

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による
ATLAS 内部飛跡検出器の物質量評価の研究

黒川 悠文
(物理学専攻)

指導教員 受川 史彦 印

概要

ATLAS 検出器においてエネルギーや運動量を精密に測定するためには、検出器内の物質の評価が重要となる。本研究では、光子が物質を通過するときに電子・陽電子対にコンバージョンするという事象を用いて、内部飛跡検出器の物質を評価した。

ATLAS 検出器のフルシミュレーションにより作成されたシミュレーションサンプル (Single Photon, Minimum Bias) と実際に ATLAS 検出器で測定された重心系エネルギー 7 TeV の実データにおいて、光子コンバージョン事象により生成したと思われる荷電粒子対を選び出し、コンバージョンが起きた位置を調べた。光子コンバージョンにより生成された荷電粒子対は、互いに逆の電荷を持ち、ある 1 点から生成し、ほぼ同方向に進行するという特徴を持つ。従って、そのような特徴を持つものを、いくつかのパラメータでカットをかけることにより取り出せば、コンバージョン事象を再構成することが出来る。このとき、検出器のヒット数に応じて分解能が変わることも考慮する必要がある。

Minimum Bias の 7 TeV での陽子衝突データを用いて、SCT 検出器にヒットがあった飛跡を採用し、その中で粒子対に対して pixel 検出器でのヒット数の合計が 0, 1 または 2, 3 で場合分けを行い、0 のものに関しては SCT 検出器のヒット数でも 3 つに場合分けをし、計 5 パターンにおいてカット値を決定した。そして、このようにして選択した粒子対の飛跡から、動径方向のコンバージョン点分布を作再構成した。結果、pixel 検出器のバレル部 3 層や、SCT 検出器の 1, 2 層目などの物質が存在する位置にピークを確認することが出来た。

Minimum Bias においては、動径方向の位置を限定することにより、pixel 検出器の 1, 2, 3 層と SCT 検出器の 1 層付近のコンバージョン点 z 分布と ϕ 分布をシミュレーションと実データにおいて作成し、比較した。

目次

第 1 章	LHC 実験と ATLAS 検出器	1
1.1	LHC 加速器	1
1.1.1	LHC 加速器	1
1.1.2	LHC で期待される物理	3
1.2	ATLAS 検出器	4
1.2.1	ATLAS 検出器概要	4
1.2.2	ATLAS 検出器の座標系	4
1.2.3	検出器一般論	5
1.2.4	内部飛跡検出器	6
1.2.5	カロリメータ	14
1.2.6	ミュオン検出器	16
1.2.7	電磁石	18
1.2.8	トリガーシステム	20
第 2 章	ATLAS ソフトウェア	22
2.1	ソフトウェアチェーン	22
第 3 章	光子コンバージョン事象を用いた内部飛跡検出器の物質質量評価	25
3.1	光子コンバージョン	26
3.2	光子コンバージョン再構成方法	28
3.2.1	光子コンバージョン再構成方法概要	28
3.2.2	事象選択	30
3.3	Single Photon 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	31
3.3.1	事象選択	31
3.3.2	内部飛跡検出器の物質質量評価	42
3.4	Minimum Bias 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	44
3.4.1	事象選択	44
3.4.2	内部飛跡検出器の物質質量評価	45
3.5	実データを用いた光子コンバージョン再構成	48
3.5.1	内部飛跡検出器の物質質量評価	48
3.5.2	内部飛跡検出器の物質質量評価 (Z 分布と ϕ 分布)	51
第 4 章	結論	54

目次

1.1	LHC 加速器概略図	1
1.2	ダイポールマグネット断面図	2
1.3	LHC 加速器における各検出器の配置図	3
1.4	ATLAS 検出器の全体図	4
1.5	ATLAS 実験で用いられている座標系及びトラックパラメータ	5
1.6	検出器一般論	5
1.7	内部飛跡検出器の全体図	6
1.8	内部飛跡検出器バレル部の概略図	6
1.9	内部飛跡検出器エンドキャップ部の概略図	7
1.10	内部飛跡検出器の物質分布	8
1.11	内部飛跡検出器の充填ガス分布	8
1.12	ピクセル検出器	9
1.13	SCT バレル部の写真	10
1.14	SCT バレル部のモジュール	11
1.15	SCT エンドキャップ部モジュールの写真	11
1.16	SCT エンドキャップ部モジュールの概要図	12
1.17	TRT 検出器バレル部	13
1.18	カロリメータの全体図	14
1.19	電磁カロリメータ	15
1.20	ハドロンカロリメータ	15
1.21	ミューオン検出器の全体図	16
1.22	y - z 平面におけるミューオン検出器の各要素の配置図	16
1.23	MDT モジュールの概要図	17
1.24	TGC 検出器の写真	17
1.25	ソレノイド磁石の写真	18
1.26	トロイド磁石の概要図と磁場の様子	19
1.27	エンドキャップ側から見たバレル部トロイド磁石の写真	19
1.28	トリガーシステムの概要	21
2.1	ATLAS ソフトウェアでのデータの流れ	23
2.2	シミュレーションサンプル作成の流れ	24
3.1	光子コンバージョン	25
3.2	光子の断面積	26
3.3	S の定義	29

3.4	SCT hit 分布	32
3.5	χ^2/Ndf 分布 (pixel hit = 0)	33
3.6	χ^2/Ndf 分布 (pixel hit > 0)	34
3.7	$\Delta\cot\theta$ 分布 (E=25GeV)	35
3.8	$\Delta\cot\theta$ 分布 (E=75GeV)	36
3.9	S 分布 (E=25GeV)	37
3.10	S 分布 (E=25GeV)	38
3.11	dz 分布 (E=25GeV)	39
3.12	dz 分布 (E=75GeV)	40
3.13	Single Photon サンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布	43
3.14	y-z 平面における内部飛跡検出器の概略図	43
3.15	TrtHTHit/TrtHit 分布	44
3.16	不変質量分布	44
3.17	Minimum Bias シミュレーションサンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布	45
3.18	Minimum Bias サンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布 ($\eta < 0.7$)	46
3.19	Minimum Bias サンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布 ($0.7 < \eta < 1.2$)	46
3.20	Minimum Bias サンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布 ($\eta > 1.2$)	47
3.21	実データから再構成した動径方向のコンバージョン点分布	48
3.22	実データから再構成した動径方向のコンバージョン点分布 ($\eta < 0.7$)	49
3.23	実データから再構成した動径方向のコンバージョン点分布 ($0.7 < \eta < 1.2$)	49
3.24	実データから再構成した動径方向のコンバージョン点分布 ($\eta > 1.2$)	50
3.25	SCT1 層目における, コンバージョン点 z, ϕ 分布	51
3.26	pixel 検出器 1, 2, 3 層目における, コンバージョン点 z 分布	52
3.27	pixel 検出器 1, 2, 3 層目における, コンバージョン点 ϕ 分布	53

表 目 次

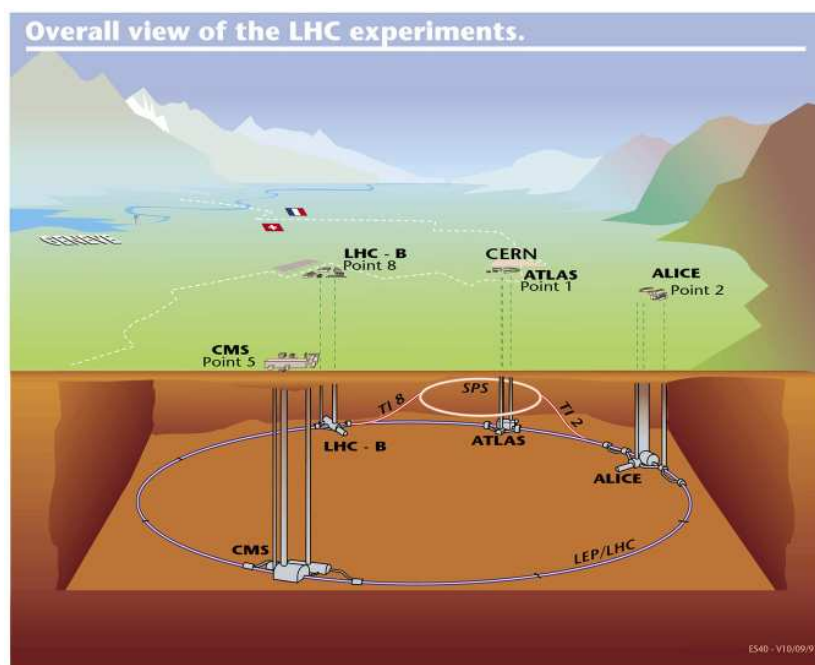
1.1	LHC 加速器の主な仕様	2
1.2	内部飛跡検出器の仕様	7
3.1	Tsai による L_{rad} と L'_{rad} の値	27
3.2	Single Photon シミュレーションサンプルでのカット値 (E=25GeV)	41
3.3	Single Photon シミュレーションサンプルでのカット値 (E=75GeV)	41
3.4	Minimum Bias シミュレーションサンプルでのカット値	44
3.5	検出器の各層を選ぶための r によるカットの値	51

第1章 LHC実験とATLAS検出器

1.1 LHC加速器

1.1.1 LHC加速器

LHC加速器 (Large Hadron Collider) は、スイス・ジュネーブ郊外にある CERN 研究所に建設された、周長 27km の陽子陽子衝突型加速器である。スイスとフランスの国境をまたいで設置されている。重心系エネルギーの設計値は 14 TeV である。2008 年 9 月に 450 GeV のビーム周回に成功した。しかし、大量のヘリウム漏れ事故が発生し修理後、2009 年 11 月に再稼働し、2010 年 3 月には重心系エネルギー 7 TeV の陽子衝突実験を開始した。LHC 加速器には、4ヶ所の衝突点があり、それぞれに、A Toroidal LHC Apparatus (ATLAS)、Compact Muon Solenoid (CMS)、A Large Ion Collider Experiment (ALICE)、LHCb の 4 つの検出器が設置されている。ATLAS、CMS は汎用検出器、LHC-B は B 中間子の研究に特化した検出器、ALICE は重イオン衝突実験の為の検出器である。LHC 加速器の概略を図 1.1 に、LHC リングの断面を図 1.2 に、加速器の主な仕様を表 1.1 に示す。



, clip , clip

図 1.1: LHC 加速器概略図 [8] .

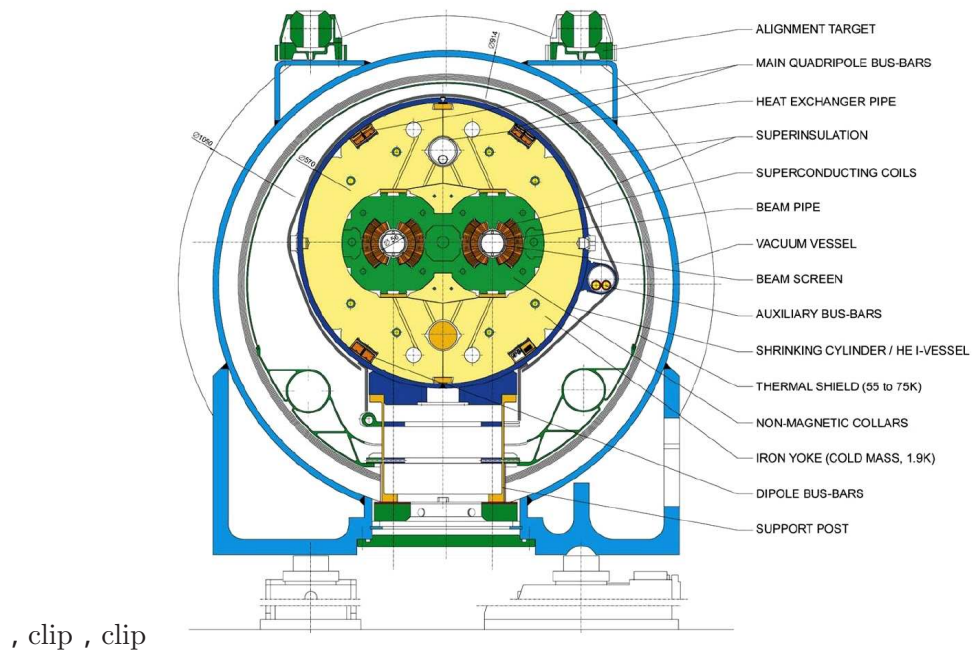


図 1.2: ダイポールマグネット断面図 [4] .

主リング周長	26.7km
粒子	陽子-陽子
陽子ビームエネルギー	7.0TeV
最高ルミノシティ	$1.0 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$
バンチ間隔	25nsec
バンチ数	2808
バンチあたりの陽子数	1.0×10^{11}
ビームエミッタンス	$3.75 \mu\text{m rad}$
超電導双極磁石	1232 台
双極磁石数と磁場	14.2m , 8.33 T
RMS バンチ長さ	7.55 cm
衝突点でのビーム半径	$16 \mu\text{m}$
バンチ衝突あたりの陽子衝突数	約 20 (非弾性散乱)
ルミノシティ寿命	10 hours
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 .

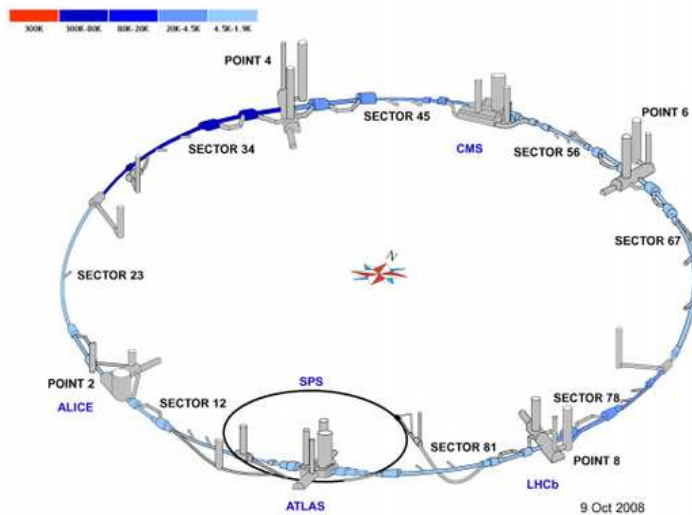


図 1.3: LHC 加速器におけ各検出器の配置図

1.1.2 LHC で期待される物理

LHC 実験では、Higgs 粒子の発見や、超対称性粒子や余剰次元などの標準理論を超える物理の発見を目指している。具体的には、以下のものが挙げられる。

1. Higgs 粒子の探索

- 標準理論 Higgs 粒子の探索
- 荷電 Higgs 粒子を含む超対称性 Higgs 粒子の探索
- Higgs 粒子の質量，生成断面積の測定
- ボソン，フェルミオンとの結合定数の測定
- スピン，パリティの決定

2. 標準理論を超える物理

- 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

3. 標準理論の検証

- W ボソン，トップクォークの質量測定
- B メソン崩壊を用いた CP 対称性の破れの探求

1.2 ATLAS 検出器

1.2.1 ATLAS 検出器概要

ATLAS 検出器は、LHC に設置された 4 つの検出器のうちの 1 つであり、衝突点をほぼ全方位囲む汎用検出器である。内側から順に、内部飛跡検出器、カロリメータ、 μ 粒子検出器が並ぶ。また、内部飛跡検出器全体はソレノイド磁石内にあり、ミュー粒子検出器部にはトロイド磁石が設置される。図 1.4 に ATLAS 検出器の概観図を示す。

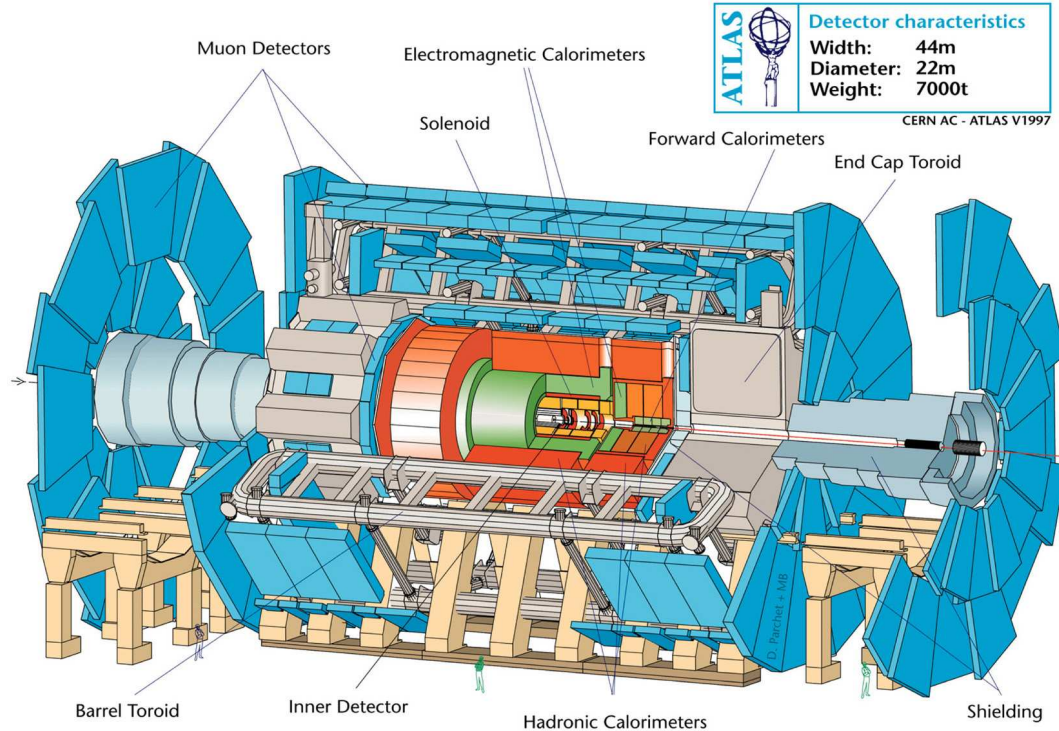


図 1.4: ATLAS 検出器の全体図。検出器要素がビーム軸と平行に配置される中央部をバレル、垂直に配置される前後方部をエンドキャップと呼ぶ。

1.2.2 ATLAS 検出器の座標系

ATLAS 検出器における座標軸及びトラックパラメータは、図 1.5 のように定義されている。ビーム軸方向を z 軸とし、 $+z$ は主リング半時計回りとなる。 x 軸は水平方向主リング中心向き、 y 軸は上向きと定義される。 xy 平面での中心からの距離は r 、 x 軸からの方位角は ϕ 、 yz 平面での z 軸からの角度は θ で表される。また、 θ の代わりに式 (1.1) のような、擬ラピディティ η が用いられることもある。

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

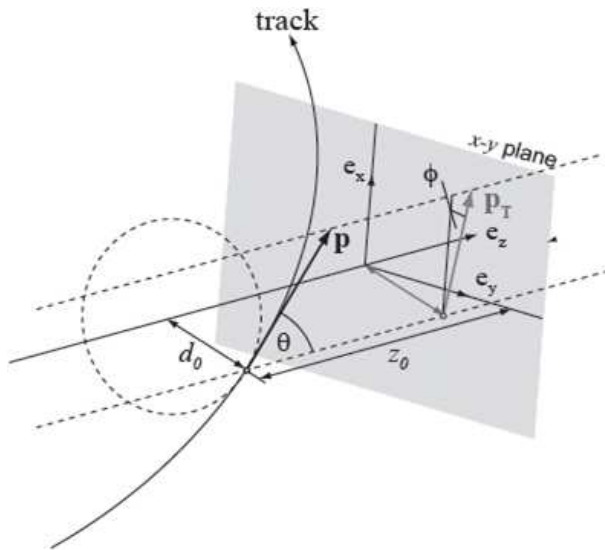


図 1.5: ATLAS 実験で用いられている座標系及びトラックパラメータ.

