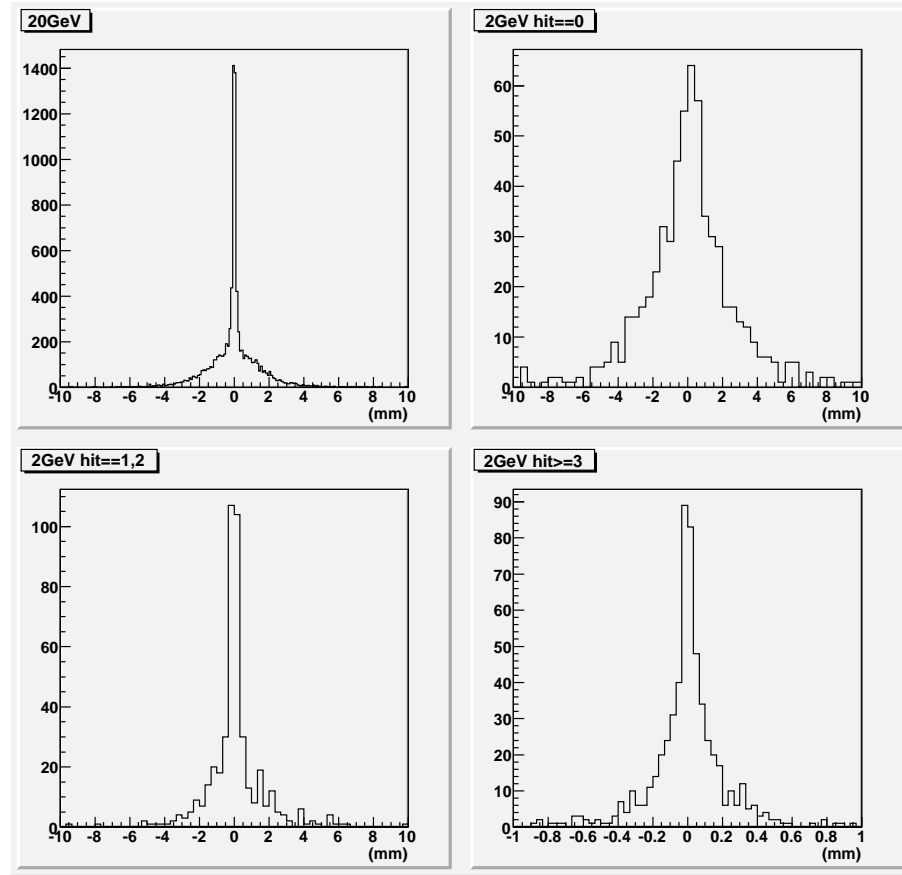


図 3.6: $|\Delta Z|$ 分布 . χ^2/Ndf , $|\Delta \cot \theta|$, S でカットしている . (左上) 20 GeV . (右上) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 0 . (左下) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 1 または 2 . (右下) 2 GeV . ピクセルでのヒット数が 3 以上 .

Cut Parameter	20 GeV	2 GeV(0)	2 GeV(1,2)	2 GeV(3 以上)
track fit χ^2/Ndf	< 10			
$ \Delta \cot \theta $	< 0.025	< 0.5	< 0.05	< 0.03
S (mm)	$-0.5 < S < 1.0$	$-2.0 < S < 7.0$		$-0.4 < S < 0.6$
$ \Delta Z $ (mm)	< 4	< 6	< 5	< 0.6

表 3.1: Photon の横方向運動量による事象選択 . Photon の P_t と , 飛跡対のピクセルでのヒット数の合計 (最大 6 層ヒット) で区別した . ピクセルでのヒット数は括弧内に示す . また , ヒット数による区別は 2 GeV のサンプルのみで行った .

