

EXPERIMENTAL STUDY OF POSITRON PRODUCTION FROM MONOCRYSTALLINE TARGETS AT THE KEKB INJECTOR LINAC

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

A) Accelerator Laboratory, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

B) Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, 1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, Japan

C) Institute of Materials Structure Science, 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 report a series of positron-production experiments from an axially-oriented single crystal target by 4- and 8-GeV channeling electrons at the KEK electron/positron injector linac. The targets tested are tungsten crystals with the maximum thickness of 14mm and diamond crystals with the thickness of less than 7.25mm, and their combinations with amorphous tungsten plates. The axis $\langle 111 \rangle$ for tungsten crystals and that $\langle 110 \rangle$ for diamond crystals have been aligned to the electron beam by a precise goniometer. The positron-production efficiencies in the momentum range of less than 30MeV/c were systematically investigated for each target by measuring the positron yield generated in the forward direction with a magnetic analyzer. The result shows that the maximum positron-production efficiency from the 9-mm-thick tungsten crystal and the 7.25-mm-thick diamond combined with amorphous tungsten are 17% and 12%, respectively, larger than that from amorphous tungsten at the momentum of 20MeV/c. In a series of the experiments using these crystal targets, the target thickness giving the maximum positron yield is clearly reduced in comparison with that of the amorphous tungsten alone due to the crystal effect.

KEKB入射器における単結晶標的を利用した陽電子生成実験

1. はじめに

次世代のリニアコライダーやBファクトリーでは、衝突ルミノシティを上げるために大強度陽電子源が要求される。高エネルギー電子ビームをタングステン等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ある。KEKB入射器を中心とする実験グループは、仏オルセー研究所のChehab等が提唱した単結晶標的を利用した新しい陽電子源[1]の可能性を追及している。これまで、我々は、重金属標的であるタングステン(W)単結晶及び軽元素結晶であるダイヤモンドを利用した陽電子生成の一連の実験結果を報告している[2-5]。前者は、4 GeV電子によるKEKB用の陽電子源を想定した実験で、後者は、8 GeV電子による次世代の大強度陽電子源を目指した実験である。本稿は、これまでの結晶標的を利用した一連の陽電子生成実験の成果をまとめたものである。これらの陽電子生成実験からW単結晶に対して最適厚さを決めることができた。現在、タングステン単結晶標的の入射器陽電子源への実装を目指し、結晶軸出しのための標的加工、アラインメント作業が進行中である。

2. 陽電子生成実験

2.1 結晶標的

結晶に入射した電子は、格子状に整列した原子核と相互作用し、チャネリング放射過程(Channeled Radiation, CR)と干渉性制動放射過程(Coherent Bremsstrahlung, CB)を通して、低エネルギー光子を多数放射する。これらの強力な放射を利用すれば、陽電子生成を増大させると期待できる。標的は、強力なCR及びCBを放射する放射体(Radiator)と電子陽電子対生成への変換体(Converter)から構成される。W単結晶では、標的中で放射と対生成が同時に起こるが、軽元素結晶による標的では、結晶がRadiatorとなり、すぐ後ろに設置されるConverter(通常非晶質Wを用いる)で陽電子への変換を行う。標的の熱負荷を避けるために、電子陽電子対生成が起こる非晶質W又は単結晶Wの標的厚さをできるだけ薄くしたい。このように、陽電子生成の効率を損なうことなく、標的厚さ(又は熱負荷)を如何に最小に抑えるかが実験の重要な点となる。

¹ E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

実験に使用したW単結晶(軸<111>)とダイヤモンド(軸<110>)の厚さと放射長の関係を表1にまとめる。ダイヤモンド標的の場合は、その後ろに非晶質W(厚さ3-18mm、3mmステップ)を置き、陽電子生成の最適化及び生成量の校正ができるようにしている。実験装置と入射電子の条件は、これまでの実験とほぼ同じである[3]。

表1：結晶標的の厚さと放射長

	厚さ[mm]	放射長[λ_0]
Diamond	4.57	0.0372
Diamond	7.25	0.0589
W	2.2	0.628
W	5.3	1.51
W	8.9	2.54
W	12.0	3.43
W	14.2	4.06

2.2 入射電子のビームパラメータ

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(ダイヤモンドでは0.13mrad(8GeV電子)、W単結晶では0.61mrad(4GeV電子))より充分小さくすることが必要となる。ビーム電流は、エミッタンス劣化を避けるために、出来るだけ小さくし標的に照射している。表1に典型的な入射電子のビームパラメータをまとめた。

