高エネルギー光子・電子ビームプロファイルモニタの開発と加速器研究への応用

Development of high-energy photon and electron beam profile monitor and application to accelerator research

東北大学大学院理学研究科 物理学専攻 原子核物理研究室 木野 量子

1 研究の背景と目的

粒子加速器を用いた物理実験を行う上で、加速器から供給さ れるビームの性質を理解することは、より良い物理データを収 集するために重要である。一方、加速器グループ、物理実験グ ループで利用する検出器やシステムが分業化されており、物理 実験で用いるシステムを加速器運用に応用するといった分野 横断的な活動は多くはない。相互にフィードバックを掛け合 いながら研究を進めることで、加速器運転効率や性能の向上を はかり、より良いパフォーマンスのもとで実験を進めることが 可能となる。本論文では、加速器から供給される光子ビームの ビームプロファイルを行うことで物理実験として要求される 精度でビーム位置を測定するとともに、光子ビームのソースと なっている電子シンクロトロンの性能評価を行うことで加速 器応用としての利用方法に関しても模索する。

東北大学電子光理学研究センター (ELPH)の BM4 光子ビー ムラインでは、1 GeV 領域の制動放射光子ビームを提供して いる。電子シンクロトロン (BST リング)によって 1.3 GeV に加速した周回電子に、 ϕ 11 μ m の炭素ファイバーの輻射体 (ラジエータ)を挿入することで制動放射光子ビームを取り出 す。従来、BM4 光子ビームラインでは、ビームライン下流 (ラ ジエータから約 10 m 地点)にシンチレータとマルチアノード PMT(浜松ホトニクス、H6568-10MOD[1])を基本構造とする ビームプロファイルモニタ HSBPM[2]を設置し、運用してき た。また、ビームライン上流 (ラジエータから約 3 m 地点)で は、写真乾板の原理による、インスタントカメラのフィルムを 用いた方法でビーム位置を確認してきた。

BM4 光子ビームラインでは様々な原子核物理実験を展開しており、このためにビームプロファイリングを高精度に行うことが非常に重要である。特に近年ハイパー核物理分野で注目を集めている「ハイパートライトンパズル」解決に向けた「三重水素ラムダハイパー核直接寿命測定実験」では、標的位置(ビームライン上流)における光子ビーム位置を誤差 $\simeq \pm 300$ μ m 以下の精度で知る必要がある。しかし従来の手法では、標的周辺位置で定量的なビーム位置の測定ができない[3]。

更に、BM4 光子ビームラインではこれまで、定量的なビーム パラメータ測定が行われていない。この状況を受け、本研究で は、新たに BM4 光子ビームライン上 ~ 中流における定量的 かつ高精度なビームプロファイルを行うための検出器「ビーム プロファイルモニタ (BPM)」を開発した。BPM を用いて物 理実験に必要なビーム位置やサイズの情報を得るだけでなく、 加速器固有のパラメータ測定を行うことにより、BST リング 運用のためのフィードバックをかけることなど加速器への応 用も目的とする。

2 ビームプロファイルモニタの基本設計

BPM の要求性能は次の5点: (1) 誤差 100 μm 以下の位置 分解能、(2) 荷電粒子背景事象の除去が可能、(3) 磁場中での 安定した動作、(4) 数 MHz の高強度光子ビーム測定が可



図 2: 検出部分の概念図

能、(5) ビームサイクルと同期した即時モニタリングが可能、 である。この要求を満たす構成として、BPM はプラスチック シンチレーションファイバーと光検出器 SiPM (浜松ホトニク ス MPPC[1])を基本構造に持つ。図1にその外・内観を、図 2に検出部分の概念図を示す。ビーム上流側から順番に、荷電 粒子背景事象を検出する Charged VETO カウンタ、光子の 一部から電子・陽電子対を生成させるためのアルミニウム光 子コンバータ、重力方向、水平方向に並べた粒子位置検出の ための2層のファイバー層 (*x*層・*y*層)、イベント選択に用い る Trigger カウンタである。各ファイバーは1セグメント毎 に SiPM に接続した [3, 4, 5, 6]。

データ収集にはトリガーレスデータ収集モジュールであるス トリーミング型 TDC(StrTDC[7])を導入した。BPM では全 てのカウンタでヒットのタイミングを記録した後に、オフライ ン上で以下の条件に従って光子イベントを選択する。

Photon event

 $= [\overline{\text{Charged VETO}}] \otimes [x \text{ layer}] \otimes [y \text{ layer}] \otimes [\text{Trigger}]$ (2.1)

3 測定したビームプロファイル

BPM を用いて様々な条件下におけるビームプロファイルを 調べた。水平方向、重力方向それぞれのヒット分布に対して2 つのガウス関数を重ね合わせた関数でフィットした。ガウス 関数の平均 µ をビーム中心、幅 σ をビームサイズとしてビー ムプロファイルの評価を行った。StrTDC の導入により十分 な統計量を確保することができ、フィッティングの精度は1秒 間のプロファイルに対して 10 µm 以上を達成した [3, 4, 5, 6]。 また、データ取得後約 10 秒で即時解析が可能である。



