

2006 修士論文

Deflection of charged particles by Si crystals

指導教官:高橋 徹

February 14, 2006

広島大学大学院
先端物質科学研究科量子物質科学専攻
光子物理学研究室

M043326

上田 敬太郎

Deflection of charged particles by Si crystals

上田 敬太郎

平成 18 年 2 月 14 日

目次

第1章	序論	3
1.1	Channeling 現象	3
1.2	研究背景と目的	4
第2章	結晶中のポテンシャルと荷電粒子の運動	6
2.1	Lindhard ポテンシャル	6
2.2	結晶中の荷電粒子の運動	8
第3章	電子ビームを用いた実験	10
3.1	実験セットアップ	10
3.2	電子ビームの角度広がり	12
3.2.1	ビームサイズ測定	12
3.2.2	角度広がり	12
3.3	測定	12
3.4	キャリブレーション	13
3.5	解析方法	14
第4章	電子ビームを用いた実験の結果	15
第5章	陽子ビームを用いた実験	20
5.1	実験セットアップ	20
5.2	結晶を用いた陽子ビームの偏向実験	22
5.3	解析方法	22
5.3.1	偏向した陽子ビームの強度の見積もり方	22
5.3.2	メインビームの強度の見積もり方	24
5.3.3	結晶に入った陽子ビームの割合	24
第6章	陽子ビームを用いた実験結果	26
第7章	議論	28
第8章	結論	29

第9章 謝辞

第1章 序論

1.1 Channeling現象

規則正しい結晶構造を持った結晶中を荷電粒子が運動する場合、荷電粒子は結晶中の原子の電磁ポテンシャルに束縛されて、荷電粒子は結晶面及び軸に沿って運動する。この現象は channeling 現象と呼ばれている。図 1.1 は channeling 現象によって、荷電粒子が結晶軸に沿って運動する様子である。

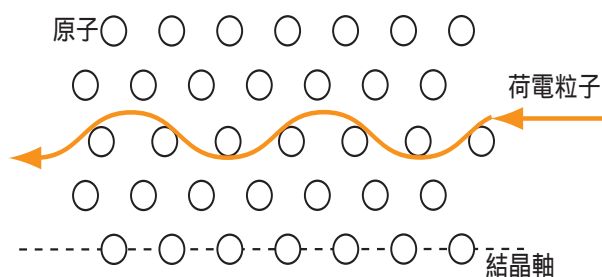


図 1.1: 結晶軸に沿って運動する荷電粒子の様子

この時、荷電粒子を結晶面、軸に対して小角度で入射すれば、荷電粒子は結晶面、軸にの電磁ポテンシャルにより束縛される。よって、結晶に入射された荷電粒子は結晶面、軸の方向に沿って運動する (図 1.2)。

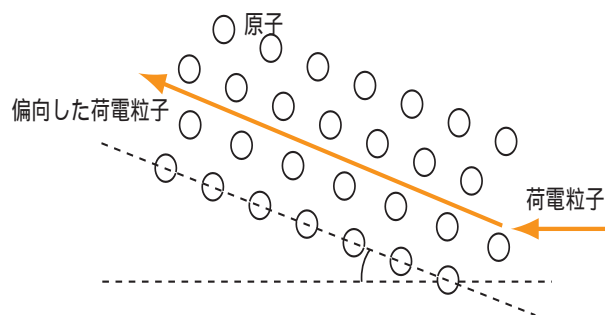


図 1.2: 結晶軸に対して小角度で荷電粒子を入射した様子

また、曲がった結晶に荷電粒子を入射すると、荷電粒子は曲げられた結晶面、軸に沿って運動する (図 1.3)。

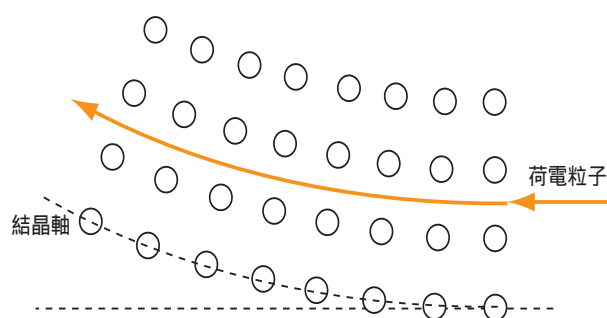


図 1.3: 曲がった結晶中を運動する荷電粒子の様子

この現象を用いれば、結晶を使用して荷電粒子を偏向させることができると考えられる。

1.2 研究背景と目的

結晶を使用した荷電粒子の偏向システムの応用例としては、加速器中の荷電粒子ビームへの応用が考えられる。加速器中の荷電粒子ビームに結晶を挿入してビームの一部だけ偏向させて引き出す、荷電粒子ビームの引き出しシステムや、ビームライン中に結晶を設置し、結晶でビームを分岐させる事や、不必要なビームのみを偏向させ、必要なビームのみを取り出す役割を持つコリメーターへの応用が考えられる。実際、陽子ビームにおいては、IHEP (Institute for High Energy Physics, Russia) の 70GeV 陽子ビーム [1] や、CERN (European Organization for Nuclear Research) の 120GeV 陽子ビーム [2] においては、ビームライン中に設置した結晶によって陽子ビームを偏向させ、陽子ビームを引き出す事に成功している。しかし、陽子などの正の電荷を持つ荷電粒子と電子などの負の電荷を持つ荷電粒子の結晶中での運動は違い、電子などの負の電荷を持つ荷電粒子の結晶による偏向はまだ分かっていない。それ故、結晶を用いた負の電荷の荷電粒子の偏向システムの加速器への応用例はまだ無い。

また、現在 Japan Proton Accelerator Complex (J-PARC) が建設中であるが、J-PARC の陽子ビームの強度は非常に高く、陽子ビームの一部を偏向させるには、従来の電磁石を使用した方法では偏向する事が難しい。そこで、結晶を使用した偏向システムを試みようと考えた。しかし、これまで結晶を使用した偏向システムを用いている施設に比べて、J-PARC の陽子ビームの強度が非常に高く、この様な大強度の陽子ビームでの結晶を用いた陽子ビームの偏向システムの応用例は無い。

そこで本研究は結晶を使用した電子ビームの偏向システムを International Linear Collider (ILC) の電子ビームにおいて、必要なビームのみを取り出す事に使用するコリメーターに応用する事や、広島大学 VBL にある超高速電子周回装置 (REFER) の電子ビーム引出しシステムへ応用する事を目的としている。そこでまず、REFER において引き出しラインが引き出された 150MeV 電子線を使用して、結晶による電子線の偏向を観測し、電子線の角度広がりや電子線偏向の関係を調べた。

また、陽子ビームを用いた研究は、J-PARC の大強度陽子ビームの引き出しシステムや、コリメーターへの応用を考えて、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の陽子シンクロトロンから引き出された陽子ビームを使用して曲がっている結晶による陽子ビームの偏向を観測した。そして、偏向ビームの強度を見積もり結晶による陽子線偏向の効率を求めた。

