

# 4 及び 8 GeV 電子ビームによるタングステン単結晶標的を用いた陽電子生成実験

諏訪田 剛<sup>1</sup>、穴見 昌三、榎本 収志、大越隆夫、大沢 哲、小川雄二郎、奥野 英城、柿原 和久、紙谷 琢哉、高エネルギー加速器研究機構、〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1  
梅森 健成、藤田 貴弘、吉田 勝英、広島大学、〒739-8526 広島県東広島市鏡山 2-313  
笹原 和俊、浜津 良輔、東京都立大学、〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1  
V. Ababiy, A.P. Potylitsyn, I.E. Vnukov, Tomsk Polytechnic University, Lenin Ave., Tomsk, 604050 Russia  
R. Chehab, LAL, IN2P3-CNRS, Universite de Paris-Sud, Bat.200-B.P.34, 91898 Orsay, France

## 概要

電子ビームをタングステン単結晶標的に照射したときの陽電子生成実験を KEK 8-GeV 電子陽電子入射器（入射器）で続けている。本実験は、次世代の大強度陽電子源開発に向けた基礎実験をなすものである。陽電子強度の増大は、電子エネルギー、陽電子運動量、標的厚さのパラメータに対しどのように最適化されるかを調べた。実験の結果、結晶標的による陽電子強度は、同じ厚さの非晶質標的に比べ最大 5 倍程度増大することを確認した。本報告は、入射器におけるタングステン単結晶標的を用いた一連の陽電子生成実験についてまとめたものである。

## 1. はじめに

次世代のリニアコライダーや B ファクトリーにおいては、高エネルギー実験で必要とする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。従来の方法では、大電流の 1 次電子ビームを非晶質の重金属標的に当て、標的中で発達する電磁シャワーにより陽電子を発生させる。このように、この方法では、陽電子強度を上げるには 1 次電子ビームの強度を上げる以外に方法はなく、この場合、標的の熱的破壊が問題となる。1989 年仏オルセー研究所の Chehab 等は、単結晶標的を利用した新しい陽電子源の可能性を提唱した[1]。この方法によると結晶中に電子が入射すると電子は、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（CR）及びコヒーレント制動放射過程（CB）を通して、相対的に低エネルギー光子を多数放射する。光子は、同時に標的中で電子陽電子対生成を起こし、陽電子を生成する。この時、多数の光子がこの放射過程で生成されるので、最終的な陽電子数は、増大するという考え方である。現在、KEK を中心とする実験グループが、この方法を利用した大強度陽電子源の実用化の可能性を追及すべく基礎的実験を続けている。我々は、まず、重金属標的であるタングステン（W）を単結晶化し、CR 及び CB を通して陽電子生成数の増大がどれくらい期待できるのかを実験で確認することにした。

## 2. 陽電子生成実験

### 2.1 1 次電子ビーム

電子ビームは、入射器終端のエネルギー分析ラインで得られるビームを利用した。設定した電子エネルギー ( $E_e$ ) は、エネルギー依存性を調べるために 4 及び 8 GeV とした。8 GeV 電子は、入射器で得られる最大エネルギーで、4 GeV 電子は、入射器の陽電子源で使用している 1 次電子エネルギーと同じである。入射器の電子ビームは、単バンチ化（パルス幅~10ps）されており、陽電子標的での電荷量は、~0.2nC/bunch に制限した。標的でのビームサイズは、直径 1-1.5mmf (FWHM) に調整した。これらは、壁電流モニター及び蛍光板モニターにより実験中監視した。電子ビームの角度拡がりは、ワイヤースキャナーを用いてエミッタンスを測定した後算出した。水平/垂直方向の角度拡がりは、4 (8) GeV 電子に対し、それぞれ 123 (23) / 121 (41) mrad であった。一方、電子ビームは、ビーム窓 (100mm 厚 SUS304) を通して大気中へ取出されるので (図 1 参照)、標的での角度拡がり、この窓による多重散乱が支配的である。計算により 4 (8) GeV 電子に対し、それぞれ 0.2 (0.1) mrad と推定した。結晶標的の結晶軸に対する入射電子の角度拡がりは重要で、チャネリング放射の臨界角 (0.61mrad/4GeV, 0.43mrad/8GeV) よりも小さいことが放射条件となる。本実験は、この臨界条件を満たす。

