



TOHOKU  
UNIVERSITY

# 極短電子バンチからのテラヘルツ領域 コヒーレント遷移放射の計測

阿部太郎#, 柏木茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 南部健一, 高橋健,  
長澤育郎, 齊藤寛峻, 齊藤悠樹, 柴崎義信, 濱広幸

東北大学電子光理学研究センター

第13回日本加速器学会年会  
(2016年8月8日 幕張メッセ・国際会議場)

# 目次

## □ はじめに

- t-ACTSにおけるコヒーレントテラヘルツ光源開発
- 極短電子バンチ生成
- 遷移放射

## □ コヒーレント遷移放射発生実験

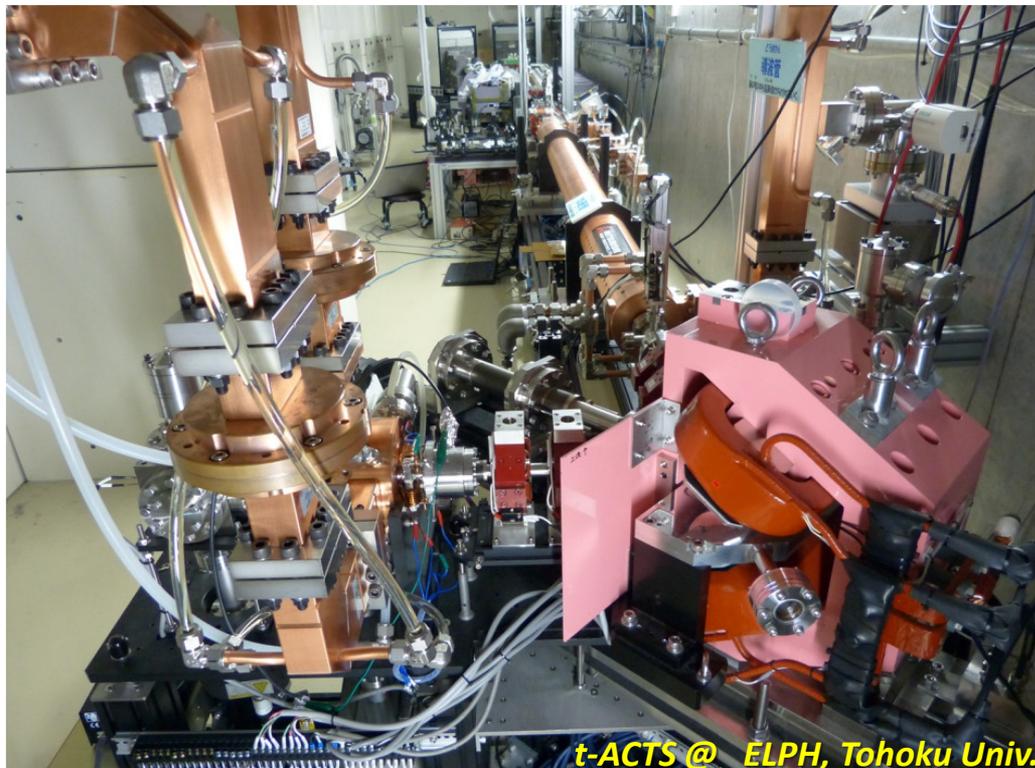
- 実験セットアップ
- 放射強度の電荷量依存性
- 空間分布
- 周波数スペクトル  
バンチ長の推定、シミュレーションとの比較

