

## チェレンコフ放射を用いた極短電子バンチ長測定の評価

### EVALUATION OF THE EXTREMELY SHORT ELECTRON BUNCH LENGTH MEASUREMENT WITH CHERENKOV RADIATION

齊藤 悠樹<sup>#,A)</sup>, 柏木 茂<sup>A)</sup>, 日出 富士雄<sup>A)</sup>, 三浦 禎雄<sup>A)</sup>, 西森 信行<sup>B)</sup>, 武藤 俊哉<sup>A)</sup>, 南部 健一<sup>A)</sup>, 柴崎 義信<sup>A)</sup>,  
高橋 健<sup>A)</sup>, 長澤 育郎<sup>A)</sup>, 鹿又 健<sup>A)</sup>, 齊藤 寛峻<sup>A)</sup>, 濱 広幸<sup>A)</sup>

Yuki Saito<sup>#,A)</sup>, Shigeru Kashiwagi, Fujio Hinode, Sadao Miura, Nobuyuki Nishimori, Toshiya Muto, Kenichi Nanbu,  
Yoshinobu Shibasaki, Ken Takahashi, Ikuro Nagasawa, Ken Kanomata, Hirotohi Saito, Hiroyuki Hama

<sup>A)</sup> Research Center for Electron Photon Science, Tohoku University

<sup>B)</sup> Institute of Multidisciplinary Research for Advanced Materials, Tohoku University

#### Abstract

A novel experimental method to observe the extremely short electron bunch length by using Cherenkov radiation emitted from a thin Silica-Aerogel has been evaluated. We have developed generation of coherent THz lights at t-ACTS (t-ACTS: test Accelerator as Coherent THz Source) in Tohoku University. It is required that electron bunch is compressed into the sub-picosecond order to get coherent THz light. For bunch length measurement so far, optical transition radiation was utilized. However it is difficult to raise the time resolution of the streak camera, which was being employed as a detector, because of insufficient number of photons. So an experimental system for the extremely short electron bunch length measurement employing optical Cherenkov radiation, which is much brighter than optical transition radiation, is being constructed and evaluated.

#### 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)ではコヒーレントテラヘルツ光の研究[1]が行われている。テラヘルツ光源として広帯域のバンド構造を持つ遷移放射や、狭帯域のアンジュレーター放射について研究が行われている。コヒーレントなテラヘルツ光を得るためには、電子バンチをサブピコ秒程度まで圧縮しなければならない。コヒーレントテラヘルツ光の研究を行うにあたり、t-ACTS で生成・圧縮された電子バンチのバンチ長およびバンチ形状について把握する必要がある。今までに、可視光領域での遷移放射:OTR の時間広がり をストリークカメラで計測することによりバンチ長を直接観測するというバンチ長計測実験[2]が行われてきた。しかし、OTR 光の光量不足のために時間分解能の高い計測を行うことができなかった。そこで、代わりに OTR 光より光量の多いチェレンコフ光を用いることでより時間分解能の高い実験の可能性について検証した。

本研究では、チェレンコフ光の時間広がり をストリークカメラで計測する際の光学系で生じる時間広がりおよび見込の検出光子数について OTR 光を用いたときと比較評価を行った。また、チェレンコフ光の広がり角を抑えるために設計・作成した光学系の試験についても紹介する。

#### 2. チェレンコフ光

##### 2.1 チェレンコフ光とは

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、光は円錐状に広がっていく。

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

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

で表される。

また、周波数 $\omega$ ごとのチェレンコフ光の放射強度 $\frac{d^2W}{dx d\omega}$ については、速度 $\beta$ で走る点電荷 $e$ について Maxwell 方程式を解くことにより

$$\frac{d^2W}{dx d\omega} = \frac{e^2}{c^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \omega \quad (2)$$

が得られる。このことより、荷電粒子が厚さ $z$ のラジエーター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

$$\frac{dN}{d\lambda} = 2\pi\alpha z \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \frac{1}{\lambda^2} \quad (3)$$

