

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

#**齊藤 悠樹**, 柏木 茂, 鹿又 健, 齊藤 寛峻, 柴崎 義信, 高橋 健, 長澤 育郎,
南部 健一, 西森 信行*, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 武藤 俊哉, 濱 広幸

東北大学 電子光物理学研究センター

* 東北大学 多元物質科学研究所

第14回加速器学会年会
2017年8月1日~3日 北海道大学

1. はじめに
 - ・ 研究目的・概要
 - ・ バンチ長測定の実験
2. チェレンコフ光を用いたバンチ長測定法
 - ・ チェレンコフ光とは
 - ・ チェレンコフ光の時間広がり
 - ・ 実験要件
3. チェレンコフ光の光輸送
 - ・ 光輸送設計
 - ・ 光輸送テスト
4. バンドパスフィルターによる波長分散の抑制
5. まとめ

1. はじめに

- ・ 研究目的・概要
- ・ バンチ長測定の先行実験

2. チェレンコフ光を用いたバンチ長測定法

- ・ チェレンコフ光とは
- ・ チェレンコフ光の時間広がり
- ・ 実験要件

3. チェレンコフ光の光輸送

- ・ 光輸送設計
- ・ 光輸送テスト

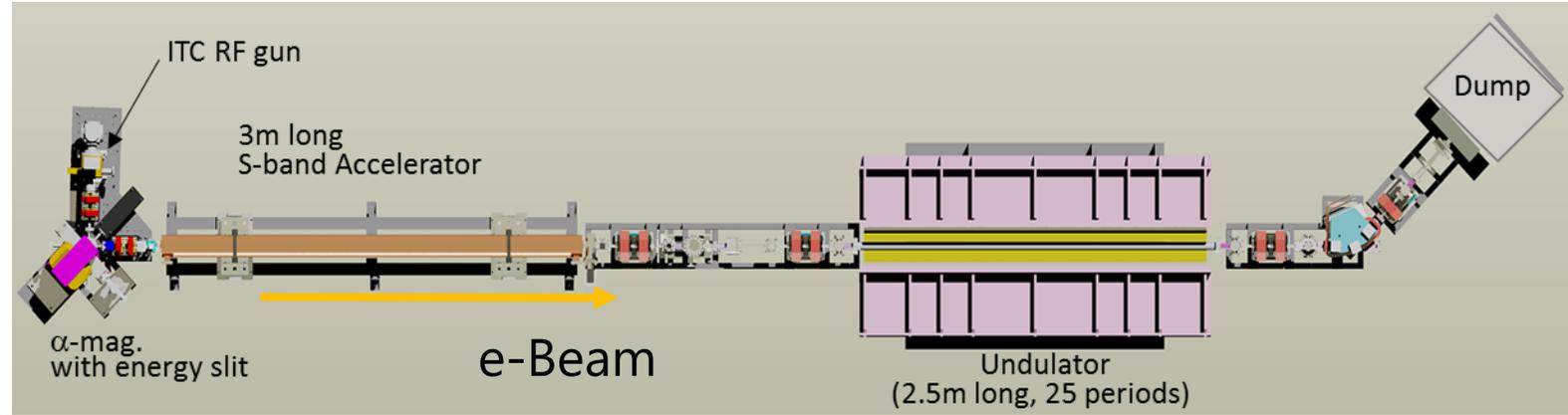
4. バンドパスフィルターによる波長分散の抑制

5. まとめ

研究目的・概要

研究目的

コヒーレントなTHz光源研究において重要な情報の生成・圧縮した電子バンチの長さを測定する必要がある。



t-ACTS (test Accelerator as Coherent THz Source)

