

氏 名 Emy Mulyani

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2030 号

学位授与の日付 平成 30 年9月28日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 加速器科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Development of X-Ray Beam Size Monitor for the  
SuperKEKB Rings

論文審査委員 主 査 教授 三橋 利行  
教授 飛山 真理  
准教授 池田 仁美  
准教授 内藤 孝  
教授 フラナガン ジョン  
Professor Gary S. Varner  
High Energy Physics Group  
University of Hawaii  
研究員 福間 均  
高エネルギー加速器研究機構  
加速器第四研究系

## Summary of Doctoral Thesis

Name: Emy Mulyani

Title: Development of X-Ray Beam Size Monitor for the SuperKEKB Rings

The SuperKEKB facility is the upgrade of KEKB to increase the luminosity 40 times, to  $8 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , with the overarching mission is to search for new physics beyond the standard model of particle physics in the B meson regime. It has two rings, the High Energy Ring (HER) and the Low Energy Ring (LER), for 7 GeV electrons and 4 GeV positrons, respectively.

Beam instrumentation in the accelerator serves as the 'eyes' of the machine operators, requiring the design, construction and operation of instruments to observe particle beams, and also research and development to find new, or improve existing, techniques to fulfill new requirements. Several beam parameters that we need to measure in the accelerator (i.e., SuperKEKB) are beam position (to know the horizontal and vertical positions of the beam throughout the accelerator chamber), beam intensity, and lifetime measurement. Other parameters are beam loss, beam profile (actual shape of the beam, in both transverse and longitudinal planes), and collision rate to measure of how well the beams overlap at the collision point.

There are two different types of synchrotron radiation (SR) monitors for beam profile diagnostics in SuperKEKB: SR interferometers (visible-light monitors, SRM) and x-ray beam size monitors (XRM). The XRM will be used primarily for vertical bunch profile measurements and secondarily for horizontal beam size measurements, and the visible light monitors will be used primarily for horizontal bunch profile measurements, with the possibility of vertical measurements at larger beam sizes for comparison with the XRM measurements.

The principal aim of the XRM is for vertical beam size measurements that eventually have the capability for high-resolution bunch-by-bunch, turn-by-turn measurements for low emittance tuning, collision tuning, and instability measurements. The motivation of the present research was the development of the XRM, consisting of designing the mask patterns, calibrating the XRMs during the commissioning of the SuperKEKB operation, and exploring the image reconstruction technique using uniformly redundant array (URA) coded apertures.

The main principle of the XRM system is to propagate X-rays from the SR source point (bending magnet) through optical elements to the observation plane (detector). They form a diffraction pattern with an array of peaks on the detector depending on the pattern of the optical elements. This pattern is a point response function (PRF),



beam sizes ( $> 30 \mu\text{m}$ ), the 12-slits URA mask has better resolution than the 17 multi-slits.

Several calibration studies (geometrical scale factors, emittance control knob, and beam lifetime studies) were carried out during Phase 1 of SuperKEKB commissioning from February until June 2016. The ratio of the geometrical scale factors recorded by tape-measurement (physical measurement) and beam-based measurement mostly agrees within a few percents at both beamlines. The studies suggested that during the Phase 1 commissioning, the measured vertical emittances  $\varepsilon_y$  are  $\sim 10 \text{ pm}$  for LER (consistent with the optical estimation) and  $\sim 35 \text{ pm}$  for HER (3.5 times greater than the optic estimation). Analysis of the beam size and lifetime measurements suggests unexpectedly large smearing factors, particularly in the HER.

In Phase 2 (May to Juli 2018), several new types of equipment were installed (thinner beryllium filter, new optical element, He gas filling, and new CCD camera) with the primary purpose to reduce the smearing factor in the HER beamline that we faced in Phase 1. Several calibration studies as in Phase 1 have been carried out and suggested a good improvement in the smearing size, which is about 5 times smaller than in Phase 1.

For further explorations and refinement following the present work, we will supplement the scintillator with 128 channels of silicon with 2-mm sensing depth and a pixel pitch of  $50 \mu\text{m}$ . This detector system will have the capability for single-shot measurement which is useful for studying beam instabilities.