## □ まとめ

# コヒーレントテラヘルツ光源の開発

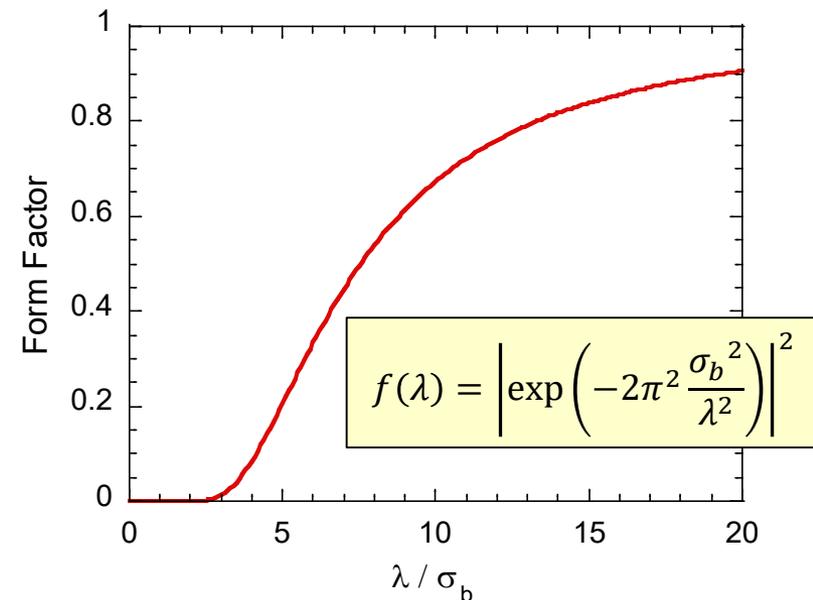
## t-ACTS (test-Accelerator as Coherent Terahertz Source)

- 速度集群法(Velocity bunching)による極短電子バンチ生成
- 極短電子バンチによるコヒーレントテラヘルツ放射の発生



$$P(\lambda) = \underbrace{[N\{1 - f(\lambda)\}]}_{\text{In-coherent part}} + \underbrace{N^2 f(\lambda)}_{\text{Coherent part}} \cdot P_0(\lambda)$$