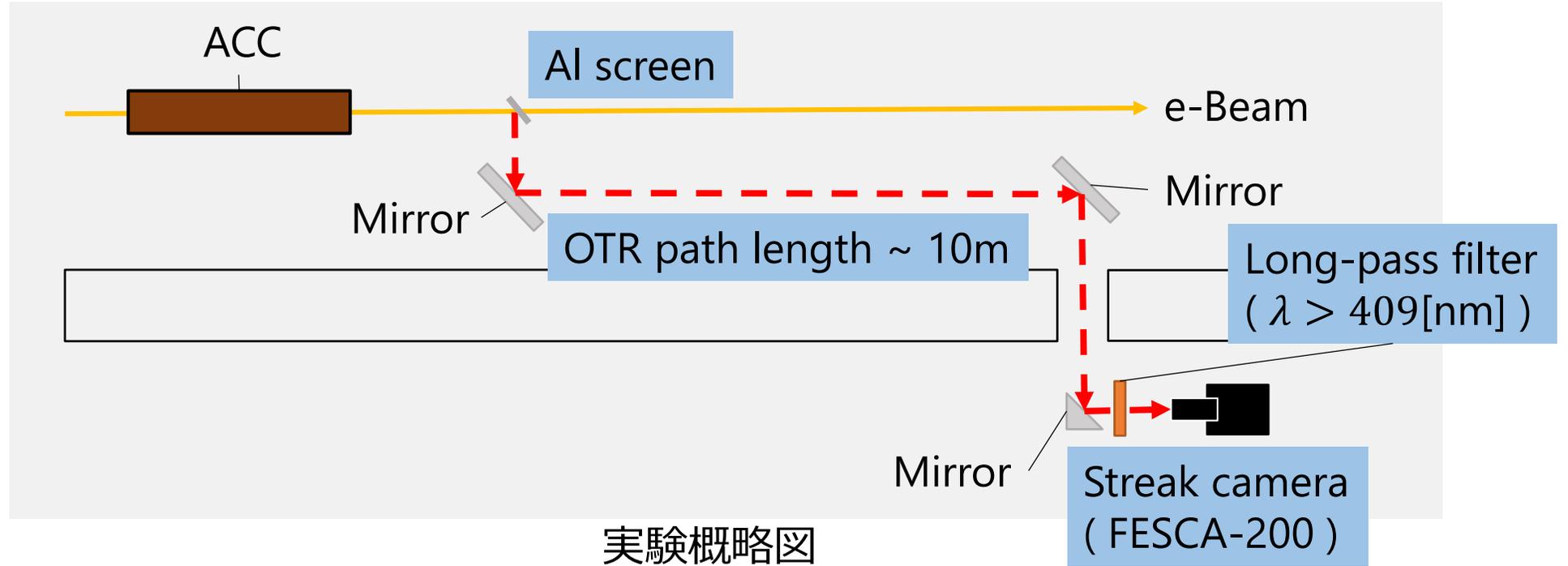
研究概要

チェレンコフ光を用いた極短電子バンチ長測定法

- 光輸送経路の設計およびテスト
- 光学系における時間広がり と検出光子数について
先行実験との比較評価

バンチ長測定の実験 OTR光

実験内容



問題点

OTR光の光量不足により

- 光路における波長分散を光学フィルターで抑えにくい
- ストリークカメラのスリット幅狭められない

時間分解能の低下

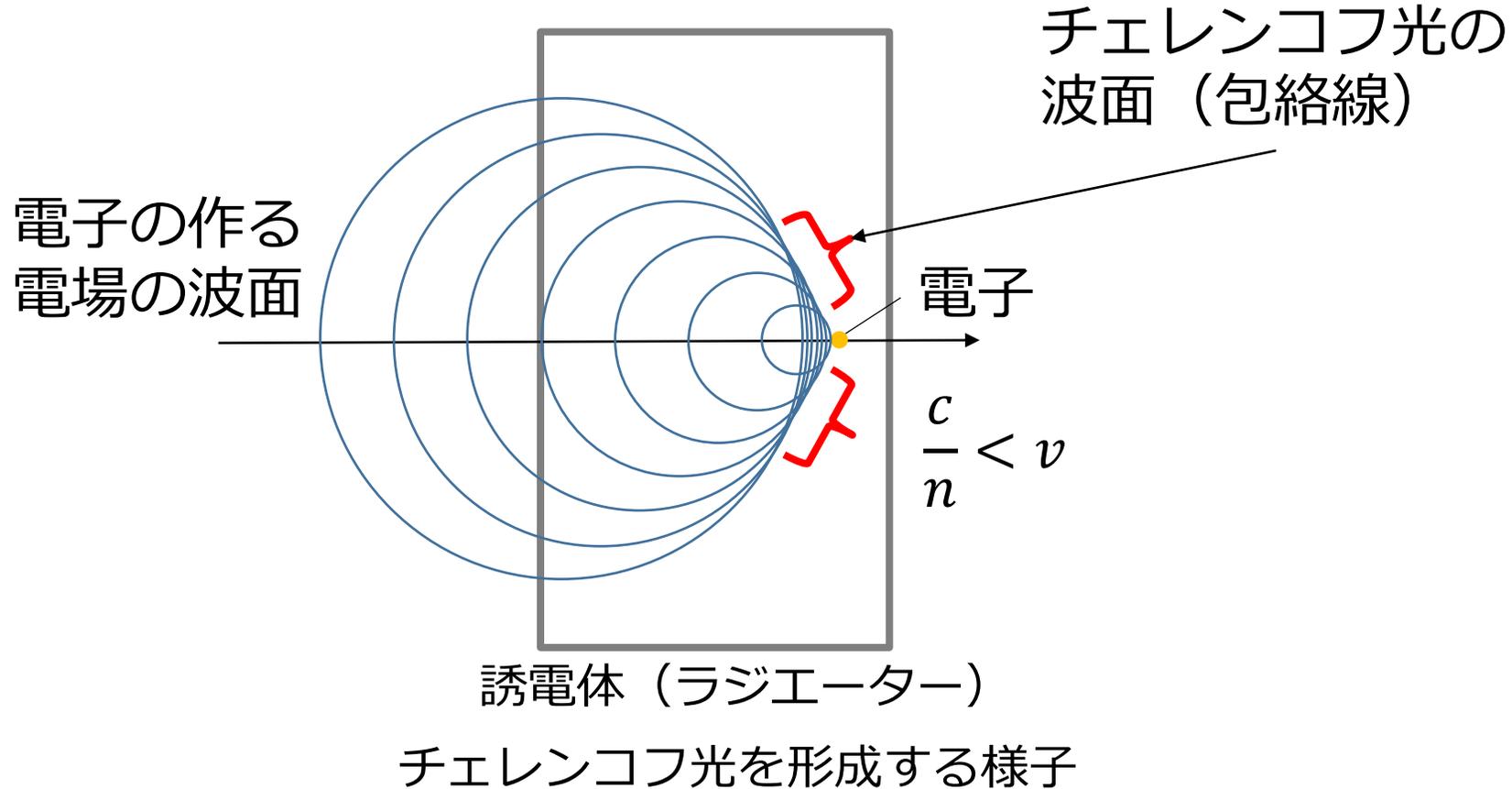
解決案

OTR光より光量の多いチェレンコフ光を利用できないか？

1. はじめに
 - ・ 研究目的・概要
 - ・ バンチ長測定の先行実験
2. チェレンコフ光を用いたバンチ長測定法
 - ・ チェレンコフ光とは
 - ・ チェレンコフ光の時間広がり
 - ・ 実験要件
3. チェレンコフ光の光輸送
 - ・ 光輸送設計
 - ・ 光輸送テスト
4. バンドパスフィルターによる波長分散の抑制
5. まとめ

チェレンコフ光とは

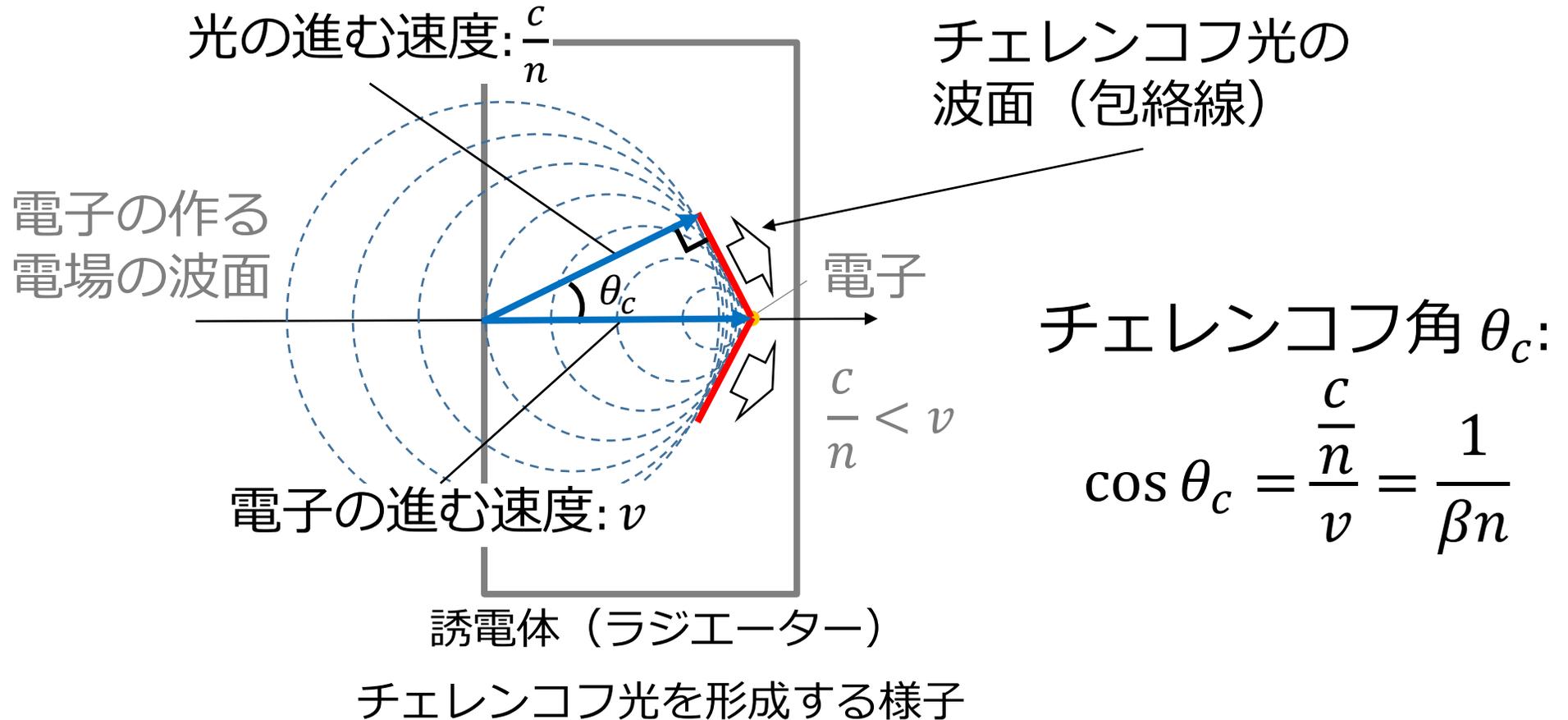
荷電粒子が屈折率 n の誘電体（ラジエーター）を通過するとき、
粒子の速度 v が誘電体内での光の位相速度 c/n を超えたときに発生する光*



