

MEASUREMENT OF BEAM SIZE USING SR INTERFEROMETER AT NEWSUBARU STORAGE RING

Shintarou Hisao¹, Takahiro Matsubara, Satoshi Hashimoto, Yoshihiko Shoji, Ainosuke Ando
NewSUBARU, Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry (LASTI), University of Hyogo
1-1-2 Kouto, Kamigori, Ako, Hyogo 678-1205, Japan

Abstract

A vertical beam size is usually so small in a light source that the visible light profile monitor can't measure accurately. So we constructed the SR interferometer and measured the vertical beam size. By varying the vertical beam size with RF shaker, contributions of Touschek effect and gas scattering effect to lifetime were measured and the life was found to be mainly determined by Touschek effect in 1.0GeV and by gas scattering in 1.5GeV.

NewSUBARUにおける放射光干渉計を用いたビーム診断

1. はじめに

ニューズバル電子蓄積リング^[1]は、ビーム診断として可視光プロファイルモニター^[2]を設置している。偏向電磁石から放出されたシンクロトロン放射光を金メッキ銅ブロックミラーで大気中に取り出し、ミラーとレンズを用いて結像させバンドパスフィルターを通して可視光をCCDカメラで観測している。しかし、ニューズバルの垂直方向のビームサイズは、このモニターの分解能以下になっているため正確な測定ができない。そこで、放射光干渉計モニター^[3]の設置及び垂直方向のビームサイズの測定を行った。

2. 測定原理

シンクロトロン放射光をダブルスリットで干渉させ、その干渉の度合い(Visibility)からビームサイズを求める事ができる。Van Citterut-Zemikeの定理より光源の大きさは、複素コヒーレント度のフーリエ変換で与えられる^[4]。

$$Visibility = \frac{2\sqrt{I_1 I_2}}{I_1 + I_2} |\gamma| \quad (1)$$

$$\gamma = \int \rho(x) \exp(-\frac{2\pi i D}{\lambda L} x) dx \quad (2)$$

ここで、 I_1 と I_2 は各スリットからの光強度、 γ は複素コヒーレンス度、 $\rho(x)$ はx方向における光源の分布関数、 L は光源からダブルスリットまでの距離、 D はダブルスリットのスリット間隔、 λ は波長である。ダブルスリットのスリットを水平方向、あるいは垂直方向に変える事により両方向の光源の大きさを測定できる。また、光源がガウス分布と仮定すると、以下の関係式が求まる。

$$\sigma = \frac{\lambda L}{\pi D} \sqrt{\frac{1}{2} \ln\left(\frac{1}{\gamma}\right)} \quad (3)$$

ここで、 σ はRMS電子ビームサイズである。これより一つの測定データからビームサイズを測定できる。

3. 実験セットアップ

図.1に実験セットアップの概略図を示す。ダブルスリットを通過した光は、レンズ($f=1000\text{mm}$)によって結像され干渉縞を作る。偏光フィルターで σ モードの光を選択し、500nmバンドパスフィルター(FWHM=10nm)で波長を決め、CCDカメラで干渉縞を観測する。観測した干渉縞は同軸ケーブルを用いて画像入力ポートでモノクロ画像としてパーソナルコンピュータに取り込む。LabVIEW及びIMAQソフトウェアを用いて画像処理を行い、干渉縞の強度分布をピクセル深度8ビットのデジタルデータで取得する。干渉縞の強度分布のデータを式(4)でフィッティングしVisibilityを求める。干渉縞の強度分布の式を以下に示す。

$$I(x) = I_0 \left\{ \text{sinc}\left(\frac{2\pi a}{\lambda F} x\right) \right\}^2 \left\{ 1 + |V| \cos\left(\frac{2\pi D}{\lambda F} x\right) + \theta \right\} \quad (4)$$

ここで、 I_0 は光の強度、 a はスリットの半分の高さ、 F はダブルスリットからCCDカメラまでの距離、 V はVisibility、 θ は干渉縞の初期位相である。