第2章 結晶中のポテンシャルと荷電粒子の運動

2.1 Lindhard ポテンシャル

原子番号 Z_2 の原子内の Z_2 個の電子の集団がフェルミ準位にあり、縮退した自由電子ガスとして近似した場合について考える。原子から距離 r 離れた点にある電荷 Z_1e を持つ粒子の相互作用のポテンシャルは

$$V(r) = \frac{Z_1 Z_2 e}{r} X\left(\frac{r}{a}\right) \quad (2.1)$$

と書ける。この時 $V(r)$ をトーマスフェルミのポテンシャルと言ひ、 $X\left(\frac{r}{a}\right)$ をトーマスフェルミ関数と言ふ。 a はトーマスフェルミの遮断長であり、以下の式で表される。

$$a = 0.8853a_0(Z_1^{1/2} + Z_2^{1/2})^{-2/3} \quad (2.2)$$

ただし $Z=1$ の時は

$$a = 0.8853a_0(Z_2)^{-1/3} \quad (2.3)$$

と表される。

実際に結晶中には多くの原子が存在し、結晶軸や結晶面を構成している。結晶軸の作るポテンシャルを考えると、(図 2.1)、

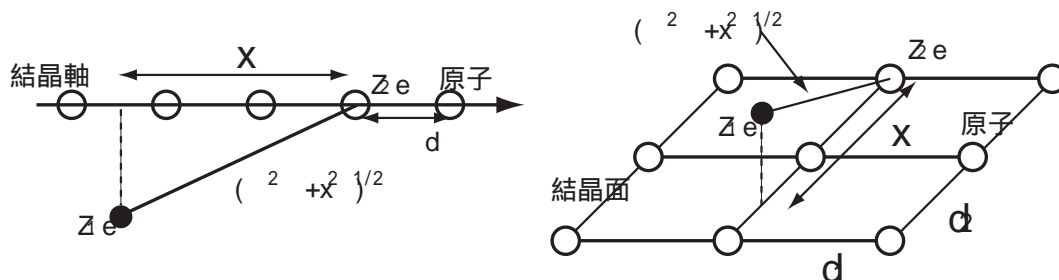


図 2.1: 結晶軸、結晶面の原子との相互作用ポテンシャル

図 2.1 の様に、結晶軸から距離 ρ 離れた位置で、一つの原子から受ける電荷 Z_1e を持つ粒子の相互作用のポテンシャルは

$$V(\sqrt{\rho^2 + x^2}) = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\sqrt{\rho^2 + x^2}} X\left(\frac{\sqrt{\rho^2 + x^2}}{a}\right) \quad (2.4)$$

となり、多数の原子からのポテンシャルは以下ようになる。

$$\begin{aligned} V_{RS}(\sqrt{\rho^2 + x^2}) &= \frac{1}{d} \int_{-\infty}^{\infty} V(\sqrt{\rho^2 + x^2}) dx = \frac{1}{d} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{\sqrt{\rho^2 + x^2}} X\left(\frac{\sqrt{\rho^2 + x^2}}{a}\right) dx \\ &= \frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + x^2}} X\left(\frac{\sqrt{\rho^2 + x^2}}{a}\right) dx \end{aligned} \quad (2.5)$$

ここで、

$$f_{RS}(\rho) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{\rho^2 + x^2}} X\left(\frac{\sqrt{\rho^2 + x^2}}{a}\right) dx \quad (2.6)$$

と置く。Lindhard は $X(r/a)$ を以下の形に評価した。

$$X(r/a) = 1 - [1 + (Ca/r)^2]^{-1/2} \quad (2.7)$$

ここで、 $C = \sqrt{3}$ である。式 (2.7) の近似式を使えば、 $f_{RS}(\rho)$ は以下のように求まる。

$$f_{RS}(\rho) = \ln(1 + C^2 a^2 / \rho^2)^{1/2} \quad (2.8)$$

このとき結晶中で結晶軸から受ける相互作用ポテンシャルは

$$V_{RS} = \frac{Z_1 Z_2 e^2}{d} f_{RS}(\rho) \quad (2.9)$$

と求まる。

また、図 2.1 の様に、結晶面から ρ 離れた位置に電荷 $Z_1 e$ があつた時、面から受ける相互作用のポテンシャルは

$$V_{PS}(\rho) = n \int_0^{\infty} 2\pi x dx V(\sqrt{\rho^2 + x^2}) = 2\pi n Z_1 Z_2 e^2 a f_{PS}(\rho) \quad (2.10)$$

ここで、

$$f_{PS}(\rho) = \int_0^{\infty} X(\sqrt{\rho^2 + x^2}) dx \quad (2.11)$$

と置く。結晶軸の場合と同様に、式 2.7 から $f_{PS}(\rho)$ は

$$f_{PS}(\rho) = (\rho^2 + C^2)^{1/2} - \rho \quad (2.12)$$

となる。この時、結晶中で結晶面から受ける相互作用ポテンシャルは

$$V_{PS}(\rho) = 2\pi n Z_1 Z_2 e^2 a f_{PS}(\rho) \quad (2.13)$$

となる。

これらのポテンシャルの形を Lindhard ポテンシャルと呼ぶ事にする。[3],[4]

2.2 結晶中の荷電粒子の運動

電磁場中を相対論的な速度を持った荷電粒子が運動する時、その運動は以下の式で表せる。

$$\frac{dP}{dt} = -e \text{grad}U + \frac{e}{c} [V \times B] \quad (2.14)$$

e は荷電粒子の電荷、 V は粒子の速度、 P は運動量、 c 、 U は電磁ポテンシャル、 B は結晶中での荷電粒子の運動を考える。

結晶面、軸に対して θ_0 の角度で電荷 e 、質量 M 、エネルギー E_0 、運動量 p_0 、速度 v_0 の荷電粒子が結晶に入射されると、結晶中での荷電粒子の運動は式 2.14 より、以下のよう表される。

$$\frac{dp_{\perp}}{dt} = -e \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \frac{dp_{\parallel}}{dt} = 0 \quad (2.15)$$

ポテンシャル U は結晶面、軸と荷電粒子の垂直な方向の距離に依存するので、

$$\frac{\partial U}{\partial x} = \frac{dU}{dx} = \frac{dU}{v_{\perp} dt} \quad (2.16)$$

ここで、式 2.15 から、 $v_x = \frac{p_{\perp} c^2}{E}$ 、 $E = c \sqrt{p_{\perp}^2 + p_{\parallel}^2 + M^2 c^2}$

ここで、荷電粒子が結晶面、軸に対して角度 θ : $\theta \approx p_{\perp}/p_{\parallel} \ll 1$ で入射されたとき、荷電粒子のエネルギー E は $E \approx E_{\parallel} + p_{\perp}^2 c^2 / (2E_{\parallel})$ で表せる。よって、エネルギー保存則は

$$\frac{p_{\perp}^2 c^2}{2E_{\parallel}} + E_{\parallel} + eU = \text{const} \quad (2.17)$$

と書き換える事が出来る。

角度 θ は非常に小さい角度なので、 $E_{\parallel} = E_0$ とすると、結晶面、軸と垂直方向のエネルギーは、

$$E_{\perp} = \frac{p_{\perp}^2 c^2}{2E_0} + eU = \frac{p_{\parallel}^2 c^2 \theta^2}{2E_0} + eU \quad (2.18)$$

となる。

また、 $(cp_0)^2 + m^2 c^4 = E_0^2$ 、 $E_0 = m\gamma c^2$ 、より $p_0 = m\gamma\beta c = \frac{\beta}{c} E_0$

よって式は

$$E_{\perp} = \frac{1}{2}E_0\beta^2\theta^2 + eU \quad (2.19)$$

ここで、 $\frac{1}{2}E_0\beta^2\theta^2 \leq eU_0$ ($U_0 = U_{x=0}$) のとき、荷電粒子は結晶中の原子の作るポテンシャルに束縛され、channeling 現象がおきる。

しかし逆に $\frac{1}{2}E_0\theta^2 \geq eU_0$ の時荷電粒子はポテンシャルに束縛される事はない。

$\frac{1}{2}E_0\beta^2\theta^2 = eU_0$ となる時の角度 θ_c を臨界角と言い、式 (2.19) より次式が導かれる。[5]
[6]

$$\theta_c = \frac{1}{\beta_0} \sqrt{\frac{2eU_0}{E_0}} \quad (2.20)$$

今回の実験においては、150MeV 電子ビームを用いた実験では臨界角は 0.8mrad 12GeV 陽子ビームを用いた実験では臨界角は 0.058mrad となる。

