

EXPERIMENTAL STUDY OF POSITRON PRODUCTION FROM SILICON AT HIGH BUNCH CHARGES

Tsuyoshi Suwada^{1,A)}, Kazuro Furukawa^{A)}, Takuya Kamitani^{A)}, Masanori Satoh^{A)}, Takashi Sugimura^{A)},
Hideki Okuno^{B)}, Kensei Umemori^{C)}, Hiroyuki Fujimoto^{D)}, Ryosuke Hamatsu^{D)}, Katsuhide Yoshida^{E)},
Alexander P. Potylitsyn^{F)}, Igor S. Tropin^{F)}, Robert Chehab^{G)},

A) Accelerator Laboratory, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

B) Institute of Particle and Nuclear Studies, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

C) Institute of Materials Structure Science, High Energy Accelerator Research Organization (KEK),

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

D) Department of Physics, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami-Ohsawa, Hachioji, Tokyo 192-0397, Japan

E) Saga Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-0005, Japan

F) Nuclear Physics Institute, Tomsk Polytechnic University, 634050, P.O.Box 25, Tomsk, Russia

G) LAL, IN2P3-CNRS, Universite de Paris-Sud, Bat.200-B.P.34, 91898 Orsay, France

Abstract

We investigated so-called channeling breaking phenomena through positron production from an axially-oriented silicon crystal with the thickness of 2.55 mm using 8-GeV channeling electrons with high bunch charges at the KEKB electron/positron injector linac. The crystal axis $\langle 110 \rangle$ has been aligned to the electron beam by a precise goniometer. The positron yield generated in the forward direction with the momentum of 20 MeV/c was measured by using a magnetic spectrometer depending on the electron bunch charge. The results show that the positron yield is proportional to the impinging bunch charge in the intensity range of 0.1-3.2 nC within the experimental errors.

高電磁場が及ぼすシリコン結晶による陽電子生成実験

1. はじめに

本報告は、8GeV単バンチ電子ビームがシリコン結晶に衝突したときの陽電子生成への影響についてその実験結果をまとめたものである。

KEKB入射器を中心とする共同実験グループは、次世代のリニアコライダーやBファクトリーに要求される大強度陽電子源を目指して単結晶を標的とした陽電子生成実験を続けている[1]。これは、高エネルギー電子をタングステンなどの重金属標的に照射し陽電子を生成するという従来の方法では、標的の熱負荷による損傷のため陽電子生成量に限界が生じるからである。結晶標的による陽電子生成の利点は、高エネルギー電子が結晶軸に沿って入射したとき、電子は、結晶原子列の作る電磁ポテンシャルに捕獲され、原子列との集団的な相互作用を通してチャネリング放射(CR)や干渉性制動放射(CB)を効率的に生成することにある。これらの放射は、電子陽電子対生成過程における陽電子の生成効率を増大させると期待できる。我々は、重金属結晶標的(タングステン)や軽元素結晶標的(シリコン、ダイヤモンド)を利用した一連の陽電子生成実験を報告している。

リニアックのビームに特徴的な極短バンチ電子ビームが結晶標的に入射するとき、陽電子生成に対する影響を調べておくことは標的として重要である、との議論が持ち上がり実験を行うことにした。

2. チャネリングの破れ

極短バンチ電子ビームが、結晶軸に沿って入射したとき、ビーム進行方向に対するローレンツ収縮により結晶中の原子列が受ける瞬間的な電磁力は強力なものになる。ビーム電荷密度が低い場合、原子列は、電磁相互作用を通して集団的な振動運動をすると考えられるが、電荷密度が高くなり振動限界を越えてしまうと原子列は破壊されることになる。文献[2]によると、この現象は、“チャネリングの破れ(Channeing Breaking)”と呼ばれ、電荷密度がある閾値($\sim 10^5 \text{ A/cm}^2$)を超えると結晶に相転移が生じ固体プラズマが出現すると考えられ、固体プラズマを利用した新しい加速方式として提唱されている[3]。一方、このような現象は、陽電子生成に直接的な影響を与えることになり、その可能性を評価しておくことは重要である。特に、陽電子標的の場合は、入射電子の電荷量をできるだけ大きくする必要があるのである。今のところチャネリングの破れを説明する理論はなく、実験的に調べるほかに方法はない。過去の実験では、エネルギーが低い電子リニアック(最大で30MeV)による放射実験が報告されているが、GeV領域での系統的な放射実験は例がない[2]。我々の既存の装置では、直接チャネリング放射を検出することはできないが、もし、このような興味深い現象が出現すれば、陽電子生成にも何らかの異常が見

