

狭帯域チェレンコフ回折放射の研究

熊谷航平(M2)、南部 健一、武藤 俊哉、柏木 茂、鹿又 健、Anjali B. Kavar、
工藤滉大、柴田 晃太郎、高橋 健、長澤 育郎、日出 富士雄、山田 悠樹、濱 広幸

東北大学電子光物理学研究センター・加速器ビーム物理研究部

目次

- 研究背景・目的
- 狭帯域チェレンコフ回折放射について
 - チェレンコフ放射
 - チェレンコフ回折放射
 - 狭帯域チェレンコフ回折放射
- t-ACTSにおける実証実験
 - 試験加速器(t-ACTS)
 - コヒーレントチェレンコフ回折放射の利用
 - HDPEラジエータ
 - セットアップ
 - 実験結果
- まとめと今後の予定

目次

- 研究背景・目的
- 狭帯域チェレンコフ回折放射について
 - チェレンコフ放射
 - チェレンコフ回折放射
 - 狭帯域チェレンコフ回折放射
- t-ACTSにおける実証実験
 - 試験加速器(t-ACTS)
 - コヒーレントチェレンコフ回折放射の利用
 - HDPEラジエータ
 - セットアップ
 - 実験結果
- まとめと今後の予定

研究背景・目的

- ・ t-ACTS(test-Accelerator as Coherent Terahertz Source)

さまざまなTHz放射の研究を行っている

アンジュレータ放射, チェレンコフ回折放射, スミス=パーセル放射

コヒーレントアンジュレータの研究

非破壊ビーム位置モニターの研究

バンチ長モニターの研究

- ・ 狭帯域のTHz光源は種類が少ない

ex アンジュレータ

- ・ スミス=パーセル放射とチェレンコフ回折放射から着想

周期構造を持つラジエータからチェレンコフ回折放射(ChDR)を

発生させることで、広帯域であるChDRを狭帯域化が可能ではないか?

- ・ もし狭帯域化が可能ならばTHz光源としてさまざまな研究に役立つ可能性あり

目的

周期構造を持つラジエータを使用し

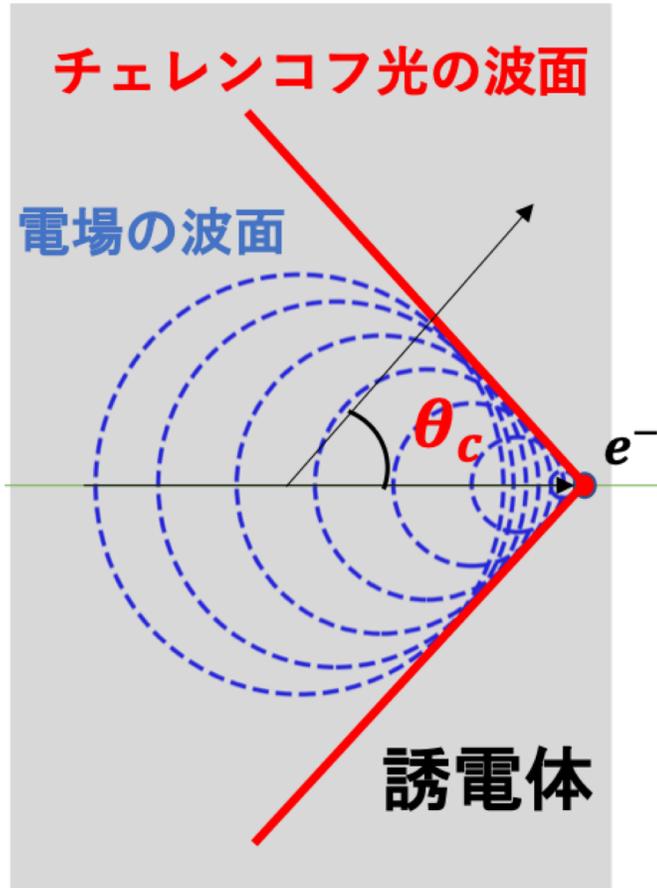
狭帯域チェレンコフ回折放射の**初観測**を目指す！！

目次

- 研究背景・目的
- 狭帯域チェレンコフ回折放射について
 - チェレンコフ放射
 - チェレンコフ回折放射
 - 狭帯域チェレンコフ回折放射
- t-ACTSにおける実証実験
 - 試験加速器(t-ACTS)
 - コヒーレントチェレンコフ回折放射の利用
 - HDPEラジエータ
 - セットアップ
 - 実験結果
- まとめと今後の予定

チェレンコフ放射(ChR)

誘電体内での光の速度 $\frac{c}{n} < \text{電子の速度 } v$ の条件下において
電場の波面が包絡線を形成し光が発生



$$\text{チェレンコフ角: } \theta_c \quad \cos \theta_c = \frac{1}{\beta n} \quad \beta n > 1$$

c : 真空での光速
 n : 誘電体の屈折率
 v : 電子の速度
 $\beta = \frac{v}{c}$: 電子の相対速度

チェレンコフ放射は**広帯域**

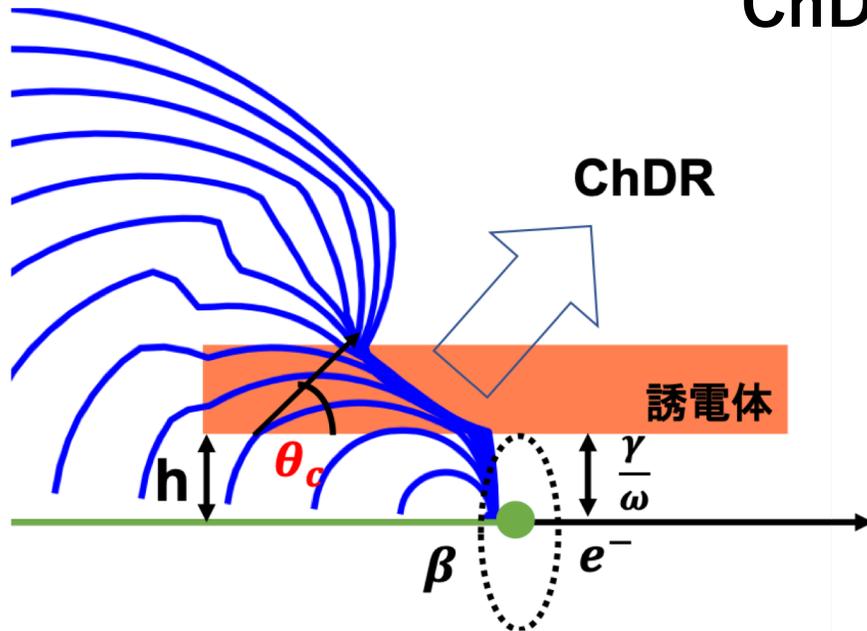
ChRの放射強度

$$\left. \frac{d^2 W}{d\omega d\Omega} \right|_{ChR} \propto \frac{1}{\lambda}$$

チェレンコフ回折放射(ChDR)

誘電体近傍に荷電粒子が通過する際に発生する放射
ビームロスがない(非破壊)

ChDRの放射強度はカップリングファクターKにより減衰



$$K = \exp\left(-2 \frac{h\omega}{\beta\gamma c}\right)$$

$\frac{\gamma}{\omega}$: 横方向フーリエ成分

ビームが誘電体近傍を通過する時の電場

h : インパクトパラメータ

ビームと誘電体の距離

ChDRの放射強度

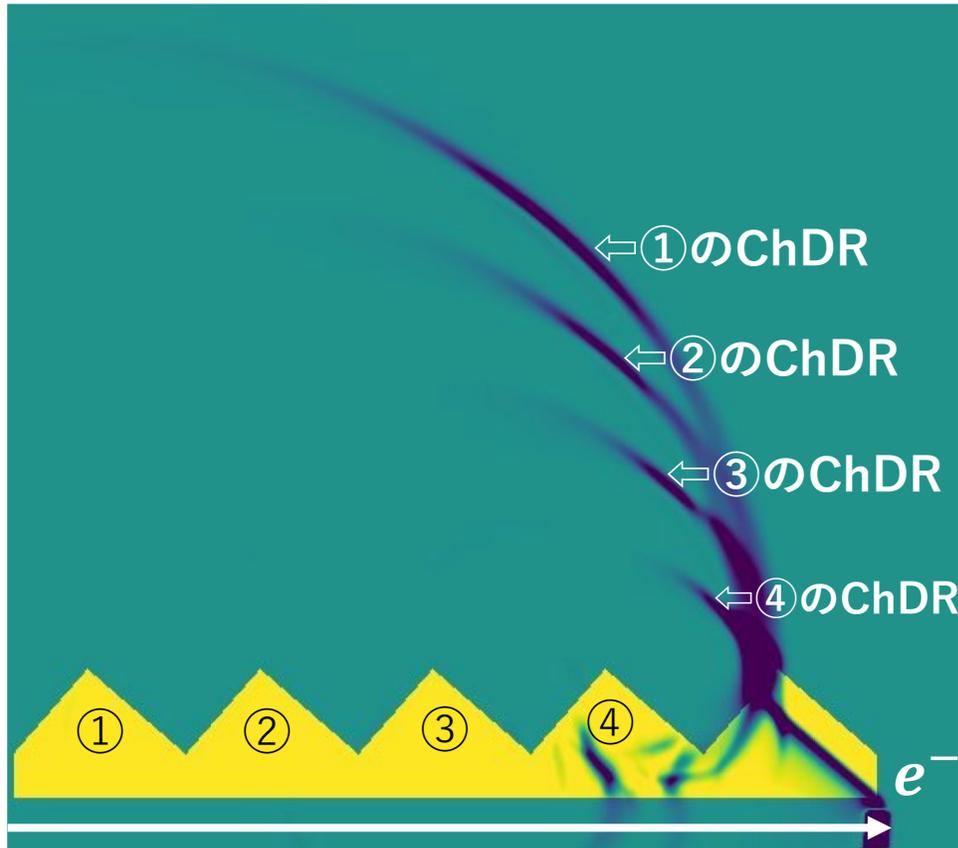
$$\left. \frac{d^2 W}{d\omega d\Omega} \right|_{ChDR} = \left. \frac{d^2 W}{d\omega d\Omega} \right|_{ChR} \times K$$