1.2.3 検出器一般論

ATLAS 検出器では，ビーム衝突で発生した様々な粒子をそれぞれ特定の検出器で補捉する．粒子は特定の検出器を通過する際に，反応を起こすことにより検出され，運動量やエネルギーが計測される．粒子が検出器に検出される様子を，図 1.6 に示す．

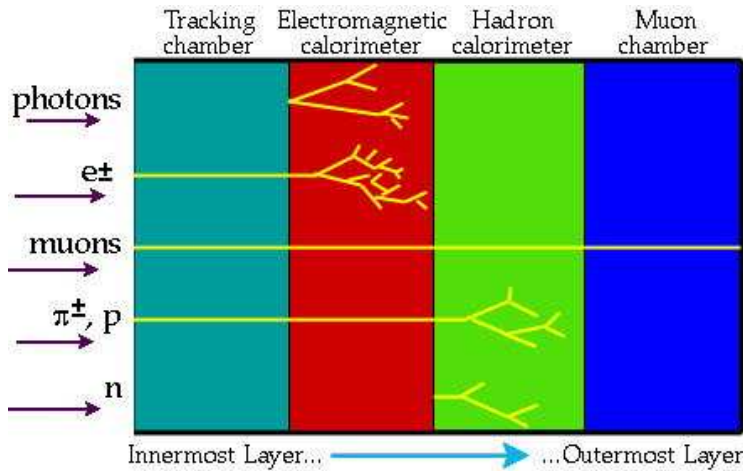


図 1.6: 検出器一般論．電子や陽子等の荷電粒子は，内部飛跡検出器とカロリメータで検出される．電荷をもたない中性子や光子は，内部飛跡検出器では検出されずカロリメータで捕らえられる．相互作用を起こしにくいミュオンは最外層のミュオン検出器で検出される [8]．

1.2.4 内部飛跡検出器

内部飛跡検出器は ATLAS 検出器の最内層に位置する検出器である。内側から、ピクセル検出器 (Pixel), シリコンマイクロストリップ検出器 (SCT), 遷移輻射検出器 (TRT) から成る。2T のソレノイド電磁石内で荷電粒子の飛跡を検出し、その曲率から、運動量、衝突点、二次崩壊点等を求める。内部飛跡検出器の全体図を図 1.7 に、バレル部の概略図を図 1.8 に、エンドキャップ部の概略図を図 1.9 に、主な仕様を表 1.2 に示す。

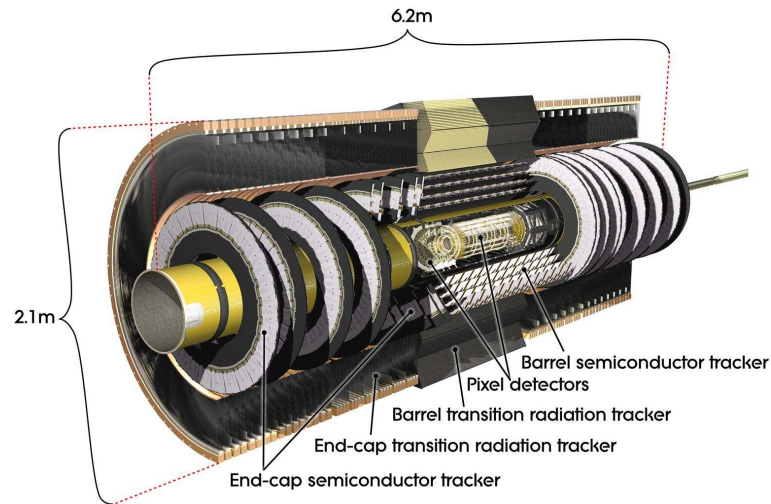


図 1.7: 内部飛跡検出器の全体図 [3] .

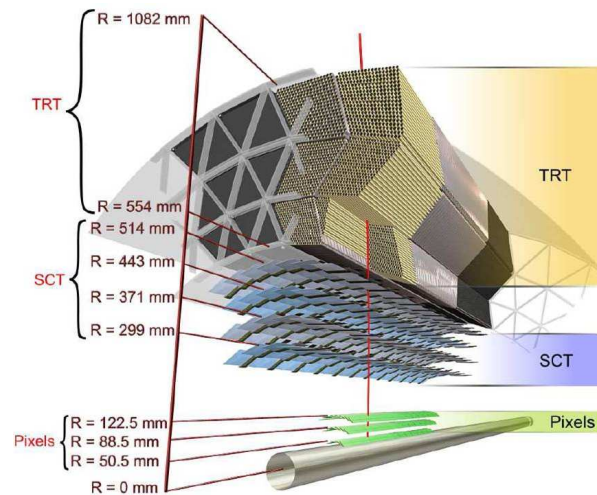


図 1.8: 内部飛跡検出器バレル部の概略図 [3] .

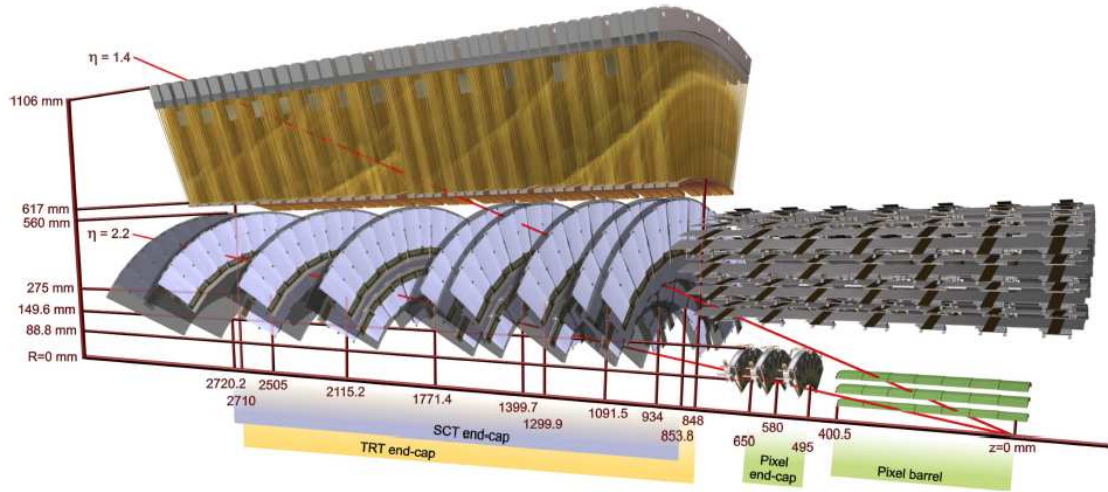


図 1.9: 内部飛跡検出器エンドキャップ部の概略図 [3] .

検出器	設置位置	検出器面積 (m^2)	空間位置分解能 (μm)	チャンネル数 (10^6)	η 領域 (η)
Pixel	B 層	0.26	$r\phi = 10, z=115$	13	± 2.5
	バレル部	1.1	$r\phi = 10, z=115$	54	± 1.7
	前方部	0.26	$r\phi = 10, z=115$	13	1.7-2.5
SCT	バレル部	34.4	$r\phi = 17, z=800$	3.2	± 1.4
	前方部	26.7	$r\phi = 17, z=800$	3.0	1.4-2.5
TRT	バレル部		130/ストロー	0.10	± 0.7
	前方部		130/ストロー	0.25	0.7-2.5

表 1.2: 内部飛跡検出器の仕様 .

$z=0$ の検出器中央から見た内部飛跡検出器の物質分布を、図 1.10 に示す。

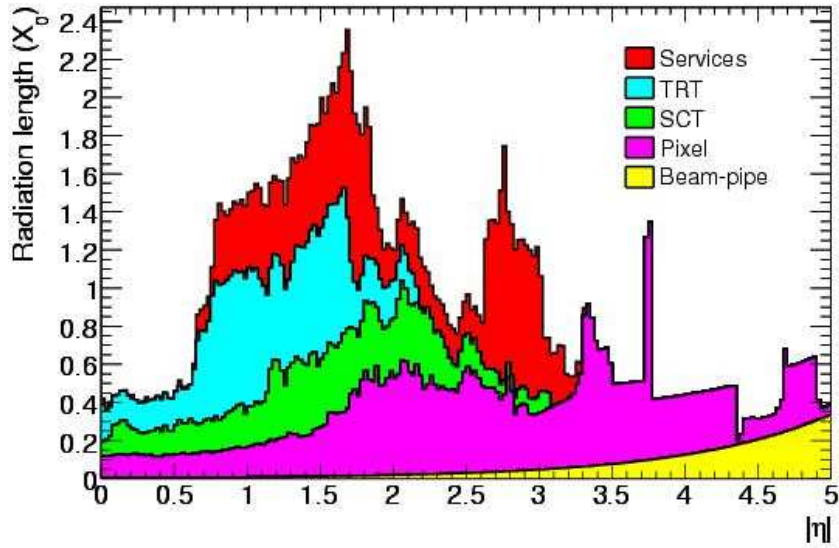


図 1.10: 内部飛跡検出器の物質分布．放射長を η の関数として表している [3] ．

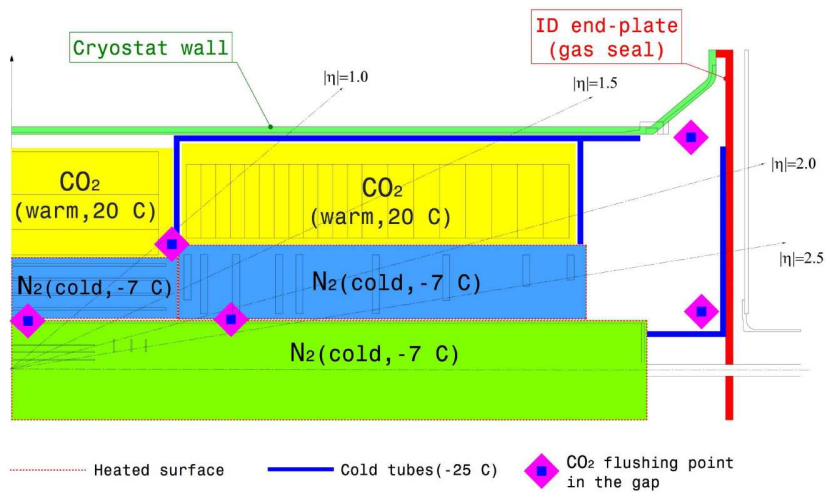


図 1.11: 内部飛跡検出器の充填ガス分布 [3] ．

- ピクセル検出器 (Pixel)

ピクセル検出器はバレル部 3 層，エンドキャップ部両側各 3 層から成る．ピクセル検出器の全体図とエンドキャップのディスクを図 1.12 に示す．最内層の B 層は取り換え可能な構造になっており，放射線損傷に対応できる．設置位置は，バレル部においては，動径方向 5cm に B 層，89mm，123mm に常設の 2 層となっている．エンドキャップ部は， $z = \pm 495\text{mm}$ ， $\pm 580\text{mm}$ ， $\pm 650\text{mm}$ の位置に 3 層ずつ設置されている．各モジュールのセンサーサイズは， $16.4\text{mm} \times 60.8\text{mm}$ である．ピクセルサイズは， $50\mu\text{m} \times 400\mu\text{m}$ ($\phi \times z$ 方向) となる．

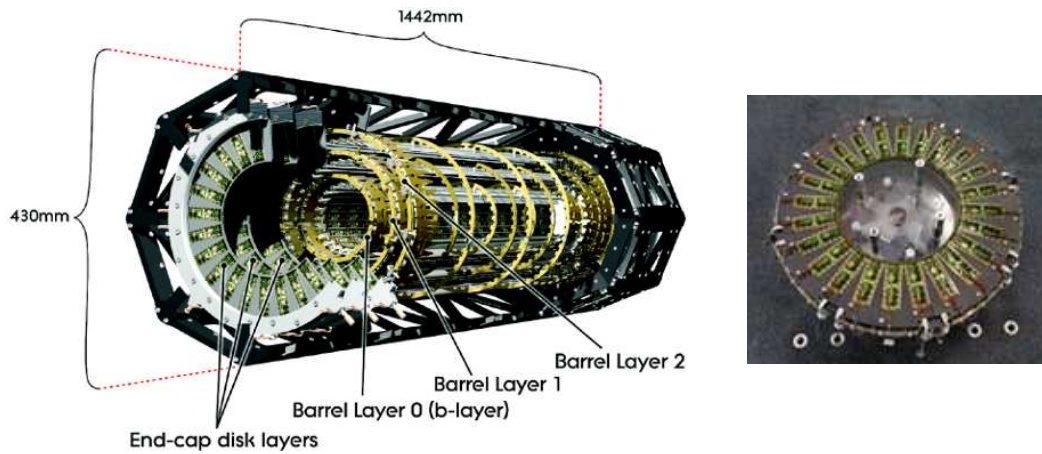


図 1.12: ピクセル検出器．(左) ピクセル検出器の全体図 [3]，(右) エンドキャップ部のディスクの写真 [3]．

- シリコンマイクロストリップ検出器 (SCT)

SCTはバレル部4層，エンドキャップ部両側各9層から成る．ピクセルと共に，荷電粒子のインパクトパラメータを精度良く決定し， $R\phi$ 方向における優れた位置分解能によって，運動量を精度良く決定する．設置位置は，バレル部においては，動径方向299cm，371mm，443mm，514mm，エンドキャップ部では， $z=\pm 853\sim 2720\text{mm}$ となっている．SCTは半導体を用いたマイクロストリップ型検出器であり，デジタル読み出しを用いている．SCT検出器のバレル部の写真を図1.13に，モジュールを図1.14に示す．バレル部の各モジュールは，約 $6\text{cm}\times 6\text{cm}$ のシリコンセンサー4枚で構成される．センサーには， $80\mu\text{m}$ 間隔で768本の読み出しストリップが備わっている．表裏のセンサーは平行ではなく， 40mrad ずらして重ねられているため， z 座標の位置を決定でき，粒子の位置を2次元で読み出すことができる．また，エンドキャップ部モジュールの写真を図1.15に，概要図を図1.16に示す．

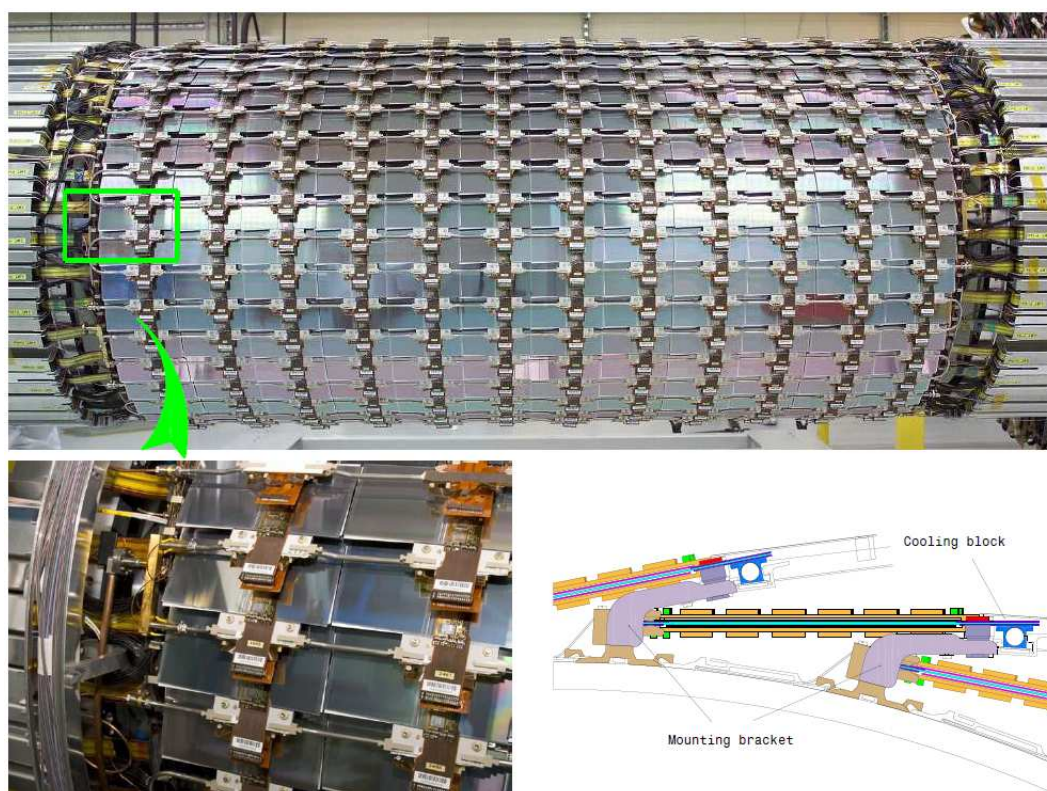


図 1.13: SCT バレル部の写真 [3] .

