

# A BEAM MONITOR UTILIZING A TRANSITION RADIATION

Yujiro OGAWA, Tsuyoshi SUWADA, Takuya KAMITANI, Hirofumi HANAKI,  
Kazuro FURUKAWA, and Atsushi ENOMOTO

KEK, National Laboratory for High Energy Physics  
1 - 1, Tsukuba, Ibaraki 305 Japan

## ABSTRACT

Beam monitors utilizing an electromagnetic wave, especially a visible light, radiated by a charged particle, have several excellent features for beam diagnostics in accelerators; they are essentially free from environmental electromagnetic noises and have characteristics of a high-speed time response. A beam monitor based on a transition radiation is one of the most promising monitors concerning positions, sizes, emittance, energy, and time structures of bunches for high-intensity, short-pulse beams. We have started to develop beam monitors utilizing a transition radiation for beam diagnostics of high-intensity electron beams.

## 遷移輻射を用いたビームモニターの開発

### 1. はじめに

近年、加速器のビームの質の向上に伴い精密なビームモニターの必要性が高まっている。たとえば、KEKにおいて検討されているB-ファクトリー計画のための入射器では、大強度の陽電子ビームを得るために、大電流電子ビームをエミッタンスの増大を抑さえて安定に加速し、陽電子生成ターゲットに導く必要がある。そのためには、横方向ウェーク場の発生を極力抑さえるべくビーム位置をできるだけ加速空洞の中心にあわせなければならないが、この場合、正確なビーム位置、サイズを知る必要がある。また、ビームのバンチ構造（波形、幅など）の把握は、シングルバンチの横方向不安定性や縦方向ウェーク場の見積りに極めて有用な情報を与える。

荷電粒子の出す電磁放射を利用したビームモニターは、本質的に応答性が速いものが多く、また加速機器の出す電磁ノイズに強いという実用上の利点をもっている。とくに、可視光領域のモニターは取り扱いが簡便で色々な利用がされている。チェレンコフ光を用いてバンチ構造の解析を行ったり、偏向電磁石のあとで放射光を利用してビームサイズおよび位置を測定する方法などが一般的であるが、それぞれの用途によって使い分けなければならない。ここでは、遷移輻射を用いたビームモニターによって、大電流ビームの様々な性質を一つのモニターで調べる可能性について検討した結果を報告する。

### 2. 遷移輻射を用いたビームモニター

#### 2.1 原理と特徴

遷移輻射を用いたビームモニターの原理に関しては、すでに幾つかの報告がある[1]。それによると、相対論的な荷電粒子（速度 $\beta=v/c$ 、エネルギー $\gamma$ ）が金属薄膜に衝突して突き抜けるとき、前方および後方に極めて指向性の強い応答性の速い光が放射される。ここでは、金属薄膜をビームラインに45度傾けて設置し、鏡面仕上げされた表面からの反射光を観測する場合を想定して、後方散乱（図1）について計算すると、単位周波数、単位立体角あたり

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = R \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{4\pi^2c} \frac{\sin^2\theta}{(1 - \beta \cos\theta)^2} \quad (1)$$

となる。ここで $R$ は金属の反射率を表し（ほとんど1としてよい）、 $\theta$ は図1のようにとるものとする。光速に近い場合は（ $\gamma \gg 1$ ）、遷移輻射光の指向性は非常に鋭くなり、

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{\pi^2c} \frac{\gamma^4 \theta^2}{(1 + \gamma^2 \theta^2)^2} \quad (2)$$

となり、 $1/\gamma$ の範囲に集中した角度分布をもつ（図2）。全立体角で積分し光子数で表すと、

$$N(\omega) = \frac{2\alpha}{\pi} \left( \log(2\gamma) - \frac{1}{2} \right) \frac{1}{\omega} \quad (3)$$

となる。ここで、 $\alpha$ は微細構造定数である。可視光領域に限ると、250MeVの電子1個が金属に入射したとき約0.01個の光子が出ることになる。

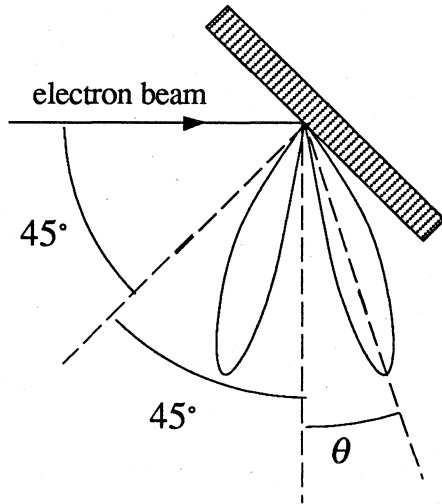


図1 45度入射の遷移輻射

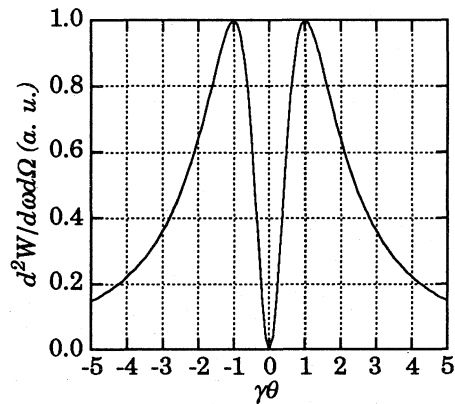


図2 遷移輻射の方向分布

遷移輻射光の全強度は、チェレンコフ輻射や放射光と比較して一般的に小さい（条件にもよるが）が、大強度ビームの場合は測定上十分な大きさになっている。たとえば、KEK陽電子発生装置の一次電子ビーム（尖頭電流10A、幅2ns、エネルギー250MeV、繰り返し25Hz）の場合、1パルス当たり $6 \times 10^8$ 程度の可視光領域の光子が放出されるので、適当な光学系によって全光量を2mm四方に集光させればおよそ1ルクスの照度となり、テレビカメラで観察可能である。またストリークカメラと組み合わせてバンチモニターとして使用する場合も、十分な光量である。一方、取扱いは極めて簡便で、以下のような幾つの特徴がある。