表2：入射電子のビームパラメータ

	unit	4GeV e^-	8GeV e^-
電荷量	nC	0.1	0.1
エミッタンス $^s_{x/y}$	nm	4.8/3.8	8.4/23
角度発散 $^*_{x/y}$	μ rad	5.2/3.9	9.7/26
角度発散 $^{**}_{x/y}$	μ rad	55/55	56/61
ビームサイズ $^*_{x/y}$	mm	1.85/1.95	1.75/1.70
バンチ長	ps	7.7	7.7

*: FWHM, **: FWHM (標的上), \$: 標準偏差

3. 実験結果

3.1 ロッキングカーブ

ロッキングカーブのピークの鋭さは、CR及びCB放射の典型的な特徴を示し、シミュレーションにおける物理過程をテストするための重要な指標を与える。また、実験的には、標的を設置する上でビーム軸に対するアラインメント誤差を規定する指標にもなる。

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2軸(H、V軸)を回転させることにより陽電子強度が最大になる角度を探すことで行う。図1(a)に、W単結晶(9mm厚)に4GeV電子を照射し、ゴニオメータを<111>軸の回りに回転させた時の陽電子生成量(運動量 $P=20\text{MeV}/c$)の相対的な変化を示す。図1(b)は、ダイヤモンド

(7.5mm厚、単体)に対するロッキングカーブを示す(4GeV電子)。結晶軸がビーム軸と一致した時は、陽電子生成量が最大となり、鋭いピークを示していることがわかる。W単結晶及びダイヤモンドのピーク幅は、それぞれ、40 mradと1.6 mrad(FWHM)となり、チャネリング放射の臨界角に比べ充分大きく、CB放射の寄与が大きいのが特徴である。また、W単結晶に対しては、入射電子の多重散乱も寄与するので、ピーク幅は、チャネリング放射の臨界角に比べて65倍以上も大きくなっている。このような広いピーク幅は、標的のアラインメントを考える上で、その許容誤差を大きくできるので有利である(図2)。陽電子生成の増大度は、W単結晶及びダイヤモンドに対し、それぞれ、軸を外したときに比べ約1.4倍及び29倍にも達している。これらは、明らかに、結晶効果による効率的な陽電子生成の増大を示すものと考えられる。

3.2 陽電子生成の増大

得られたロッキングカーブから陽電子生成の増大度が計算される。増大度は、陽電子ピーク強度に対する、H軸の回転角(V軸は最大値に固定)がピークから30(又は50)mrad離れた角度での陽電子強度の比で定義される。図3(a),(b)に、W単結晶、ダイヤモンド標的の厚さに対する陽電子生成増大度の変化をそれぞれ示す。ただし、ダイヤモンドの場合は、後段に設置する非晶質Wの厚さで表す。W単結晶又は非晶質Wを厚くしてゆくと増大度は急速に減少し、いずれの標的でも $4X_0$ (14mm)程度で非晶質Wによるベーター-ハイトラー過程の陽電子生成に近づく。これは、結晶中での放射エネルギーが相対的に低いために、生成される陽電子が、多重散乱により発散(又は吸収)するからであると考えられる。W単結晶では、陽電子生成の最大値は、10mm厚で達成され、非晶質Wの最適厚14mmに対して薄い標的で済むことを示している。これは、結晶効果により、電磁シャワーの発達がより強められ、シャワーピークまでの距離が短縮することを意味する。その増大量は、非晶質Wの最大値に比べ~17%大きい。一方、ダイヤモンドの場合でも同様な特徴を示し、増大量を非晶質Wの最大値と比べると~6%(4.5mm厚)、~12%(7.5mm厚)大きい。また、厚さに対して増大度は、明らかに大きくなっている。増大量は、W単結晶に比べると明らかに小さいが、特に注意したいのは、実験データからはダイヤモンドの厚さで増大量が飽和している兆候はなく、さらに厚くすることで生成量の増加が期待できることである。W単結晶による生成量を越えるには、ダイヤモンドの厚さは少なくとも10mm以上が必要となる。しかしながら、このような厚いダイヤモンドは、天然又は人工にしろ、入手は困難である。現在の所、ロシアのグループと協力して人工ダイヤモンドの可能性を検討している。

4. まとめ

これまで行ってきた結晶標的(W単結晶及びダイヤモンド)を用いた一連の陽電子生成実験結果をまとめた。W単結晶では、入射電子4GeVに対し、10mmが最適厚さを与えることがわかった。一方、ダイヤモンド標的の最適厚さは、さらに厚い(10mm以上)ところにあり、陽電子生成をさらに増大させる可能性が有ることがわかった。

この成果により、入射器陽電子源へのW単結晶の実装が計画され、現在、2006年度の夏期シャットダウンを利用して、結晶標的実装に向けた機械加工及び精密アラインメントが進行中である。

謝辞

本研究は、高エネルギー加速器研究機構の共同開発研究及び文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)「単結晶を利用した高輝度陽電子・X線源の基礎研究」(No.17540377)よりご支援を賜りました。

