

HERA における
電子ビーム横偏極度測定装置の性能

東京都立大学大学院理学研究科修士課程2年
高エネルギー実験研究室所属

0283255

加藤 聡美

平成16年1月9日

概要

HERA 加速器はドイツハンブルグ市に建設された世界で唯一の電子陽子衝突型加速器であり、そこでは衝突実験 (H1、ZEUS) と固定ターゲットの実験 (HERMES、HERA-B) が行われている。2000 年から 2001 年にかけてのシャットダウンの際、HERA にはふたつの改良が行なわれた。ひとつはルミノシティの増強、もうひとつは電子ビームを偏極させることである。加速器内を回る電子ビームは Sokolov-Ternov 効果により横方向に自然偏極する。その電子ビームを衝突点の前後に設置した spin rotator によって縦偏極に変え、衝突実験を行なう。

HERA の電子ビームの偏極度は TPOL、LPOL と呼ばれるふたつの独立した装置で測定される。電子ビームを左右円偏光させたレーザーとコンプトン散乱させ、TPOL では散乱された光子の位置の非対称性から横偏極度を、LPOL では光子のエネルギーの非対称性から縦偏極度を測定する。

偏極電子を用いた物理の解明には偏極度を $\delta P/P < 0.02$ で求めることが要求される。TPOL のカロリメータは上下 2 層に分かれた構造をしており、それぞれに落とされたエネルギーの非対称性から偏極度測定を行う。この時、 $\eta - y$ 変換曲線によってエネルギーの非対称性を位置情報に直すのだが、これには 4.4% の系統誤差がある。これを改善するためにカロリメータ前方にシリコン検出器とファイバー検出器が導入された。シリコン検出器は垂直方向の位置を測定し、測定と同時に $\eta - y$ 変換曲線を決定する。これにより、系統誤差を減らすことができる。しかし、シリコン検出器には年間 $\sim 2\text{Mrad}$ の放射線が当たり、放射線損傷による劣化が予想される。このシリコンの劣化をモニターすることがファイバー検出器の役割である。

本研究ではシリコンの劣化が偏極度測定に与える影響をシミュレーションし、ファイバー検出器を用いた劣化モニター法の安定性を調べた。シミュレーションの結果、劣化によりシリコンで観測されるクラスターの数が増え、かつクラスターの charge の値が大きくなることが分かった。クラスター数の減少は $\eta - y$ 変換曲線の統計精度が下がることを意味しており、その結果偏極度測定の精度が落ちることになる。そこでファイバー検出器をトリガーデバイスとし、シリコンのクラスターの charge 変化を見ることによって、劣化をモニターすることにした。今回は短期間に数回データを取り、この量の安定性を調べるとともに、偏極度測定における系統誤差の主な要因である $\eta - y$ 変換曲線の時間的変化を見た。

目次

| | |
|------------------------------|----|
| 第1章 序章 | 1 |
| 第2章 偏極度測定 | 6 |
| 2.1 偏極電子ビーム | 6 |
| 2.2 測定原理 | 8 |
| 第3章 TPOL | 12 |
| 3.1 TPOL | 12 |
| 3.2 円偏光レーザー | 12 |
| 3.3 カロリメータ | 16 |
| 3.4 シリコン検出器 | 17 |
| 3.4.1 シリコン検出器 | 17 |
| 3.4.2 cluster algorithm | 19 |
| 3.5 ファイバー検出器 | 24 |
| 3.5.1 ファイバー検出器 | 24 |
| 3.5.2 ファイバーイベントの定義 | 26 |
| 3.5.3 カロリメータ、シリコン検出器との比較 | 31 |
| 第4章 シミュレーション | 36 |
| 4.1 方法 | 36 |
| 4.2 シミュレーション結果 | 39 |
| 4.2.1 各ストリップに与える影響 | 39 |
| 4.2.2 シリコンに与える影響 | 41 |
| 4.2.3 $\eta - y$ 曲線 フィットへの影響 | 44 |
| 第5章 解析結果 | 49 |
| 5.1 シリコンの劣化モニター | 49 |
| 5.2 $\eta - y$ 変換曲線の時間変化 | 50 |
| 5.2.1 $\eta - y$ 変換曲線の決定 | 50 |
| 5.2.2 $\eta - y$ 変換曲線の時間変化 | 55 |
| 第6章 結論 | 58 |

目次

| | | |
|------|-----------------------------|----|
| 1.1 | HERA 概観図 | 2 |
| 1.2 | 右巻き荷電流反応 | 3 |
| 1.3 | 右巻き荷電流反応の断面積 | 4 |
| 2.1 | HERA 加速器での電子の偏極 | 7 |
| 2.2 | 偏極度の時間変化 | 8 |
| 2.3 | 実験系、静止系でのコンプトン散乱 | 9 |
| 3.1 | TPOL 写真 | 13 |
| 3.2 | TPOL 概念図 | 14 |
| 3.3 | TPOL Optical System | 15 |
| 3.4 | カロリメータ | 17 |
| 3.5 | $\eta - y$ 分布 | 18 |
| 3.6 | 各ストリップの ADC 値 | 21 |
| 3.7 | 各ストリップの Pulse height | 22 |
| 3.8 | シリコン検出器で見たクラスター分布 | 23 |
| 3.9 | ファイバー検出器 | 24 |
| 3.10 | LED 回路 | 25 |
| 3.11 | カロリメータとファイバー検出器の LED のタイミング | 26 |
| 3.12 | カロリメータとファイバー検出器のタイミング | 27 |
| 3.13 | 左右 PMT の peak の timing | 28 |
| 3.14 | 左右 PMT の charge 分布 | 28 |
| 3.15 | threshold を変えたときのイベント数の変化 | 29 |
| 3.16 | コントロール電圧を変えたときのイベント数の変化 | 30 |
| 3.17 | コントロール電圧調整後 左右 PMT の charge | 30 |
| 3.18 | ファイバーでトリガーした η | 32 |
| 3.19 | ファイバー検出器で見た $\eta - y$ 変換曲線 | 33 |
| 3.20 | シリコン上のクラスターの位置 | 34 |
| 3.21 | Si-fiber の直線性 | 35 |
| 4.1 | あるイベントの暗電流を増大した様子 | 37 |
| 4.2 | common mode の変化 | 38 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.3 | ストリップ 398 の Pluse hight の変化 | 39 |
| 4.4 | seed の数の変化 | 40 |
| 4.5 | cluster 数、charge の変化 | 42 |
| 4.6 | cluster charge の変化 | 43 |
| 4.7 | $\eta - y$ 分布の変化 | 45 |
| 4.8 | $\eta - y$ 変換曲線 1RMS | 46 |
| 4.9 | $\eta - y$ 変換曲線 2RMS | 47 |
| 4.10 | $\eta - y$ 変換曲線 3RMS | 48 |
| 5.1 | ファイバーモニター | 49 |
| 5.2 | 各位置でのファイバーイベントの cluster charge | 51 |
| 5.3 | 時間的 charge 変化 | 52 |
| 5.4 | η 分布をガウス関数でフィット | 53 |
| 5.5 | $\eta - y$ 変換曲線 | 54 |
| 5.6 | y 非対称性 | 56 |
| 5.7 | η 非対称性 | 57 |

表 目 次

| | | |
|-----|---------------------------|----|
| 1.1 | HERA 主要パラメータ | 1 |
| 4.1 | Π_η の変化 | 44 |
| 5.1 | data taking | 50 |
| 5.2 | 各変数と Π_η | 56 |

第1章 序章

HERA(Hadron-Electron Ring Anlage)はドイツハンブルグ市にある DESY(Deutsches Elektron-Synchrotron) 研究所に建設された、世界で唯一の電子陽子衝突型加速器である。その直径約 2km、円周 6336m である。PETRA 加速器で電子(あるいは陽電子)は 14GeV まで、陽子は 40GeV まで加速され、HERA 加速器へと入射される(図 1.1)。その後、電子は 27.5GeV まで、陽子は 920GeV まで加速される。各リングには最大 220 個のバンチが貯蔵され、96nsec 毎に衝突する。このときの重心系のエネルギーは 318GeV である。HERA では 2 つの衝突実験 ZEUS、H1 と固定ターゲット実験 HERMES が行なわれている。

2000 年から 2001 年にかけてのシャットダウンで HERA には 2 つの改良が行なわれ、2003 年から HERA II が始まった。改良点は、ルミノシティーの増強、電子ビームを縦偏極させた衝突実験を行なうことである。ビームのカレントを上げ、ビームを絞ることによってルミノシティーを増強した。ルミノシティーはそれまでの約 5 倍の $7.57 \times 10^{31} cm^{-2} s^{-1}$ まで上がる予定である(表 1.1)。加速器内を回る電子はシンクロトロン放射によって次第にビームの進行方向に垂直な向きに偏極する。これを Spin rotator によって進行方向の向きにして衝突実験を行う。

| パラメータ | HERAI | | HERAII | |
|------------------------------|-----------------------|--------|-----------------------|--------|
| | 陽子 | (陽) 電子 | 陽子 | (陽) 電子 |
| ビームエネルギー (GeV) | 920 | 27.5 | 920 | 27.5 |
| ビームカレント (mA) | 100 | 50 | 140 | 58 |
| バンチ長 (mm) | 191 | 11.2 | 191 | 10.3 |
| ビームサイズ (x)(μm) | 192 | 189 | 112 | 112 |
| ビームサイズ (y)(μm) | 50 | 50 | 30 | 30 |
| 重心系でのエネルギー (GeV) | 314 | | 318 | |
| ルミノシティー ($cm^{-2} s^{-1}$) | 16.9×10^{30} | | 75.7×10^{30} | |

表 1.1: 2000 年まで (HERA I) とアップグレード後 (HERA II) の主要パラメータ

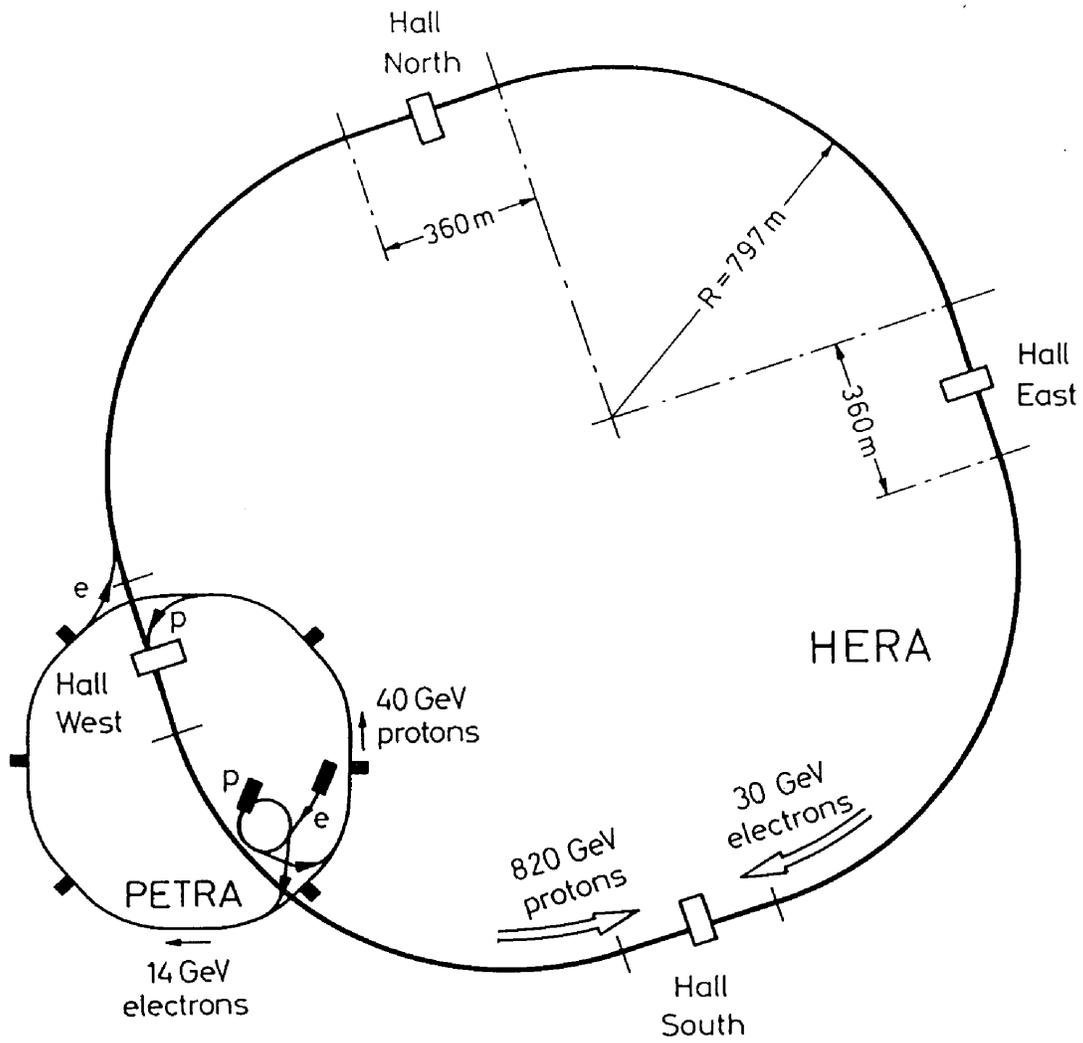


图 1.1: HERA 概観図

縦偏極電子ビームと偏極していない陽子の衝突実験により次のような物理の解明が期待される。

- 右巻き荷電流反応の散乱断面積の上限値の決定 [1] [2]
- 電弱相互作用を記述するパラメータの精密測定 ($\Delta M_w \approx 55 \text{ MeV}$) [3]
- Z^0 ボソンと軽いクォークとの結合定数 [4]

右巻き荷電流反応は図 1.2 のような反応である。荷電流反応の断面積は偏極度 P を用いて式 (1.1) のように表される。

$$\sigma_{pol}^{\pm} = \sigma_{unpol}(1 + P) \quad (1.1)$$

σ_{unpol} は偏極していないときの断面積である。この断面積と偏極度の関係を示したのが図 1.3 である。偏極度が 0 の点は HERA I で測定された値であり、その他の点はシミュレーション結果である。HERA II で異なる偏極度の (陽) 電子ビームを用いて、荷電流反応の断面積を測定することにより、標準模型では禁止されている右巻き荷電流断面積の上限を定めることができるのである。これらの物理の解明には偏極度を $\delta P/P < 0.02$ の精度で求めることが要求される。

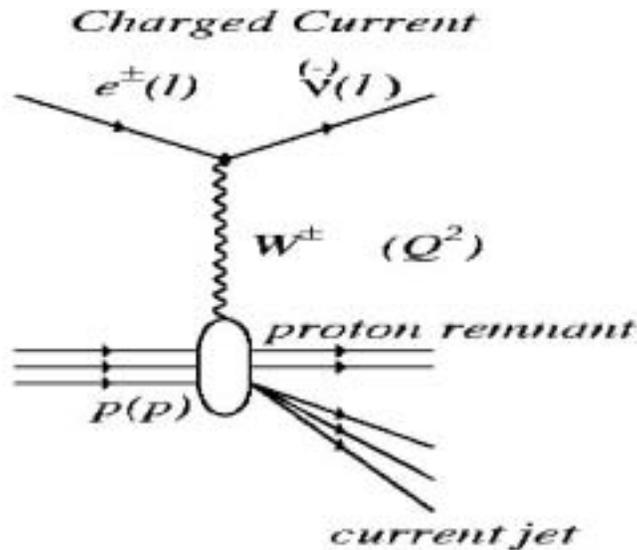


図 1.2: 右巻き荷電流反応

ZEUS CC Cross Sections

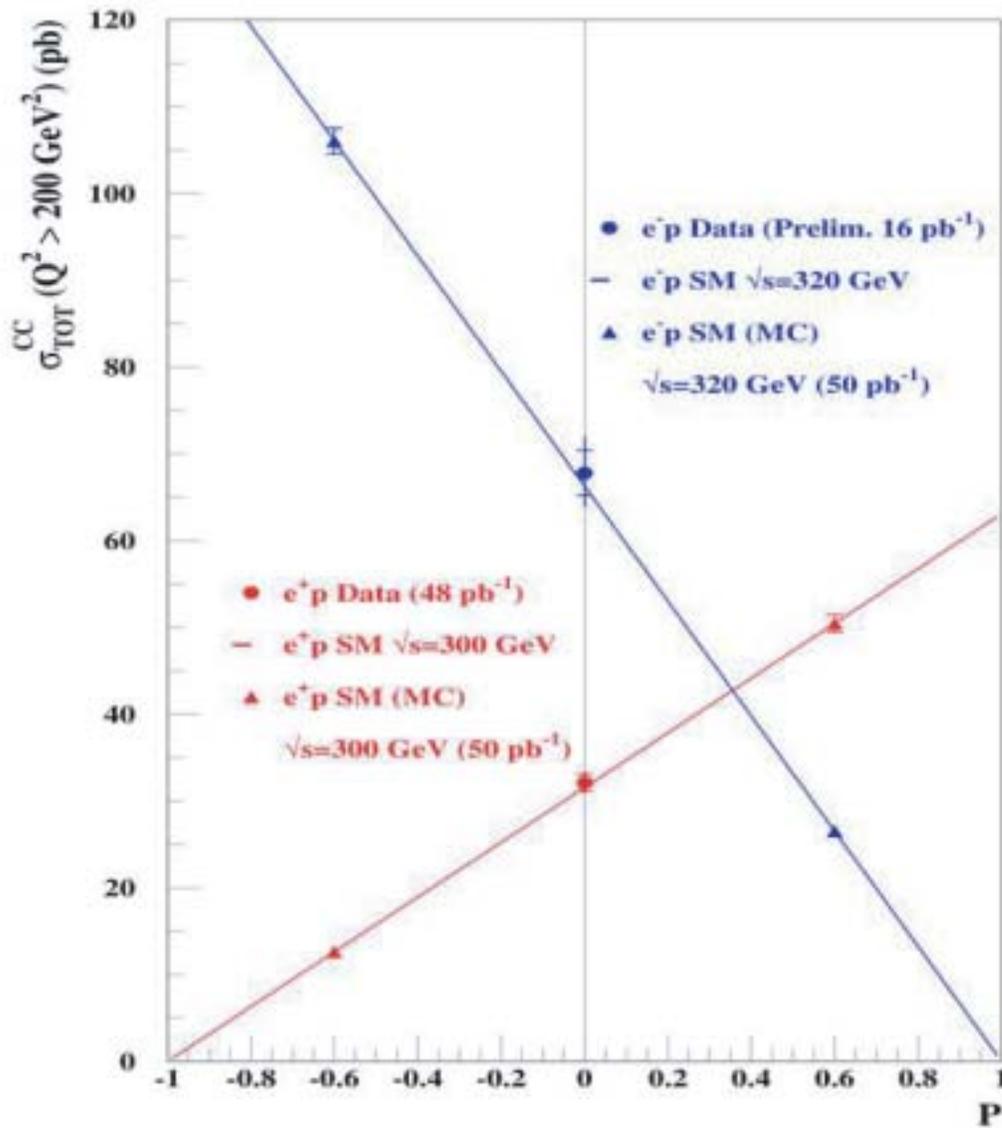


図 1.3: 右巻き荷電流反応の断面積と偏極度の関係 (偏極度が0の点は測定値)

HERA ではふたつの独立した装置によって偏極度が測定されている。ひとつが横偏極度測定装置 (TPOL)、もうひとつが縦偏極度測定装置 (LPOL) である。我々、都立大学グループは TPOL での測定に携わっている。TPOL では電子ビームを左右円偏光したレーザーとコンプトン散乱させ、散乱後の光子の垂直方向の位置を測る。HERA I では上下 2 層に分かれたカロリメータに落とされたエネルギーの非対称性を測定することにより偏極度を測定していた。しかし、このエネルギーの非対称性を垂直方向の位置に直すときに 4.4% の系統誤差が生じる。この系統誤差を減らすために HERA II からシリコン検出器とファイバー検出器が導入された。本論文では、シリコン検出器導入による系統誤差の改善を確認すると共に放射線損傷によるシリコン検出器の劣化が偏極度測定に及ぼす影響を調べた。また、ファイバー検出器によってシリコンの劣化をモニターする方法を述べる。

第2章 偏極度測定

2.1 偏極電子ビーム

HERA の電子ビームの偏極度は2つの独立した装置によって測定される。ひとつが縦方向の偏極度を測る LPOL(Longitudinal Polarimeter)、もうひとつが横方向の偏極度を測る TPOL (Transverse Polarimeter) である。電子ビームの進行方向を縦方向、進行方向に垂直な向きを横方向と呼ぶ。LPOL、TPOL とともに偏極電子ビームを左右円偏光させたレーザーとコンプトン散乱させ、散乱された光子によって偏極度を測定する。LPOL は East Hall の近くにあり散乱後の光子のエネルギーの非対称性によって縦偏極度を測る。一方、TPOL は West Hall 近くにあり垂直方向の位置非対称性によって横偏極度を測定している。

加速器内を回る電子はシンクロトロン放射によって横方向に自然偏極する。これは電子のスピンの up から down へひっくり返る割合と down から up へひっくり返る割合に小さな差があるために生じる現象であり、Sokolov-Ternov 効果と呼ばれる。HERA では H1、ZEUS の二ヶ所の衝突点の前後に spin rotator を入れ、横方向に自然偏極した電子ビームを縦方向に変えて衝突実験を行なっている (図 2.1)。