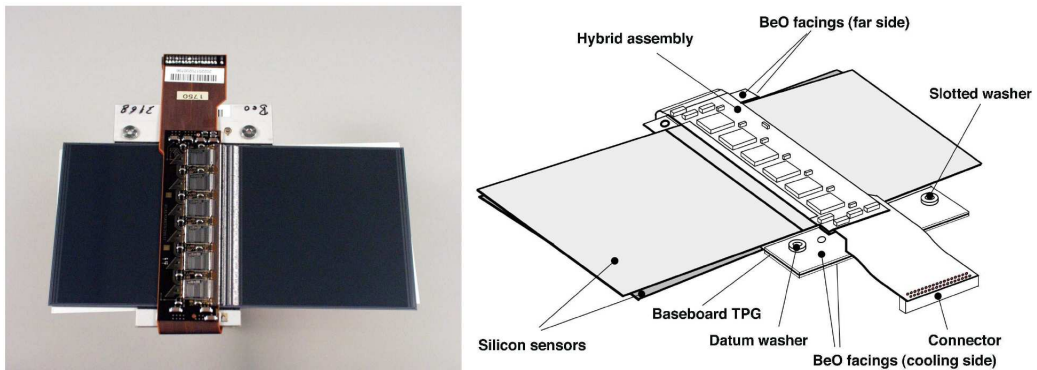


図 1.14: SCT バレル部のモジュール . (左) バレル部モジュールの写真 . (右) バレル部モジュールの概要図 [3] .



図 1.15: SCT エンドキャップ部モジュールの写真 [3] .

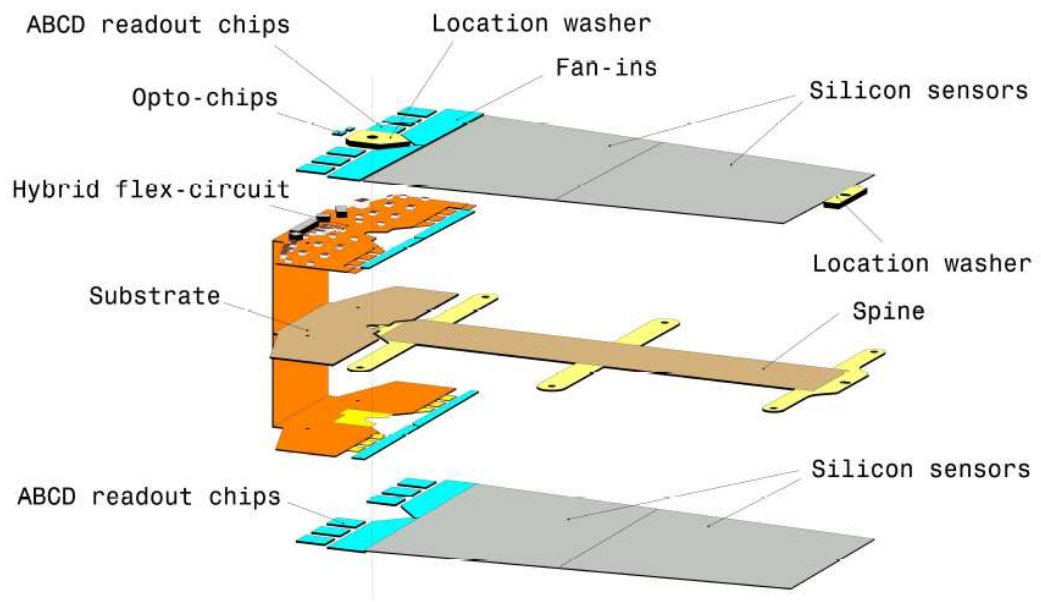


図 1.16: SCT エンドキャップ部モジュールの概要図 [3] .

- 遷移輻射検出器 (TRT)

TRT は，内部飛跡検出器の中で最も最外層に位置する，ストロー型のガスチューブ検出器である．細いカーボンファイバー製のドリフトチューブが多層並べられており，そのチューブの中にガスが充填され，中心には直径 $30\mu\text{m}$ の金メッキされたタングステン製の読み出しワイヤーが張られている．ガスの組成は，Xe が 70%， CO_2 が 27%， O_2 が 3% となっている．各ストローチューブで電離電子のドリフト時間を測定することで $130\mu\text{m}$ 程度の位置分解能を得る．また，飛跡検出だけでなく，遷移輻射を用いて，電子とその他の荷電粒子 (π 中間子など) の識別も行っている．

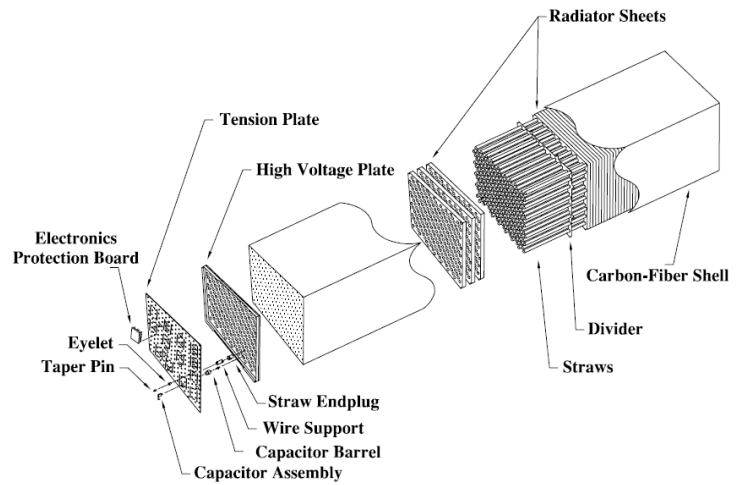
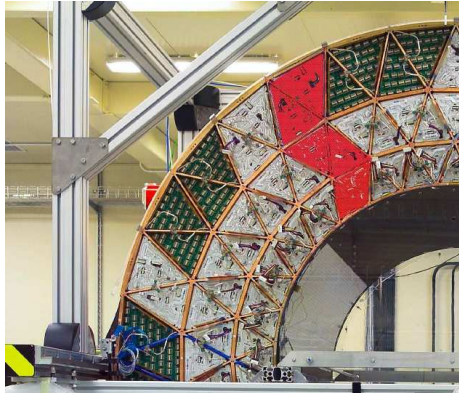


図 1.17: TRT 検出器バレル部．(左)TRT 検出器バレル部の断面，(右)TRT 検出器バレル部モジュールの構造 [3]．

1.2.5 カロリメータ

カロリメータは粒子の識別やエネルギーの測定を行う。ATLAS 検出器では、超電導ソレノイドの外側に、電磁カロリメータとハドロンカロリメータが設置されている。電磁カロリメータでは電子や光子、ハドロンカロリメータではハドロンのエネルギーをそれぞれ測定する。カロリメータの全体図をを図 1.18 に示す。

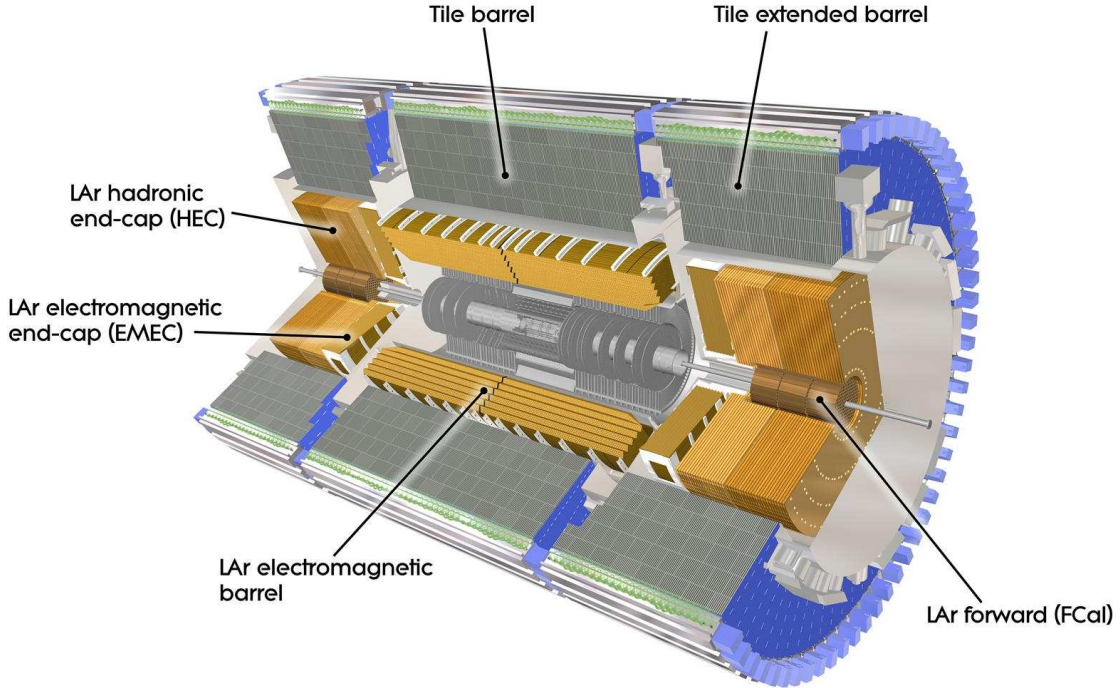


図 1.18: カロリメータの全体図 . [3]

- 電磁カロリメータ

電磁カロリメータは鉛の吸収体と液体アルゴンで構成され、 $|\eta| < 3.2$ をカバーする。吸収体の鉛は、読み出しスピードが速くデットスペースが少ないアコーディオン構造を取っている。

- ハドロンカロリメータ

ハドロンカロリメータは、バレル部に鉄とシンチレータをタイル状に並べたタイルカロリメータ、エンドキャップ部に液体アルゴンカロリメータが設置される。液体アルゴンカロリメータは、銅と液体アルゴンによるものとタンゲステンと液体アルゴンによるものがある。

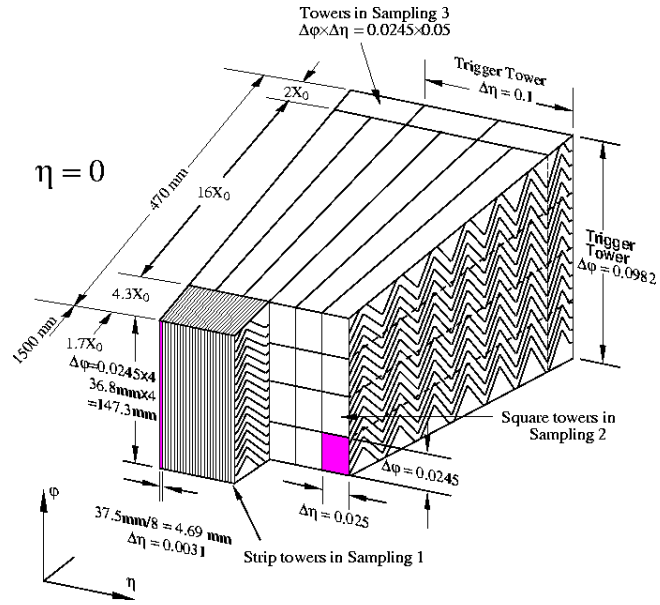


図 1.19: 電磁カロリメータ. (左) 電磁カロリメータのアコーディオン構造, (右) 電磁カロリメータのパレル部概要図 [3].

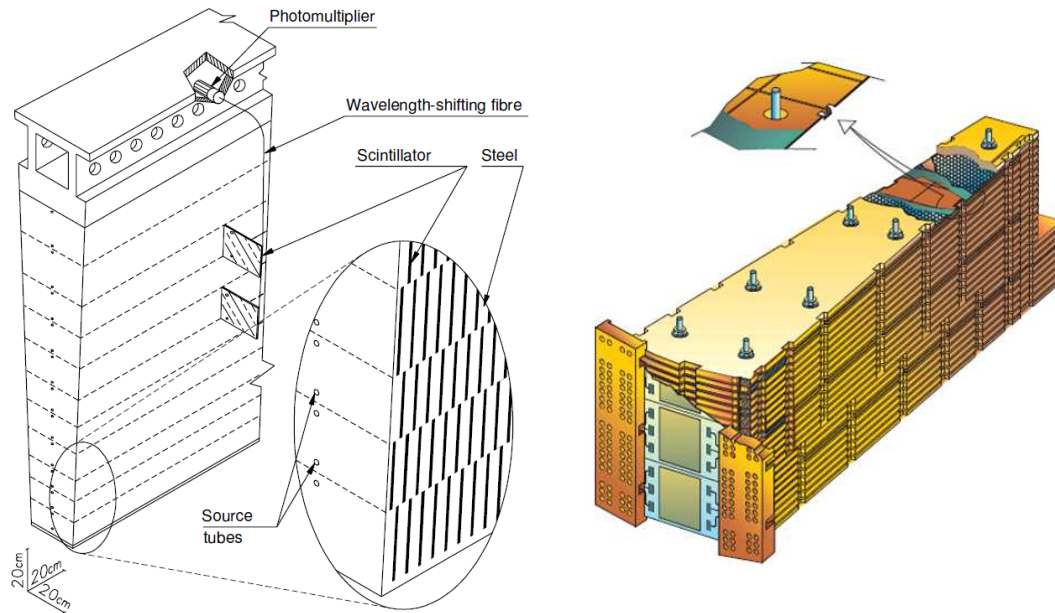


図 1.20: ハドロンカロリメータ. (左) パレル部にあるタイルカロリメータの概要図, (右) エンドキャップ部のハドロンカロリメータ HEC のモジュール [3].

1.2.6 ミューオン検出器

ミューオン検出器はミューオンの位置や運動量などを測定する，最も外側に設置された検出器である．ATLAS 検出器では，内部の検出器をすべて透過するミューオンをミューオン検出器により検出する．図 1.21 のように，運動量測定のための MDT(Monitored Drift Chamber)，CSC(Cathode Strip Chamber)と，トリガー信号生成のための RPC(Resistive Plate Chamber)，TGC(Thin Gap Chamber) から構成されている．

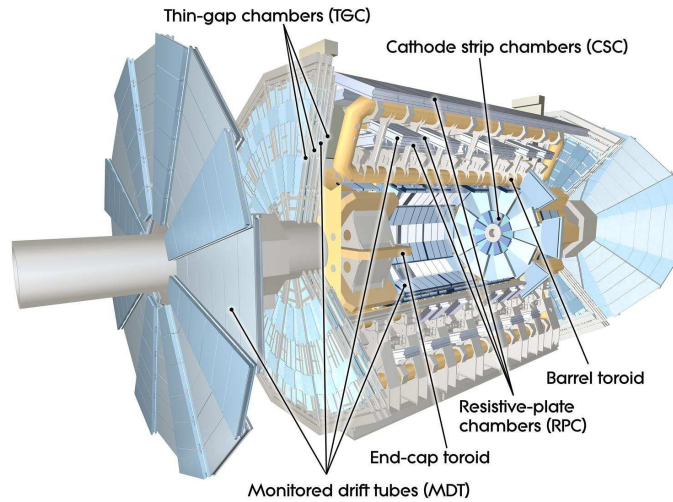


図 1.21: ミューオン検出器の全体図 [8] .

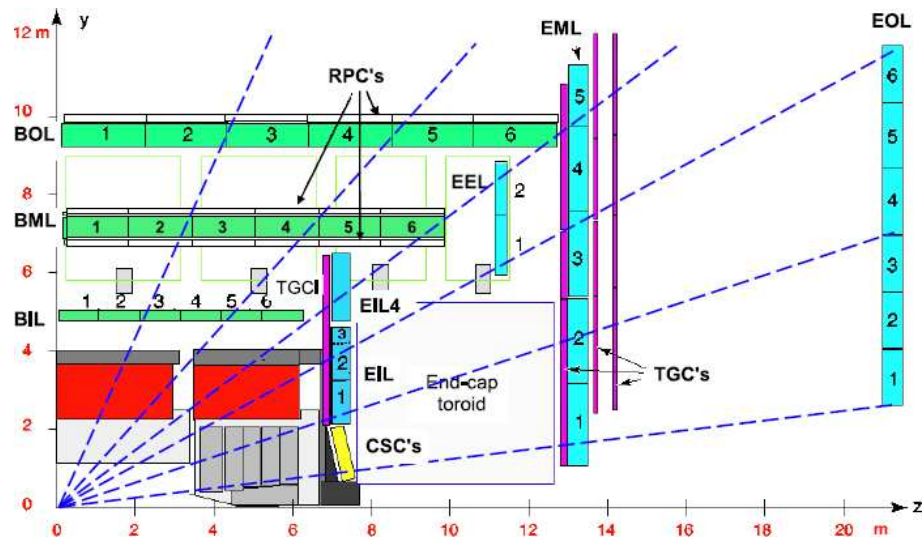


図 1.22: y - z 平面におけるミューオン検出器の各要素の配置図 [3] .

MDTは図 1.23 のように、厚さ $400\mu\text{m}$ 直径 30mm のアルミニウム製のドリフトチューブを積層したもので、チューブの中心には直径 $50\mu\text{m}$ の金メッキされたワイヤーが張られている。MDTは ATLAS のエンドキャップ部分 (Big wheel) 及び円筒部分に 3 層に渡って設置されている。カバー領域は、 $|\eta| < 2.0$ である。

$2.0 < |\eta| < 2.7$ の放射線強度の高い前後方部には CSC が設置されている。CSC には 4 層のガス電離層 ($\text{Ar}:\text{CO}_2:\text{CF}_4=3:5:2$) があり、その中央にはアノードワイヤーが 2.54mm 間隔で密に張られ、カソード部には、 5.6mm 間隔で読み出し用ストリップが取り付けられている。位置分解能は、MDT が $80\mu\text{m}$ 、CSC が $60\mu\text{m}$ を達成している。

RPC はトリガー用検出器で、2 枚の平行板を用いたガスチェンバーであり、 $|\eta| < 1.0$ のバレル部をカバーする。電離層に用いられる気体の組成は、 $\text{C}_2\text{H}_2\text{F}_4 : \text{isoC}_4\text{H}_{10} : \text{SF}_6 = 94.7 : 5 : 0.3$ である。また、位置分解能は 1cm である。

TGC は、 $1.05 < |\eta| < 2.4$ のエンドキャップ部に設置される薄型マルチワイヤー比例計数検出器である。電離層には、 $\text{CO}_2 : n\text{-C}_5\text{H}_{12} = 55 : 45$ で組成された気体を用いられる。

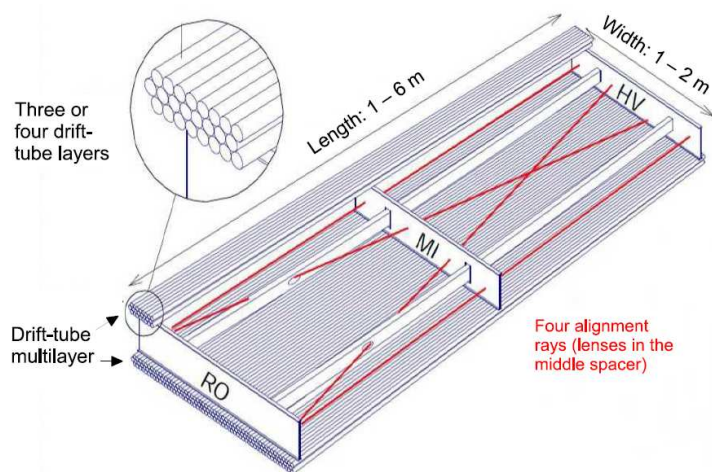


図 1.24: TGC 検出器の写真 [8] .

