

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

二宮慎吾, 柏木茂, 日出富士雄, 三浦禎雄, 武藤俊哉, 南部健一,
高橋健, 長澤育郎, 鹿又健, 齊藤寛峻, 濱広幸

東北大学電子光理学研究センター

日本加速器学会 第15回年会

2018年8月8日

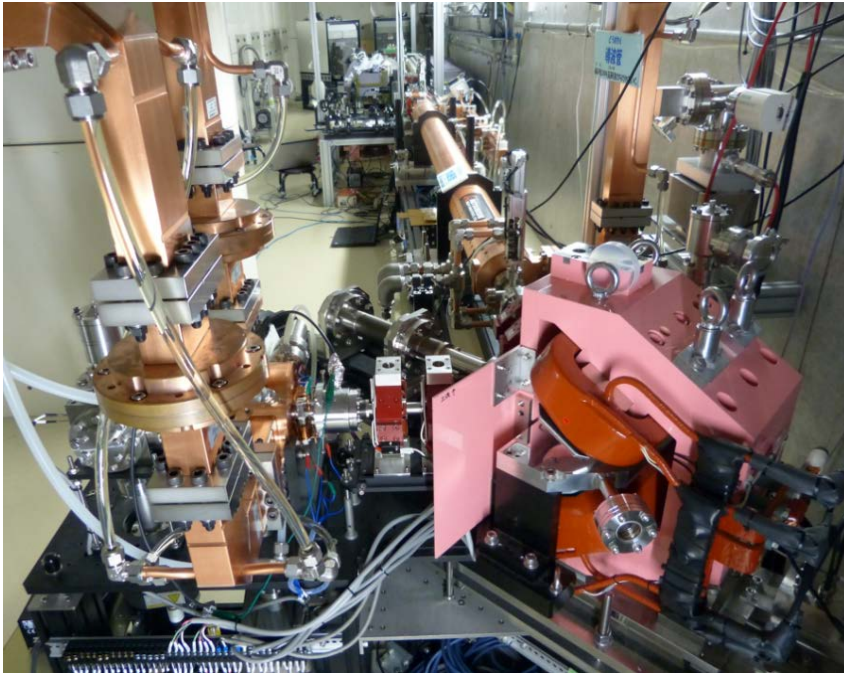
ハイブ長岡

目次

1. Introduction
2. ラジエータ近傍を電子が通過した際のチェレンコフ光
3. 実験計画
4. まとめと展望

はじめに

t-ACTS @ ELPH, Tohoku Univ.



高輝度コヒーレントTHz光源の
開発研究



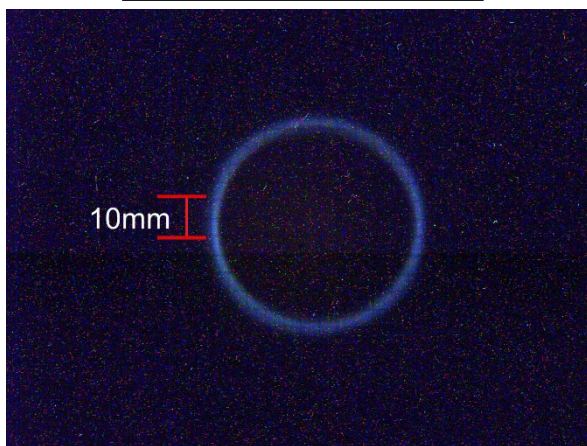
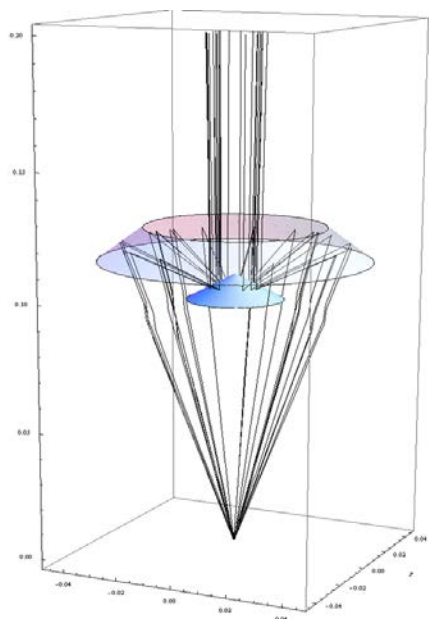
- ・速度集群法(Velocity bunching)を用いた
極短電子ビーム生成
- ・極短電子ビームによる
コヒーレントテラヘルツ放射の発生

