

結晶による粒子ビームの操作

飯沼 昌隆^{*1}・澤田 真也^{*2}・ストロコフ セルゲイ^{*3}・高橋 徹^{*4}

Beam Handling by Crystals

Masataka IINUMA^{*1}, Shinya SAWADA^{*2}, Sergey STROKOV^{*3} and Tohru TAKAHASHI^{*4}

Abstract

Using channeling phenomena of a crystal is one of the useful ways to handle high energy beams efficiently. We have performed an experiment with a 150-MeV electron beam at Hiroshima University and one with a 12-GeV proton beam at KEK-PS. In this article, these experiments are presented. In addition, examples of applications of bent crystals, such as a possibility of beam collimation at the ILC and a beam separation device at J-PARC, are briefly introduced.

1. はじめに

チャネリングとは、荷電粒子が結晶の軸あるいは面にはぼ平行に入射するときに、原子とほとんど衝突せずにその軸あるいは面に沿って進む現象である。結晶がまっすぐならチャネリングされた粒子はまっすぐ進むだけだが、結晶をわずかに湾曲させてやると、粒子は結晶の曲がりによって進む。チャネリング現象は、1960年代前半にイオンの飛程がチャネリングによって長くなることで発見されたが^{1,2)}、1970年代以降チャネリングを加速器でのビーム操作に用いようという試みがなされてきた。本稿では、チャネリングを利用したビーム操作について、ロシア Institute of High Energy Physics (IHEP), CERN やフェルミ研究所などで行われてきた研究を中心に概観し、広島大学電子周回装置 (REFER) での 150 MeV 電子を用いた実験と KEK-PS で行われた 12 GeV 陽子を用いた実験について紹介する。また、ILC や J-PARC へ向けての展望についても述べる。

1.1 粒子ビームのチャネリング

荷電粒子が結晶に入射すると、荷電粒子は結晶を形成する原子によるポテンシャルを感じながら運動するが、特に荷電粒子が結晶軸ないし結晶面に平行に近い角度で入射したときには、結晶軸の周りあるいは結晶面の間に形成されるポテンシャルに捉えられて進むこ

とがある。これがチャネリングである。原子核が正電荷を持つことから、荷電粒子の電荷が正の場合（陽子や陽電子など）と負の場合（電子など）によって、チャネリングの様相は異なる。正電荷の場合、粒子は結晶軸と結晶軸の間、あるいは結晶面と結晶面の間のポテンシャルの谷間に捉えられて進む。負電荷の場合、結晶軸の周りに捉えられるが、数値シミュレーションによると、一つの結晶軸の周りに捉えられていた粒子が隣の結晶軸の周りに飛び移るなど、複雑な動きをすることが予見されている。

荷電粒子が感じる平均的なポテンシャルは個々の原子からのポテンシャルの和を取ることによって求めることができる。図1にモデル化して計算したポテンシャルの例を示す。上は正電荷の粒子に対する結晶面間のポテンシャル、下は負電荷の粒子に対する結晶軸間のポテンシャルである。横軸はそれぞれ結晶面間あるいは結晶軸間の位置である。図2は我々の数値シミュレーションにより予想されるチャネリングされた電子の動きで、結晶軸は紙面に垂直な方向である。いくつかの結晶軸の間を電子が飛びまわっている様子がわかる。

荷電粒子がポテンシャルに捕らえられてチャネリングが起こるかどうかは、粒子の横方向の運動エネルギーと結晶面（あるいは結晶軸）が形成するポテンシャルの大きさの兼ね合いで決まる。荷電粒子が捕らえ

*1 広島大学 先端物質科学研究科 Hiroshima University (Email: iinuma@hiroshima-u.ac.jp)

*2 高エネルギー加速器研究機構 大強度陽子加速器計画推進部 KEK (Email: shinya.sawada@kek.jp)

*3 広島大学 先端物質科学研究科 Hiroshima University (Email: sergik@hiroshima-u.ac.jp)

*4 広島大学 先端物質科学研究科 Hiroshima University (Email: tohru-takahashi@hiroshima-u.ac.jp)

られるための臨界角（最初に定式化した Lindhard³⁾にちなんで Lindhard 角と言う) θ_L は入射荷電粒子の速度 β と運動エネルギー E , それに結晶面（あるいは結晶軸）が形成するポテンシャルの最大値 U^{\max} によって,

$$\theta_L = \frac{1}{\beta} \sqrt{\frac{2U^{\max}}{E}}$$

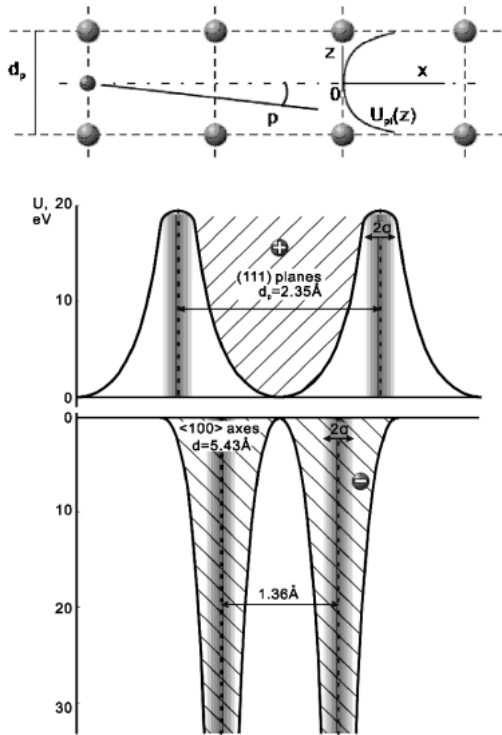


図1 正電荷の粒子に対する結晶面間(上)および負電荷の粒子に対する結晶軸間(下)のポテンシャル。

と表すことができる。 U^{\max} は結晶の種類及び結晶面（あるいは結晶軸）の選び方によって変わる。例えば、チャネリングによく用いられるシリコン結晶の(111)面を考えると $U^{\max}=19$ eV であり、12 GeV の陽子に関する Lindhard 角は 0.056 mrad となる。150 MeV の電子のシリコン<100>軸によるチャネリングを考えると、 $U^{\max}=36$ eV であり、Lindhard 角は 0.69 mrad となる。

