

高エネルギー放射光による陽電子生成

(財)高輝度光科学研究センター / SPring-8 早乙女光一

1. 概要

電子または陽電子が磁場中を通過する際に、シンクロトロン放射が発生します。これを用いて各種の物性研究、材料加工、医学利用などを行うのが、放射光施設です。

高エネルギー放射光による対生成過程を利用して陽電子を生成する、というアイデアは、何人かの方から提唱されていたようです[1-4]。大型放射光施設 SPring-8 の加速器部門では、ロシアの Budker 原子核研究所と共同で、高エネルギー放射光の発生とその応用の可能性を探る試みを、1995 年から続けてきました。昨年 8 月、このような目的で試作した 10T 超伝導ウイグラーを 8GeV 電子蓄積リングに設置し、9 月と 11 月の二度にわたって、実際に高エネルギー放射光を発生させるためのビーム試験を行いました。以下では、超伝導ウイグラーからの放射光の性質とビーム試験の結果などについて報告します。

2. 超伝導ウイグラーによる高エネルギー放射光の発生

対生成過程を利用して陽電子を生成するためには、放射光のエネルギーが 1MeV 以上でなければなりません。しかし、蓄積リングの偏向電磁石や通常の挿入光源からは、このような高エネルギー放射光は発

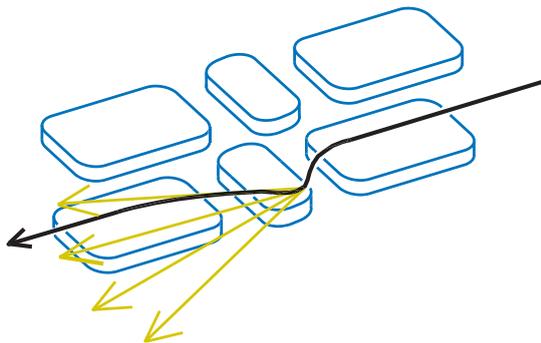


図 1 : 超伝導ウイグラーの概念図。

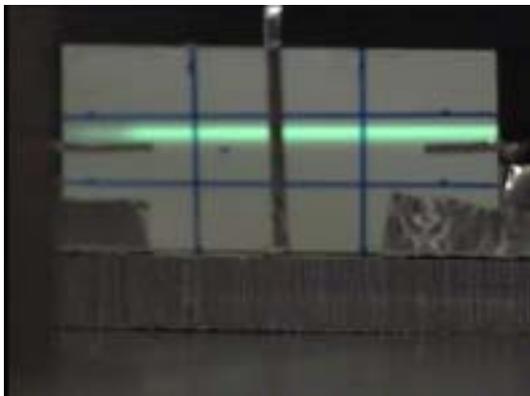


図 2 : 放射光を蛍光板に照射したときの様子。

生しません。そこで我々は、8GeV の電子ビームと組み合わせることを念頭に、最大磁場 10T の超伝導電磁石を内蔵するウイグラーを製作することにしました。超伝導ウイグラーの概念図を、図 1 に示します。中心のコイルでは最大 10T を発生させることができます。その上流側と下流側には、極性が逆になった 1.9T のコイルが 1 対ずつ付いており、全体での曲げ角を 0 度に保っています。水平方向の光の発散角は、およそ $\pm 25\text{mrad}$ です。また垂直方向の発散角は、例えば 1MeV の光に対しては $\pm 25\mu\text{rad}$ です。従って、小さなサーチライトを水平面で振ったときのような光が前方に出てきます。なお、水平面内に仰角 0 度で放射される光は、面内に直線偏光しています。有限の仰角を持った光には円偏光成分が混じってきますが、仰角が大きくなるほど光子数も減ってきます。