図 1.23: MDT モジュールの概要図 [3] .

1.2.7 電磁石

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，内部飛跡検出器を覆うように設置され，荷電粒子の運動量測定に利用されている．トロイド磁石はミュオン検出器付近に設置され，ミュオン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，内部飛跡検出器に 2T の磁場をかけている．この磁場による荷電粒子の曲率から，運動量を測定する．



図 1.25: ソレノイド磁石の写真 [8] .

- トロイド磁石

バレル部のトロイド磁石は図 1.27 のように配置されている．8 個の超電導空芯コイルがビーム軸回りに対称に配置され，ビーム軸に巻きつく方向に磁場を形成する．そのため，荷電粒子は前方にも曲がる．大きさは，内径 9.4m，外径 20m，全長 26m である．エンドキャップ部には 5m 長のコイル 8 個がバレル部の両外側に配置される．

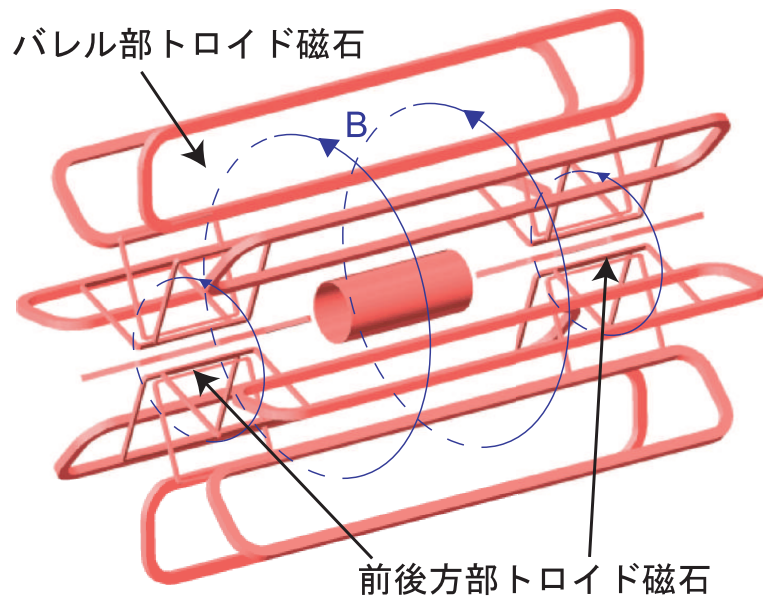


図 1.26: トロイド磁石の概要図と磁場の様子 [1].

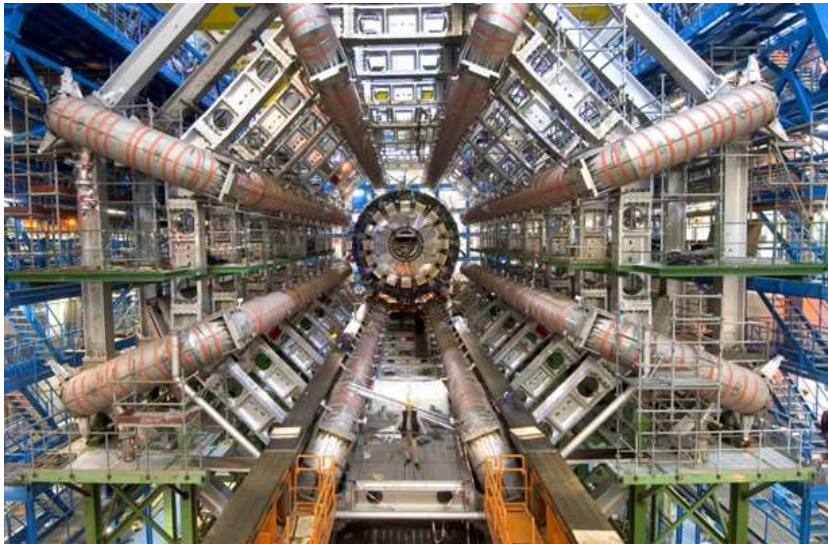
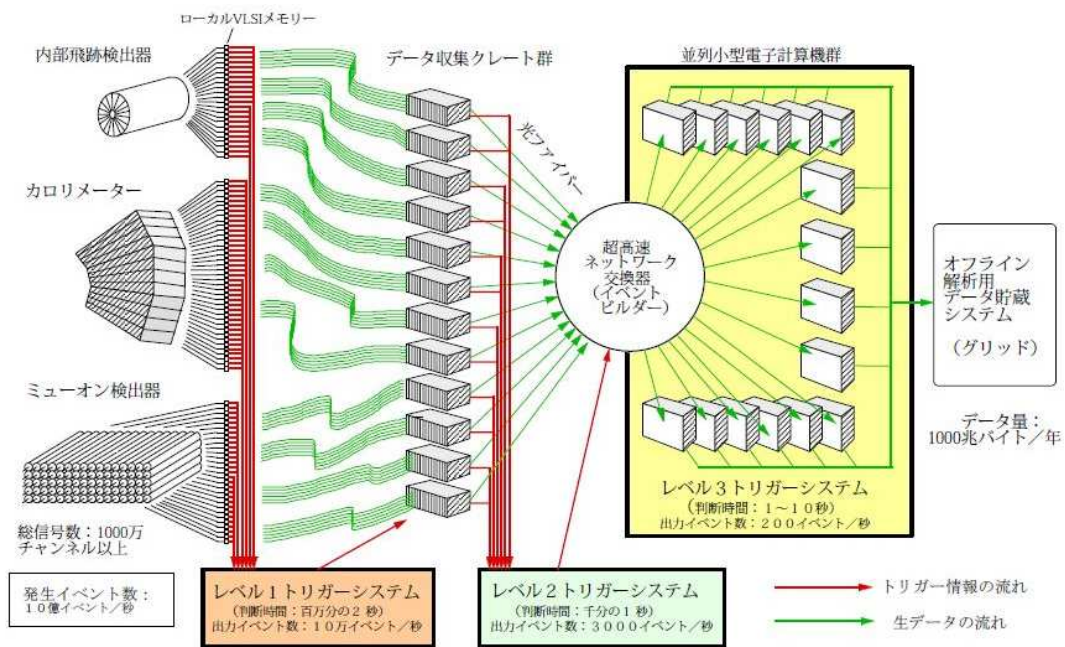


図 1.27: エンドキャップ側から見たバレル部トロイド磁石の写真 [8].

1.2.8 トリガーシステム

LHC 加速器では、バンチ衝突間隔は 40MHz(25ns) で、1 度の衝突ごとに約 24 個の陽子衝突が起こる。そのため、ATLAS 検出器の陽子陽子衝突の頻度は 1GHz に達するが、その膨大なイベント全てを保存することは出来ない。よって、データ収集の前に重要なイベントを選び取ることが必要になる。その選別を行うために、ATLAS 実験では 3 つのトリガーシステムを用いている。図 1.28 にトリガーシステムの概要を示す。

- LEVEL 1 トリガー
カロリメータとミュオントリガー検出器からの信号を元に、CTP(Central Trigger Processor) が選別を行う。CTP から送られる LEVEL 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。そのとき、トリガー信号と共に、トリガー信号を生成した領域 ROI(Regions Of Interest) の情報も送られる。この段階でイベントレートは 75kHz まで落とされる。
- LEVEL 2 トリガー
カロリメータ、ミュオン検出器、内部飛跡検出器の位置情報を組み合わせることにより、精度の高い処理を行う。それと共に、LEVEL 1 トリガーによって与えられた ROI のデータから注目する検出器の領域を絞ることにより、短時間での選別を行う。この段階でイベントレートは数 kHz まで落とされ、LEVEL 2 トリガー信号は、DFM(Data Flow Manager) に送られる。
- イベントフィルター
すべての検出器からの情報を元に最終的な選別が行われる。イベントレートは 100Hz 程度にまで落とされる。



アトラス実験に使われるオンラインデータ収集法とトリガー

図 1.28: トリガーシステムの概要 [5] .

第2章 ATLASソフトウェア

2.1 ソフトウェアチェーン

ATLAS ソフトウェアでのデータの流りは図 2.1 のようになっている。

- イベント生成 (Event Generation)
物理事象 (Higgs, SUSY 等) を生成するイベントジェネレーターを用いて衝突点での粒子を生成する。
- 検出器シミュレーション (Detector Simulation)
生成された粒子を検出器中を走らせ、物質との反応や粒子の崩壊などをシミュレーションする。この段階では物質を通過した時刻、位置、エネルギー損失がデータとして保存される。
- 検出器応答シミュレーション (Digitization)
通過時刻、位置、エネルギー損失などのヒット情報を元に、検出器がどのような信号で応答するか (信号の発生時間や大きさなど) をシミュレーションする。その計算結果は RDO(Raw Data Object) または Digit と呼ばれる。
- 再構成 (Reconstruction)
Digit データや Byte Stream と呼ばれる実データを元に、粒子の飛跡、運動量、エネルギーを再構成し粒子識別を行なう。その結果を ESD(Event Summary Data) として保存する。また、解析のための物理情報を集約した AOD(Analysis Object Data) も同時に生成する。
- 解析 (Analysis)
最終的なデータを元に、ROOT で扱える ntuple やヒストグラムを生成する。

最終的なデータは主に次の 3 種類である。本研究では、シミュレーションサンプルとして、ESD データから取り出した飛跡の情報を用いる。

- AOD : 物理解析用データ。基本的に Athena を使って読む。
- ESD : AOD より詳細な検出器情報を持ったデータ。基本的に Athena を使って読む。
- DPD : 物理解析用データ (Derived Physics Data)。これが主流になりつつある。基本的に ROOT を使って読む。

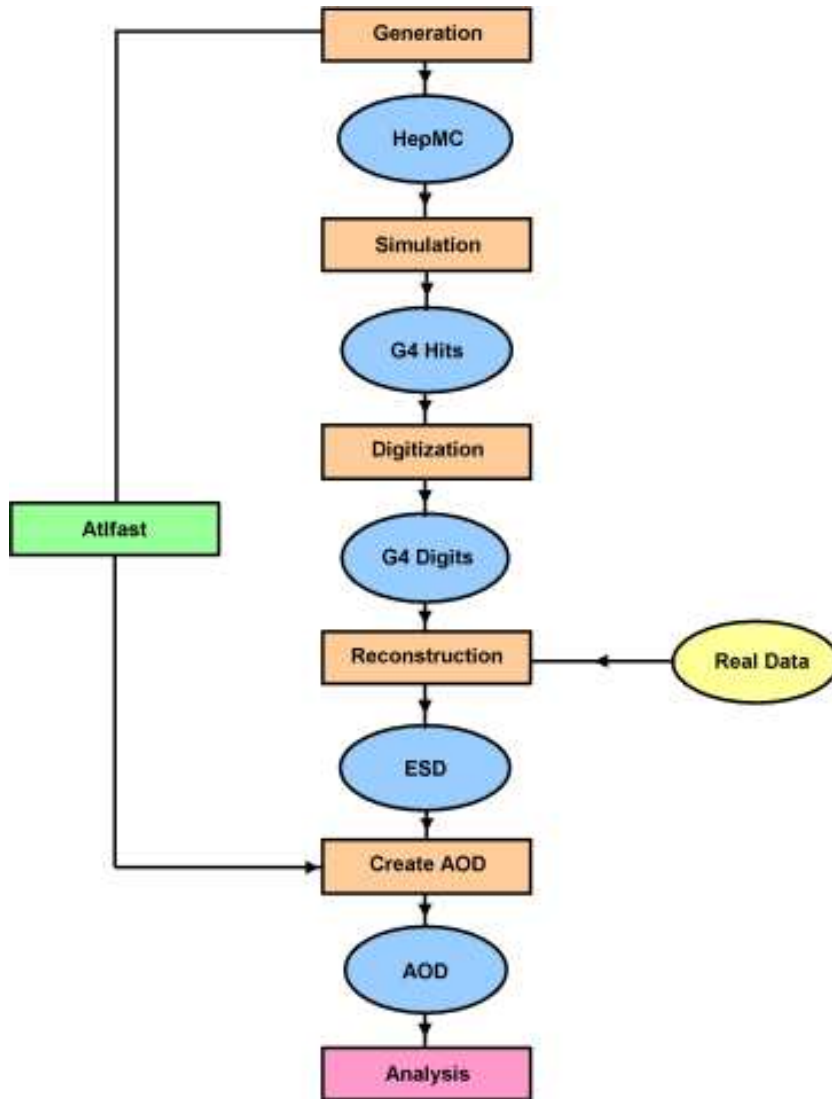


図 2.1: ATLAS ソフトウェアでのデータの流れ. 四角で囲まれた部分が実行を表し, 長円で囲まれた部分がデータを表す. [7]

Simulation Data Flow

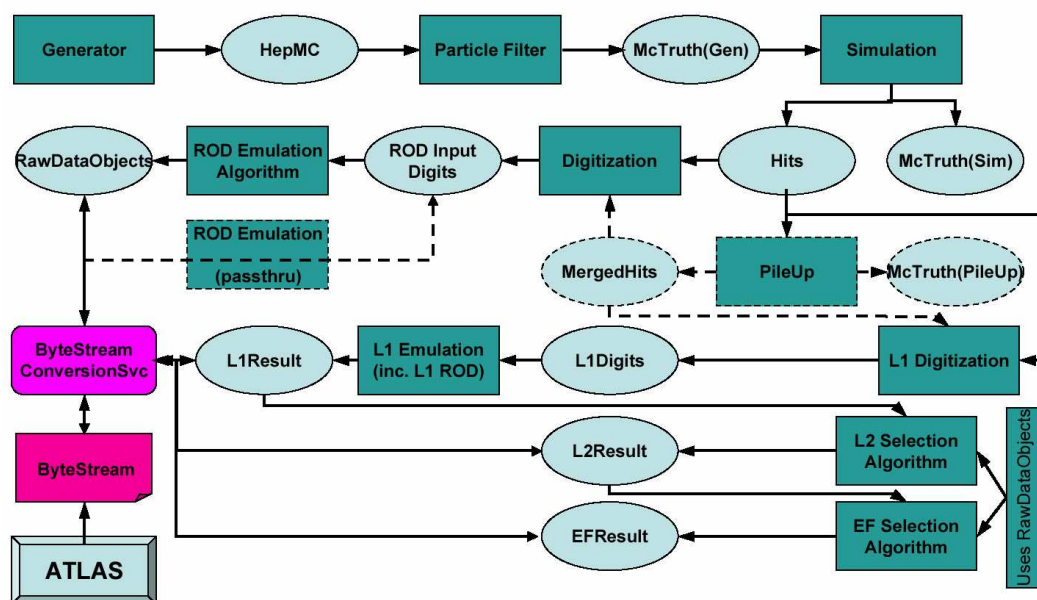


図 2.2: シミュレーションサンプル作成の流れ [5]

第3章 光子コンバージョン事象を用いた内部 飛跡検出器の物質質量評価

ATLAS 検出器においてエネルギーや運動量を精密に測定するためには，検出器内の物質の評価が重要となる．そこで，光子が物質を通過するときに電子・陽電子対にコンバージョンするという事象を利用する．光子コンバージョンが起きた位置は物質が存在する位置に相当するので，コンバージョン点を再構成することが出来れば，検出器の物質質量分布を知ることが出来る．

本研究では，ATLAS 検出器のフルシミュレーションにより作成されたシミュレーションサンプル (Single Photon, Minimum Bias) と実際に ATLAS 検出器で測定された重心系エネルギー 7 TeV の実データにおいて，光子コンバージョン事象の再構成を行った．

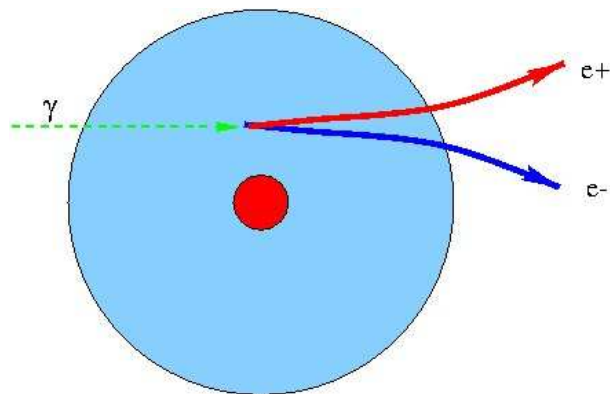


図 3.1: 光子コンバージョン．原子核の近傍を通過する光子から電子と陽電子が対生成する様子． [9]

3.1 光子コンバージョン

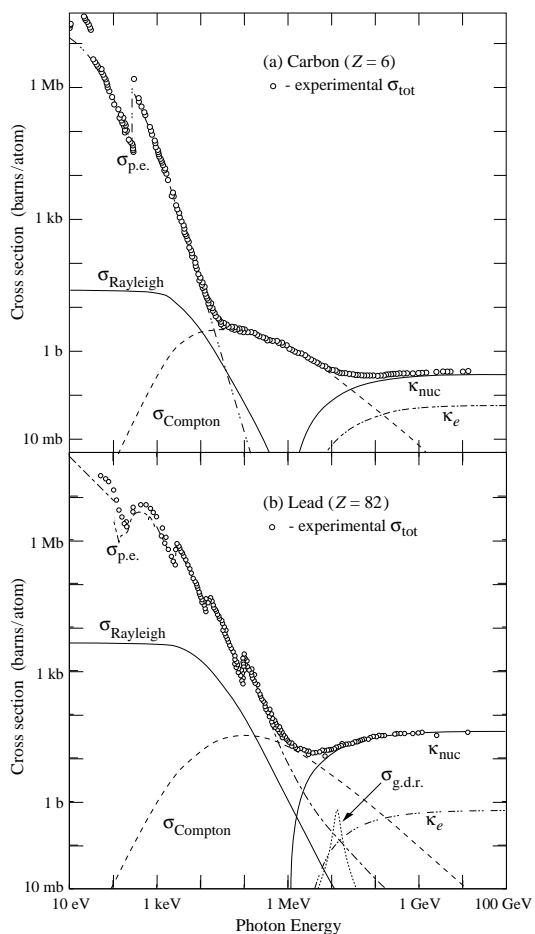


図 3.2: 光子の断面積 [10]. 次のような様々な事象によるものである.