チャネリングされた荷電粒子は結晶内を進む間に電子や原子核との散乱を受け、ある確率でポテンシャルから飛び出す。これをデチャネリング (dechannering) とする。このデチャネリングについては Biryukov らが理論的な考察を行い⁴⁾、結晶中を荷電粒子が z 進んだときにチャネリングされ続けている荷電粒子の割合を $\exp(-z/L_d)$ と表すと、正電荷の粒子の面チャネリングに関するデチャネリング長 L_d が

$$L_d = \frac{256}{9\pi^2} \frac{pv}{\ln[2m_e c^2 \gamma / I] - 1} \frac{ad_p}{Z_i r_e m_e c^2}$$

で表されることを示した。ここで、 m_e は電子の質量、 r_e は電子の古典半径、 Z_i , p , v , γ はそれぞれ入射荷電粒子の電荷、運動量、速度、ローレンツ因子、である。 a は原子の種類によって決まる遮蔽長でシリコンの場合には 19.4 pm, d_p は結晶面の面間距離で、シリコンの(111)面の場合には 235 pm と 78 pm の二つがある。 I はイオン化ポテンシャルで、シリコンの場合約 172 eV である。シリコンの(111)面の場合、12 GeV 陽子のデチャネリング長は 10.7 mm となる。負電荷の粒子（軸チャネリング）の場合のデチャネリング長に関しては不明の点が多いが、この式から計算した値

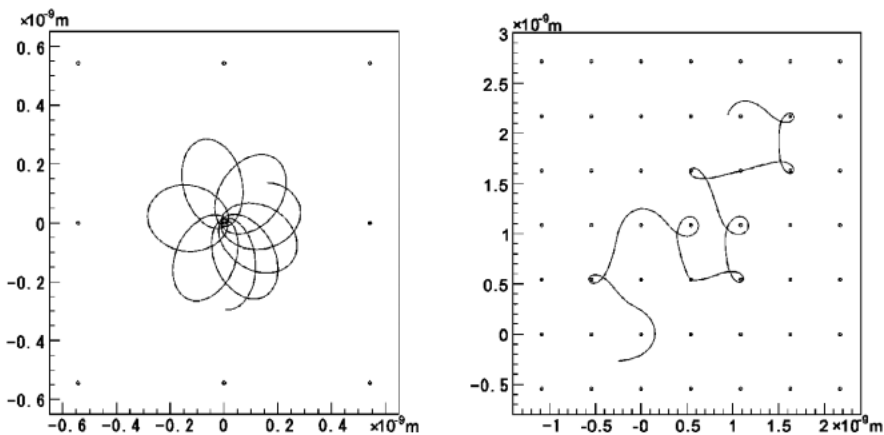


図2 シミュレーションによる負電荷の粒子の軸チャネリングの例。点で表されているのが結晶軸である。条件が整うと左図のように一つの結晶軸の周りに捕捉されるが、少し初期条件を変える（この場合には初期の位置を少し結晶軸に近くする）と右図のように結晶軸間を“渡り歩く”ような複雑な動きをする。

(150 MeV の (陽) 電子の場合には約 0.1 mm) よりも一桁程度小さくなる傾向があるようである。

1.2 いくつかの例

結晶によるチャネリングそのものは 1960 年代から研究され, また, チャネリングされた荷電粒子による放射などにも大きな関心が持たれてきたが⁵⁾, 高エネルギー粒子ビームの操作への応用は, 当時 JINR (Dubna) からフェルミ研究所に来ていた Tsyganov によって湾曲結晶 (bent crystal) による粒子の偏向が提案されたのが始めてである⁶⁾. 実験的には 1979 年に Dubna で湾曲結晶を用いた 8.4 GeV の陽子ビームの偏向が最初に確認された⁷⁾.

1980 年代以降, 湾曲結晶を陽子ビームの操作に実際に応用しようという試みが行われるようになった. ロシア IHEP では, 70 GeV 陽子の遅い取り出しビームの一部を湾曲結晶によって曲げて切り出し, 別のビームラインへ導くシステムが作られた. 1 サイクル (9 秒) あたり 10^{13} 個程度の 70 GeV 陽子ビームから, 10^7 個程度のビームを切り出すことに成功している.

ロシア以外でも CERN や BNL, フェルミ研究所で結晶チャネリングをビーム操作に応用する試みが行われている. CERN では, SPS における湾曲結晶を用いた遅い取出しをはじめとした研究がなされている^{8,9)}. BNL の RHIC では, 金ビームのハローを湾曲結晶によって除去する試みが行われた¹⁰⁾. 通常は銅などのコリメータによってビームハローを除去するが, コリメータにぶつかった一次粒子あるいはコリメータによって散乱されたハローが二次粒子を作りだし, 効率的なビームハローの除去が期待できない. 一方, 湾曲結晶によってビームハローを決まった方向に偏向してやり, そこにあらかじめビームダンプを用意しておけば, 効率的なビームハローの除去が期待できる. RHIC では期待したとおりビームハローを軽減することはできなかったが, これはビームの角度広がり (beam divergence) が計算から予想されていたものよりも 3, 4 倍大きいためであることが示された. フェルミ研究所の Tevatron では RHIC のハロー除去システムの一部を移設して実験を行い, 実際に衝突実験用の検出器 (CDF) の位置でハローが減少することを確認した¹¹⁾. 今後, LHC でのビームハロー除去を念頭に, さらなる改良と実験が行われる予定である.

1.3 実験の目的

本稿では, 広島大学 REFER における 150 MeV 電子を用いた実験と, KEK-PS における 12 GeV 陽子を用いた実験を紹介するが, これらの実験の目的は概略次のようなものである.

- 150 MeV 電子の実験: 電子のチャネリングについては, その理論的な枠組みも含め, 明らかでないことが多い. 比較的手軽に利用できる 150 MeV 電子ビームを用いて繰り返し実験を行い, シミュレーションと実験結果を比較することによってシミュレーションの精度を高め, 電子のチャネリングの理解を深めることを目的とする. 電子のチャネリングを理解する先には, ILC でのビームハローのコリメーションの可能性を見据えている. また, 応用として, REFER からの電子の遅い取り出しに使用する可能性を探る.
- 12 GeV 陽子の実験: 最終的に目指すのは, J-PARC 50 GeV 加速器の遅い取り出しビームラインにおけるビーム分岐デバイスとして湾曲結晶を用いることである. そのためには原理的なことから実際のエンジニアリングまで数多くのハードルを越えなければならないが, まず第一に, 実際に我々の手でビームの偏向・分岐を確認すること, そしてその効率を実験的に求めることを目的とする.

