

高エネルギー電子と単結晶標的を用いた陽電子生成実験

古川 和朗^{A)}、穴見 昌三^{A)}、梅森 健成^{A)}、榎本 収志^{A)}、大越 隆夫^{A)}、大澤 哲^{A)}、
小川 雄二郎^{A)}、奥野 英城^{A)}、柿原 和久^{A)}、笹原 和俊^{B)}、紙谷 琢哉^{A)}、佐藤 政則^{A)}、
杉村 高志^{A)}、諏訪田 剛^{A)}、浜津 良輔^{B)}、原 順一^{B)}、吉田 勝英^{C)}、
V. Ababiy^{D)}、A. P. Potylitsyn^{D)}、I. E. Vnukov^{D)}、R. Chehab^{E)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、〒 305-0801 茨城県つくば市大穂 1 - 1

^{B)} 東京都立大学、〒 192-0397 東京都八王子市南大沢 1 - 1

^{C)} 北里大学、〒 228-8555 神奈川県相模原市北里 1 - 15 - 1

^{D)} Tomsk Polytechnic University, P.O.Box 25 Lenin Ave. Tomsk, 604050, Russian Federation

^{E)} LAL, IN2P3-CNRS, Université de Paris-Sud, Bât. 200, B.P. 34, 91898 Orsay, France

概要

次世代の高エネルギー電子陽電子衝突実験においては、発熱などの問題を克服しながら、収率の高い陽電子生成部を設計することが大きな課題のひとつとなっている。単結晶標的を用いて陽電子を生成すると、発生するチャネリング放射光とコヒーレント制動放射とによって陽電子生成効率が增大することが期待されるが、これまで、われわれのグループでは単結晶タングステン標的を用いて、ガンマ線発生と引き続く電子陽電子対発生を同じ結晶内で起こす機構を実験し、一定の成果を挙げた。さらに可能性を追求するために、軽い結晶標的のガンマ線を発生させ、そのうしろに配置した重い結晶標的の電子陽電子対を発生させる機構の実験を始めた。結晶標的としてはシリコンやダイヤモンドを用い、標的の2軸走査など実験装置も改善して、実験結果が得られたのでそれについて報告する。

1. はじめに

電子・陽電子衝突型高エネルギー実験においては、衝突する粒子の質と量が実験効率を決めることになるが、そのうち、特に陽電子発生源の性能が効率を左右する大きな要因になる。

例えば、KEKの電子・陽電子線形加速器においては、要求される陽電子を発生させるために、パルスあたり10 nCという大電流で3.7 GeVという高いエネルギーの一次電子を安定に生成し、重金属の標的に照射して、そこから発生する陽電子を捕獲利用している^[1]。

しかし、次世代のリニア・コライダでは、さらにバンチ数を増やして、百バンチ程度の一次電子を標的に導くことが検討されており、その場合には標的の発熱が大きな課題となっている。この課題が解決されないならば、標的を融体にするなどの対策も考えなくてはならないかもしれない。

このような状況の中で、Chehabらによって提案された単結晶標的を用いた陽電子生成の方法^[2]は新しい方法として注目されている。従来の多結晶または非晶質を用いた陽電子発生に比べ、単結晶標的を用いた場合には、一次電子が結晶軸に沿って入射した場合に、チャネリング放射光やコヒーレント制動放射により低エネルギー($< 30\text{MeV}$)光子数が増大し、その結果、生成陽電子数が増大する。この効果を利用するためには、結晶

軸を一次電子の入射方向に合わせるためのゴニオメータが必要となるが、他に特殊な装置が必要ないことも有利な点である。

筆者らも、KEK電子Linacなどにおいて、この方法による陽電子発生の実験を行い、実用化の可能性を探ってきた。これまでの実験では、重い金属であり、すでに電子ビームに対する耐性の実績のあるタングステンの単結晶を主な標的に用いてきた。その結果、薄い標的においては陽電子の発生効率が数倍になること、陽電子収量を最適化した実用的な厚い標的では効率は大きくは変わらないが、相対的に薄い標的を用いることができる^[3, 4, 5]。この実験結果を利用した、陽電子発生機構のシミュレーションコードの開発や、現実的な陽電子発生装置の設計は今後行われることになると期待される。

一方、陽電子発生効率のさらなる向上を追求するために、他の標的の可能性を探ることが考えられた。重い金属単結晶を用いれば、その中でガンマ線の発生と電子陽電子対の発生の双方を起こすことができる。しかし、他にもチャネリング放射に適した結晶があり、その利用が可能であるかどうか定量的に検証することは有意義であると思われる。