となる(微細構造定数: $\alpha$ )。特定の波長域内 $\lambda_1$ から $\lambda_2$ の間に放出される光子数は

$$N = 2\pi\alpha z \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (4)$$

で表される。

##### 2.2 電子バンチの放出するチェレンコフ光

時間広がりを持った電子バンチを誘電体に入射させた際のチェレンコフ光の時間広がり、電子のバンチの時間広がり(バンチ長)と空間広がり(ビームサイズ)の両方を反映する。Figure 1 でその様子を示す。バンチ長のチェレンコフ光の時間広がりを与える影響は、チェレンコフ光の放出角 $\theta_c$ へバンチ長を射影した像として現れるため、バンチの時間広がり $\sigma_L$ であるときチェレンコフ光の時間広がり $\sigma_L \cos \theta_c$ となる。また同様にビームサイズの影

<sup>#</sup> ysaito@lms.tohoku.ac.jp

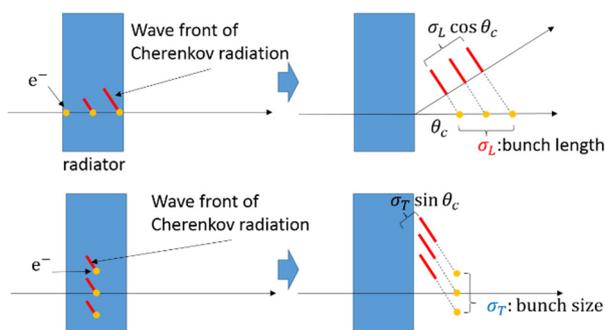


Figure 1: The influence of bunch length (top) and bunch size (bottom) on the time distribution of Cherenkov radiation.

響を考えると、ビームサイズが $\sigma_T$ であるときチェレンコフ光の時間広がり $\sigma'_L$ は $\sigma_T \sin \theta_c$ となる。

したがって、バンチ長 $\sigma_L$ 、ビームサイズ $\sigma_T$ の電子バンチから放出されるチェレンコフ光の時間広がり $\sigma'_L$ は

$$\sigma'_L = \sqrt{(\sigma_L \cos \theta_c)^2 + (\sigma_T \sin \theta_c)^2} \quad (5)$$

となる。式(1)、(5)より電子バンチから放出されるチェレンコフ光はラジエーターの厚さ $z$ には依存せず、ラジエーターの屈折率 $n$ にのみ依存する。例えば屈折率 $n = 1.05$ のラジエーターを用いて $\sigma_L = 100\text{fs}$ のバンチ長を計測するときビームサイズを $\sigma_T = 100\mu\text{m}$ まで絞っておけばチェレンコフ光の時間広がり $\sigma'_L = 137\text{fs}$ となる。また、チェレンコフ光の時間広がりに対してバンチ用の影響をビームサイズの影響より大きくするためには、屈折率 $n = 1.05$ のラジエーターを用いた場合ビームサイズは $100[\mu\text{m}]$ より小さくする必要がある。したがって、チェレンコフ光でバンチ長計測を行うにはビームサイズは十分に絞る必要がある。

### 3. Velocity Bunching 法による極短電子バンチの生成

t-ACTS では、進行波加速管中での Velocity Bunching 法[3]によりサブピコ秒の極短電子バンチを生成している。Velocity Bunching 法とは加速管の RF の位相速度よりもわずかに遅い速度の電子バンチ加速管に入射させることにより、電子を加速させながらバンチ長を圧縮する方法である。加速管中で phase slip を起こすことにより縦方向位相区間で圧縮が実現する。縦方向位相空間においてエネルギー広がりの小さい電子ビームを、RF 電場の加速電場から減速電場に変化する位相付近に入射させた時に最も短い時間幅のビームを得ることができる。

## 4. バンチ長測定実験系

### 4.1 実験セットアップ

今回チェレンコフ光のラジエーターとして屈折率 $n = 1.05$ のシリカエアロゲル $1\text{mm}$ 厚を用いた。式(1)より屈折率が增大するとチェレンコフ光の放出角が増大する。放出角が増大すると光輸送が困難であること、また式(5)より電子ビームサイズがチェレンコフ光の時間広がりに与える影響が大きくなる。また、チェレンコフ光を取り出せる

ためにラジエーターは透明でなければならない。最後にラジエーター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必要である。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]を用いた。