2. 電子ビームの操作 – 広島大学での実験

広島大学 150 MeV 電子周回装置 (REFER) の引き出し線を用いて, 結晶による電子ビーム操作の実験を行った. 前述のように, この実験は, 負電荷の粒子の結晶中における振る舞いの詳細を調べるとともに, REFER における電子線引き出し, ILC におけるコリメータへの応用を念頭に置いたものである.

図 3 に REFER 全体図を示す. REFER は広島大学放射光科学研究センターの入射器である 150 MeV マイクロトロンからの電子線を周回させる, ストレッチャーリングである. 実験は REFER の電子引き出し線で行った. 引き出し電子線は, 強度が 10 kHz, duty 約 80% のほぼ連続ビームである.

図 4 に引き出し線におけるセットアップを示す. 結晶はゴニオメータに固定され, 水平方向 (θ) と垂直方向 (ϕ) に回転できるようになっている. 結晶軸と電子ビームの相対角は約 1 mrad の精度でアライメントされている. 電子ビームの形状を測定するため, 結晶位置から 2340 mm 下流に蛍光板を設置し, 電子線のプロファイルを光学系と市販の暗視カメラ (イメージインテシファイアーチューブと CCD カメラの一体型システム) で観測している. これらの装置は真空容器内に収められており, 真空度は 10^{-5} Torr である. 真空容器の下流にはシンチレーションカウンタを設置して, ビーム強度を常時モニターした.

また, 引き出し線に設置された四極電磁石によ

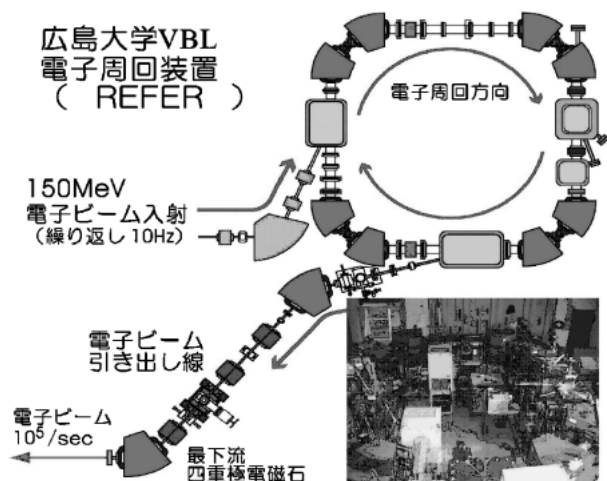


図3 広島大学 150 MeV 電子周回装置 (REFER). マイクロトロンで 150 MeV まで加速された電子ビームは、繰り返し 10 Hz で周回装置に入射され、遅い取り出しで引き出し線へ取り出される。引き出し線の下流部で強度は $10^5/\text{sec}$ である。

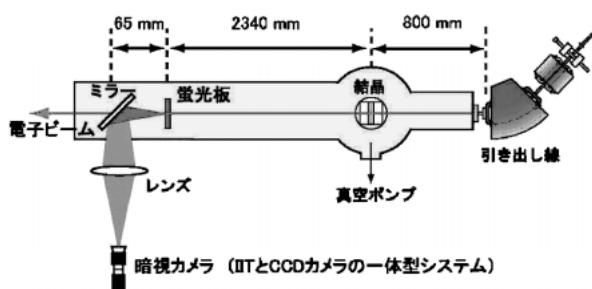


図4 実験セットアップ。

て、ビームの角度広がりを変化させることが可能であり、測定中、結晶位置での角度広がりを 3.0 mrad ~ 5.2 mrad (RMS) で変化させた。四極電磁石の強度を変化させたによるビーム軸のずれが問題になるようなことはなかった。

図5はビーム軸からみたシリコン単結晶を表している。結晶の厚さは $16\ \mu\text{m}$ で、直径 10 mm の穴の開いたホルダーで保持されている。電子ビームに対するアライメントは、ホルダーがビーム軸と垂直となる場合を基準とするように行った。この場合電子ビームがシリコン結晶の $\langle 100 \rangle$ 軸に沿って入射する。以下、 θ, ϕ ともに 0.0 mrad という場合はこの場合を指している。また前述のように 150 MeV 電子に対する Lindhard 角は 0.69 mrad である。

図6に θ を 0.0 mrad に固定し、 ϕ 方向を変化させながら、電子ビームの中心位置を測定した結果を示す。図6(a)はビームの角度広がりが 3.0 mrad のと

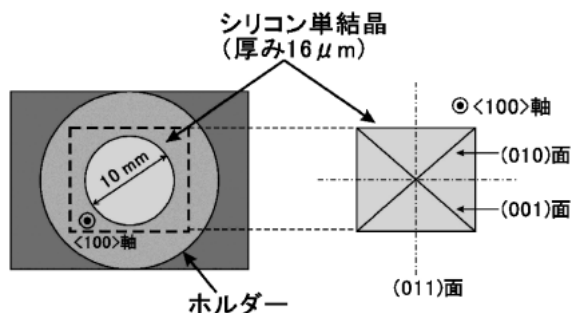


図5 シリコン単結晶。厚み $16\ \mu\text{m}$ の板状のシリコン単結晶で、結晶表面が(100)面、表面に対して垂直方向が $\langle 100 \rangle$ 軸となっている。結晶は 10 mm の穴の開いたホルダーで挟みこむことで固定されている。