放射強度は放射波長とインパクトパラメータに強く依存する

狭帯域チェレンコフ回折放射

(Narrow-Band Cherenkov Diffraction Radiation ; NBChDR)

周期構造を持つラジエータを使用することで
チェレンコフ回折放射(ChDR)を**狭帯域化**！！



電子を周期構造を持つラジエータ近傍を通過させる

周期構造により個々のラジエータからChDRが発生

十分遠方において、
光の干渉効果により**狭帯域化**できるのではないか

放射波長の計算

ビームがAからBまで通過した際に1周期の中で
同じ場所であるP1とP2から出た光を比べる

観測者に対してラジエータは十分遠方と仮定

d : 周期長

β : 電子の相対速度

θ : 観測角

観測者



P1sで発生した光がP1eに届くまでの時間 t_1

$$t_1 = t_c + t_d = \frac{d \cos \theta}{c} + t_d$$

P2sで発生した光がP2eに届くまでの時間 t_2

$$t_2 = t_b + t_d = \frac{d}{\beta c} + t_d$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{d}{\beta c} - \frac{d \cos \theta}{c}$$

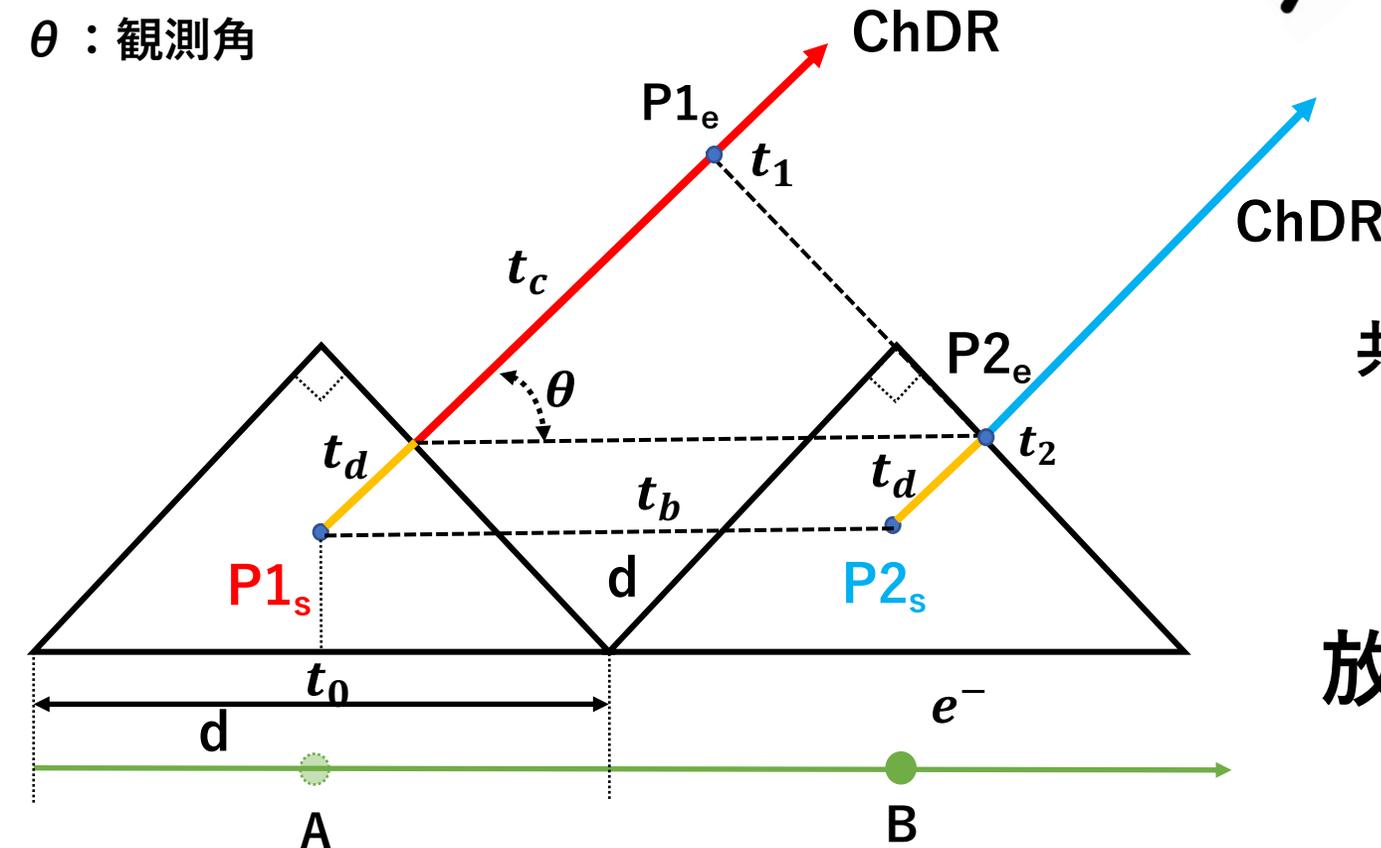
共鳴条件

$$\Delta \varphi = \omega \Delta t = 2\pi m (m = 0. 1. 2 \dots)$$

放射波長

$$\lambda = \frac{d}{m} \left(\frac{1}{\beta} - \cos \theta \right)$$

スミス=パーセル放射の式と同じになる

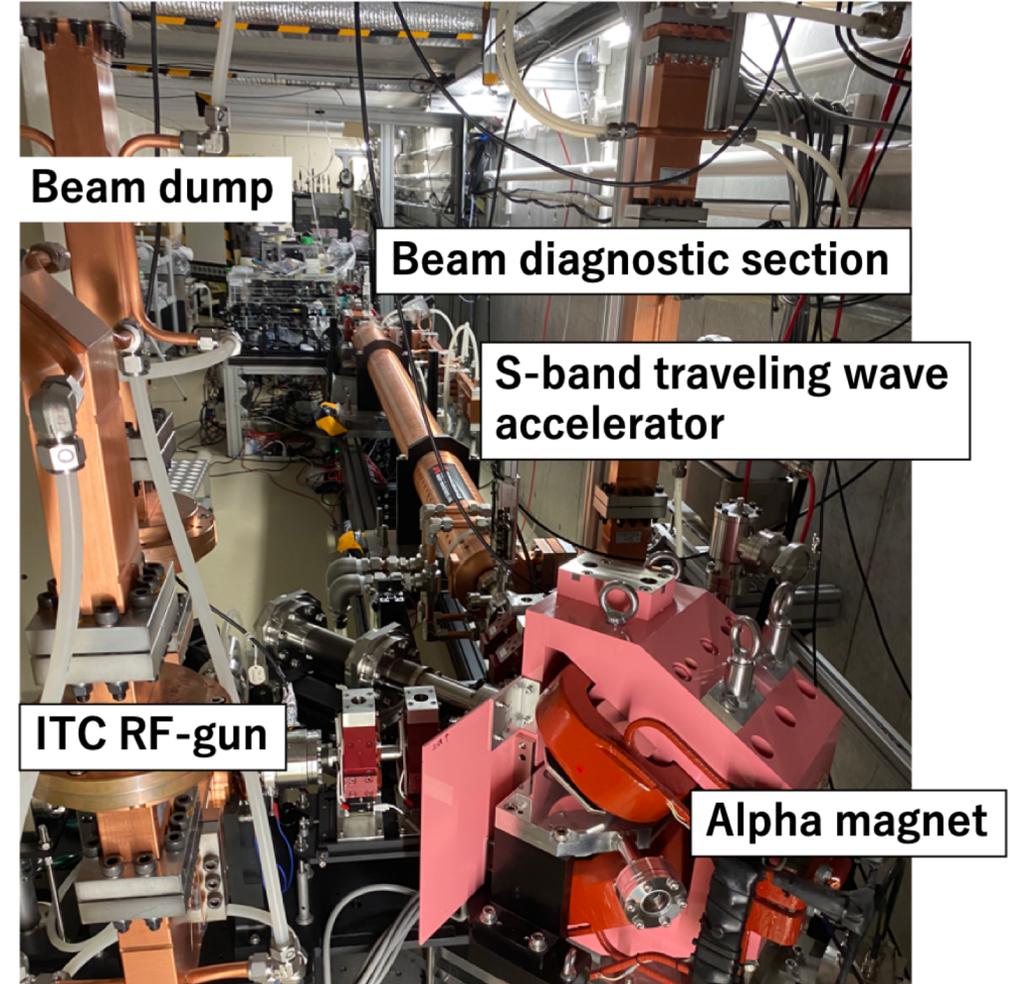
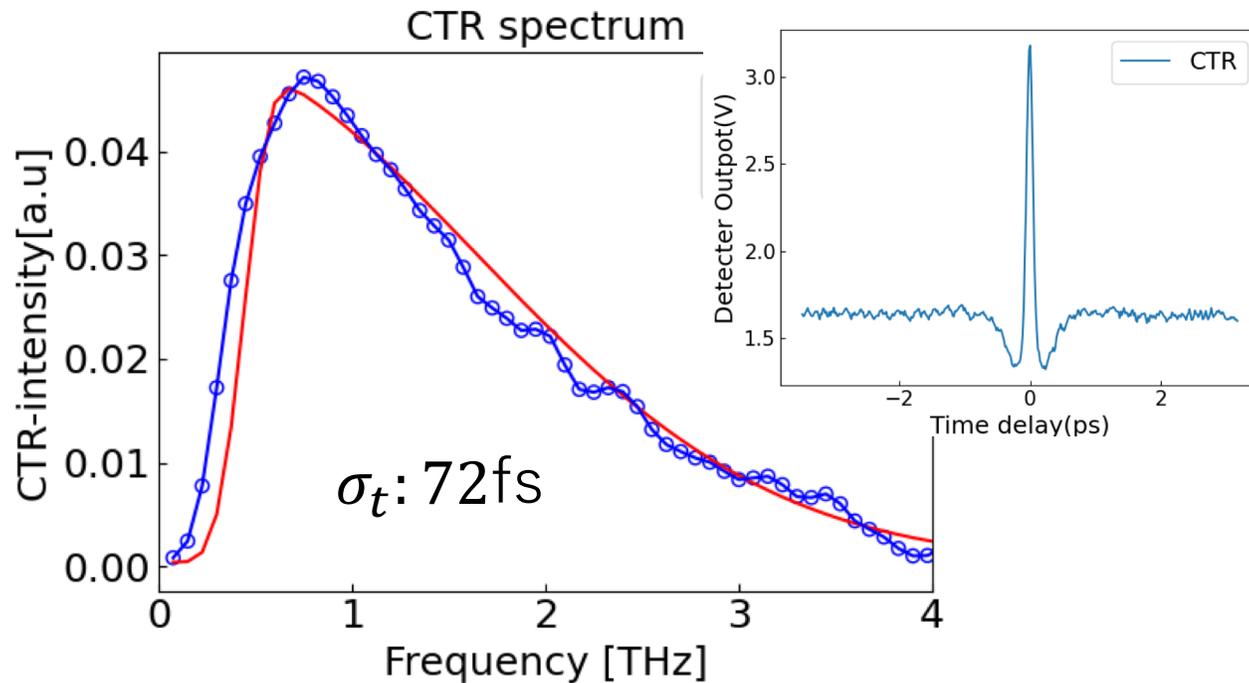