*Jelley, J.V. "Čerenkov Radiation And Its Applications" 1958, pp.4-5

チェレンコフ光とは

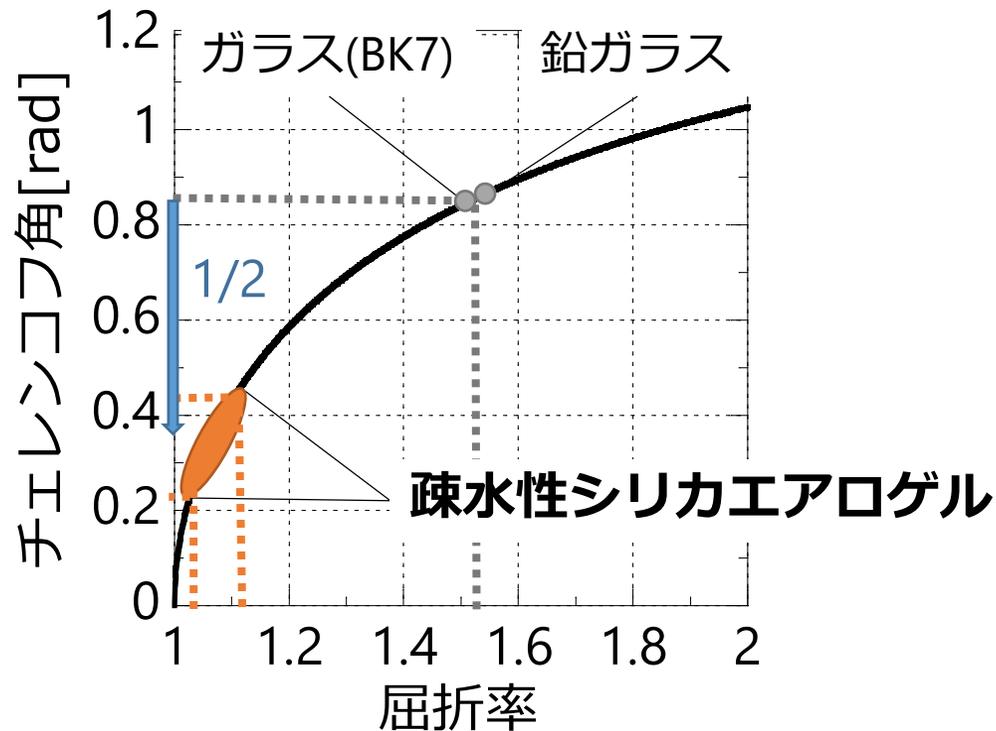
荷電粒子が屈折率 n の誘電体（ラジエーター）を通過するとき、
粒子の速度 v が誘電体内での光の位相速度 c/n を超えたときに発生する光*



*Jelley, J.V. "Čerenkov Radiation And Its Applications" 1958, pp.4-5

チェレンコフ放射エータ

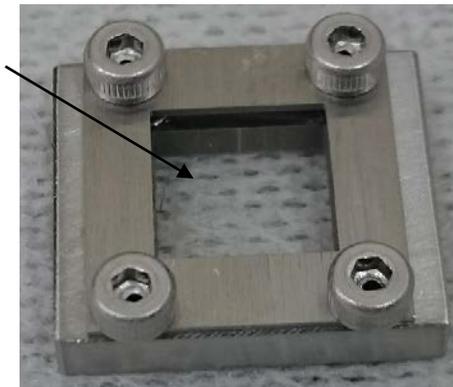
ビームライン上に設置できて電子バンチを直接入射できる
透明なラジエーターが必要



チェレンコフ角が大きいと
光輸送が困難

疎水性シリカエアロゲル
(千葉大学 河合准教授らによる)

屈折率: $n = 1.03 \sim 1.11$
厚さ:1mm~数cm



利用例

- Belle実験
- 宇宙塵の捕獲

屈折率1.05、厚さ1mm
のエアロゲルを仮定
→チェレンコフ角:0.310[rad](=17.6°)

発生光子数の比較計算

計算条件 (先行実験を仮定) :

$\lambda_1 = 409$ [nm]:ロングパスフィルターのカットオン波長

$\lambda_2 = 850$ [nm]:ストリークカメラの測定波長上限 (QE \approx 1%)

電子の速度	β	1
$E_e = 50$ MeV	γ	97.8
微細構造定数	α	1/137
ラジエータの屈折率	n	1.05
ラジエータの厚さ	z	1mm

OTR光

$$N_{OTR} = \frac{\alpha(\ln 4\gamma^2 - 1)}{\pi} \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (\text{Ginzburg-Frank formula})$$

$$N_{OTR} = 0.0163 \text{ [photons/electron]}$$

チェレンコフ光

$$N_{CR} = 2\pi\alpha z \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2}\right) \left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2}\right) \quad (\text{Frank-Tamm formula})$$