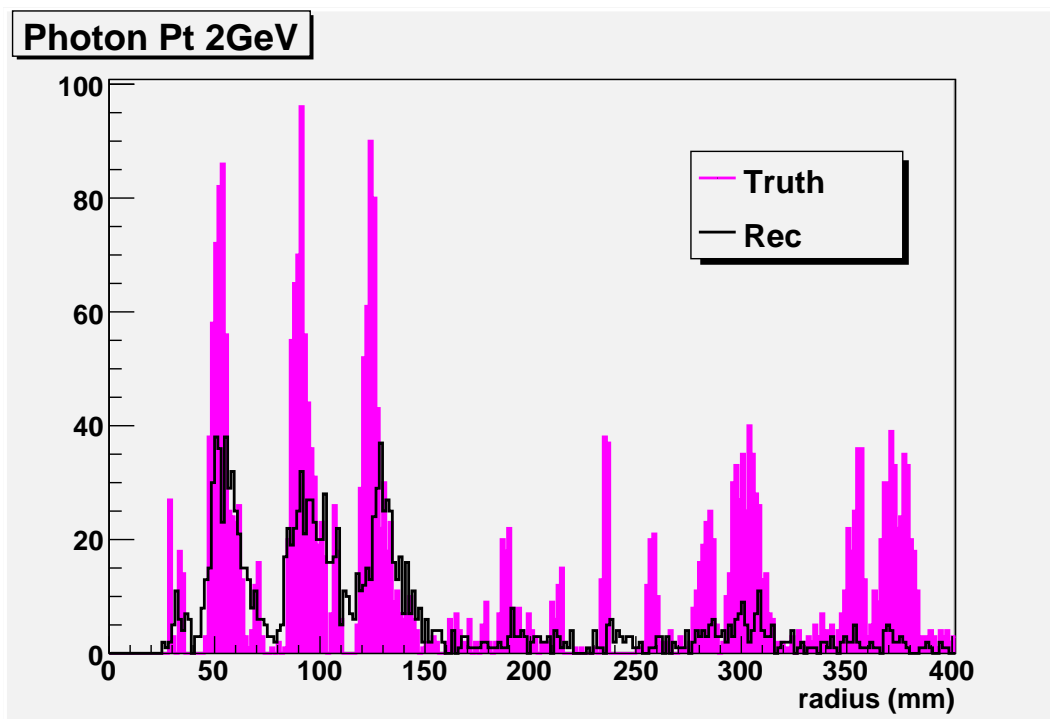
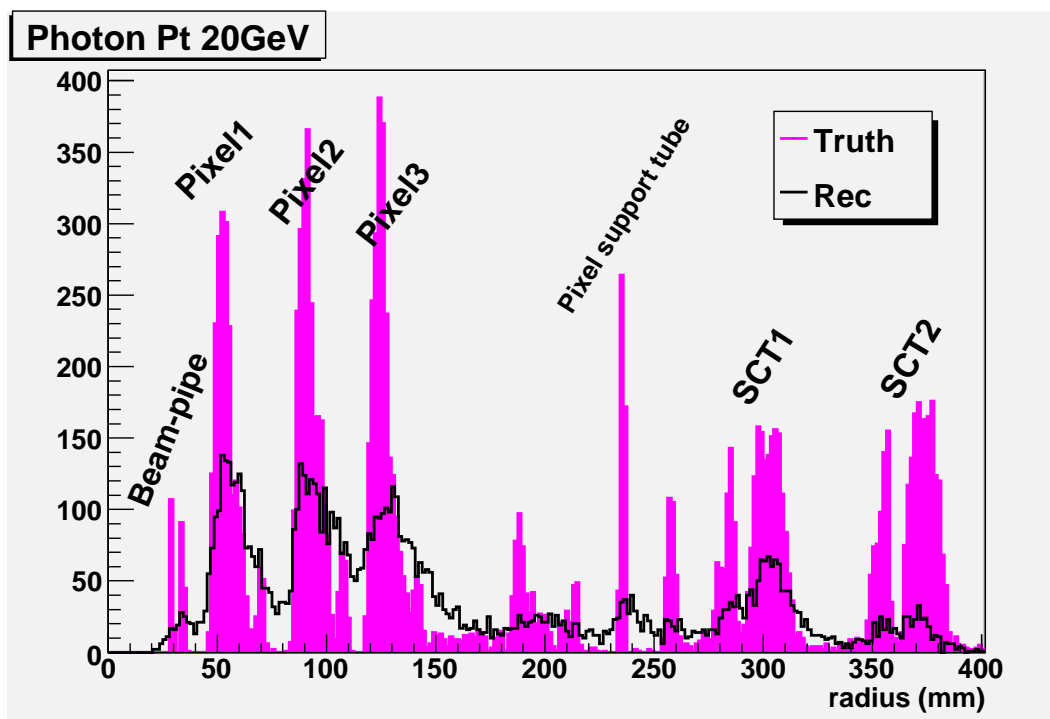


図 3.7: コンバージョン点の R 方向分布 . (上) Photon $P_t=20$ GeV . ビームパイプと各検出器の位置を示す . (下) Photon $P_t=2$ GeV . ピンクでシミュレーションの Truth のコンバージョン点を , 黒の実線で再構成したコンバージョン点を示す .

ビームパイプ, 3層のピクセル検出器と SCT 検出器の 2 層目までが再構成点の分布のピークとして確認できる. 検出器の設置位置は図 1.7 に示した通りである. ビームパイプと各検出器のバレル部の設置位置を表 3.2 にまとめる.

	radius (mm)
Beam-pipe	34.3
Pixel	50.5
	88.5
	122.5
SCT	299
	371
	443
	514
TRT	563-1066

表 3.2: ビームパイプと内部飛跡検出器バレル部の R 方向設置位置 .

3.4.2 位置分解能

再構成した点と真のコンバージョン点の R 方向の差の分布を図 3.8 に示す. R_{rec} は再構成点の, R_{truth} は真のコンバージョン点の R を表す.

また, コンバージョンにより対生成した電子, 陽電子は制動放射によりエネルギーを失う. 制動放射が再構成の位置精度に与える影響を確認するため, 対生成した電子, 陽電子が内部飛跡検出器において失う横方向運動量 P_t が 20% 以下のイベントを選び, 図 3.9 に示す.

また, コンバージョン点の R 方向位置分解能を, 再構成点と真のコンバージョン点の R 方向の差の分布の標準偏差を用いて表す. 図 3.10 に, 縦軸に図 3.8, 3.9 の分布をガウス分布でフィットしたときの標準偏差をとり, 再構成した全イベントと, 制動放射による P_t 損失が小さいイベントの R 方向位置分解能を, 20 GeV, 2 GeV それぞれで示す.