先行研究

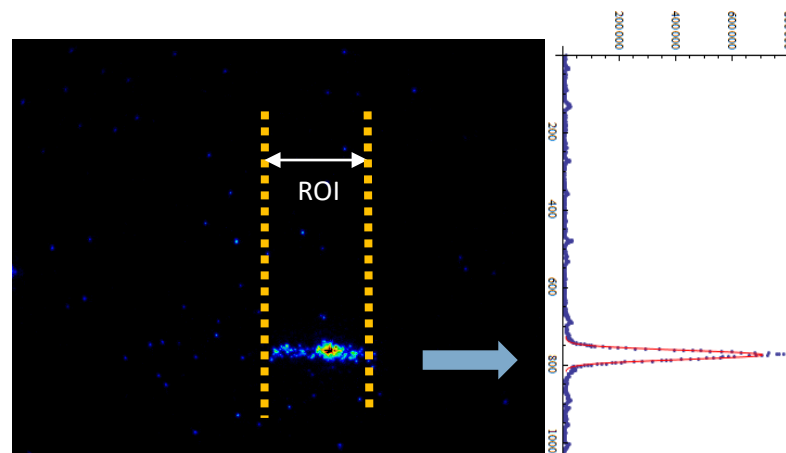
✓※チェレンコフ光をストリークカメラを使い測定するバンチ長測定システムの開発

- ラジエータ： 低屈折率、厚さ1mmのシリカエアロゲル
- 光輸送システム： ダブルアキシコンミラー

実際に測定した
チェレンコフ光



ストリークカメラでの計測結果



独自に設計した光学系および
計算されたチェレンコフ光の輸送経路

※斎藤悠希修士論文,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

研究目的

これまでに**チェレンコフリング全体**の測定に成功



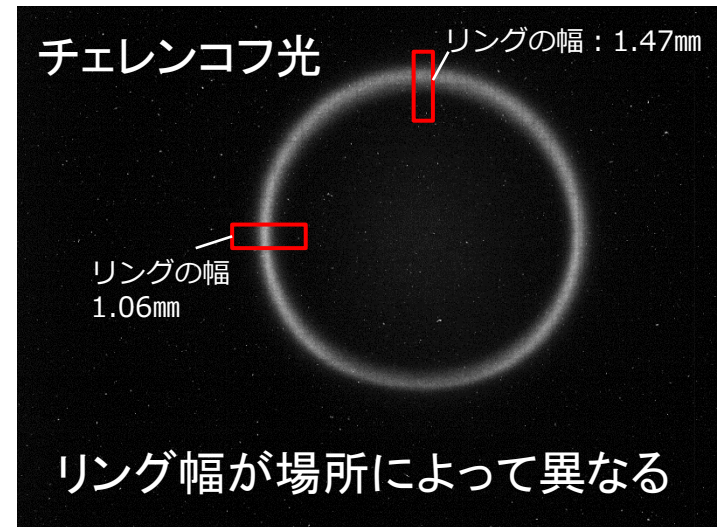
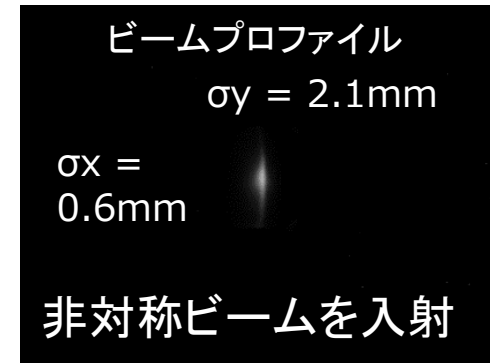
チェレンコフリングと電子ビーム状態に相関あり

(リングの太さ \leftrightarrow 電子ビームサイズ)

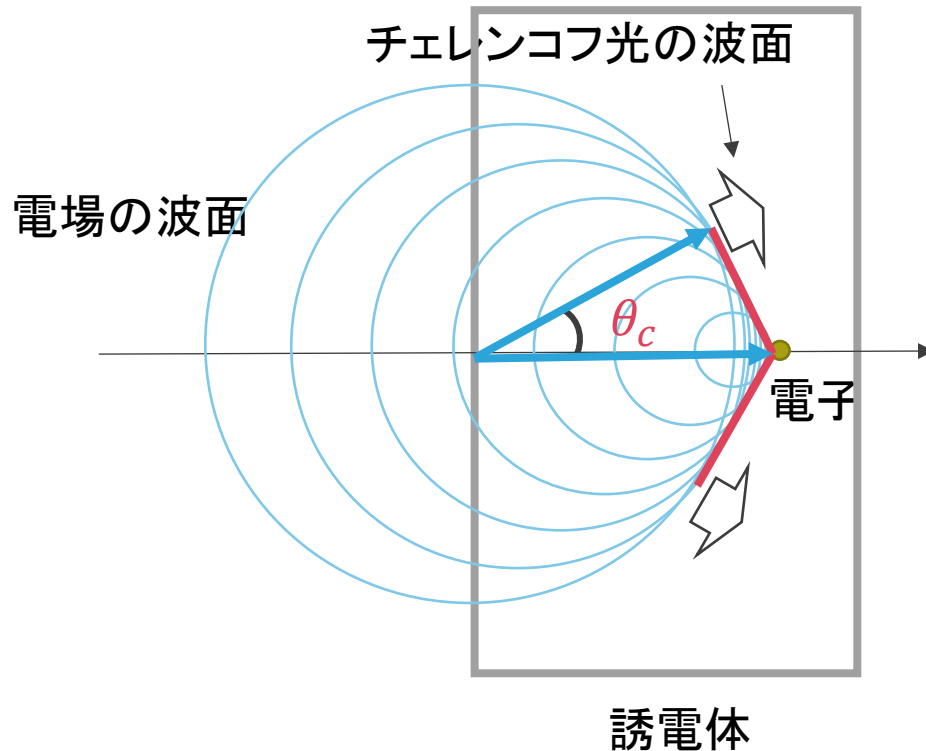


ビームサイズやビーム位置を

チェレンコフリングから測定したい



チェレンコフ光の放射原理



c : 真空での光速度
 n : 誘電体の屈折率
 v : 電子の速度

誘電体内での
光の速度 $c/n < v$ 電子の速度

チェレンコフ角 θ_c

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

$$(\beta \approx 1, \beta n > 1)$$

電場の波面が包絡線を
形成し光が発生

非破壊ビームモニターへの応用

誘電体にビームを直接入射

↳ ビームロスが発生



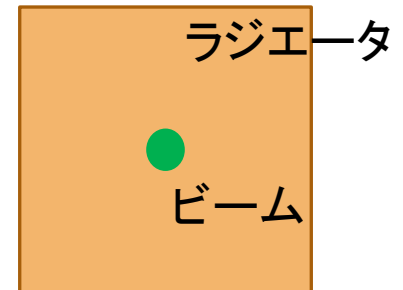
誘電体に穴をあけビームを通す

↳ ビームロスなし(非破壊)

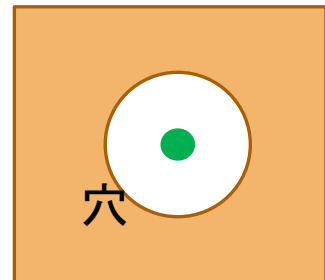


ラジエータの穴をビームが通った時

チェレンコフ光が生じる？



直接ビーム入射
→ ビームロス



穴をビームが通過
→ ビームロスなし

電場の伝搬(二次元)

電場は光速で伝搬していく(重心系)



ある角度 θ 方向の電場の伝搬する速度は
x軸y軸それぞれ

$$\frac{v_x}{c} = \frac{1}{n} \cos \theta, \quad \frac{v_y}{c} = \frac{1}{n} \sin \theta$$