第3章 電子ビームを用いた実験

3.1 実験セットアップ

電子ビームを用いた実験は 広島大学 VBL にある、超高速電子周回装置 REFER (Relativistic Electron Facility for Education and Research) で行った。図 3.1 電子は 150MeV マイクロトロンから 10Hz で入射される。電子ビームは電子周回リングから、アブソーバー、キッカーマグネット、セプタムマグネット、により、電子ビーム引出しラインから引き出される。本実験ではこの引出しラインから引き出された 150MeV 電子線を使用した。

実験のセットアップは図 3.2 の様になっている。引き出された 150MeV 電子線は、引き出しライン最下流のベンディングマグネットから 80cm の位置に設置した結晶に入射される。結晶は図 3.3 の様に Al ホルダーに設置してあり、結晶構造も図 3.3 に示す。

結晶を通過した電子ビームは結晶の下流 234cm の位置に設置したファイバー光学付 CsI 蛍光板 (FOS, Hamamatsu) に当たる。電子ビームが当たる事で蛍光板は微弱な可視光を発光する。この光をイメージインテンシファイアを用いて増幅し、CCD カメラによってイメージ画像を取得する。

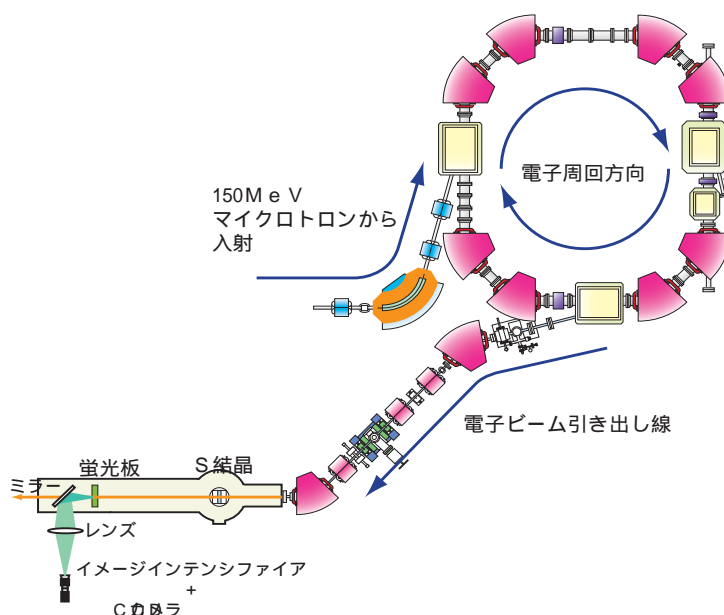


図 3.1: 超高速電子周回装置 (REFER)

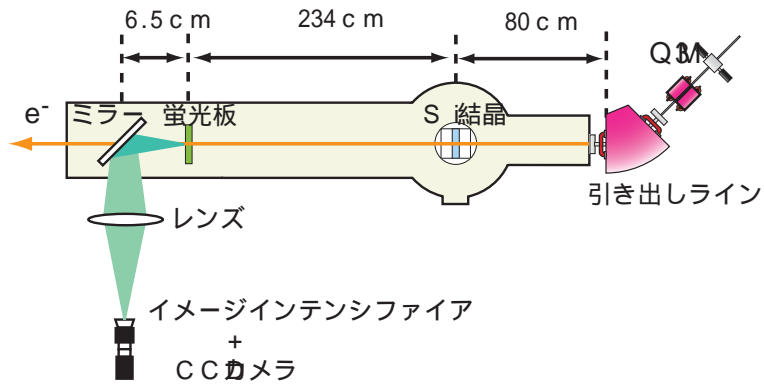


図 3.2: 電子ビーム偏向実験のセットアップ

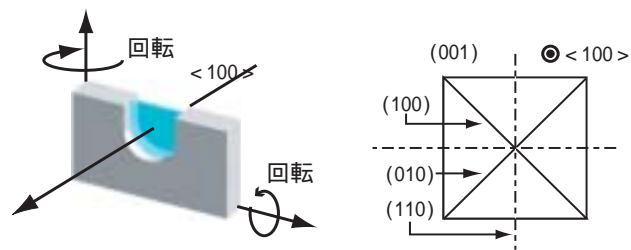


図 3.3: 結晶構造と結晶結晶の回転方向

3.2 電子ビームの角度広がり

REFERの電子ビーム引き出しラインには四極電磁石が3つあり、最下流の四極電磁石3(QM3)の電流値を変化させることで、引き出された電子ビームの垂直方向の角度広がりを変化させる事が出来る。

QM3の電流値を変化させ、電子ビームのサイズを測定し、その結果を用いて電子ビームの角度広がりを計算した。

3.2.1 ビームサイズ測定

電子ビームの角度広がりを求めるために、結晶の位置とFOSの位置の二つの位置で電子ビームのサイズを測定した。

四極電磁石の電流値を変化させて、それぞれの電流値において電子ビームのプロファイルを撮った。

CCDによって得られた電子線のイメージ画像を水平方向をに射影し、位置と輝度の情報にしてその分布の分散 σ を求めて、これを電子ビームのサイズとした(図3.4)。

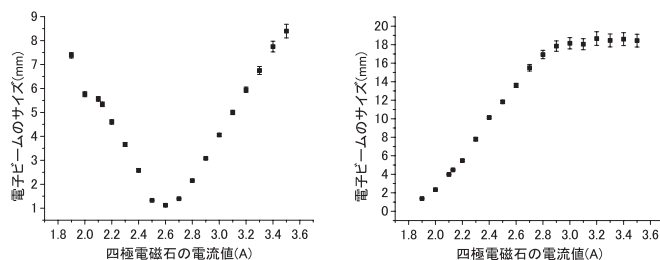


図 3.4: 結晶の位置と FOS の位置でのビームサイズ

3.2.2 角度広がり

結晶の位置でのビームサイズの測定結果を使用して、REFERの電子ビーム引出しライン下流での電子ビームの角度広がりを計算から求めた。図3.5にQM3の電流値と電子ビームの角度広がりとの関係を示す。

3.3 測定

測定はSi結晶の $\langle 100 \rangle$ 軸と電子ビームとの角度を変化させて、電子ビームのプロファイルを測定した。実験に使用したREFER引き出しラインでは、垂直方向の電子ビームの角度広がりが垂直方向の角度広がりよりも大きいため、 θ 方向の角度を固定し、 ϕ 方向

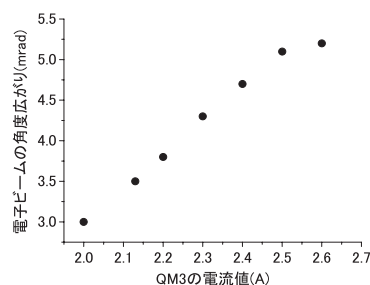


図 3.5: QM3 の電流値と電子ビームの角度広がり

に $-10\text{mrad} \sim 10\text{mrad}$ まで 0.5mrad 刻みで、それぞれの角度で電子線プロファイルを測定した。 θ 方向には $-1\text{mrad} \sim 1\text{mrad}$ まで 0.1mrad 刻みで変化させた。