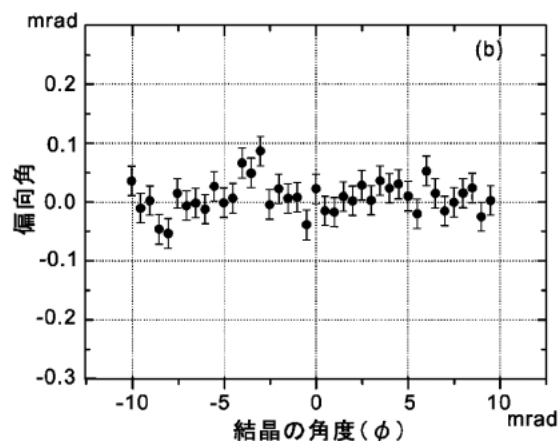
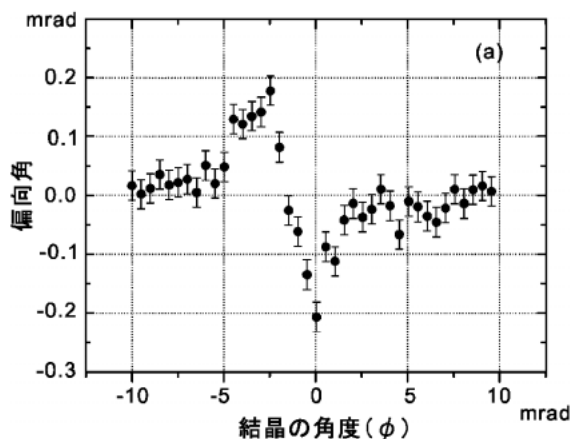


図6 結晶の角度と偏向角。図の(a)は結晶位置でのビームの角度広がりが 3.0 mrad, (b)は 5.2 mrad の実験結果を示す。(a)では明らかに結晶の角度を変化とともに偏向角も変化するが、(b)では偏向角はゼロである。

き、図6(b)が 5.2 mrad の場合である。横軸は垂直方向の結晶の角度 ϕ , 縦軸はビーム中心が動いた距離と結晶と蛍光板との距離から導出した偏向角である。こ

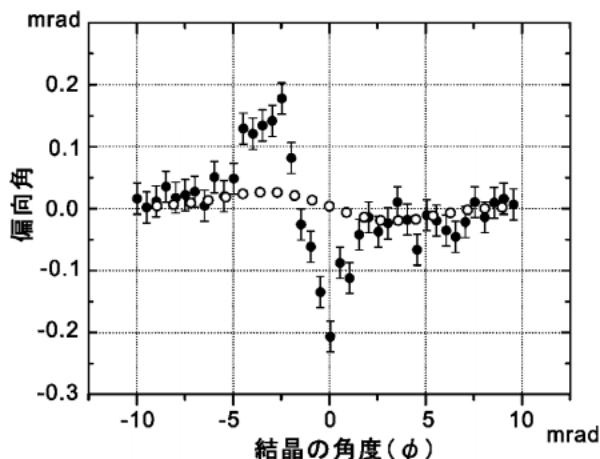


図7 シミュレーション結果と実験結果との比較. 黒丸が実験結果, 白丸がシミュレーション結果を示す. 電子ビームの空間分布は σ が5 mmのガウス型, 角度分布は σ が3.0 mradのガウス型とした.

れを見ると, ビームの角度広がり(3.0 mrad)のときは偏向角が変化しているが, 5.2 mradのときは, ビームの偏向が見られないことがわかる. 図6(a)において偏向角が0となる点が $\phi \sim -2$ mrad程度であるのは, 電子ビームと結晶軸のアライメントの精度によるものである. またビームの偏向がみられる範囲がLindhard角(0.69 mrad)より大きく, ビームの角度広がり(3.0 mrad)を反映していることもみてとれる.

この現象を理解するために, Lindhardのモデルから導出された連続ポテンシャルを用いて, シミュレーションを行った. 計算結果の一例をトラジェクトリとして示したのが図2である. 結晶の位置における, 電子ビーム形状と角度分布をそれぞれ標準偏差5.0 mm, 3.0 mradのガウス分布としてシミュレーションを行ない, 実験値と比較したのが図7である. 図の中で, 黒丸が実験値, 白丸が計算値を示す. シミュレーションが定性的にビーム偏向の傾向を再現していることはわかるが, ビーム偏向の大きさを含む定量的な再現はできていない. 特に, 実験に比べて, シミュレーションの方が偏向の効果を小さく見積もっていることに注意したい. このシミュレーションは個々の粒子の軌道を追跡しているため, 非常に時間がかかる. そのため, Lindhard角より二倍以上大きな角度で入射した粒子に対する偏向は考慮していないが, 図2をみてもわかるように, 結晶中において粒子は多数の結晶軸から影響をうけるため, ある程度大きな角度で入射した粒子も, 無視できない程度の偏向をうける可能性がある. これを考慮して, 原因を調査中である.

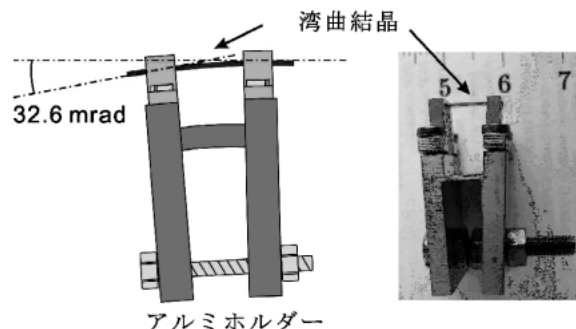


図8 陽子ビーム実験で用いた湾曲結晶. 結晶は, 高さ3 mm, 幅0.3 mm, 長さが10 mmで32.6 mrad湾曲させたものを用いた.

3. 陽子ビームの操作 - 12 GeV 陽子ビーム偏向実験

序論でも述べたように, この実験は, 大強度陽子加速器施設(J-PARC)の50 GeV陽子ビームラインにおけるビーム操作システム構築へ向けての第一段階と位置づけられる.

陽子は正電荷を持つため, 結晶面の面間に捕捉される面チャネリングが利用される. この実験では, 共同研究者であるロシアIHEPのグループによって作成された, 幅0.3 mm, 高さ3 mmの端面を持つ長さ10 mmのシリコン単結晶を機械的に32.6 mrad曲げた湾曲結晶を使用した. 図8がその写真である. 結晶は湾曲面が結晶面の(111)面となるように切り出されている.

12 GeV陽子ビームが結晶面(111)の面間に捕捉される場合のLindhard角は0.056 mrad, したがって, 全陽子ビームのうち, 入射角が0.056 mrad以下で1 mm²の結晶端面に入射した陽子が結晶により偏向される. EP-2ビームラインの典型的なビーム断面の直径は10~20 mm程度, また角度広がり(1 mrad程度)と考えられるので, 偏向ビームは全ビーム強度より4~5桁弱い強度になることが予想される.