$$N_{CR} = 5.41 \text{ [photons/electron]}$$

$$\frac{N_{CR}}{N_{OTR}} \approx 300 \text{ 倍}$$

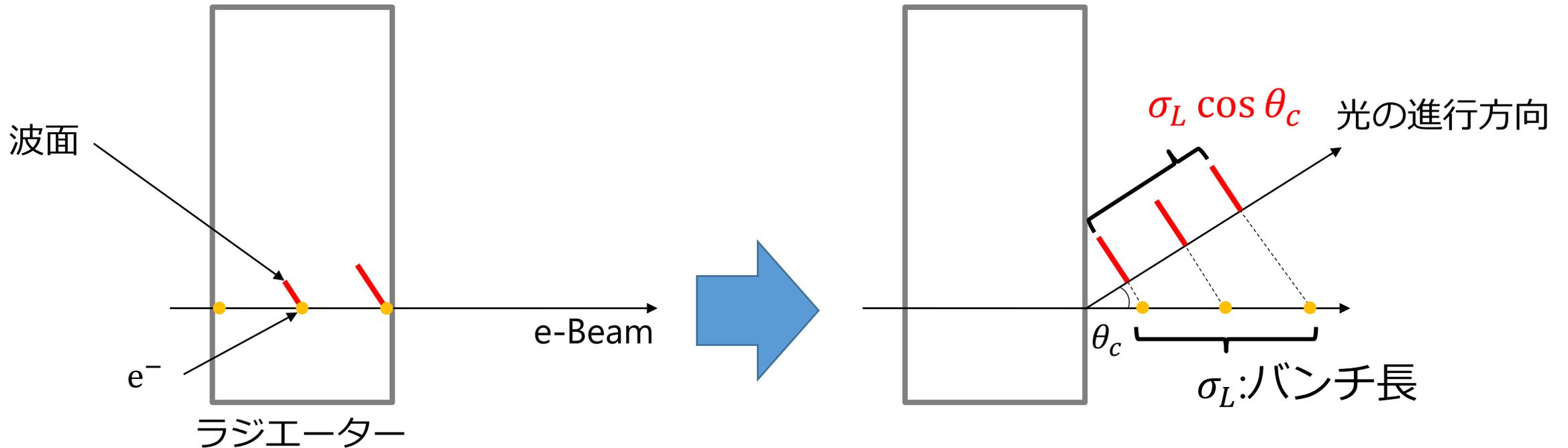


チェレンコフ光を用いれば
問題点であった**光量不足**を解決

チェレンコフ光の時間広がり

バンチ長・ビームサイズ（ガウシアン分布）を持った電子バンチをラジエーターに入射

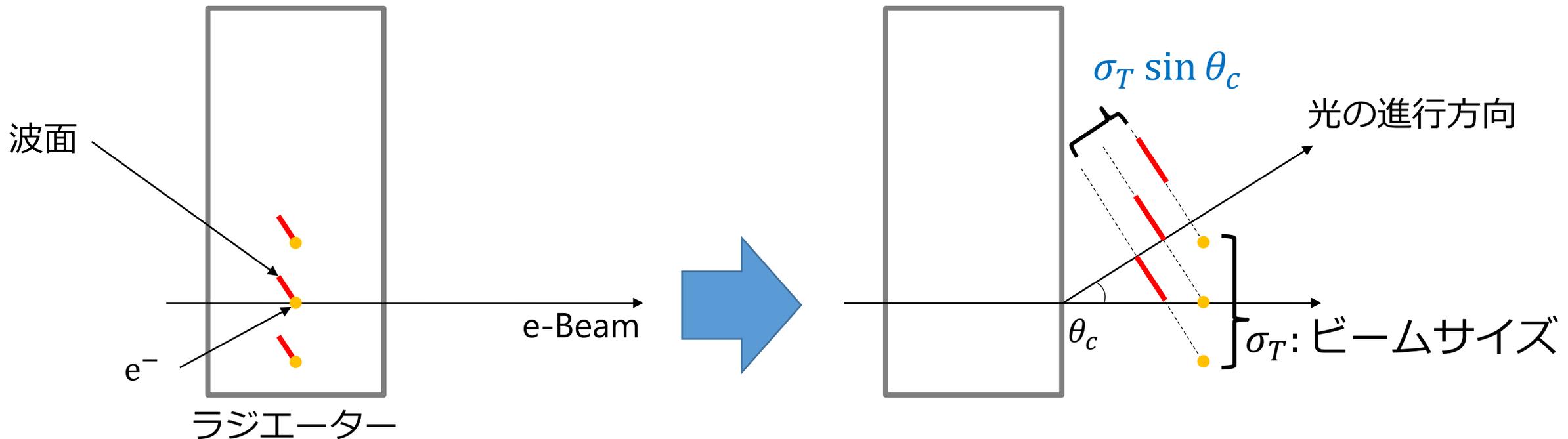
バンチ長が与える影響



チェレンコフ光の時間広がり

バンチ長・ビームサイズ（ガウシアン分布）を持った電子バンチをラジエーターに入射

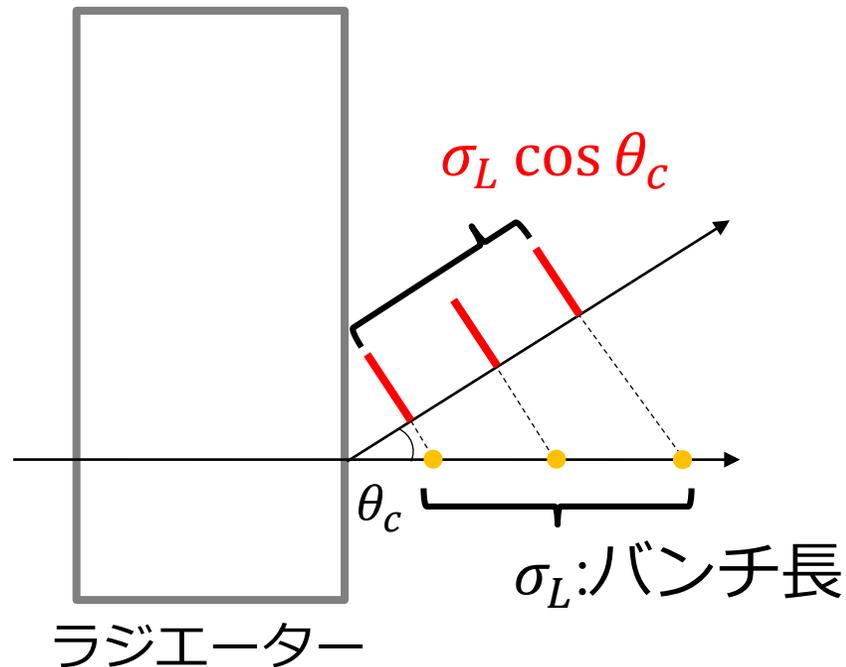
ビームサイズが与える影響



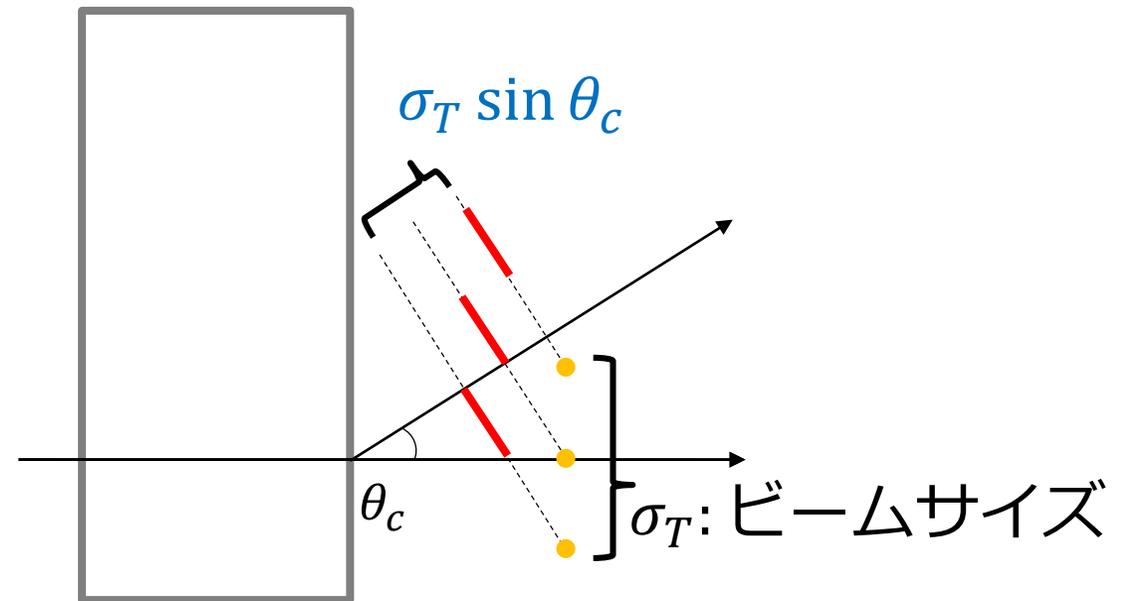
チェレンコフ光の時間広がり

バンチ長・ビームサイズ（ガウシアン分布）を持った電子バンチをラジエーターに入射

バンチ長が与える影響



ビームサイズが与える影響



チェレンコフ光の時間広がり: $\sigma_L' = \sqrt{(\sigma_L \cos \theta_c)^2 + (\sigma_T \sin \theta_c)^2}$

バンチ長 ビームサイズ

ビームサイズの影響の見積もり

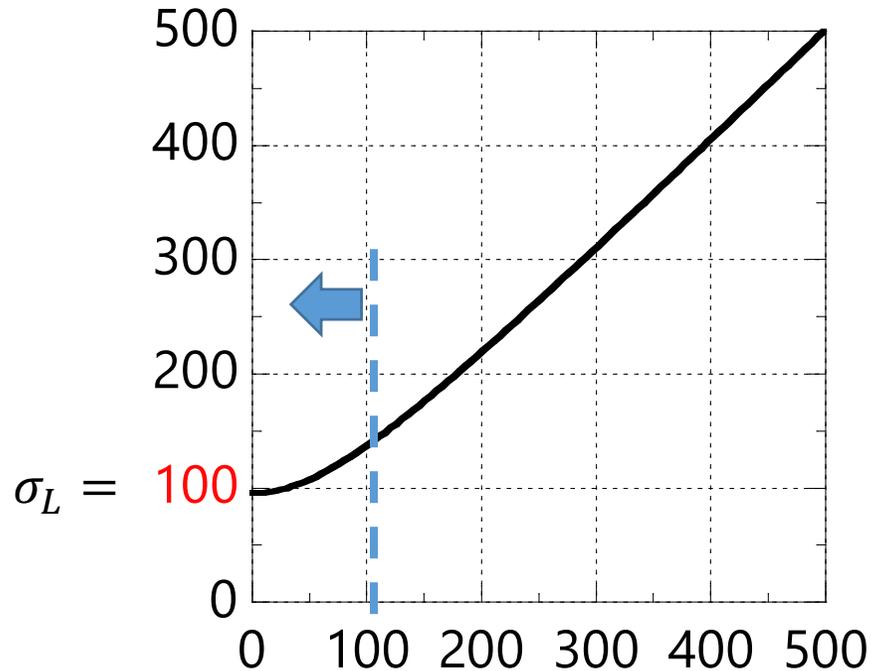
チェレンコフ光の時間広がり: $\sigma'_L = \sqrt{(\sigma_L \cos \theta_c)^2 + (\sigma_T \sin \theta_c)^2}$

観測量 バンチ長

ビームサイズ σ_T を小さくする

バンチ長: $\sigma_L = 100$ [fs] の測定時

σ'_L : チェレンコフ光の
時間広がり[fs]