偏極度は時間とともに以下のように増加し、理想的な場合、偏極度は 92.4 % に達する。

$$P(t) = P_{max}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2.1)$$

P_{max} は平衡状態になったときの偏極度であり、 τ は偏極にかかる時間である。偏極を抑える効果を考慮しないときの τ を τ_{ST} と表すとすると、 τ_{ST} は HERA の場合、27GeV で 40 分である。しかし、実際には加速器の歪みなどが原因で偏極を抑える力が働く。偏極度を抑える効果の強さは τ_{dep} で表される。 τ_{dep} を用いると、偏極度の最大値 P_{max} と build-up time τ は次のようになる。

$$P_{max} = P_{ST} \frac{\tau_{dep}}{\tau_{ST} + \tau_{dep}} \quad (2.2)$$

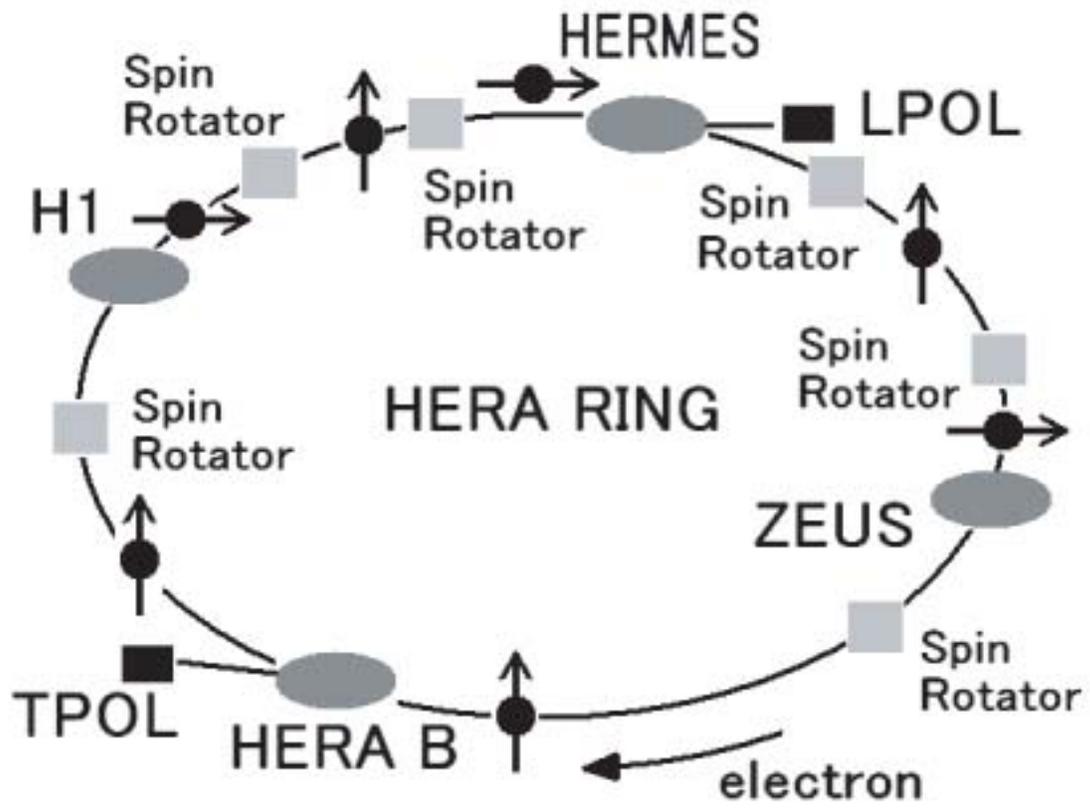


図 2.1: HERA 加速器での電子の偏極

$$\tau = \tau_{ST} \frac{\tau_{dep}}{\tau_{ST} + \tau_{dep}} \quad (2.3)$$

図 2.2 は時間とともに電子ビームが偏極していく様子を測定したものである。平衡状態になるまでの時間 τ を測定することにより、 τ_{dep} が計算でき、偏極度 P_{max} を知ることができるのである。

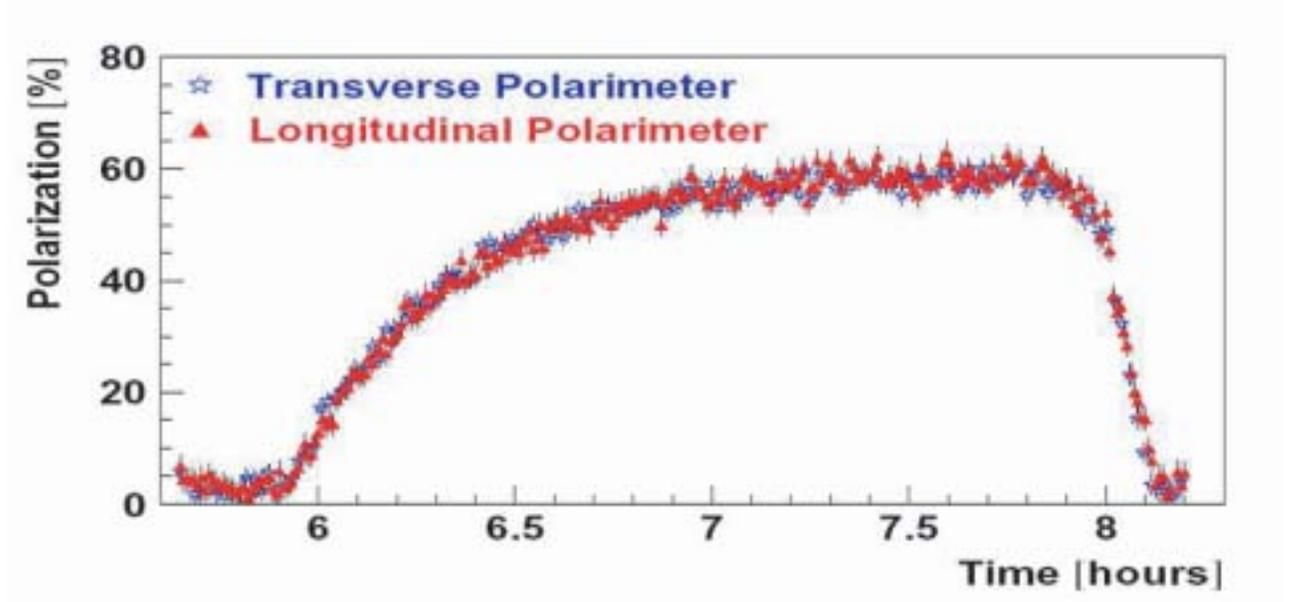


図 2.2: 偏極度の時間変化

2.2 測定原理

図 2.3 は実験室系と電子の静止系で見たコンプトン散乱の様子である。 k_i 、 k_f はそれぞれ静止系での入射ビームの運動量と散乱された光子の運動量であり、HERA では $k_i = 0.508$ である

$$k_i = 2\gamma E_\lambda / m_e = 2E_e E_\lambda / m_e^2 \quad (2.4)$$

$$k_f = 1 / (1 - \cos \theta + 1/k_i) \quad (2.5)$$

γ は電子の静止系に対する実験室系の Lorentz boost である。 E_λ は静止系でのレーザーのエネルギー、 E_e は電子のエネルギー、 m_e は静止系での電子の質量であ

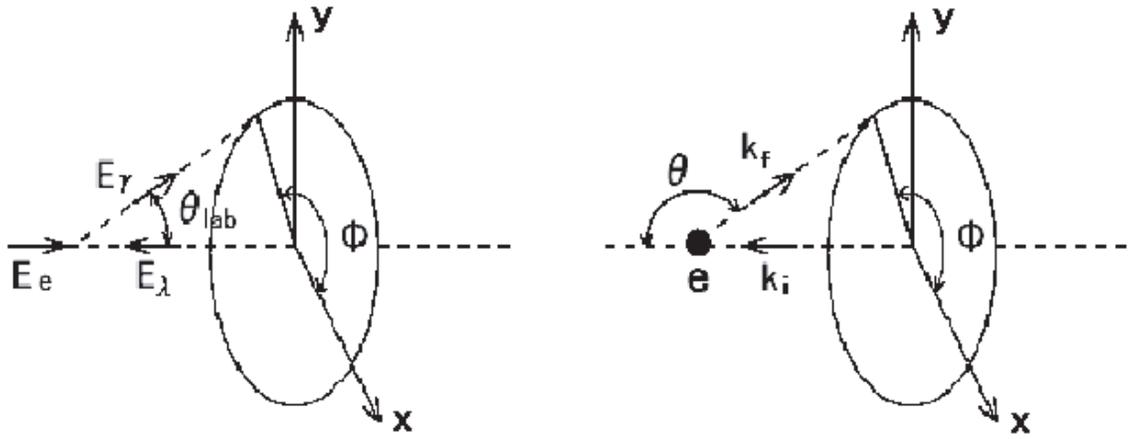


図 2.3: 実験系 (左) と電子の静止系 (右) でのコンプトン散乱

る。 θ は静止系での散乱角であり、実験系での光子のエネルギーにのみ依存する。よって同じエネルギーの光子は測定装置の表面に半径 $R(E)$ の同心円を描く。

$$\cos \theta = \frac{E_e - E(1 + 1/k_i)}{E_e - E} \quad (2.6)$$

$$R(E) = D \tan \theta_{lab} = \frac{D}{\gamma \tan \theta/2} \quad (2.7)$$

ここで D はレーザーと電子の衝突点と測定装置との距離である。方位角 ϕ は散乱された光子のエネルギーが分かれば、次のように垂直方向の位置と関係付けることができる。 $\theta = 180^\circ$ のとき散乱される光子のエネルギーは最大となる。

$$y = R(E) \sin \phi \quad (2.8)$$

$$E_{max} = \frac{2E_e}{2 + 1/k_i} \quad (2.9)$$

レーザーの偏光度は Stokes vector $\mathbf{S} = (S_0, S_1, S_2, S_3)$ を用いて次のように表される。

$$S_0 = E_1^2 + E_2^2 \quad (2.10)$$

$$S_1 = E_1^2 - E_2^2 \quad (2.11)$$

$$S_2 = 2E_1 E_2 \cos \delta \quad (2.12)$$

$$S_3 = 2E_1 E_2 \sin \delta \quad (2.13)$$

直線偏光の大きさは $S_{lin} = \sqrt{S_1^2 + S_2^2}$ であり、円偏光の大きさは $S_{circ} = |S_3|$ である。よって円偏光は $S_{circ} = \sqrt{1 - S_{lin}^2}$ と書き表すことができる。 $S_3 < 0$ のとき右巻き円偏光、 $S_3 > 0$ のとき左巻き円偏光とする。電子の偏極度は $\mathbf{P} = (P_x, P_y, P_z)$ で表す。これらを用いてコンプトン散乱の微分散乱断面積は次のように書くことができる。

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega}(S, P) = \Sigma_0 + S_1(0)\Sigma'_1 + S_3[P_y\Sigma_{2Y} + P_z\Sigma_{2Z}] \quad (2.14)$$

$$\Sigma_0 = [(1 + \cos^2 \theta) + (k_i - k_f)(1 - \cos \theta)] \quad (2.15)$$

$$\Sigma'_1 = C \cos 2\phi \sin^2 \theta \quad (2.16)$$

$$\Sigma_{2Y} = -C k_f \sin \phi \sin \theta (1 - \cos \theta) \quad (2.17)$$

$$\Sigma_{2Z} = -C(1 - \cos \theta)(k_f + k_i) \cos \theta \quad (2.18)$$

$$C = 0.5 r_0^2 k_f^2 k_i^{-2} \quad (2.19)$$

r_0 は電子の古典半径であり、 $r_0 = 2.818 fm$ である。 Σ 関数は散乱された光子のエネルギーにのみ依存する。

偏極度は右巻き円偏光のレーザーと左巻き円偏光のレーザーを当てたときの散乱された光子の非対称性で表される。

$$A(y, E_\gamma) = \frac{\sigma_L(y, E_\gamma) - \sigma_R(y, E_\gamma)}{\sigma_L(y, E_\gamma) + \sigma_R(y, E_\gamma)} \quad (2.20)$$

$$= \Delta S_1 \frac{\Sigma'_1}{\Sigma_0} + \Delta S_3 (P_y \frac{\Sigma_{2Y}}{\Sigma_0} + P_z \frac{\Sigma_{2Z}}{\Sigma_0}) \quad (2.21)$$

σ_L 、 σ_R はそれぞれ右巻き、左巻きの電子ビームとコンプトン散乱させたときの散乱断面積である。 ΔS_1 、 ΔS_3 は左右の偏光度の差である。式 (2.20) より縦偏極度 P_y は散乱された光子の位置非対称性から求めることができる。

$$A(y) = \Delta S_1 \Sigma'_{1/0} + \Delta S_3 P_y \Sigma_{2Y/0} \quad (2.22)$$

横偏極度 P_z はエネルギーの非対称性から求めることができる。

$$A(E_\gamma) = \Delta S_3 P_z \Sigma_{2Z/0} \quad (2.23)$$

第3章 TPOL

3.1 TPOL

電子ビームの横偏極度は、左右円偏光させたレーザーとのコンプトン散乱後の光子の垂直方向の位置非対称性によって測定される。横偏極測定装置 (TPOL) は電子ビームとレーザーの衝突点の 65m 下流に設置されている。TPOL はカロリメータと 2 つの位置検出器であるシリコン検出器、ファイバー検出器から構成される (図 3.2)。これらは Light-tight box の中に設置されている。コンプトン散乱後の光子はファイバー検出器の前方に置かれた、厚さ 1 放射長 ($1X_0$) の鉛を通過して、電子・陽子対生成をし、TPOL で検出される。

横偏極度 P_y はコンプトン散乱後の光子の上下方向の位置非対称性 Δy から以下の関係式により算出される。

$$\Delta y(E_\gamma) = \frac{\langle y \rangle_L - \langle y \rangle_R}{2} = \Delta S_3 P_y \Pi_y \quad (3.1)$$

$\langle y \rangle_L$ 、 $\langle y \rangle_R$ はそれぞれ左巻き、右巻き円偏光のレーザーを当てたときの光子の位置の平均値である。 Π_y は analyzing power と呼ばれ、シミュレーションから得られる値である。これは電子ビームが 100% 偏極したときの $\langle y \rangle_L$ 、 $\langle y \rangle_R$ の差であり、典型的な値は 0.142mm である。

3.2 円偏光レーザー

TPOL で用いられる円偏光レーザーはアルゴン・レーザー (INNOVA-200, Coherent Corporation) で West Hall の 9 階にあるレーザー室で発生する。波長 514.5nm ($E_\lambda = 2.41\text{eV}$)、出力 10W の緑色レーザーで、Pokel's cell によって 99.5 % 以上偏光する。レーザー室で発生したレーザーは、ミラーによって HERA トンネル内に輸送される (図 3.3)。レーザーを長距離輸送するため、ミラーは $2\mu\text{rad}$ の精度で調整しなくてはならない。M2、M3 はコンピュータによって $0.2\mu\text{rad}$ ステップで制御されている。輸送される間の偏極度の減少を最小限に抑えるため、M4 までは直線偏光で運ばれ、window の前に位置する $\lambda/4$ 板で円偏光に変換する。電子ビームは図の左側から入射し、レーザーとコンプトン散乱する。そのときの電子ビームの

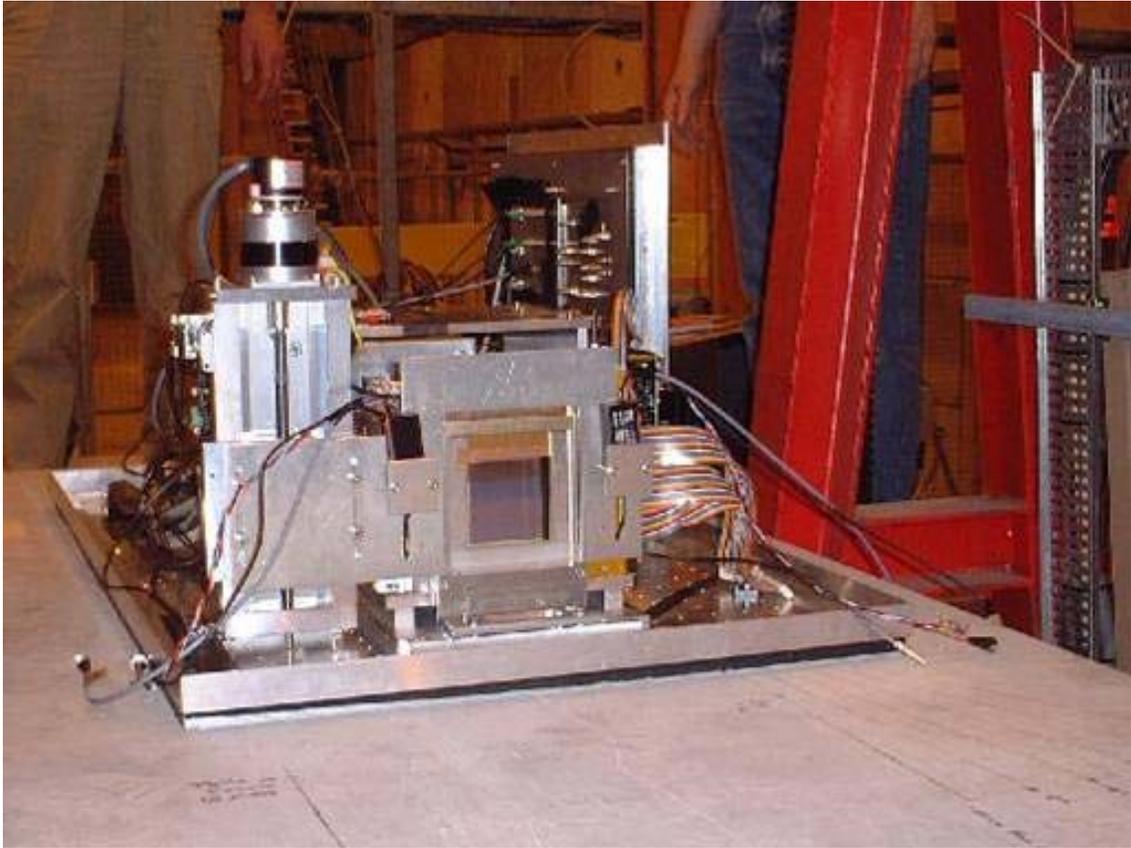


图 3.1: TPOL 写真

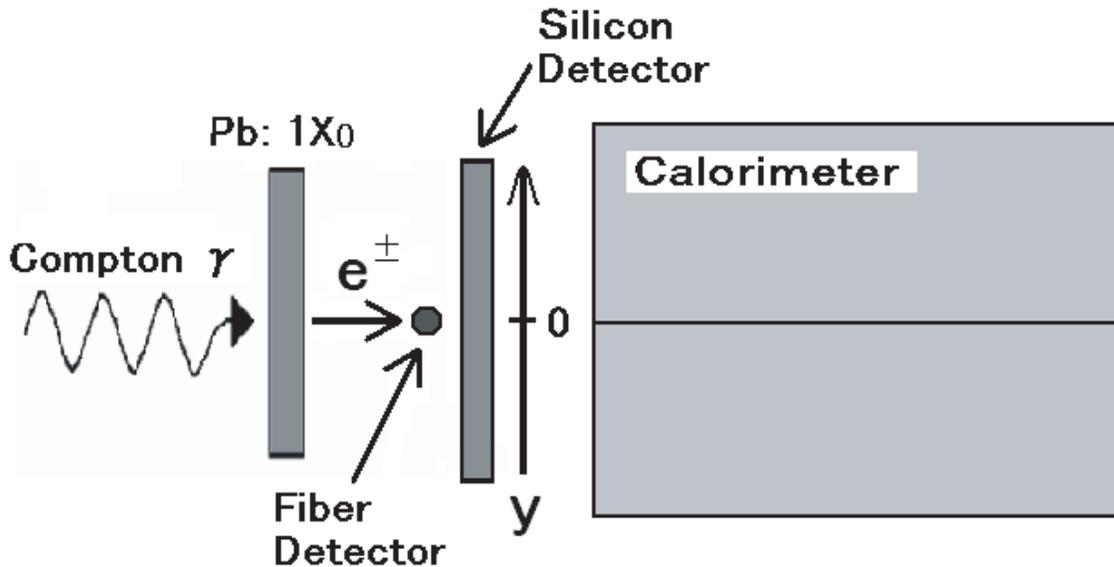
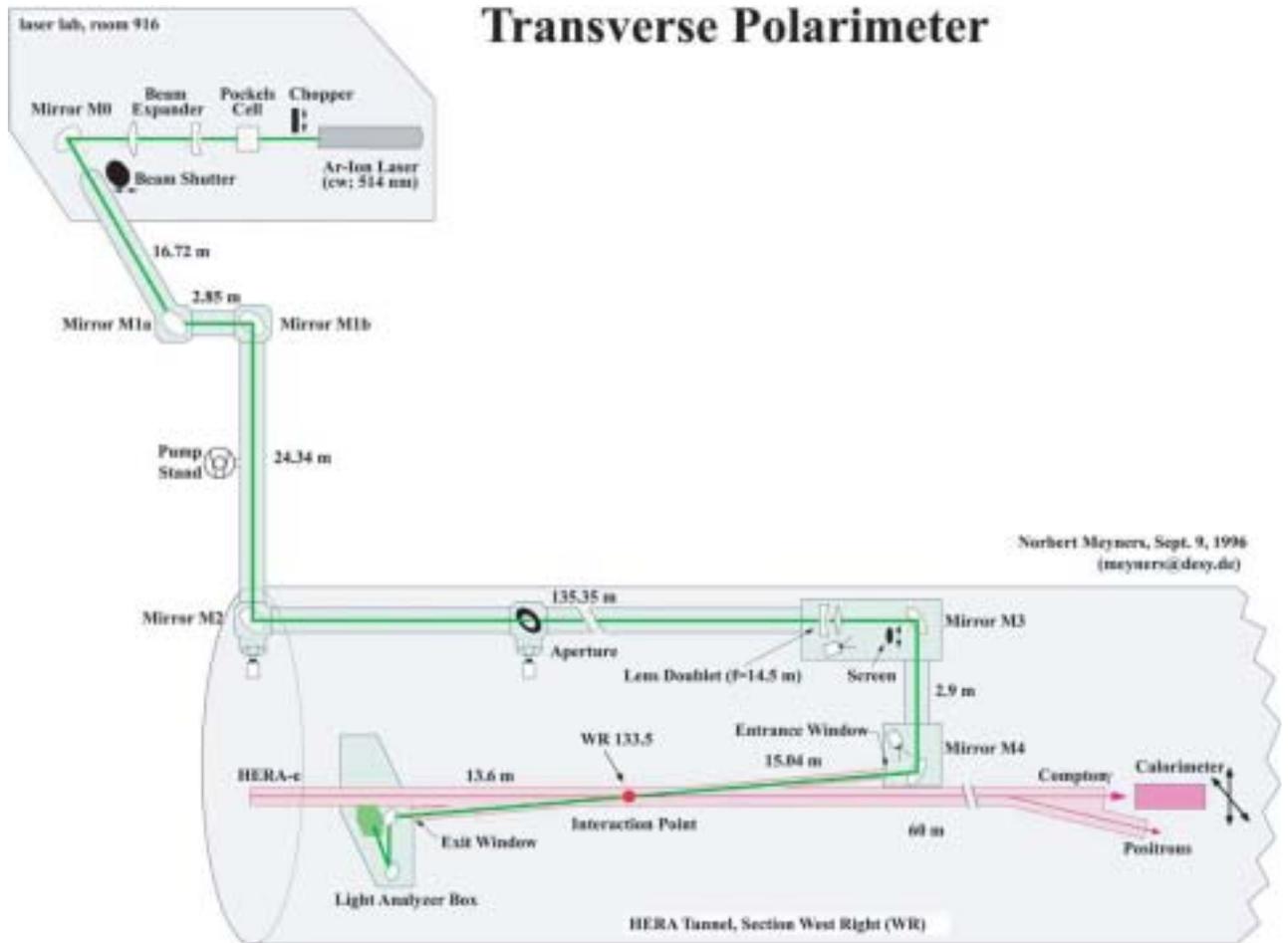