$f(\lambda)$ : Bunch form factor

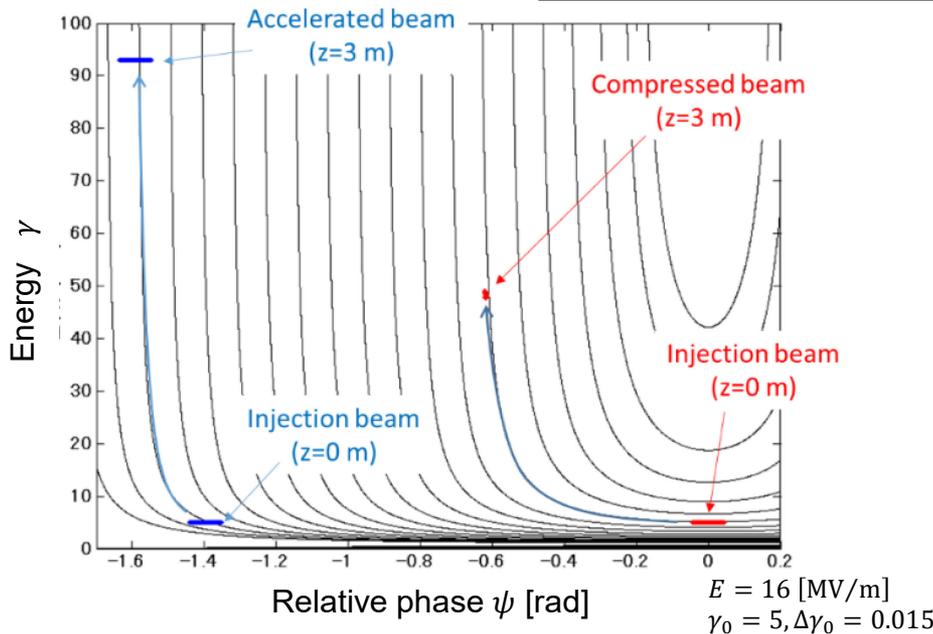


# 極短電子バンチ生成

## 速度集群法 (Velocity bunching)

加速管のRFの位相速度よりわずかに遅い速度の電子バンチを加速管に入射

$$v_{beam} < v_{ph}(= c)$$

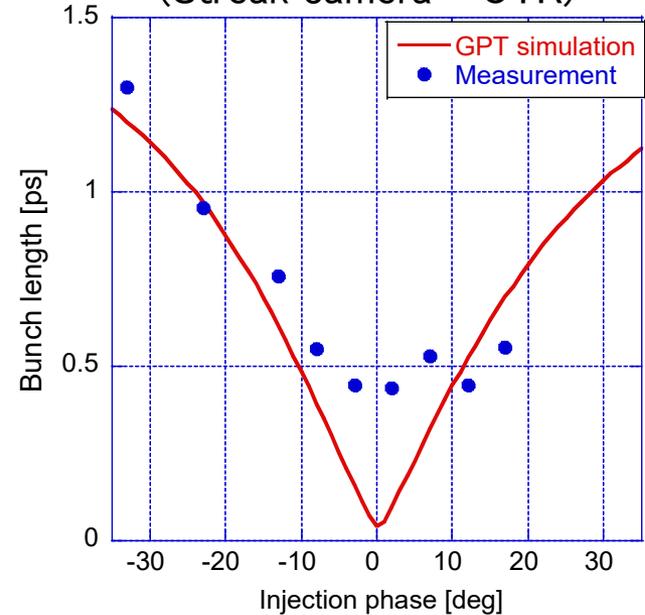


加速管中で位相滑り(phase slip)を起こし  
加速と同時に縦方向の圧縮が実現する

RFゼロクロス付近に、エネルギー広がりの小さい  
ビームを入射することで効率的にバンチ圧縮できる

最新の測定結果: MOP067 (齊藤寛峻)

## バンチ長計測 (Streak camera + OTR)

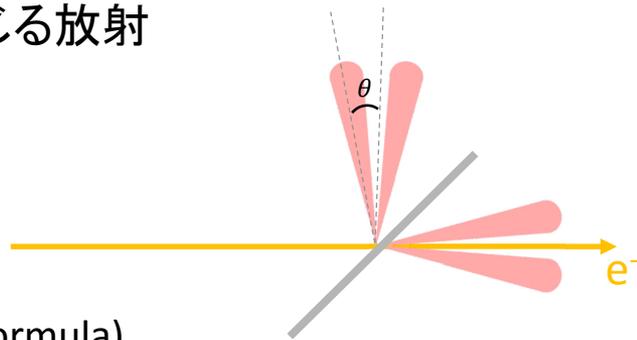


500 fs以下まで圧縮できていることを確認  
(測定系に時間分解能の制限あり)

遷移放射のスペクトル測定によって  
RFゼロクロス付近でのバンチングを確認する

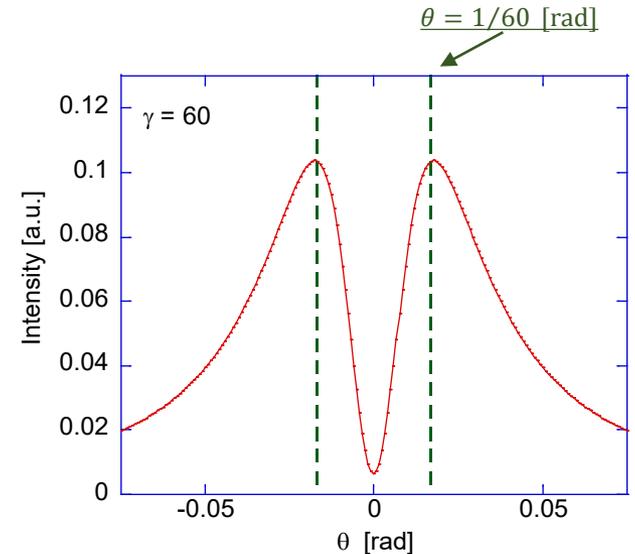
# 遷移放射 (Transition Radiation)