$\sigma_{p.e}$: 光電効果

$\sigma_{Rayleigh}$: レイリー散乱

$\sigma_{Compton}$: コンプトン散乱

κ_{nuc} : 電子対生成 (原子核磁場中)

κ_e : 電子対生成 (電子磁場中)

光子コンバージョンは、図 3.1 のように、高エネルギーの光子が原子核の近傍を通過したときに、光子が原子核や電子の作る電場の影響で、電子と陽電子の対を生成し、自分は消滅する現象である。これは、光子のエネルギーが電子の質量エネルギーの 2 倍 (1.022 MeV) 以上のときに起こり得る。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、断面積はほぼ Z の二乗に比例し、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、質量数 A 、アボガドロ数 N を用いて式 (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。

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

ここで、radiation length X_0 は、Y.S. Tsai によって計算され、式 (3.3) のように書ける。

$$\frac{1}{X_0} = 4 \alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} Z^2 [L_{rad} - f(Z)] + Z L'_{rad} \quad (3.3)$$

これより、 $A = 1 \text{ g mol}^{-1}$ のとき、 $4 \alpha r_e^2 N_A / A = (716.408 \text{ g cm}^{-2})^{-1}$ となる。ここで、 $f(Z)$ は無限和で、4 項目まで書くと式 (3.4) のようになる。

$$f(Z) = a^2 [(1 + a^2)^{-1} + 0.20206 - 0.0369 a^2 + 0.0083 a^4 - 0.002 a^6] \quad (3.4)$$

ここで、 $a = \alpha Z$ である。また、 L_{rad} と L'_{rad} は、表 3.1 のように与えられる。

Element	Z	L_{rad}	L'_{rad}
H	1	5.31	6.144
He	2	4.79	5.621
Li	3	4.74	5.805
Be	4	4.71	5.924
Others	> 4	$\ln(184.15 Z^{-1/3})$	$\ln(1194 Z^{-2/3})$

表 3.1: Tsai による L_{rad} と L'_{rad} の値 [10] .

しかし，式 (3.3) は少し複雑で， Z との相関が分かりづらい．Dahl はもっとシンプルな X_0 の式を，式 (3.5) のように表した．

$$X_0 = \frac{716.4 \text{ g cm}^{-2} A}{Z(Z+1)\ln(287/\sqrt{Z})} \quad (3.5)$$

式 (3.5) は，He 以外の元素において Tsai の値と 2.5 % 以下の誤差で一致する．

3.2 光子コンバージョン再構成方法

光子コンバージョン事象を再構成することは，光子コンバージョンにより生成された電子と陽電子のペアを見つけるということである．ここでは，多数の飛跡の中から，光子コンバージョンにより生成された電子と陽電子の特徴と一致するものを選び出す過程を説明する．

3.2.1 光子コンバージョン再構成方法概要

光子コンバージョンにより生成された荷電粒子の対は，以下の特徴を持つ．

- お互いの電荷が逆である．
- ある 1 点から生成し，ほぼ同方向に進行する．

これより，電荷が異なる且つ，2 つの粒子の飛跡の延長がある 1 点でほぼ平行に交わるものを探せば良いことが分かる．しかし，検出器の分解能を考えると，実際の飛跡と検出器で検出され再構成された飛跡は厳密には一致しない．そこで，実際に，“ある 1 点”ではなく，“ある程度近い場所”とする必要がある．ここで，光子コンバージョンから電子と陽電子が生成したと仮定したときに， $x-y$ 平面（動径方向成分）でのそれぞれが生成した位置の近さを表すパラメータとして， S を定義する．図 3.3 は，ある 2 つの粒子の $x-y$ 平面に射影した飛跡を延長したものである．運動する荷電粒子は，内部飛跡検出器を覆っているソレノイド磁石の磁場によって $x-y$ 平面において円運動をする．よって， $x-y$ 平面での荷電粒子の飛跡は図 3.3 のように曲率半径 $r[\text{m}]$ の円を描く．このとき， r は以下の式で表される．

$$r[\text{m}] = \frac{p_T[\text{GeV}/c]}{0.3 \times B[\text{T}]} \quad (3.6)$$

ここで， $p_T[\text{GeV}/c]$ は $x-y$ 平面での運動量， $B[\text{T}]$ は磁場である．粒子の飛跡を半径 $r[\text{m}]$ の円とみなしたときの，円の中心間の距離を L とすると，生成した位置の近さを表すパラメータ S は次式で表される．

$$S = L - r_+ - r_- \quad (3.7)$$

これより，2 つの円が交わるとき S は負，交わらないときは S は正となる．また， S 上で円の半径の比で内分した点を $x-y$ 平面でのコンバージョン点候補とする．

$x - y$ 平面での粒子の生成点間の距離の指標として S を定義したが, $y - z$ 平面でも同様に粒子の生成点間の距離を考える必要がある. そこで, $x - y$ 平面でのコンバージョン点候補に最も近い飛跡上の点の z 成分を 2 つの粒子に関してそれぞれ求め, その 2 点間の距離を dz とする. また, その 2 点間の中心をコンバージョン点候補の z 成分とする.

このように, 光子コンバージョンにより生成された電子と陽電子らしい飛跡の条件を付けていき, 選択することにより, 光子コンバージョンによる飛跡を取り出し, コンバージョン点を再構成する.

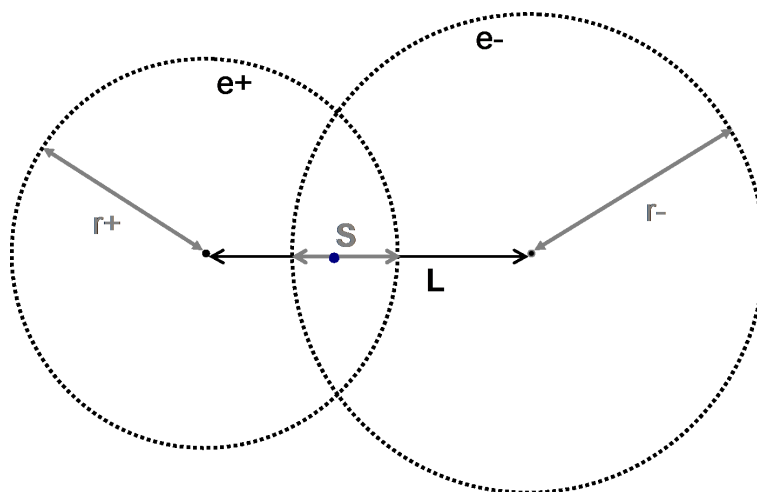


図 3.3: S の定義. 光子コンバージョンにより生成された電子, 陽電子対の飛跡を延長し, その 2 本の飛跡が平行になる位置での飛跡間の距離が S の絶対値となる [1].

3.2.2 事象選択

光子コンバージョン再構成のための事象選択としては，次のものを採用した．

- χ^2/Ndf
飛跡再構成の精度を要求する．
- 電荷が逆の 2 つの粒子
光子コンバージョンにより生成される粒子は電子と陽電子であるので，電荷の符号が違う 2 つの飛跡のペアを取り出す．
- $|\Delta\cot\theta| \sim 0$
光子コンバージョンでは，生成された位置での電子対の飛跡のなす角は小さい (ほぼ平行)．これより，コンバージョン点における 2 つの飛跡の θ (ビーム軸と飛跡のなす角度) の差が小さいことを要求する．
- $S \sim 0$
x-y 平面においてある 1 点から生成していると思われる飛跡対を選ぶ．前節で定義した S が小さいことを要求する．
- $\Delta Z \sim 0$
y-z 平面においてある 1 点から生成していると思われる飛跡対を選ぶ．前節で定義した ΔZ が小さいことを要求する．
- $TrtHTHit/TrtHit > 0$ (minimum bias の場合)
 $TrtHit$ は TRT 検出器におけるヒットの数で， $TrtHTHit$ (TRT High Threshold) は電子による遷移輻射からの大きな信号を記録したヒット数である．電子以外の粒子も存在する Minimum Bias において，飛跡が電子のものであるために， $TrtHTHit/TrtHit$ が 0 でないことを要求する．

3.3 Single Photon 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．光子のエネルギーが $E=25$ GeV, 75 GeV のイベントを用いてそれぞれ再構成を行い，再構成効率を評価する．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，光子コンバージョンにより生成した 2 粒子の横方向運動量 P_t 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，内部飛跡検出器がカバーする領域は $|\eta| < 2.5$ であるため，真のコンバージョン点が $|\eta| < 2.1$ であるイベントを選択する．

3.3.1 事象選択

事象選択は次の順に行う．

1. 電荷が逆の 2 つの粒子
2. χ^2/Ndf
3. $|\Delta\cot\theta|$
4. S
5. ΔZ

まず，電荷が逆の 2 つの粒子を選択して，その選択後に χ^2/Ndf のヒストグラムを見てカット値を決定し，そのカット後に $|\Delta\cot\theta|$ のヒストグラムを見てカット値を決めて，という流れで選択を行う．ここで，検出器のヒット数に応じて分解能が変わってくるので，(ヒット数が少なくなるとトラッキングの精度が悪くなる) $|\Delta\cot\theta|$, S, ΔZ に関しては，検出器のヒット数に応じて，以下のように 5 種類に場合分けし，それぞれカット値を決める．

- pixel hit = 0
 - SCT hit ≤ 11
 - $11 < \text{SCT hit} \leq 15$
 - SCT hit > 15
- pixel hit = 1, 2
- pixel hit ≥ 3

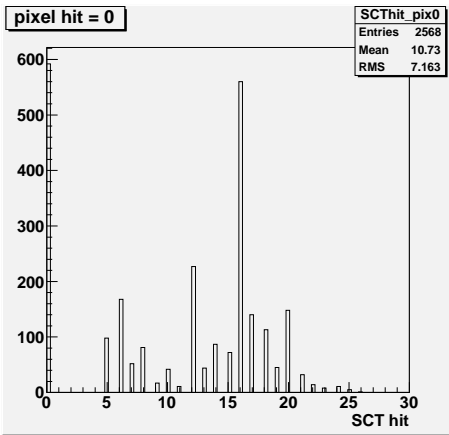


図 3.4: Single Photon ($E=25$ GeV) のときの, SCT hit 数 (2つのトラックの合計) 分布の一例. barrel 部の SCT 検出器は, 4層により構成されている. 1モジュールにつき 2枚のシリコンセンサーが重ね合わされているので, 2つのトラックが全ての層で検出されれば, SCT hit = 16 となる. 16より多いものが存在しているのは, 隣り合わさったセンサー部が重なった場所を通過したトラックが 1層につき 4回検出されてしまったためである.

カットパラメータ χ^2/Ndf , $|\Delta\cot\theta|$, S , ΔZ のヒストグラムを以下に示す.

- χ^2/Ndf

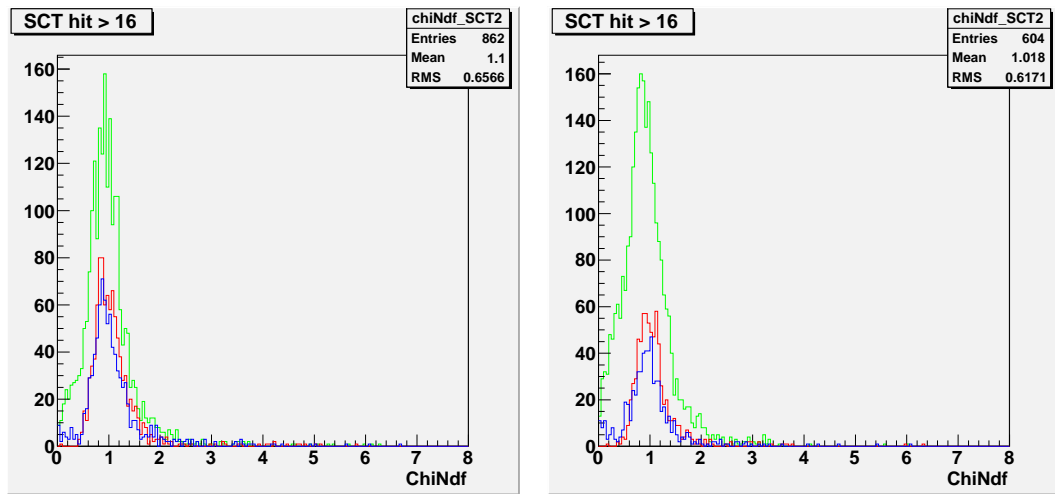
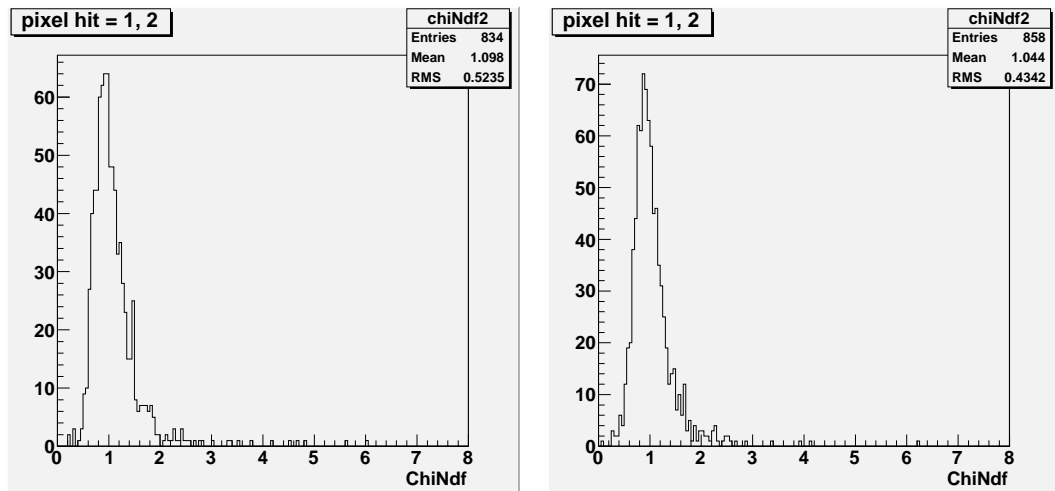


図 3.5: χ^2/Ndf 分布 (pixel hit = 0) . (左)E=25GeV (右)75GeV . SCT hit がある場合で , 赤: SCT hit ≤ 11 , 青: $11 < \text{SCT hit} \leq 15$, 緑: SCT hit > 15 とした .