図 3.2: TPOL 概念図

大きさは $\sigma_x \simeq 3.4\text{mm}$ 、 $\sigma_y \simeq 0.5\text{mm}$ 、レーザーとの衝突角度は 3.1mrad である。散乱された光子は電子と同じ方向に飛び、偏光電磁石によって電子が取り除かれ、光子だけが TPOL で検出される。レーザーの偏光度は衝突点より下流に設置されている Analyzer Box で測定される。Glan-Thompson プリズムを回転させ、それを通過するレーザーの強度から偏光度を測っている。

TPOL では 10kHz でコンプトン散乱が行なわれる。この頻度であれば、ふたつの散乱過程が重なる可能性を無視することができる。偏極度測定は、まず 20 秒間シャッターによってレーザーが遮られ、バックグラウンドの測定が行なわれる。次の 40 秒間ではシャッターが開き、電子ビームとの衝突が行なわれる。この間、Pokel's cell の高電圧を変えることによって、左巻き円偏光と右巻き円偏光が 90Hz で切替えられる。左右円偏光ビームを交互に当てることによって、測定中の電子ビームの位置のずれによる影響を減らすことができる。

Transverse Polarimeter



☒ 3.3: TPOL Optical System

3.3 カロリーメータ

カロリメータは1 2層のタンゲステン (6.2 mm) とシンチレーター (2.6mm) のサンドイッチ構造をしており、シンチレーターは上下に2分割されている (図 3.4)。シンチレーション光は上下左右4つの wavelength shifter によって集められ、それぞれが光電子増倍管 (PMT) によって電気信号に変換される。TPOL の測定は全てカロリメータのシグナルでトリガーしており、カロリメータの DAQ は最大 100kHz である。

TPOL では散乱された光子の垂直方向の位置を直接測定するのではなく、上下カロリメータに落とされたエネルギーの非対称性 $\eta(y)$ という量を使って測定している。上下のカロリメータに落されるエネルギーをそれぞれ E_{up} 、 E_{down} とすると垂直方向の非対称性 $\eta(y)$ は以下のように定義される。

$$\eta(y) = \frac{E_{up} - E_{down}}{E_{up} + E_{down}} \quad (3.2)$$

図 3.5 は実験で得られた η と垂直方向の位置 y の様子をプロットしたものである。これを $\eta - y$ 変換曲線と呼ばれる以下のような式でフィットして、 η と y を関係づける。

$$\eta(y) = -\frac{|y - P_3|}{y - P_3} [1 - e^{-|y - P_3|/P_2} + P_0(e^{-|y - P_3|/P_2} - e^{-|y - P_3|/P_1})] \quad (3.3)$$

P_3 はビーム中心の位置を意味している。この $\eta(y)$ を使って式 (3.1) は以下のように表される。

$$\Delta\eta(E_\gamma) = \frac{\langle \eta \rangle_L - \langle \eta \rangle_R}{2} = P_y \Delta S_3 \Pi_\eta \quad (3.4)$$

ここで $\langle \eta \rangle_L$ 、 $\langle \eta \rangle_R$ は左巻き、右巻き円偏光のレーザーを当てたときの η 分布の平均値である。 Π_η は η に対する analyzing power である。これは Π_y を $\eta - y$ 変換曲線を用いて η に変換したものである。このように、 $\eta(y)$ を測定することによって偏極度を求めることができる。

カロリメータの calibration は上下左右4つの PMT の高電圧を調整することによって行われる。左右の PMT の calibration は水平方向のエネルギー非対称性 $\eta(x)$ を用いて行われる。 E_{right} 、 E_{left} はそれぞれ左右の wavelength shifter から読み出されたエネルギーであり、 $\eta(x)$ が 0 になるように PMT の高電圧が調整される。

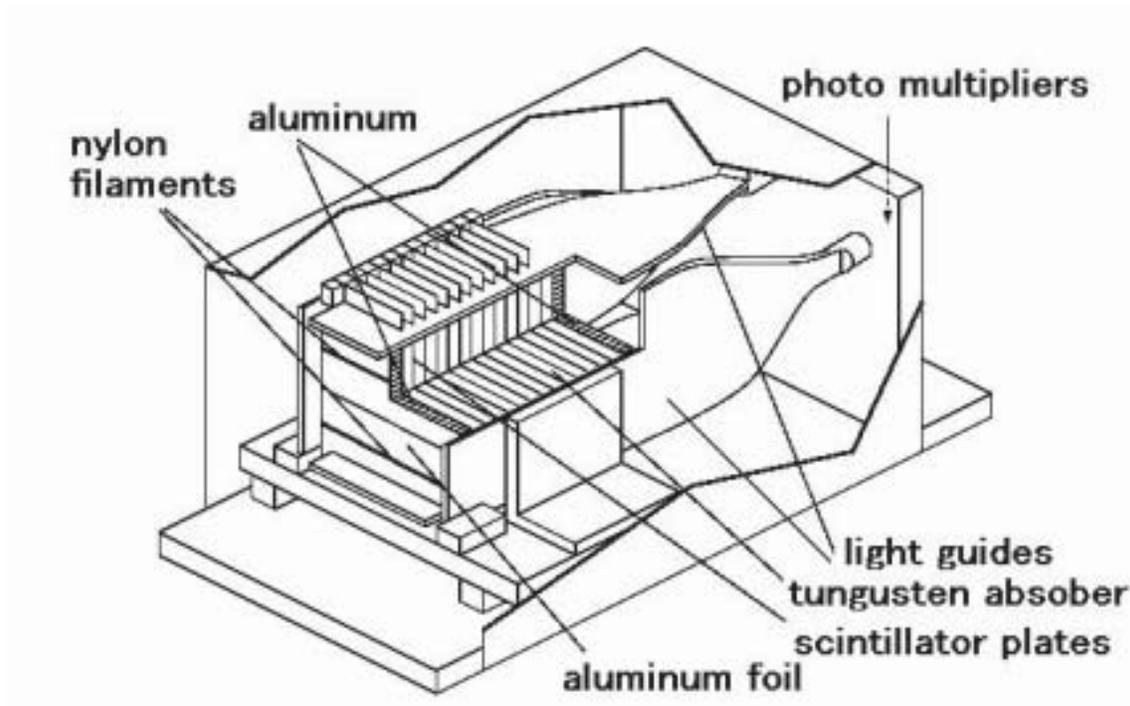


図 3.4: カロリメータ 概念図

$$\eta(x) = \frac{E_{left} - E_{right}}{E_{left} + E_{right}} \quad (3.5)$$

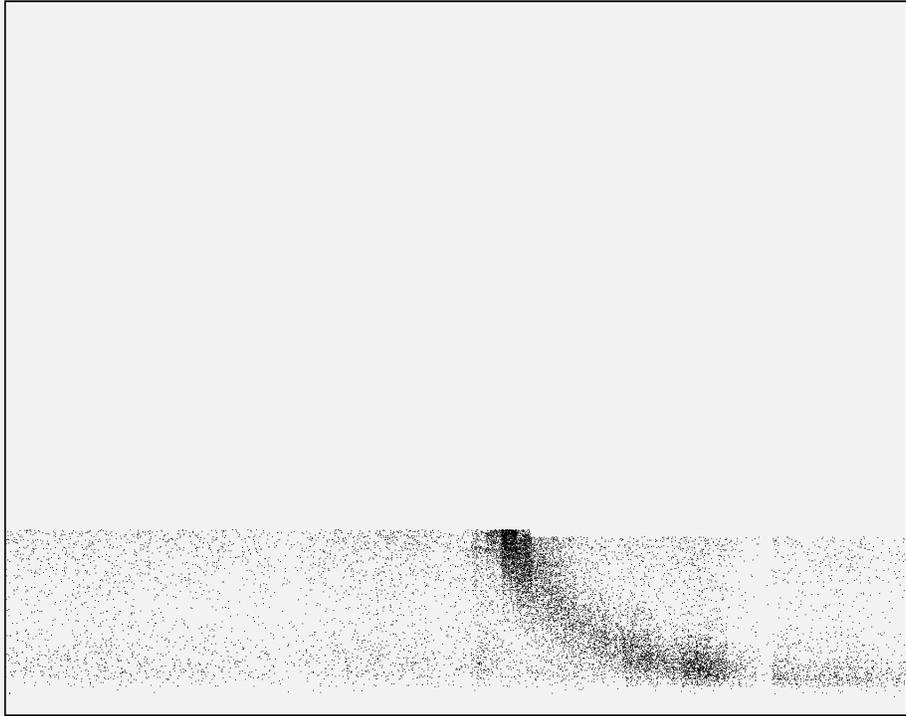
上下の PMT の calibration には、上下から読み出されるエネルギーの和と左右から読み出されるエネルギーの和の比 R が使われる。これらは同じシンチレーターを見ているので、シンチレーション光の減衰効果を除けば、この比は入射位置やエネルギーに依存せず 1 になるはずである。

$$R(\eta) = \frac{E_{up} + E_{down}}{E_{left} + E_{right}} \quad (3.6)$$

3.4 シリコン検出器

3.4.1 シリコン検出器

過去に DESY と CERN の 2 箇所で TPOL のビームテストが行なわれた。それぞれの実験結果から得られた /



がある。そこで導入されたのがふたつの位置検出装置、シリコン検出器とファイバー検出器である。

シリコン検出器は荷電粒子しか観測することができない。そこでシリコン検出器の前方に鉛が設置された。コンプトン散乱後の光子はこの鉛を通過し、電子・陽子対となる。シリコン検出器はカロリメータの前方に位置し、これらの垂直方向の位置を測定する。シリコン検出器の導入により、偏極度測定と同時に $\eta - y$ 変換曲線を求めることが可能となった。そのため、上述の系統誤差を取り除くことができるのである。シリコン検出器は ATLAS prototype(Hamamatsu) を使用している。厚さ約 $300\mu m$ 、大きさは $64mm * 63.6mm$ で $80\mu m$ 間隔でストリップが 768 本並んでいる。位置測定の精度は $24\mu m$ である。これらの信号は 6 つの APV25 Amplifier/Multiplexer で読み出され、ひとつのチップで 128 本のストリップの情報を読み出す。シリコン検出器の DAQ は 100Hz 程度であり、カロリメータの千分の一である。

3.4.2 cluster algorithm

シリコン検出器には 768 本のストリップがある。その i 番目のストリップの Pulse height(PH_i) は以下のように表される。

$$PH_i = ADC_i - PED_i - CM \quad (3.7)$$

それぞれのパラメータの意味を以下に示す。

ペDESTAL (PED_i)

i 番目のストリップに対して、0 から 500 イベントまでの ADC 値の平均をペDESTAL PED_i とし、その RMS を N_i とする。これは次の 500 イベントに適應される。500 から 1000 イベント目までの平均値は次の 500 イベントのペDESTAL となるのである。図 3.6 はあるイベントにおける全ストリップの ADC 値を見たものである。ペDESTAL の値が 6 つのノコギリ状になっているが、この形は APV25 チップの特性によるものである。

Common mode(CM)

Common mode の引き算は各イベントに対して、APV25 チップのベースラインの shift を補正するものである。同じチップで読み出される 128 本のストリップの各 ADC 値からペDESTAL を引き、それらの平均値を CM とする。ただし、シグナ

ルのヒットがあるストリップは除く。

このようにして求められた各ストリップの Pulse height が図 3.7 である。ストリップ 420 付近にシグナルが見える。Pulse height を用いて、シリコンのクラスターは以下のように計算される。

1. $PH_i > 5 * N_i$ を満たすストリップを seed とする
2. seed の両サイドのストリップを順に見ていき、 $PH_i > 3 * N_i$ ならば、クラスターに含める
3. 初めて $PH_i < 3 * N_i$ になったストリップまでクラスターに含める
4. seed と seed の間隔が 6 ストリップ以下の場合、同じクラスターとする

1 イベントに作られるクラスターの数を示したものが図 3.8 の左上の図である。通常、解析にはクラスターがひとつのイベントが使われる。図 3.7 のイベントもクラスターがひとつのイベントである。これを 1 クラスターイベントと呼び、全体の約 25 % を占める。右上の図は 1 クラスターイベントのクラスターの charge 分布である。クラスターの charge はクラスターに含まれるストリップの Pulse height の総和になっている。クラスターの位置 P_{cl} は以下のように計算される。

$$P_{cl} = \frac{\sum PH_j \times j}{\sum PH_j} \quad (3.8)$$

PH_j はクラスターに含まれる j 番目のストリップの Pulse height を意味している。このようにして求められたクラスターの位置をプロットしたものが図 3.8 の左下の図である。これにも 1 クラスターイベントを使用した。シリコンの位置で 32mm 付近がピークになっており、これがビーム中心になる。

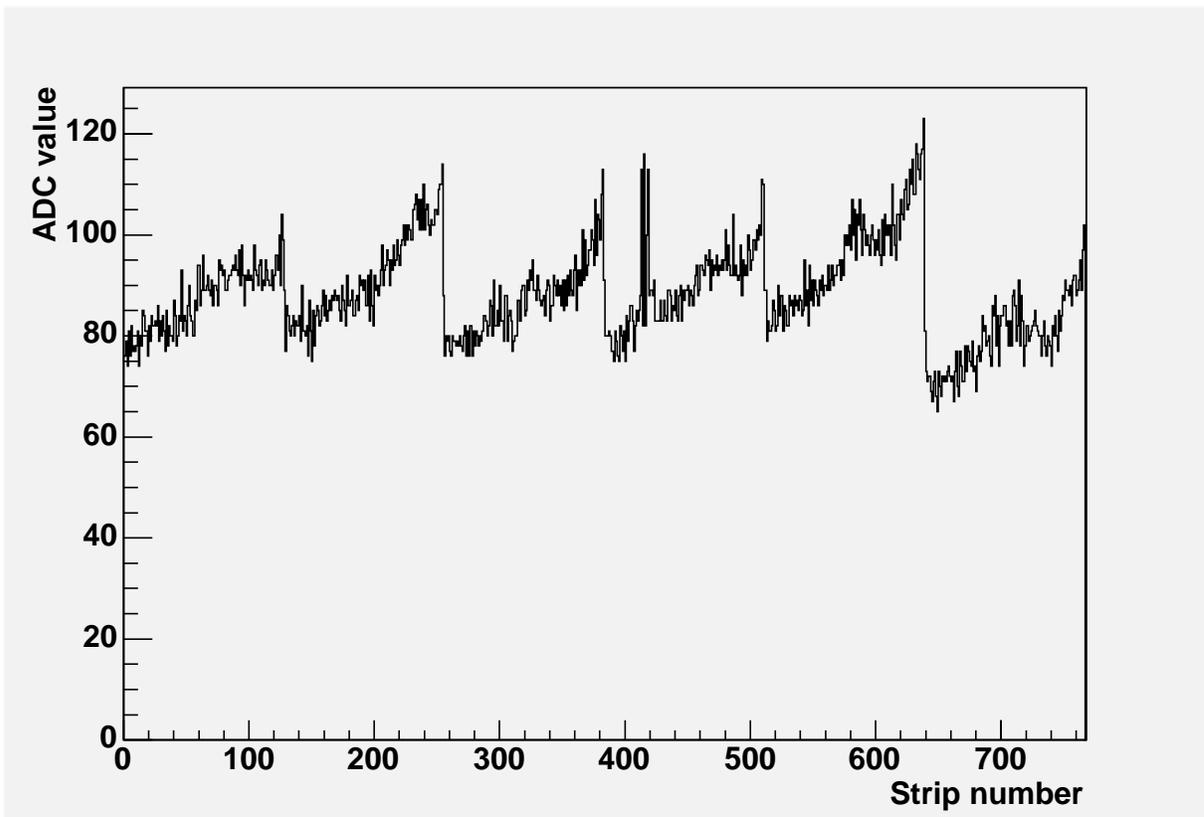


図 3.6: 各ストリップの ADC 値の様子

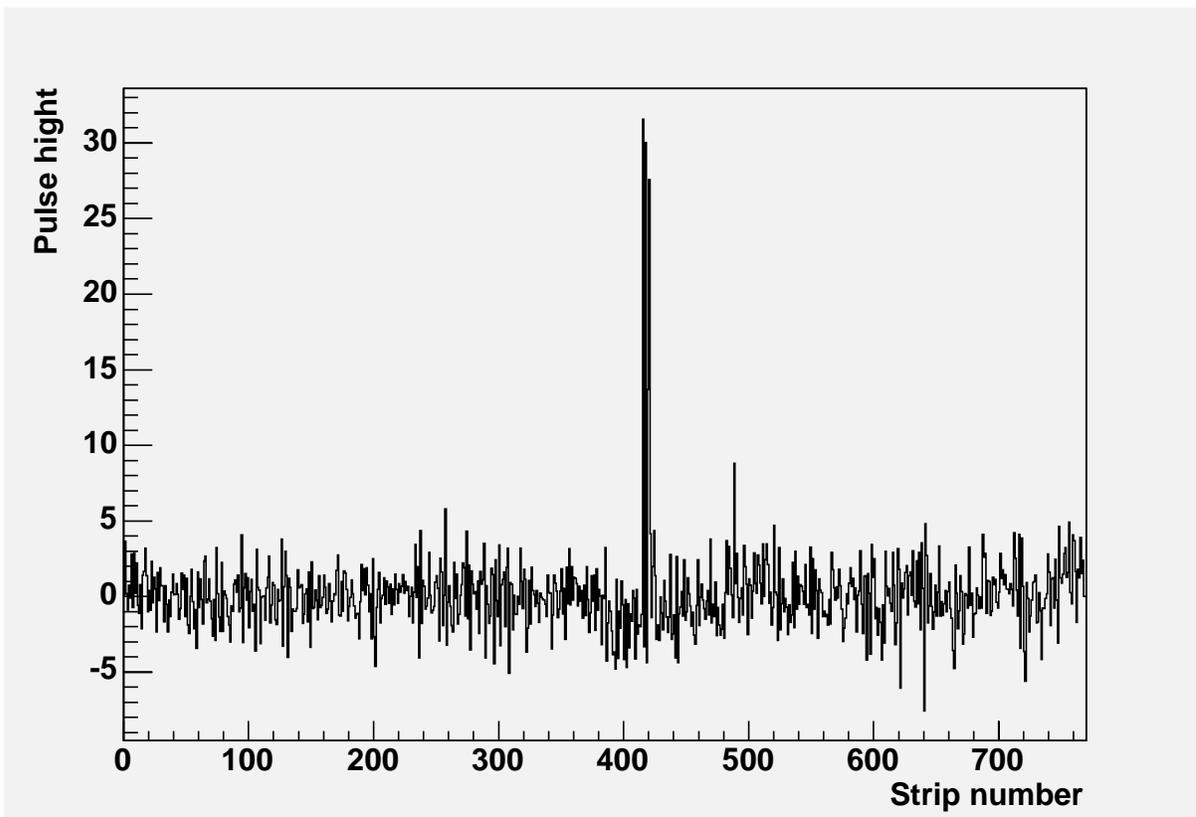


図 3.7: 各ストリップの Pulse height (ADC 値からペDESTAL、CM を引いたもの)

