

チェレンコフ光リングを用いた非破壊型ビームモニターの検討

INVESTIGATION OF A NON-DESTRUCTIVE BEAM MONITOR USING CHERENKOV RING

二宮 慎吾[#], 柏木 茂, 鹿又 健, 齊藤 寛峻, 高橋 健, 長澤 育郎, 南部 健一, 日出 富士雄, 三浦 禎雄,
武藤 俊哉, 濱 広幸

Shingo Ninomiya[#], Shigeru Kashiwagi, Ken Kanomata, Hirotoishi Saito, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa,
Kenichi Nambu, Fujio Hinode, Sadao Miura, Toshiya Muto, Hiroyuki Hama
Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

Abstract

A novel method to monitor the transverse electron beam parameter has been studied, which is based on an observation of a ring image of Cherenkov radiation. When the relativistic electrons pass through a medium with a low refractive index, Cherenkov light is emitted on a cone with sufficiently narrow angle, so that a whole ring image can be clearly observed. This ring image of Cherenkov light has the information of electron bunch, therefore it can be expected to apply it to a beam diagnostics. In this study, an application for a non-destructive beam monitor has been investigated by employing a silica-aerogel with a hole as the Cherenkov radiator.

1. はじめに

現在、東北大学電子光理学研究センターにある小型試験用加速器 t-ACTS(test Accelerator as Coherent THz Source)では、加速器ベースのコヒーレント THz 光源開発の研究が行われている。高強度なコヒーレント THz 光を得るためには、電子ビームのバンチ長が 100 フェムト秒程度以下でなければならず、低屈折率シリカエアロゲルに電子ビームを照射することで発生するチェレンコフ光をストリークカメラで直接計測するバンチ長計測[1]などを行いバンチ長の評価を行ってきた。その際チェレンコフ光のリング全体を測定することができた実際に観測したチェレンコフ光のリングが Figure 1 である。またバンチ長計測実験を行う際、チェレンコフ光全体を観測しながら光学系の調整などを行ったが、その時にラジエータに入射する電子ビームの位置や大きさを変えると、観測しているチェレンコフリングの位置や、リングの幅が変化していることに気が付いた。そこで我々はビームモニターに活用できないかと考えた。

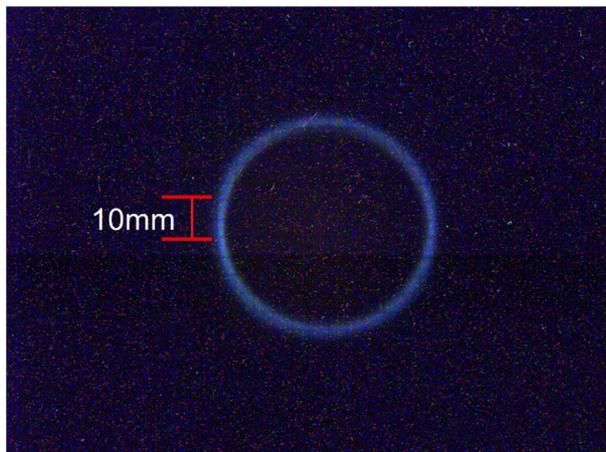


Figure 1: Observed Cherenkov ring.

[#] ninomiya@lms.tohoku.ac.jp

ビームモニターとしての応用を考える際、直接誘電体にビームを入射しチェレンコフ光リングを観測する方法ではビームロスは免れない。そこで本研究ではビームロスをなくすためにラジエータに穴をあけ、その穴に電子ビームを通した時もラジエータ内に入射した際と同様のチェレンコフ光リングが観測できないか計算を行いさらに、誘電体にあけた穴を電子ビームが通った時に発生するチェレンコフ光リング全体の強度分布等を用いて非破壊型ビームモニターへの応用ができないか検討を行った。

2. チェレンコフ光

2.1 チェレンコフ角と屈折率

チェレンコフ光とは荷電粒子が誘電体を通過する際、荷電粒子の進行速度が誘電体内での光の速度を超えたときに荷電粒子の作る電場の波面が包絡線を形成することで発生する光である。特徴としては放出される光はラジアル偏向を持ち、円錐状に広がっていく。[2]