- 荷電粒子が誘電率の異なる媒質の境界面を通過する際に生じる放射



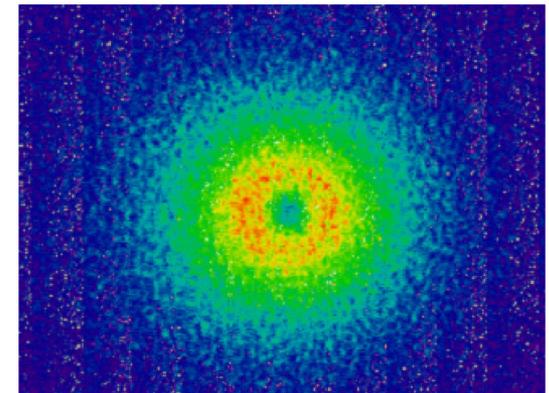
(Ginzburg-Frank formula)

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2}$$



## 特徴

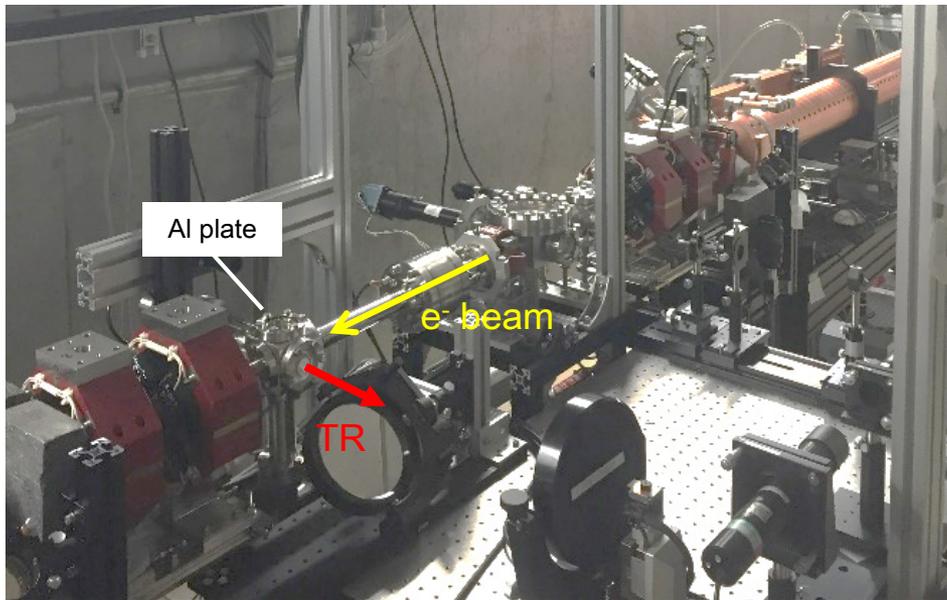
- ✓ 発光点からコーン状に広がる放射
- ✓ 放射の発散角:  $\theta \sim 1/\gamma$  付近にピークをもつ
- ✓ 動径方向の偏光成分をもつ(ラジアル偏光)
- ✓ ブロードな放射スペクトル



可視光領域の遷移放射  
(I.I. Camera)

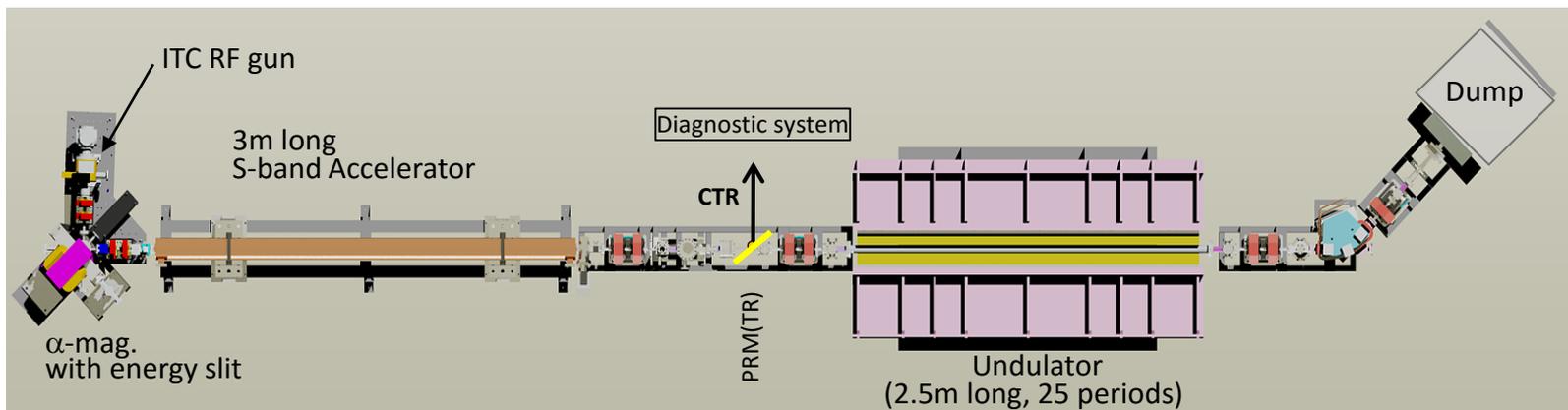
# t-ACTS (加速器システム)