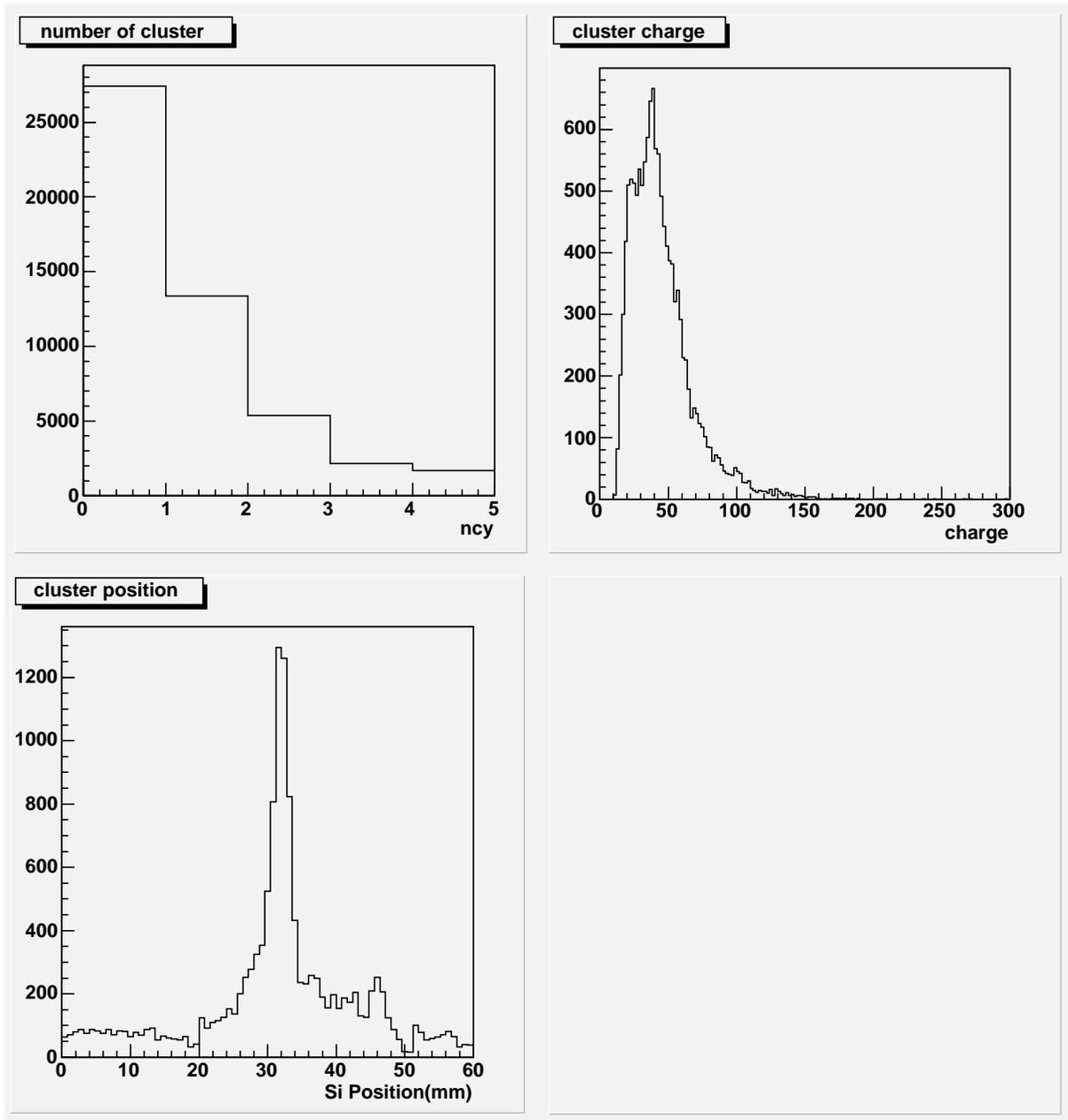


図 3.8: 左上：クラスターの数. 右上：クラスターの charge. 左下：クラスターの位置

3.5 ファイバー検出器

3.5.1 ファイバー検出器

シリコン検出器には年間約 2Mrad の放射線があたるため、放射線損傷による劣化が予想される。そこで我々は Si の放射線による劣化をモニターするためにファイバー検出器を作製、設置した。ファイバー検出器はシリコン検出器の前方に位置する。長さ 70mm、直径 1mm のシンチレーションファイバー (KURARAY, SCSF-81M) で受けた光信号はクリアファイバー (Edmund Scientific Japan., Ltd.) で両端の PMT (Hamamatsu H6780) に輸送される (図 3.9)。この PMT は高圧電源を内蔵しており、低いコントロール電圧 (0 ~ 1V) でゲインを調整することができる。ファイバー検出器では左右の PMT で信号が見えた場合をシグナルとする。ファイバーと PMT はアルミニウムの板に固定されており、Stepping Motor によって検出器全体を上下に移動することができる。その精度は $1\mu\text{m}$ である。

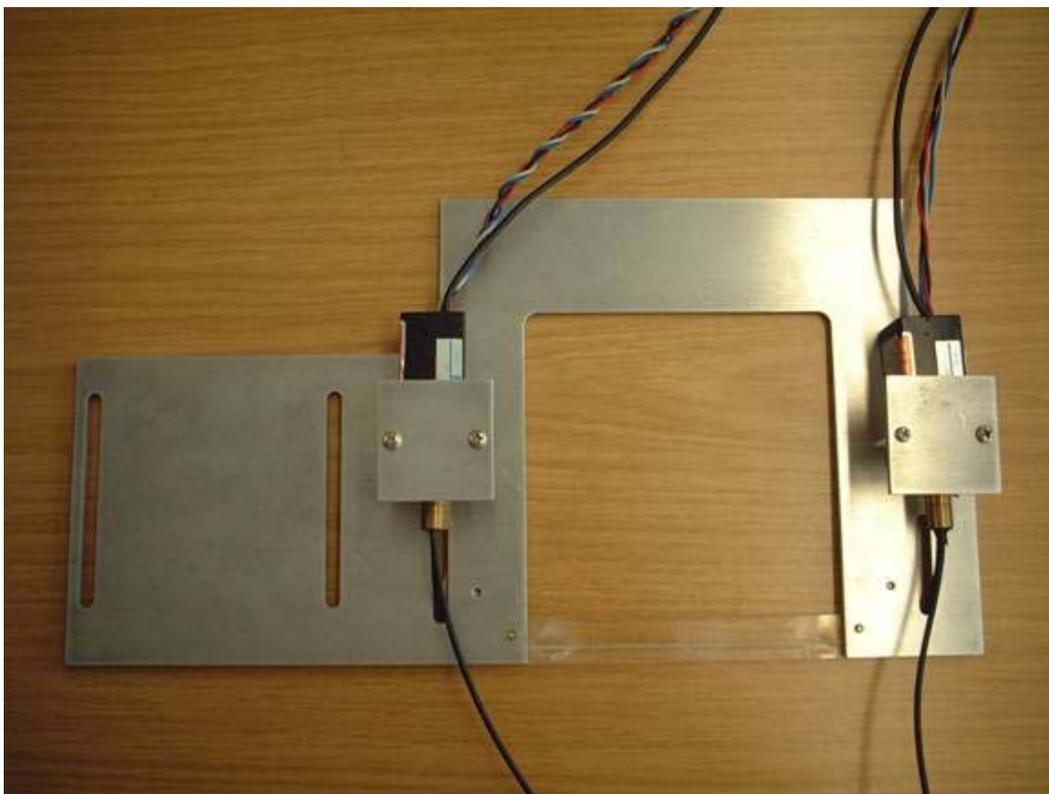


図 3.9: ファイバー検出器

左右の PMT の動作モニターするための LED システムを作製した。図 3.10 がその回路図である。LED は青色 (日亜化学) を使用した。高速動作が可能なアバランシェトランジスター (Zetex ZTX-415) を使用することにより、実際のシグナル

と同程度の短パルス (約 20nsec) の光を出すことが可能である。その波長は 470nm である。回路は内部トリガーと外部トリガーに切り替えることができる。外部トリガーはカロリメータの PMT モニター用の LED に使われている信号と同じものを使用している。この LED 回路は TPOL の Light-tight box の外部に設置され、発生した光はクリアファイバーによってそれぞれの PMT に輸送される。図 3.11 はカロリメータの LED とファイバー検出器の LED の信号をそれぞれの PMT で見たものである。TPOL はカロリメータの信号によってトリガーされ、カロリメータに信号が来ると、24nsec ごとに 16 回サンプルする。横軸はそのサンプリング時間、縦軸は ADC 値である。カロリメータの信号は 10 倍、ファイバー検出器の信号は 100 倍に増幅されている。ファイバー検出器の LED の信号はカロリメータの LED にくらべて 1 サンプル遅れて信号が来ることが分かる。

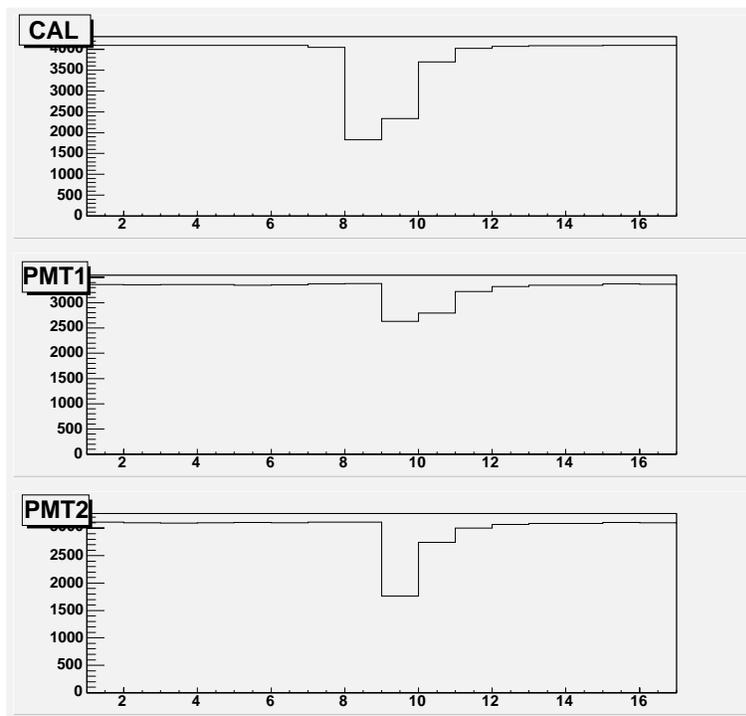


図 3.11: 典型的なカロリメータとファイバー検出器の LED のタイミング

3.5.2 ファイバーイベントの定義

図 3.12 は実際のイベントを見たときのカロリメータとファイバー検出器の典型的なタイミングを示したものである。縦軸はそれぞれの ADC カウントであり、カロリメータの値は 10 倍にファイバー検出器は 100 倍に増幅されている。トリガーはカロリメータの信号である。カロリメータのシグナルは 11 サンプル目

に来ている。それに対してファイバー検出器は9サンプル目にシグナルが来ており、カロリメータより2サンプル早くシグナルが来ていることとなる。そのためファイバー検出器のシグナルはカロリメータのシグナルの1サンプル前と2サンプル前とする。chargeはそれらのADC値からペDESTALを引いた値の和とした。ファイバー検出器のペDESTALはそれぞれのPMTの1サンプル目と2サンプル目のADC値の平均値となっている。

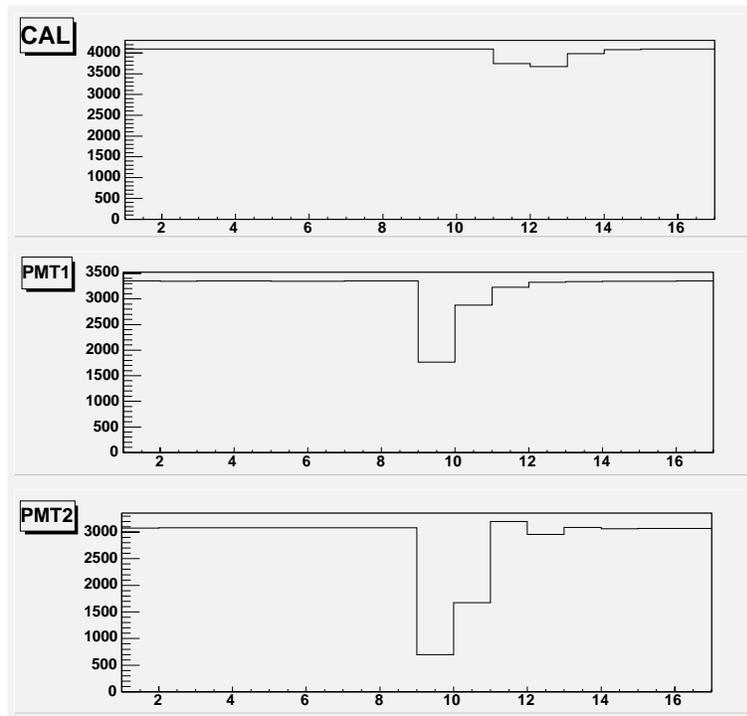


図 3.12: 典型的なカロリメータとファイバー検出器のタイミング

図 3.14 は左右の PMT の charge 分布である。この時の PMT1、2 のコントロール電圧は共に 0.9V であった。左右の charge が大きく異なり、PMT2 は saturate している様子が見える。そのため、PMT のゲインの調整が必要となり、PMT1 のコントロール電圧を 0.9V、PMT2 を 0.8V とした。

次にファイバーイベントの定義を決めた。シグナルの charge がペDESTAL の RMS の 1 倍から 6 倍以上をファイバーイベントと仮定し、それぞれの場合においてファイバーにヒットがあるイベント数の変化を見た (図 3.15)。RMS の 1 から 2 倍ではイベント数が急激に減少する。これはイベントの中にペDESTAL が混ざっており、正しくイベントが選ばれていないことを意味する。3 倍から 6 倍のときはイベント数に大きな変化は見られない。そのため、RMS の 3 倍以上をファイバーイベントと定義するのが適切と考えられる。3RMS は ADC 値にすると左右ともに約 50

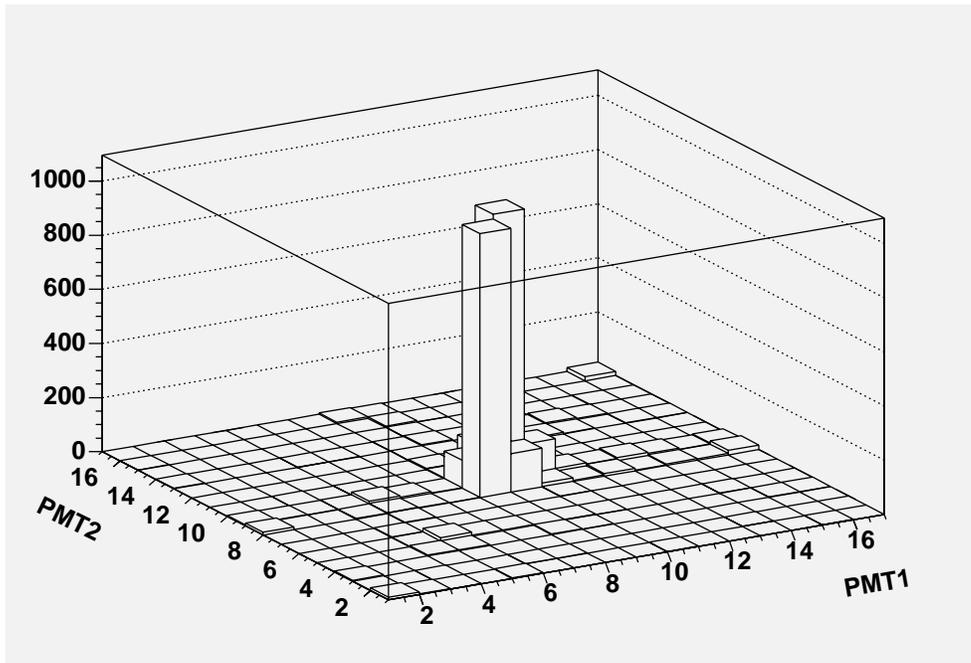


図 3.13: 左右 PMT の peak の timing

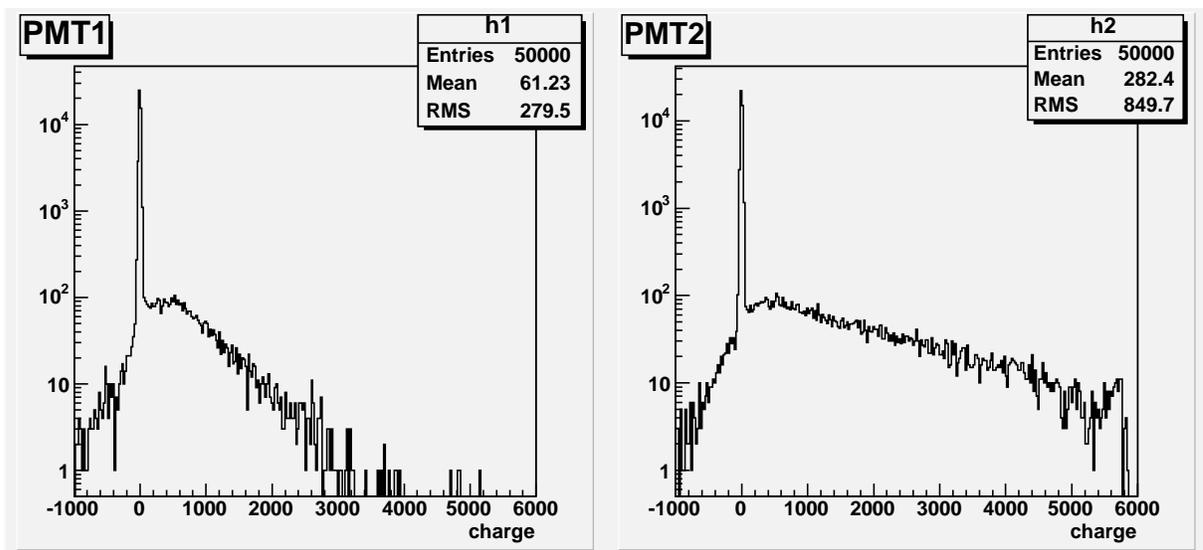


図 3.14: 左右 PMT の charge 分布

にあたる。

図 3.16 は PMT のコントロール電圧を変化させたとき (左右同じ値) のファイバーイベントの数の変化を見たものである。3RMS 以上をファイバーイベントとした。コントロール電圧が 0.7V 以上ではイベント数は大きく変わらず、この範囲内で電圧を調整してもファイバー検出器の検出効率に影響を与えないと言える。

これらの結果から、ファイバー検出器の左右の PMT のコントロール電圧は PMT1 を 0.9V、PMT2 を 0.8V とした。このときの全イベントの charge 分布を見たものが図 3.17 である。PMT2 の saturate が直っていることが分かる。

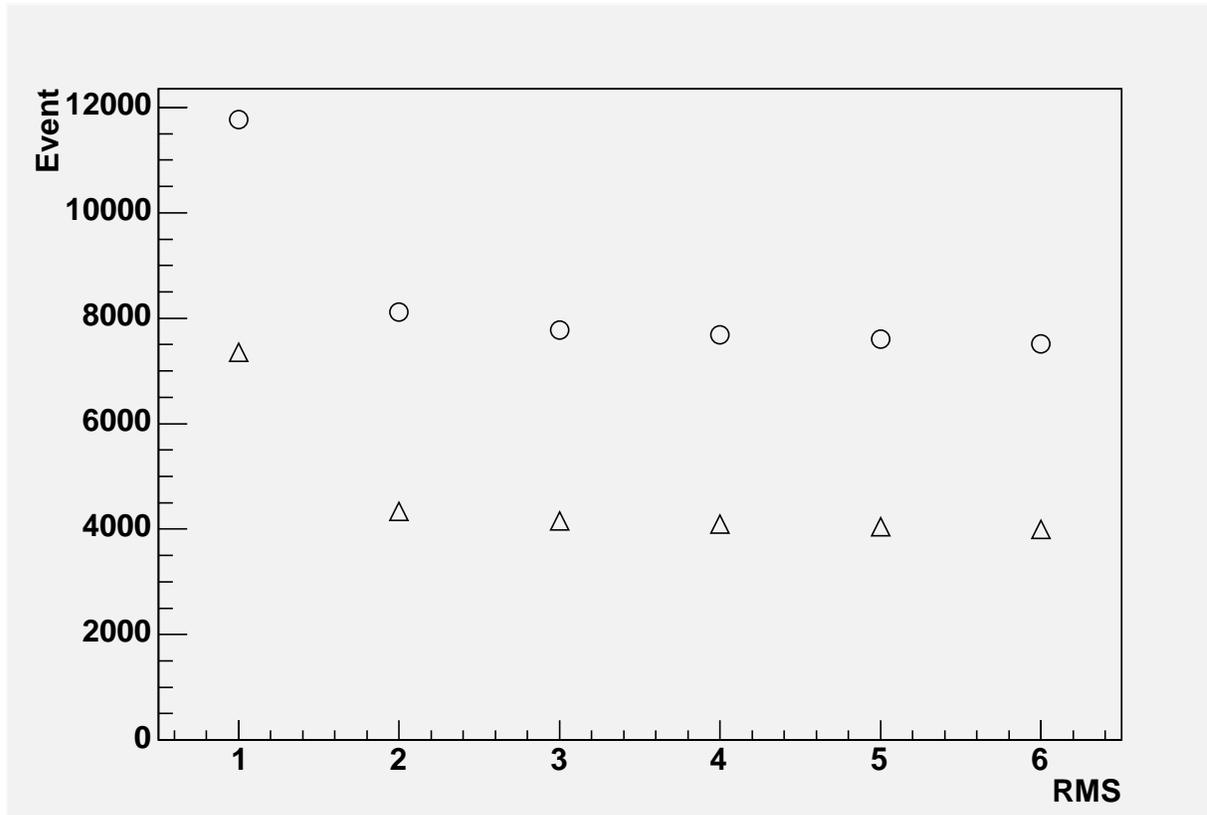


図 3.15: threshold を変えたときのイベント数の変化 (Δ PMT1 PMT2)