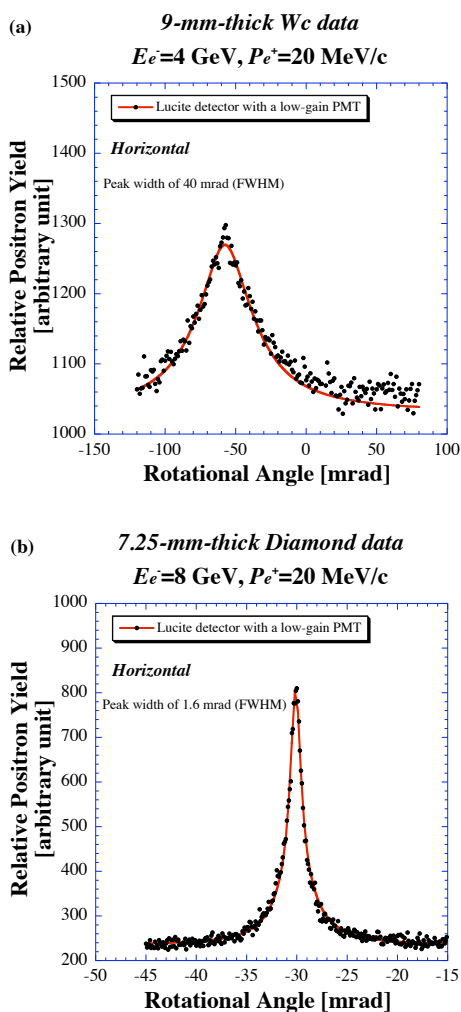


図1：結晶標的をH軸の回りに回転させたときのロッキングカーブ。(a)W単結晶(9mm厚)、(b)ダイヤモンド(7.5mm厚)。

参考文献

[1] R. Chehab, et al., Proc. the 1989 IEEE Particle Accelerator Conf. (PAC'89), Chicago, IL, USA, March 1989, p.283.
[2] K.Furukawa, et al., Procs. the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tsukuba, 2001, p.138.
[3] T.Suwada, et al., Procs. the 27th Linear Accelerator Meeting in Japan, Kyoto, 2002, p.105.
[4] T.Suwada, et al., Procs. the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan, Nihon Univ., 2004, p.396.
[5] T.Suwada, et al., Procs. the 30th Linear Accelerator Meeting in Japan, Tosu, 2005, p.176.

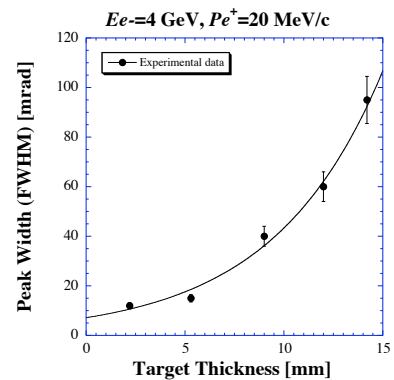


図2：W単結晶厚さに対するロッキングカーブピーク幅の変化。

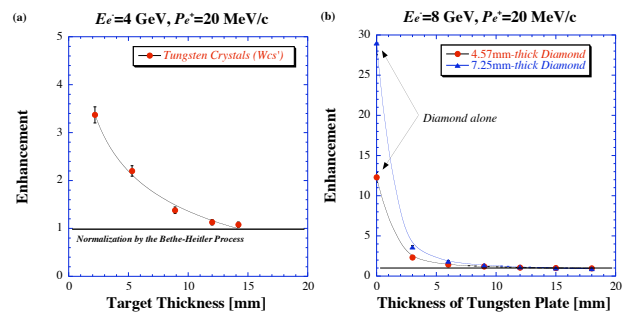


図3：結晶厚さに対する陽電子生成増大度の変化。(a) W単結晶、(b) ダイヤモンドの場合。

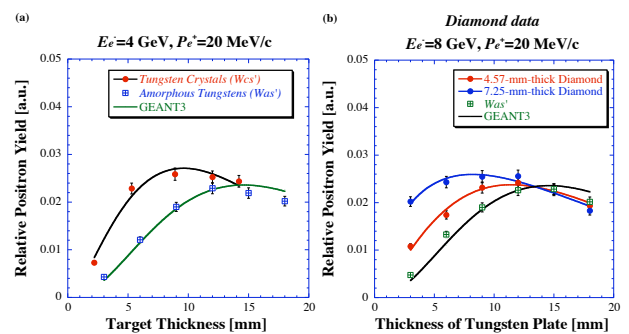


図4：標的厚さに対する陽電子生成量の変化。(a) W単結晶、(b) ダイヤモンドの場合。非晶質Wのデータで規格化している。