σ_T : ビームサイズ [μm] $30[\mu\text{m}] = 100[\text{fm}]$

チェレンコフ光の時間広がり: σ'_L に対して
(バンチ長の影響: σ_L) > (ビームサイズの影響: σ_T)
にするためには、ビームサイズ σ_T を
100 [μm] 以下に絞らなければならない。
(バンチ長の**約3倍**)

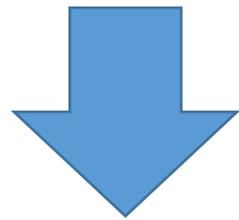
バンチ長測定の実験要件

実験内容

十分にビームサイズを絞った電子バンチを用いて、チェレンコフ光の時間広がりをストックカメラで計測することでバンチ長測定を行う。

実験要件

- チェレンコフ角 17.6° のチェレンコフ光を**約10m光輸送**
- チェレンコフ光の光量を活かすために光をそのまま輸送したい

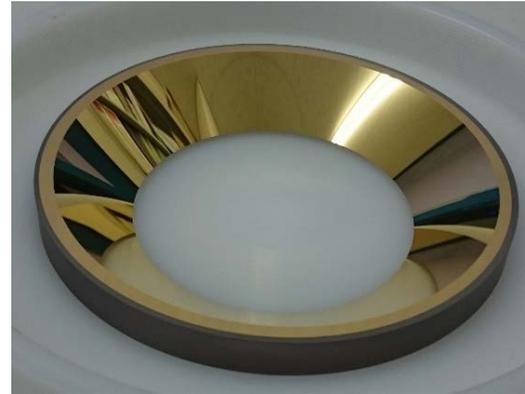
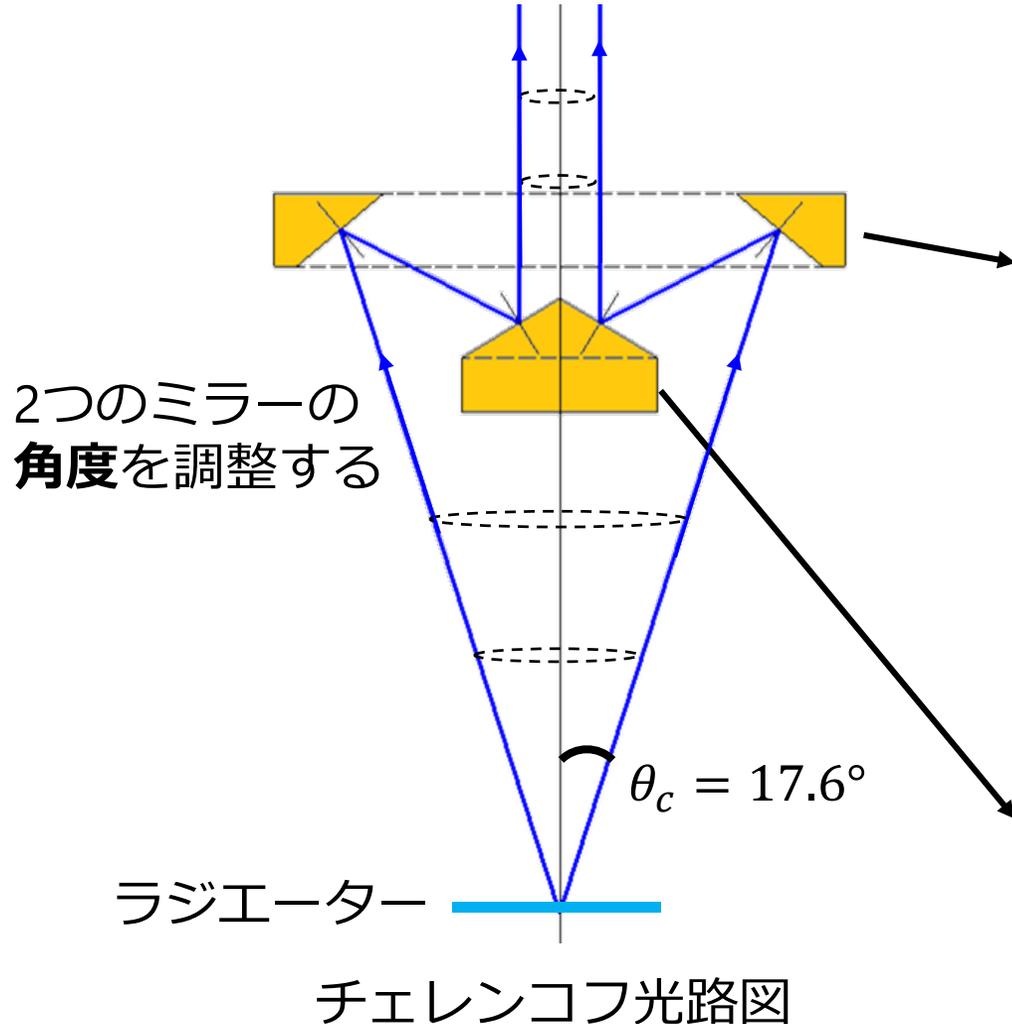


波長分散を抑えるために、**バンドパスフィルター**で波長域を強く制限しても前実験以上に検出光量が確保できないか？

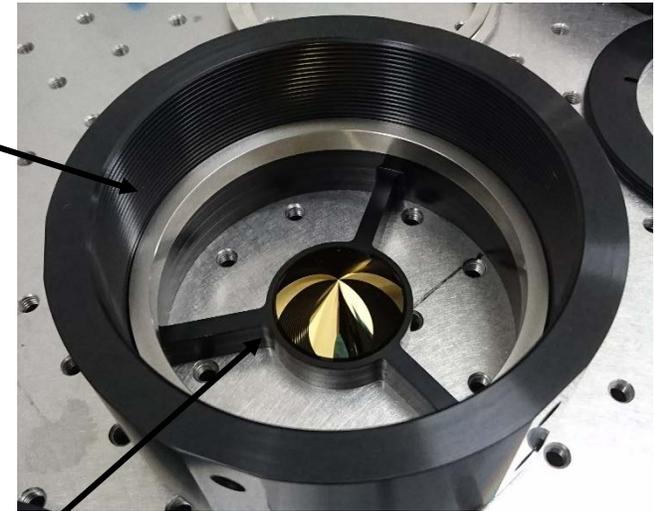
1. はじめに
 - ・ 研究目的・概要
 - ・ バンチ長測定の実験
2. チェレンコフ光を用いたバンチ長測定法
 - ・ チェレンコフ光とは
 - ・ チェレンコフ光の時間広がり
 - ・ 実験要件
3. チェレンコフ光の光輸送
 - ・ 光輸送設計
 - ・ 光輸送テスト
4. バンドパスフィルターによる波長分散の抑制
5. まとめ

光輸送のためのミラー設計

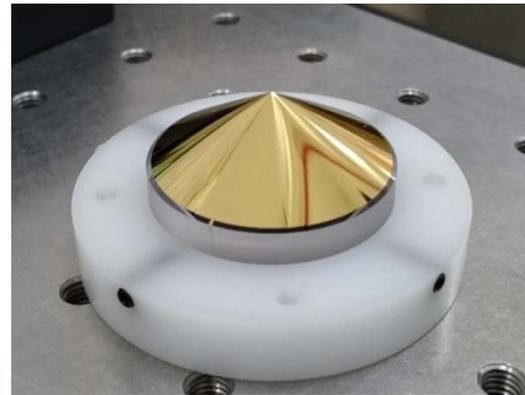
チェレンコフ角 $\theta_c = 17.6^\circ$ のチェレンコフ光を平行光に変換するため専用のミラーおよびミラーホルダーを独自に製作した。