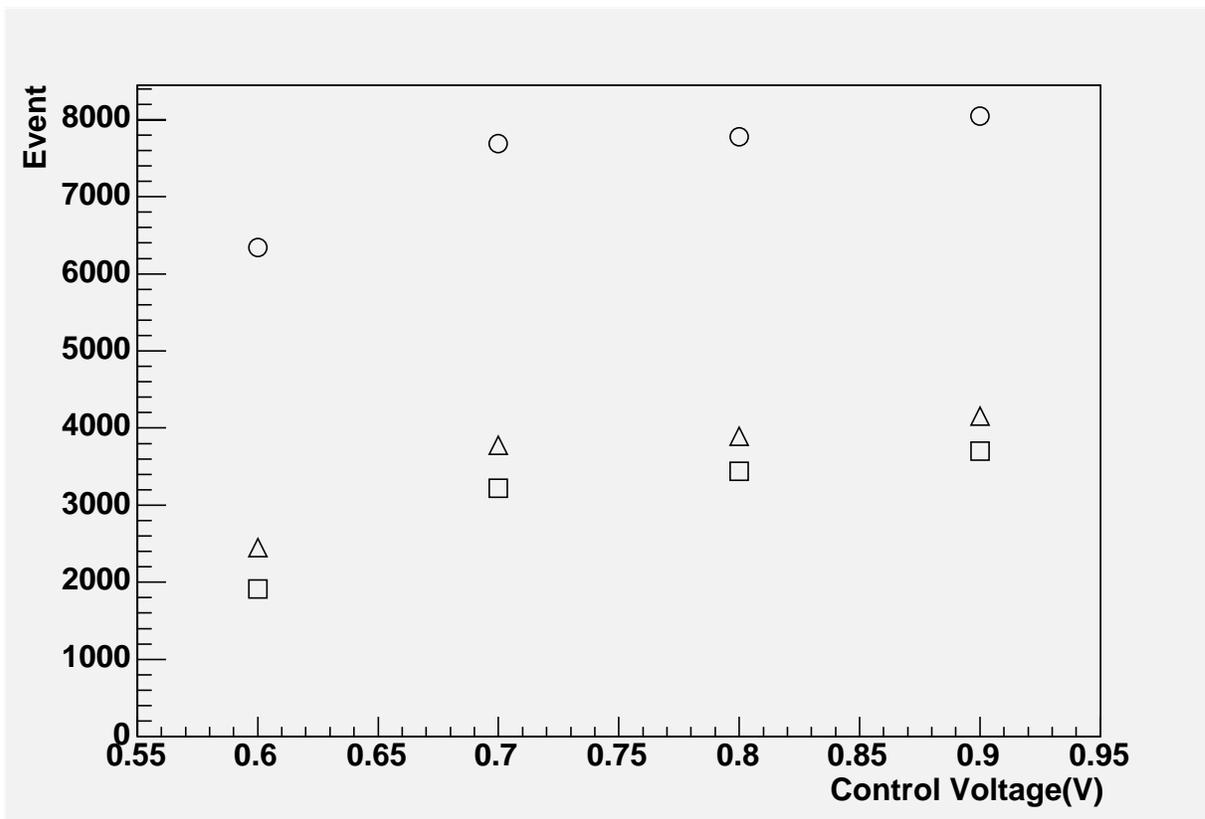


図 3.16: コントロール電圧を変えた時のイベント数の変化 (△ PMT1 PMT2 両方に hit)

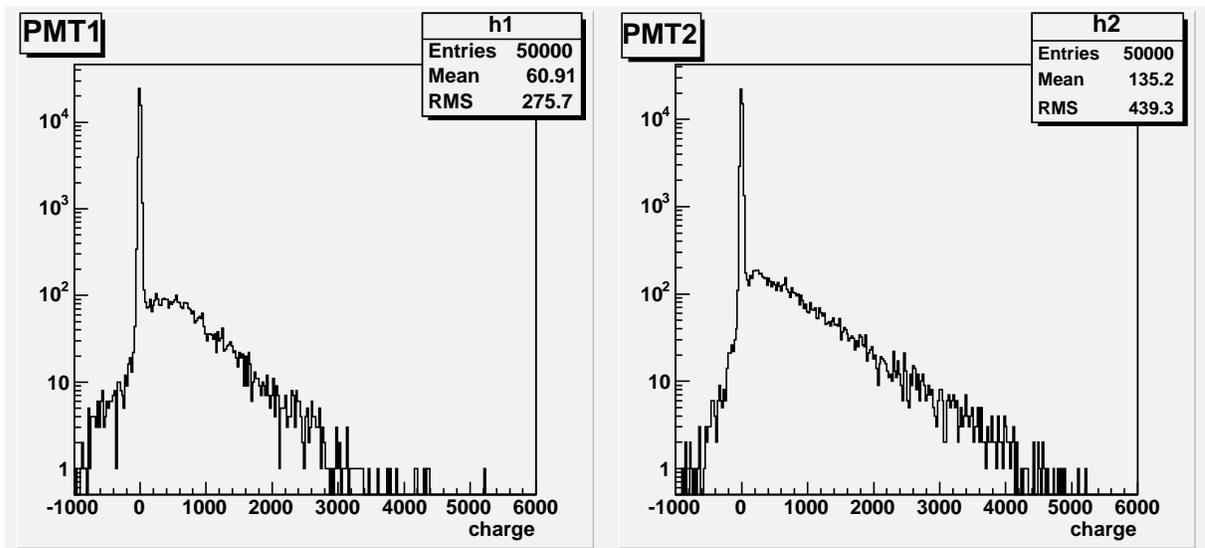


図 3.17: コントロール電圧調整後 左右 PMT の charge

3.5.3 カロリーメータ、シリコン検出器との比較

ファイバー検出器を 0.1mm 間隔で上下に移動させ、カロリーメータ、シリコン検出器との関係を見た。

図 3.18 はファイバーをそれぞれの位置に移動した時の、ファイバーイベントの η 分布である。これをガウス関数でフィットし、その平均値を用いて $\eta - y$ 変換曲線を求めたものが図 3.19 である。横軸はファイバーの Stepping Motor の Motor Count であり、8000 Count が 1mm に相当する。260000 Count のとき η が 0 になっており、ここがビーム中心であると考えられる。

図 3.20 はシリコン検出器上のクラスタの位置を見たものである。色の濃い部分はファイバーにヒットがあったイベントを示している。ファイバーの位置は Motor Count 260000 である。ファイバーにヒットがあるイベントのシリコン上での位置とファイバーの位置の関係を表したのが図 3.20 である。クラスタの位置は分布をガウス関数でフィットしてその $\pm 2RMS$ をもう一度フィットするといったことを最高で 10 回繰り返し、得られた平均値を使用した。ファイバーの位置は Motor Count 260000 を 0mm とした。これらは直線でフィットすることができ、傾きは 0.99 である。本来傾きが 1 になるべきものだが、これはビームの形の影響であると考えられる。ファイバーの直径は 1mm であるが、使用されているビームの幅は非常に狭く、1mm の範囲内でもビーム中心方向に分布が偏り、その結果フィットした直線の傾きが 1 より小さくなると考えられる。ファイバーの位置が 0mm のとき、シリコン上での位置は 31.56mm となっている。ここがシリコン上のビーム中心と言える。

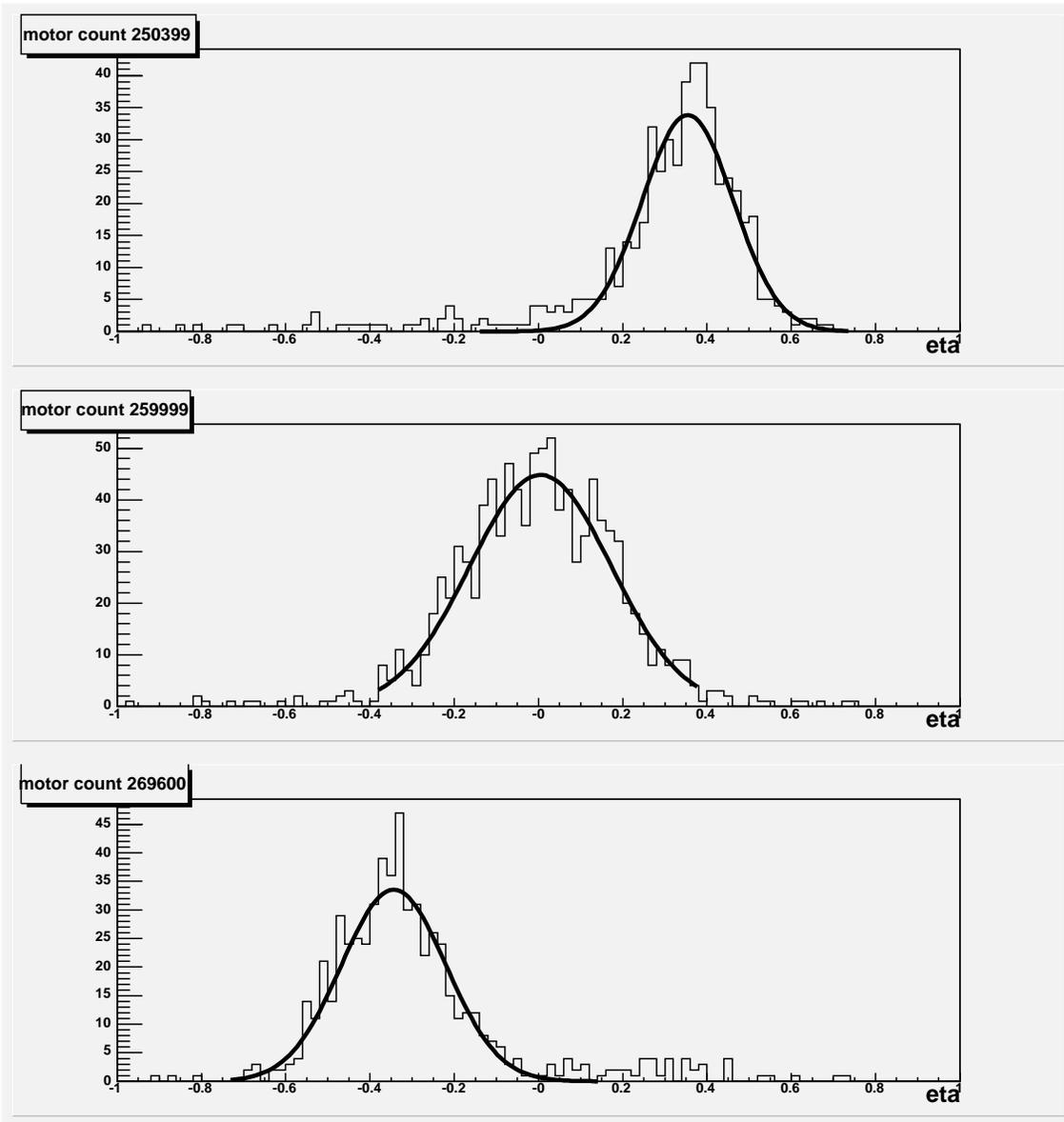
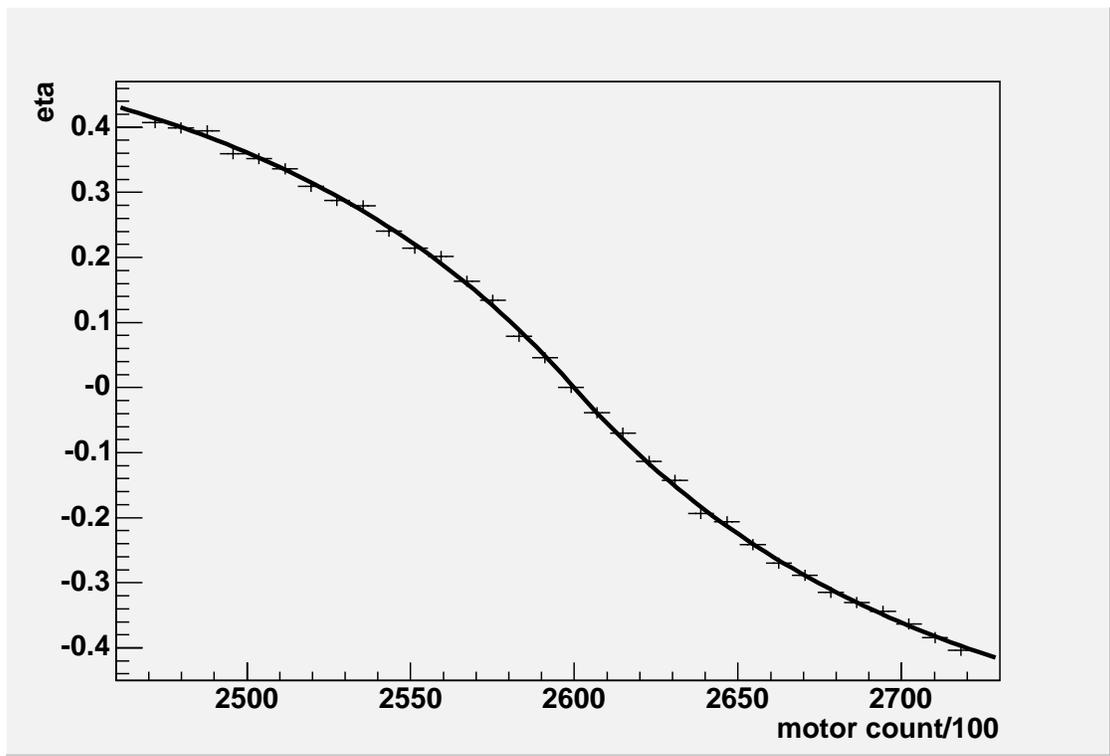


図 3.18: ファイバーでトリガーした η



| | |
|----|------------------|
| p0 | 0.5059 ± 0.1 |
| p1 | 93 ± 19 |
| p2 | 1701 ± 3800 |
| p3 | 2600 ± 0.3 |

図 3.19: ファイバー検出器で見た $\eta - y$ 変換曲線

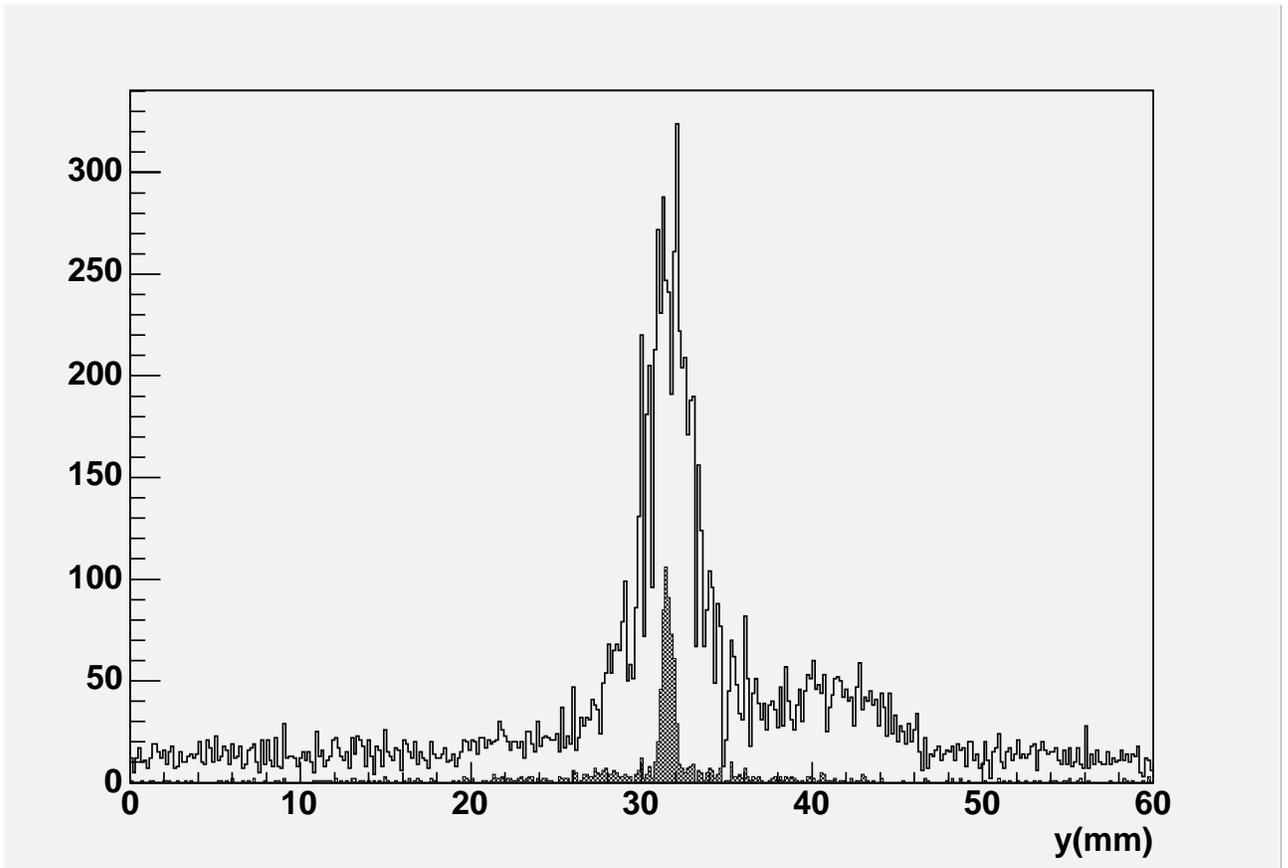
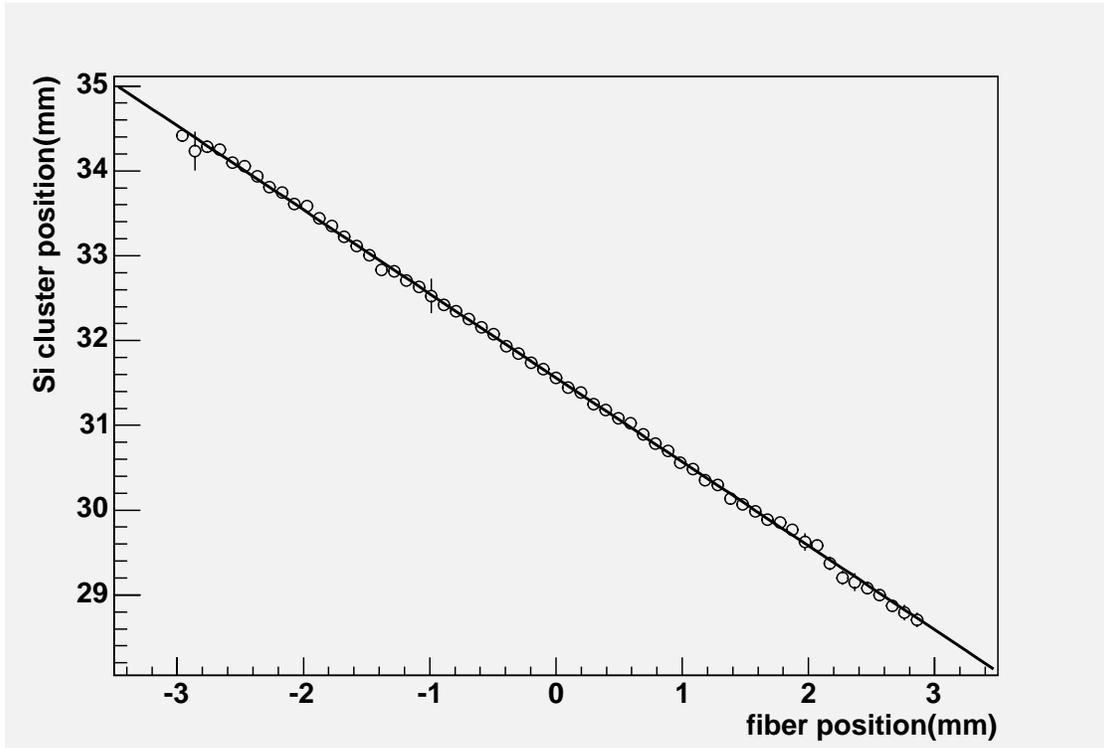


図 3.20: シリコン上のクラスターの位置 (色の濃い部分はファイバー条件あり)



| | |
|----|---------------------|
| p0 | 31.56 ± 0.01 |
| p1 | -0.9906 ± 0.004 |

図 3.21: シリコンとファイバーの直線性

第4章 シミュレーション

4.1 方法

放射線損傷によるシリコンの劣化によって、シリコン検出器の暗電流が増大することが予想される。そこで実際のデータ (50000 イベント) を用いて暗電流の増大がシリコン検出器に与える影響をシミュレーションした。各ストリップのペDESTALのRMSを N_i とすると、ペDESTALを $2N_i$ 、 $3N_i$...に広げることによってシミュレーションを行った。以下のような方法で暗電流を増大させた。

1. 各ストリップのADC値を平均値とするガウス乱数をふり、得られた値を新しいADC値とする
2. これらをもとにペDESTAL、common mode(CM)を計算し直す
3. 新しいADC値からペDESTAL、CMを引き Pulse heightを計算する
4. クラスタを作る

あるイベントに対し、全ストリップの暗電流を増大させたときの Pulse height の変化を示したもの図 4.1 である。左上の 1RMS が最初の状態である。ペDESTALの分布の幅を広げるにしたがって、シグナルの無いストリップのノイズが増大し、疑似的なピークとして観測され、本来のシグナルが見えなくなっていく様子が分かる。

図 4.2 は1つの APV チップの CM 分布の変化を見たものである。ノイズが増大することによって CM の値の平均値は変わらないが、ばらつきは大きくなるのが分かる。