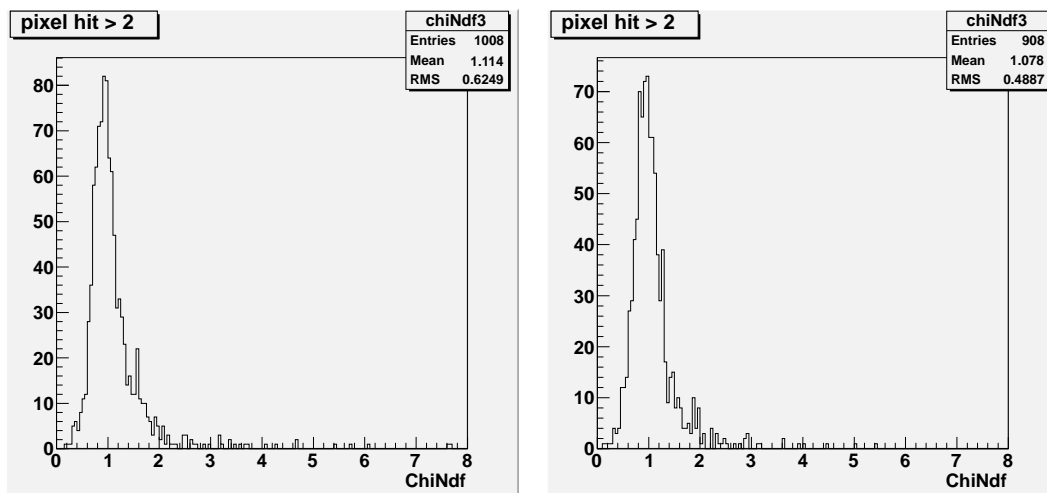
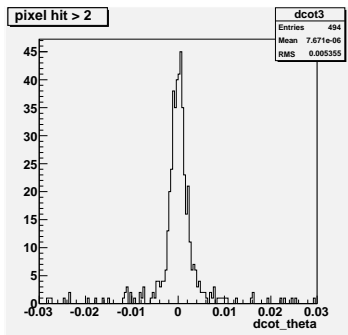
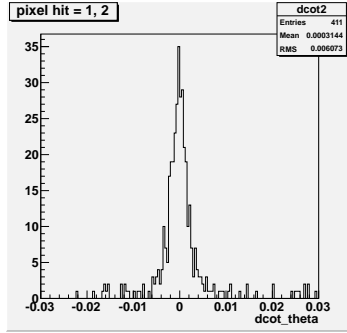
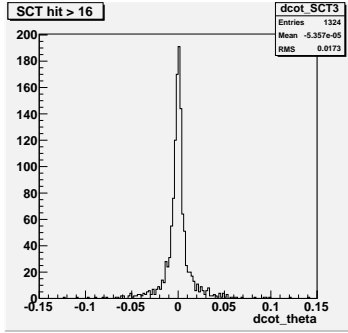
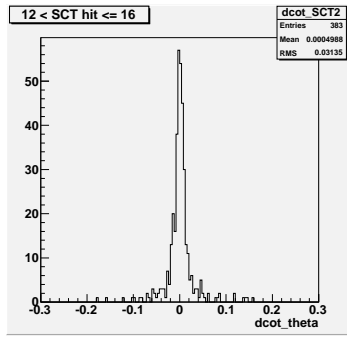
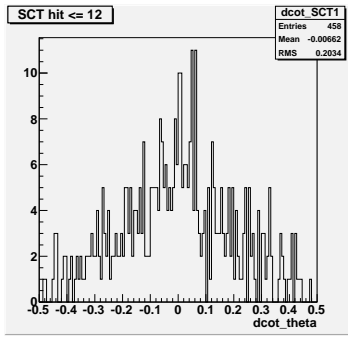
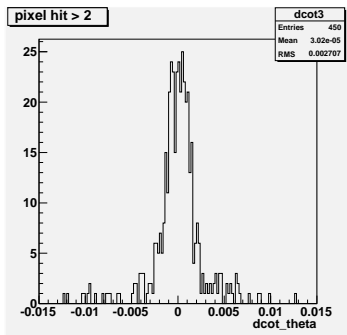
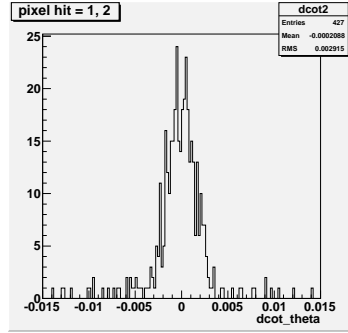
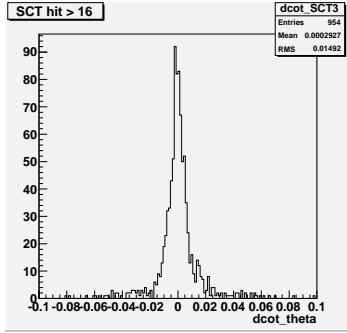
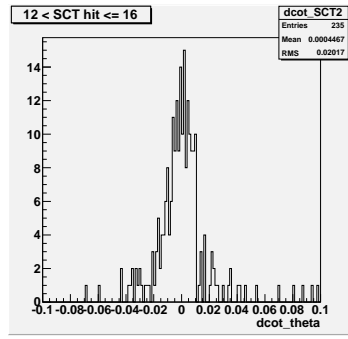
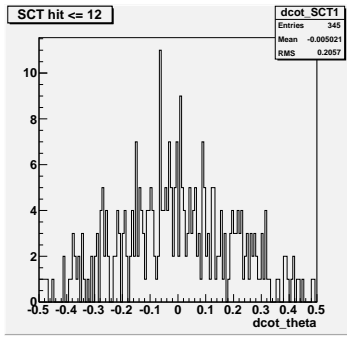


図 3.6: χ^2/Ndf 分布 (pixel hit > 0) . (左)E=25GeV (右)75GeV . 上段は , pixel hit = 1 , 2 の場合 . 下段は , pixel hit ≥ 3 の場合 .



☒ 3.7: $\Delta\cot\theta$ 分布 ($E=25\text{GeV}$) .



☒ 3.8: $\Delta\cot\theta$ 分布 ($E=75\text{GeV}$) .

• S

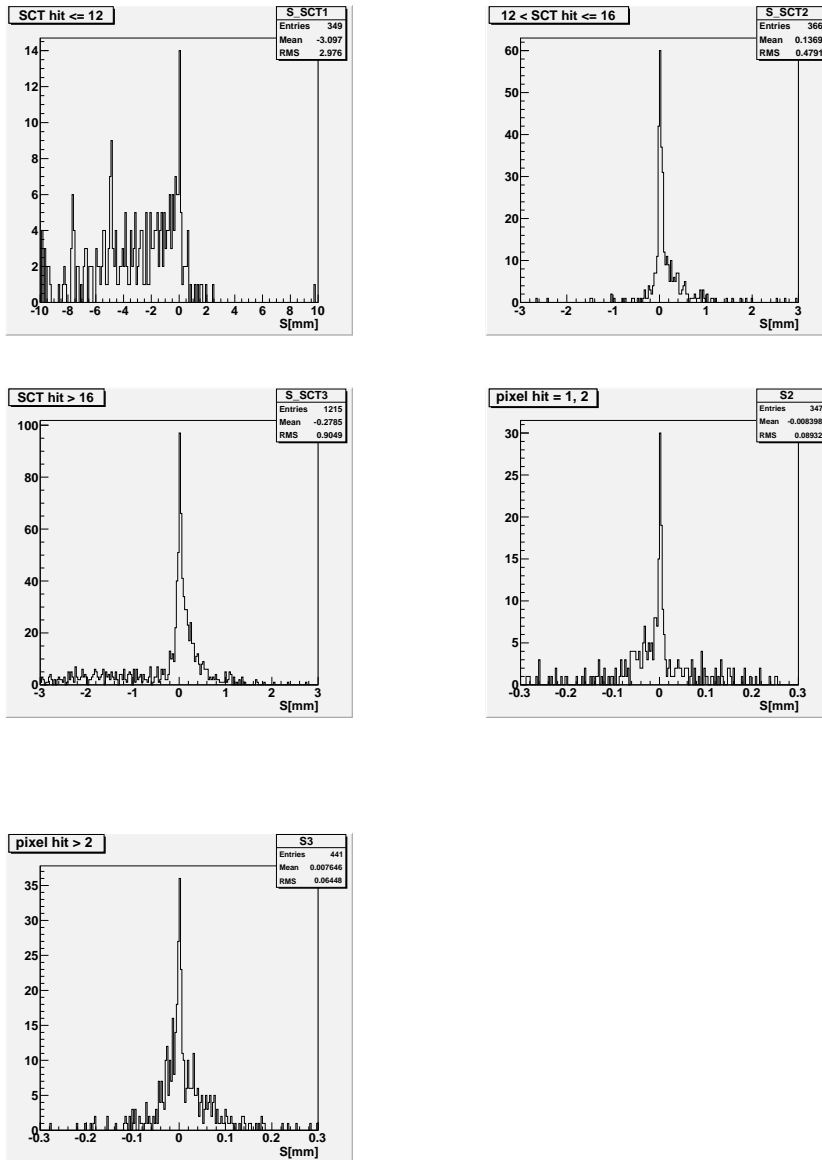
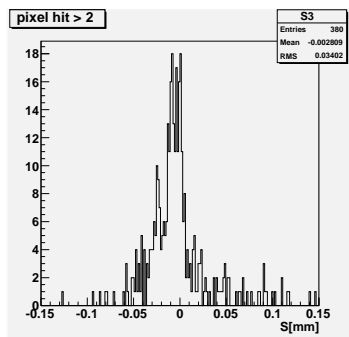
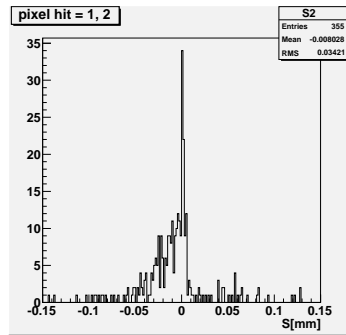
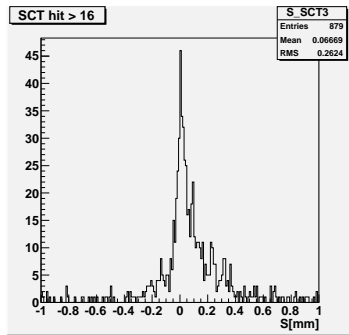
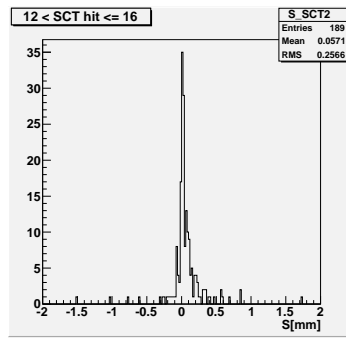
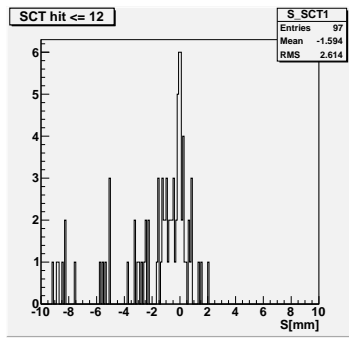


图 3.9: S 分布 ($E=25\text{GeV}$) .



☒ 3.10: S 分布 ($E=25\text{GeV}$) .

• ΔZ

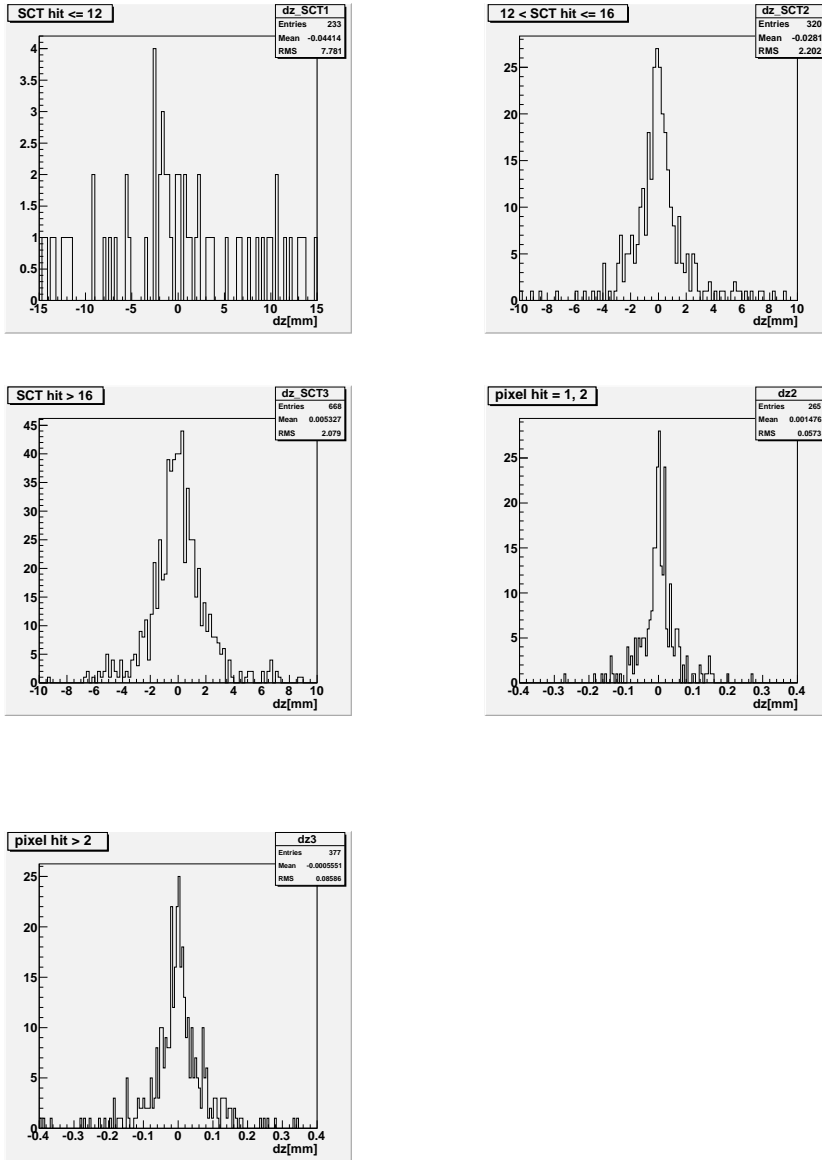


图 3.11: dz 分布 ($E=25\text{GeV}$) .

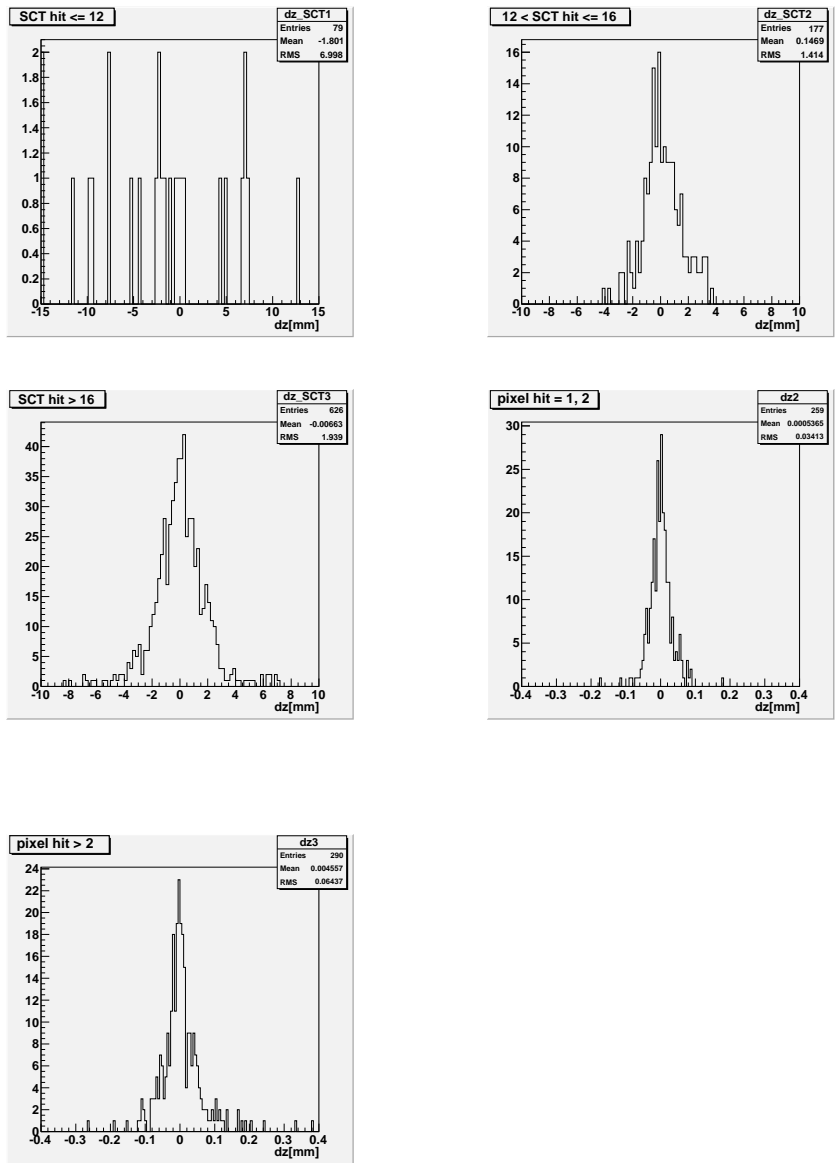


図 3.12: dz 分布 ($E=75\text{GeV}$) .

これらの分布から，事象選択に用いるパラメータ χ^2/Ndf , $|\Delta\cot\theta|$, S , ΔZ に関しての，具体的なカット値を，表 3.2 ($E=25\text{GeV}$) , のように決めた .

カットパラメータ		χ^2/Ndf	$ \Delta\cot\theta $	S [mm]	$ \Delta Z $ [mm]
pixel hit = 0	SCT hit ≤ 11	<4	<0.3	-6<S<4	<5
	11 < SCT hit ≤ 15		<0.1	-1<S<1	<4
	SCThit > 15		<0.05	-1<S<1	<4
pixel hit = 1, 2	<0.01		-0.2<S<0.2	<0.15	
pixel hit ≥ 3	<0.01		-0.1<S<0.1	<0.15	

表 3.2: Single Photon シミュレーションサンプルでのカット値 (E=25GeV)

カットパラメータ		χ^2/Ndf	$ \Delta\cot\theta $	S [mm]	$ \Delta Z $ [mm]
pixel hit = 0	SCT hit ≤ 11	<4	<0.07	-0.5<S<0.5	<10
	11 < SCT hit ≤ 15		<0.02	-0.1<S<0.4	<3
	SCThit > 15		<0.02	-0.1<S<0.3	<2.5
pixel hit = 1, 2	<0.004		-0.04<S<0.03	<0.1	
pixel hit ≥ 3	<0.004		-0.04<S<0.04	<0.1	

表 3.3: Single Photon シミュレーションサンプルでのカット値 (E=75GeV)

3.3.2 内部飛跡検出器の物質質量評価

表 3.2, 表 3.3 のカットをかけたときの動径方向のコンバージョン点分布を, 図 3.13 に示す. 黒線が再構成したコンバージョン点分布, 水色で塗られた部分が真のコンバージョン点分布である. イベント数で規格化を行った. また, y - z 平面における内部飛跡検出器の概略図を, 図 3.14 示す.

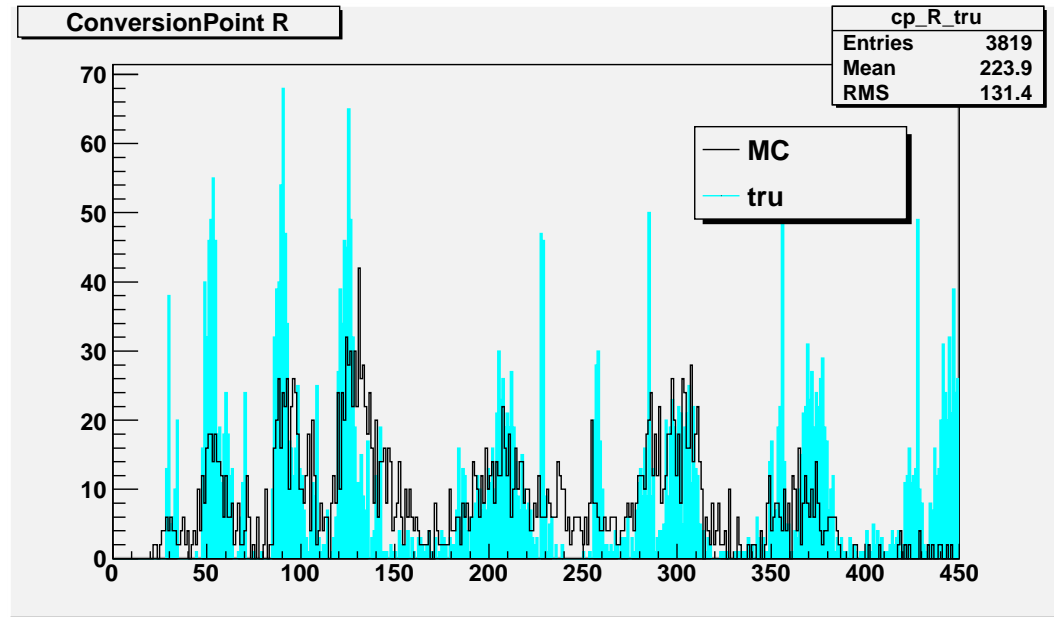


図 3.13 では, いくつかのピークが見られる. これはそこに物質質量が多く存在しているということである. 図 3.14 にあるように, 動径方向においては, $R = 34.3$ の位置にビームパイプが, $R = 50.5, 88.5, 122.5$ には pixel 検出器の層が, $R = 229$ には pixel 検出器を支えるチューブが, $R = 371, 443$ には SCT 検出器の層が設置されているが, コンバージョン点分布のピークの位置と一致していることが分かる.