放出されるチェレンコフ光をストリークカメラまで光輸送する経路を Figure 2 に示す。放出されたチェレンコフ光をアルミニウムミラーで反射させた後、クォーツ真空窓(7mm厚)を通してビームライン真空から取り出した。その後、円錐状に広がっていくチェレンコフ光を、金コートのアキシコンミラーを用いて平行光に変換した後、4枚のアルミコートミラーで反射光学系を組み、 $90^\circ$ 非軸放物面鏡で集光した。チェレンコフ光の時間幅を見るための検出器としてストリークカメラ FESCA-200 (浜松ホトニクス)を用いる。

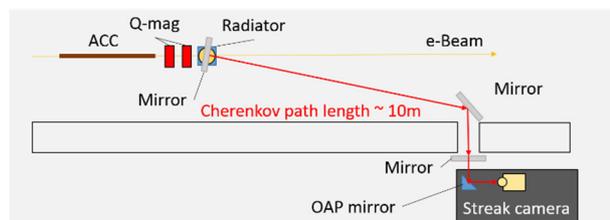


Figure 2: Optical outline for bunch length measurement.

### 4.2 チェレンコフ光の光輸送

バンチ長計測実験においてラジエーターからストリークカメラのある位置まで 10m 光輸送をしなければならない。2.1 で述べた通りチェレンコフ光はラジエーターの屈折率に依存した角度方向に円錐状に広がって放出される。そこで、式(1)で求められる角度で広がっていくチェレンコフ光に対して平行光に変換するためのアキシコンミラーおよび逆アキシコンミラーを製作した(Figure 3)。反射コートには可視光領域の長波長側およびテラヘルツ領域で反射率の高い金コートを採用した。また、2つのミラーの光軸を一致させつつ、ミラーの間隔をスペーサーで変化させることができるミラーホルダーを製作した(Figure 4)。2つのミラーの間隔を広げると、チェレンコフ光はアキシコンミラー(Figure 3 下図)の先端側で反射するため、チェレンコフ光のリング半径は小さくなる。逆にミラーの間隔を近づけるアキシコンミラーの外周側で反射するため、チェレンコフリングのリングの半径は大きくなる。

### 4.3 バンドパスフィルターで抑制した波長分散

ラジエーターからストリークカメラにチェレンコフ光を運ぶまでの間にクォーツ真空窓および空気の波長分散によりチェレンコフ光の時間広がりが増大してしまう。このことによりストリークカメラで観測する光は時間方向にぼやけた光になり時間分解能の低下を招く。したがって、時間分解能の良いバンチ長測定を行うためには、光輸送の途中にバンドパスフィルターを挿入して波長分散を抑制する必要がある。しかし、バンドパスフィルターのように光の波長域に制限を加えると不確定性関係により時間広がりはある一定以上より大きくなってしまう。この効果によって光の時間広がりは増大してしまう。このときの時間広がりのことをフーリエ限界パルス幅と呼ぶ。バンドパス

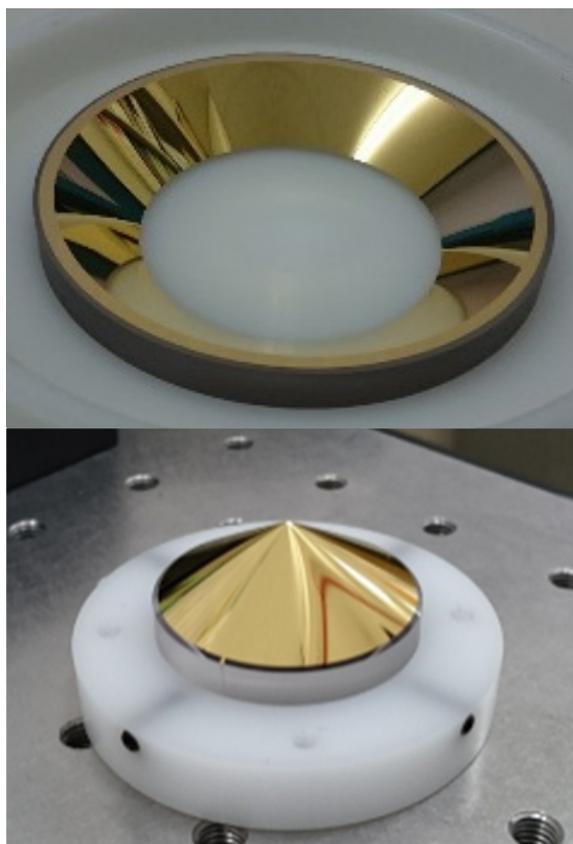


Figure 3: Inverse-axicon mirror (top) and axicon mirror (bottom) with Au coat.