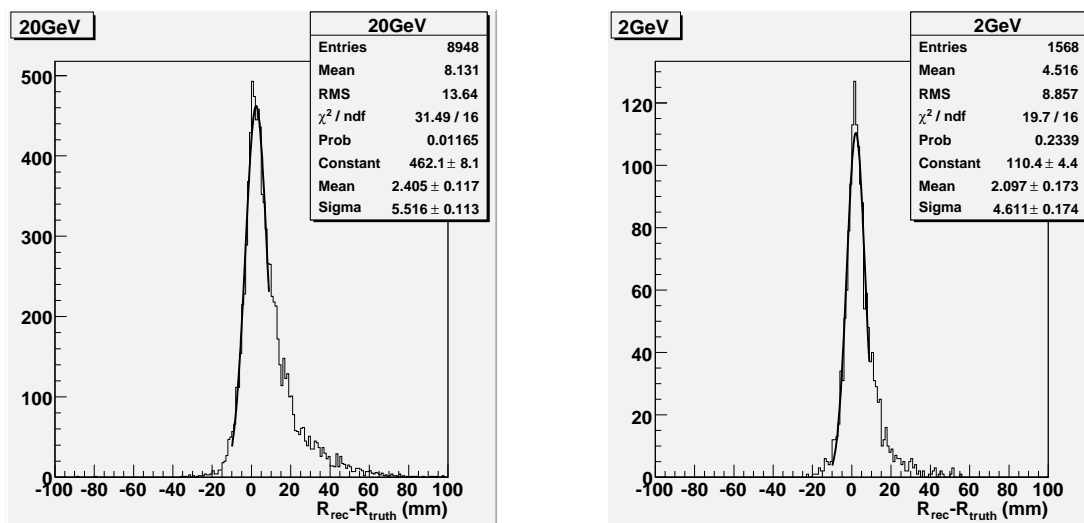


図 3.8: 再構成点と真のコンバージョン点の R 方向の差 . ガウス分布でフィットした . (左)converted Photon $Pt=20$ GeV . (右)converted Photon $Pt=2$ GeV .

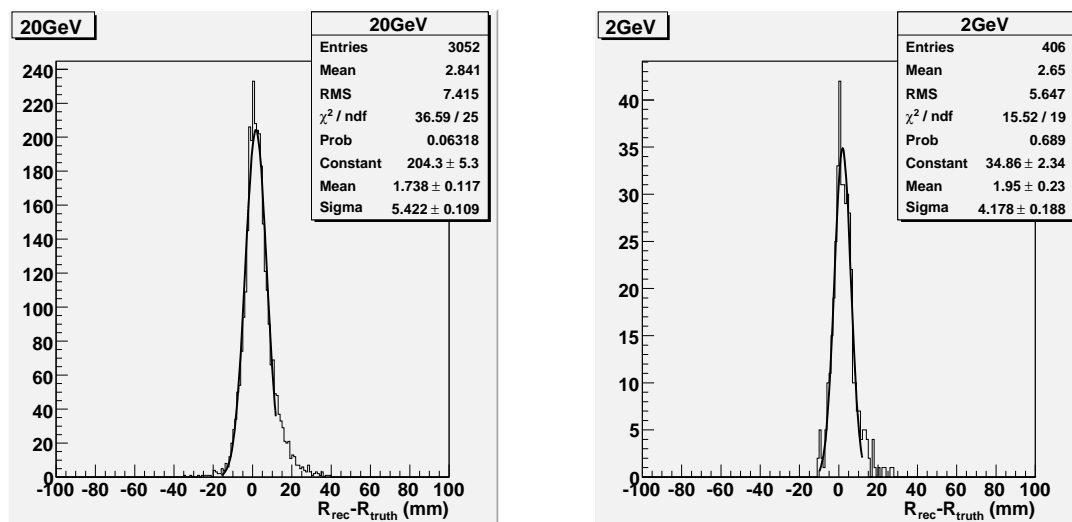


図 3.9: 制動放射により内部飛跡検出器内で失った Pt が , 2 本の飛跡とも 20% 以下であるイベントの再構成点と真のコンバージョン点の R 方向の差 . ガウス分布でフィットした . (左)converted Photon $Pt=20$ GeV . (右)converted Photon $Pt=2$ GeV .

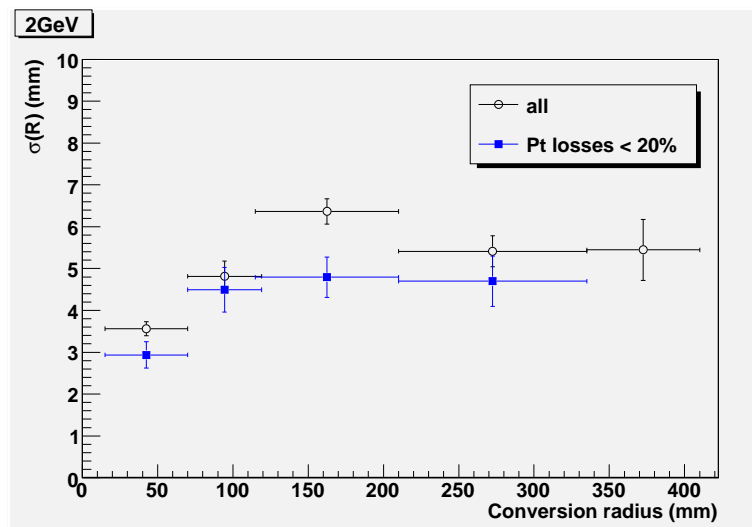
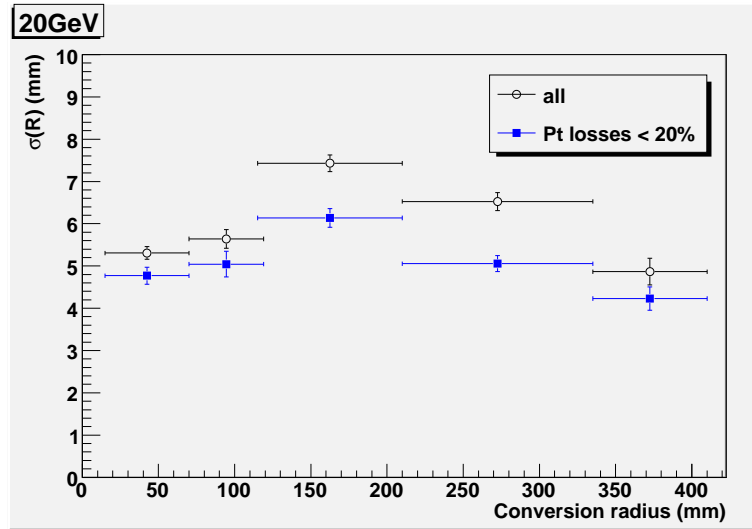