目次

- 研究背景・目的
- 狭帯域チェレンコフ回折放射について
 - チェレンコフ放射
 - チェレンコフ回折放射
 - 狭帯域チェレンコフ回折放射
- t-ACTSにおける実証実験
 - 試験加速器(t-ACTS)
 - コヒーレントチェレンコフ回折放射の利用
 - HDPEラジエータ
 - セットアップ
 - 実験結果
- まとめと今後の予定

t-ACTS(test Accelerator as Coherent THz Source)

RF Frequency	2856MHz
Beam energy	22MeV
Macropulse length	~2.0us
Number of bunch	~5700 bunch/macropulse
Bunch charge	7pC/microbunch
Bunch length	~80fs
Beam size	$\sigma_x: \sim 100 \mu\text{m}$ $\sigma_y: \sim 100 \mu\text{m}$



コヒーレントチェレンコフ回折放射の利用

t-ACTS(22MeV)

100フェムト秒以下の極短電子バンチを生成可能

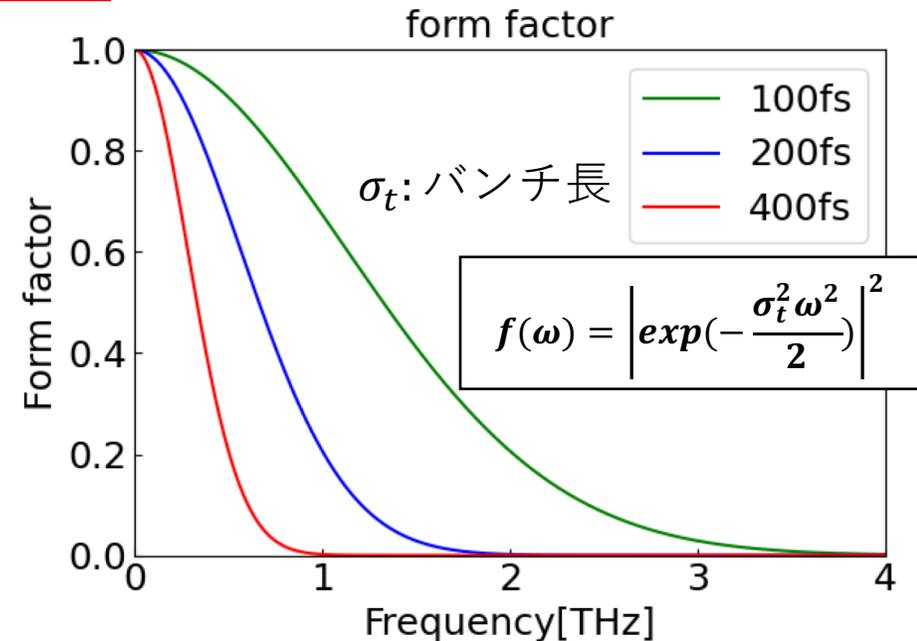
コヒーレント放射の条件

放射波長 > バンチ長

チェレンコフ放射波長はバンチ長に比べて十分長い

$$I_{total}(\omega) = I_{ChDR}(\omega) \times [n_e \{1 - f(\omega)\} + n_e^2 f(\omega)]$$

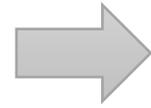
コヒーレントチェレンコフ回折放射を利用



HDPEラジエータ

ラジエータに必要なスペック

- ・加工しやすい
- ・高透過率
- ・高屈折率



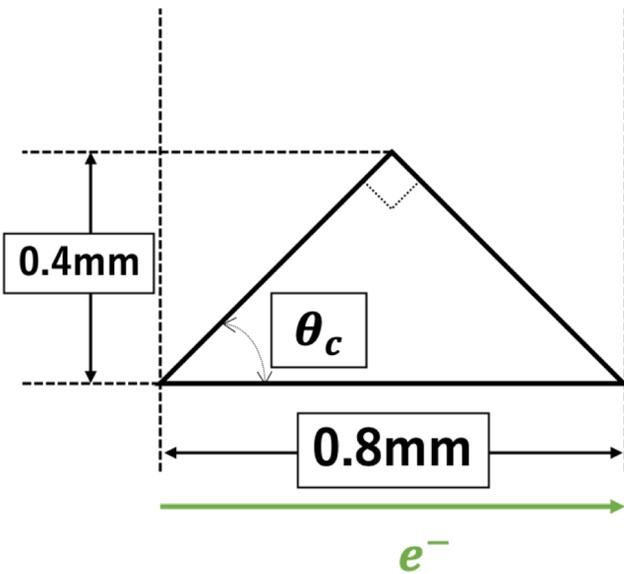
高密度ポリエチレン(HDPE)

HDPEをラジエータの形に**射出成形**

$$n_{HDPE_2021} = 1.536 \pm 0.003, \gamma = 43$$

としてチェレンコフ角を計算 $\theta_c = 49.3^\circ$

周期数40 周期長0.8mmとしてラジエータを設計



設計の工夫

チェレンコフ角に出た放射がラジエータ境界面に垂直に入射

➡ 屈折を無視できる

	周期長	θ_c
設計値	0.8mm	49.3°
実測値	0.816mm ±0.003mm	48.7° ±0.15°

概ね期待通り!

射出成形したHDPEを使用し屈折率を測定

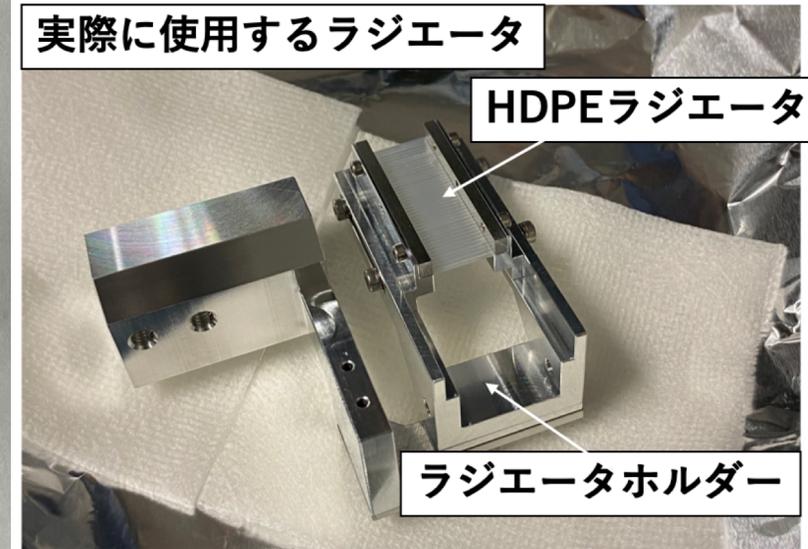
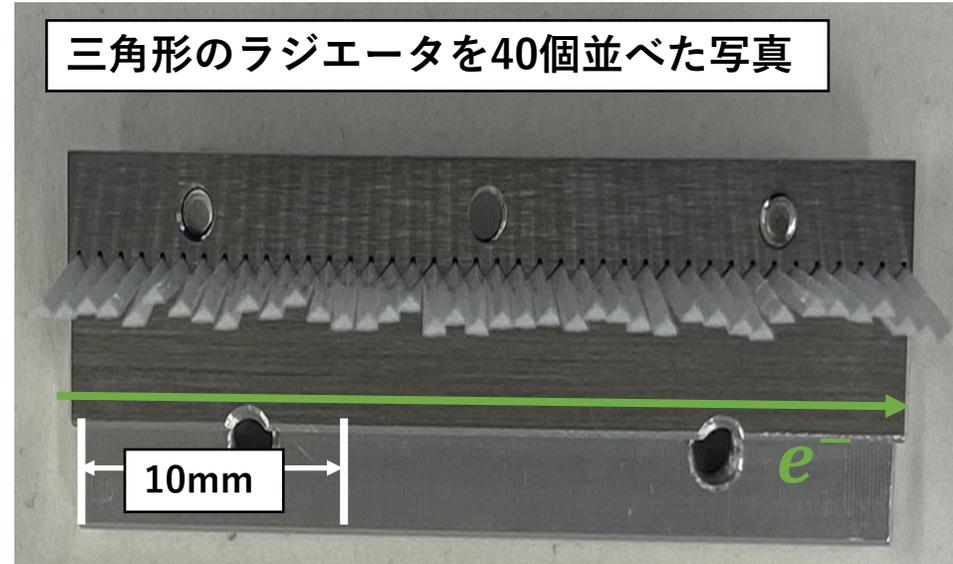
$$n_{HDPE_2023} = 1.524 \pm 0.008$$