実験セットアップを図9に示す. 湾曲結晶はゴニオメータのステージに設置され, 水平方向, 垂直方向それぞれ独立に角度を制御できる. ゴニオメータは, ビーム形状モニター用の蛍光板(Desmarquest社AF995R, 100 mm×100 mm)とともに, 可動ステージのテーブル上に設置されている. さらに結晶の位置から1450 mm下流にCsI板(2 mm×5 mm, 厚さ3 mm)を貼り付けたもう一枚の同じ蛍光板を設置した. CsI板は, 強度が数桁弱い偏向ビームを観測するために用いられるが, 偏向しない大部分のビームの形状は

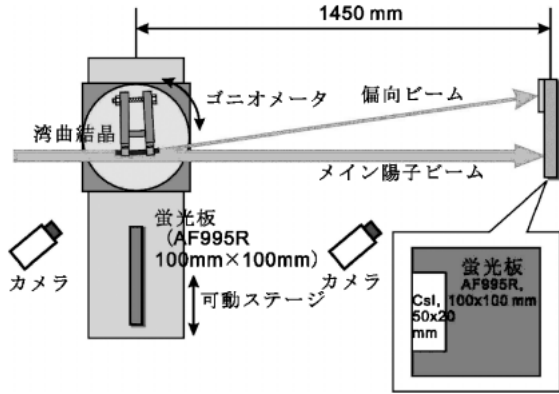


図9 陽子ビーム偏向実験のセットアップ。

蛍光板でモニターすることができる。このCsI板を取り付けた蛍光板も別の可動ステージに設置され、偏向ビームのスポット位置に応じて、横方向の位置を遠隔制御できるようになっている。二つの蛍光板は、二台のカメラで撮影され、偏向ビームと主ビームの場所と形状がPCに取り込まれる。

ビームの測定の結果、結晶の位置でのビーム形状はガウス型で、ビームサイズは水平方向が $\sigma=15$ mm、垂直方向が $\sigma=12$ mmであった。

結晶をビームの中心に置いたとき下流の蛍光板で観測した典型的な画像を図10(a)に示す。中心付近の明るいスポットがメインビームを示しており、図の左に見える白い板がCsI板を示している。この状態では、CsIがメインビームのビームハローで光ってしまうため、偏向したビームスポットは全く見えない。そこでビーム軸上から結晶を完全に離れた状態で取り込んだ画像をバックグラウンド画像として差し引いた図が図10(b)である。これを見るとCsIの位置に偏向したビームが見えていることがわかる。このビームスポットの位置と、湾曲結晶の曲げ角および結晶から下流蛍光板までの距離から予想した位置が一致したことから、このスポットが偏向ビームであることを確認した。さらに結晶を左右上下に平行に動かすと、動かした距離と同じ距離だけCsI上のビームスポットが動くことも確認した。

メインビーム強度 ($10^{12}/\text{spill}$) と偏向ビーム強度の比を求めることによって、偏向ビーム強度を評価できる。横軸に水平方向の角度 (θ)、縦軸に偏向ビーム強度をプロットしたのが図11である。ビームの角度広がりがあるため、0.056 mrad よりも大きな範囲で θ を変化させても、偏向ビーム強度がゼロになっていないことが分かる。

この実験結果を定量的に検討するために、シミュ

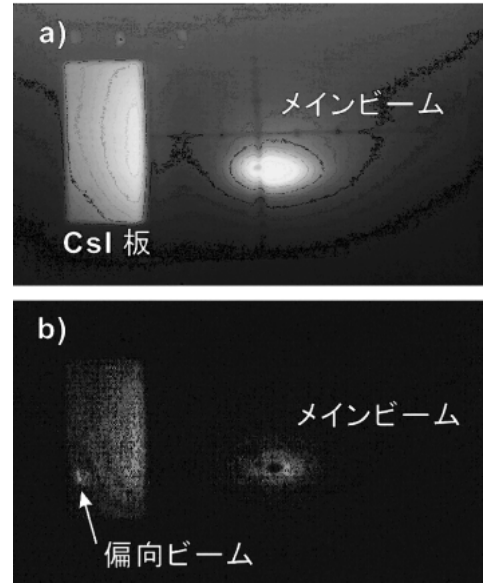


図10 下流蛍光板の画像。(a)はバックグラウンドを引く前の画像、(b)は、バックグラウンドを引いた後の画像である。

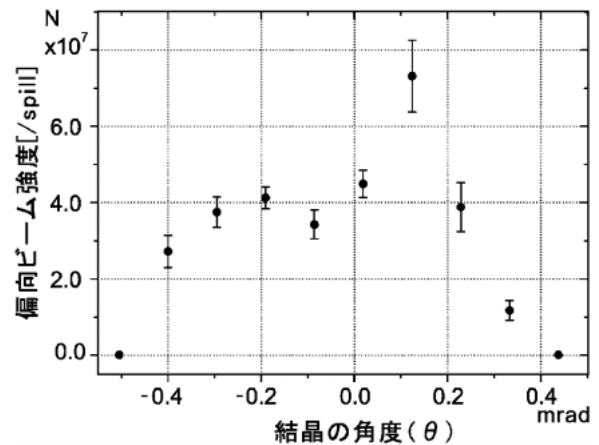


図11 結晶の水平方向の角度 (θ) と偏向ビーム強度。

レーションコード CATCH⁴⁾を使ってシミュレーション計算を行った。実験結果とシミュレーション結果の比較を行うため、ビームの角度広がりおよびビーム強度をパラメータとして：

$$\chi^2 = \frac{1}{n-2} \sum \frac{1}{\sigma_i^2} (n_i^{\text{exp}} - n_i^{\text{sim}})^2$$

を定義し、ビームの角度広がり最適値を求めた。ここで、 n_i^{exp} 、 σ_i 、 n_i^{sim} は、それぞれ、i番目の結晶角における観測された偏向ビーム数とその誤差、シミュレーションによる値である。その結果、陽子ビームの角度広がりには0.6 mrad程度であることがわかった。