(1) 光が取り出し易い。

図1のような配置が可能なので簡単に光を取り出せる。また、指向性が鋭く全光量を集めることが容易である。チェレンコフ光を用いる場合、適当なガス中に電子を導く必要があるし、また、放射光の場合は偏向電磁石が必要であるのに対し、遷移輻射光の場合は通常のビームライン（真空中）に金属薄膜を挿入するだけでよい。

(2) 時間と位置の分解能が高い。

一般に用いられているセラミックスからの発光\*を利用するものと違って発光機構が単純で発光面がほぼ表面なので、応答速度が速い。また、ビームサイズ、位置などを忠実に再現するものと思われる。但し、ビームのエネルギーに比例して位置分解能は落ちる（観測波長を $\lambda$ とすると $\gamma\lambda/2\pi$ 程度まで拡大される）ので、その場合は短波長領域の輻射成分を利用することを考えなければならないであろう。原理的には、ピコ秒の応答速度があるといわれているのでバンチの時系列解析にも用いることが可能であろう。

(3) エネルギーが測定できる。

図2において、角度分布の中央付近 ( $\gamma\theta \ll 1$ ) の輻射成分の光量はビームエネルギーの4乗に比例する[1]なので、 $\gamma$ が小さい場合はエネルギーを容易に測ることができる。また、 $\gamma$ が大きい場合でも、全立体角で積分した式(3)によって相対的なエネルギー変化は求められる。

## 2.2 実験計画

KEK2.5GeV電子線形加速器では、現在検討中のB-ファクトリー計画用大強度電子ビームを加速するための準備として入射部の改造を進めているが、ビーム特性を精密に測るために遷移輻射を用いたモニターを設置することを検討している。計画としては、図3に示すように、ビームラインに45度に傾けた金属薄膜を設置し、大強度電子ビームの通過によって発生する遷移輻射を利用する。ビームスプリッターによって分けられた一つはテレビカメラによって観測し位置、ビームサイズ等を測り、他の一つは、光ファイバーによってストリークカメラまで運ばれ、バンチの時系列解析、及び相対的なエネルギー測定を行なう。

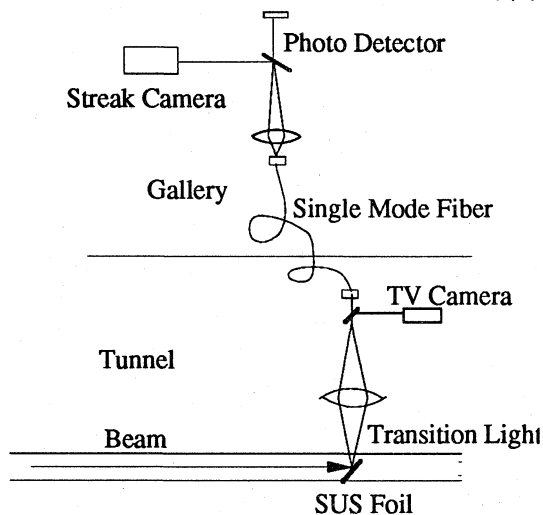


図3 実験計画

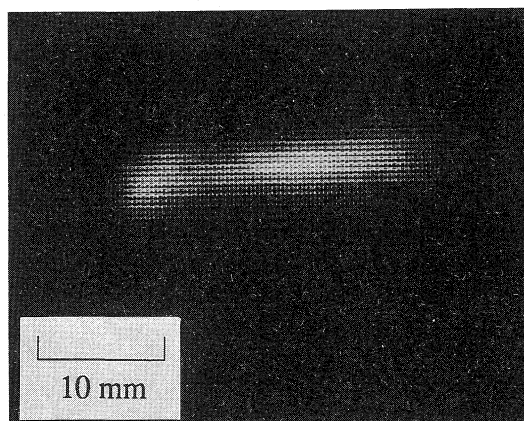


図4 遷移輻射の観測例

## 3. 予備実験

これまでに遷移輻射光について、KEK陽電子発生装置の一次電子ビームを用いて検討を行なっている。加速器の運転上の都合でビームラインに直接モニターを入れることが不可能であったので、陽電子生成用ターゲット前のエネルギー解析装置の偏向電磁石のあとに2mm厚のステンレス板を挿入した。したがって、放射光が同時に観測されるが、発光点の違いを利用してカメラの焦点距離を変えることによって両者を分離することが可能である。図4に偏向電磁石後約1mの位置にあるステンレス板によって生じた遷移輻射光の例を示す。縦ウェーク場によってバンチ毎にエネルギーが異なるため、バンチ毎の遷移輻射が観測されている。このほか、指向性が鋭いこと、ビームサイズを忠実に表していること、テレビカメラで観測する範囲でも応答速度が十分速いこと、等を確認している。

\* 通常用いているデマルケスト (AF995R) からUV成分光として非常に応答性の速い光が観測されたという報告がある。文献[2]を参照のこと。

## 参考文献

- [1] M. Jablonka, J. Leroy, X. Hanus and L. Wartski, DPhN Saclay 91-32.
- [2] S. Tagawa, H. Shibata, Y. Yoshida, T. Ueda and T. Kobayashi, in Proc. of the 8th Symposium on Accelerator Science and Technology, Nov. 25-27, 1991, RIKEN, Japan, p.293.