- 加速管下流のビームラインにAl板を45度の角度で挿入し、遷移放射を発生



## Beam parameters

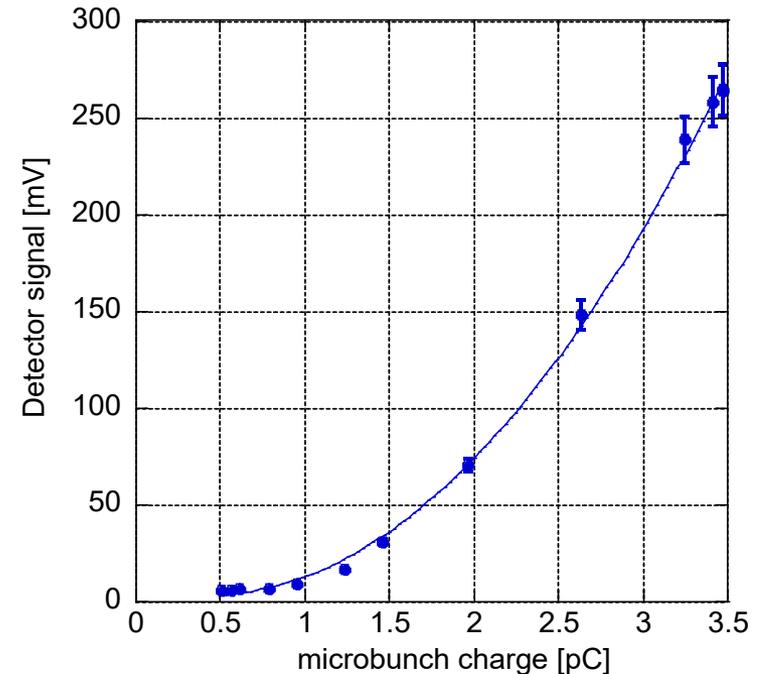
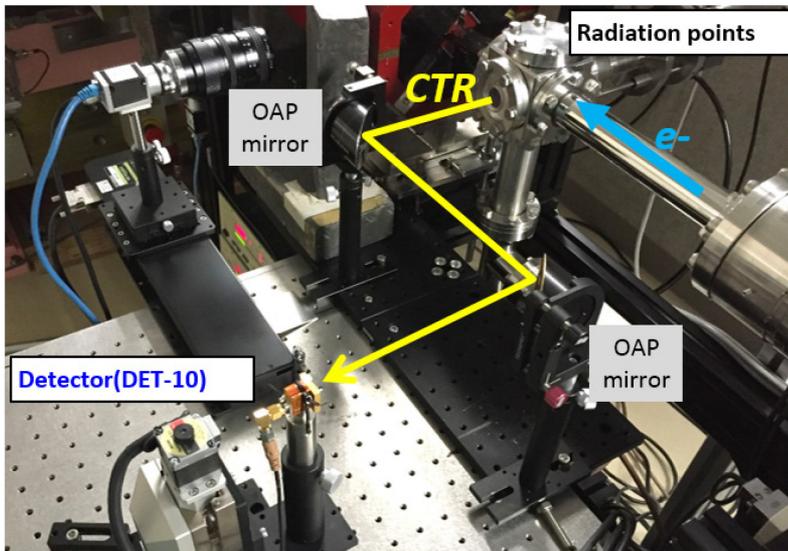
Macropulse length	~2.0 $\mu$ s
Number of bunch	~5700 bunches/macropulse
Beam energy	30~50 MeV
Bunch charge	3 ~ 4 pC /microbunch
Bunch length ( $\sigma_b$ )	< 0.04 ~ 2 ps (Calculation)