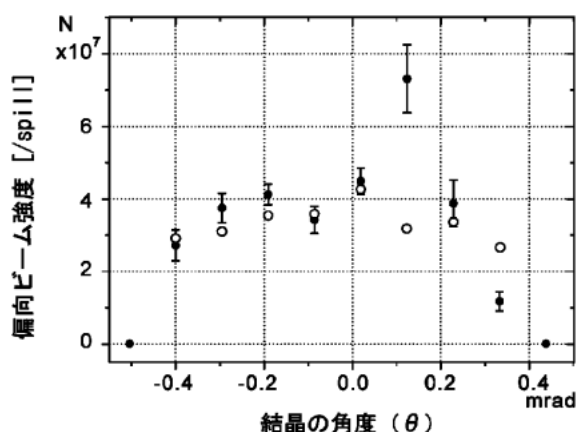


図12 図11にシミュレーション結果を重ねた図。黒丸が実験値、白丸が陽子ビームの角度広がりがあるときのシミュレーション結果である。

図12は図11に陽子ビームの角度広がりがあるときのシミュレーション結果を重ねたものである。図の黒丸は実験結果を示しており、白丸がシミュレーション結果である。このときの偏向効率を実験値から求めると、約23%となる。

この実験から、曲げ角32.6 mrad長さ10 mmの湾曲結晶を用いて、12 GeVの陽子ビームを効率20%程度で偏向できることを実験的に確認することができた。さらにシミュレーションと比較することによって、入射した陽子ビームの角度広がりがあることが評価できることもわかった。これらの結果から、我々の持つ理論的な枠組みやシミュレーションがこのエネルギー領域で十分に使えることがわかり、J-PARCの50 GeV陽子ビームラインでの結晶によるビーム操作の可能性に見通しを得られた。

4. 展 望

4.1 国際リニアコライダー (ILC) への応用可能性

ILCの電子・陽電子衝突点では、電子・陽電子反応の確率をできるかぎりあげるため、粒子のパンチを縦5 nm、横600 nm程度に絞り込む。周知のように、ビームのサイズを小さくするためには、強力な収束電磁石を衝突点のできるだけ近くに設置する。一方、電子・陽電子衝突によって起こった反応を再構成し、そこで起こった現象を正確に知るためには、高精度の測定器を衝突点にできる限り近づけて設置する必要がある。

ILCに限らず高強度ビームはまた、非常に高いバックグラウンド源でもある。測定器の性能を保ったまま、

これをどこまでビームに近づけることができるのかは、ILCにおける物理探索の大きな鍵を握る。ILCの主線形加速器の出口から衝突部までの、いわゆるビーム分配システムの使命は、高ルミノシティと低バックグラウンドという相反する要求をいかにして達成するかである。

測定器に対するバックグラウンド源として大きなものに、ビームのテールによるものがある。前述のように、ビームは最終収束電磁石 (Final Doublet = FD) によって強く曲げられるが、テールがFDに当たって生じた光子や、直接当たらないにしてもFDで曲げられた時に生じた光子は、測定器、特に衝突点に一番近いバーテックス測定器にとって大きなバックグラウンドとなることがわかっている。

このテールが生じる原因は主に二つである。

1. ビームが最終収束系を通過する時にできるテール。これはビームの色収差や幾何収差が要因である。
2. ビームができてから主線形加速器によって最高エネルギーまで加速されるまでの、いろいろな要因によってどうしても生じてしまうテール。

ビーム分配システムの初段に2番目の原因によるテールを除去するセクション、コリメータが設置されている。ここで議論する結晶によるコリメータはこれに関するアイデアである。

ILCにおけるコリメータの設計についてはすでに詳細な議論が開始されているが、基本的には、二段階のコリメーション方式である。ILCではスポイラーと呼ばれる第一段階コリメータでテールを散乱させ、下流においたアップソーバでこれを吸収する。現在の設計ではビーム分配システムの上流部分に複数のスポイラー (8.6 mm (0.6X₀) 程度の銅) とアップソーバ (4.3 m (30X₀) 程度の銅) のセットを設置する方針となっている。特にコリメータはビームの近くに設置するため、ウエイクフィールドによるビームのエミッタンスへの影響などを考えた慎重な設計が必要だが、それに加えてビームによる損傷も大きな問題である。現在考えられているのは、円盤型の消耗品タイプである。

このスポイラーに結晶を使うことはできないだろうか。テールのシミュレーションによると、スポイラー設置予定場所において、テールの角度広がり、シリコン結晶のチャネリング臨界角より十分に小さいことが期待できる。250 GeVの陽電子に対する湾曲結晶の効果を見積もると、湾曲角を0.1 mradとした場合、2 mm程度の湾曲結晶であれば80%近い効率でビームを偏向することが期待できる。ちなみに8.6 mmの

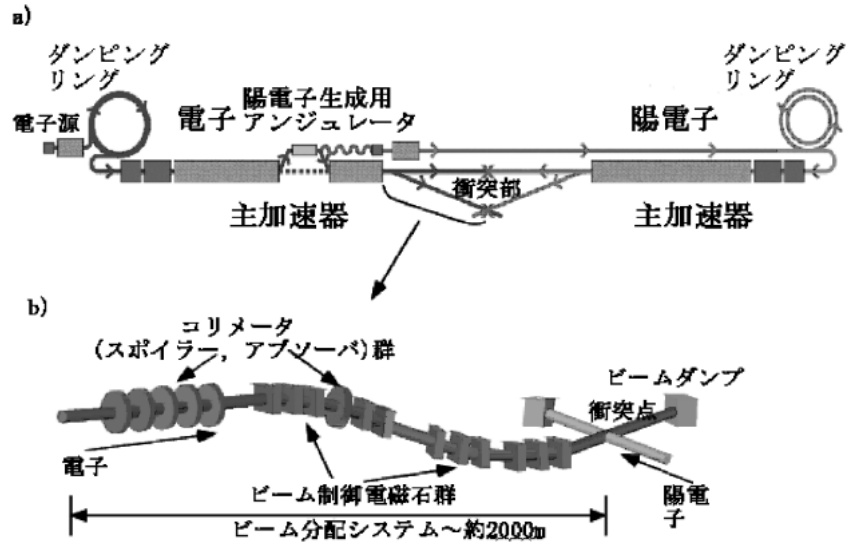


図13 ILC 全体構成図とビーム分配システム.