### 2.2 タングステン単結晶標的

標的として、W 単結晶単独の場合（結晶標的）及びその直後に (82.5mm 後) 非晶質 W を組合わせた標的（混合標的）をテストした。結晶標的の厚さは、2.2, 5.3, 9.0mm の 3 種類を、混合標的の非晶質 W は、厚さ 3-18mm (3mm ステップ) を準備した。標的の電子ビームに対する結晶軸は、 $\langle 111 \rangle$  軸である。また、陽電子強度の絶対値を校正するために、結晶標的と同じ厚さのもの

<sup>1</sup> E-mail: tsuyoshi.suwada@kek.jp

を含め 2.8 mm 厚までの幾つかの非晶質 W プレート（通常標的）を用意した。

## 2.3 陽電子スペクトロメータ

図 1 に陽電子生成実験のセットアップを示す。標的上で生成された陽電子は、陽電子スペクトロメータで、運動量が選択され、陽電子検出器でその強度が計測される。偏向電磁石は、陽電子をビーム軸に対し 60 度偏向することにより設定された運動量 ( $P_{e^+}=5\text{--}20\text{MeV}/c$ ) の陽電子を選択する。陽電子輸送路は、陽電子の空気との多重散乱を極力避けるために、標的直後からすぐに真空チェンバーに入り真空 ( $<0.1\text{Pa}$ ) を確保している。陽電子検出のアクセプタンスは、偏向電磁石前後に置いた鉛コリメータ（前/30, 40mmf, 後/20mmf）により決められる。陽電子強度は、2 種類の測定器（5mm 厚 Lucite Cherenkov Detector (陽電子数を測定)、20mm 厚 Lead-Glass Cherenkov Calorimeter (陽電子の総エネルギーを測定)）で測定する。標的後の陽電子輸送路は、バックグラウンドを極力抑制するために鉛で覆った。バックグラウンドの主な要因は、オフモーメントム電子ビームが標的上流でダクトに当たり電磁シャワーを生成する、また、オフモーメントム陽電子のコリメータ部で発生する電磁シャワーである。陽電子スペクトロメータのアクセプタンスは、計算機コード GEANT3 を用いて測定運動量ごとに評価を行い算出した。陽電子運動量 20MeV/c における典型的な幾何学的/運動量アクセプタンスは、 $1\text{msr}/2.4\%(DP/P, \text{FWHM})$  である。データ収集系については、他の報告[2]を参照してほしい。

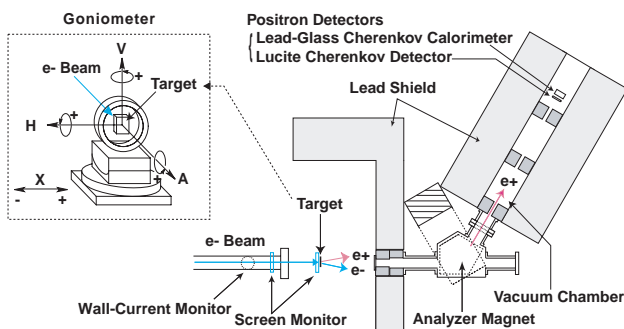


図 1：陽電子生成実験セットアップ。

## 3. 実験結果

### 3.1 ロッキングカーブ

本実験は、標的の厚さ、電子エネルギー及び陽電子運動量をパラメータとして陽電子強度を測定するため、広いダイナミックレンジ（数 10 倍）が必要である。このことから、検出器の光電子増倍管の高電圧を陽電子強度に対し比例するように注意深く調整した。結晶標的に対する軸出しは、ゴニオメータの水平/垂直 (H/V) の 2 軸を回転させ、陽電子強度が最大になるように決めた。図 2 (a),

(b) に、4 及び 8 GeV 電子による H 軸を回転させたときの陽電子強度の変化（ロッキングカーブ、V 軸はピークに固定）を示す。各データ点は、20 回平均と標準偏差を示す。補正は、検出器の ADC ペDESTAL、バックグラウンド及び電子ビーム電流に対し補正を行っている。電子ビームに伴うバックグラウンドは、偏向電磁石をオフし、標的を離れた状態での測定値とし、陽電子データから差し引いた。ロッキングカーブの幅は、明らかにチャネリング放射臨界角より大きく、かつ結晶厚さが厚いほど大きい。この幅の拡がりは、数 GeV 電子エネルギー領域では、CR よりもむしろ CB が優勢であることを示唆している。図 3 に結晶標的に対するロッキングカーブ幅の変化をプロットした。結晶厚さが増すに従い単調に増加している。