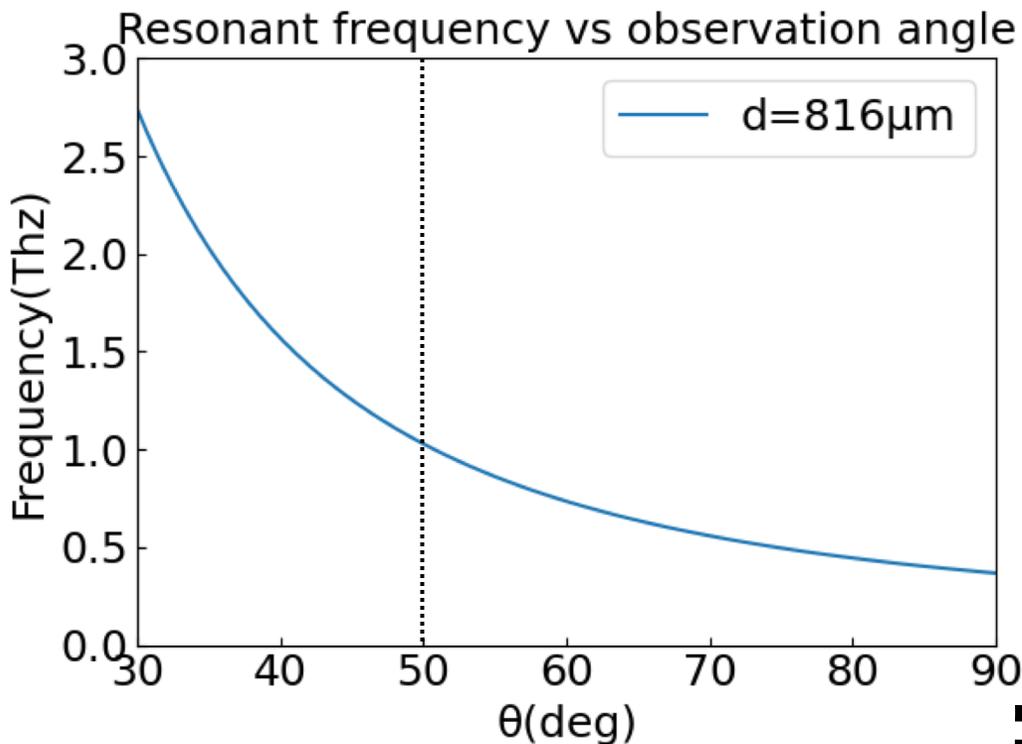
$$\theta_c = 49.0^\circ$$

HDPEラジエータ

HDPEを射出成形したラジエータを組み立てた



期待される放射波長の算出



放射波長

$$\lambda = \frac{d}{m} \left(\frac{1}{\beta} - \cos\theta \right)$$

λ : 放射波長
 d : 周期長
 θ : 観測角
 β : 電子ビームの相対速度
 m : 放射の次数

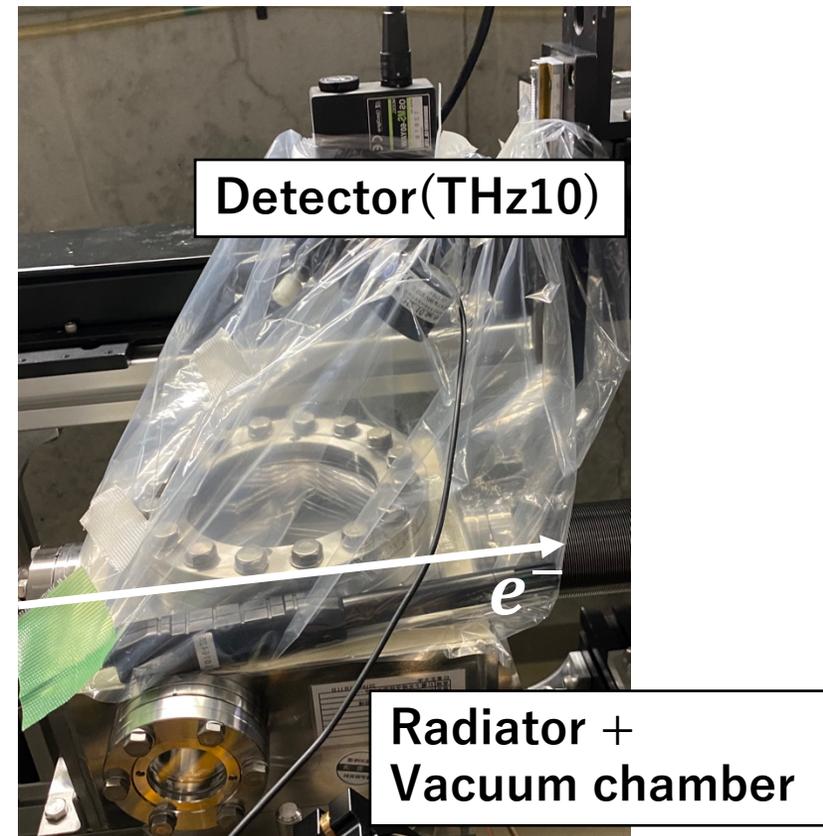
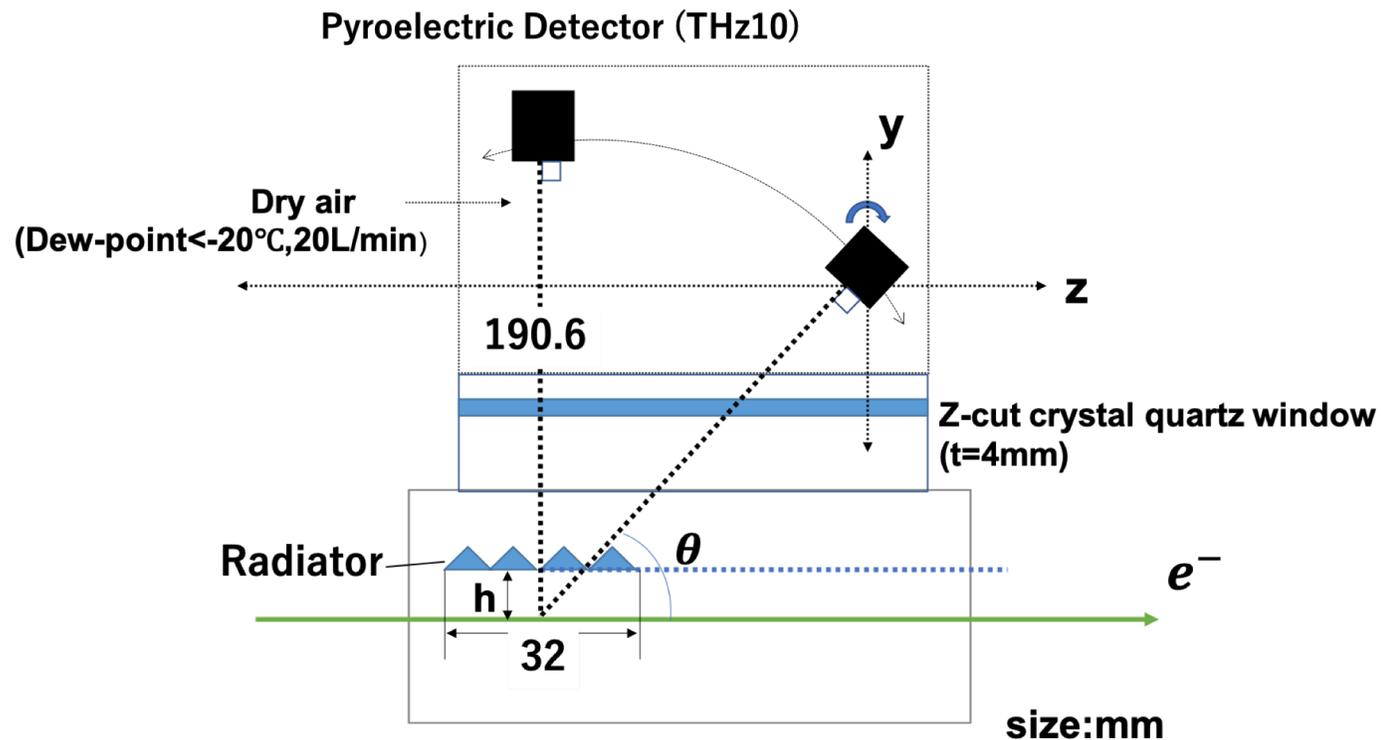
$d=816 \mu\text{m}$, $\theta_c=49^\circ$ での

基本波の共鳴周波数は**1.07THz**

実験ではチェレンコフ角($\theta_c=49^\circ$)に近い
 $\theta=50^\circ$ (1.03THz)の分光測定を行う

角度分布とインパクトパラメータ依存性の測定

実験セットアップ



Point

焦電素子検出器(THz10)