逆アキシコンミラー



ミラーホルダー

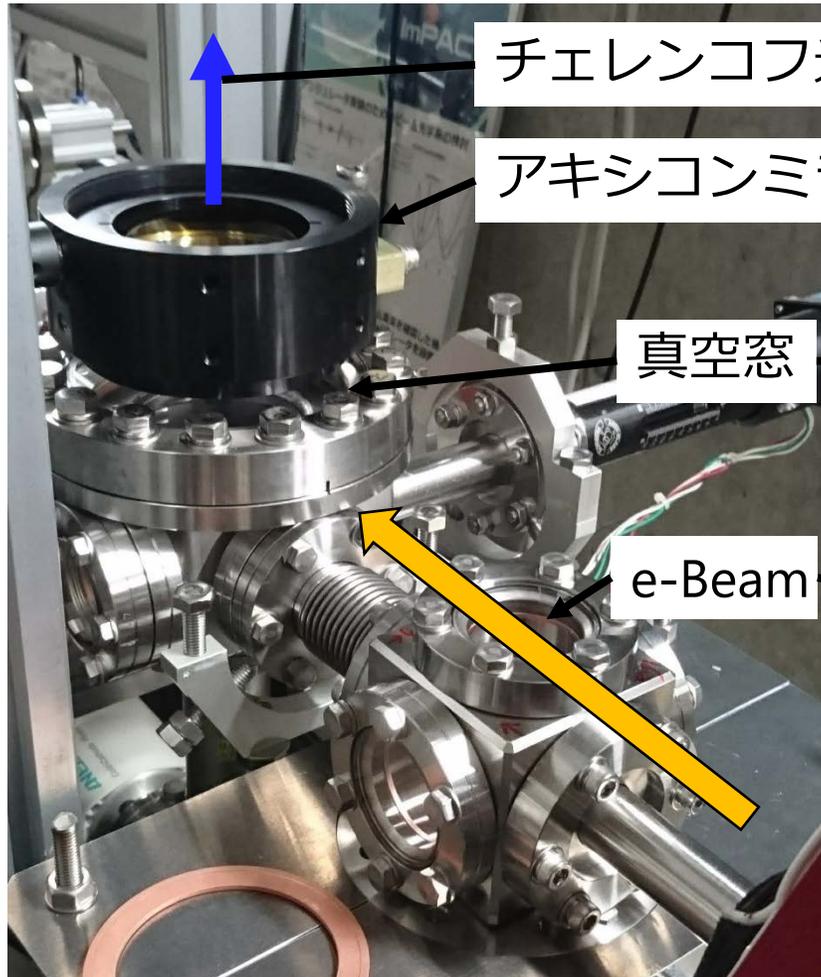


アキシコンミラー

チェレンコフ光の光輸送テスト

ミラーホルダーの影

設計通りに光輸送できるかテスト



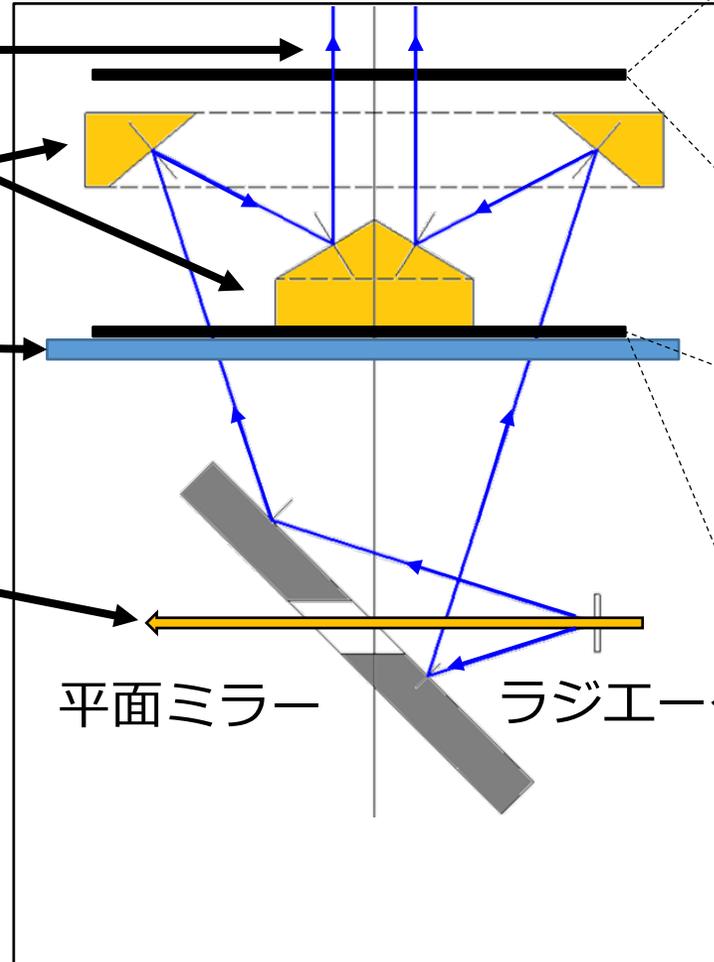
実験セットアップ

チェレンコフ光

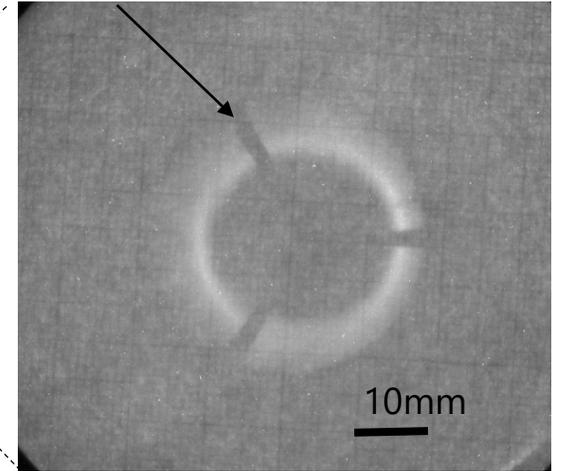
アキシコンミラー

真空窓

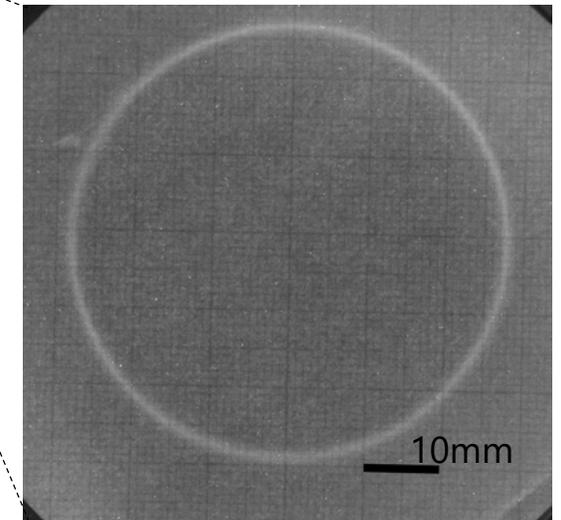
e-Beam



光路図



通過後



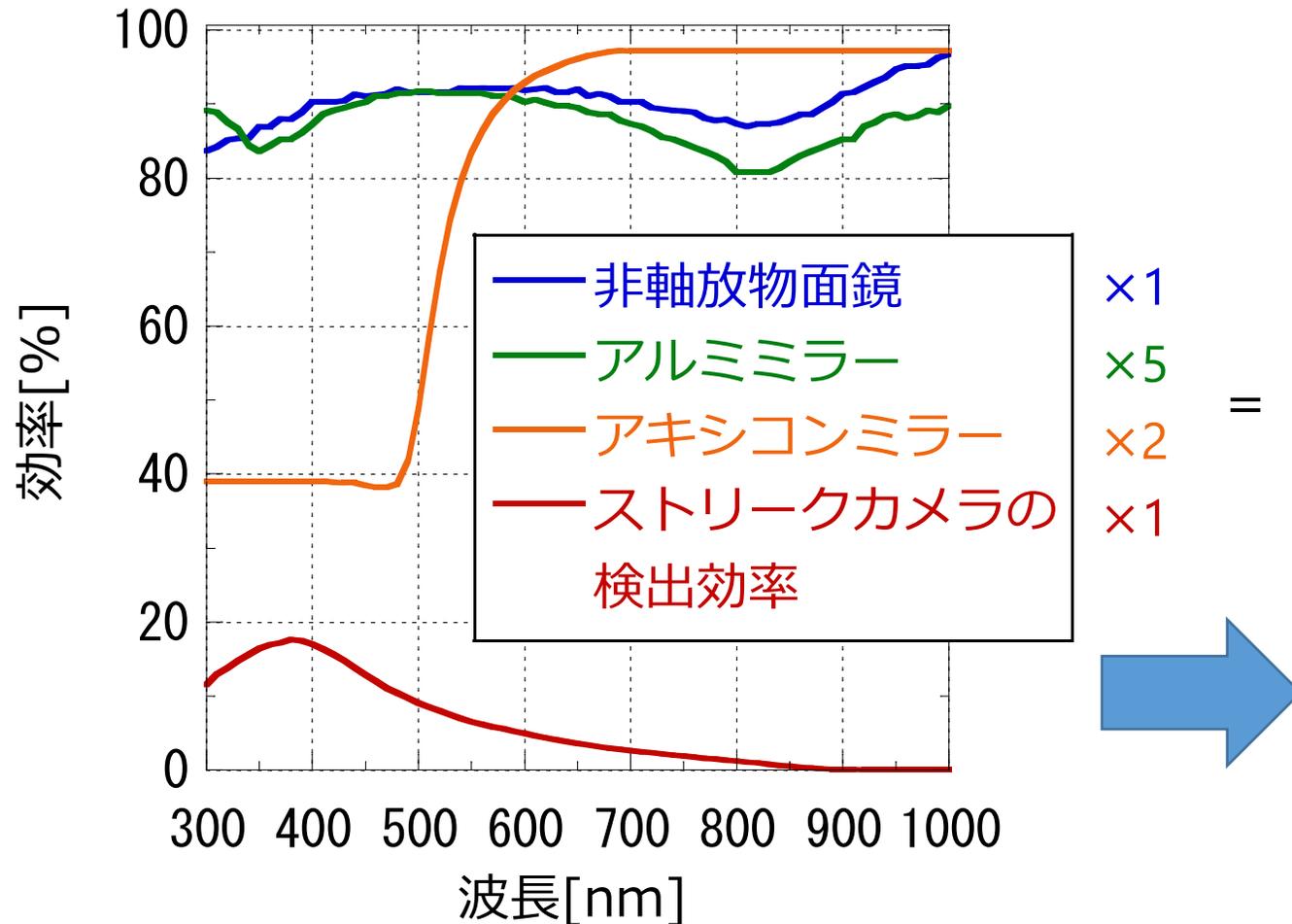
通過前

1. はじめに
 - ・ 研究目的・概要
 - ・ バンチ長測定の先行実験
2. チェレンコフ光を用いたバンチ長測定法
 - ・ チェレンコフ光とは