### 3.2 陽電子生成増大度

ロッキングカーブから陽電子強度の増大度が得られる。ここで、増大度は、H 軸をピークから 50mrad (off-axis) 離れた入射角度での陽電子強度に対するピーク (on-axis) の陽電子強度の比で定義する。図 4 は、得られた増大度を標的の厚さ（混合標的の場合は標的総長で定義）の関数として表したもので、混合標的の結果も同時に示した。図 4 (a) は 4 GeV 電子、図 4 (b) は、8 GeV 電子の結果を示す。このように、4 (8) GeV 電子では、薄い標的に対し最大 4 (5) 倍程度の増大度が得られ、標的の厚さに対する変化はなめらかに減少している（図中の実線はガイド線）。これは、電子ビームの標的中の多重散乱が、標的の厚さが厚いほど大きく寄与するからだと考えられる。また、4 GeV 電子のデータは、標的の厚さが  $\sim 1.5\text{mm}$  以上になると増大度が 1 以下になり、通常の制動放射過程に比べ陽電子強度が小さくなることを示す。これは、結晶標的で生成された光子のエネルギーが相対的に小さいために標的が厚いほど対生成された陽電子の吸収が起こりやすくなるからだと考えられる。増大度の陽電子運動量依存性を 5–20MeV/c の範囲で測定したが、実験誤差の範囲内で依存性は認められなかった。図 5 に、結晶標的に対する増大度の電子エネルギー依存性を示す。図中、1 GeV 電子のデータは、過去に東大核研 ES で行った実験である。増大度の電子エネルギー依存性は、単調に増加するようだ。

### 3.3 陽電子生成率

陽電子強度の絶対値を非晶質標的の実験データ及びシミュレーションにより求めた。シミュレーションは GEANT3 を用いて、測定系の幾何学的配置を考慮して計算した。陽電子生成率を入射電子数で規格化した検出陽電子数で定義する。図 6 に、結晶又は混合標的の厚さに対する陽電子生成率の変化を示す。図 6 (a), (b) は、それぞれ 4 及び 8 GeV の結果である。図中黒丸は、結晶標的を、白抜きは混合標的のデータを示す。また、白抜きダイヤモンドは、非晶質標的のデータを示す。陽電

子生成率として表した陽電子強度の絶対値は、9.0mm 厚非晶質の実験データを同厚さのシミュレーション結果を規格化することにより行った。シミュレーションは、非晶質データをよく再現しているのがわかる。また、結晶標的の方が、混合標的に比べ若干ではあるが陽電子生成率が大きい。一方、4 GeV 電子データの混合標的のデータを見ると陽電子生成率は、非晶質部の厚さに殆ど依存せず、その変化は、非晶質データに比べ厚さが薄い方にピークがシフトしている。これは、結晶標的中の電磁シャワーの発達为非晶質に比べ速い、すなわち、実効的放射長が、短くなっていることを示すものと考えられる。得られた最大陽電子生成率は、9.0mm 厚結晶標的の場合で、非晶質標的の得られる最大値（最適厚 14mm/4GeV, 18mm/8GeV）に比べ、20%程度の増大を示した。さらに厚い結晶標的のデータも興味深いが、残念ながら準備出来なかった。この結果は、実際の陽電子源設計に対し、同程度の陽電子強度を要求するならば、標的厚さを薄く出来るので、熱的破壊に対し緩和が期待できる。

#### 4. まとめ

KEK 電子陽電子入射器の電子ビーム ( $E_e=4$  及び  $8\text{GeV}$ ) を利用して、タングステン単結晶標的による陽電子生成実験を行った。電子ビームを結晶標的の $\langle 111 \rangle$ 軸に調整すると同厚さの非晶質標的に比べ最大5倍の陽電子の増大度が得られた。標的の厚さは、厚いほど増大度は減少することを定量的に確認した。9mm 厚結晶標的の陽電子生成率は、非晶質標的の最適値と比べると20%程度の増大があった（電子エネルギーの違いは殆どない）。この結果は、通常標的の最適厚に比べ約半分の厚さで同等の陽電子数が得られることを示し、標的の熱的破壊が緩和できると期待される。今後は、熱的破壊緩和の実験的検証、結晶損傷の問題等、実設計へ向けた実験を行う予定である。

#### 参考文献

- [1] R. Chehab, et al., PAC'89, Chicago, IL, Mar. 1989, p.283.
- [2] T. Suwada, et al., EPAC2002, Paris, France, June 2002.