# 遷移放射強度の電荷量依存性

- コヒーレント放射: 放射強度は $N^2 (\propto Q^2)$ に比例
- バンチ電荷量 $Q$ を変化させた際の遷移放射強度を測定

Freq: 0.1 [THz] ( $\lambda = 3$  [mm])  
 $\sigma_b = 500$  [fs] (150 [ $\mu\text{m}$ ])  
 $\rightarrow$  Form factor  $\sim 0.9$

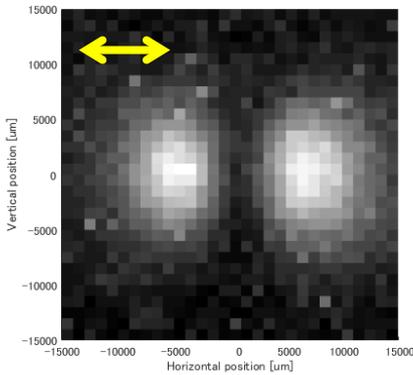


検出器: ショットキーバリアダイオード  
 Detector: DET-10 [Millitech]  
 Center Freq.: 100 [GHz]  
 Band-width  $\sim 35$  [GHz]

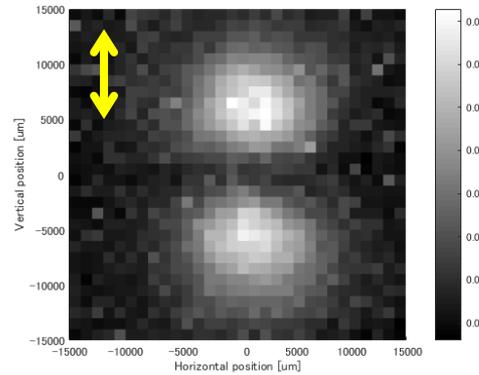
0.1 THz付近の周波数帯域で  
 コヒーレント放射が発生していることを確認

# 遷移放射の空間分布(1)

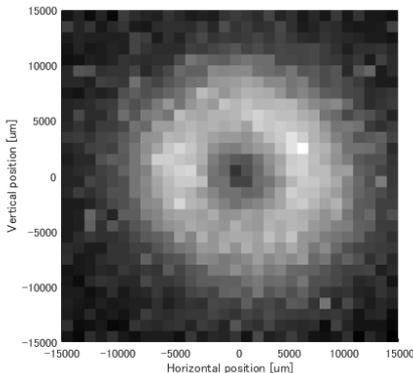
- 検出器を可動ステージに搭載し、遷移放射の二次元強度分布を測定
- ワイヤーグリッドを使い、水平・垂直偏光成分を測定



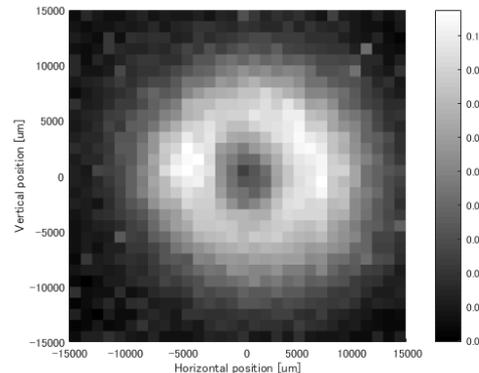
水平方向の偏光成分



鉛直方向の偏光成分



2偏光成分の重ね合わせ



偏光素子なしでの測定

検出器: 焦電検出器

Detector: THZ11-BL-BNC [Gentec-EO]