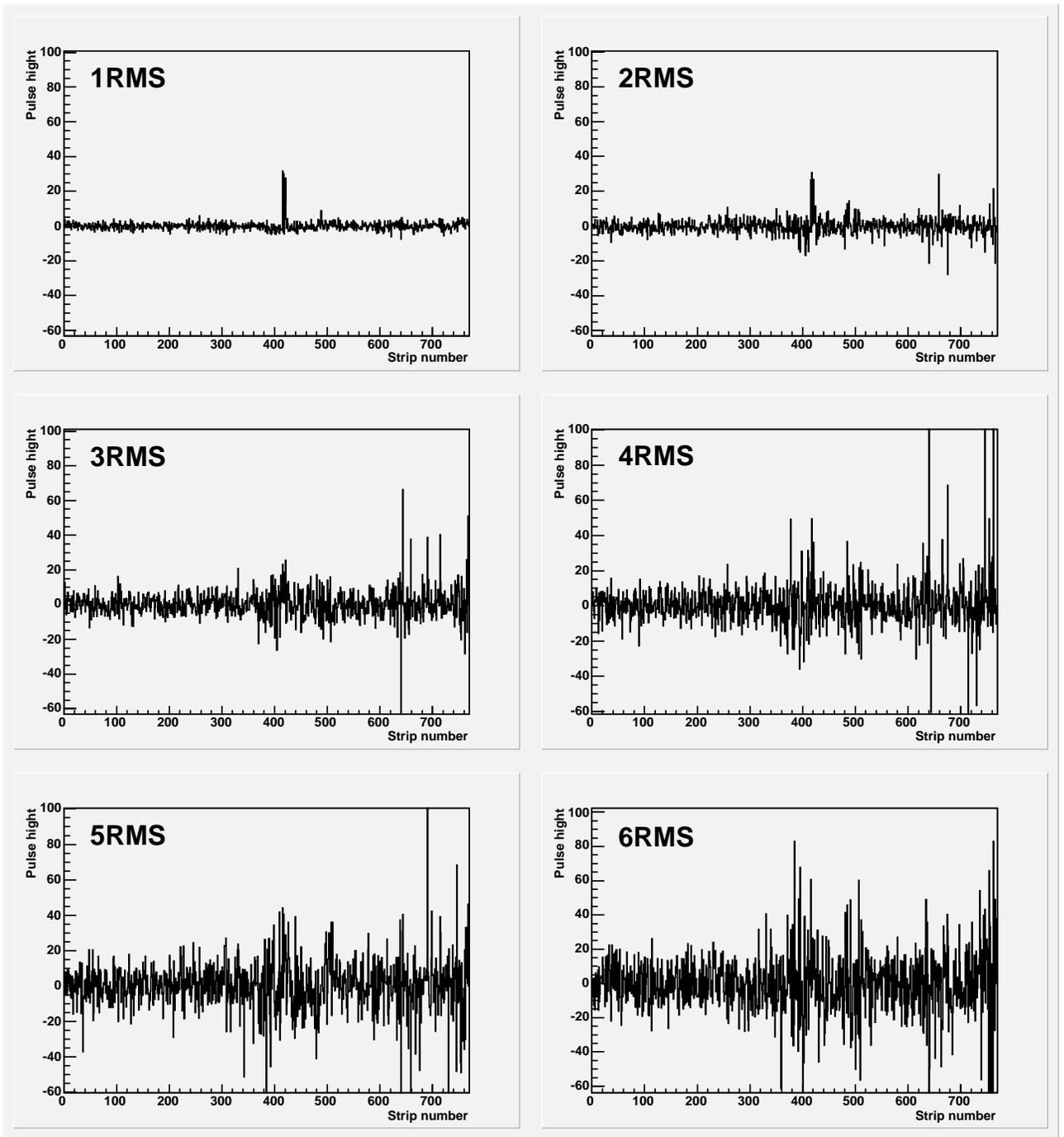


図 4.1: あるイベントの暗電流を増大した様子

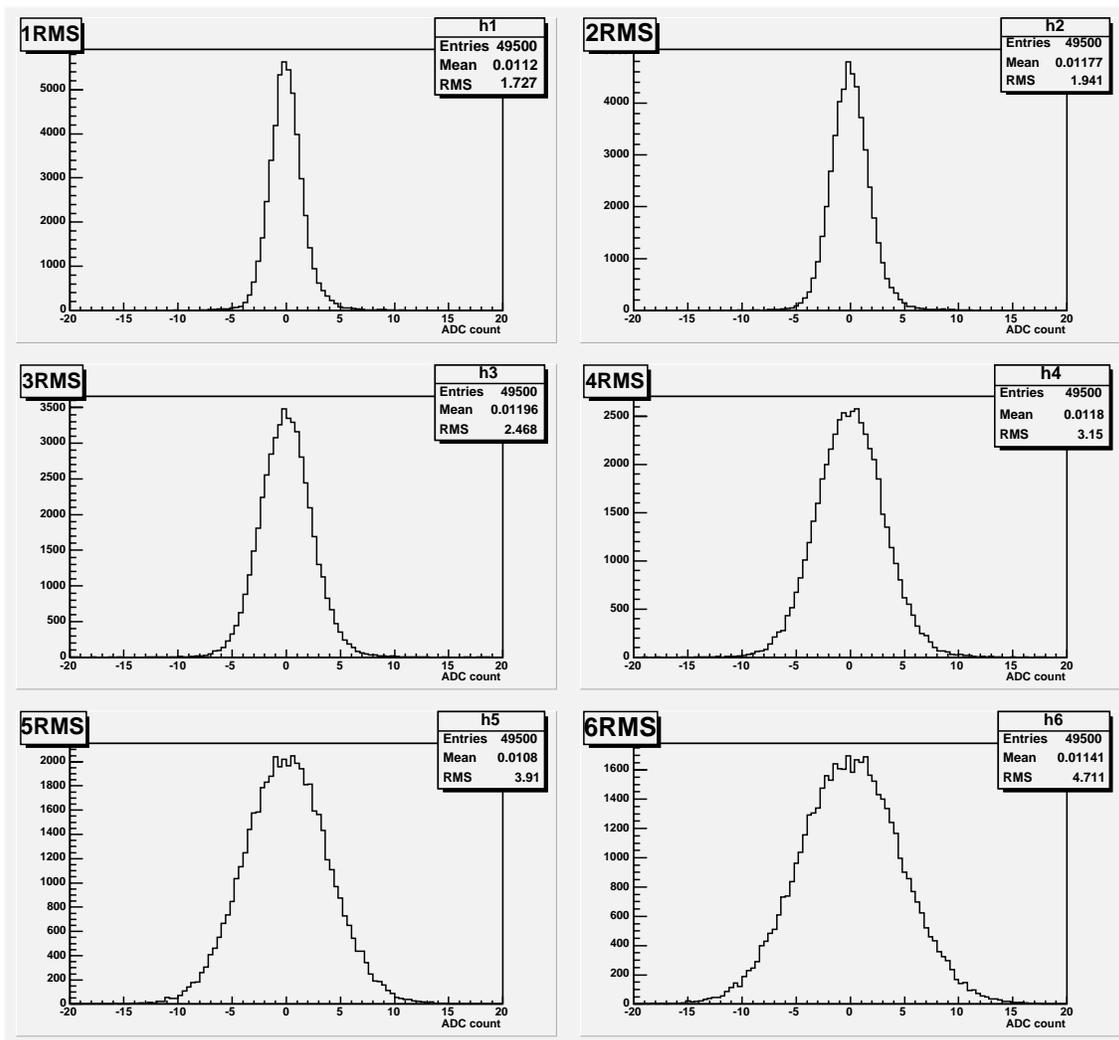


図 4.2: 3 番目の APV25 チップ common mode の変化

4.2 シミュレーション結果

4.2.1 各ストリップに与える影響

ビーム中心付近のストリップ(ストリップ 398)の暗電流を増大させたときの Pulse height の分布の変化を見たものが図 4.3 である。左上のプロットがもともとの状態である。2つあるピークのうち、左側がペDESTAL、右側のがシグナルである。ペDESTALの幅が広がるに従って、ペDESTALとシグナルと区別がつかなくなっていくことが分かる。

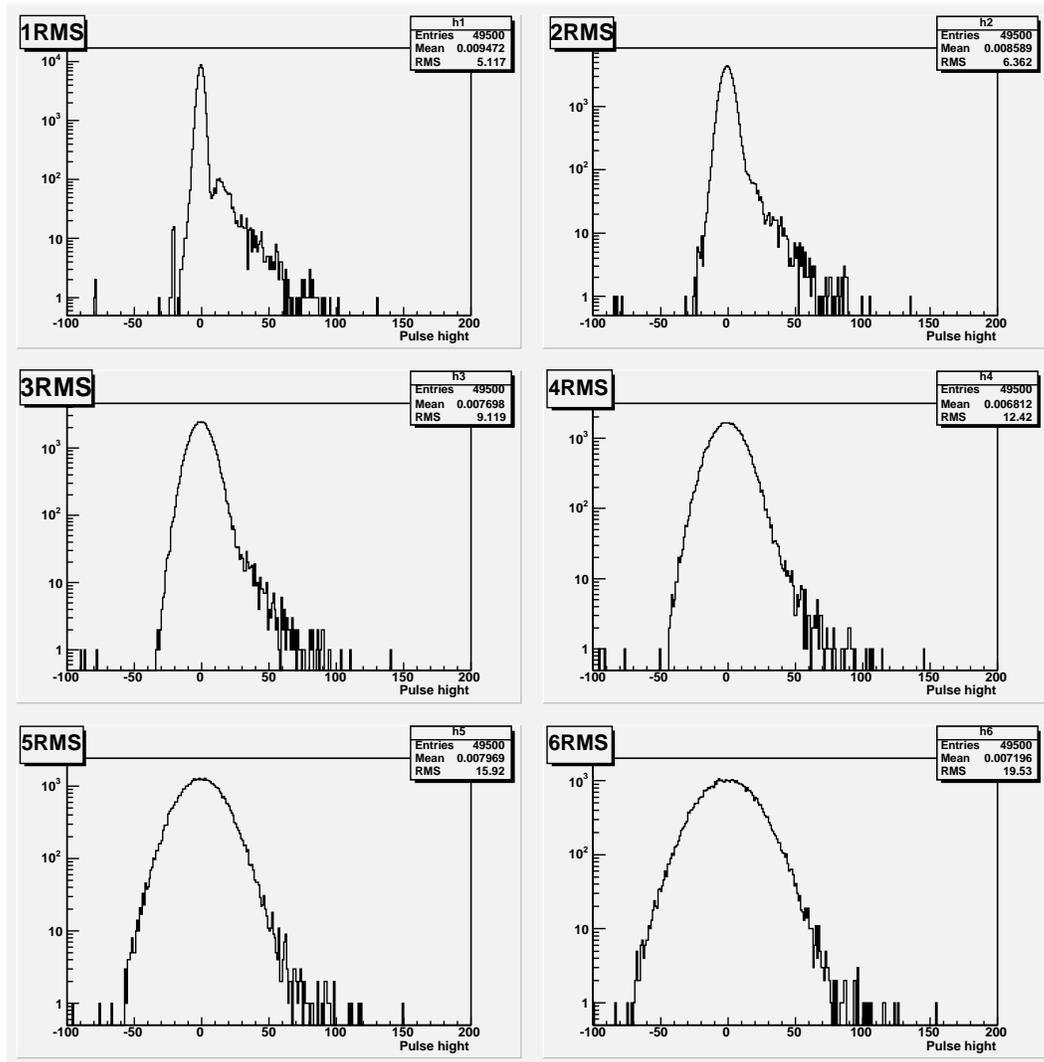


図 4.3: ストリップ 398 の Pulse height の変化

図 4.4 はクラスターを形成する元となる seed の数の変化をビーム中心付近のストリップ (ストリップ 398) とビームから離れたストリップ (ストリップ 125) で見たものである。ビーム中心では seed の減り方が激しくこれによりクラスターが形成されにくくなる。それに対してビームから離れたところでは seed の数は大きく減少しない。このことはシリコン検出器の位置決定精度が落ちることを意味している。

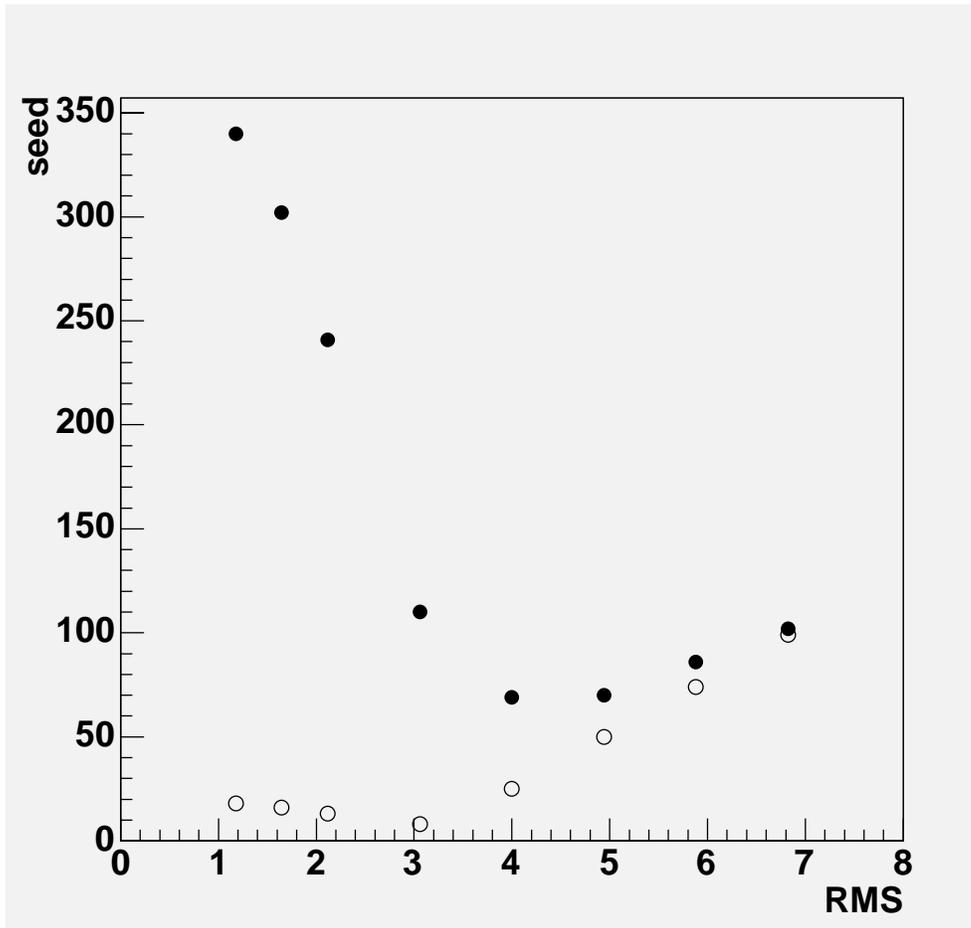


図 4.4: seed の数の変化 (strip 398 strip 125)

4.2.2 シリコンに与える影響

次に全ストリップに対するシミュレーションの結果を示す。通常、 $\eta - y$ 変換曲線を求めるときには、1 クラスターイベントを用いる。図 4.5 は 1 クラスターイベントの数の変化とその charge の平均値の変化を示したものである。シリコン検出器の劣化により 1 クラスターイベントは減少する。その結果 $\eta - y$ 変換曲線の統計精度が下がることが予想される。また、現在の cluster algorithm を使うと、クラスターの charge の平均値は大きくなる。これは暗電流の増大によりペDESTALの RMS が広がり、charge の小さいクラスターはペDESTALに吸収されてしまうためである。その結果 charge の大きなクラスターだけが残り、charge の平均値が増大するのである。

この様子は図 4.6 にも見ることができる。これは 1 クラスターイベントのクラスターの charge 分布である。クラスターの charge が小さいものが順に選ばれなくなり、charge の大きなものだけが残っていることが分かる。また、charge 分布の RMS も次第に大きくなっていることが分かる。

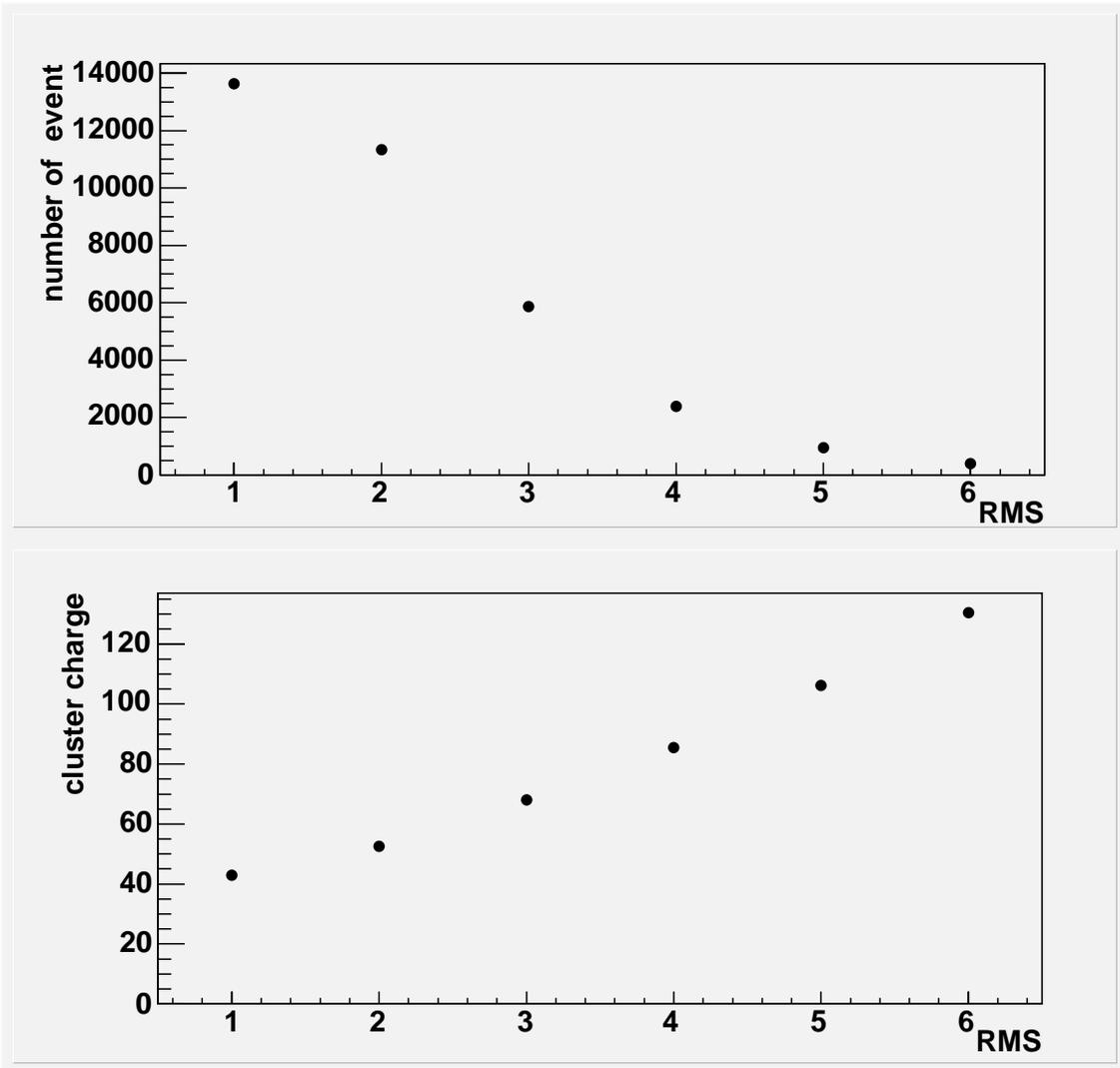


図 4.5: 上 : 1 cluster event の数の変化下 : 1 cluster event の charge 変化

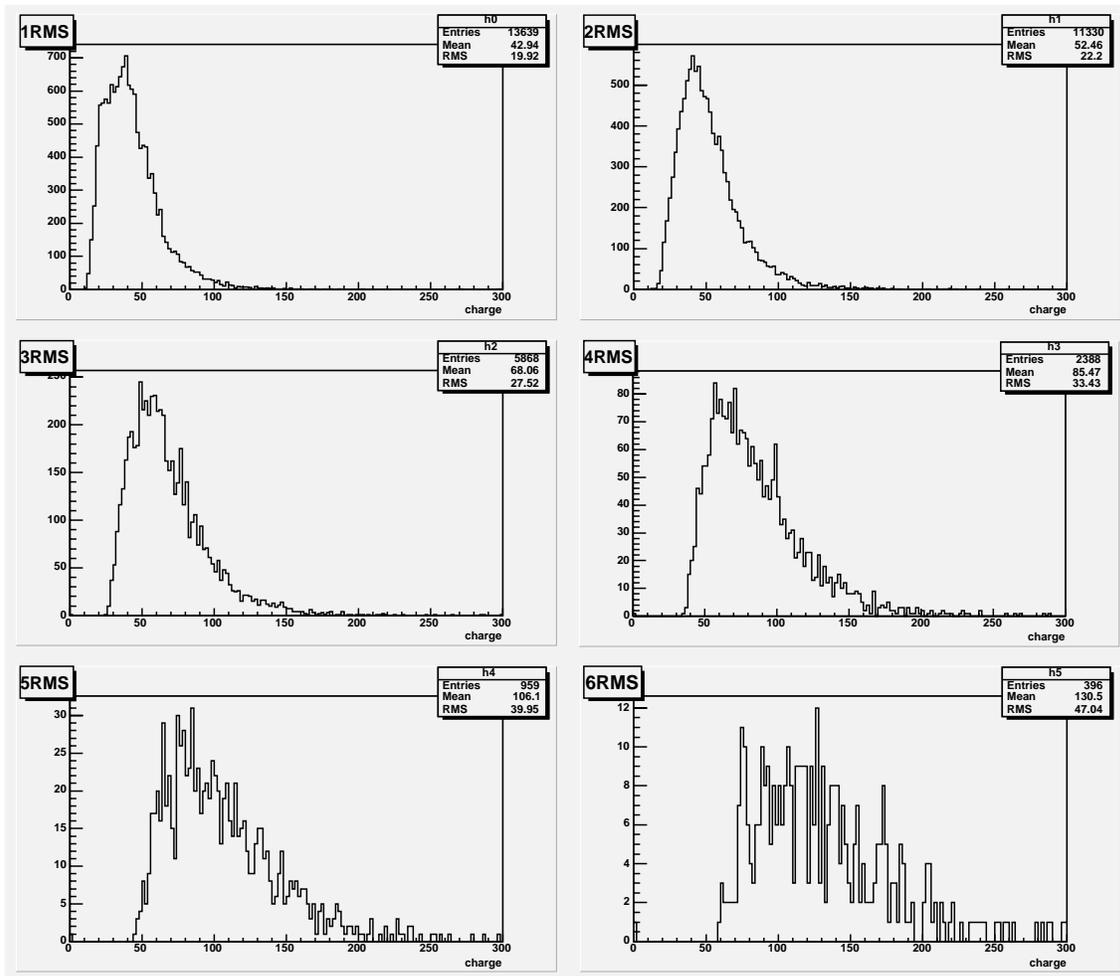


図 4.6: cluster charge の変化

4.2.3 $\eta - y$ 曲線 フィットへの影響

次にこれらの現象が $\eta - y$ 変換曲線の決定精度にどの程度影響を与えるかを調べた。図 4.7 は $\eta - y$ 分布の変化を見たものである。暗電流が増大するにしたがって全体的にイベント数が減り、 $\eta - y$ 分布の形もぼやけていく様子が分かる。この分布を以下の手順で $\eta - y$ 変換曲線でフィットをし、各パラメータの値を求めた。フィットの範囲はビーム中心から $\pm 1.5\text{mm}$ の領域である。