2. 単結晶を用いた陽電子の発生の改善

2.1 タングステン結晶による実験

これまで行われたタングステンの単結晶を標的に用いた実験においては、ある程度の陽電子収量の増大が観測されてきた。厚い結晶を作ることが困難であったこともあり、当初は薄い結晶による実験を行い、例えば放射長(3mm)の半分の厚さでは、多結晶の標的に比べ約5倍の収量を得ることができ、成果が期待された。しかし、次第に厚さを増して実験を行うと、多結晶の場合より薄い標的でも最大の収量が得られることがわかったが、収量の絶対値はそれほど大きくならないことがわかった。標的厚さに対して陽電子収量を見ると、単結晶の場合はより薄い領域で収量が高くなっており、横軸が圧縮されたように見える。これは通常の制動放射に、チャネリング放射やコヒーレント制動放射が放射長が加わったために、単結晶では放射長が短くなっている、とも考えることができる。

リニアコライダの陽電子発生装置の設計では標的での発熱がボトルネックになっているが、単結晶ではより

* <kazuro.furukawa@kek.jp>

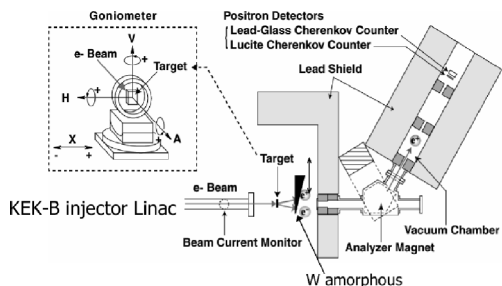


図 1: 実験に使われた標的、分析電磁石、測定器等の配置

薄い標的で収量が最適化できるので、発熱を半分から 4 分の 1 程度に押さえることができ、非常に有利になる^[6]。また、多結晶の標的に比べ、単結晶標的の場合の発生陽電子のエネルギー分布や角度分布が異なるので、これらの実験結果を利用してシミュレーションコードを整備し、収束系、加速系を含めて現実的な陽電子発生装置を設計すれば、現在用いられている発生装置よりも効率のよい装置が設計できる可能性はある。

ところで、これらの実験では厚い単結晶を作ることが比較的困難であることもあり、標的が厚い場合については単結晶だけの標的と半分程度の厚さの単結晶と多結晶を組み合わせた標的の実験を比較した。その結果、収量にはほとんど差異がないことがわかった。これは、単結晶の効果が標的の前半分だけで重要となっていて、そこで生成された光子が後ろ半分で陽電子に変換されると考えると理解することができる。

2.2 軽い結晶と新しい実験方法

上の解釈によると、標的全体が同じ単結晶でなくてもよいことがわかる。陽電子の発生を忘れて、単結晶中の結晶軸に沿ったチャネリング放射光やコヒーレント放射光の発生について考えると、タングステンよりも効率のよい単結晶は多数ある。このような放射の強度は原子間距離や軸方向のポテンシャルの深さなどで決るが、例えばダイヤモンドやシリコン、クロムの効率が高く、このような放射の発生の目的に向いている^[7]。厚いダイヤモンドが入手できればタングステンに比べ 3 倍の光子を発生することが可能と計算されている。10 mm のダイヤモンド標的を使用して入射電子のエネルギーの 30% を光のエネルギーに変換できたという報告もある。発生した光子は別の重い標的で電子陽電子対に変換することができるので、このような方法によって、高エネルギー入射電子を多数の低エネルギー陽電子に変換できる可能性が期待される。

そこで、軽い単結晶を前に置き、後ろに重い金属を置くような、複合標的を利用することを考えた。前半分の単結晶はビーム軸に合わせる必要があるが、後ろ半分の金属はその必要がないので、実験装置についてはこれまでの使用してきた装置を大幅に変更することなく利用できる。ダイヤモンドの効率が高いため、厚い標的の入手が困難なので、まずは薄いダイヤモンドとシリコンの単結晶標的で実験を行ってみることにした。