図 3.10: R 方向位置分解能 . 再構成した全てのイベントと P_t の損失が小さいものをそれぞれ示す . (上)converted Photon $P_t=20$ GeV . (下)converted Photon $P_t=2$ GeV .

3.4.3 再構成効率

Photon P_t 20 GeV , 2 GeV のサンプルで再構成の効率を求めた．効率は，真のコンバージョン点に対する再構成点の数の割合である．ここで，再構成点と真のコンバージョン点の位置のずれは考えないものとする．真のコンバージョン点の R 方向， η 方向による効率を図 3.11 に示す．

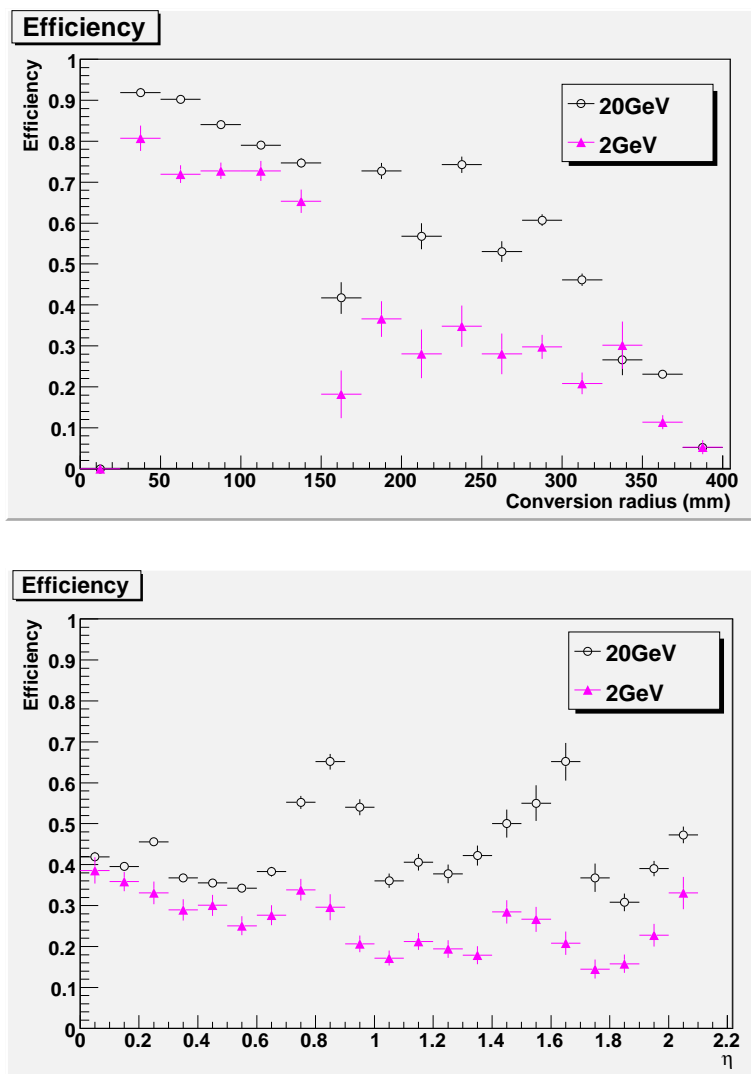


図 3.11: 再構成効率． P_t 20 GeV , 2 GeV

$R < 400$ mm における再構成の効率は， $R < 150$ mm において Photon P_t 20 GeV で 0.75 以上，2 GeV で 0.65 以上で， R が大きくなるごとに低くなっていく． $R > 330$ mm ではどちらもほぼ同じ値をとる．ただし， $0 < R < 25$ mm の範囲において，真のコンバージョン点は 0 であるため，効率は 0 となっている．

3.4.4 ミニмумバイアスサンプルによる再構成

重心系エネルギー 900 GeV のミニмумバイアスシミュレーションサンプルを用いて、コンバージョン点の再構成を行った。使用するイベントに対して、イベント内のコンバージョンの数や飛跡の数、コンバージョンにより生じた粒子の横方向運動量は制限しない。

このイベントでは光子の横方向運動量 P_t は、そのほとんどが 5 GeV 以下である (図 3.12)。そのため、カットの値は 2 GeV の光子のコンバージョン再構成と同様に、飛跡対のピクセルでのヒット数の合計値によって 3 種類に分けて調整した。