 - ・ チェレンコフ光の時間広がり
 - ・ 実験要件
3. チェレンコフ光の光輸送
 - ・ 光輸送設計
 - ・ 光輸送テスト
4. バンドパスフィルターによる波長分散の抑制
5. まとめ

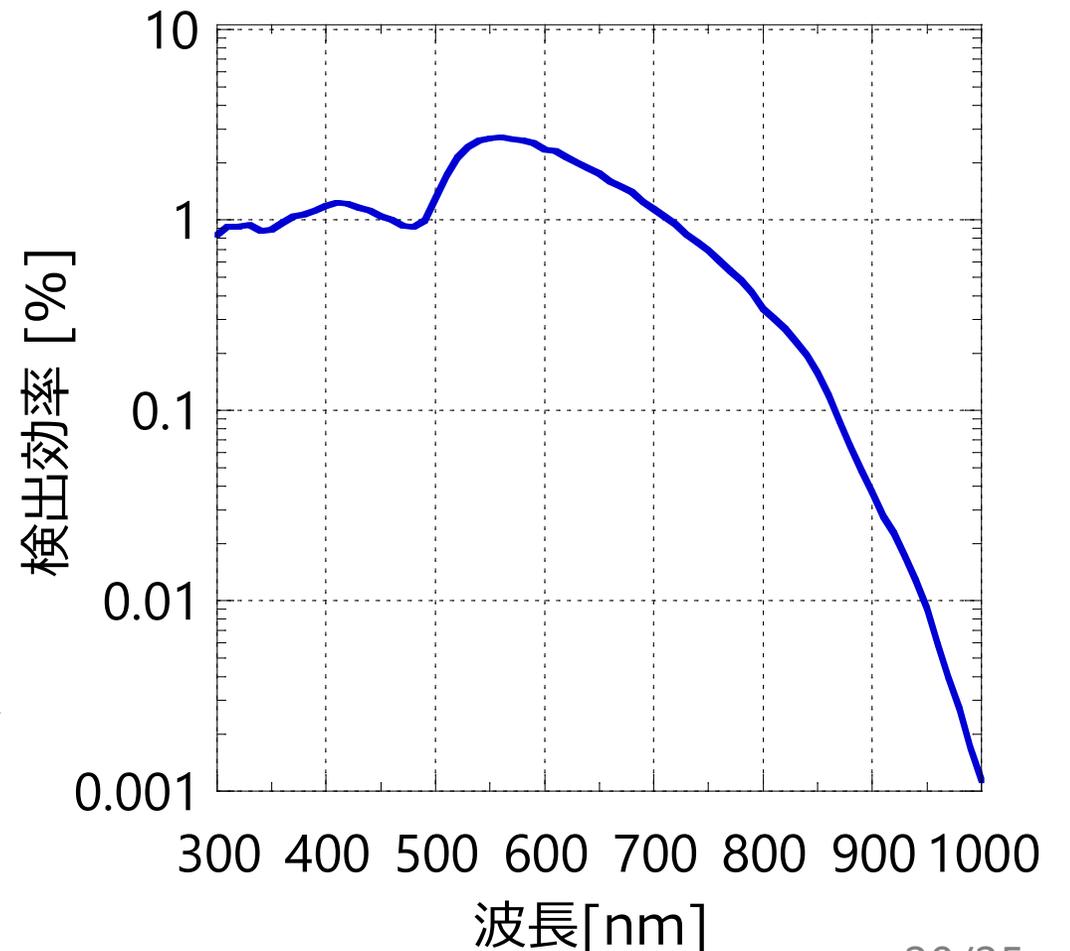
検出効率の見積もり

チェレンコフ光をすべて輸送できた場合の検出光子数を見積もるための情報

反射率・検出効率



測定系における検出効率

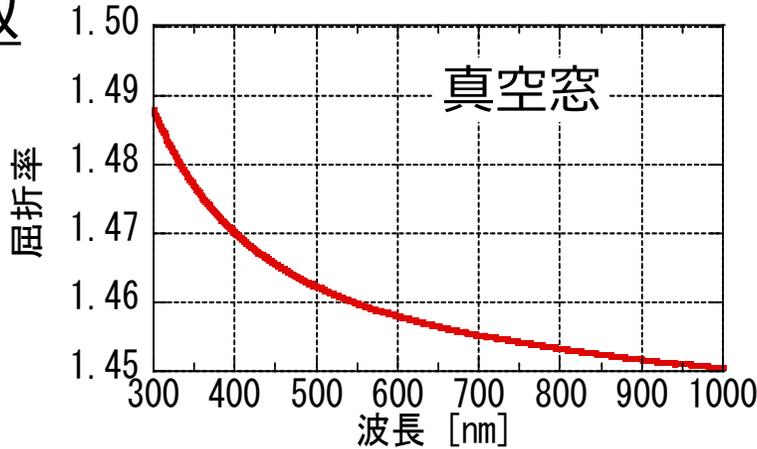


波長分散による時間広がりを見積もり

空気10m+真空窓7mmにおける波長分散を考える。

波長分散

$$c' = \frac{c}{n(\lambda)}$$



不確定性関係

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq \frac{\hbar}{2} \text{ (Gaussian)}$$