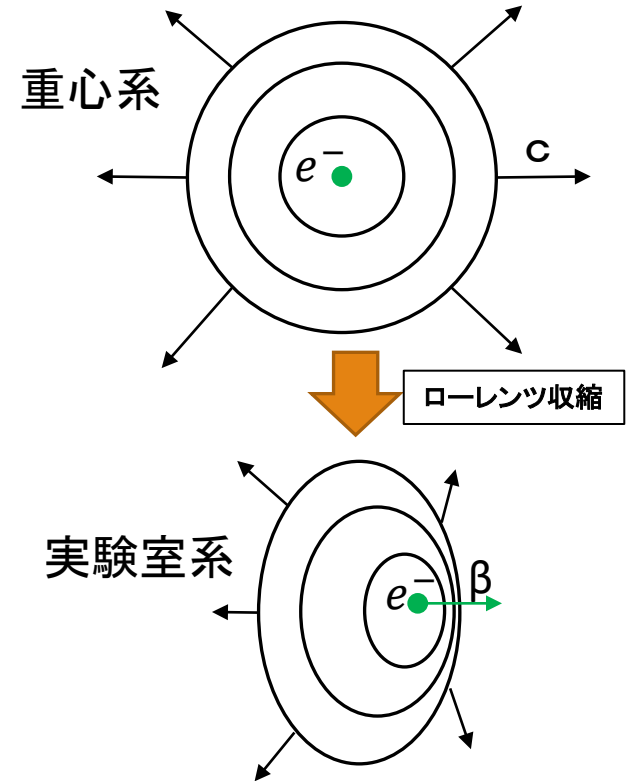
電子がx軸に β で移動



ローレンツ収縮

実験室系から見た電場の伝搬する速度は

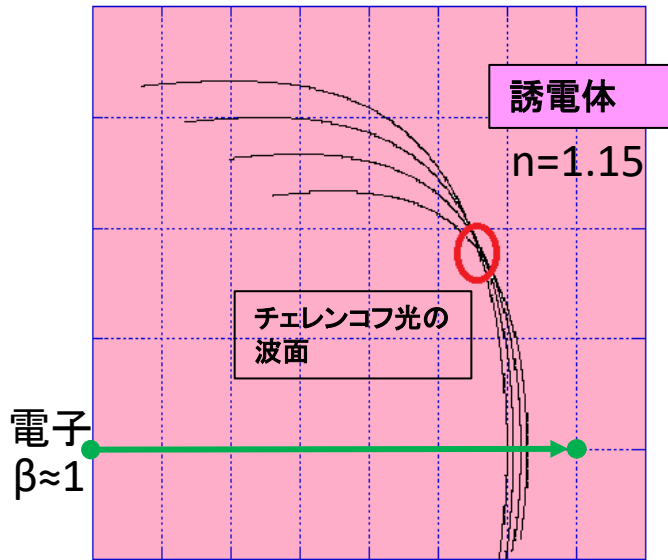
$$\frac{v'_x}{c} = \frac{\beta + \frac{\cos \theta}{n}}{1 + \beta \frac{\cos \theta}{n}}, \quad \frac{v'_y}{c} = \frac{1}{n} \sin \theta$$



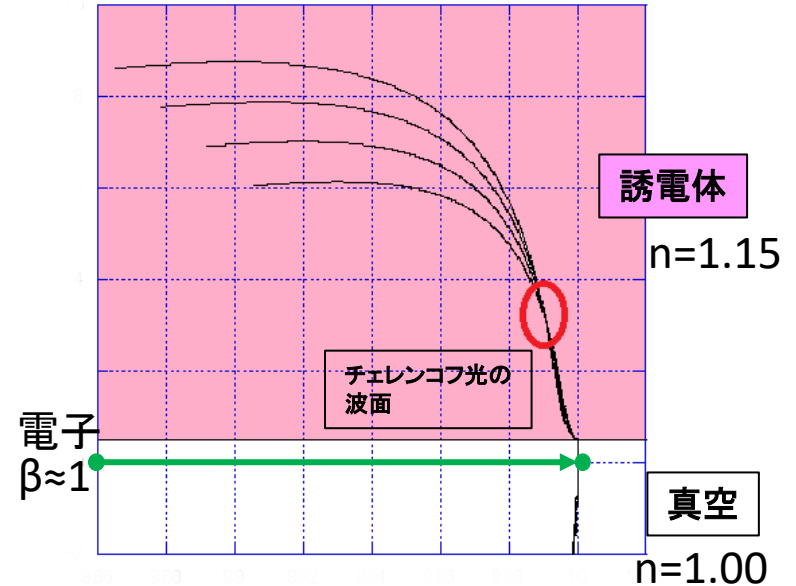
誘電体近傍を通過した際の
電場の波面を計算

誘電体近傍を通過した際の電場の波面

誘電体に直接入射した場合



誘電体近傍を電子が通った時の電場の波面



※簡単のために電子の初期位置から一定時間ごとに発生する電場の波面を4本のみ-20~90度の部分のみを書きだした。

誘電体近傍を通った時も電場の波面が包絡線を形成



チェレンコフ光が発生

発生光子数と位置の応答性

レーザーに直接荷電粒子を入射した際に
波長 λ_1 から λ_2 の間に発生する光子数

(Frank-Tamm formula) :