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

られるかもしれない。

3. 陽電子生成実験

3.1 結晶標的

結晶標的としては、チャネリング放射による陽電子生成の増大率が比較的大きい薄いシリコン(結晶軸 $\langle 110 \rangle$)を用いることにした。使用したシリコンの厚さは、2.55mm(放射長 $0.0272X_0$)である。

3.2 入射電子

入射電子の条件は、結晶軸に対する入射角がチャネリング放射条件を満たす臨界角(シリコンの場合 $170\mu\text{rad}$)より小さくすること、また電荷密度をできるだけ大きくすることである。電荷量を大きくしてゆくと、エミッタンス劣化とバンチの伸長が避けられないが、丹念なビーム調整により最大電荷量 3.2nC/bunch を標的まで輸送を可能にした。ただし、最大電荷量では、チャネリング条件は満足するが、ビーム劣化を起し最大電荷密度にはならなかった(図1)。表1に入射電子(8GeV)の電荷条件をまとめる。

表1：入射電子の電荷量と電荷密度

	最小値	最大値
電荷密度 [A/cm^2]	0.15×10^4	1.2×10^4
電荷量 [nC/bunch]	0.09	3.2

3.3 陽電子スペクトロメータ

陽電子スペクトロメータを用いた運動量分析装置は、すでに報告している[4]。ただし、本実験では、陽電子数を測定するルーサイトから発生するチェレンコフ光をライトガイドで誘導し、2本の光電子増倍管(PMT)に入力している。片方のPMT(高ゲイン)にはNDフィルターを挿入し入力光を減衰させ、他方のPMT(低ゲイン)にはそのまま入力している。2本のPMTは、ほぼ同じ出力になるように高電圧(HV)を調整し、陽電子測定ダイナミックレンジを充分確保するようにしている。

3.4 レーザーによる光電子像倍管の校正

本実験の入射電荷量の範囲は、約30倍にもなるのでPMTゲインを電荷量に応じて最適化する必要がある。また、陽電子生成を定量化するには、HVに依存するPMT出力の非線形性を校正しておく必要がある。図5は、PMTに通信用光ケーブルを通して直接レーザー(Advanced Photonic Systems社、 $\lambda=438.7\text{nm}$ 、ピーク出力 $\sim 140\text{mW}$ 、パルス幅 $\sim 60\text{ps}$)を入射し、PMT出力を測定した結果である。陽電子数は、PMT出力としてAD変換される。ADC値は、PMTへの入力光量とPMTゲインの関数となる。PMTに印加するHVをパラメータとし、レーザー強度に対するADC値を測定することにより校正データを得ることができる。校正データに4次の多項式を用いて最小二乗法を適用し、校正曲線を決めた。このように、陽電子生成

量は、校正曲線に従い校正された。

4. 実験結果

4.1 ロッキングカーブ

結晶標的の入射電子に対する軸出しは、入射電子に垂直な面でゴニオメータの二軸(H, V)を回転させて陽電子強度が最大になる角度を探すことで行う。図2は、シリコンに8GeV電子を入射させ、ゴニオメータを結晶軸の回りに回転させたときの陽電子生成量の変化(運動量 $P=20\text{MeV}/c$)を示す。図3は、 V 軸を最大値に固定し H 軸の回りにスキャンした結果(ロッキングカーブ)を示す。結晶軸がビーム軸と一致したとき(on-axis)は、陽電子生成が最大となり鋭いピークとなる。その増大度は、軸を外したとき(off-axis)に比べ約10倍にも達し結晶による陽電子増大が如何に大きいかがわかる。ロッキングカーブの分布幅(Lorentzian関数でフィット)は、 CR 、 CB による放射過程を特徴づけるパラメータとなる。図4に入射電荷量に対する分布幅の変化を示した。この結果を見る限り、入射電荷量に対する依存性は、ほぼ一定と考えられ異常現象を示す兆候は見られない。