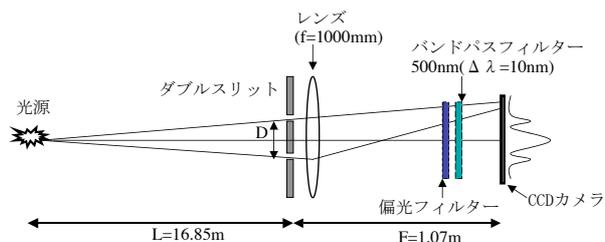


図.1 干渉計の概略図

¹ E-mail:shinta@lasti.u-hyogo.ac.jp

4. 実験結果

4.1 ビームサイズの測定結果

ダブルスリットのスリット間隔Dを変化させ Visibilityを測定した。その結果を以下に示す。

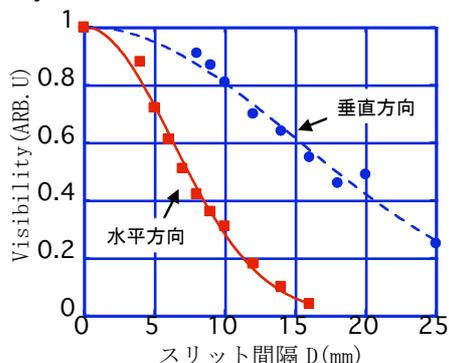


図.2 スリット間隔D(mm)とVisibilityの関係。横軸はスリット間隔、縦軸はVisibilityである。実線は水平方向、破線は垂直方向である。

図.2の結果からRMSビームサイズを求めると水平方向は $209\mu\text{m}$ 、垂直方向は $93\mu\text{m}$ となった。エミッタンス値は水平方向が 53nm 、垂直方向が 0.4nm となりカップリング定数は 0.75% となった。設計値の水平方向のエミッタンスは、 40nm であり予想より大きい値になった。可視光プロファイルモニターの結果は 38nm であり^{[2][5]}、バンプ電磁石を用いて真空チェンバーで電子ビームを削る事によってビームサイズを求める方法からでは 36nm であった^{[2][5]}。垂直方向のエミッタンスは、カップリング定数から求めた結果^[5]と一致した。放射光干渉計から求める方法では、Visibilityの測定誤差がビームサイズの誤差に反映させる。Visibilityの測定誤差は、冷却水配管及び床面の振動により干渉縞が揺れてしまう事から生じ、Visibility値で約 ± 0.05 であった。

4.2 可視光プロファイルモニターとの比較

2台のSkewマグネットでカップリング補正を行い、垂直方向のビームサイズを小さくして可視光プロファイルモニターと放射光干渉計モニターでサイズを測定し性能を比較した。Touschek寿命は、ビームサイズに比例する事からカップリング補正によりビームサイズが小さくなっている事は寿命の測定から判断できる。測定結果を図.3に示す。可視光プロファイルモニターはビームサイズの変化を測定できなかったが、放射光干渉計モニターは寿命とほぼ比例した測定結果が得られた。放射光干渉計モニターは、可視光プロファイルモニターの測定範囲外でも測定可能である事がわかった。

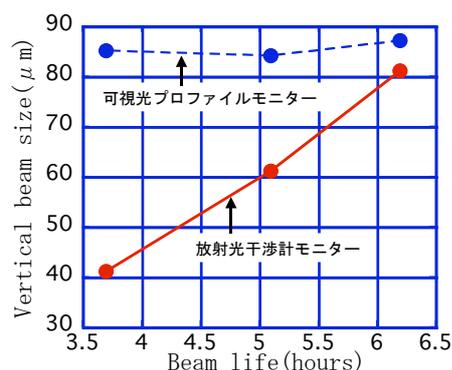


図.3 垂直方向のビームサイズの測定結果。横軸は寿命(hours)、縦軸は垂直方向のビームサイズ(μm)である。実線は放射光干渉計モニター、破線は可視光プロファイルモニターである。

放射光干渉計モニターの測定限界はスリット間隔の大きさ及びVisibilityの測定精度で決まる。スリット間隔を大きくすればより小さいビームサイズが測定できる。ニュースバルの放射光干渉計モニターの垂直方向の最大スリット間隔は、実験ホールまで導くミラーの大きさで決まる。その間隔は、 30mm でありVisibility値が 0.8 とすると約 $20\mu\text{m}$ まで測定可能となる。Visibility値が1付近ではビームサイズの変化に対するVisibilityの変化が乏しい事と1付近ではCCDカメラのノイズなどから測定精度が悪く正確な値が測定できない^[6]。

4.3 ビームサイズと寿命の変化

ニュースバルは、RFシェーカーで電子ビームを垂直方向にkickし垂直方向のベータatron振動を励起させビームサイズを大きくする事により寿命を延ばし利用運転を行っている。電流値を一定でRFシェーカーのパワーを変化させ積極的に垂直方向のビームサイズを変え、パワーに対するビームサイズ及び寿命を測定し、Touschek寿命とガス散乱寿命を求めた。RFシェーカーのonとoffの干渉縞の違いを以下に示す。