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



レーザー近傍を
通過した場合は？

仮想的なレーザー厚 L を考える

チェレンコフ光に寄与するレーザー厚はチェレンコフ角 θ_c から

$$L = z - \frac{r}{\tan\theta_c}$$



チェレンコフ角 θ_c
$$\cos\theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

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

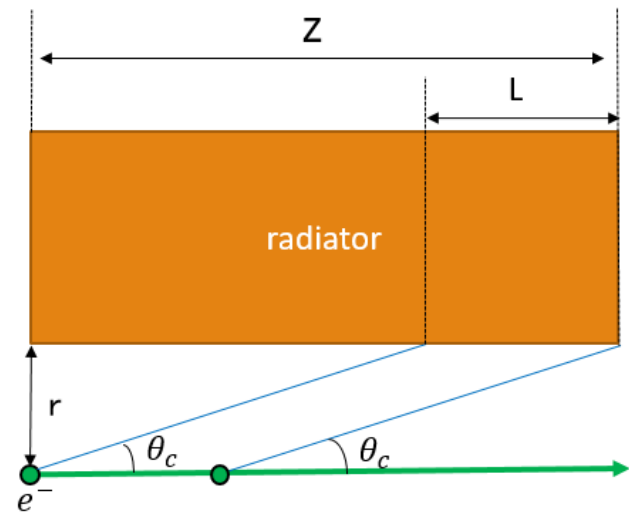


$$N \propto r$$



位置応答性

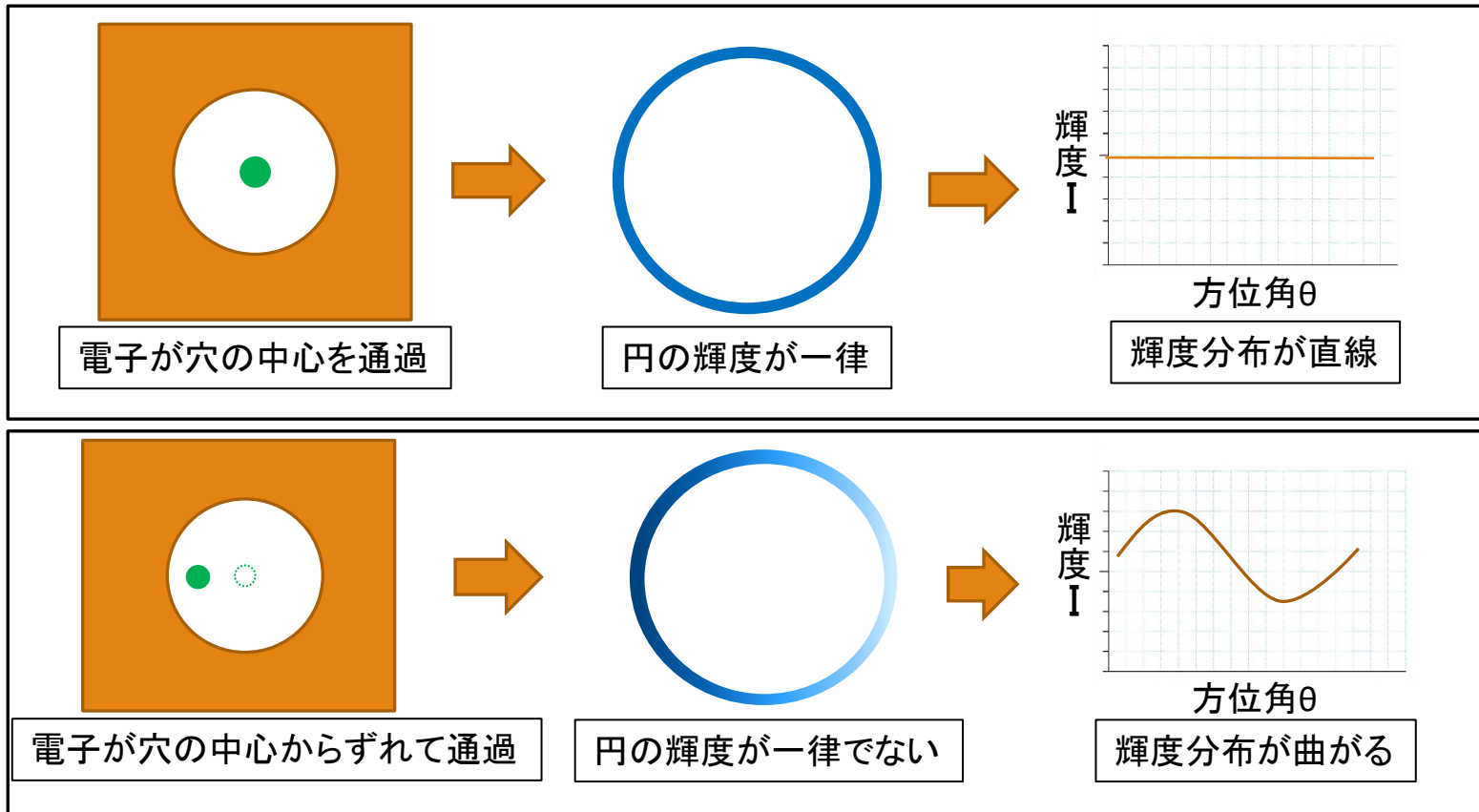
z :レーザー厚
 r :レーザーと電子の距離



位置応答性

チェレンコフ光

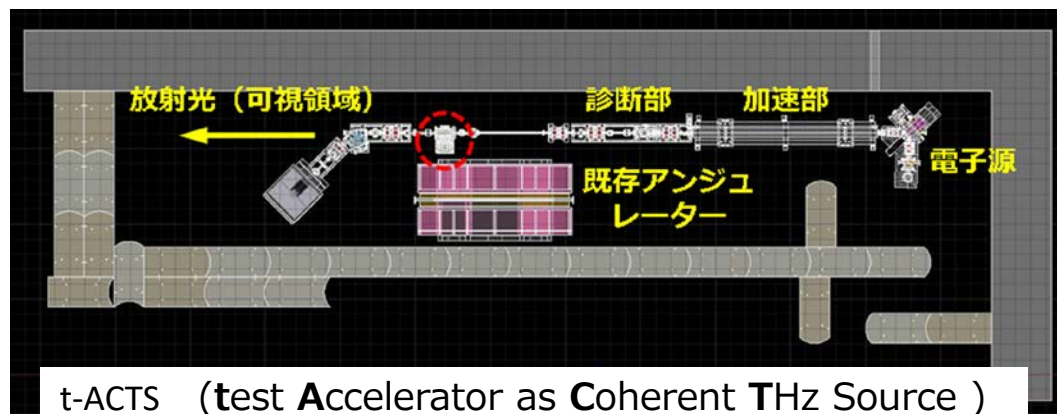
輝度分布



輝度分布を測定して位置を決める

実験計画

- 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測定。
→チェレンコフリング全体をCCDカメラで測定
- 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。



Macropulse length	~2.0 μ s
Number of bunch	~5700 bunches/macropulse
Beam energy	30~50 MeV
Bunch charge	3 ~ 4 pC /microbunch
Bunch length (σ_b)	< 0.04 ~ 2 ps (Calculation)

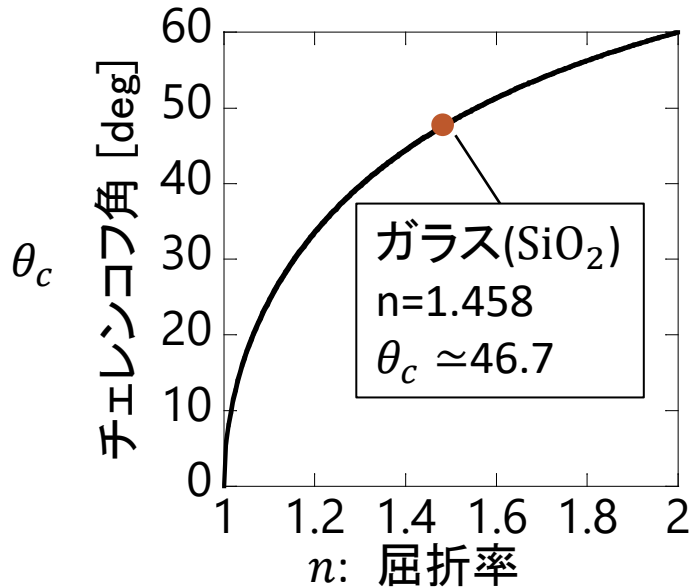
チェレンコフ角

チェレンコフ光リング全体を
観測する必要あり

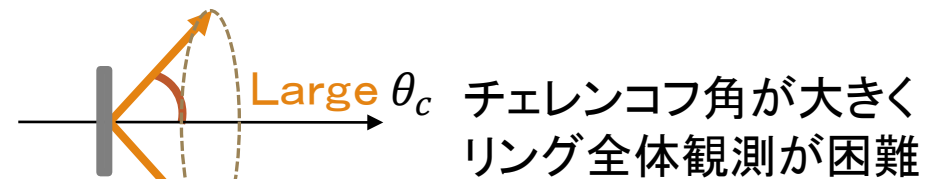
チェレンコフ角 θ_c

$$\cos \theta_c = \frac{1}{\beta n}$$

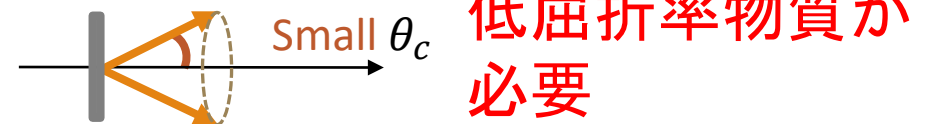
$$(\beta \approx 1, \beta n > 1)$$



高屈折率 (ガラス(SiO_2) など)