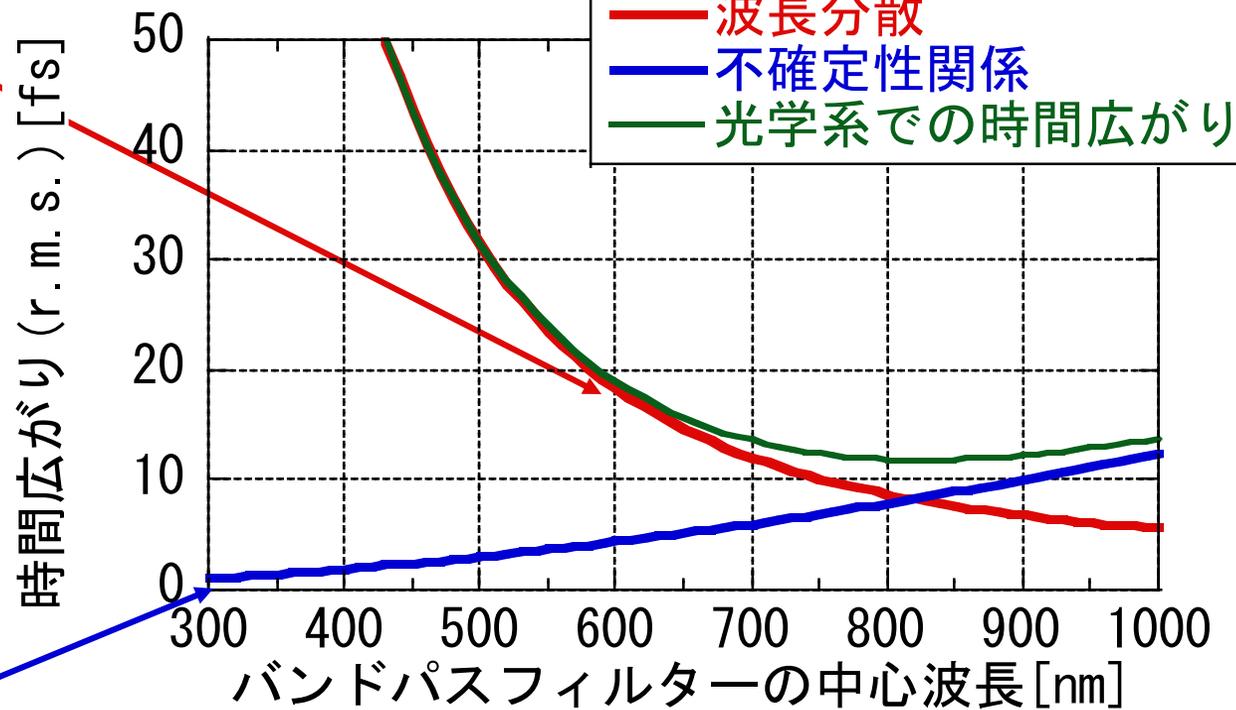
制限

$$\Delta \lambda_{FWHM} = 50 \text{ [nm]}$$

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

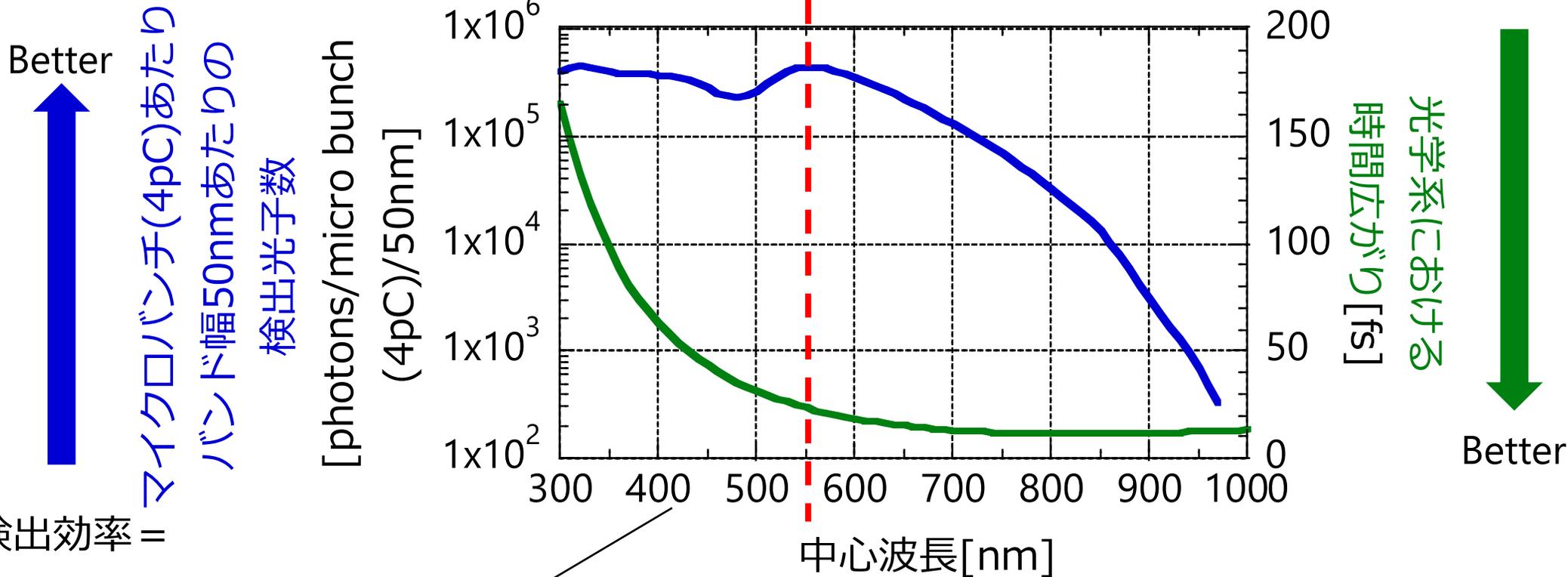
バンド幅50nm(FWHM)のバンドパスフィルターを用いたときの時間広がり

+(空気)



検出光子数と時間広がり

先行実験より光量を確保しつつ、時間広がり向上させる



検出光子数が多く、光学系での時間広がりが小さい波長域の中心波長550nmのバンドパスフィルターを選択

OTR実験とチェレンコフ実験との比較

先行実験より検出光子数と時間広がりを改善できているか比較評価

	先行実験		New
	OTR光		チェレンコフ光
観測波長域	409[nm] ~850[nm]		525 [nm] ~575[nm]
検出光子数 [個/micro bunch(4pC)]	3.0×10^4	14倍	4.3×10^5
光学系における 時間広がり	130 [fs]	1/5	24 [fs]

1. はじめに
 - ・ 研究目的・概要
 - ・ バンチ長測定の実験
2. チェレンコフ光を用いたバンチ長測定法
 - ・ チェレンコフ光とは
 - ・ チェレンコフ光の時間広がり
 - ・ 実験要件
3. チェレンコフ光の光輸送
 - ・ 光輸送設計
 - ・ 光輸送テスト
4. バンドパスフィルターによる波長分散の抑制
5. まとめ

まとめ

- バンチ長の3倍以下にビームサイズを絞った電子バンチであれば、チェレンコフ光の時間広がりを見測することによりバンチ長測定が可能であると考えられる。
- 独自に製作したアキシコンミラー2枚をセットで用いて、チェレンコフ角 17.6° のチェレンコフ光を輸送に適した光に変換する試験を行っている。
- OTR光の代わりにチェレンコフ光でバンチ長計測を行った場合、検出光子数は14倍多く、光学系における時間分解能は1/5に改善できると計算される。

今後の予定

チェレンコフ光をストリークカメラまで輸送して、測定系全体の時間分解能を求めることでOTR光のバンチ長測定法と比較を行う。