次に、電子ビームの角度広がりや channeling 現象による電子ビームの偏向角の関係を調べるために、引き出しラインにある4極電磁石の電流値を変化させて、結晶に入射する電子ビームの角度広がりを変化させた。それぞれの角度広がりにおいて、Si結晶の角度を ϕ 方向に $-10\text{mrad} \sim 10\text{mrad}$ まで 0.5mrad 刻みで変化させ、電子線のプロファイルを測定した。

3.4 キャリブレーション

CCDカメラで取得した画像の pixel 数と実際の蛍光板上での距離の関係を求めるために、channeling 実験と同じセットアップで、 $50\text{mm} \times 50\text{mm}$ の大きさの蛍光板の画像を撮った(図 3.6)。取得した画像から、 1mm が8pixelに相当する事が分かった。

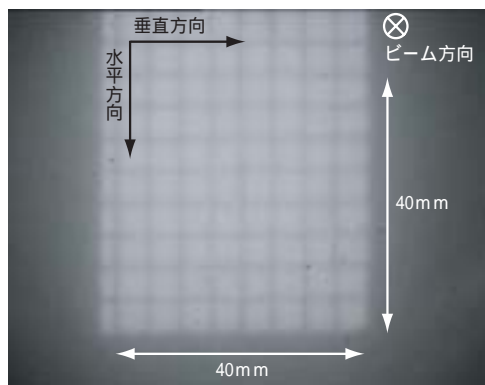


図 3.6: キャリブレーション

3.5 解析方法

CCDカメラによって得られた電子ビームの2次元プロファイルを図3.7に示す。この2次元プロファイルを水平方向に射影して、輝度と水平方向の位置の情報を得る。

電子線の中心値の変化を求めるために、まず、射影によって得られた輝度と位置情報のデータを2つのガウス関数を用いてフィットした(図3.7)。

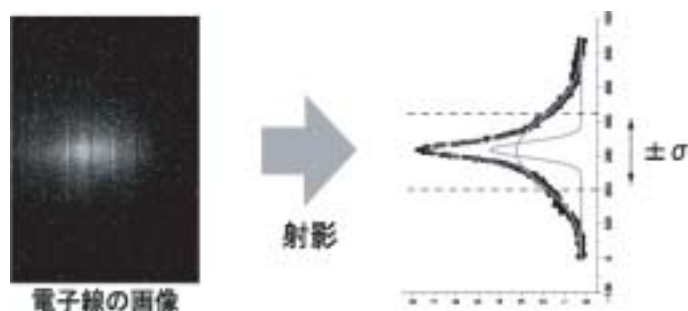


図 3.7: 電子ビームのプロファイルと射影してフィットしたグラフ

次に、2つのガウス関数のフィットから得られた、幅の広いガウス関数の $\pm\sigma$ の範囲を使用して加重平均を行い、電子ビームの中心値を求めた。この様にして得られた中心値の変化を結晶と蛍光板との間の距離で割って、電子ビームの偏向した角度を算出した。

次に上の解析から得られた、Si結晶〈100〉軸と結晶に入射する電子ビームとの角度による、電子ビームの偏向角のグラフを次のような関数でフィットした(図3.8)。

$$y = y_0 - (A/w^2)(x - x_c) \exp(-0.5((x - x_c)/w)^2) \quad (3.1)$$

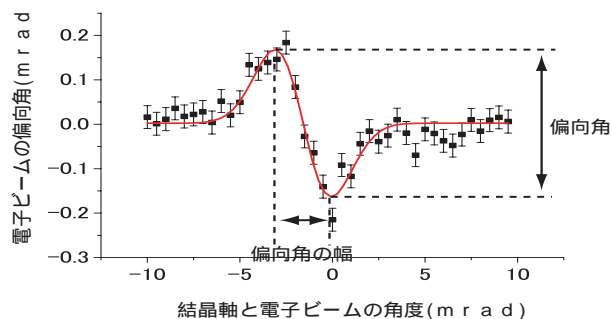


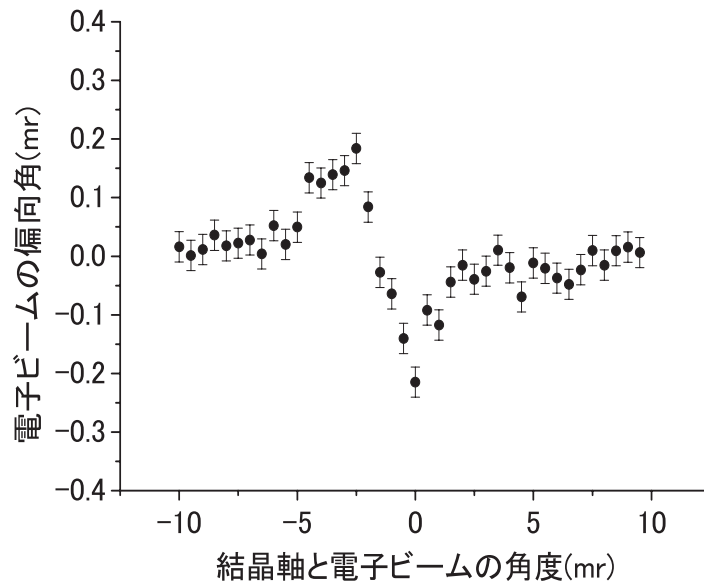
図 3.8: フィッティングの様子

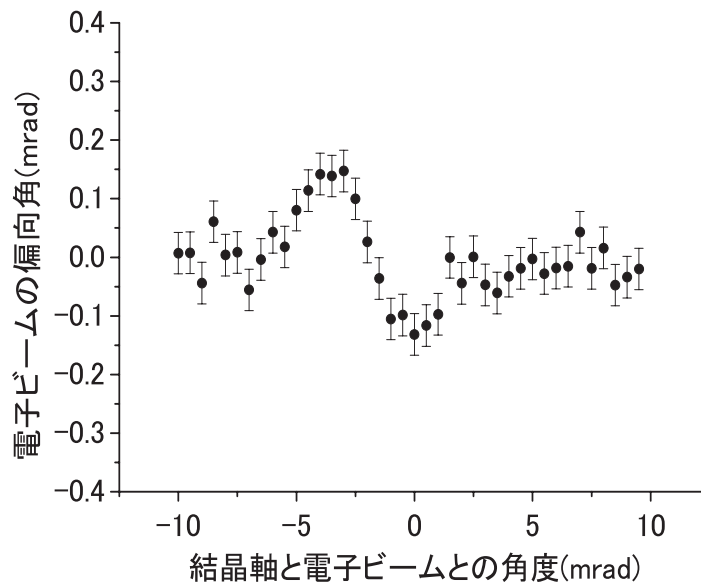
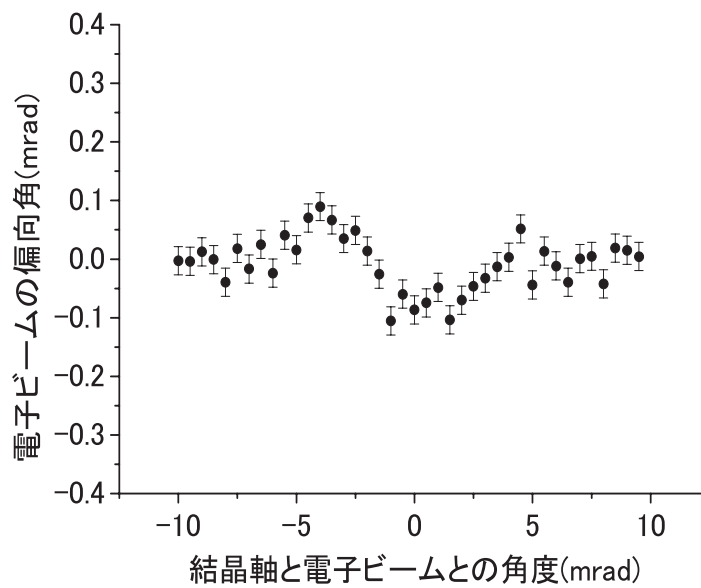
フィッティングをする事で、結晶による電子線の偏向角が電子線の角度広がりに対してどのように変化して行くかを調べた。