低屈折率

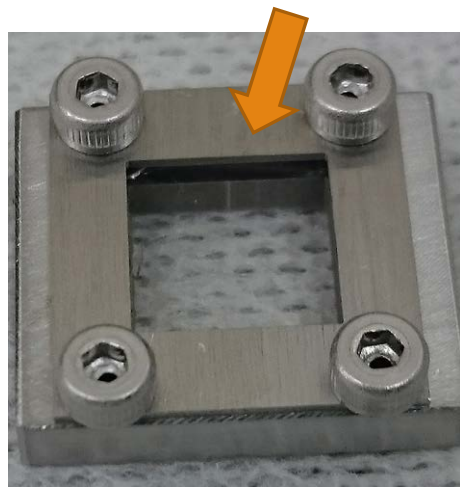


チェレンコフラジエーター

ラジエーターへの要求仕様

1. 低屈折率
2. 真空耐用性
3. 透明度が高い
4. 成形の自由 (穴あける)

→ *疎水性シリカエアロゲル



先行研究で使用したシリカエアロゲル
($n=1.05$, 厚さ1mm)

千葉大学：河合准教授、田端博士から提供

疎水性シリカエアロゲルの特性

屈折率→低屈折率に**実績有**

真空耐用性○

透明度○

成形性○



$n=1.03$, $d=17,25\text{mm}$ の
シリカエアロゲルを選択
チェレンコフ角: $\theta_c = 14.0^\circ$

* M. Tabata et al., Nucl. Instr. and Meth. A 668 (2012)

ラジエータ比較

	先行研究ラジエーター	本研究ラジエーター
穴	なし	Φ10mm (#1)
厚さ	1mm (#2)	25mm (#3)
屈折率	1.05	1.03 (#4)

(#1) ビームが直接ラジエータに当たらないように、大きめな径を確保する

(#2) 多重散乱等を防ぐため薄くした

(#3) 穴をあけたときの光量確保ために充分厚くする

(#4) よりチェレンコフ角を小さくするため、できる限り屈折率の低いものを選択

実験セットアップ

発生した光をミラーで跳ね上げ

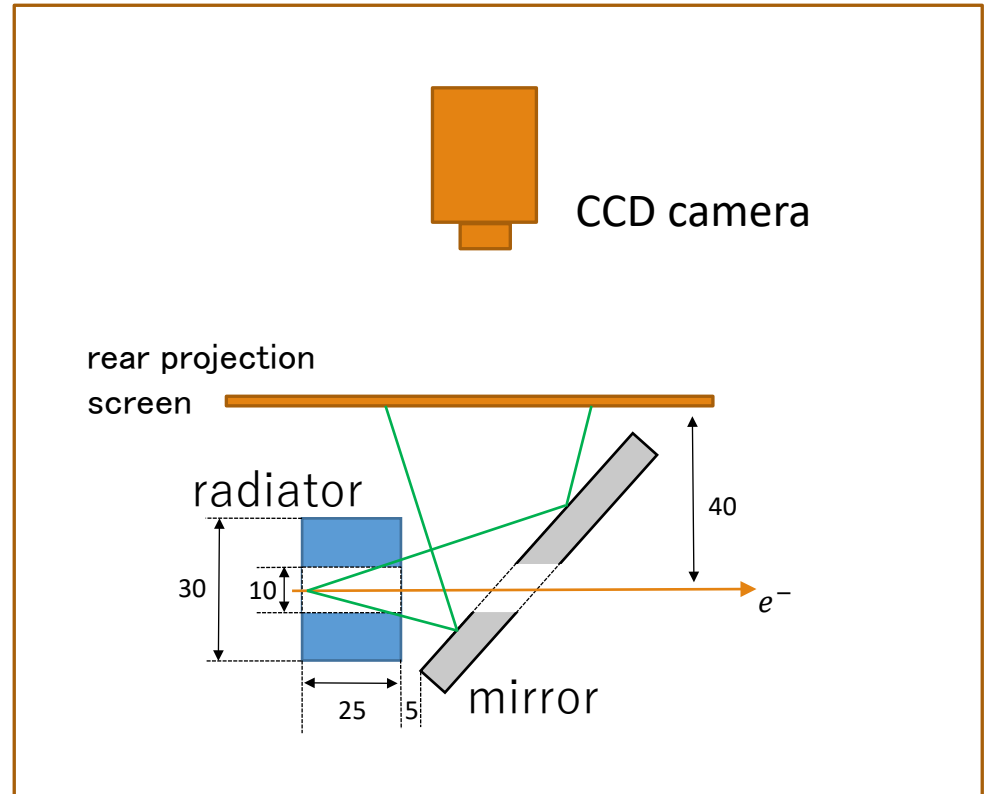


※リアプロジェクションスクリーンに投影



CCDカメラで計測

※リアスクリーンとはスクリーンの裏側からの光を透過して写った映像を、反対側から観測するスクリーン



ラジエータ上流部およびミラー下流部の二枚のプロファイルモニター
ラジエータ位置のスクリーンモニターにてビーム位置を決める

まとめと展望

- ・本研究では穴あきのラジエータから放出されるチェレンコフ光を用いた非破壊型のビームモニターの開発検討をおこなった。
- ・ラジエータ近傍を電子が通過した時に生じる電場の波面を数値的に計算し、チェレンコフ光が発生することを定性的に評価した。
- ・今後は、チェレンコフ光リングの輝度と位置の定量的な計算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を計測する。

バックアップ

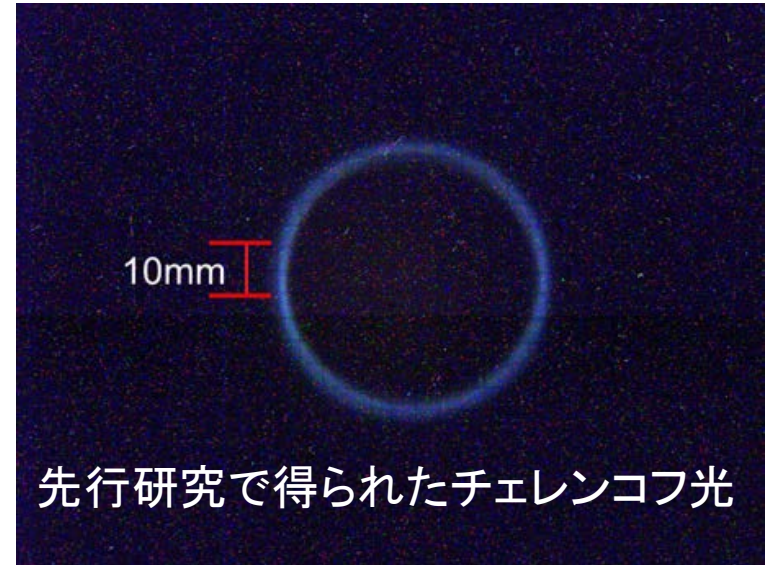
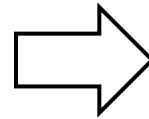
光量