1. y 方向を 0.2mm 間隔でスライスする
2. 各 y での η をガウス分布でフィットする
3. 平均値から $\pm 2\text{RMS}$ の範囲で再びガウス分布でフィットする
4. 平均値の値の差が 0.01 以下になるまで手順 2.3 を繰り返す

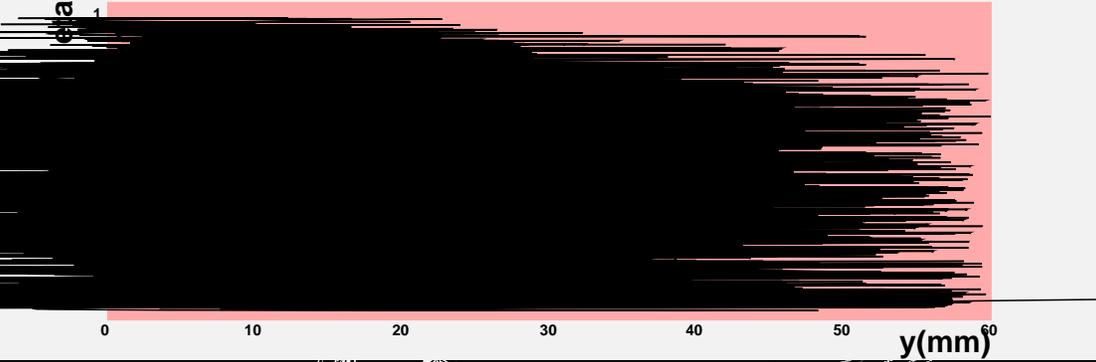
この方法でフィットをし、 $\eta - y$ 変換曲線を求めたものが図 4.8、4.9、4.10 である。劣化が進むにしたがって、フィットに使えるイベントが減り、曲線を正しく求められなくなることが分かる。今回の解析では 4RMS 以上ではフィットが出来なかった。これらのフィット結果を比較するために、それぞれ $\eta - y$ 変換曲線を用いて、analyzing power Π_η を計算したものが表 4.1 である。 1RMS の Π_η の値とくらべ、 2RMS のときは 0.6% 、 3RMS のときは 5% ずれてしまう。この Π_η のずれはそのまま偏極度の誤差に反映される。偏極度測定目標精度は 2% であり、ペDESTAL の RMS が 3 倍になるとそれを上回ってしまうこととなる。

| | 1RMS | 2RMS | 3RMS |
|------------|-------------------|-------------------|------------------|
| p0 | 0.098 ± 0.01 | 0.0689 ± 0.01 | 0.19 ± 0.6 |
| p1 | 0.178 ± 0.03 | 0.146 ± 0.04 | 0.7 ± 1 |
| p2 | 3.3 ± 0.1 | 2.9 ± 0.1 | 4.2 ± 5 |
| p3 | 31.56 ± 0.006 | 31.56 ± 0.008 | 31.56 ± 0.01 |
| Π_η | 0.0475 | 0.0478 | 0.0449 |

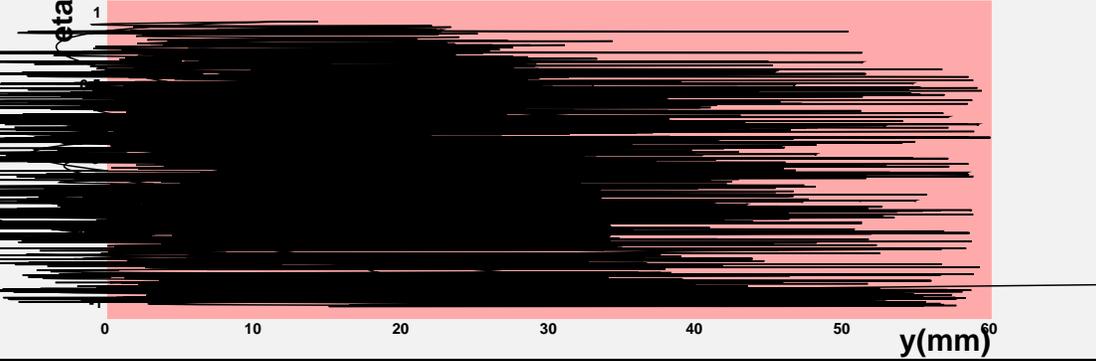
表 4.1: Π_η の変化

1RMS

3RMS



5RMS



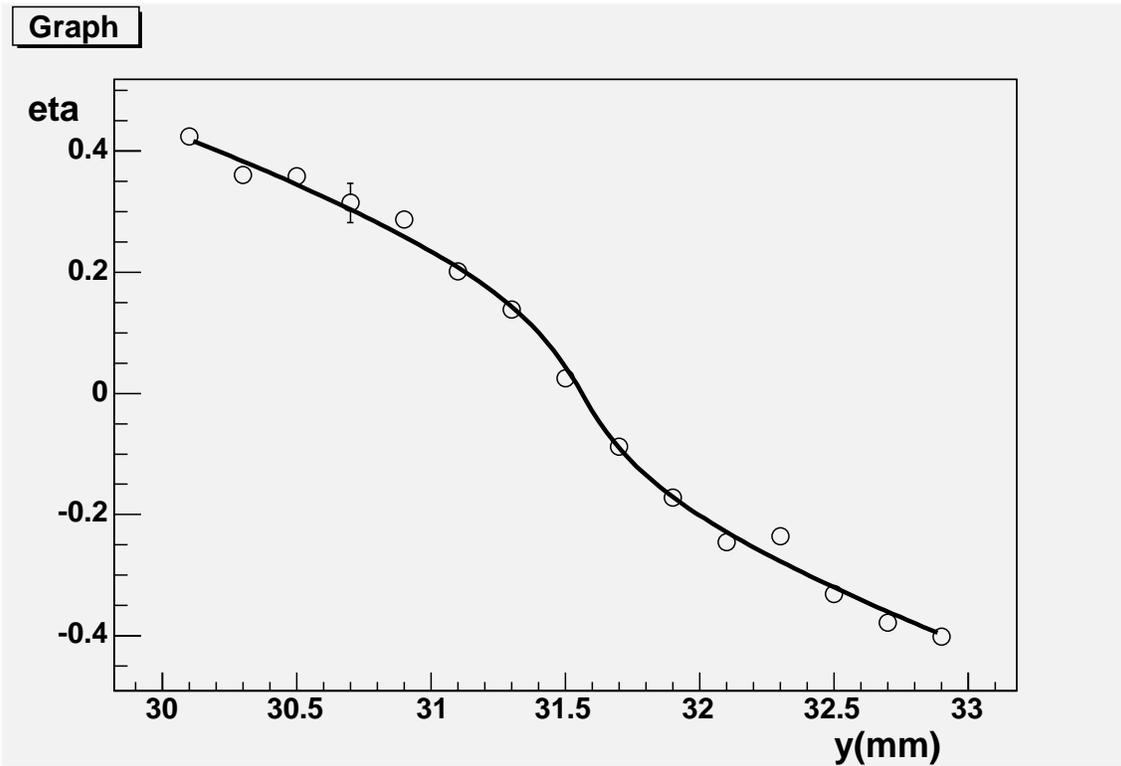


図 4.8: 最初の状態での $\eta - y$ 変換曲線

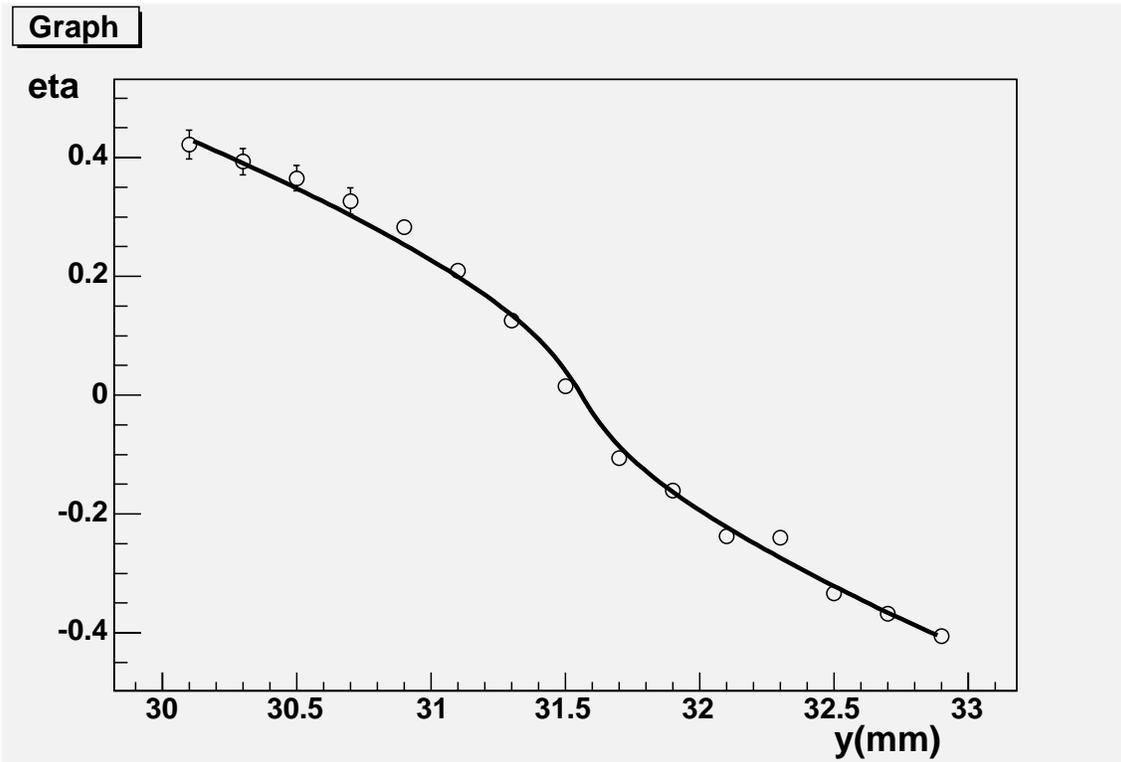


図 4.9: 2RMS に広げたときの $\eta - y$ 変換曲線

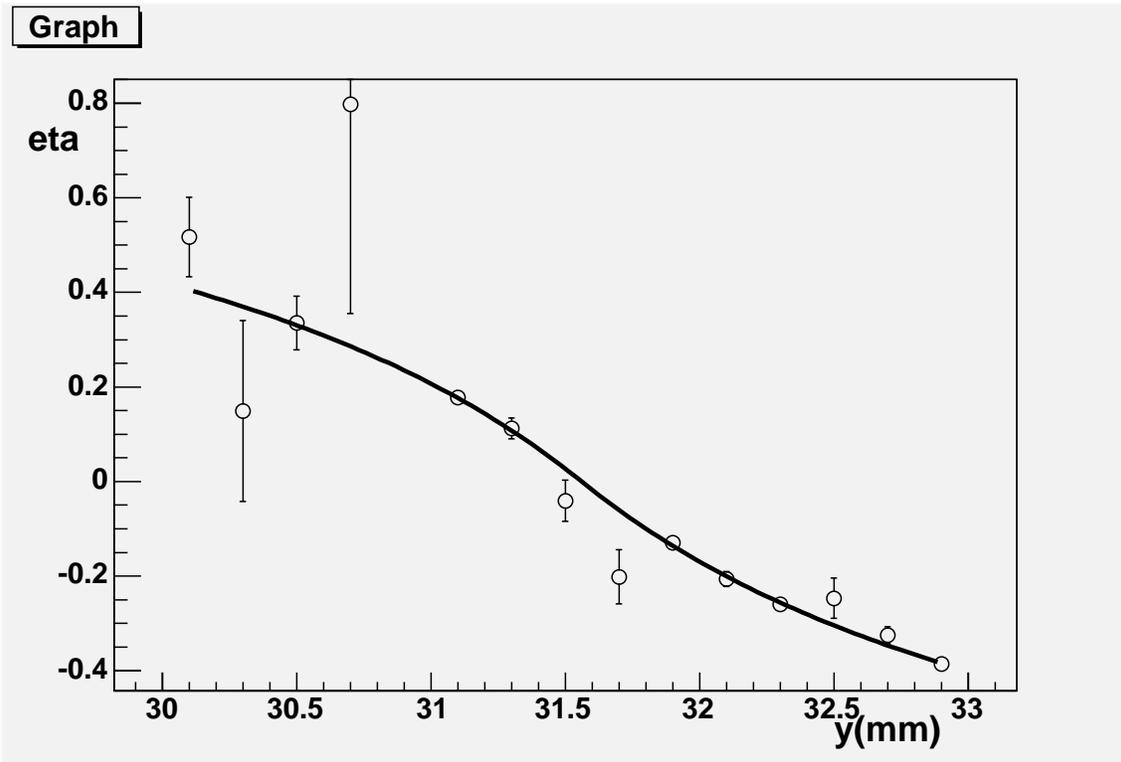


図 4.10: 3RMS に広げたときの $\eta - y$ 変換曲線

第5章 解析結果

5.1 シリコンの劣化モニター

シミュレーション結果から、放射線損傷によるシリコンの劣化により観測されるクラスターの数が減り、クラスターの charge の平均値が増大することが分かった。そこでファイバー検出器を用いて、次のような方法でクラスターの charge を見ることによって、シリコンの劣化をモニターすることとした。

1. ファイバーをモニターしたい位置に移動する
2. データをとる
3. ファイバーの影にある 10 ストリップのクラスター charge 量を見る (図 5.2)

解析には1クラスターイベントを用い、ファイバー検出器をトリガーデバイスとしてシリコンの劣化をモニターする。シリコンの劣化は最もビームが当たる中心付近から始まると考えられる。そこで今回はファイバーをビーム中心から $\pm 1mm$ の範囲内で動かし、劣化をモニターした。

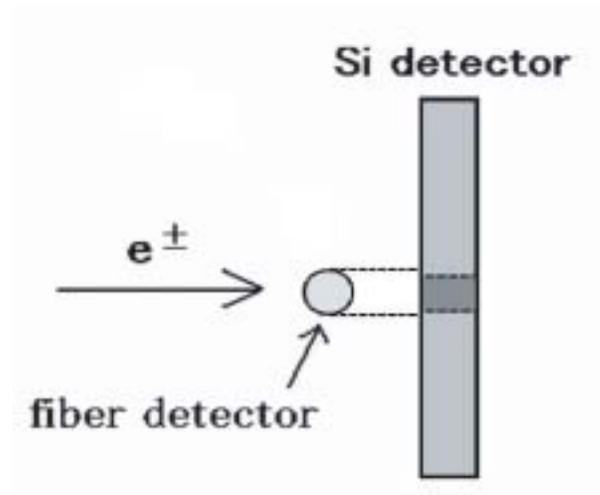


図 5.1: ファイバーの影にあたるストリップ (色の濃い部分) をモニターする

| 日付 | 12/2 | 12/9 | 12/11 | 12/30 | 1/3 | 1/7 |
|---------------|---------|---------|----------|---------|---------|---------|
| 1点の event 数 | 100,000 | 50,000 | 50,000 | 50,000 | 50,000 | 650,000 |
| fiber positon | 5点 | 13点 | 81点 | 13点 | 13点 | なし |
| 全イベント数 | 500,000 | 650,000 | 4050,000 | 650,000 | 650,000 | 650,000 |

表 5.1: data taking

ファイバーの位置がビーム中心から 0mm 、 $\pm 0.5\text{mm}$ 、 $\pm 1\text{mm}$ の5点においてクラスタの charge の時間的変化を見た。図 5.2 は各位置でのファイバーの影にあるストリップに落ちたクラスタの charge 分布である。ファイバーにヒットがある1クラスタイベントのみを使用した。このような分布の平均値を用いて劣化モニターを行う。今回はこの charge 量の安定性を確かめるために短期間に5回、ファイバーを用いたデータを取った(表 5.1)。

図 5.3 はそれぞれの位置でのクラスタの charge 量の変化である。全ての位置において平均値を求め、各点の平均値からの差を求めた。今回の測定では全ての点でその差は6%以内であった。更に正確な結果を出すため、今後も時間変化を見る必要がある。

5.2 $\eta - y$ 変換曲線の時間変化

$\eta - y$ 変換曲線を測定と同時に決定することによって系統誤差を減らし、偏極度測定の精度をあげるのがシリコン検出器の目的である。そこで、シリコン検出器を用いて $\eta - y$ 変換曲線の時間的変化を調べた。今回の解析には約一ヶ月間に取られた6回分のデータ(図 5.1)を使用した。

5.2.1 $\eta - y$ 変換曲線の決定

図 5.4 はシリコン上の各点での η の分布を表したものである。各 y に対応する η の値は以下のようにして求めた。

1. y 方向を 0.1mm 間隔でスライスする
2. 各 y での η をガウス分布でフィットする
3. 平均値から $\pm 2RMS$ の範囲で再びガウス分布でフィットをする
4. 平均値の差が 0.1 以下になるまで手順 2.3 を繰り返す

このようにして求められた η と y を用いて、 $\eta - y$ 変換曲線を求めたものが図 5.5 である。全てのデータに対して同様に $\eta - y$ 変換曲線を求めた。

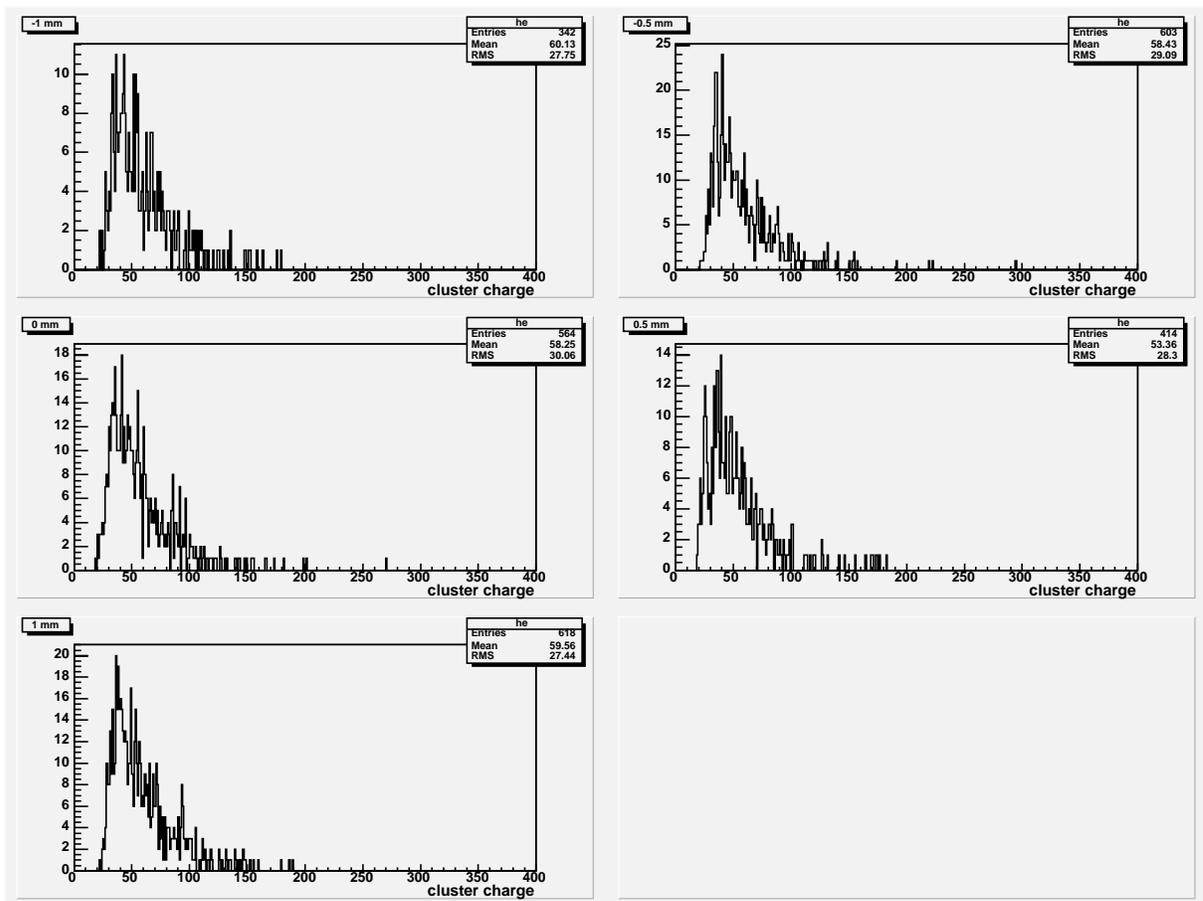


図 5.2: 各位置でのファイバーイベントの cluster charge

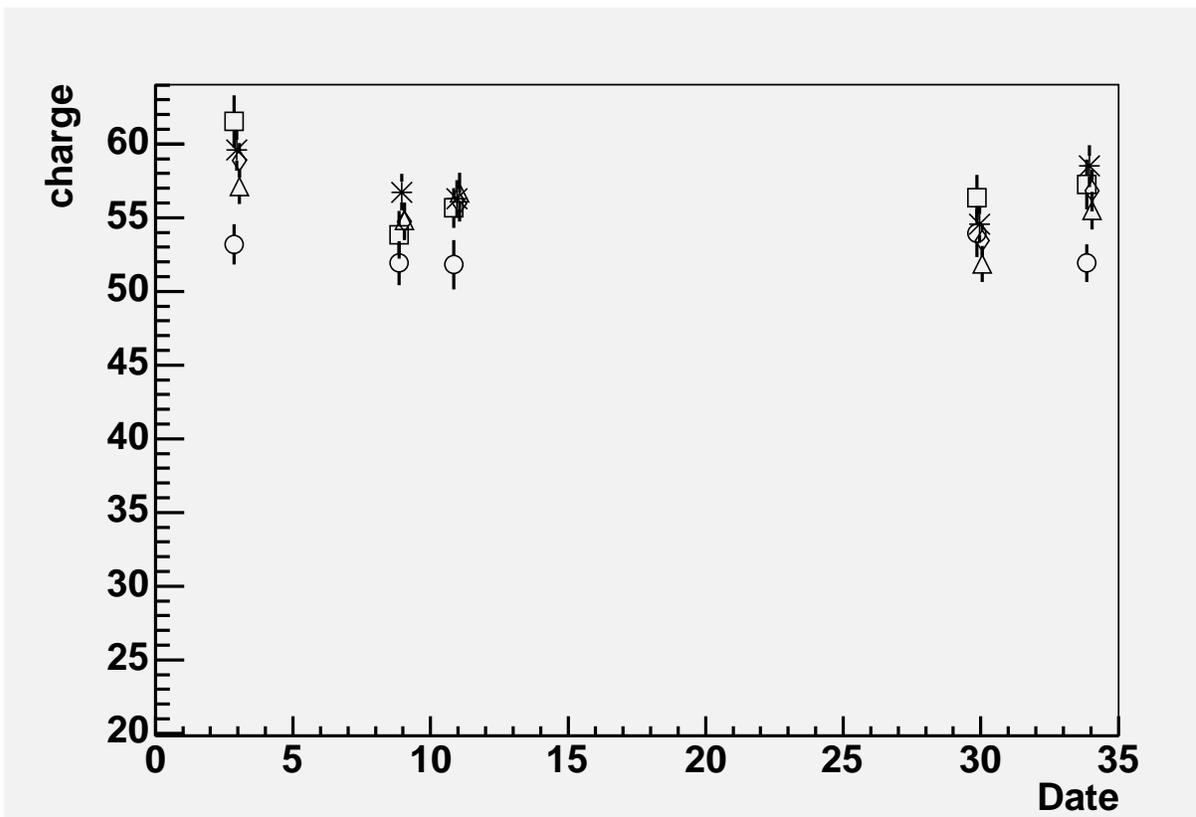


図 5.3: 時間的 charge 変化 (□ $-1mm$ △ $-0.5mm$ * $0mm$ ◇ $0.5mm$ ○ $1mm$)