第4章 電子ビームを用いた実験の結果

図 4.1~図 4.5 は $\theta = 0$ に固定して、 ϕ 方向の角度を $-10\text{mrad} \sim 10\text{mrad}$ まで 0.5mrad 刻みで変化させ、電子ビームの偏向を測定した結果である。電子ビームの角度広がりが 3.0mrad の時、結晶の $\langle 100 \rangle$ 軸と入射する電子ビームが $-3\text{mrad} \sim 0\text{mrad}$ の角度となる時、電子ビームが $0.2\text{mrad} \sim -0.2\text{mrad}$ 偏向しているのが分かる。 3.5mrad では $\langle 100 \rangle$ 軸と入射する電子ビームが $-3\text{mrad} \sim 0\text{mrad}$ の角度の時、電子ビームが $0.15\text{mrad} \sim -0.15\text{mrad}$ 偏向している、 3.8mrad では $\langle 100 \rangle$ 軸と入射する電子ビームが $-3\text{mrad} \sim 0\text{mrad}$ の角度の時、電子ビームが $0.07\text{mrad} \sim -0.07\text{mrad}$ 偏向している、 4.3mrad では $\langle 100 \rangle$ 軸と入射する電子ビームが $-3\text{mrad} \sim 0\text{mrad}$ の角度の時、電子ビームが $0.04\text{mrad} \sim -0.04\text{mrad}$ 偏向している事を見ることが出来る。しかし、 4.7mrad の場合は電子ビームの偏向を見ることが出来ない。

次に、図 4.6 は電子ビームの角度広がりと電子ビームの偏向角の関係、図 4.6 は電子ビームの角度広がりが大きくなるに連れて、偏向角が小さくなる事を見ることが出来る。

図 4.1: 角度広がり 3mrad の時の電子ビームの偏向の様子

図 4.2: 角度広がり 3.5mrad の時の電子ビームの偏向の様子図 4.3: 角度広がり 3.8mrad の時の電子ビームの偏向の様子

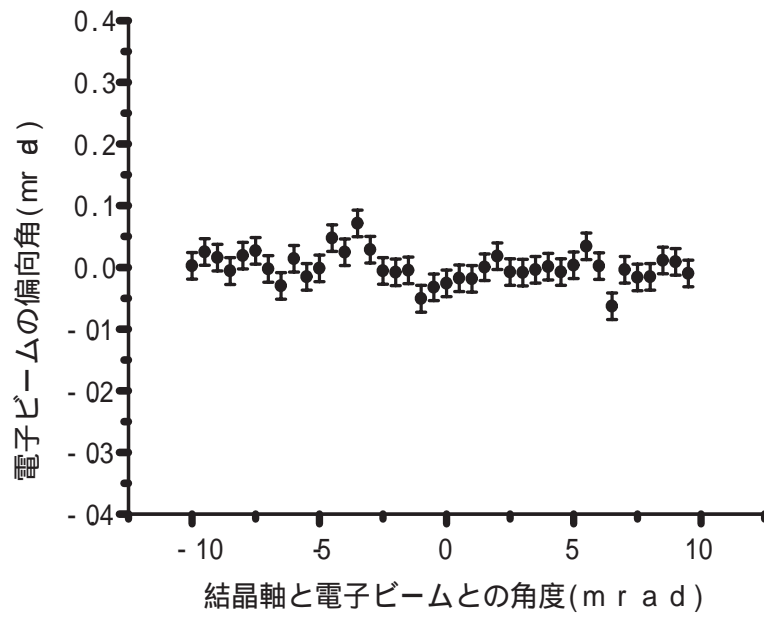


図 4.4: 角度広がり 4.3mrad の時の電子ビームの偏向の様子

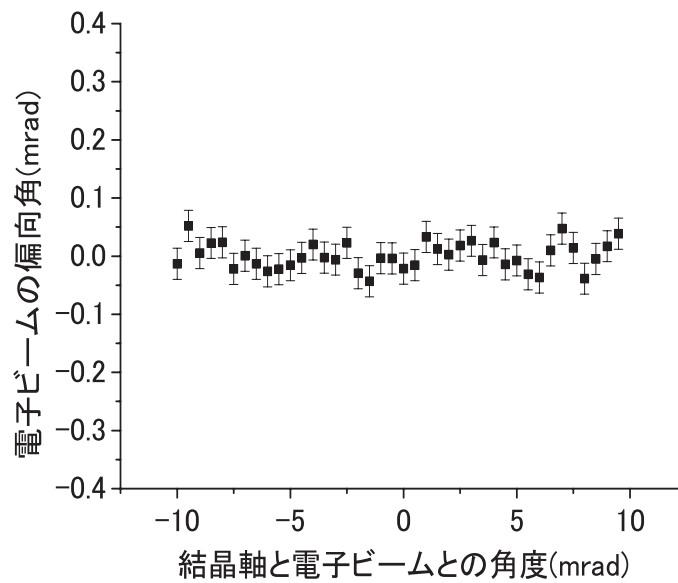


図 4.5: 角度広がり 4.7mrad の時の電子ビームの偏向の様子

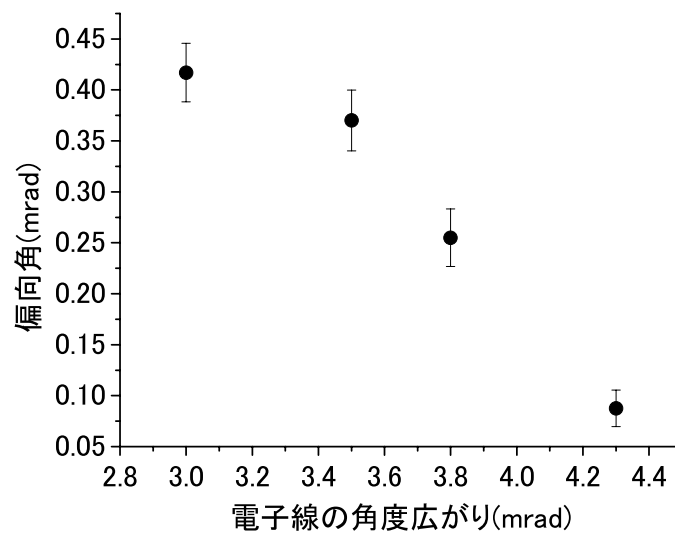


図 4.6: 角度広がりと偏向角の大きさの関係

第5章 陽子ビームを用いた実験

5.1 実験セットアップ

陽子ビームを使用した channeling 実験には、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の陽子シンクロトロンから EP2 ビームラインに引き出された 12GeV 陽子ビームを用いた。陽子シンクロトロンからは 4sec 毎に 1spill の陽子ビームが引き出される。 1spill は 2sec であり、陽子ビームの強度は約 $10^{12}\text{spill/proton}$ である。

EP2 ビームライン下流に図 5.1 の様な実験セットアップを設置した。今回の実験には、2つの曲げられた Si 単結晶を使用した。結晶構造は以下図 5.2 に示す。Si 結晶は Al のホルダーによって固定され、図 5.2 のように Al ホルダーの端に力を加える事で曲げられている。その角度は結晶 1 が 32mrad 、結晶 2 が 19mrad である。また、ビーム方向の断面は $3\text{mm}\times 0.3\text{mm}$ となっていて、断面積は 0.9mm^2 である。結晶はゴニオメーターの上に設置しており、陽子ビームに対して ϕ 方向と θ 方向に回転させる事が出来る。また、結晶の他にセラミック板、Al 板が上流の X ステージと Z ステージの上に設置しており、X ステージと Z ステージをスライドさせる事で 2つの結晶とセラミック板と Al に陽子ビームを当てる事が出来る。セラミック板は結晶の位置での陽子ビームのプロファイルを測定する為に設置しており、セラミック板からの光はカメラによって観測される。Al 板は陽子ビームのビームロスを調べるために設置した。