直接誘電体に入射 (先行研究)

(Frank-Tamm formula) :

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

$$n=1.05 \quad z=1\text{mm}$$



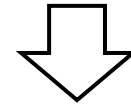
穴を通過させる (本研究)

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

$$n=1.03 \quad r=5\text{mm} \quad d=25\text{mm} \quad \theta_c=14^\circ$$

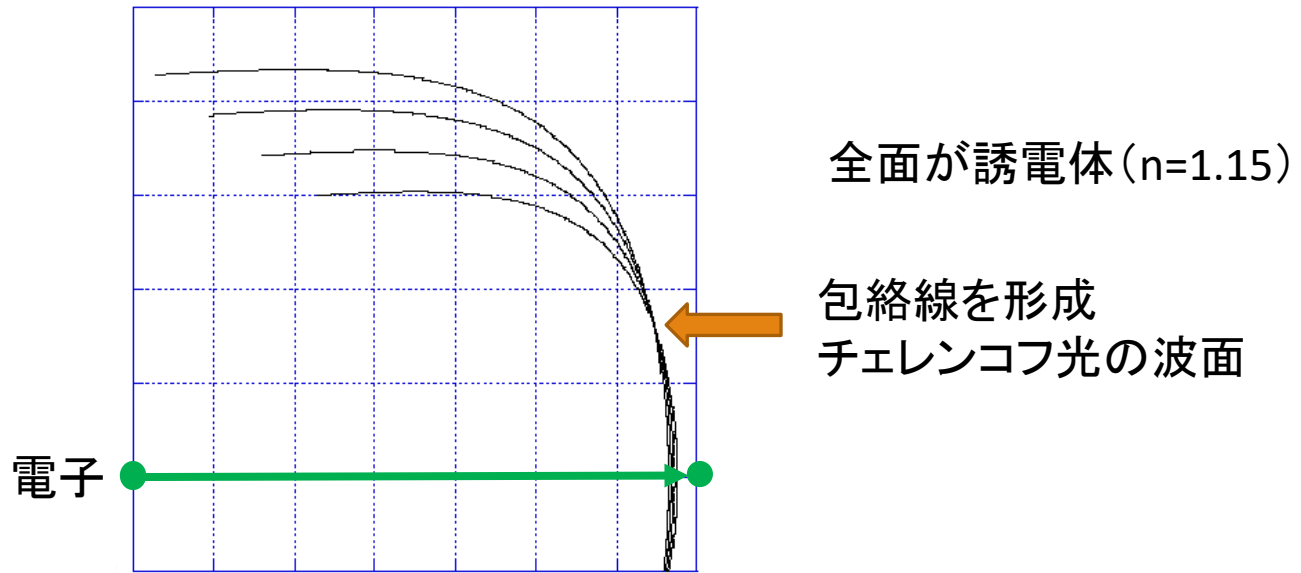
$$\left(z - \frac{r}{\tan\theta_c} \right) \approx 4.946$$

$$\frac{N}{N_{pre}} \approx 3.05$$



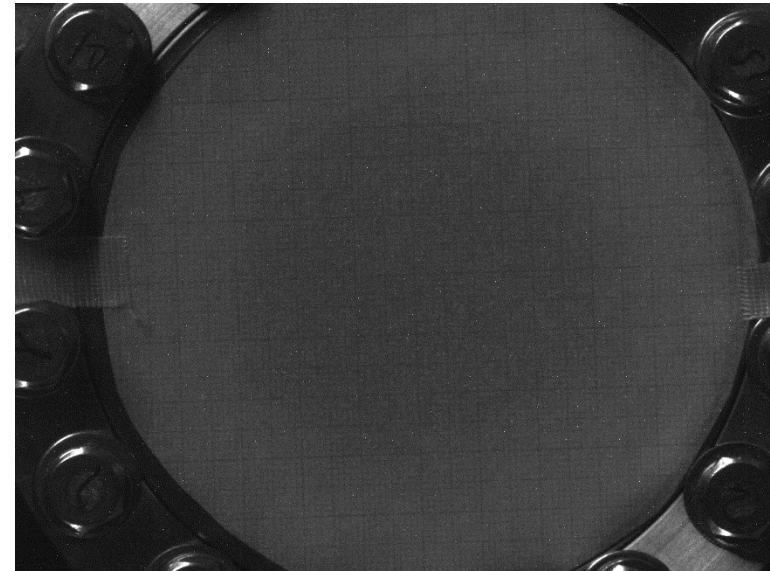
三倍の光量が期待できる

ラジエータに直接入射した際の ポテンシャル面

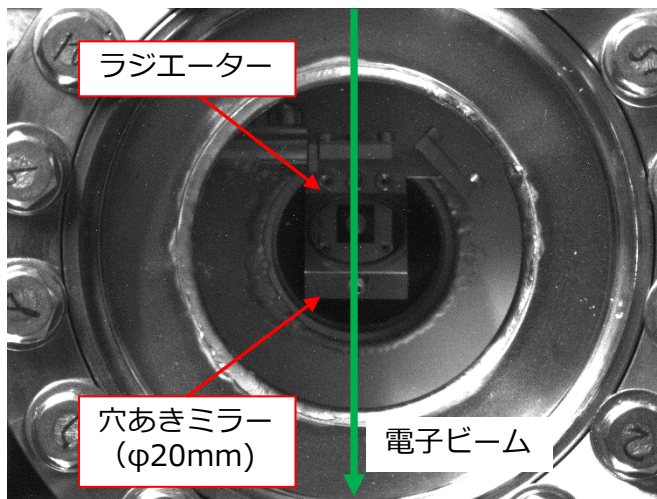
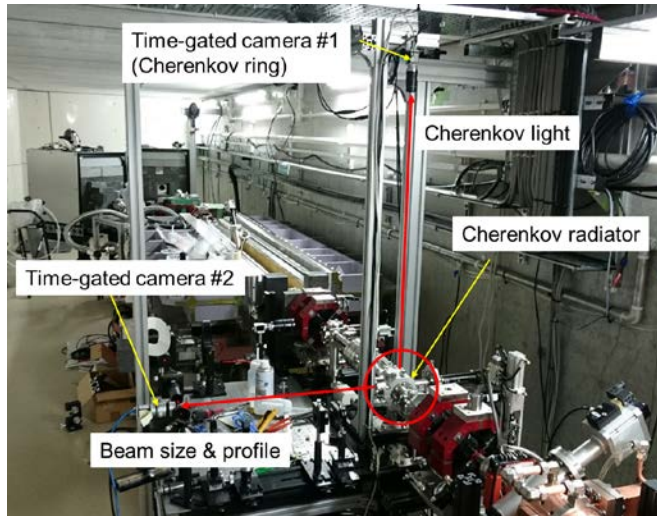