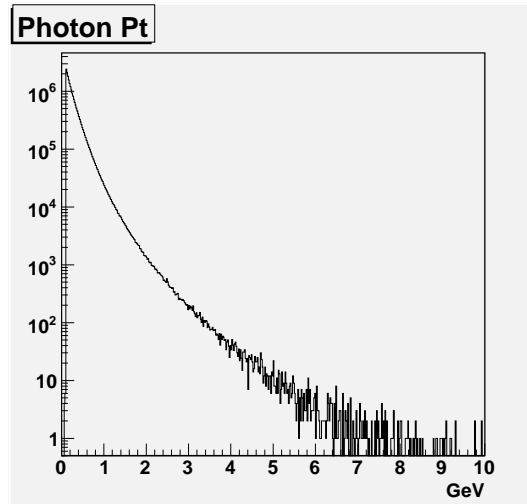


図 3.12: ミニмумバイアスサンプル (900 GeV) における Photon P_t .

ここで用いたミニмумバイアスサンプルは、 P_t が 100 MeV までの粒子をトラッキングし、飛跡としての情報を持っている。ここでは前述のシミュレーションサンプルと同様に、500 MeV 以上の飛跡で再構成を行うため、 $P_t < 500$ MeV の飛跡をカットした。また、前述の、シミュレーションサンプルは、電子、陽電子のみが飛跡として認識されていたのに対し、ミニмумバイアスサンプルでは、陽子・陽子の衝突をシミュレーションしており、衝突点から無数の様々な粒子が発生するため、電子、陽電子以外の粒子も飛跡として認識される。それらのバックグラウンドを落とすため、TRT 検出器による電子らしさの要求 ($\text{TrtHTHit}/\text{TrtHit}$) と、不変質量を事象選択に加えた。図 3.13 に $\text{TrtHTHit}/\text{TrtHit}$ の分布を、図 3.14 に 不変質量 の分布を示す。表 3.3 にカットの値を示す。

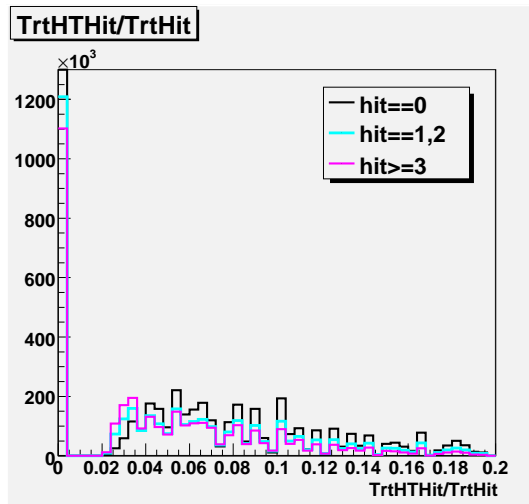


図 3.13: $\text{TrtHTHit}/\text{TrtHit}$ 分布 . 黒線:ピクセルでのヒット数が 0 . 青線:ピクセルでのヒット数が 1 または 2 . ピンク:ピクセルでのヒット数が 3 以上 .

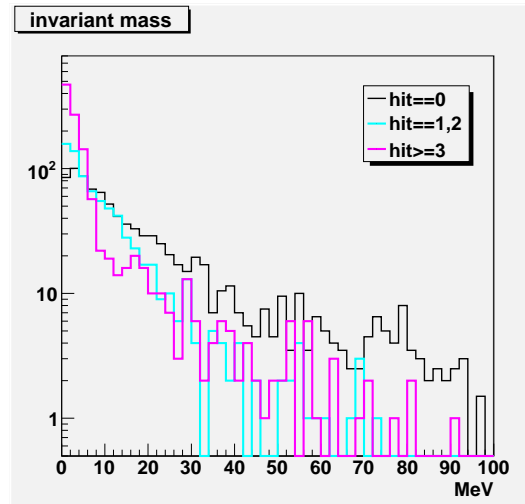


図 3.14: 不変質量分布 . 黒線:ピクセルでのヒット数が 0 . 青線:ピクセルでのヒット数が 1 または 2 . ピンク:ピクセルでのヒット数が 3 以上 .

Cut Parameter	hit = 0	hit = 1,2	hit \geq 3
track Pt (MeV)	≥ 500		
track fit χ^2/Ndf	< 10		
$\text{TrtHTHit}/\text{TrtHit}$		> 0.015	> 0.04
$ \Delta \cot \theta $	< 0.15	< 0.15	< 0.025
S (mm)	$-2.0 < S < 7.0$	$-2.0 < S < 5.0$	$-0.4 < S < 0.6$
$ \Delta Z $ (mm)	< 6	< 5	< 0.6
invariant mass (MeV)	< 30		

表 3.3: ミニマムバイアスサンプルに用いた 事象選択 . 飛跡対のピクセルでのヒット数の合計で区別した .