3. 実験方法

実験は加速器の終端近く（第 3 スイッチヤード）の

エネルギー分析ラインで行なわれた。パルス当たり約 0.1 nC の S-バンドのシングルバンチ、8 GeV のビームが分析されてビームラインに導かれた。ビーム診断は蛍光板ビーム形状モニタと壁電流モニタによって行われ、四重極磁石によってビームは標的上に収束された。真空は標的の直前で薄い金属膜によって遮断されるが、今回は軽い単結晶の臨界角が小さいために、これまでの実験よりも薄い 30 μm のステンレスの膜が用いられた。もともとのビームのエミッタンスと膜による散乱を合わせたビームの角度広がりには 70 μrad 程度であり、シリコンやダイヤモンドの臨界角 (170 μrad と 130 μrad) に比べて十分小さくなった。

調整された一次電子は、ゴニオメータに取りつけられた単結晶標的に導かれる。単結晶で発生した光子はそのうしろのタングステン標的に導かれ電子陽電子対に変換される。タングステン標的は複数の厚さを用意してあり、水平方向に移動して入れ替えることができる。陽電子は鉛コリメータを通して、小型 60 度分析電磁石と 3 つの鉛コリメータとでエネルギー分析された後、ルーサイト・チェレンコフ検出器、さらに鉛ガラス検出器に到達する（図 1）。空気による散乱吸収に影響されずに、低エネルギーの陽電子を測定するため、測定器を含めて、標的直後からの経路には真空にしてある。また、一次電子を起源とするバックグラウンドを避けるため十分な鉛シールドが積まれている。

ゴニオメータは 3 軸の自由度を持っていて、計算機の指令によって高精度に調整することができ、陽電子の収量の変化を見れば、ビーム方向と結晶軸を合わせることができる。今回の軽い結晶では面チャネリングも比較的強く、軸チャネリングを探すことが難しかったので、自動 2 軸走査を行い実験時間を短縮した。

また、測定器から得られる信号は、入射した陽電子の数に比例するよう、注意深く光電子増倍管の高電圧が調整された。測定器の信号は、標的直前の一次電子の電荷量を表す壁電流モニタの信号とともに、電荷感応型 ADC で数値に変換され Linux 計算機で収集された。

KEK の電子線形加速器はパルス運転を行なうので、陽電子を計数する実験は適さないが、上に述べた実験装置により、1 パルス内で多量に発生する陽電子をまとめて観測することができる。測定器の測定可能範囲を正しく把握していれば、計数実験に比べ統計精度を容易に高めることが可能となる。

標的としては、5 mm のダイヤモンドと 2.5, 10, 30, 50 mm の 4 種類の厚さのシリコンの単結晶を用意し比較した。5 mm のダイヤモンドは放射長の 0.037 倍で実験に最適とは言えないが、50 mm のシリコンは放射長の 0.51 倍となっていて、タングステン結晶での結果から考えると、タングステンと組み合わせると複合標的とした場合に、最適な結果を与える厚さから遠くない条件になっていると思われる。

4. 実験結果

実験の結果、陽電子収量の角度依存性、標的厚さ依存性、陽電子エネルギー依存性、等の情報を得ることができたのでまだ予備解析の段階であるが、概要を述べる。解析についてはさらにモンテカルロシミュレーションとの比較を含めて検討を進めているところである。