Z-cut 結晶水晶窓

乾燥空気

小型・常温でも使用可能・感度は波長によらない

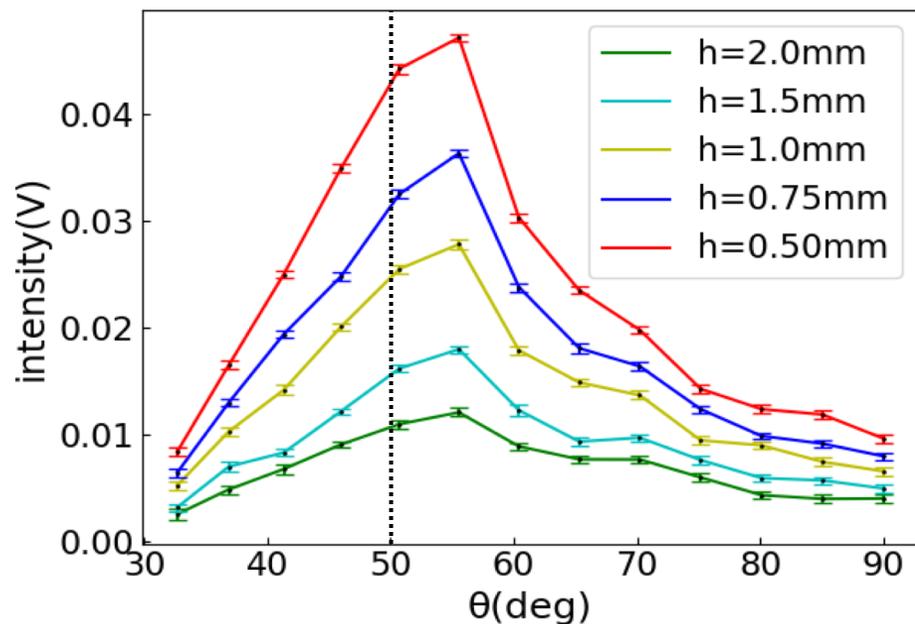
1THz付近で高い透過率

THz領域の水蒸気の吸収を防ぐ

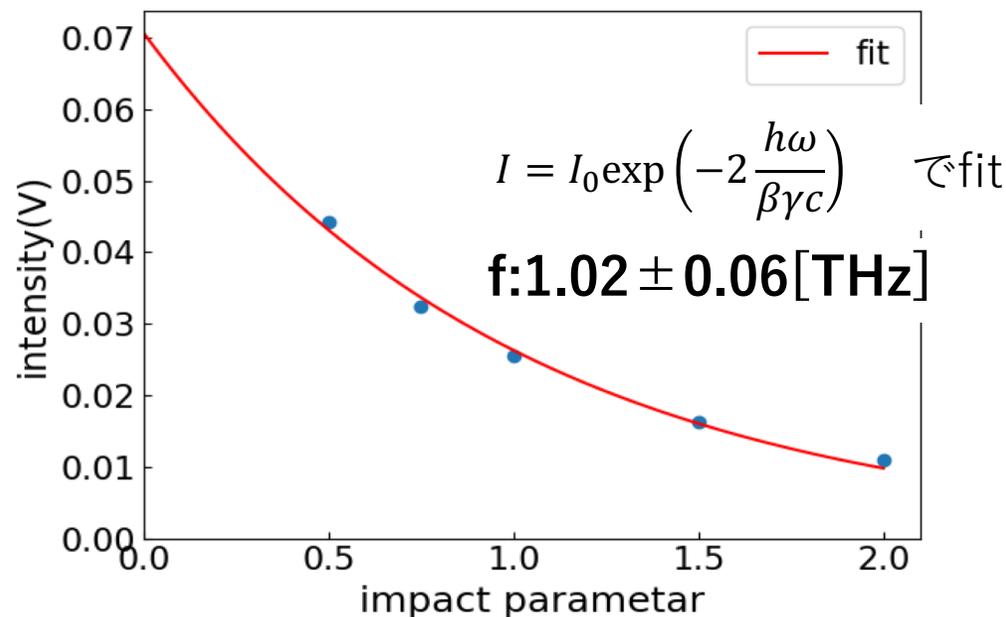
角度分布とインパクトパラメータ依存性の測定

インパクトパラメータ(誘電体とビームの距離) $h=2.0\text{mm}\sim 0.5\text{mm}$ で測定

角度分布



$\theta = 50^\circ$ でのインパクトパラメータ依存性



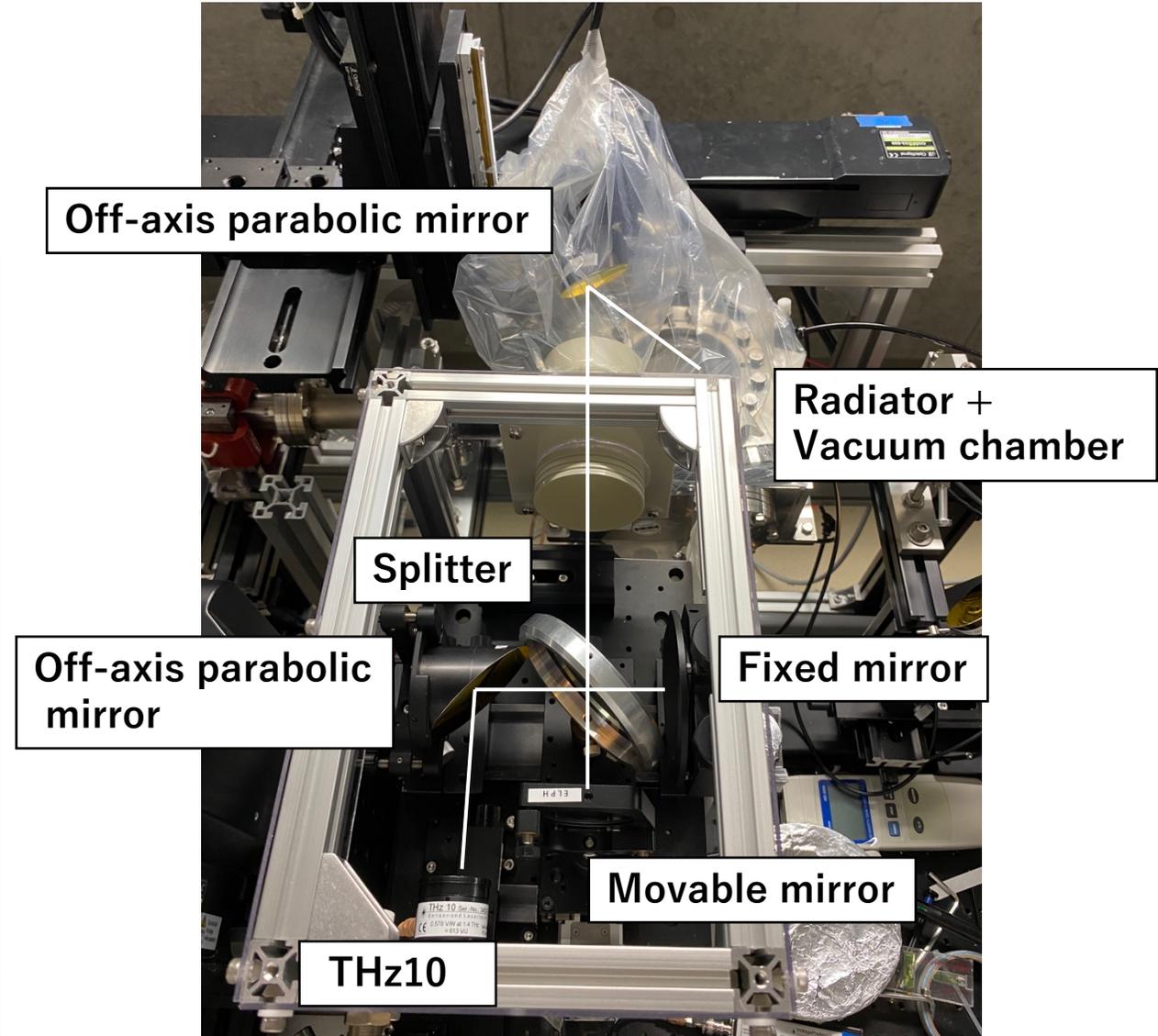
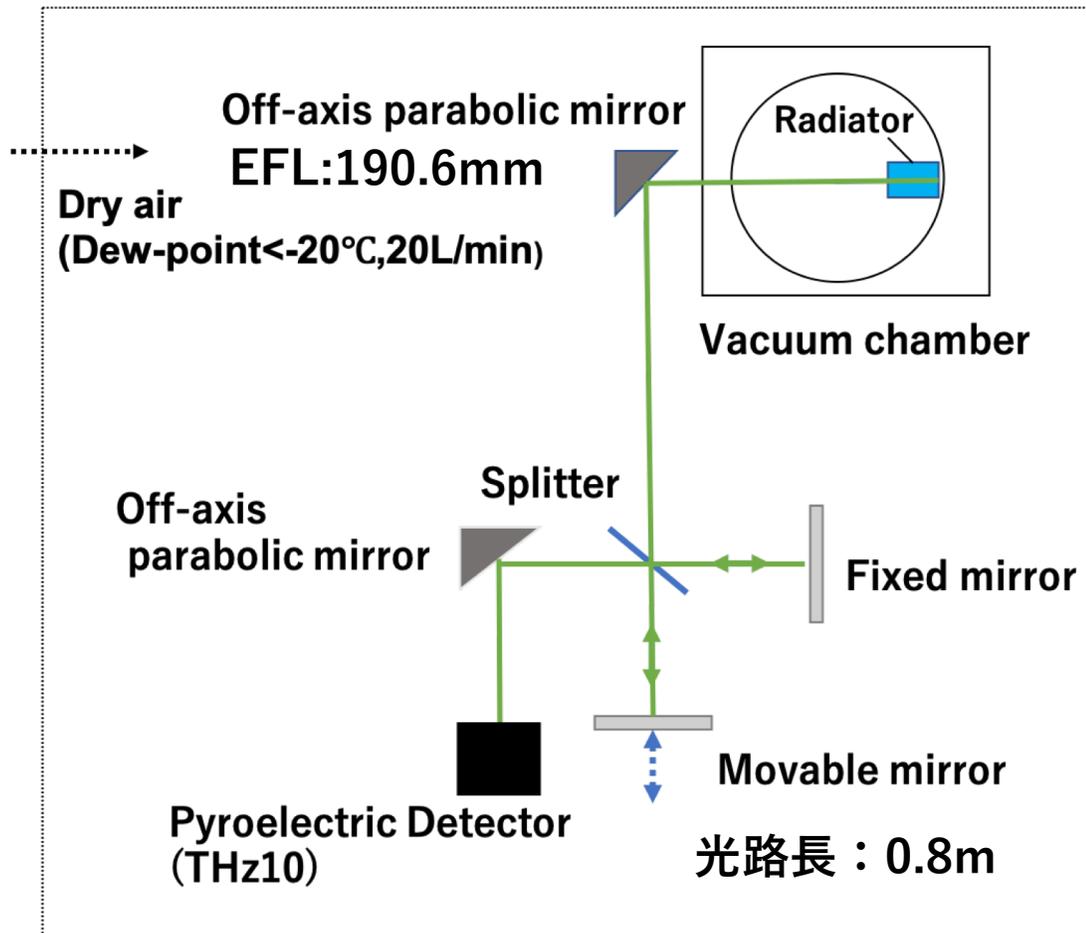
- ・ チェレンコフ角付近で**強い放射強度**をもつ
- ・ チェレンコフ角付近**以外**にも**有意な放射強度**をもつ
- ・ インパクトパラメータに依存し**指数関数的**に放射強度が変化