実際のビーム試験時に、発光点から約 30m 下流に置いた蛍光板を放射光が照らしている様子を、図 2 に示します。水平に引いた 2 本の線の間隔は、10mm です。蛍光板の上流には、0.25mm 厚のベリリウム板と 3mm 厚のアルミ板でできた二重窓が設置されていて、超高真空と大気とを隔てています。通常の放射光ビームラインで

は、光はさらに下流まで、真空ダクトを通して導かれ、最終的にはマシン収納部の外にある実験ハッチまで到達します。しかし今回の実験では、放射線管理上の問題から、超伝導ウイグラーからの光を収納部外に出すことは許されませんでした。また、放射線防護および機器に対する熱負荷の観点から、蓄積電流値の上限値を、通常のユーザー運転時の 1/100 である 1mA に設定しました。

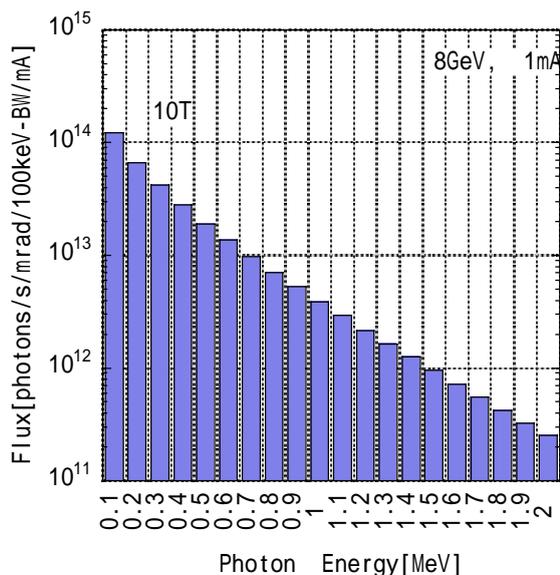


図3：10T 磁場による放射光のフラックス。

次に 10T 磁場から発生する放射光のフラックスを図3に示します(計算値)。縦軸は、蓄積電流値が 1mA のとき、水平面内の角度 1mrad 当たり毎秒やってくる光を、エネルギーバンド幅 100keV で捕らえた場合の光子数です。横軸は光子のエネルギーです。

これより、エネルギーが 1MeV 以上の光子数は、1.5E13 [個/s/mrad/mA] と評価されます。前述のように、垂直方向の光の発散角は小さいため、発光点から後方に照射する光は、水平方向に広がっています。図3に示したフラックスは、放射光の垂直方向拡がりについては積分した後のものです。

ここで、発生する放射光の時間構造について説明しておきます。SPring-8 蓄積リングの場合、RF 加速周波数は 508.58MHz であり、これは時間で言うと 1.97ns に、波長で言うと 0.5895m に相当します。すなわち、放射光発生によるエネルギー損失を定常的に補って電子が安定に

周回できるタイミング(場所)が、1.97ns (0.5895m) おきに存在する、ということです。リングの周長は 1435.95m ですから、これより、電子が安定に周回できる場所(RF バケット)は 2436 カ所あることとなります。電子は、このいずれかの場所に集群して周回しています(バンチング)。例えば、2436 カ所のすべての場所に電子を均等に詰め込んだ場合には、放射光は 1.97ns おきにやってきます。また、たった 1 カ所に電子を詰め込んだ場合には、放射光は 4.79us おきにやってきます。SPring-8 では、電子をどの RF バケットに詰め込むかを、任意に選べるようになっています。ビーム試験のときには、最大で 0.91mA 相当の電子を 1 カ所の RF バケットに詰め込みました。また、個々の電子群の時間的な拡がり(バンチ長)は、FWHM で 40ps 程度です。放射光のパルス幅も、この時間幅で決まります。

一般に RF バケット間隔とその個数、およびバンチ長は、加速器ごとに異なります。もしも超伝導ウイグラーを、別の蓄積リングに設置したとすると、そのリングに応じた時間構造で放射光が発生することになります。