チェレンコフ光の放出される角度 θ_c は、誘電体の屈折率 n 、荷電粒子の速度 β とすると

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n} \quad (1)$$

で表される。

本研究ではチェレンコフ光全体の観測が必要なためチェレンコフ角は小さい必要がある。つまりラジエータには非常に小さな屈折率のものを使う必要がある。

2.2 電子が誘電体近傍を通過した際のチェレンコフ光

一般的なチェレンコフ光は誘電体に直接荷電粒子が入射した際に放出される光とされているが、荷電粒子が誘電体近傍を通過した時を考える。

誘電体($n=1.15$)から y 軸に 5mm 離れた場所を x 軸方向に速度 β で通過する電子の作る電場の伝搬を考えることにする。電子の重心系から見ると電場の波面は光速

($c=1$)で伝搬していく。ある角度 θ に伝搬する電場の波面の一部に注目すると電子の重心系での電場の伝搬する速度は x 軸方向、 y 軸方向それぞれ

$$\frac{v_x}{c} = \frac{1}{n} \cos \theta \quad (2)$$

$$\frac{v_y}{c} = \frac{1}{n} \sin \theta \quad (3)$$

で表される。電子の重心系は x 軸に速度 β を持っているので実験室系から見た電子の進行方向に伝搬する電場の波面の速度はローレンツ収縮を起こし

$$\frac{v_x}{c} = \frac{\beta + \frac{\cos \theta}{n}}{1 + \beta \frac{\cos \theta}{n}} \quad (4)$$

と表される。[3]これに従って伝搬する電場の波面を書いたグラフを Figure 2 に示す。Figure 2 は電子を x 軸上速度 $\beta=0.99$ で 10cm 移動させたときに電子がそれぞれ $x=0,1,2,3$ (cm)地点で放出した電場が伝搬した際の波面である。赤い円で囲った場所に波面が包絡線を形成しており、チェレンコフ光が放出されていることがわかる。

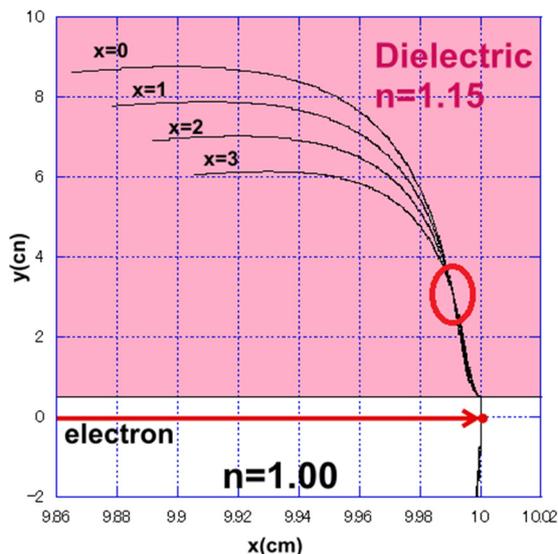


Figure 2: The wave front of the electric field when an electron pass through the vicinity of the dielectric.

2.3 チェレンコフ光リングの輝度と位置の応答性

荷電粒子が厚さ z のラジエータ中を通過したときに発生するチェレンコフ光の単位波長 $d\lambda$ あたりの光子数は

$$\frac{dN}{d\lambda} = 2\pi\alpha z \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2} \quad (5)$$

となる(微細構造定数: α)。特定の波長域内 λ_1 から λ_2 の間に放出される光子数は

$$N = 2\pi\alpha z \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (6)$$

で表すことができる。

ラジエータ近傍を荷電粒子が通過した際はチェレンコフ角へ放出された電場が影響を受ける仮想的なラジエータの厚さを考えることで発生光子数を概算した。

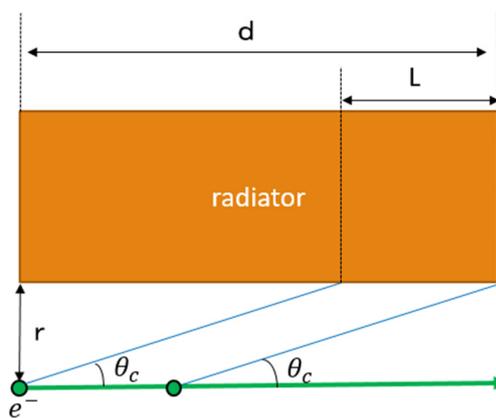


Figure 3: Virtual radiator thickness.