分光測定

$\theta = 50^\circ$ で分光測定を行う

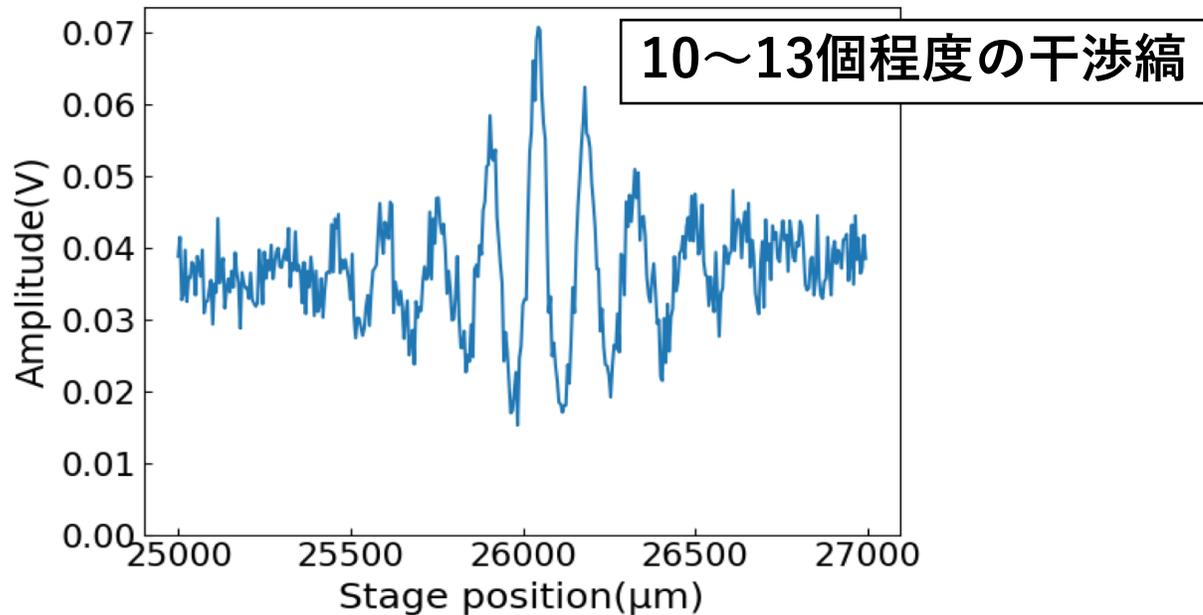
マイケルソン干渉計を使用

移動ステップ $5\mu\text{m}$ 移動距離 $2000\mu\text{m}$

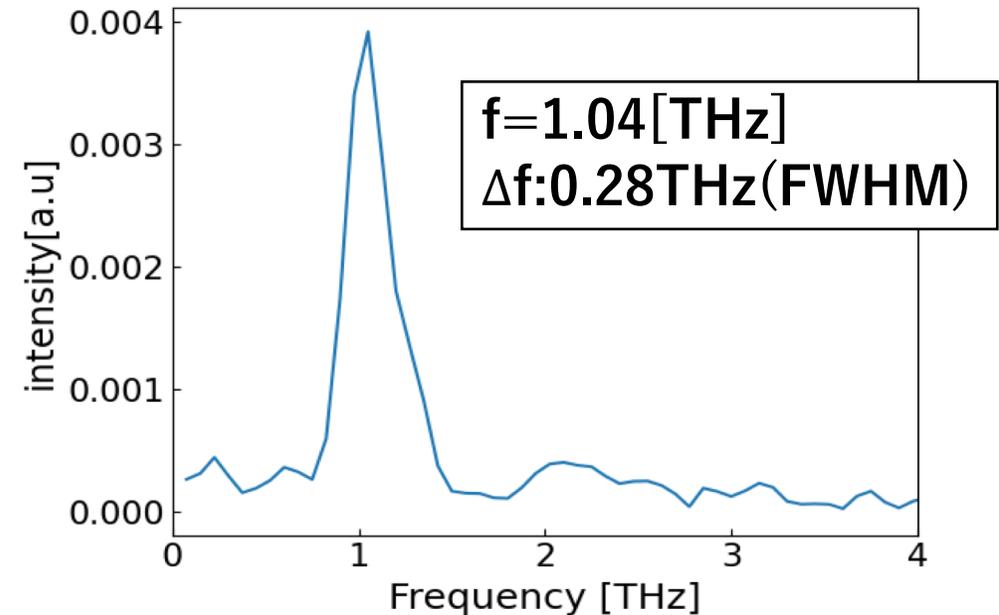


分光測定 ($\theta = 50^\circ$)

干渉パターン



周波数スペクトル



予測していた周波数域付近(1.03THz)にピークを確認

課題

周期数(40周期)に比べて干渉が少ない
→ ラジエータの精度に問題ありか？

狭帯域化した
コヒーレントChDRの観測に**成功!!**

まとめと今後の予定

t-ACTS(test-Accelerator as Coherent Terahertz Source)において
周期構造を持つラジエータを使用し狭帯域チェレンコフ回折放射の初観測を試みた。

角度分布測定によりチェレンコフ角付近に強い放射強度を持ちその他の角度でも
有意な放射強度を得た。

チェレンコフ角でマイケルソン干渉計を使用し分光測定を行い
狭帯域チェレンコフ回折放射の観測に成功。

今後はチェレンコフ角以外の角度でも分光測定を行う。

周期数(40周期)に対し干渉数が少ないのはラジエータの精度に問題がある可能性が
あるため今後は改良したラジエータを使用し比較実験を行う。

問題点

周期数に対して干渉が少ない

→ ラジエータの精度に問題がある可能性あり

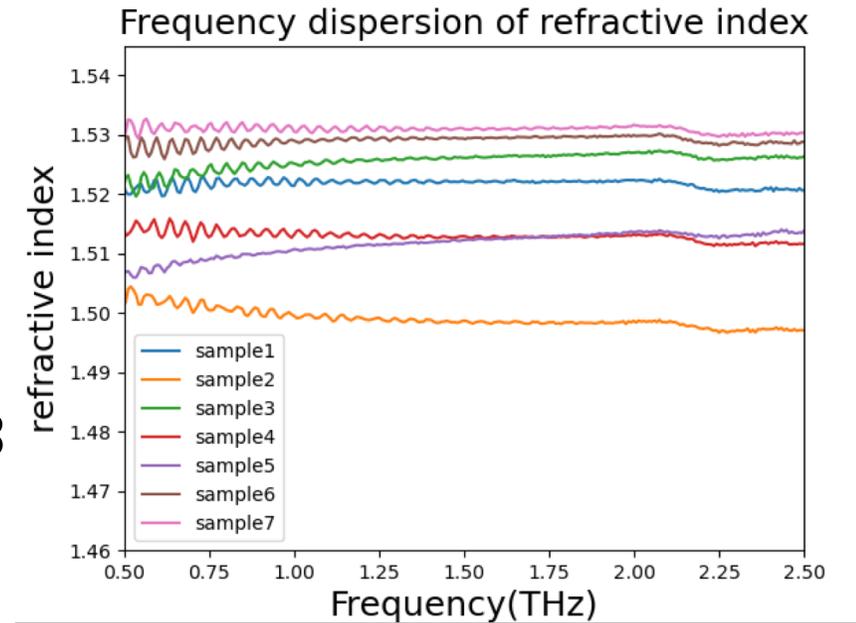
以前の実験で使用したHDPEと比べると屈折率がややばらついている

以前の実験

$$n_{HDPE} = 1.536 \pm 0.003$$

今回の実験

$$n_{HDPE} = 1.524 \pm 0.008$$



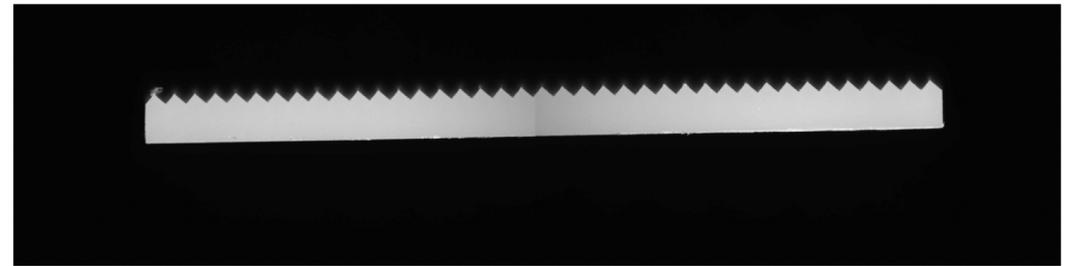
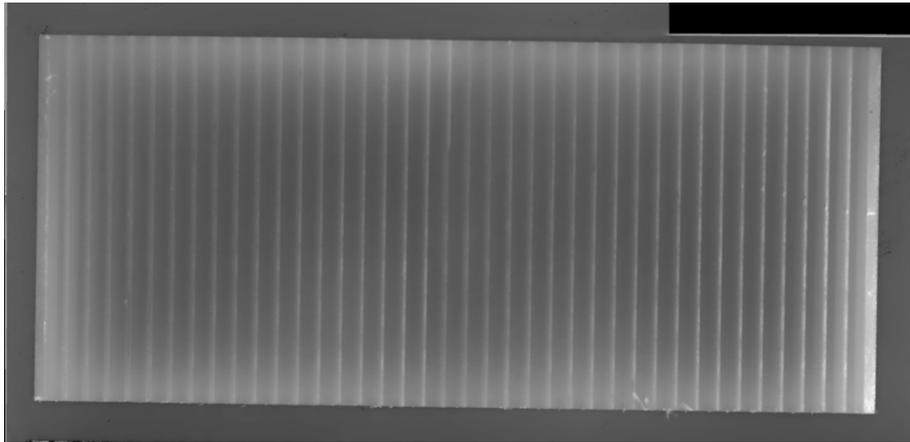
HDPEを射出成形したサンプルには写真のようなDefectがあるものがやや混じっていた