3. 陽電子生成

以上のようにして発生した放射光をターゲット物質に当てれば、対生成過程により、陽電子が生成されます。今回のビーム試験では、窓材として使った 3mm 厚のアルミ板により、相当量の陽電子が発生して

いたと思われます。シミュレーションコード[5] を使って得た結果では、1MeV 以上の入射光子の数と、アルミ板で生成された陽電子の数の比は、およそ $7E-4$ でした。また、生成された後、アルミ板から放出された陽電子に対しては、およそ $4E-4$ でした。

前述の通り、10T 磁場で発生する 1MeV 以上の光子数は、 $1.5E13$ [個/s/mrad/mA] と評価されます。実際には、超伝導電磁石がクエンチして試験時間が無駄にならないようにとの配慮から、励磁量を低めに抑えました。蓄積電流値 0.91mA の時点では、9.5T でした。この磁場での光子数は $1.3E13$ [個/s/mrad/mA] と評価されます。発光点からアルミ窓までの物理的なアパーチャー 2.38mrad を考慮すると、実験中には、

およそ $1E10$ [個/s] の陽電子が発生していた、と推定されます。

こうして発生した陽電子のエネルギー分布（計算値）を、図4に示します。線型加速器を使った場合に比べて、4MeV 以下の低いエネルギー領域に発生しているのが特徴的です。

ビーム試験では、NaI を使った放射光スペクトルの直接測定も試みましたが、詳細は解析中ですが、1MeV 付近の光子数（絶対値）は計算とよく合っています。

また、今回は試みませんでした。陽電子の収量を増やすのであれば、放射光をアルミ窓に垂直に入射させずに、適当な材質の薄い板に、浅い角度で入射させるのが効果的です。計算によれば、収量が一桁以上増えることがわかっています。ただし、斜めに入射する分、陽電子の発生領域が広がってしまいますから、後段での輝度強化が必要になると思います。

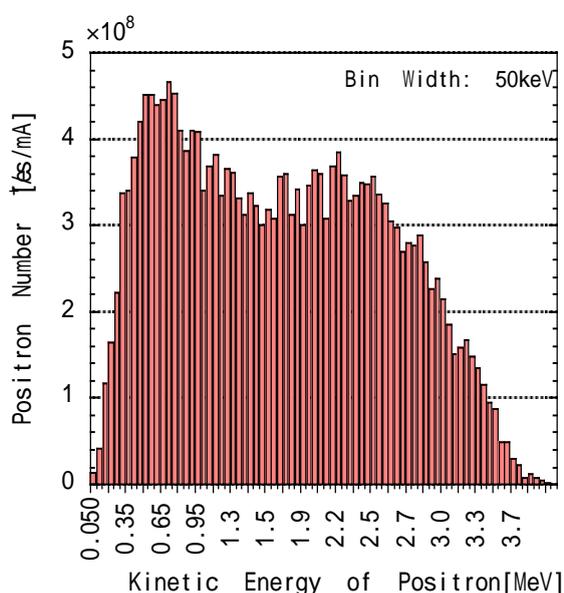


図4：陽電子のエネルギー分布（計算）

4．電子ビームへの影響

SPring-8 の放射光は、非常に輝度が高いという性質があります。これは、光源としての電子ビームの広がりが小さく、また軌道の時間変動が電子ビームサイズに比べて十分小さく抑えられていることの結果です。挿入光源位置における典型的な電子ビームサイズ（RMS 値）は、水平方向が 0.3~0.4mm 程度、垂直方向が 0.005mm 程度です。

このような状況で、10T という、通常よりも一桁高い磁場を持つ超伝導ウィグラーを蓄積リングに設置し、安定に動作させるというのは、容易なことではありません。また超伝導ウィグラーは、周回する電子ビームに対して、輝度を低下させたり、安定領域を狭めたりする、という影響を与えることもわかっています。これは、事前の磁場測定に基づく計算から、ある程度予想がつくことです。