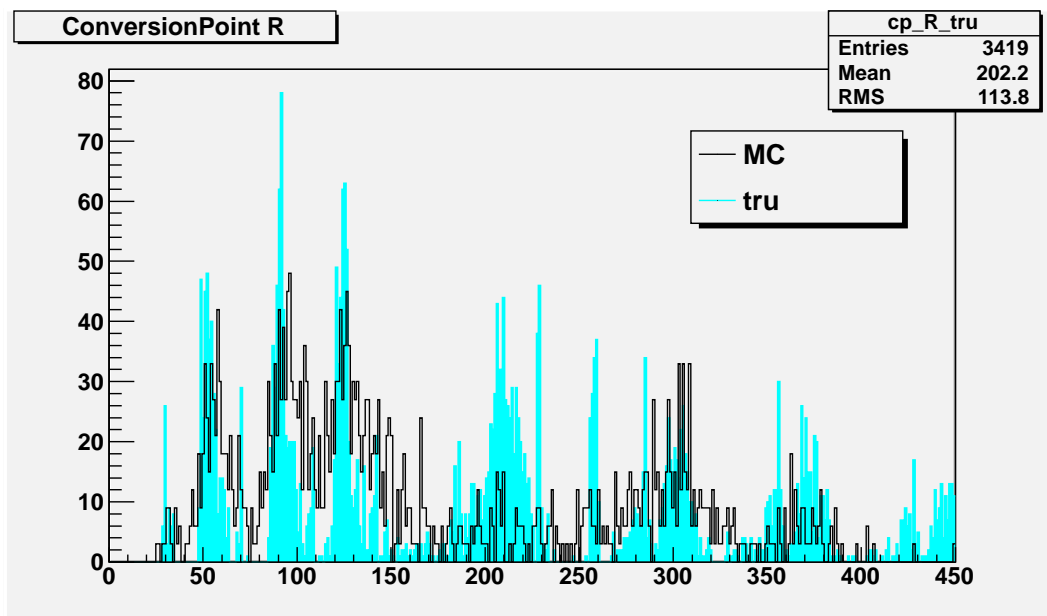


図 3.13: Single Photon サンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布 ($E=75\text{GeV}$) .
(上) $E=25\text{GeV}$, (下) $E=75\text{GeV}$.

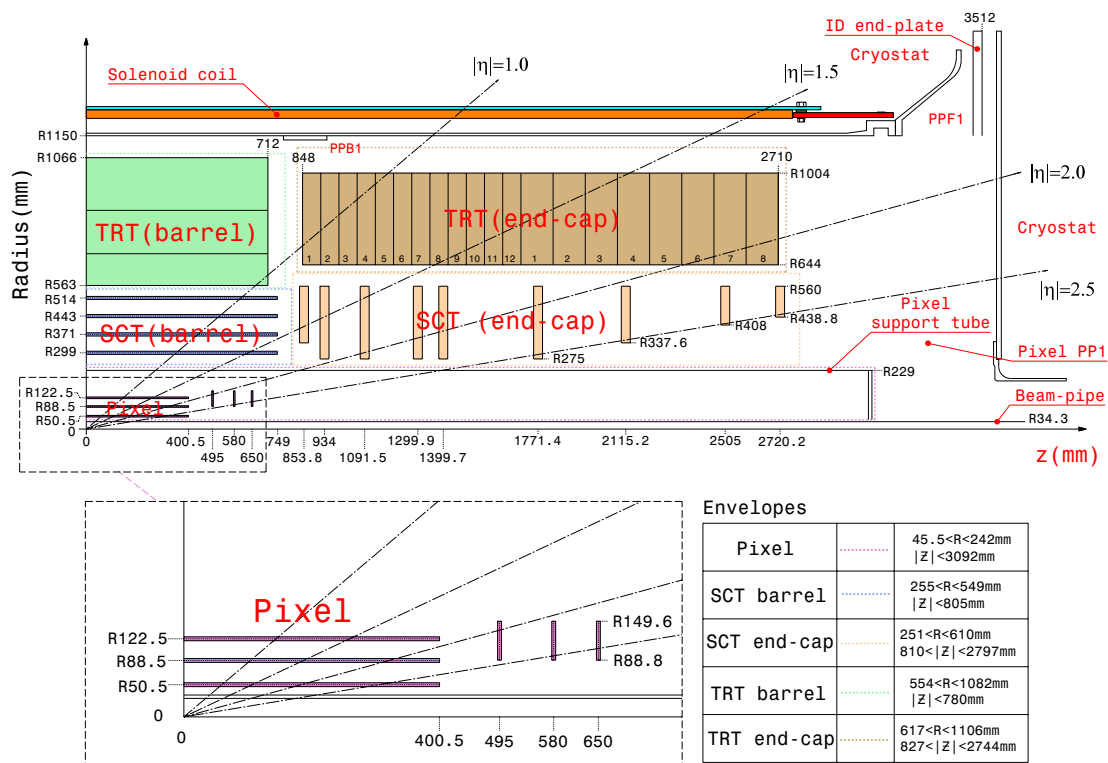


図 3.14: y-z 平面における内部飛跡検出器の概略図

3.4 Minimum Bias 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

3.4.1 事象選択

重心系エネルギー 7TeV の Minimum bias 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う。Minimum bias サンプルでは、電子以外の様々な荷電粒子も存在するため、電子と思われる飛跡を選択することが必要となる。そこで、TrtHtHit が電子の飛跡のヒット数とみなせることを利用して、TrtHtHit/TrtHit が 0 でないことを要求した。また、不変質量 $< 30(\text{MeV})$ であることも要求した。その上で、Single Photon のときに用いたパラメータ χ^2/Ndf , $|\Delta\cot\theta|$, S, ΔZ のヒストグラムを見て、それぞれにおけるカット値を決定し、事象選択を行った。TrtHtHit/TrtHit 分布を図 3.15 に、不変質量分布を図 3.16 に、そこから決定したカット値を、表 3.4 に示す。

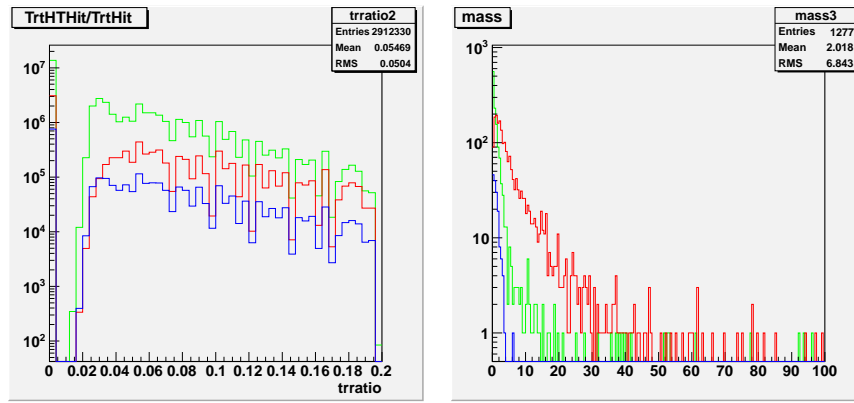


図 3.15: TrtHtHit/TrtHit 分布 . 図 3.16: 不変質量分布 . 赤: pixel hit = 0 , 青: pixel hit = 1 , 2 , 緑: pixel hit > 2 とした . 赤: pixel hit = 0 , 青: pixel hit = 1 , 2 , 緑: pixel hit > 2 とした .

カットパラメータ		χ^2/Ndf	TrtHtHit / TrtHit	$ \Delta\cot\theta $	S [mm]	$ \Delta Z $ [mm]
pixel hit = 0	SCT hit ≤ 12	< 4	< 0.02	< 0.3	$-2 < S < 2$	< 5
	$12 < \text{SCT hit} \leq 15$			< 0.1	$-1 < S < 2$	< 4
	SCT hit > 15			< 0.05	$-1 < S < 2$	< 3
pixel hit = 1 , 2		< 10		< 0.03	$-0.6 < S < 0.4$	< 0.2
pixel hit ≥ 3				< 0.01	$-0.2 < S < 0.1$	< 0.2

表 3.4: Minimum Bias シミュレーションサンプルでのカット値

3.4.2 内部飛跡検出器の物質評価

表 3.4 のカットをかけ、再構成した動径方向のコンバージョン点分布を、図 3.17 に示す。黒線が再構成したコンバージョン点分布、水色で塗られている部分が真のコンバージョン点分布である。イベント数で規格化を行った。また、 η の大きさによって場合分けしたときのコンバージョン点分布を、図 3.18, 図 3.19 図 3.20, に示す。

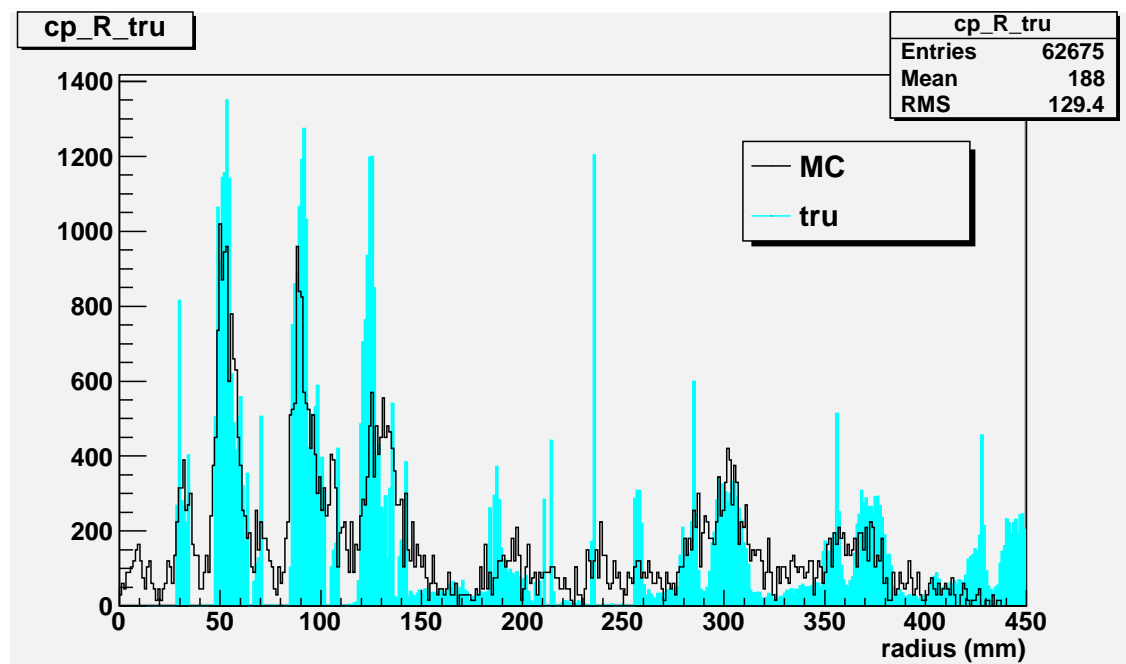


図 3.17: Minimum Bias シミュレーションサンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布

図 3.17 から、Minimum Bias シミュレーションサンプルにおいても、ビームパイプ、pixel 検出器の 3 層、pixel サポートチューブ、SCT 検出器の 1, 2 層目がピークとして見えていることが分かる。ここで、物質がないはずのビームパイプの内部にも再構成点が多く見られる。これは光子コンバージョンではなく、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。

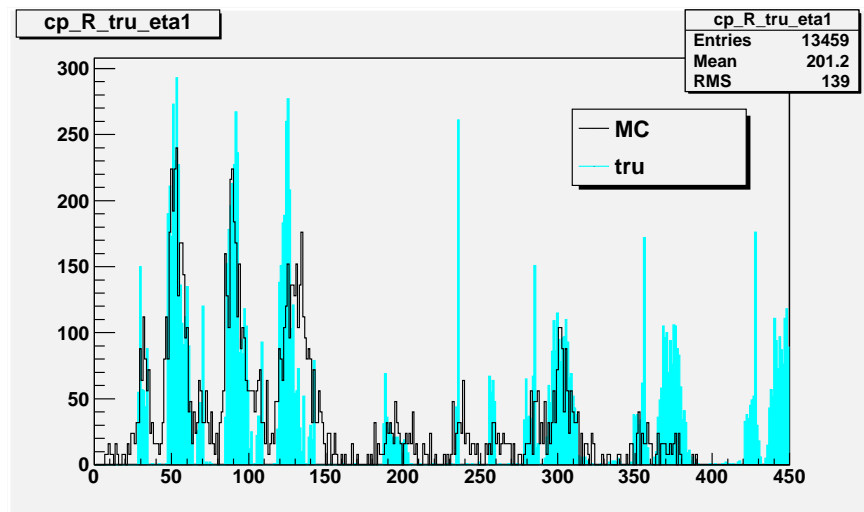


図 3.18: Minimum Bias サンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布 ($\eta < 0.7$)

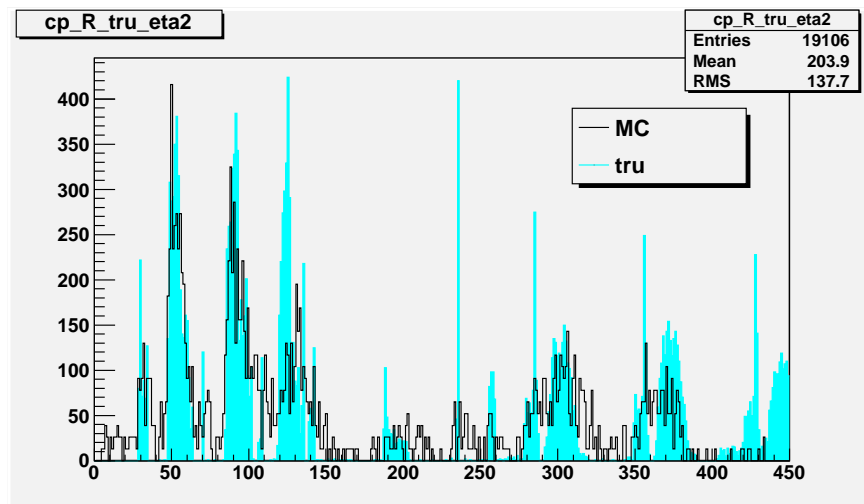


図 3.19: Minimum Bias サンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布 ($0.7 < \eta < 1.2$)

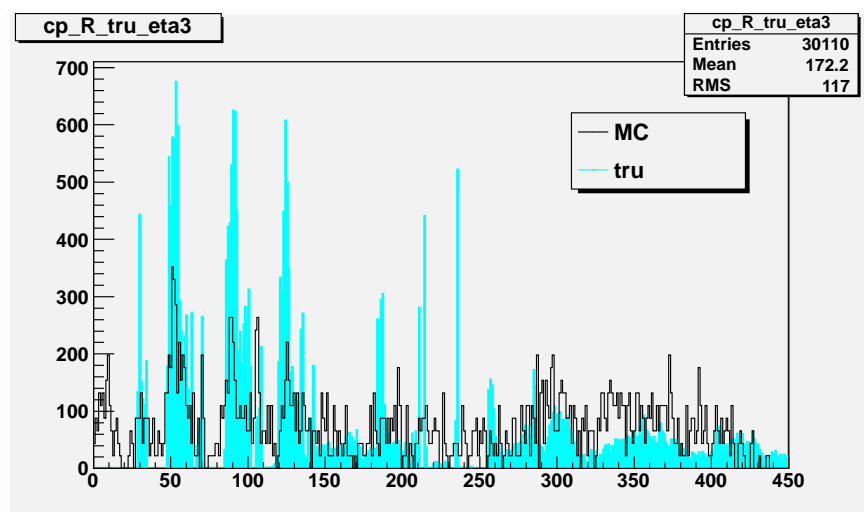


図 3.20: Minimum Bias サンプルにおける動径方向のコンバージョン点分布 ($\eta > 1.2$)

3.5 実データを用いた光子コンバージョン再構成

3.5.1 内部飛跡検出器の物質質量評価

重心系エネルギー 7TeV の 実データを用いて，光子コンバージョンの再構成を行う．事象選択は，Minimum Bias 同様，表 3.4 のカット値を用いる．動径方向のコンバージョン点分布を，図 3.21 に示す．黒線が Minimum bias シミュレーションサンプルから再構成したコンバージョン点分布，ピンク色で塗られている部分が実データから再構成したコンバージョン点分布である．イベント数で規格化を行った．同様にして， η の大きさによって場合分けしたときのコンバージョン点分布を，図 3.22, 図 3.23 図 3.24，に示す．