チェレンコフ光測定実験のセットアップ

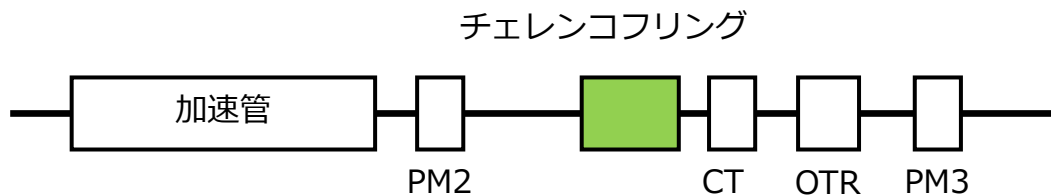
真空窓の大気側にトレーシングペーパーを設置



照明を落とし、チェレンコフリングを観測

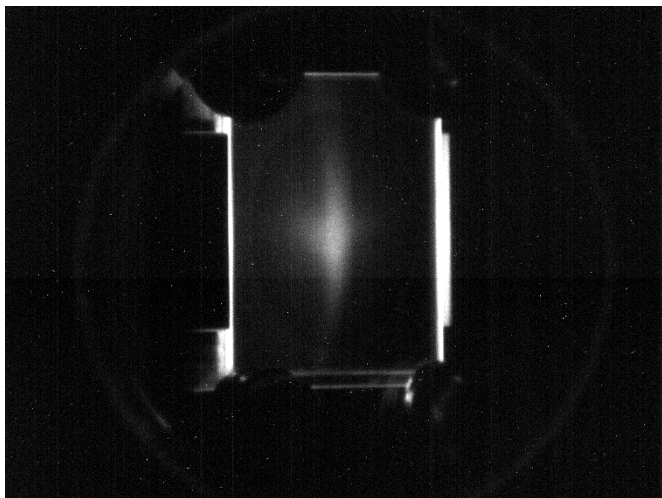


チェレンコフ光測定実験のセットアップ

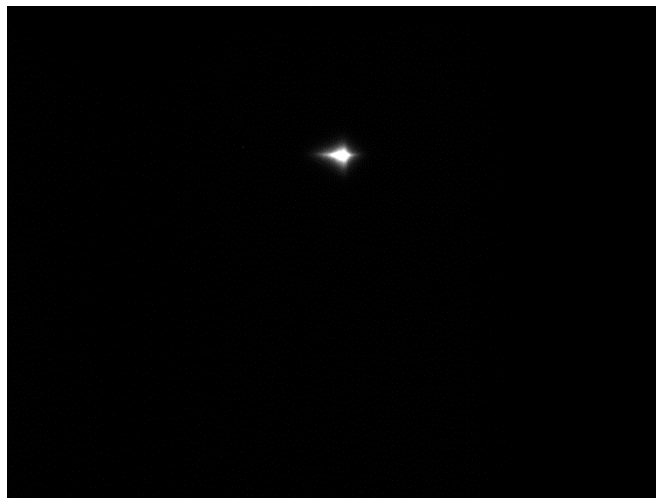


実験方法

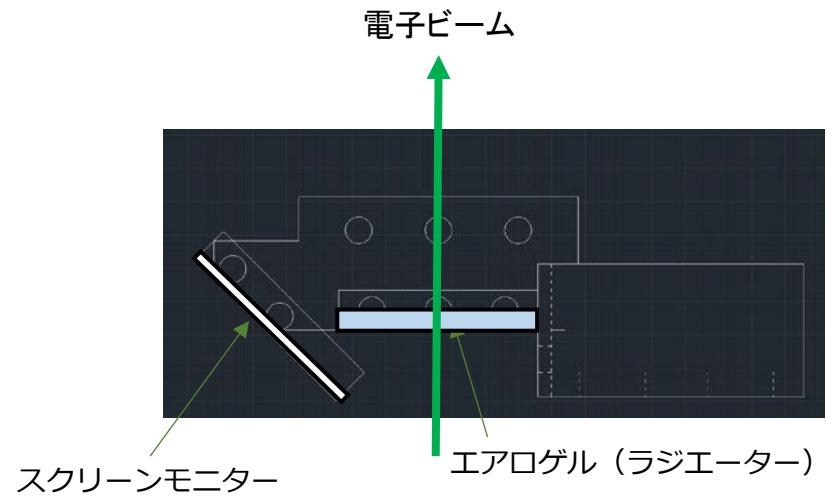
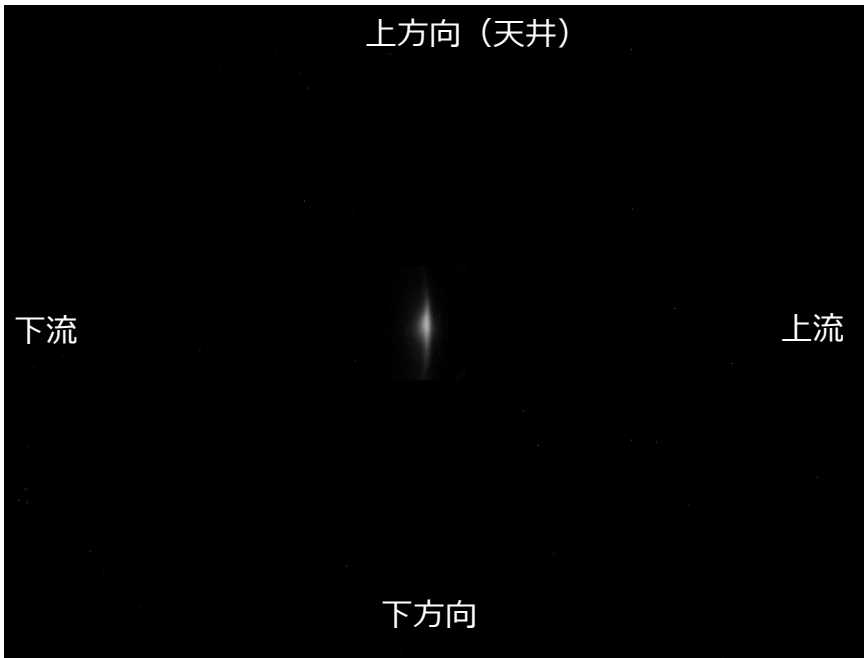
- ① チェレンコフリング真空槽の前後のプロファイルモニターでビームが中心に来るように調整
- ② チェレンコフラジエーターと一体となっているスクリーンモニターでビームが中心となるように位置決めを行う
- ③ チェレンコフ光を観測する