図 3: 水平方向のヒット分布 (左図) とビームプロファイルの二 次元ヒストグラム (右図)



図 4: ラジエータから距離約 3 m 地点における光子ビームプロ ファイルのスピル内時間依存性。左図はビーム中心位置、右図 はビームサイズを示す。

測定の結果、ビーム取り出しの1サイクル (スピル)の中で、 時間依存性を持つことが分かった。通常の制動放射光子ビー ム取り出しの場合、輻射体であるラジエータは BST リング中 の周回電子ビームの中を絶えず移動する。図4に示す時間に 依存したプロファイルの変化は、このラジエータ位置に起因す るものであることが分かった [8, 9]。一方、ビームプロファイ ルはビームエネルギー、周回電子ビームカレントに依って変化 しないことが分かった。

4 加速器研究への応用

ラジエータ位置に依存したプロファイルの変化の要因は、光 子ビームのソースである BST リング中の周回電子ビームが持 つ特性であると言える。ラジエータ位置によって、削り出す電 子ビームが持つ運動量方向やその強度が変化するためである。 即ち、光子ビームのプロファイルを定量的に評価することで、 BST リング内の周回電子ビームの特性にアプローチすること ができる。

本研究では、光子ビームプロファイルのラジエータ位置依存 性を詳細に調査し、その結果から BST リングの Twiss parameter を測定することに成功した [8, 9]。光子ビーム位置 (μ_x) とラジエータ位置 (x_{rad})の間には次式が成り立つ [10]。

$$\mu_x = \left(1 - \frac{\alpha_x}{\beta_x} z_{\rm BPM}\right) x_{\rm rad} \tag{4.1}$$

ここで α_x 、 β_x が Twiss parameter、 z_{BPM} はラジエータと BPM の距離である。図 5 に水平方向の光子ビーム位置のラジ エータ位置依存性の測定結果を示す。測定結果に対して 1 次関 数のフィッティングを行い (図 5)、 $-\alpha_x/\beta_x = -0.510 \pm 0.001$ を得た。設計値は $-\alpha_x/\beta_x = -0.51$ であり、今回の測定が BST リングの設計値を保証するとともに、より高精度のもと 実際のパラメータを測定しうることが分かった。



図 5: ビーム水平位置とラジエータ位置の相関へのフィ ッティング結果: BPM1(*z*_{BPM} = 3.09 m)

また、BST リング中の周回電子ビームの強度分布も調べた。 ラジエータの位置 x_{rad} が変化すると、ラジエータと周回電子 ビームとの重なり具合が変化するため、単位時間あたりに削り 出す電子ビームの量も変化する [10]。各ラジエータ位置におけ る光子ビーム強度 $I(t, x_{rad})$ の経過時間の関数

$$I(t) = I_0 \exp\{-\Gamma(x_{\rm rad})t\}$$

$$(4.2)$$

から、各ラジエータ位置 x_{rad} における減衰定数 $\Gamma(x_{rad})$ を測 定した。この測定結果に対し、電子ビームの強度がガウス分布 に従うと仮定し、フィッティングを行なった。この結果により 得られた電子ビームサイズ (σ) は 0.83 ± 0.00 mm であった。 計算による予想値は 0.76 mm であり、100 μ m の精度で一致 する結果を得た。

5 まとめと今後の展望

本研究では ELPH BM4 光子ビームラインにおいて、光子 ビームのプロファイリング を定量的かつ即時的に行うため、 新たにビームプロファイルモニタ (BPM) を開発した。BPM は1 秒間のビームプロファイルに対して 10 µm を上回る位置 精度を達成した。

高精度な光子ビームプロファイリングにより、加速器のパラ メータ測定や BST リング中の周回電子ビーム強度分布測定が 可能になった。本研究の成果は今後の加速器運転とビームを 用いた物理実験のどちらにも重要な結果である。

開発した BPM は、将来的に BM4 光子ビームラインにおい て継続して運用していく。このため、現在はより安定し高精度 なデータ提供を行うための調査・改良と同時に、誰でも運用が 可能になるよう GUI の開発などを進めている。また、開発し た粒子位置検出のシステムを、他のハイパー核実験で用いるス ペクトロメータ角度情報較正のための粒子位置検出器へ応用 することを検討している。

参考文献

- [1] 浜松ホトニクス (URL:https://www.hamamatsu.com)
- [2] T. Ishikawa *et al.*, NIM A **811** (2016) 124-132.
- [3] 木野量子 他, 日本物理学会 2021 年秋季大会
- [4] R. Kino, 第7回クラスター階層領域研究会 (2021)
- [5] 木野量子, ELPH symposium 2022
- [6] 木野量子 他, 日本物理学会第 76 回年次大会 (2022)
- [7] R. Honda *et al.*, PTEP(2021) 123H01.
- [8] 木野量子 他, 日本物理学会 2022 年秋季大会
- [9] R. Kino, Workshop QBI2022
- [10] Y. Obara *et al.*, NIM A **922** (2019) 108-113.