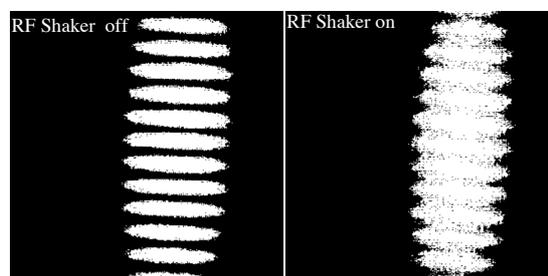


図.4 干渉縞の違い。左図はRFシェーカーがoffであり、右図はonである。

図.4から左図の方が干渉の度合い(Visibility)が高く、左図が右図より垂直方向のビームサイズが小さい事を意味している。

RFシェーカーのパワーに対する垂直方向のビームサイズ及び寿命の測定結果を示す。

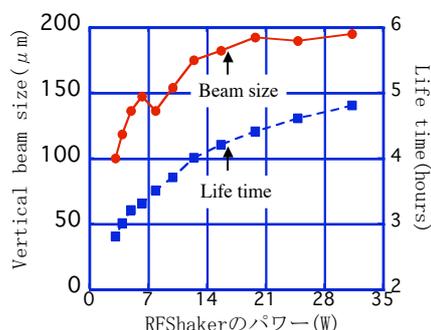


図.5 垂直方向のビームサイズと寿命の変化。横軸はRFシェーカーのパワー (W)、縦軸は左が垂直方向のビームサイズ(μm)、右が寿命(hours)である。実線がビームサイズ、破線が寿命である。

電子ビーム寿命は以下の式で表される。

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{Touschek}} + \frac{1}{\tau_{Gas}} + \frac{1}{\tau_{Ion}} + \frac{1}{\tau_{Quantum}} \quad (5)$$

寿命(τ)は、Touschek寿命、ガス散乱寿命、イオントラッピングによって決まる寿命、量子寿命で決まる。量子寿命は、他と比べて非常に長時間なのでここでは無視し、イオントラッピング効果による寿命の減少はイオンクリアリング装置とフィリングパターンにより寿命の減少がないと仮定する。Touschek寿命はビームサイズに比例している事から式(5)は、以下のようなになる。

$$\frac{1}{\tau} \cong \frac{1}{\tau_{Touschek}} + \frac{1}{\tau_{Gas}} = \frac{A}{\sigma_y} + \frac{1}{\tau_{Gas}} \quad (6)$$

ここで、Aは定数、 σ_y は垂直方向のビームサイズである。ビームサイズの逆数と寿命の逆数をプロットして線形フィットすることにより、切片からガス散乱寿命、傾きからTouschek寿命が求まる。1.0GeV、200mAにおける測定結果を示す。

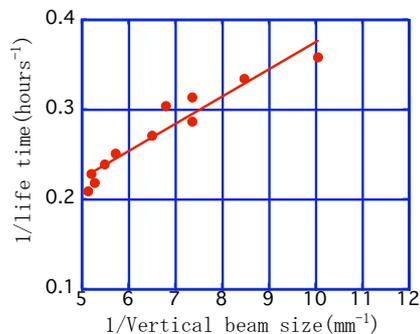


図.6 観測した寿命と垂直方向のビームサイズの逆数の関係。横軸は垂直方向のビームサイズの逆数(mm⁻¹)、縦軸は寿命の逆数(hours⁻¹)である。

1.0GeVと1.5GeVの場合の寿命の内訳を表.1にまとめた。

表.1 1.0GeVと1.5GeVのTouschek寿命とガス散乱寿命

1.0GeV 200mA	RF shaker OFF	RF shaker 35W
全ビーム寿命	1.8	4.8
ガス散乱寿命	14.3	
Touschek寿命	2.1	7.2

1.5GeV 110mA	RF shaker OFF	RF shaker 35W
全ビーム寿命	13.3	14.5
ガス散乱寿命	19.2	
Touschek寿命	43.4	58.8

(単位はhours)

電子エネルギーが1.0GeVではTouschek寿命が、1.5GeVではガス散乱寿命が支配的である事がわかった。

5. まとめ

放射光干渉計モニターの設置及びビームサイズの測定を行った。結果、可視光プロファイルモニターでは困難であった垂直方向のビームサイズの測定に成功した。また、RFシェーカーを用いて垂直方向のビームサイズと寿命の測定から1.0GeVではTouschek寿命が、1.5GeVではガス散乱寿命が支配的である事がわかった。

謝辞

放射光干渉計モニターの光学系を検討するにあつた助言をいただいたSpring-8 加速器グループの正木満博氏に心よりお礼申し上げます。

参考文献

- [1] A. Ando, *et al.*, J. Synchrotron Rad. 5, 342 (1998).
- [2] A. Ando, *et al.*, "Beam size blow up and energy widening in NewSUBARU", Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A481, p.43-47 (2002).
- [3] M. Katoh and T. Mitsuhashi, "Measurement of beam size at the photon factory with the SR interferometer", PAC'99.
- [4] 谷田貝豊彦, "光とフーリエ変換", 株式会社朝倉書店.
- [5] 福田義博, 博士論文, "ニュースパルのビームサイズ測定に関する研究", (2002).
- [6] T. Naito and T. Mitsuhashi, "Development of SR interferometer with reflecting focus mirror and the small beam size measurement at ATF-DR", Proc. 加速器学会, p.578, (2004).