4.3 陽電子生成

図6に入射電荷量をパラメータとして、高/低ゲイン2本のPMTで測定した陽電子生成量を示す。ここで陽電子生成量は、on-axisでの陽電子数からoff-axisでの陽電子数を差引いた量で定義されるので、結晶効果により増加した陽電子数を表している。電荷量が増えるに従いバックウランド(BG)が急速に増大したのでBGの差引きには十分注意を払った。陽電子生成量は、BG差引き後、校正曲線に従い校正された。実験結果は、入射電子の電荷量(0.1-3.2nC/bunch)をパラメータとし陽電子生成量を測定した結果、実験誤差の範囲内で比例していることを示した。これは、入射電子の電荷密度($0.15-1.2 \times 10^4 \text{A}/\text{cm}^2$)の範囲内では陽電子生成に異常現象は認められないことを示すものである。

4. まとめ

シリコンに8GeV単バンチ電子ビームを入射し陽電子生成実験を行った。入射電子の電荷量(0.1-3.2nC/bunch、電荷密度 $0.15-1.2 \times 10^4 \text{A}/\text{cm}^2$)をパラメータとし陽電子生成量を測定した結果、実験誤差の範囲内で比例しており、チャネリングの破れを示すような異常現象が認められないことを確認した。

参考文献

- [1] T.Suwada, *et al.*, *Procs. the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan*, p.396.
- [2] R.A.Carrigan, presented at *Int. Workshop on Relativistic Channeling and Related Phenomena*, Mar. 23, 2004, Frascati, Italy.
- [3] R.Hofstadter, “*The Atomic Accelerator*”; HEPL-560 (1968).
- [4] T.Suwada, *et al.*, *Phys. Rev. E* 67 (2003) 016502.