In the current phase, we are using the template-fitting method that has excellent capability in the reconstruction of the image source, but in the future, for single-bunch measurements this method cannot keep up with the vast volumes of data in real-time. An investigation of fast reconstruction method based on URA coded aperture imaging for XRM is of great interest. This method is essential for measuring the beam sizes of all 2500 bunches in the SuperKEKB accelerator over thousands of turns, as needed for instability studies and luminosity tuning.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 Emy Mulyani

Title  
論文題目 Development of X-Ray Beam Size Monitor for the SuperKEKB Rings

SuperKEKB 加速器では、Luminosity を KEKB 加速器と比較して、40 倍に増強することを目標に建設が開始され、2016 年より最終収束系及び検出器が無い状態での Phase I コミッショニングが行われ、2018 年からは衝突実験を開始する Phase II コミッショニングが始まった。Luminosity の 40 倍への増強は、vertical 方向の Beam-Beam parameter を KEKB と同程度に保ったまま、衝突点における  $\beta_y^*$  を 1/20 に絞り、HER, LER の蓄積電流を 2 倍に増やすことで達成される。この際 Beam-Beam parameter を一定に保つために、vertical emittance も小さくする必要がある。したがって、Luminosity の増強のためにはビームサイズが、デザイン通りに小さくなっているかを正確に評価することが重要なポイントとなる。設計上の SR モニターの光源点における vertical beam size は  $9\mu\text{m}$  程度であるので、観測点から張られる角直径では  $0.2\mu\text{rad}$  に相当する。従来加速器で用いられてきた可視光干渉計、X-線ピンホールカメラ等の測定限界は  $0.5\mu\text{rad}$  程度なので、従来よりも見かけ上 2.5 倍程度小さいビームサイズを評価する必要がある。このために SuperKEKB において、X-線を用いた大開口モニターの一種である Coded Aperture モニターが開発された。Mulyani 氏はこの開発に参加し、Coded Aperture について、先ず、シングルスリットについて最適化し、続いてスリットを多数配置したマルチスリット（一般的な Coded aperture）、均一冗長スリットアレイ (URA ともいい、スリットサイズもフリーパラメータに含まれる) の 2 種類の coded aperture についてデザインの最適化をシミュレーションを用いて行った。3 番目の URA は、これを用いることにより、ビームの像が自己相関関数により与えられるという利点があるので、decoding により、ビームサイズのみならずビームプロファイルの観測が容易に行えるという利点がある。次に、最適化したデザインに基づいて、実際に制作したシングルスリットおよび 2 種類の Coded Aperture を SuperKEKB に建設された X-線モニターラインに設置して、Phase I コミッショニングにおいて Geometrical Scale Factor について、スクリーン等の観測系の応答を含めて測定を行った。また、鉛直方向エミッタンスコントロールノブを用いてビームサイズの変化に対する応答についても評価し Geometrical Scale Factor についての consistency のチェックを行った。これ等から得られた Geometrical Scale Factor を用いてビームサイズ測定し、結果として、LER においては、ほぼデザイン emittance から予想される beam size に一致する結果が測定された。一方で、HER においては、デザイン値の 3 倍近い大きなビームサイズが測定されたので、この原因を探るために、鉛直方向 beam size に対する Touschek effect の影響、Beam size と lifetime の関連の測定を行った。その結果は測定値よりも小さなビームサイズを支持し、HER においては、やはり、何らかの理由でビームサイズが大きく測定されていることが予想された。この原因として、Mulyani 氏は LER と HER に設置された X-線ビームラインの違いを検討

し、HEL には LER に対して 80 倍も厚さがある Be の厚いフィルター（厚さ 16 mm）が設置されていることに注目し、この厚い Be のフィルターによって生じる PSF のビームサイズ測定への影響が大きいことを予想した。この予想を確かめるために、Phase II コミッショニングに向けて、Be フィルターを LER のものと同じ厚さ、0.2 mm の薄いものに交換した。Phase II コミッショニングが開始されたのに伴い、HER において、ビームサイズ測定を行った結果、デザイン値と一致する beam size が測定され、HER における問題点の原因が Be の厚いフィルターによる PSF の大きさの増大にあったことが同定された。以上の研究により、Coded aperture モニターを SuperKEKB において beam size の測定モニターとして応用するための基礎について確立されたと思われる。さらに、Mulyani 氏は URA による観測を Phase II コミッショニングで行い、URA により Encode された object からの projection pattern を Decode して像の再構成をすることにより、beam の image を再構成して見せた。この結果は bunch by bunch での高速 beam image の測定の可能性を demonstration したことに於いて非常に重要である。

Mulyani 氏は提出論文の内容について、これまでに国際会議において 3 件の発表を行っており、また、学術雑誌（NIMA）への投稿を行い現在査読が進行中である。予備審査及び本審査での発表、質疑応答は英語によってなされた。また公開での発表は英語によって行われ、質疑に対して的確な応答をした。

以上により、審査員全員一致で合格とした。