陽子ビームは図 5.1 のように、結晶によって偏向したビームと、偏向しないビームに分けられる。偏向しなかった陽子ビームは下流 145cm の位置に設置したセラミック板に当たる。偏向した陽子ビームはセラミック上に設置した CsI 板に当たる。これは、結晶入射した主ビームの強度に比べて偏向したビームの強度が小さく、セラミック板の感度では主ビームの様子を観測出来ても、偏向した陽子ビームの観測ができないためである。そこで、結晶により偏向したビーム位置を、結晶の曲がっている角度と、結晶とセラミックの間の距離を使って計算し予想した。予想されたセラミック板上の位置に CsI 板を図?? の様に設置した。

偏向した陽子ビーム、偏向しなかった陽子ビームによって、セラミック板と CsI 板から出た光はカメラによって観測される。

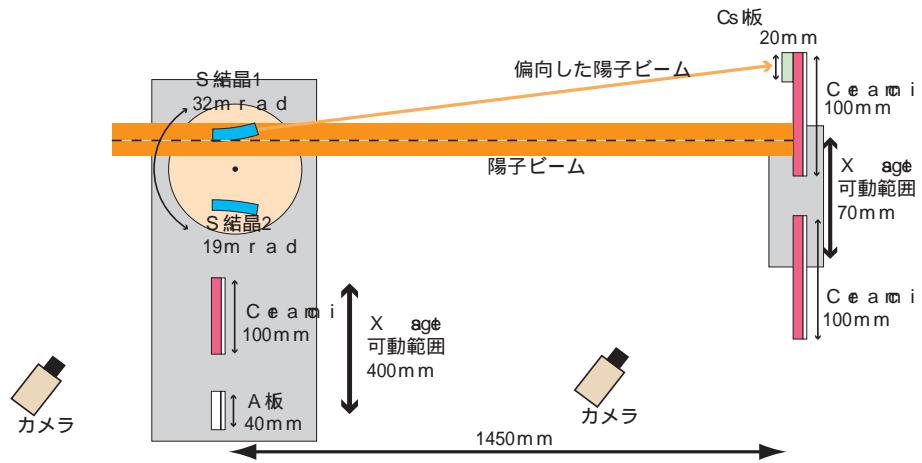


図 5.1: 陽子ビーム偏向実験のセットアップ

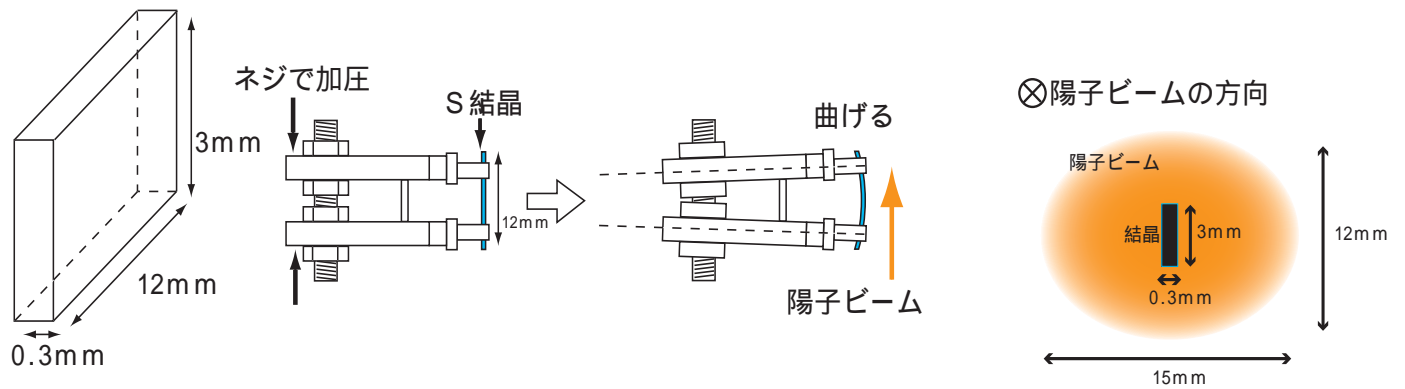


図 5.2: 結晶の様子

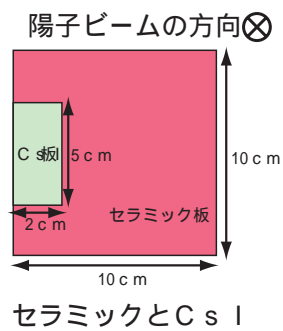


図 5.3: セラミックと CsI の位置関係

5.2 結晶を用いた陽子ビームの偏向実験

Si 結晶 1 を使用して、陽子ビームの偏向を観測した。12GeV 陽子ビームの中心に結晶を挿入し、結晶によって偏向した陽子ビームの画像をかめらによって観測した。Si 結晶を $\phi = 0$ に固定し θ 方向の角度を変化させ、結晶と入射する陽子ビームの角度を変えた時の偏向した陽子ビーム画像を観測した。図 5.4

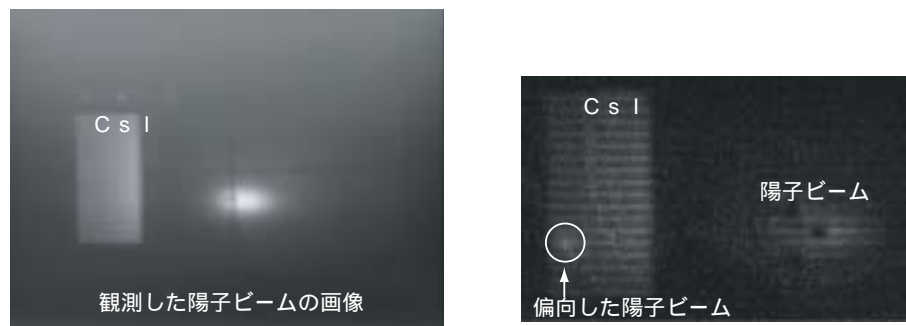


図 5.4: 陽子ビームの画像と、偏向した陽子ビームの画像

5.3 解析方法

実験で得たデータを使用して、偏向した陽子ビームの位置の変化、強度をを調べた。また、メインビームの強度を見積もり、偏向した陽子ビームとメインビームの強度の割合を求めた。

次に、メインビームと結晶に入射した陽子ビームの割合を求めて、結晶に入射した陽子ビームと結晶によって偏向した陽子ビームの割合を求めた。

5.3.1 偏向した陽子ビームの強度の見積もり方

結晶をビームライン上に挿入していないデータをバックグラウンドデータとして使用した。射影して得た位置と輝度のデータの CsI 板上のデータを三次関数でフィットして、この三次関数をバックグラウンドとして使用した。図 5.5