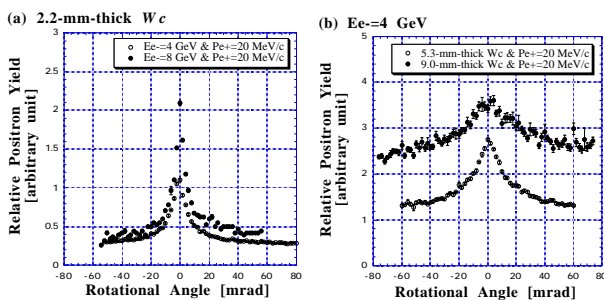


図 2：結晶標的による陽電子生成 ( $P_{e^+}=20\text{MeV/c}$ ) ロッキングカーブ測定結果 (a) 標的の厚さ 2.2mm ( $E_e=4$  及び  $8\text{GeV}$ )、(b) 標的の厚さ 5.3 及び 9.0mm ( $E_e=4\text{GeV}$ )。

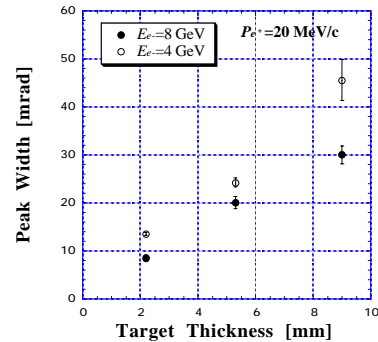


図 3：ロッキングカーブピーク幅の結晶標的厚さ依存性 ( $P_{e^+}=20\text{MeV/c}$ )。

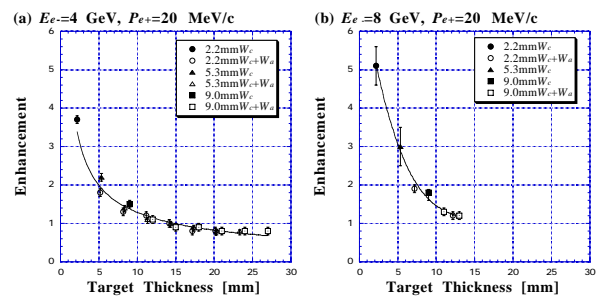


図 4：結晶及び混合標的の厚さに対する陽電子増大度の変化 ( $P_{e^+}=20\text{MeV/c}$ ) (a)  $E_e=4\text{GeV}$ , (b)  $E_e=8\text{GeV}$ 。

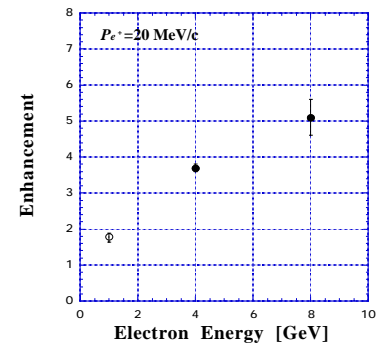


図 5：1次電子エネルギーに対する陽電子増大度の変化,  $P_{e^+}=20\text{MeV/c}$ 。

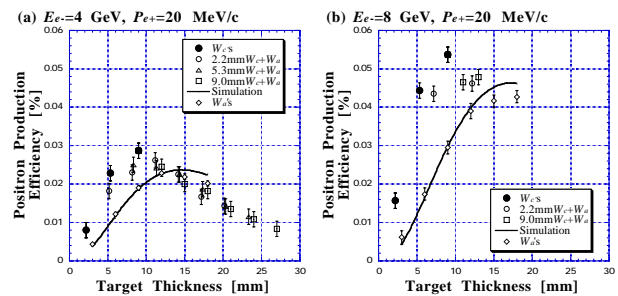


図 6：結晶及び混合標的の厚さに対する陽電子生成率の変化 ( $P_{e^+}=20\text{MeV/c}$ ) (a)  $E_e=4\text{GeV}$ , (b)  $E_e=8\text{GeV}$ 。