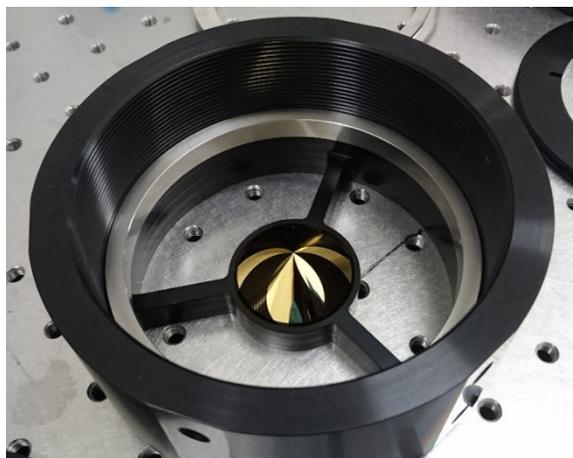


Figure 4: The holder of axicon mirrors. Spacers (Silver ones) can change diameter of Cherenkov ring.

フィルターに入射させる波形にガウシアンを考えた場合、バンドパスフィルターの中心波長 $\lambda$ 、バンド幅 $\Delta\lambda$ (FWHM)、光速度 $c$ とするとフーリエ限界パルス幅は

$$\Delta t_{rms} \geq \frac{2\sqrt{2 \ln 2}}{4\pi} \frac{\lambda^2}{c\Delta\lambda_{FWHM}} \quad (6)$$

となる。これらのことよりチェレンコフ光をバンドパスフィルターに入射させた際の透過光の時間広がりは一例として Figure 5 のようになる。

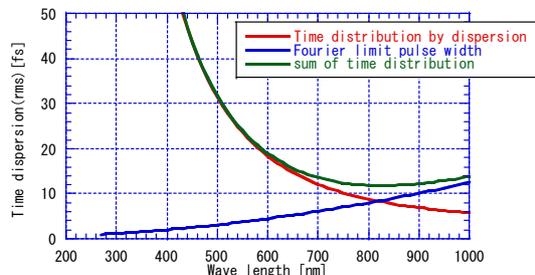


Figure 5: Time distribution with restrict of bandpass filter (FWHM 50nm).

#### 4.4 実験系における観測光子数

バンチ長計測でチェレンコフ光を用いた理由として、可視光領域の OTR よりも放出される光子数が多いという理由がある。そこでどの程度 OTR によるバンチ長測定実験より光子数が増大するのかを計算した。

4.1 で述べた通りラジエーターからストリークカメラに入射させるまでの間の各光学系によって波長ごとに光学損失が生じる。式(4)より波長 10nm ごとに発生するチェレンコフ光の光子数に各鏡の反射率を用いた枚数分とストリークカメラの波長ごとの検出効率掛けたものを検出光子数とした(Figure 6)。

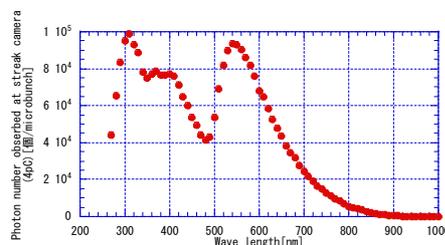


Figure 6: Detection number of photons every 10nm.

#### 4.5 前実験との比較

電子光理学研究センターの t-ACTS では可視光領域での遷移放射の時間広がりを見ることができ、この実験によりバンチ長測定実験[3]が行われてきた。この実験では OTR 光の光量不足によりストリークカメラの測定レンジを上げることができなかった。また、波長分散を抑えるためにバンドパスフィルターを用いることができず 409nm ロングパスフィルターを用いた。そのとき、OTR 光によるバンチ長測定実験[3]における検出光子数は $3.0 \times 10^4$ [個/micro bunch(4pC)]であり、光学系で生じる時間広がりには 130fs と計算される。