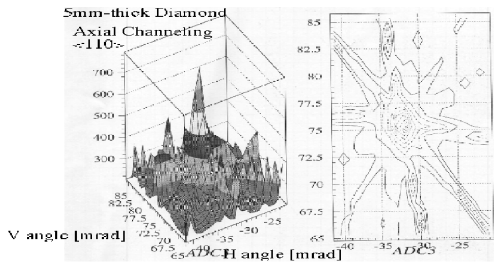


図 2: ダイヤモンドの軸チャネリングを探すための 2 次元走査の様子

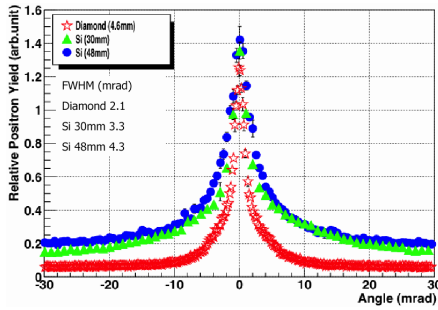


図 3: 5 mm のダイヤモンドと 30, 50 mm のシリコン単結晶標的についての陽電子収量の標的角依存性

まず、実験時間を短縮するのに役立つ走査の様子を 図 2 に示す。その結果見つかった軸の周りでの測定によって、ダイヤモンドと厚いシリコン単結晶標的についての、例えば 20 MeV/c の陽電子収量に対する、結晶の $\langle 110 \rangle$ 面に垂直な軸と入射一次電子との角度の依存性 (ロッキングカーブ) が 図 3 のように観測されている。軸の周りではチャネリング放射光やコヒーレント制動放射によって陽電子の収量が増えている。ピークの幅はダイヤモンドについて約 0.7 mrad (1σ)、50 mm のシリコン単結晶について約 1.4 mrad (1σ) となっており、タングステン単結晶に比べて 1/3 程度になっている。ピークの形から 2 つの成分が含まれているようにも見え (2 つのガウシアン曲線によくフィットできる) シミュレーションの結果との比較すれば、成分の分離も可能かも知れない。

ピークのすそでは、単結晶の効果はほとんどなく多結晶と同じ陽電子量が得られていると考えられるので、ピークの陽電子量と比較することによって、増倍率が得られる。増倍率の陽電子エネルギーや放射長の依存性を 図 4 に示す。標的が薄いので増倍率がたいへん高く見

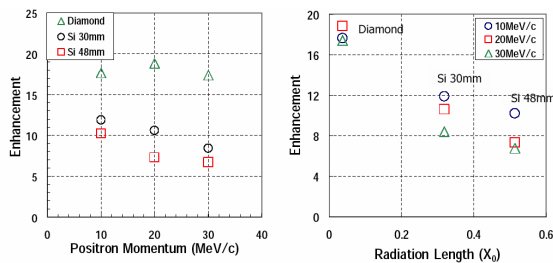


図 4: 陽電子収量増倍率の標的厚さ (放射長単位) 及び陽電子エネルギー依存性

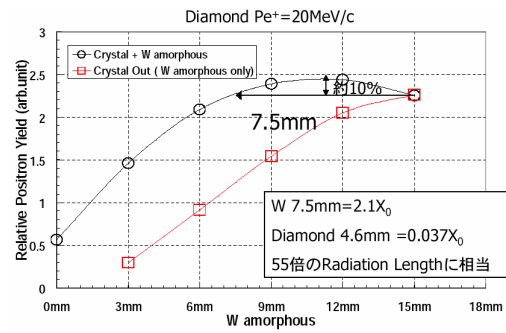


図 5: ダイヤモンドとタングステン多結晶金属の複合標的についての陽電子収量の厚さ依存性

えるが、これまで測定されたタングステンのデータと比較するとそれほど大きいわけではない。

複合標的にした場合のダイヤモンドの例を 図 5 に示すが、タングステンの場合の最大収量 (15mm 厚さ) に比べて、今回の測定では陽電子の収量はあまり大きくはない。シリコン単結晶についてもほぼ同様の結果が得られている。しかし、タングステンの場合と同様、単結晶を利用すれば、同じ量の陽電子を得るために、薄い標的を用いることができることは確認され、このことは標的での発熱が少くなることを示している。まだ予備解析の結果なので、さらに検討を加えることにしている。

5. まとめ

今回の実験で、ダイヤモンドやシリコン単結晶を用いた複合標的方法による、陽電子の収量について、入射角度、陽電子エネルギー、標的厚さなどの知見が得られた。さらにシミュレーションと比較しながら解析を進めている。これまでのところ、実験結果は、少しの収量の向上と発熱の低下を示唆しており、陽電子生成が有用となる可能性のある情報を示しているため、今後、さらに詳しい実験を行ないたいと考えている。

参考文献

- [1] I. Abe, *et al.*, "The KEKB Injector Linac", Nucl. Instrum. Meth. A **499**, 2003, p.167.
- [2] R. Chehab *et al.*, Orsay Report LAL-RT 89-01, 1989.
- [3] K. Yoshida *et al.*, "Positron Production in Tungsten Crystal by 1.2 GeV Channeling Electron", Phys. Rev. Lett. **80**, 1998, p.1440.
- [4] K. Furukawa *et al.*, "Positron Production Experiment with Tungsten Single Crystal", Proc. of 26th Linear Accelerator Meeting, Tsukuba, 2001, p.138.
- [5] T. Suwada, *et al.*, "Measurement of positron production efficiency from a tungsten monocrystalline target using 4- and 8-GeV electrons", Phys. Rev. E **67**, 2003, 016502.
- [6] R. Chehab *et al.*, Particle Accelerators **59**, 1998, p.19.
- [7] V. N. Baier *et al.*, Phys. Stat. Sol. **133**, 1986, p.583.