ばらつきの原因である可能性が高い

問題点

以前の実験で使用したHDPEラジエータはHDPEの塊から切り出したものであり、射出成形したものよりもばらつきが少ない可能性がある

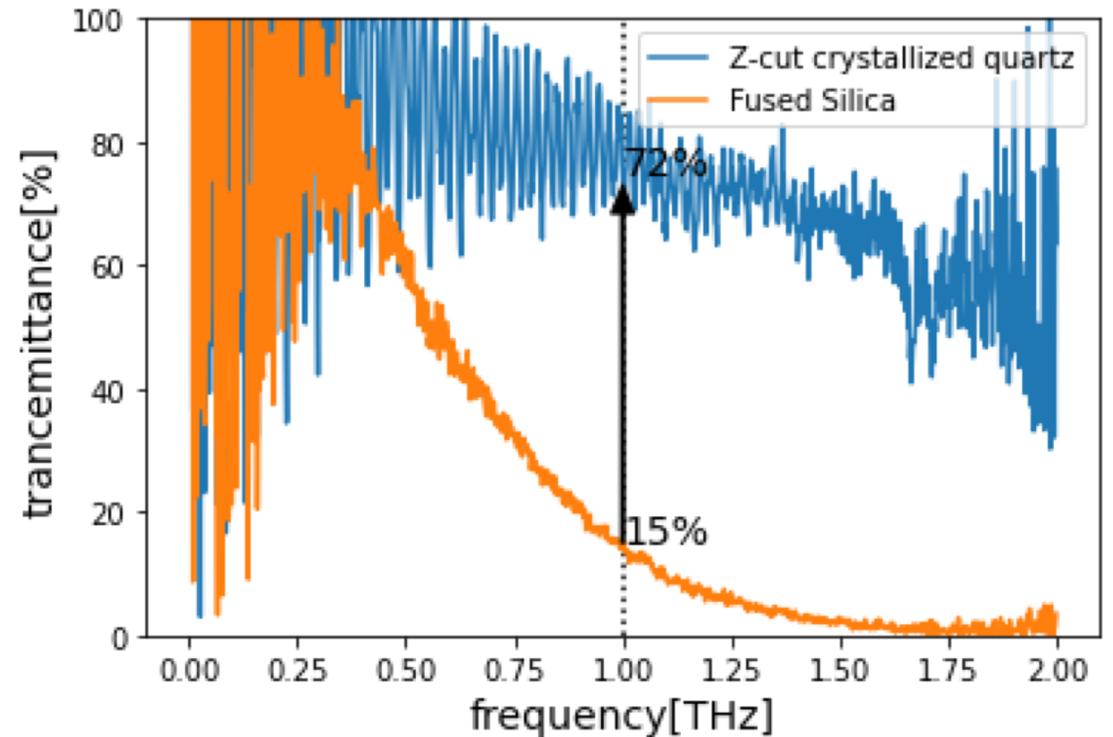
HDPEの平板を切り出したラジエータを使用し比較実験を行う



チェンバーの光取り出し窓

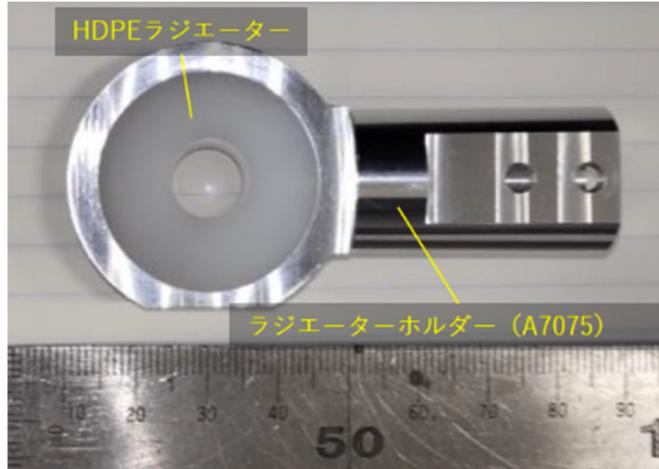
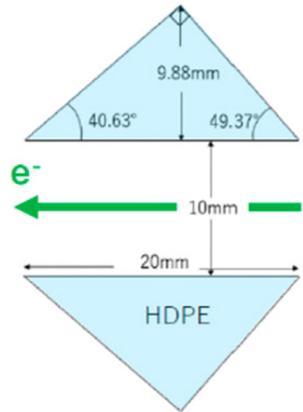
Z-cut結晶水晶窓

透過率(1THz)	約72%
厚さ	4mm
直径	100mm

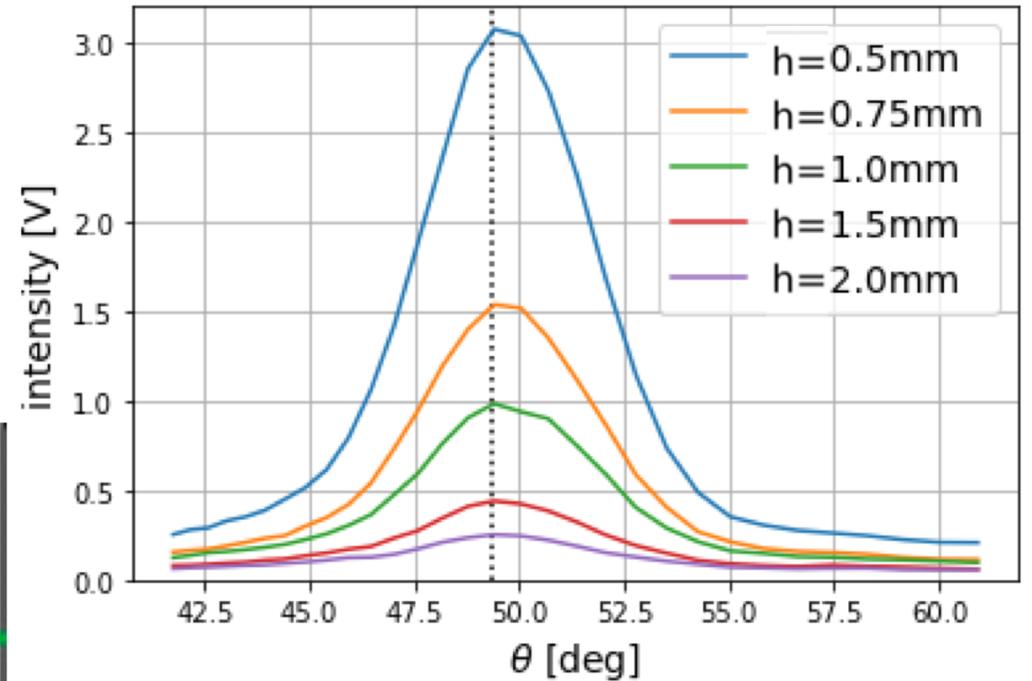


ChDR測定 of 角度分布測定

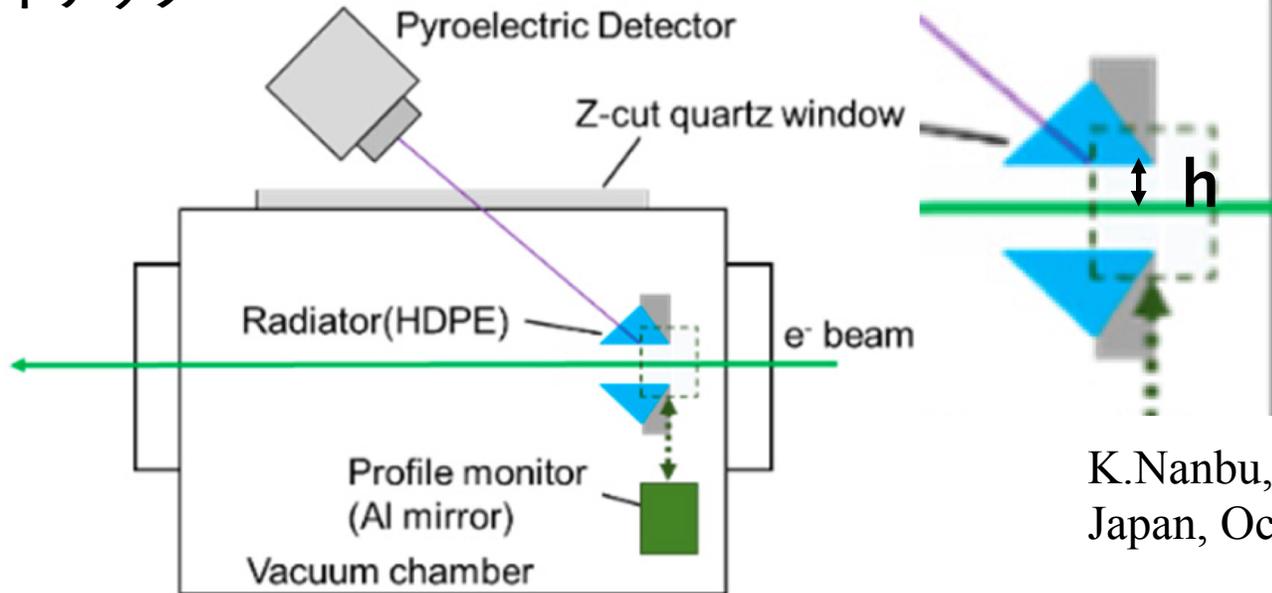
ラジエータ



角度分布測定結果



セットアップ



h : インパクトパラメータ (誘電体とビームの距離)

K.Nanbu, et al., Proc. of PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 761-763.