Figure 3 からラジエータ近傍を荷電粒子が通過した際のラジエータの仮想的な厚さ L は、ラジエータの実際の厚さ d 、荷電粒子のラジエータからの距離 r 、チェレンコフ角 θ_c を用いて次のように書くことができる。

$$L = d - \frac{r}{\tan \theta_c} \quad (7)$$

よってラジエータ近傍を荷電粒子が通過した際の発生光子数は

$$N = 2\pi\alpha \left(d - \frac{r}{\tan \theta_c}\right) \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (8)$$

で表すことができ、光子数は $-r$ に比例することがわかる。つまりチェレンコフ光の輝度は位置との応答性があるということである。この応答性をビームの位置モニターとして応用する。

3. ラジエータ

3.1 ラジエータ条件

今回ラジエータに要求される要件として、式(1)より屈折率が増大するとチェレンコフ光の放出角が増大するためリング全体の観測が困難であることから低屈折率であることが必要である。また、チェレンコフ光を取り出せるためにラジエータは透明でなければならない。最後にラジエータを真空引きした際に、屈折率が変化しないこと、ガスの放出が無いことが挙げられる。これらの条件を満たす物質として疎水性シリカエアロゲル[4,5]を選択した。

3.2 ラジエータの選択

本研究では先行研究で用いられたラジエータに比べ十分にチェレンコフ角 $\theta_c = 14^\circ$ を小さくするために屈折率 $n=1.03$ (チェレンコフ角)と小さな屈折率、光量の確保のため厚さ 17mm もしくは 25mm と厚く、ビームを通すための $\phi 10$ mm の穴をあけたシリカエアロゲルを使用する。(Table 1 参照)

Table 1: Comparison of Radiator Parameters

	Previous research	This research
Thickness	1mm	25mm
Refractive index	1.05	1.03
Hole	Nothing	$\phi 10$ mm

4. 実験計画

4.1 実験概要

ビーム実験を東北大学電子光学研究センター所有の試験加速器(t-ACTS)で実施する。

穴ありエアロゲルに電子ビームを通過させ、チェレンコフリングを発生させ、チェレンコフリング全体を CCD カメラで測定し、電子ビーム位置とチェレンコフリングの明るさの相関について調べる。

4.2 実験セットアップ

ビーム実験のセットアップの概形は Figure 4 である。

ラジエータの穴に電子ビームを入射し発生したチェレンコフ光リングをリアプロジェクションスクリーンに投影し CCD カメラで観測する。観測したチェレンコフ光リングの輝度の角度分布とビームの位置の依存性を測定する。

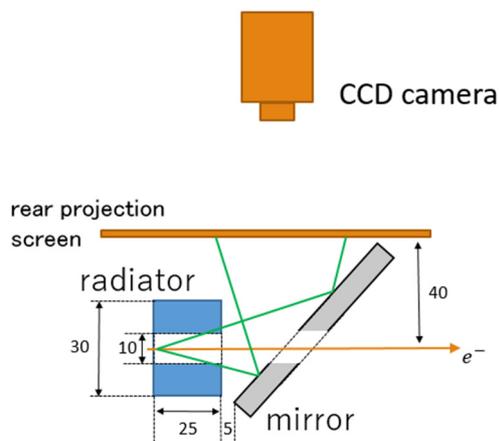


Figure 4: Outline of experiment setup.

本研究ではラジエータ上流部とミラー下流部にそれぞれプロファイルモニターと、ラジエータの位置に排他的に挿入できるスクリーンモニターの三枚のモニターを用いてビームの位置を決定し、実際の実験では様々ビームパラメータを変えて測定を行う。

5. まとめ

本研究ではチェレンコフ光リングを用いた非破壊型ビームモニターの検討を行った。電場の波面を計算することで誘電体近傍を電子が通過した際にもチェレンコフ光が発生することを確認し、仮想的なラジエータ厚を考えることで輝度と位置の応答性についても説明できることが分かった。今後は定量的な輝度と位置の応答性について議論を進めると同時に実験計画を進め実際に電子ビームをラジエータの穴に通した際の結果について観測をしたいと考えている。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 18K11915 の助成を受けたものです

参考文献

- [1] 斎藤悠希, 低屈折率シリカエアロゲル薄膜からのチェレンコフ光を用いたサブピコ秒バンチ長計測, 東北大学, 2018.
- [2] Jelley, J.V., Čerenkov Radiation And Its Applications, 1958.
- [3] T. Shintake, New mathematical method for radiation field of moving charge, Proceedings of EPAC 2002.
- [4] M. Tabata *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 668 (2012) 64.
- [5] M. Tabata *et al.*, Nucl. Instr. and Meth. A 623 (2010) 339.