真のコンバージョン点と再構成点の R 方向分布を図 3.15 に示す．ただし，真のコンバージョン点の分布は，再構成されたイベント数に合わせて規格化している．ビームパイプ，3 層のピクセル検出器と SCT 検出器の内側 2 層が確認できる．

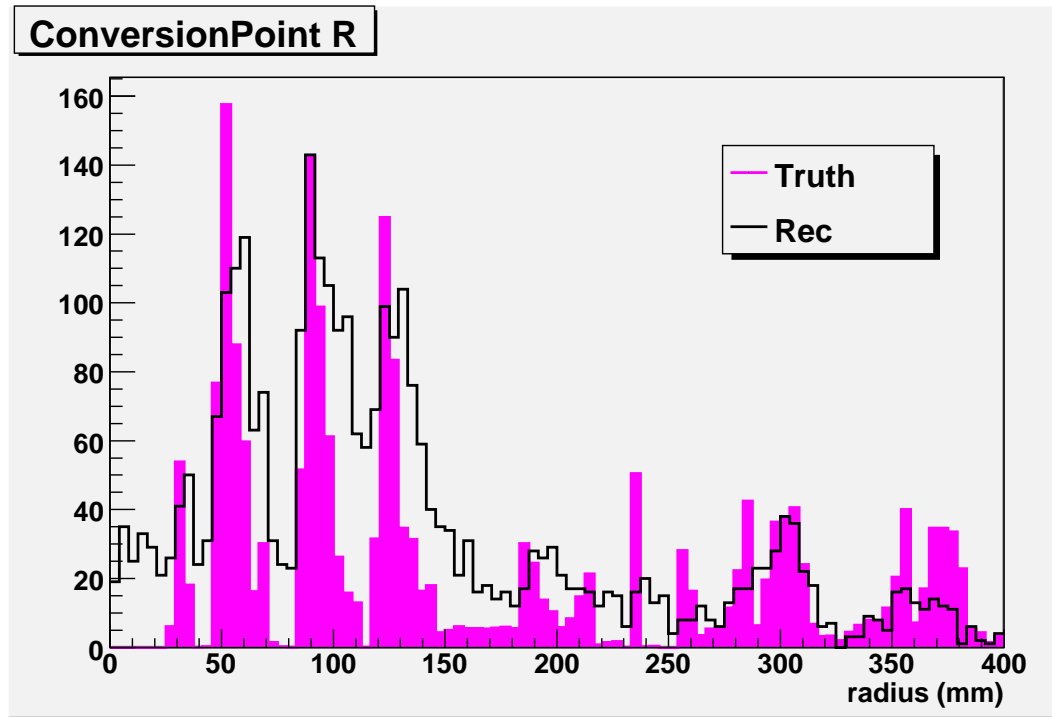


図 3.15: 重心系エネルギー 900 GeV ミニマムバイアスサンプルを用いたコンバージョン点分布．ピンクで真のコンバージョン点の分布を，黒の実線で再構成したコンバージョン点の分布を示す．

再構成した点と真のコンバージョン点の R 方向の差の分布を図 3.16 に示す．ガウス分布でフィットし， $\text{mean} \pm 3\sigma$ 内の再構成点の分布を図 3.17 に青色で示す．黒の実線は全再構成点である．

ここで $R < 25$ mm における再構成点は，同イベント内の真のコンバージョン点と比較してずれが大きく，明らかに誤った点を再構成している．図 3.15 から，ビームパイプの中にあたるこの範囲には，コンバージョン点は存在していないことがわかる．これは，Dalitz 崩壊 ($\pi^0 \rightarrow e^+e^-\gamma$) による電子，陽電子を再構成したものであると考えられる．Dalitz 崩壊の崩壊分岐比は $(1.198 \pm 0.032) \%$ である．

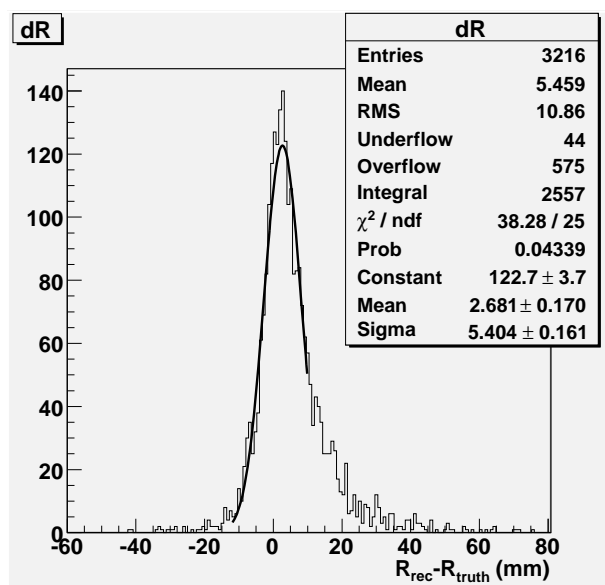


図 3.16: ミニマムバイアスサンプルの再構成の位置精度 . 再構成点と真の値との R 方向の差を示す . ガウス分布でフィットした .