4.3 および 4.4 よりチェレンコフ光によるバンチ長測定実験において OTR 実験よりも検出光子数を確保しつつバンドパスフィルターで波長分散を抑えることが必要である。そこで、中心波長 550nm バンド幅 50nm(FWHM)のバンドパスフィルターを選択した。このバンドパスフィルターを用いた場合の検出光子数は $4.3 \times 10^5$ [個/micro bunch(4pC)]であり時間広がりには 24fs に抑えられる。した

がってチェレンコフ光をバンチ長測定に用いることで OTR 光よりも光量を確保しつつ時間広がりを抑えることができるものと期待される。

## 5. チェレンコフ光の光輸送実験

4.2 で紹介したアキシコンミラー2枚とミラーホルダーで、ラジエーターからストリークカメラまで 10m 光輸送できるかどうか調べた。アキシコンミラー2枚で反射させて平行に変換した後の光を、アキシコンミラーとの距離を変化させてその像をスクリーンに映して撮影した(Figure 7)。

アキシコンミラーを通した後のチェレンコフリングの内径の変化を見ると拡がり角が抑えられおり、 $17.6^\circ$  から  $0.87^\circ$  に変化していることが確認できた。しかし、アキシコンミラーからストリークカメラまで 10m の距離光輸送した場合チェレンコフリングの直径が 300mm を超えてしまい、このままではストリークカメラに集光して入射させることができない。したがって、発散方向に広がる光を凸レンズで平行光に更に修正する必要がある。また、ミラーホルダーのスペーサーを追加して2つのミラーの間隔を変えて、アキシコンミラーを通した後のチェレンコフリングの直径をより小さくする必要もある。現在のセットアップで作成したミラーホルダーではチェレンコフ光のリングの直径を 12mm まで小さくできる。いま、チェレンコフ光の拡がり角  $0.87^\circ$  であるため、焦点距離 300mm の凸レンズを用いれば平行に変換することができると考えられる。もし光路の途中で空気より波長分散の大きいガラスを加えた場合、凸レンズの波長分散の効果の分だけチェレンコフ光の時間広がりが増大する。しかし今回のバンチ長測定において、バンドパスフィルターで波長域を制限しているので時間広がりを抑えらと考えられる。

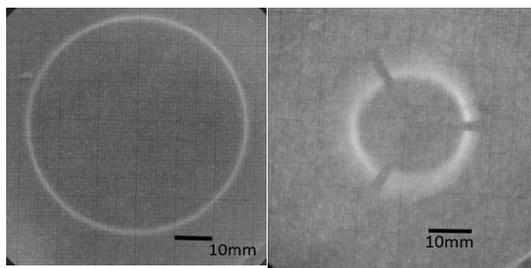


Figure 7: Cherenkov ring before axicon mirror (left), after axicon mirror (right).

## 6. まとめ

チェレンコフ光による極端電子バンチ計測実験の可能性を求めた。バンチ長計測においてラジエーターから検出器までの距離を光輸送するために、円錐状広がって進行するチェレンコフ光を平行に変換するためのアキシコンミラーを製作した。また、実際にチェレンコフ光をアキシコンミラーで反射させて拡がり角が抑えられていることを確認した。バンドパスフィルターを用いることで、バンチ長測定の前実験で問題点であった光量不足を解消しつつ、波長分散による時間広がり抑制できることが分かった。

今後、ストリークカメラまでチェレンコフ光を輸送して、ストリークカメラを含めた測定系全体における時間分解

能を評価して、バンチ長測定を行う。

## 謝辞

チェレンコフラジエーターとして使用した疎水性シリカエアロゲルは千葉大学の河合秀幸准教授と田端誠博士に提供していただきました。また本研究の一部は、JSPS 科研費 15K13394, 15K17486 の助成を受けたものです。

## 参考文献

- [1] 阿部太郎, “極短電子ビームによるコヒーレントテラヘルツ放射の研究”, 修士論文, 平成 28 年.
- [2] H. Saito *et al.*, “ストリークカメラを用いた OTR 測定による極短電子ビームバンチ長測定 (II)”, *Proceedings of PASJ2016* pp.537-541.
- [3] L. Serafini and M. Ferrario, *AIP Conf. Proc.* 581 (2001) 87-106.
- [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.