結晶を挿入して偏向ビームを観測したデータから、三次関数をバックグラウンドとして引いて偏向ビームの情報を得た。図 5.6

この偏向ビームの情報をガウス関数でフィットして (図 5.7)、中心値を偏向ビームの位置、その面積を偏向ビームの強度として求めた。

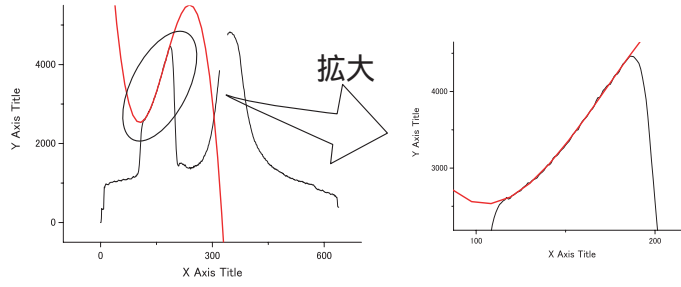


図 5.5: バックグラウンド

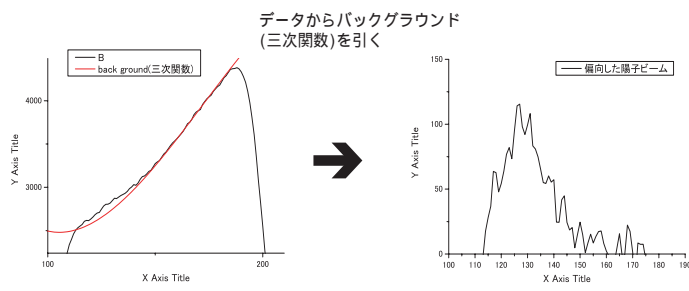


図 5.6: 偏向ビーム

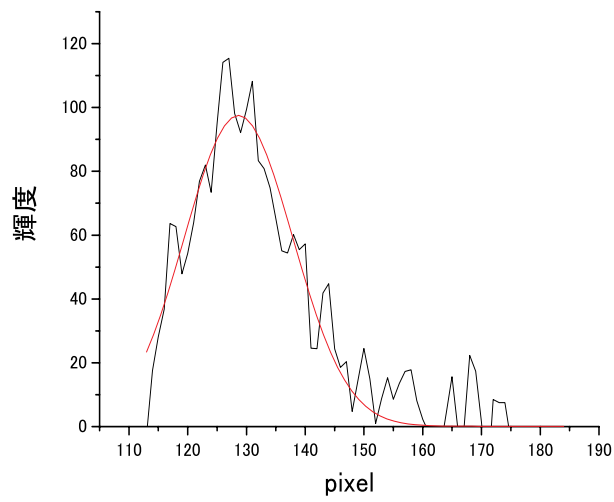


図 5.7: フィッティングの様子

5.3.2 メインビームの強度の見積もり方

メインビームの強度を見積もる場合は、結晶をメインビームに挿入していないデータを使用する。図 5.8 図 5.8 をに射影して、位置と輝度のデータにする図 5.8。

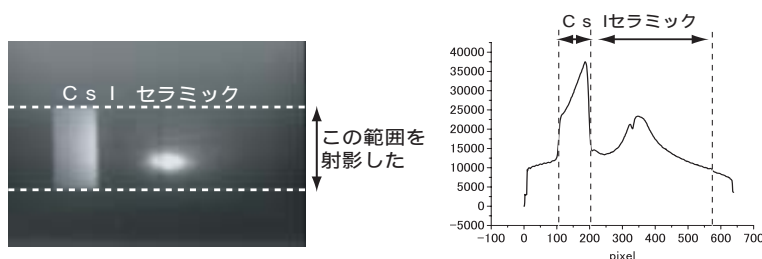


図 5.8: メインビームの画像と射影したデータ

すると、セラミック板上にメインビームからの中心付近の様子を観測できる。また、CsI 板上にはメインビームの端の様子を観測できる。偏向した陽子ビームは CsI 上で観測しているため、偏向した陽子ビームとメインビームとの強度を比較するには、メインビームの強度を CsI 上での

そこでまず、5.8 のセラミックの部分のみをローレンツ関数でフィットし、メインビームの形を決定した。次に、フィッティングから得たローレンツ関数の中心値、を固定して、CsI 板上をローレンツ関数でフィッティングし、そのローレンツ関数の面積をメインビームの強度とした図 5.9。

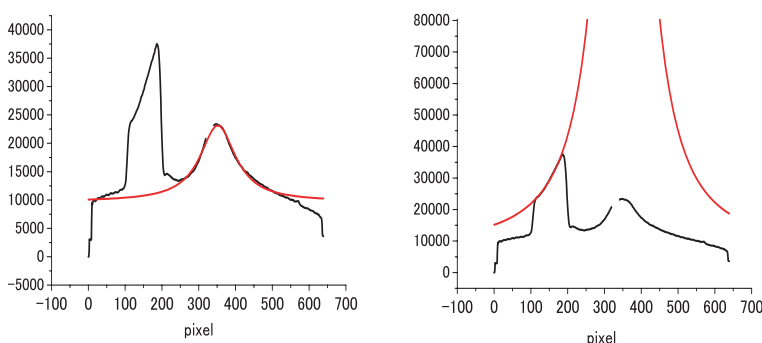


図 5.9: フィッティングの様子

5.3.3 結晶に入った陽子ビームの割合

まず、結晶の位置での陽子ビームのプロファイルを全範囲で射影し、位置と輝度の情報にする。次に、ローレンツ関数でフィットし、そのローレンツ関数の面積を結晶の位置でのメインビームの強度とした。5.10

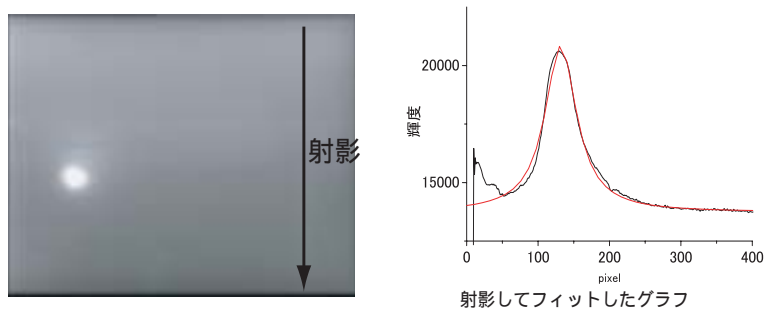


図 5.10: 結晶の位置でのメインビームの見積もり方

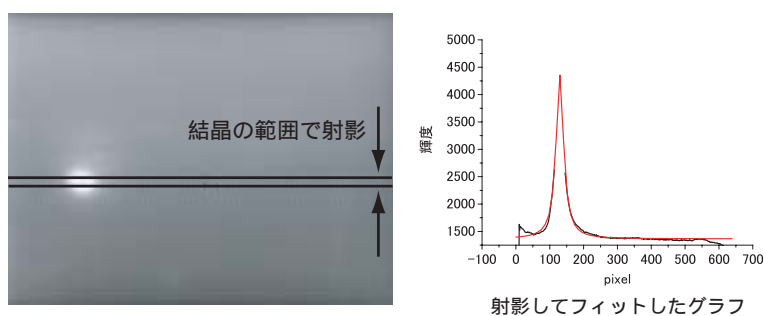


図 5.11: フィッティングの様子

結晶と入射した陽子ビームの位置関係は図 5.2 の様になっているので、結晶に入射した陽子ビームを見積もるために、まずメインビームの中心の 3mm の範囲を射影し、ローレンツ関数でフィットした。フィットしたローレンツ関数の中心 0.3mm の範囲の輝度を結晶に入った陽子ビームの強度として求めた。5.11

この様にして求めた結晶の位置でのメインビームの強度と、結晶に入射した陽子ビームの強度から、メインビーム全体の何%が結晶に入射したかを求めて、結晶に入射した陽子ビームの何%が偏向したかを求めた。