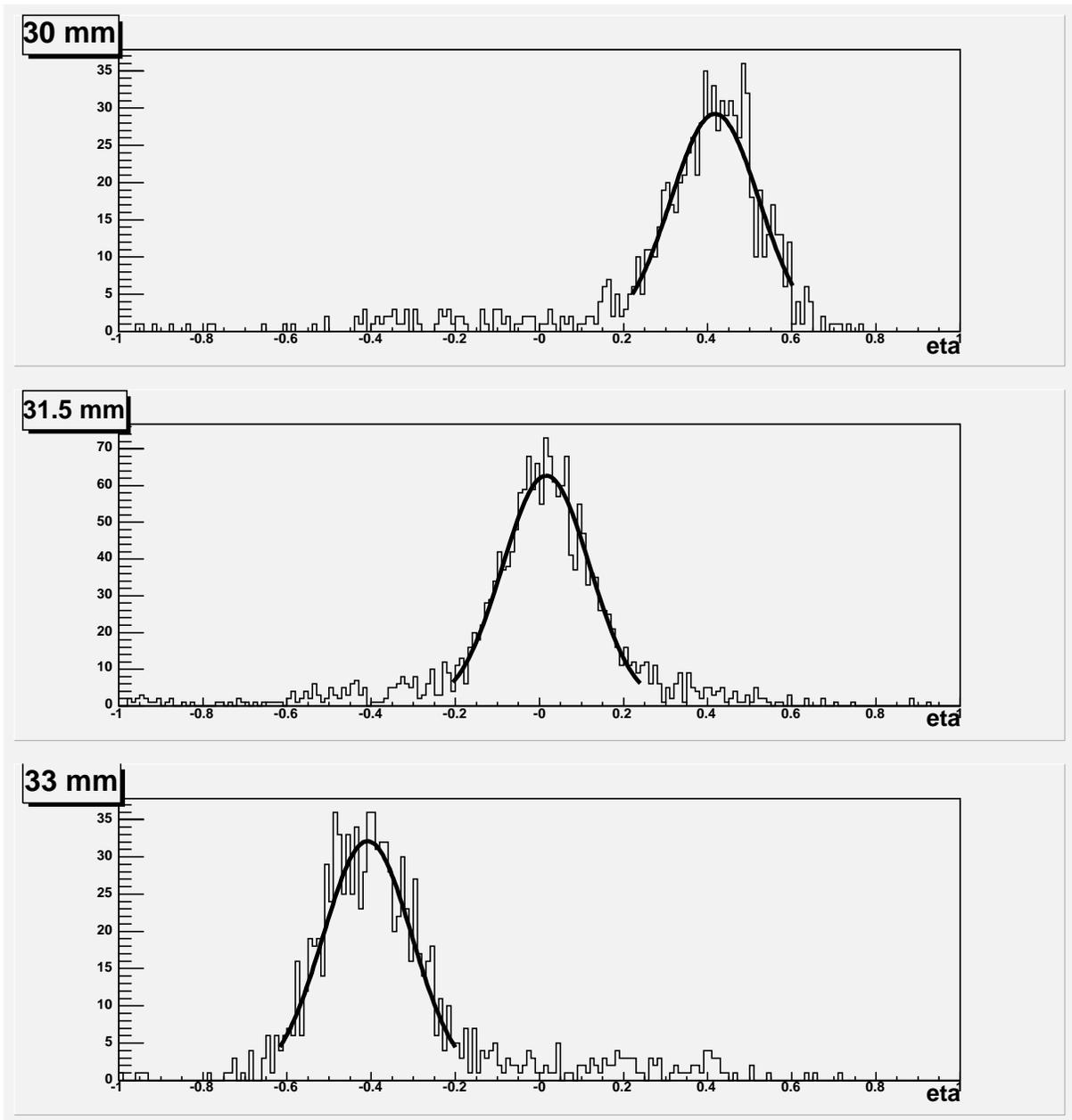


図 5.4: η 分布をガウス関数でフィット

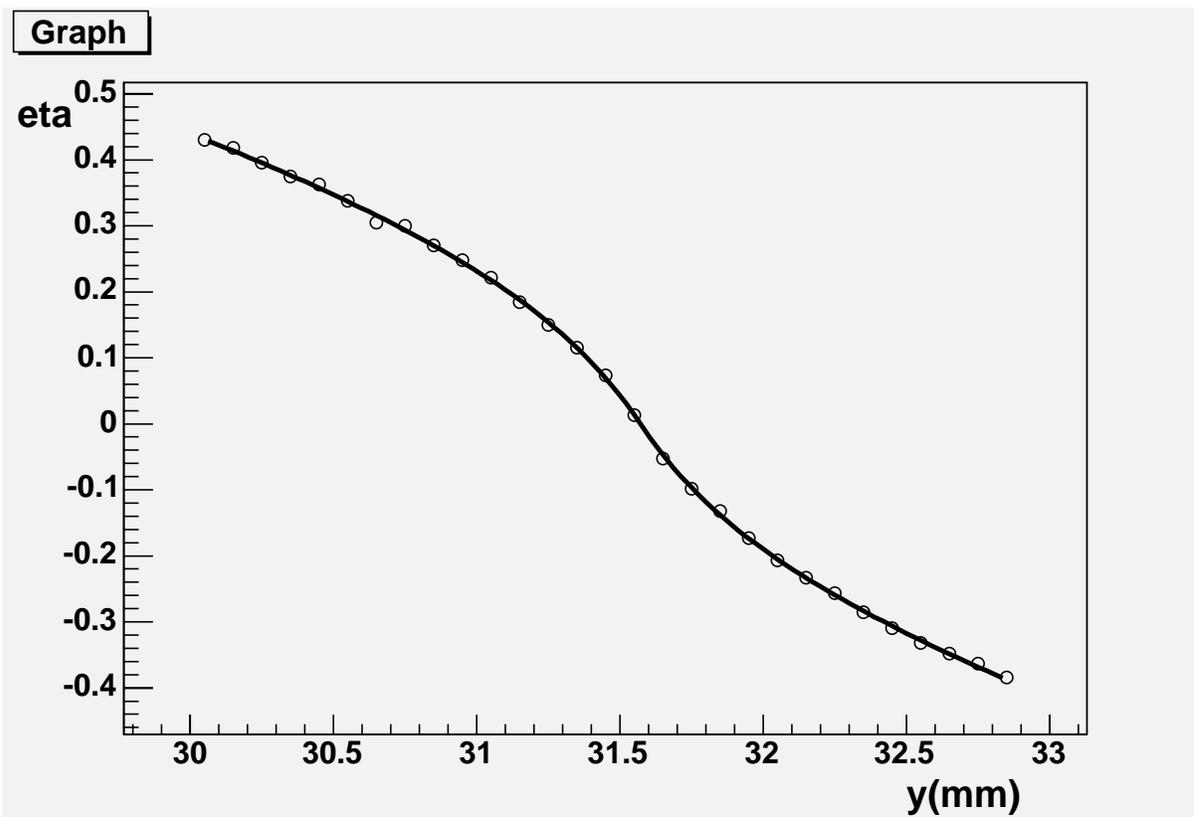


图 5.5: $\eta - y$ 变换曲线 (12/11)

5.2.2 $\eta - y$ 変換曲線の時間変化

$\eta - y$ 変換曲線の各パラメータの変動が偏極度に与える影響を調べるためには、 Π_η を求めるて比較する必要がある。そこで次のようなシミュレーションを行い、コンプトン散乱後の光子の y 分布を求め、 $\eta - y$ 変換曲線によってこれを η 分布に変換することによって Π_η を求めた。

100%偏極した電子ビームに左右に 100%円偏光させたレーザーを当て、65m 離れたところでの散乱後の光子の位置をシミュレーションした。これには検出器の効果は含まれておらず、理想的な状態での位置非対称性を見たことになる。このシミュレーションから得られた位置の非対称性を見たものが図 5.6 である。光子のエネルギーは非対称性が最もよく現れる 5.2GeV ~ 11.9GeV のイベントを用いた。この結果から y に対する Π_y は次のように求まる。

$$\Pi_y = \frac{\langle y \rangle_L - \langle y \rangle_R}{2} = \frac{0.1456 - (-0.1444)}{2} = 0.145 \pm 0.002 \quad (5.1)$$

Π_y の典型的な値は 0.142 mm であり、理想的な状態でのシミュレーションであることを考慮すれば、矛盾がない値が得られたと言える。

次に 5.2.1 の手順で求めた $\eta - y$ 変換曲線を用いて、この分布の位置情報を η に変換し、コンプトン散乱後の光子の η 分布を得た。12月2日のデータから得られた $\eta - y$ 変換曲線を用いた η 分布が図 5.7 である。このときの Π_η は次のように求まる。

$$\Pi_\eta = \frac{\langle \eta \rangle_L - \langle \eta \rangle_R}{2} = \frac{0.05201 - (-0.04071)}{2} = 0.0463 \quad (5.2)$$

同様に他の日に取られたデータから求めた $\eta - y$ 変換曲線を使って η 分布を作り、 Π_η を求め、比較した (表 5.2)。今回の解析結果では $\eta - y$ 変換曲線のパラメータは変化したものの、 Π_η の変動は 2.3%であった。よって、シリコン検出器を導入したことにより、 $\eta - y$ 変換曲線のこのような変動による系統誤差が解消されたといえる。

| Date | 12/2 | 12/9 | 12/11 | 12/30 |
|------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| p0 | 0.12 ± 0.01 | 0.13 ± 0.01 | 0.10 ± 0.01 | 0.14 ± 0.01 |
| p1 | 0.33 ± 0.04 | 0.36 ± 0.03 | 0.265 ± 0.03 | 0.35 ± 0.03 |
| p2 | 3.6 ± 0.1 | 3.7 ± 0.1 | 3.3 ± 0.1 | 3.7 ± 0.1 |
| p3 | 31.58 ± 0.001 | 31.57 ± 0.001 | 31.57 ± 0.002 | 31.58 ± 0.001 |
| Π_η | 0.0463 | 0.0463 | 0.0472 | 0.0474 |

| Date | 1/3 | 1/7 |
|------------|-------------------|-------------------|
| p0 | 0.12 ± 0.01 | 0.12 ± 0.01 |
| p1 | 0.32 ± 0.02 | 0.30 ± 0.02 |
| p2 | 3.6 ± 0.1 | 3.6 ± 0.1 |
| p3 | 31.57 ± 0.001 | 31.57 ± 0.001 |
| Π_η | 0.0464 | 0.0466 |

表 5.2: 各変数と Π_η

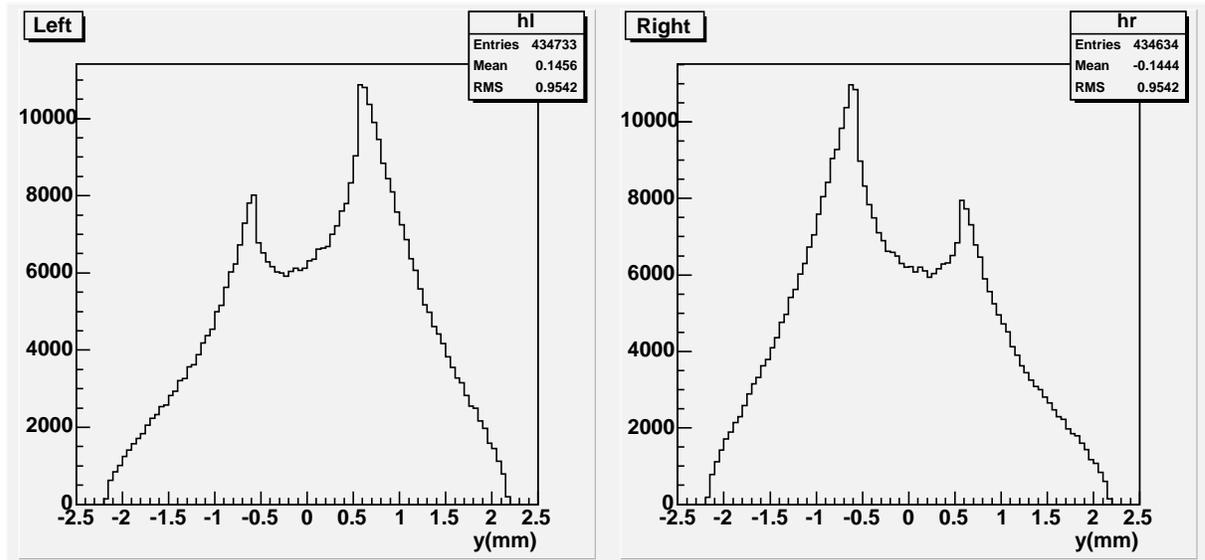


図 5.6: 左右円偏光レーザーを当てたときに散乱された光子の y 分布

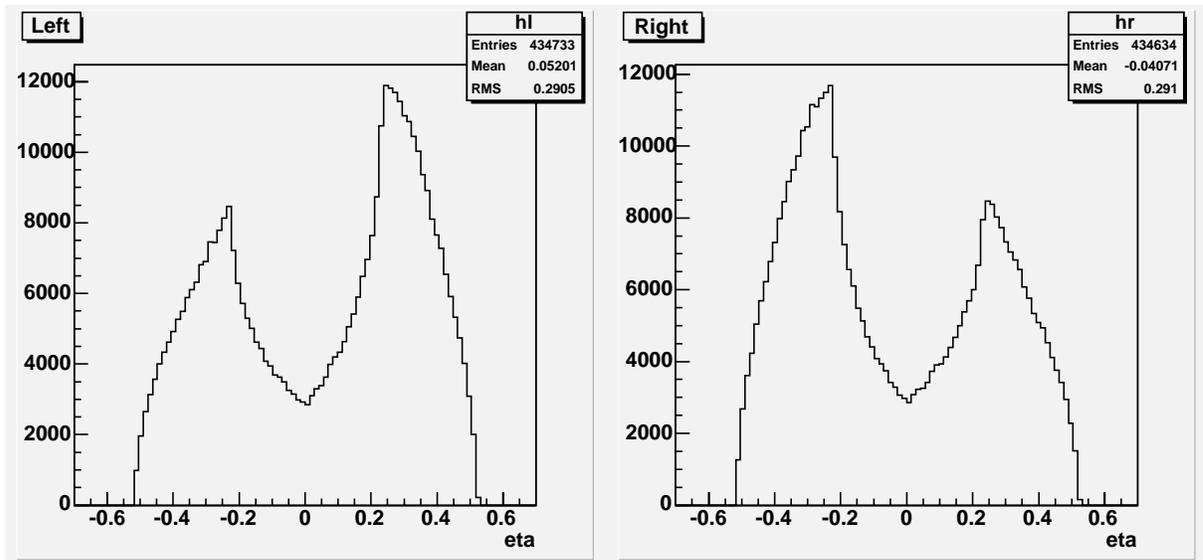


図 5.7: 左右円偏光レーザーを当てたときに散乱された光子の η 分布

第6章 結論

HERA Iにおいて横偏極度測定 of 系統誤差の最大の要因は $\eta - y$ 変換曲線によるものであった。そこで HERA II からシリコン検出器とファイバー検出器が導入された。シリコン検出器の役割は垂直方向の位置を測定し、 $\eta - y$ 変換曲線を偏極度測定と同時に決定することにより、この誤差を解消することである。今回は約1ヶ月間に6回の測定を行った。各データに対する $\eta - y$ 変換曲線から Π_η を求めたところ、その変動は2.3%であった。シリコン検出器導入によりこのような変動が解消されたと言える。

シリコン検出器には年間 $\sim 2\text{Mrad}$ の放射線があたり、放射線損傷によるシリコンの劣化が予想される。シリコン検出器の劣化をモニターすることが、我々の作製したファイバー検出器の役割である。劣化によってシリコン検出器の暗電流が増大することが予想される。そこで、実際に取られたデータを用いて暗電流の増大をシミュレーションし、劣化が偏極度測定に与える影響を調べた。その結果、劣化が進むにしたがって、クラスター数が減少、さらにクラスターの charge の平均値が大きくなることが分かった。クラスター数の減少は、 $\eta - y$ 変換曲線の統計精度が落ちることを意味している。ペDESTAL の RMS が2倍に増大したときには Π_η の値は本来の値と0.6%ずれ、RMS が3倍になったときは5%ずれてしまう。これは偏極度測定の目標精度である2%を上回る事となる。

そこでファイバー検出器をトリガーデバイスとし、シリコンのクラスターの charge を見ることによって劣化をモニターすることとした。今回は約1ヶ月間にデータを5回取得し、クラスターの charge の時間的安定性を見た。シリコンの劣化は放射線が最もあたるビーム中心付近から進むと考えられるため、中心から $\pm 1\text{mm}$ の範囲でファイバーを動かしデータを取った。その結果、charge の平均値の時間的変動は全ての位置で6%以下であった。今後、さらに charge の変動を見る必要がある。

謝辞

今回この研究テーマを与えてくださり、細部にわたり指導してくださった浜津良輔先生に心から感謝致します。ミーティングなどにおいて研究に関する様々な助言をしてくださった、住吉孝行先生、千葉雅美先生、汲田哲郎先生に感謝致します。また、一昨年に退官なされた広瀬立成先生、昨年お辞めになった五十子満大先生に感謝いたします。

KEKの久世先生、山崎先生にはDESY研究所滞在中に親切に指導していただきました。心よりお礼申し上げます。ZEUS日本グループのスタッフである、山田先生、徳宿先生、鶴貝先生、伊賀先生、喜多村先生にはミーティングにおいて、多くの助言を頂きました。長野先生にはお忙しい中、今回のデータの多くを取っていただきました。お礼を申し上げます。POL2000グループのStefan Schmitt氏、Vahagn Gharibyan氏にはファイバー検出器インストールの際、大変お世話になりました。深く感謝致します。

東京大学の河野さん、俵さん、香川さん、奈良女子大学の片岡さんにはDESY滞在中、研究だけでなく生活面でも面倒を見て頂きました。また、李さん、太田さん、藤本さん、堀さんとともにドイツに滞在することができ、楽しい時間を過ごすことができました。心より感謝致します。

犬塚将英さん、松澤邦裕さんには卒研時代からお世話になり、基礎的な事から教えて頂きました。また、研究生活における様々な相談にも乗っていただきました。心より感謝致します。

最後に日々の研究生活でお世話になった、高エネルギー実験研究室のみなさんに感謝します。

参考文献

- [1] R.J.Cashmore et al., Electroweak Physics at HERA:Introduction and Summary,Proceedings of the Workshop: Future Physics at HERA Vol.1, edited by G.Engelmann, A.De Roeck and R.Klanner, Hamburg(1996) 129.
- [2] F.Zetsche, Lepton Beam Polarisation at HERA,ibid.222.
- [3] R.Beyer et al., Electroweak Precision Tests With Deep Inelastic Scattering at HERA,ibid.140
- [4] O.Deppe et al., Measurement of Weak Neutral Current Couplings of Quarks of at HERA,ibid.163
- [5] C.Collins-Tooth et al.,The Transverse Polarimeter(TPOL) Test Beam at DESY in January-February 2001,June 2001, ZEUS-01-019
- [6] T.Behnke et al.,The Transverse Polarimeter(TPOL) Test Beam at CERN in July-August 2001,October 2002,ZEUS-02-019