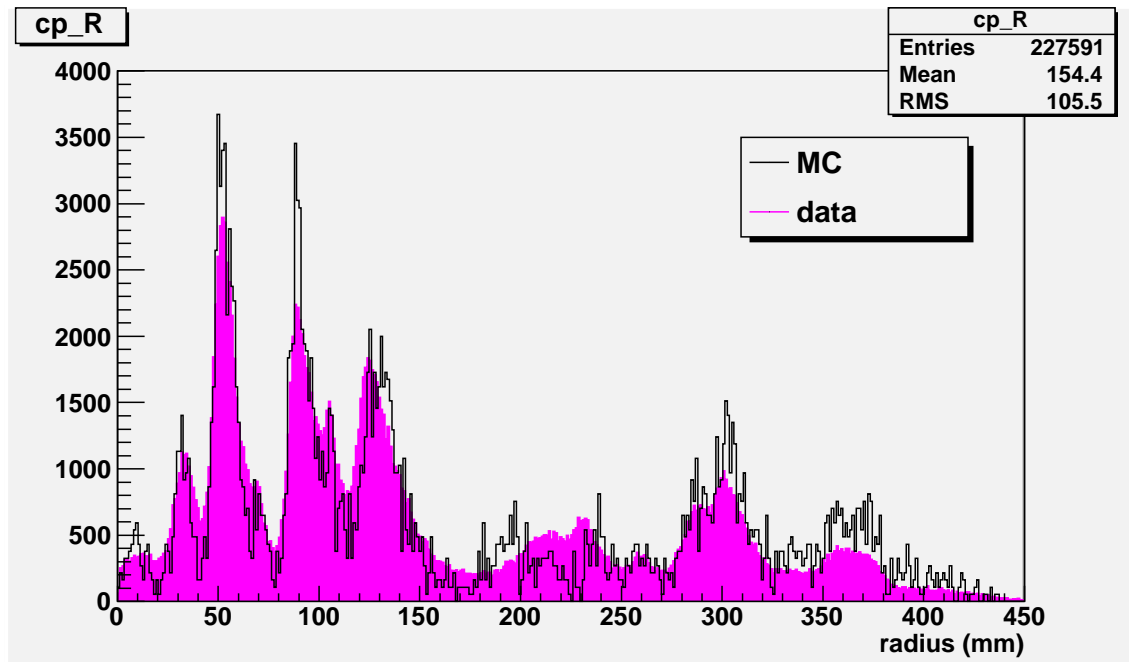


図 3.21: 実データから再構成した動径方向のコンバージョン点分布

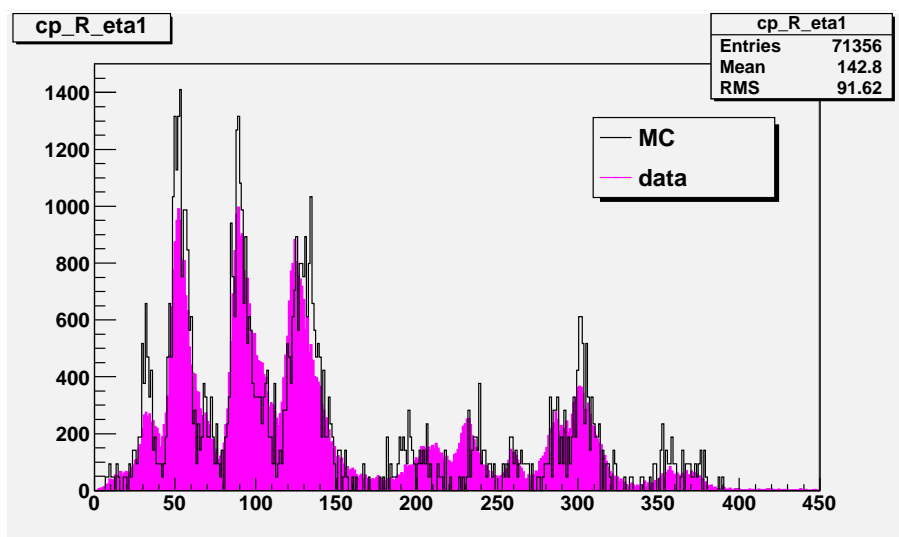


図 3.22: 実データから再構成した動径方向のコンバージョン点分布 ($\eta < 0.7$)

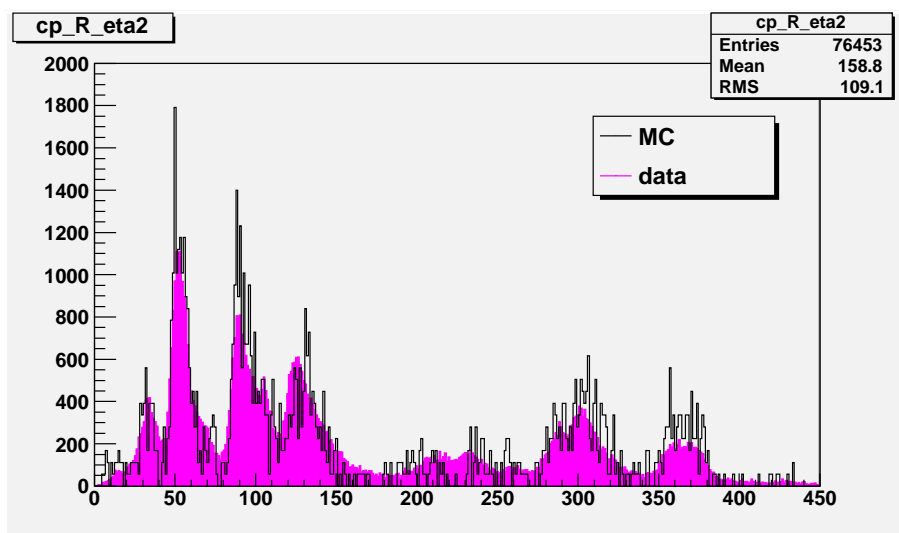


図 3.23: 実データから再構成した動径方向のコンバージョン点分布 ($0.7 < \eta < 1.2$)

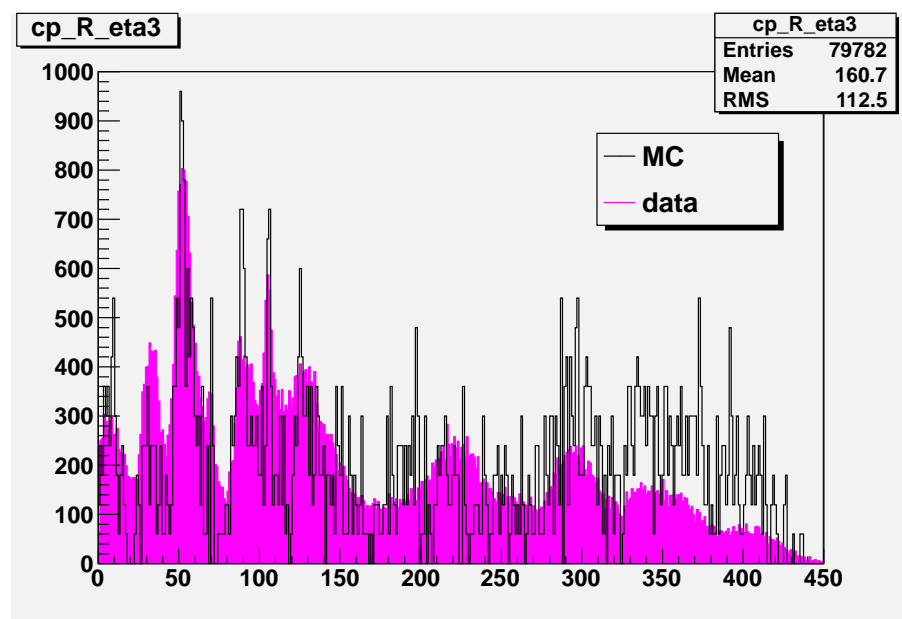


図 3.24: 実データから再構成した動径方向のコンバージョン点分布 ($\eta > 1.2$)

3.5.2 内部飛跡検出器の物質質量評価 (Z 分布と ϕ 分布)

図 3.17, 図 3.21 で, 動径方向のコンバージョン点分布を確認できたが, さらに, この分布を参考に表 3.5 のように, 動径方向 r で場合分けすることにより, 検出器の各層でのコンバージョン点の Z 分布と ϕ 分布を再構成した.

	r [mm]
Pixel 1	$45 < r < 75$
Pixel 2	$80 < r < 115$
Pixel 3	$115 < r < 145$
SCT 1	$290 < r < 320$

表 3.5: 検出器の各層を選ぶための r によるカットの値

表 3.5 のカットをかけて再構成したコンバージョン点 Z 分布を図 3.25, 図 3.26 に, ϕ 分布を図 ??, 図 3.27 に示す.

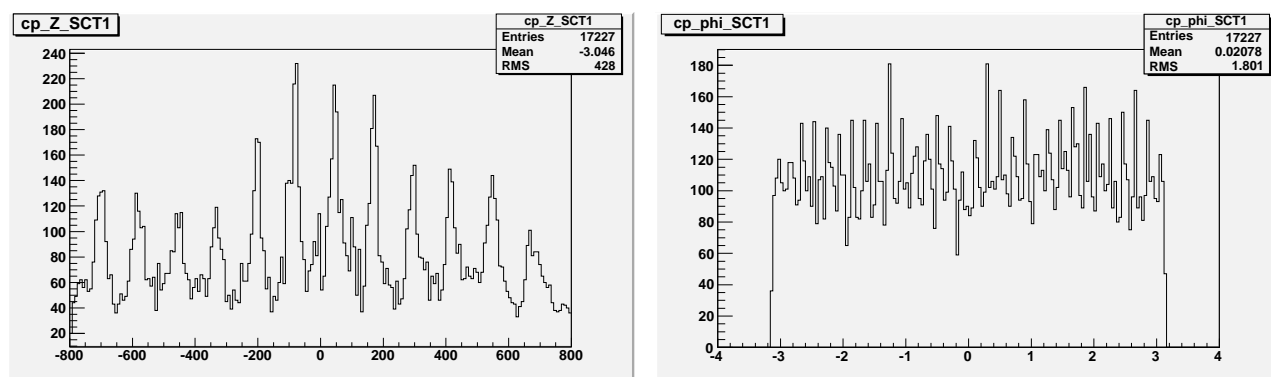


図 3.25: SCT1 層目における, コンバージョン点 z , ϕ 分布 (実データ). (左) z 分布. (右) ϕ 分布.

SCT の 1 層目での Z 分布では, はぼ等間隔に 12 箇所ピークが存在していることが分かる. これは, SCT 検出器のパレル部に設置された 12 列のモジュールによるものだと考えられる. 12 箇所のピークは, モジュールのハイブリッド部がある位置であり, そのピークの間にある小さなピークはセンサー部であるシリコンが隣同士で重なっているためである.

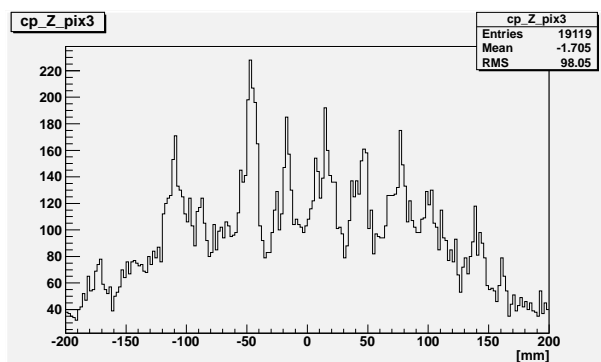
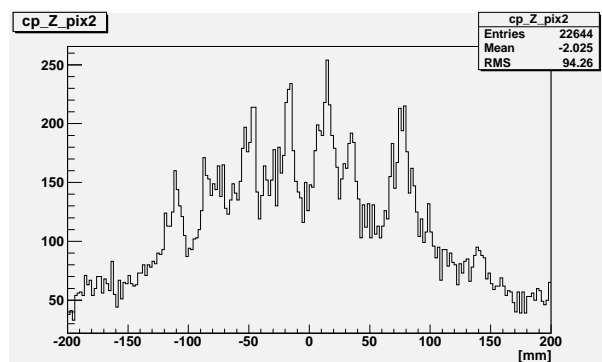
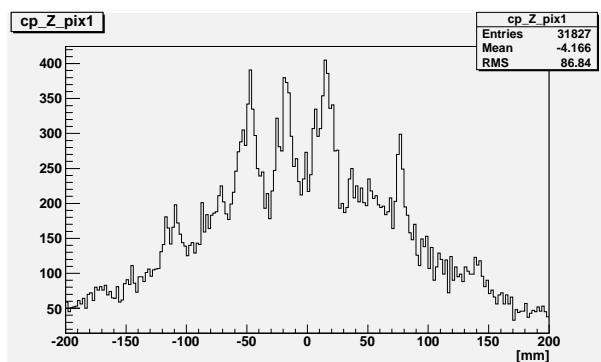


図 3.26: pixel 検出器 1, 2, 3 層における, コンバージョン点 z 分布. 左上が 1 層目, 右上が 2 層目, 左下が 3 層目である.

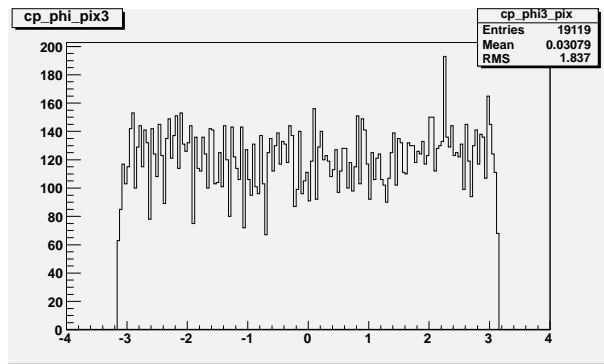
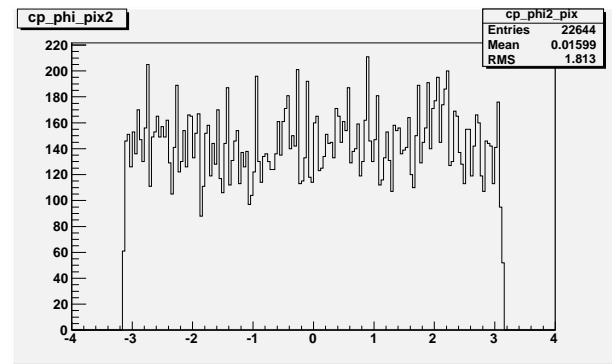
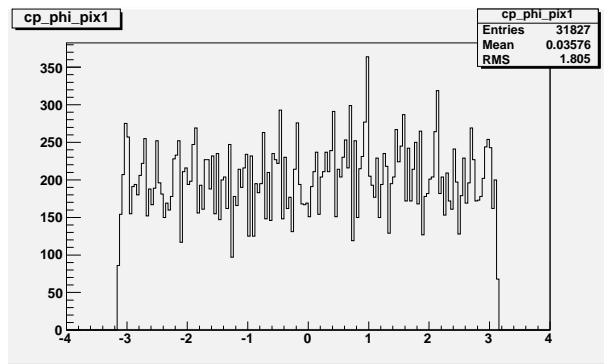


図 3.27: pixel 検出器 1, 2, 3 層目における, コンバージョン点 ϕ 分布. 左上が 1 層目, 右上が 2 層目, 左下が 3 層目である.

第4章 結論

光子のエネルギーが 25GeV と 75GeV の Single Photon 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点の再構成アルゴリズムの調整を行った．事象選択としては， χ^2/Ndf ， $|\Delta\cot\theta|$ ， S ， ΔZ を用いた．

Single Photon でのカットに TRT 検出器の情報を加え，重心系エネルギー 7TeV の Minimum bias シミュレーションサンプル及び実衝突データサンプルに対して，光子コンバージョン点の再構成を行った．pixel 検出器 3 層，SCT 検出器 1，2 層目，ビームパイプなどの存在をピークとして確認出来た．また，Dalitz 崩壊も確認出来た．

さらに，pixel 1，2，3 層目と，SCT 1 層目付近でのコンバージョン点 z ， ϕ の再構成を行った．

謝辞

指導教員である受川史彦先生には，入学当初から，いつも暖かいお言葉で親身な御指導をして頂きました．いつも笑顔で接して下さり，ありがとうございました．

金信弘先生には，普段から研究室でお声をかけて頂き，優しく御指導して頂きました．また，宇宙史拠点実習では，課題の内容に対する配慮に始まり，現地でのアドバイスなど大変お世話になりました．

戸村友宣さんには，席がお隣だったこともあり，様々なことを教えて頂きました．宇宙拠点実習では，解析が進まずに夜遅くまでオフィスにいなければならなかった私たちに付き合っって親身に指導して頂きました．

武内勇司先生，佐藤構二先生，永井康一さん，三宅英樹さん，永野間淳二さん，倉田正和さん，永井義一さんには常に暖かく接して頂き，様々なことを教えて頂きました．

埴さん，林さんには ATLAS の解析についてたくさんのお話を学ばさせて頂きました．どんなにお忙しいときでもいつも快く質問に答えてくださったこと，本当に感謝しています．

松隈さんには，御卒業後，社会人1年目でお忙しいにも関わらず，嫌な顔一つせず，貴重な休日に研究室にいらして教えて頂きました．当時，しつこく連絡してしまいすみませんでした．本当にありがとうございました．感謝してもしきれません．

同期のみんなには，研究面でも生活面でも色々助けてもらいました．みんなのおかげで，楽しい大学院生活を送ることが出来ました．そして，原先生には，何から何まで本当にお世話になりました．研究に関するあらゆることを教わりました．私がどんなに初歩的な質問をしてもやさしく教え，導いて頂きました．休日返上で指導をして頂いたこともありました．また，研究だけでなく，休日などには先生の奥様のコンサートや山登りなどに連れて行って頂き，本当に楽しかったです．最後に，いつも私の気持ちを尊重し，どんなときでも応援し，支えてくれた母や祖母には本当に感謝しています．本当にありがとうございました．

参考文献

- [1] 松隈恭子 「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」,(筑波大学修士論文 2010 年).
- [2] The ATLAS Collaboration, *Expected Performance of the ATLAS Experiment "Detector, Trigger and Physics"* , v.1
- [3] The ATLAS Collaboration, *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider* ,2008 JINST 3 S08003
- [4] Lyndon Evans and Philip Bryant (editors) , *LHC Machine* , 2008 JINST 3 S08001
- [5] ATLAS Japan web page , <http://atlas.kek.jp>
- [6] CERN Twiki web page , <https://twiki.cern.ch/>
- [7] web page , <http://www-hep.phys.titech.ac.jp/atlas/tutorials2009/>
- [8] ATLAS EXPERIMENT web page , <http://www.atlas.ch>
- [9] web page , <http://g4education.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=426073>
- [10] Particle Data Group , *REVIEW OF PARTICLE PHYSICS* , Volume 37 Number 7A , July 2010.