PM2でのプロファイル
ビームはスクリーンのほぼ中心

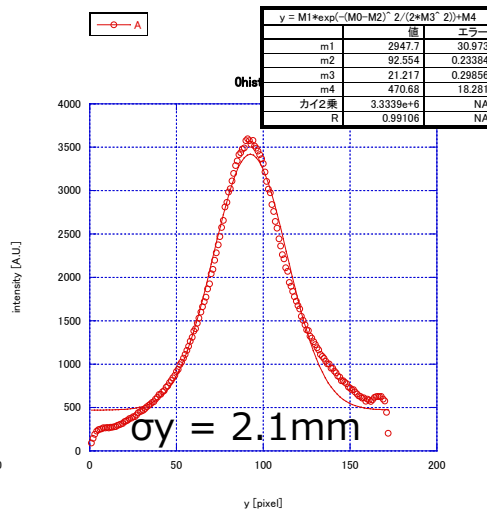
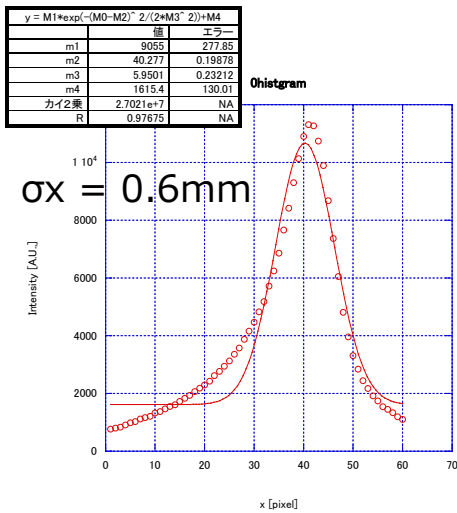


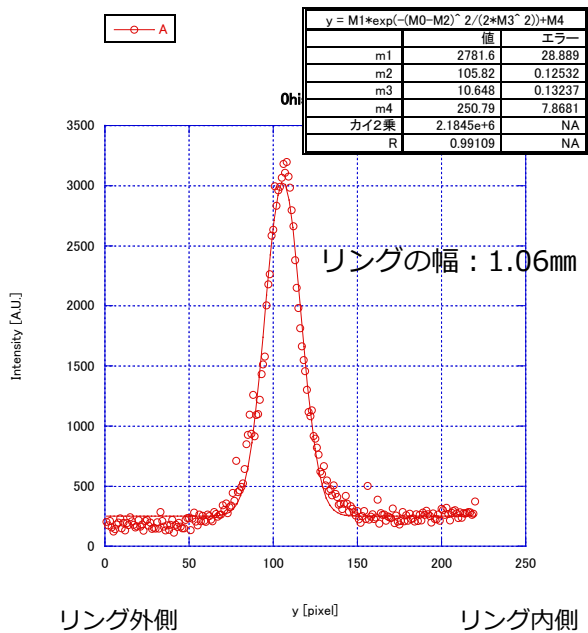
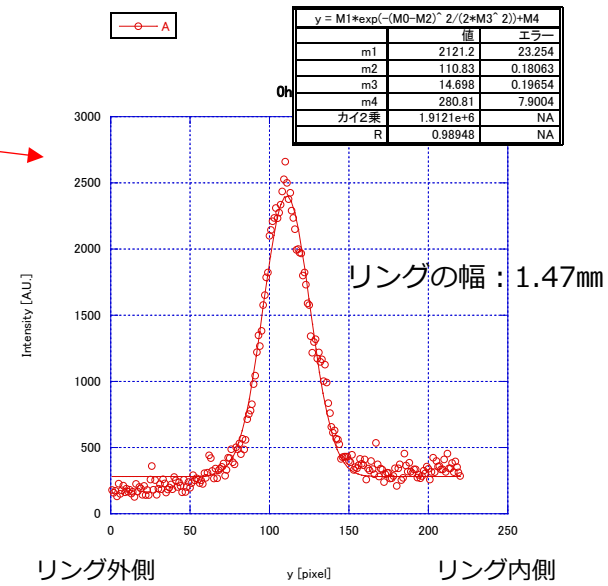
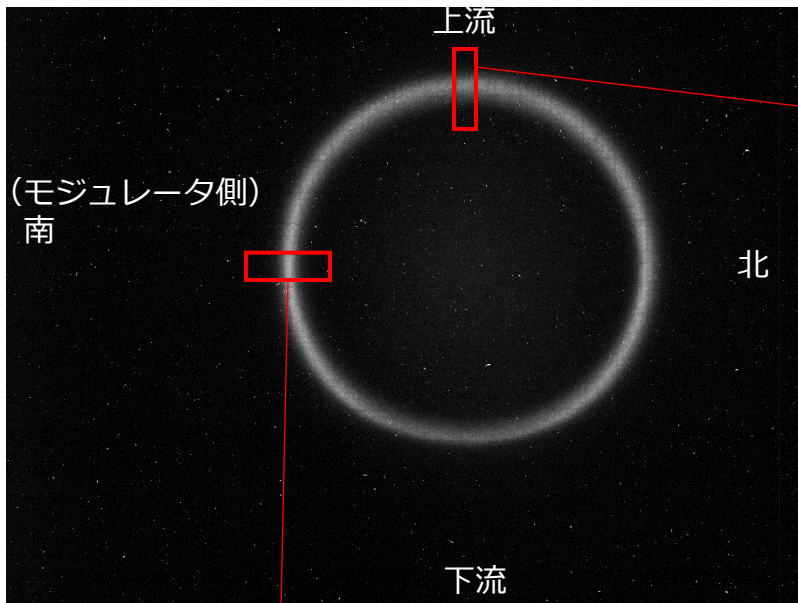
PM3でのプロファイル
ビームはスクリーンの中心から、おおよそ
水平方向に0.60mm、垂直方向に0.52mmずれている
(右下方向にずれている)



ラジエーター上でのビームプロファイル
 (ラジエーターと一体のスクリーンモニターで測定したもの)

ビームを丸くできなかったので、上記の状態でチェレンコフ光測定を行った。





- ・ラジエーター上でのビームが非対称なため、場所によりリングの幅が異なっていると思われる
- ・下流側のチェレンコフリングがわずかに欠損している