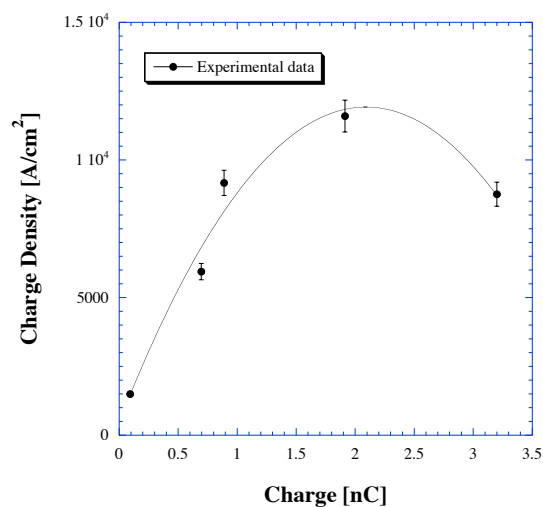


図 1：入射電子の電荷量に対する電荷密度の変化。

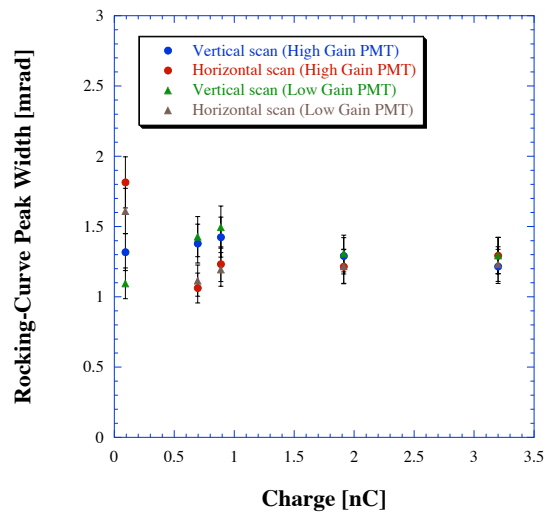


図 4：入射電子の電荷量に対するロッキングカーブ分布幅の変化。

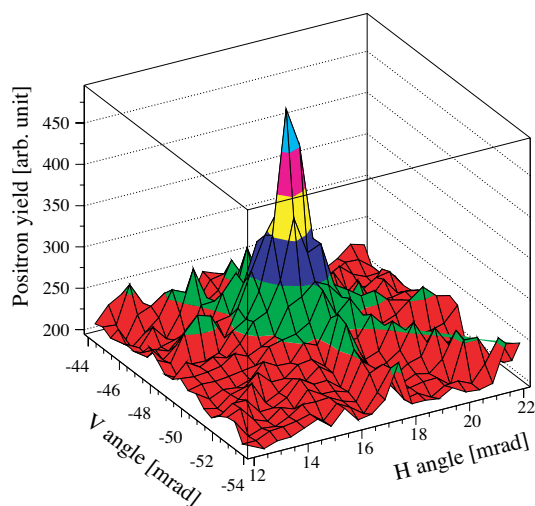


図 2：二軸(H, V)回転平面上における陽電子生成の強度分布。入射電荷量は1nC/bunch。

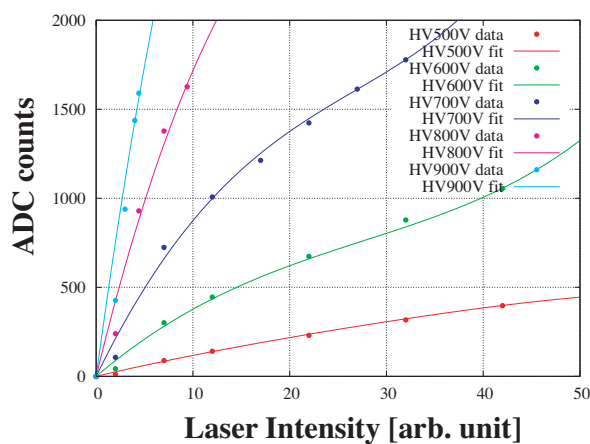


図 5：レーザーによる光電子増倍管のゲイン校正結果。

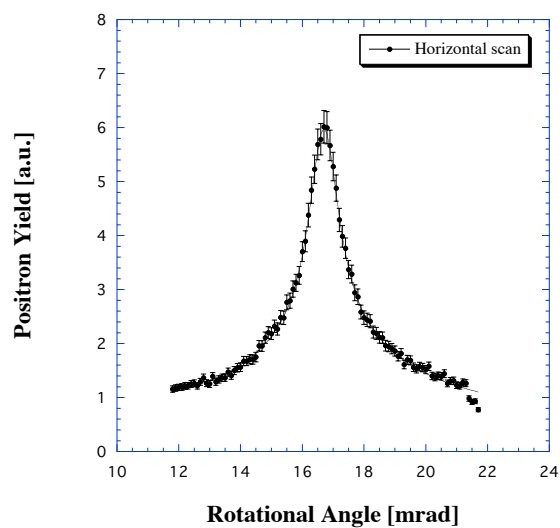


図 3： H 軸を回転させたときの (V 軸は最大値に固定) ロッキングカーブ。

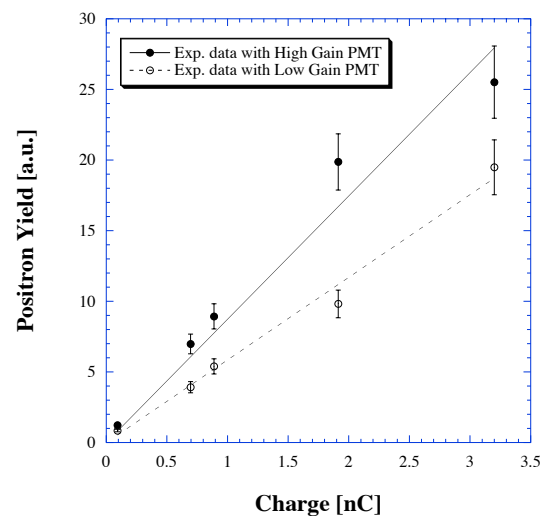


図 6：入射電子の電荷量に対する陽電子生成量の変化。