バンチ長測定

1バンチに 10^8 個の電子が含まれている。

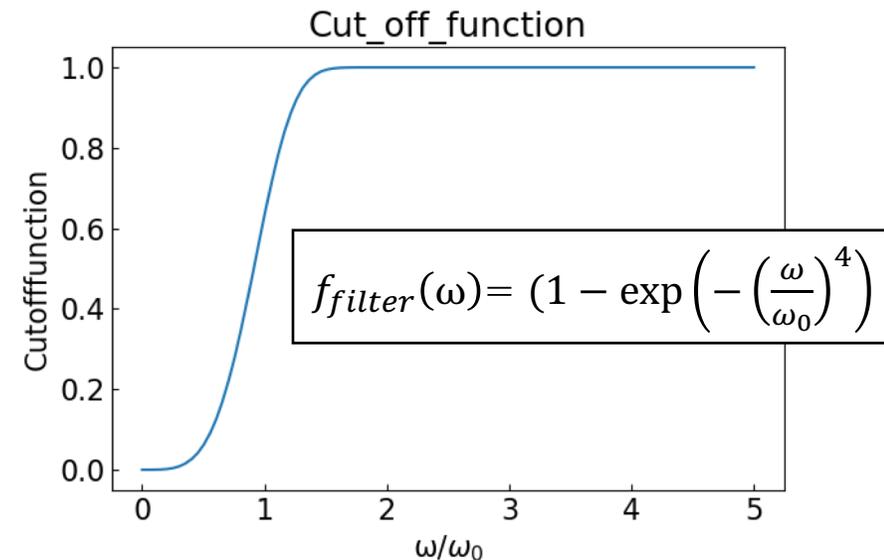
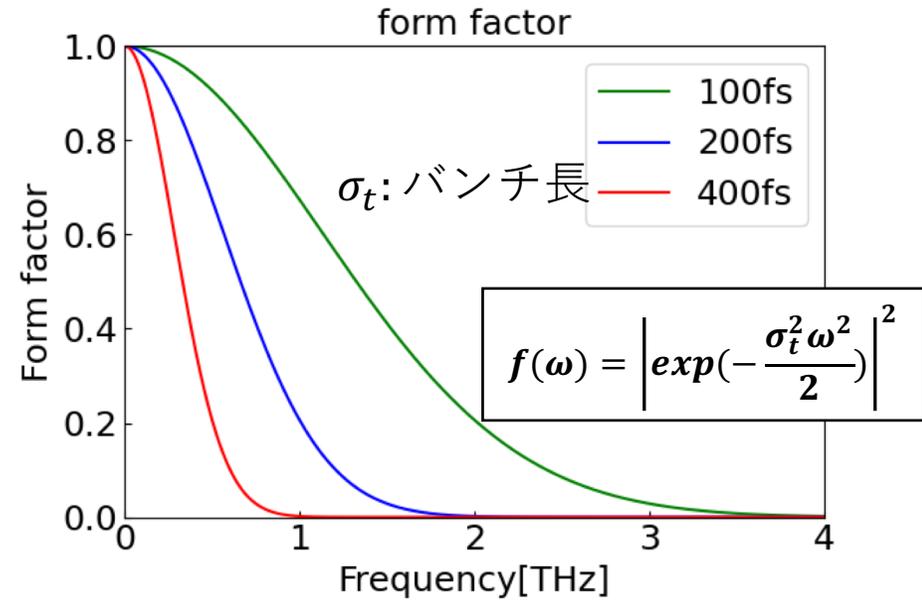
→自発放射とコヒーレント放射で8桁の差の放射強度
コヒーレント放射と同一視することができる

CTRの周波数スペクトル \longrightarrow バンチ形状因子の関数形
Fit可能

関数形

$$\begin{aligned} f_{fit}(\omega) &= A * f_{FormFactor}(\omega) * f_{filter}(\omega) + B \\ &= A * \left(\exp\left(-\frac{\sigma_t^2 \omega^2}{2}\right) \right)^2 * \left(1 - \exp\left(-\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^4\right) \right) + B \end{aligned}$$

測定したスペクトルデータをフィッティングすることで
パラメータA,B, σ , ω_0 を決定(ω_0 はカットオフ周波数)

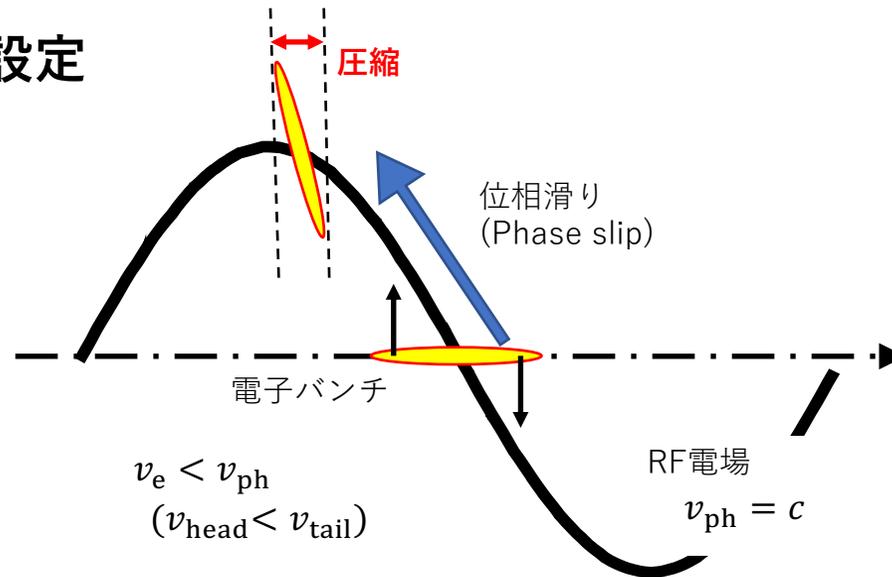


t-ACTSにおける極短電子ビーム生成

Velocity bunching

進行波型加速管に、
RF電場の位相速度より僅かに遅い速度の電子バンチを入射

入射位相をゼロクロス位相に設定



バンチの前方と後方で速度変調が生じ
加速と同時にバンチが圧縮される

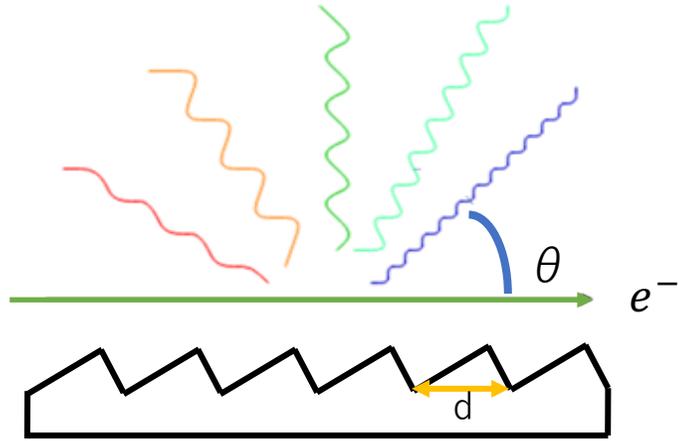
スミスパーセル放射

電子が周期構造を持った金属表面近傍を通過する際に生じる放射

SPRの特徴

- ・ 回折格子の周期長と観測角で放射波長が決定
- ・ 光の干渉効果により狭帯域化

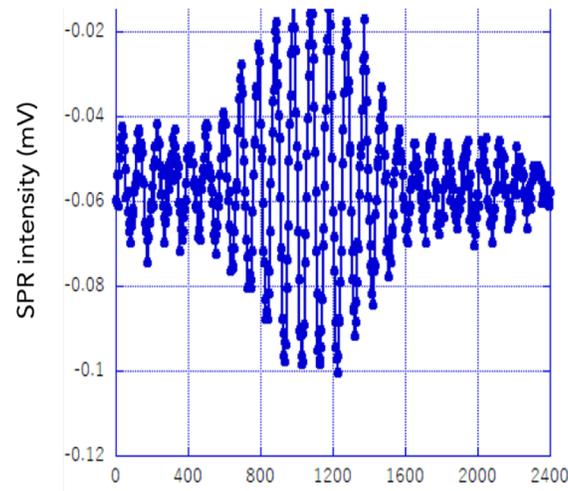
$\theta = 90^\circ$ におけるCSPRのスペクトル測定結果



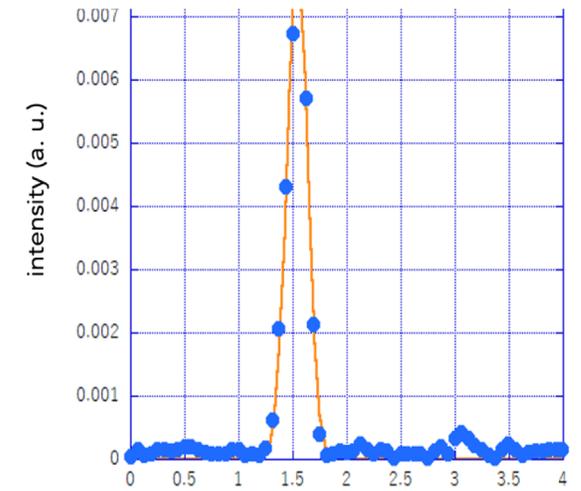
放射波長

$$\lambda = \frac{d}{m} \left(\frac{1}{\beta} - \cos\theta \right)$$

λ : 放射波長
 d : 周期長
 θ : 観測角
 β : 電子ビームの相対速度
 m : 放射の次数



Stage position (μm)



Frequency (THz)