第6章 陽子ビームを用いた実験結果

図 6.1 は結晶と入射する陽子ビームとの角度を変化させたときの、偏向ビームの位置の変化を表しているグラフである。結晶と入射した陽子ビームの角度が変化するとき、CsI 板上で偏向したビームも変化しており、結晶と入射する陽子線の角度の変化と、CsI 板上での偏向した陽子ビームの位置の変化は、定性的に一致している。

図 6.2 は結晶と入射する陽子ビームの角度を変化させた時の、結晶に入射した陽子ビームの強度と偏向した陽子ビームの強度の割合の変化を示したグラフである。結晶に入射された陽子ビームの内、結晶により偏向した陽子ビームの割合は最大で 0.7 % だった。

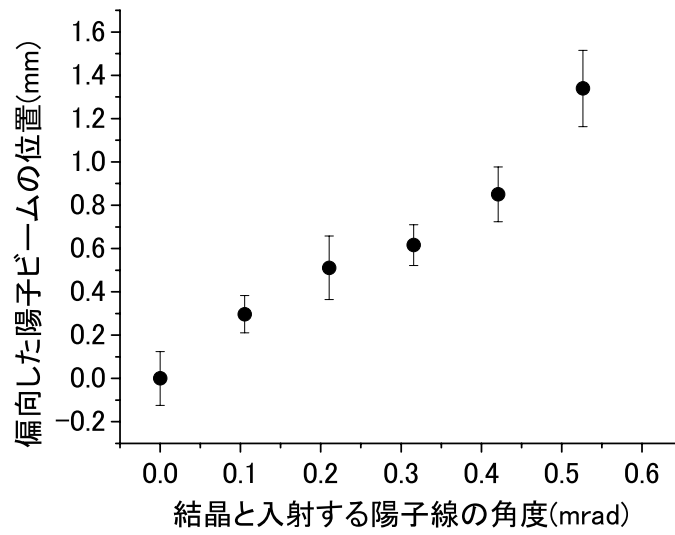


図 6.1: 偏向ビームの位置の変化

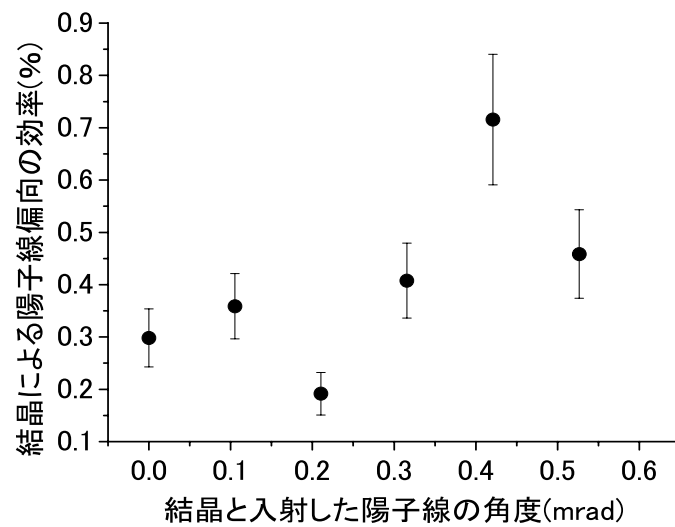


図 6.2: 結晶に入った陽子ビームと結晶により偏向した陽子ビームの割合

第7章 議論

電子ビームを使用した実験においては、結晶軸と入射する電子ビームの角度を変化させたとき、電子ビームが偏向していることが分かった。また、結晶に入射する電子ビームの角度広がりを大きくさせた時、電子ビームの偏向する角度が小さくなっていく事が分かった。図7.1の様に、入射する電子ビームの角度広がりが大きいと、臨界面以内の角度で入射される電子が少なく、Channeling 現象による影響が小さくなる。逆に、角度広がりが小さい電子ビームの場合、臨界面以内で入射される電子が多くなるため、Channeling 現象による影響が大きくなると考えられる。

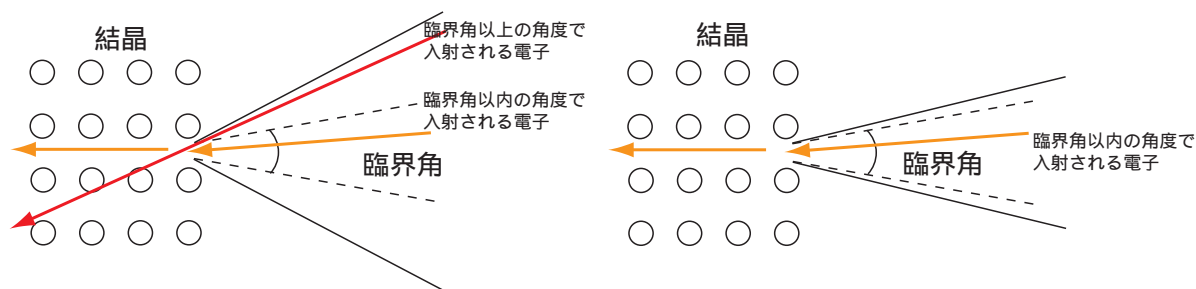


図 7.1: 角度広がり と Channeling 現象の関係

今回の実験結果を見ると、角度広がりが小さい時、電子ビームの偏向が大きく、角度広がりが大きい時、電子ビームの偏向が小さい。よってこの偏向は Channeling 現象による偏向を観測できたと考えられる。

陽子ビームを使用した実験においては、結晶と入射した陽子ビームの角度と、偏向した陽子ビームの位置は定性的に一致している。このことから、この偏向した陽子ビームは結晶により偏向していると考えられる。

第8章 結論

REFERの150MeV電子ビームを使用した実験では、 $16\mu\text{m}$ の結晶による電子線偏向を観測する事が出来た。また、結晶に入射する電子ビームの角度広がりを大きくするにつれて、結晶による電子線偏向が小さくなる事を確認した。

高エネルギー加速器研究機構の12GeV陽子ビームを使用した実験では、結晶による、陽子ビームの偏向を観測する事が出来た。結晶をビームライン中に設置し、結晶と陽子ビームの角度を調節し、偏向した陽子ビームの強度を観測することで結晶によって陽子ビームを分岐する技術を得ることが出来たと考えられる。

第9章 謝辞

まず、光子物理学研究室の高橋先生、研究活動全般だけでなく、さまざまな事を最後までご指導いただき、また面倒を見ていただきありがとうございました。そして、遠藤先生、ありがとうございました。飯沼先生色々なことを教えていただきありがとうございます。また、高エネルギー加速器研究機構の澤田先生、色々ご指導いただきありがとうございます。そして、広島大学VBLの黒岩さん、大西さん、実験だけでなく様々な事でお世話になりました。セルゲイ、色々助けていただきありがとうございました。卒業された研究室の先輩方、また研究室の後輩の皆様、大変お世話になりました。ありがとうございます。

最後にこれまで支えてくれた両親と、姉に感謝をしたいと思います。皆様本当にありがとうございました。

関連図書

- [1] V.M.Biryukov, Yu.A.Chesnokov, V.I.Kotov. Steering of high-energy charged particle beams by bent single crystals. *Physics-Uspekhi* 37 (1994) pp. 937-961.
- [2] K.Elsener et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. B*, 119 (1996) 215-230
- [3] Donald S. Gemmell. *Reviews of Modern Physics*, Vol. 46, No.1, January 1974
- [4] J.Lindhard, *Phys. Lett.* 12, 126 (1964)
- [5] S.P.Denisov *Soros Educational Journal*, vol.12, 1999
- [6] V.N. Barrier, V.M. Kotkov, V.M. Strakhovenko, *Electromagnetic Processes at High Energies in Oriented Single Crystals*. World Scientific, 1998