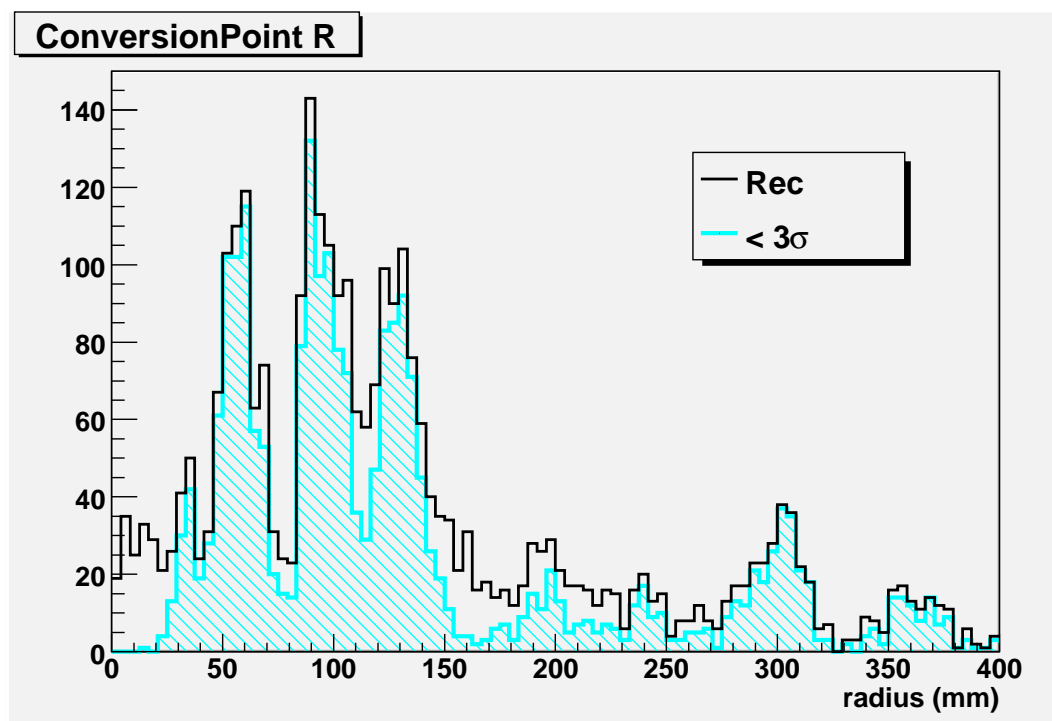


図 3.17: 全最構成点 (黒) と位置精度のガウス分布フィットにおいて 3σ 以内の再構成点の p 分布 (青) . $R < 30$ mm はビームパイプの中にあたるので , 図 3.15 の Truth からわかるようにコンバージョン点は存在しない . ビームパイプ内の領域では Dalitz 崩壊を再構成している .

3.5 実際の衝突事象を用いた光子コンバージョン再構成

2009年に再稼働したLHCで、重心系エネルギー900 GeVの衝突イベントが観測された。この衝突事象(ミニマムバイアス)を用いてコンバージョンを再構成した。事象選択はシミュレーション・ミニマムバイアス・サンプル(900 GeV)と同様である(表3.3)。図3.18に衝突事象の再構成分布を示す。データで再構成されたイベント数に合わせて規格化したシミュレーション・ミニマムバイアス・サンプルの再構成点も示した。

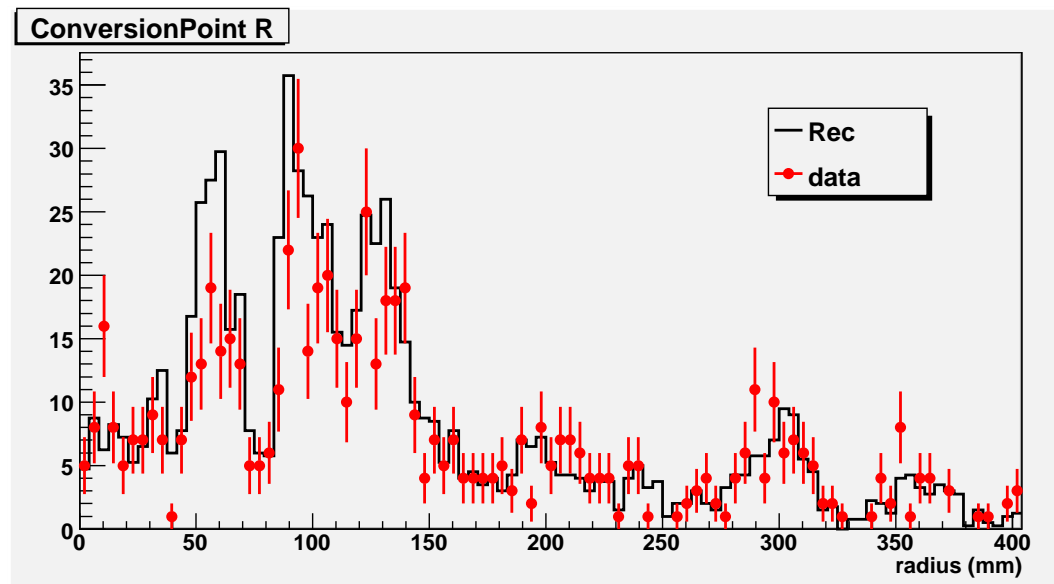


図 3.18: 衝突事象を用いて再構成したコンバージョン点 R 方向分布 (赤点)。シミュレーションサンプルの再構成点と合わせて示す (黒実線)。シミュレーションサンプルはデータで再構成されたイベント数に合わせて規格化している。

第4章 結論と今後の課題

4.1 結論

光子の横方向運動量 P_t が 20 GeV, 2 GeV のシミュレーションサンプルを用いて光子コンバージョンの再構成を行った。2 GeV のサンプルでは飛跡対のピクセル検出器でのヒット数によって3通りに分け、カットの値を変えて再構成を行った。20 GeV, 2 GeV 共に、ビームパイプ, 3層のピクセル検出器と SCT 検出器の最内層を, 20 GeV のサンプルでは, SCT 検出器 2 層目まで再構成点の R 方向分布のピークとして確認できた。