実は、「超伝導ウィグラーを 10T に励磁したままで、はたして電子ビームを入射・蓄積できるのか」という基本的なことを調べるのも、今回の試験の最大の目的の一つでした。結果は、「可能である」でしたが、なにぶん、10T などという高磁場を発生させる装置を電子蓄積リングに持ち込んだ例は、（私の知る

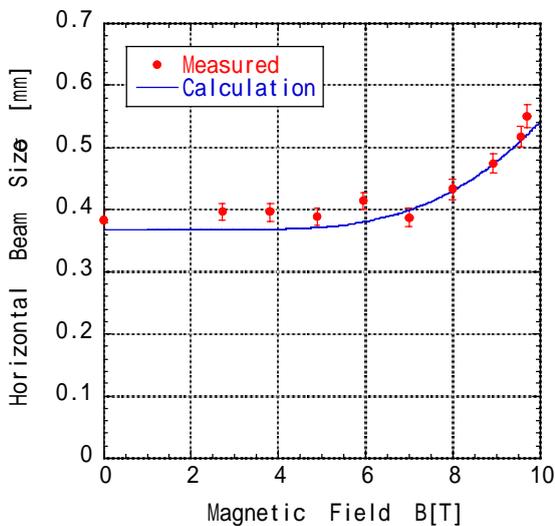


図5：電子ビームの水平サイズの変化。

限り) 今までにありませんでした。まずは基本的な運転操作ができるかどうかを確かめるのが先決だったわけです。(個人的な感想を述べさせていただくと、ビームが回った瞬間は、本当にホッとしました。)

さらに今回の試験により、電子ビームに対する様々な影響を調べて、計算と比較する、ということができました。その一例を図5に示します。横軸は超伝導ウイグラーの励磁量で、縦軸は水平方向の電子ビームサイズです[6]。励磁量を増やしていくと、ビームサイズが大きくなり、光源としての輝度が低下してしまうことがわかります。

光源の質に対して、特に厳しい要求を持っているような放射光ユーザーとの共存は、難しいと言わざるをえません。

5. 今後

一連のビーム試験はこれで一旦終了となり、超伝導ウイグラーは、この冬の停止期間中にマシン収納部から出され、テストベンチに移されました。今後の計画については、いくつかの素案はあるものの、まだはっきりとは決まっていません。電子ビームへの影響や、高い熱負荷など、加速器側で解決しなければならない困難さがあります。発生させた高エネルギー放射光をどのように利用していくのか、という問題も同時に議論すべきでしょう。この点に関して、本稿をお読みの皆様のご意見をいただければ、と思っています (soutome@spring8.or.jp)。

謝辞：ここで報告した結果は、Budker 原子核研究所と SPring-8 の数多くのスタッフの努力のたまものです。特に Dr. N.Mezentsev と Dr. A.Batrakov には、1回目のビーム試験時に、はるばるロシアから参加していただきました。また大阪市立大学の畑徹教授より、超伝導ウイグラーの冷却能力改善について数々のご助言をいただきました。ここに謝意を表します。

文献：

- [1] G.Kulipanov, Rev. Sci. Instrum. 60 (1989) 1406; G.Kulipanov, in Proc. of "Workshop on Future Light Sources", SSRL 92/02, p.440.
- [2] P.L.Csonka, NIM A345 (1994) 1.
- [3] R.H.Howell, in "Positron Beams and Their Applications", World Scientific, ed. P.Coleman, p.318.
- [4] A.Ando, et.al., J. Synchrotron Rad. 3 (1996) 201.
- [5] J.Schimizu, SPring-8 Ann. Rep. 1998, p.154. (http://www.spring8.or.jp/ENGLISH/publication/ann_rep/)
- [6] K.Soutome, et.al., SPring-8 Ann. Rep. 1999, p.136. (http://www.spring8.or.jp/ENGLISH/publication/ann_rep/)