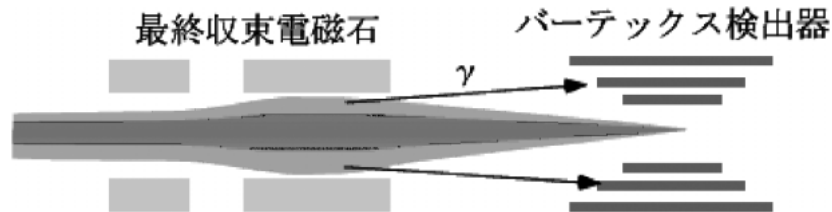


図14 ビームハローと測定器に対するバックグラウンド.

銅による 250 GeV 電子の平均多重散乱角は $0.04 \mu\text{rad}$ である. また, シリコンの 2 mm は, $0.02 X_0$ であり, これは 8.6 mm の銅の 1/30 であり, ビームによるエネルギー損失 (すなわちダメージ) は非常に小さいと考えられる.

このように, ILC のコリメータシステムに結晶によるビーム偏向技術を利用できる可能性がある. しかし, これはまだ机上の話である. この技術の実用可能性を見極めるには以下のような課題がある.

- ① 結晶によるビームコリメーションの実証.
- ② 実際のコリメータシステムとしての実装方法の確立.
- ③ ビームによる結晶へのダメージの定量的調査.
- ④ ビーム偏向技術が確立しているのは, 面チャネルリングによる正電荷粒子のみである. 電子の場合, 結晶中でどのように振る舞うのか, そしてその振る舞いを利用したビーム操作が可能なのか.

以上の項目の内, ①, ②に関してはフェルミ研究所で進行中の Tevatron におけるビームコリメーション実験から学ぶことが可能である. われわれもこの実験に参加すべく関係者と議論を続けている. ②, ④に関し

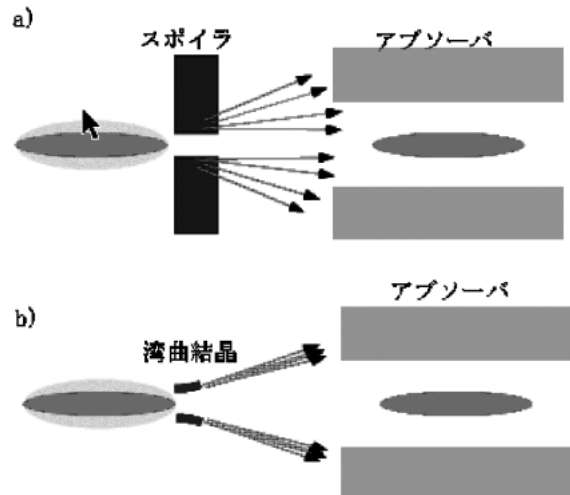


図15 結晶による2段階コリメーションの原理. a) 流においてスライダによってテール部分を削り, そこで生じた2次粒子を, 下流においてアブソーバで吸収する. この場合スライダは散乱体として働く. b) スライダに湾曲結晶を用いると, テールを特定の角度に偏向させることができるため, 効率のよりテール除去ができる可能性がある.

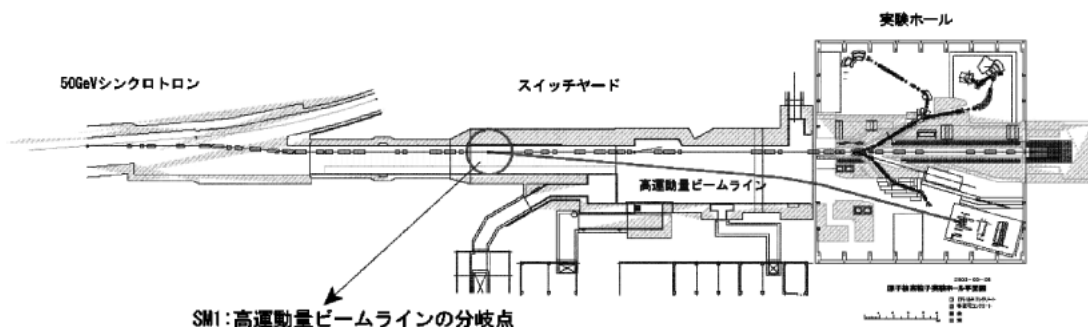


図16 J-PARC ハドロン実験施設の概要. 左側の 50 GeV シンクロトロンから取り出されたビームが実験ホールに導かれる. 毎秒 10^{14} 個の陽子ビームを導く一次ビームラインの途中からその一部を分岐させ (SM1) 高運動量ビームラインに導くと, 毎秒 10^9 個から 10^{12} 個程度の一次ビームを得ることが出来る.

では KEK-ATF におけるテスト実験を計画している. ATF におけるテスト実験項目としてはすでに採択されており, 現在関係者と実験セットアップの実装方法について検討を重ねている. また③については, 前述の J-PARC におけるビーム分割システムの開発をつうじて定量的データが得られる.

結晶を使ったビーム操作は陽子ビームのみならず, 電子や陽電子ビームにも応用できる可能性があると考えている. KEK には, ATF という世界に誇る高品質電子ビーム設備が存在している. 広島大学にも小型ながら, 柔軟に活用できる電子ビーム設備がある. これを使った効率的な研究開発が可能であると考えている.

4.2 J-PARC 50 GeV 加速器の遅い取出しビームラインへの応用可能性

東海村で建設が進んでいる J-PARC 50 GeV 加速器からの遅い取出しビームを用いる施設がハドロン実験施設である (図 16). ここでは, 50 GeV 陽子シンクロトロンから遅い取出しによって取り出された毎秒約 10^{14} 個の陽子ビームを用い, 固定標的での原子核物理あるいは素粒子物理の実験が行われる. ハドロン実験施設の最大の特徴はこの大強度陽子ビームを標的に照射して得られる K や π などの大強度の二次粒子ビームであるが, 一方で 30 GeV ないし 50 GeV の一次陽子ビームを用いる研究への関心も少なからず表明されてきた.

このような一次陽子ビームを直接用いる実験では, 毎秒約 10^9 個から 10^{12} 個程度の陽子ビームを必要としている. 従来, 主ビームからその一部を「切り取って」別のビームラインに導くためのデバイスとして静電セパタムなどの技術が用いられてきたが, 湾曲結晶のチャネリングを用いるビーム偏向も分岐デバイスの有力な候補である (図 17). 湾曲結晶を用いる場合の利点として主に次の二つが考えられる.