コンバージョン点の位置分解能は制動放射による電子, 陽電子の横方向運動量損失によって悪化している。制動放射による横方向運動量損失が多いものを除去すると, 特に $R > 120$ mm で位置分解能が向上する。

コンバージョン点の再構成効率は, R が大きくなるにつれて小さくなり, 20 GeV は $R > 280$ mm, 2 GeV は $R > 160$ mm で効率が次第に落ちる。

重心系エネルギー 900 GeV のシミュレーション・ミニマムバイアス・サンプルを用いた光子コンバージョンの再構成では, 飛跡の電子らしさの要求や不変質量の要求を加え再構成を行った。ここでも SCT 検出器の 2 層目までを確認できた。 $R < 30$ mm のビームパイプの内側には, Dalitz 崩壊の分布を見ることができた。

実際の LHC の運転による重心系エネルギー 900 GeV の衝突事象 (ミニマムバイアス) では, シミュレーションサンプルと同様に, ビームパイプ, ピクセル検出器, SCT 検出器 2 層目までの再構成点分布を確認できた。衝突事象を用いた再構成は, シミュレーションサンプルを用いた再構成の結果とよく一致している。また, Dalitz 崩壊も確認できる。シミュレーションサンプルではピクセル 1 層目で物質量をやや多めに評価している可能性がある。但し, コンバージョン検出効率等の不確かさも評価して判定する必要がある。

4.2 今後の課題

物質量を定量的に評価するためには, 再構成の効率の評価だけでなく, 光子 (γ) の個数を知る必要がある。光子の多くは, $\pi^0 (\rightarrow \gamma\gamma)$ がその起源である。シミュレーションと実データの両方で Dalitz 崩壊を確認できたので, シミュレーションサンプルを用いて Dalitz 崩壊の再構成効率を求める。衝突データの統計量が増えれば, Dalitz 崩壊の事象数を合わせることで π^0 の生成数が評価できる。また, シミュレーションと実際の衝突事象の光子の横方向運動量 P_t の違いによるコンバージョンの割合を評価する。

参考文献

- [1] CERN webpage , <http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>
- [2] LHC webpage , <http://lhc.web.cern.ch/lhc/>
- [3] ATLAS webpage , <http://atlas.web.cern.ch/Atlas/index.html>
- [4] ATLAS Japan webpage , <http://atlas.kek.jp>
- [5] ATLAS Collaboration , *INNER DETECTOR Technical Design Report*, CERN/LHCC/97-16 ATLAS TDR 4, 30 APR 1997.
- [6] William R.Leo , *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments*
- [7] 小田稔 『宇宙線 [改定版]』 , 裳華房 ,1972 年.
- [8] webpage , <http://public.web.cern.ch/Public/Welcome.html>
- [9] ATLAS Collaboration , *Expected Performance of the ATLAS Experiment Detector , Trigger and Physics , Vol1*
- [10] AtLAS Collaboration , *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider , 2008 JINST 3 S08003*
- [11] Particle Data Group , *REVIEW OF PARTICLE PHYSICS*, Physics Letters B Volume 667 Issues 1,July 2008.

謝辞

研究室の先生，スタッフの皆様には，本当にお世話になりました．研究に関する質問から，たわい無い雑談まで，いつも学ばせていただくことばかりでした．本研究を進めてこられたのは，いつも快く質問に応じて下さった先生方がいてくださったからです．特に指導教官の金信弘教授には，研究の進捗を幾度となく見ていただき，その都度たくさんの助言をいただきました．直接ご指導して頂いた原先生には，いつも進むべき道を示していただき，私はいつもそれに甘えてばかりだったように思います．本当にありがとうございました．

先生方から学ぶことが多かったのと同様に，先輩方にも多くのことを教えていただきました．勉強や研究に関すること，研究室での生活のこと，また，海外での拠点実習の際は先輩がいてくれたからこそ，たくさんの経験ができたと感じます．ありがとうございました．

後輩の皆が研究室に入ってきて，より一層研究室が明るくなり、居心地がよくなった気がします．研究室の中だけで顔を合わせるのではなく，一緒に飲みについていろいろな話をして，とても楽しかったです．

今年一緒に修士論文を提出する同学年の皆様には，本当にいろいろなところで助けてもらいました．いつも皆様には迷惑をかけてばかりでした．授業のレポート，1ヵ月の拠点実習，学会，そして修士論文．つらい時期に頑張ることができたのは皆のおかげです．本当にありがとうございました．

研究室では神代さんにも大変お世話になりました．わからないことがあればいつも神代さんに聞いていました．ありがとうございました．

気心知れた友人には研究が辛い時でも，会うといつも元気をもらっていました．一人暮らしだったつくばでの6年間が楽しかったと思えるのは，会えばどんなときでも元気になれる，多くの友人に恵まれたからだと感じています．密かに，でもすごく感謝しています．

最後になりましたが，両親には多くの面で支えていただきました．今まで学生生活を続けてこられたのは，他ならぬ両親のおかげです．実家に帰ることも少なく，心配をかけたことも何度もあるかもしれませんが．それでも，私が決めたことを否定せず，やりたいことを思いきりできるよう後ろから手助けしてくれたことに，本当に感謝しています．ありがとうございました．