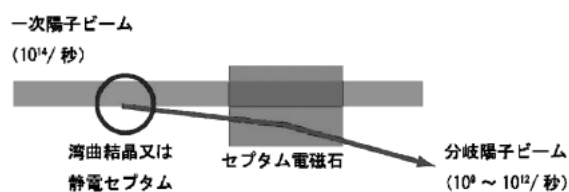


図17 一次ビーム分岐部の模式図.

- 主たる一次陽子ビームに曝される物質量が少なく, したがってビーム損失に伴う熱や放射線, 放射能の発生が少なくすむ:

例えば, J-PARC 50 GeV 加速器の遅い取り出し部分で考えられている典型的な静電セパタムのセパタム面は, $80 \mu\text{m}$ ほどのタングステン線が 1200 本程度並んだものである. ビームに曝される部分は高さ 1 cm 程度の部分だとすると, 物質量は 1 g 程度となる. 一方, ビーム分岐に用いられる典型的なシリコン結晶は, 断面積が 1 mm^2 から数 mm^2 で長さが 10 mm ないし数 10 mm なので, その物質量は 0.02 g ないし 0.2 g 程度となる. このことから, シリコン結晶を用いるとより少ないビームロスでビームを偏向・分岐させられる可能性が十分にある.

- 小さな (エミッタンスのよい) ビームを得ることが出来る:

静電セパタムの場合, ビームハローも含めてセパタム面を境に分岐側に入った部分がすべて偏向を受ける. 一方, 湾曲結晶を用いた方法では, 例えば数 mm^2 の結晶の断面に入り, かつ, Lindhard 角以下の角度で入射したもののみが偏向を受けるため, ビームの像が小さくなる. このサイズの小さな良質の陽子ビームについては, 陽子ビームと原子核の反応から生じる電子対を測定する実験など, 強い要望がある.

今回 KEK-PS で行った実験で、我々自らの手で湾曲結晶を用いたビーム分岐を実現することが出来た。しかしそれはスピルあたり 10^{12} 個程度の陽子ビームについて空気中で行ったものである。J-PARC はなんととっても大強度ビームの施設である。そこでの毎秒 10^{14} 個程度の陽子ビームの一部を湾曲結晶で偏向・分岐させるためには、発生する熱の除去や耐放射線性、メンテナンス性に留意し、かつ、真空内で動作可能な駆動システムを作り上げるなど、チャネリングそのものの原理的なこと以外にエンジニアリングを含めた種々の問題を解決しなくてはならない。今後も地道に開発研究を行っていきたいと考えている。

5. まとめ

結晶チャネリング、特に湾曲結晶のチャネリングを用いたビーム操作は、Dubna でビーム分岐の最初の試みが行われてから、ロシア IHEP, CERN, フェルミ研究所, BNL など綿々と研究されてきた。正電荷を持つ陽子のチャネリングについては理論的な理解が進んでいるが、負電荷を持つ電子のチャネリングについては、理解が進んだとは言いがたい。このような状況下で我々は、広島大学の比較的手近な加速器を用いて電子ビームのチャネリングについて基本的な理解を深めようと実験を行った。まずは湾曲していない薄いシリコン結晶を用いてチャネリング現象を観測することに取り組み、この結果を用いて理論的な理解を深めようとしている。この努力は ILC でのビームコリメーションの検討を進める上で、避けて通れないものである。一方、陽子のチャネリングについては、J-PARC でのビーム分岐の実現に向けた第一歩として、KEK-PS の 12 GeV 陽子を用いて湾曲結晶を用いたビーム分岐の可能性を自らの手で実証することに成功した。この実験では、チャネリングの様相を観測することによってビームの角度広がりやを測定できること、すなわちビーム診断ができる可能性を示すことも出来た。今後は、電子ビームについてはさらに基礎的な理解を深め、陽子ビームについては分岐デバイスの実現に向けたエンジニアリングを含めた具体的な検討を進めていく予定である。

謝辞

本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤(B)・課題番号 16340082 (研究代表者：澤田)、および、KEK・大学等連携支援事業「広島大学産学連携センター超高速電子周回装置を用いた教育研究(事業責任者：高橋)」の援助を得て実施されました。

本研究は、この論文の共著者以外に、遠藤一太、佐藤博紀、上田敬太郎(以上広島大学大学院先端物質科学研究科)、黒岩洋敏、大西健広(以上広島大学ベンチャービジネスラボラトリー)、V. Biryukov, Yu. Chesnokov(以上ロシア IHEP) 各氏との共同研究です。

また、KEK-PS での実験に際しては、KEK の職員の皆様、また、同時に実験した実験グループの皆さんに多大なるご協力をいただきました。ありがとうございます。

参考文献

- 1) M. T. Robinson and O. S. Oen, Phys. Rev. 132, 2385 (1963).
- 2) G. R. Piercy *et al.*, Phys. Rev. Lett. 10, 399 (1963).
- 3) J. Lindhard, Mat. Fys. Medd. Dan. Vid. Selsk. 34, 1 (1965).
- 4) Valery M. Biryukov, Yuri A. Chesnokov, and Vladilen I. Kotov, "Crystal Channeling and Its Application at High-Energy Accelerators", Springer-Verlag, 1997.
- 5) "The 2nd International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena (Channeling 2006)", 3-7 July 2006, Frascati, Rome, Italy, <http://www.lnf.infn.it/conference/channeling2006/>.
- 6) E. N. Tsyganov, Fermilab TM-682, TM-684 (1976).
- 7) A. A. Elishev *et al.*, Phys. Lett. B 88, 387 (1979).
- 8) G. Arduini *et al.*, Phys. Lett. B 422, 325 (1998).
- 9) Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Res. B 164-165, 27 (2000).
- 10) R. P. Fliller III *et al.*, Phys. Rev. Special Topics-Accelerator and Beams 9, 013501 (2006).
- 11) Richard A. Carrigan *et al.*, Prepared for the 2nd International Conference on Charged and Neutral Particles Channeling Phenomena, 3-7 July 2006, Frascati, Rome, Italy, FERMILAB-CONF-06-309-AD.