Spectral range: 0.1-30 THz

(ブラックポリエチレンシートにより  
可視光をカット)

ワイヤーグリッド

Polarizer: GS57207 [SPECAC]

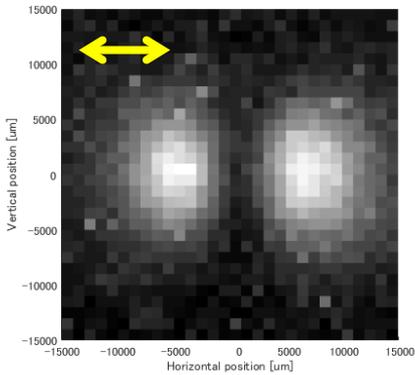
Wire diameter : 10 um

Wire spacing: 25 um

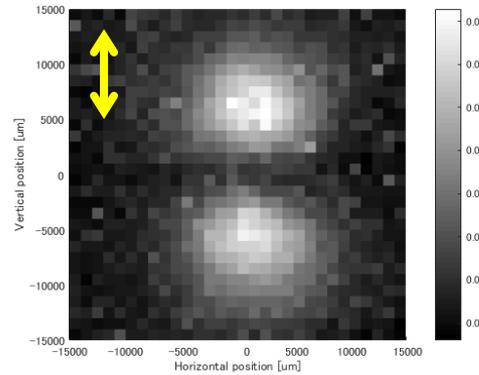
THz領域の遷移放射を測定

# 遷移放射の空間分布(2)

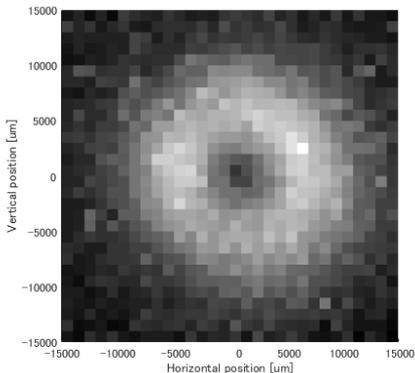
■ 測定された遷移放射のプロファイルから広がり角を確認



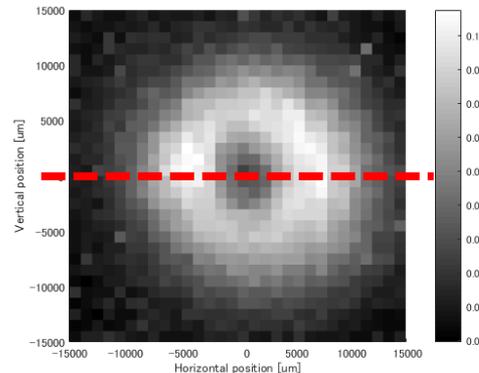
水平方向の偏光成分



鉛直方向の偏光成分



2偏光成分の重ね合わせ

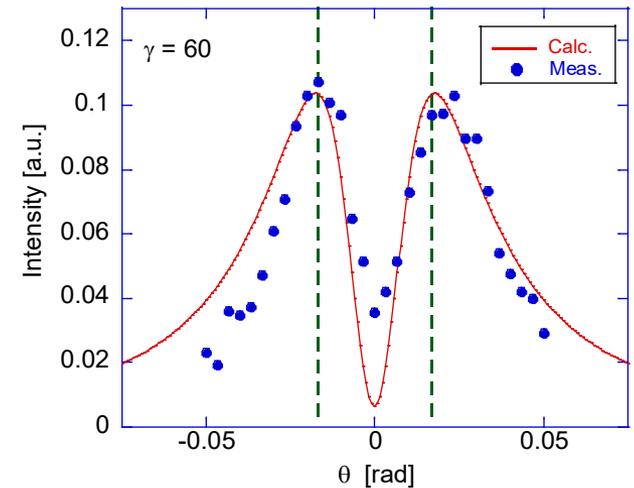


偏光素子なしでの測定

Ginzburg-Frank

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2}$$

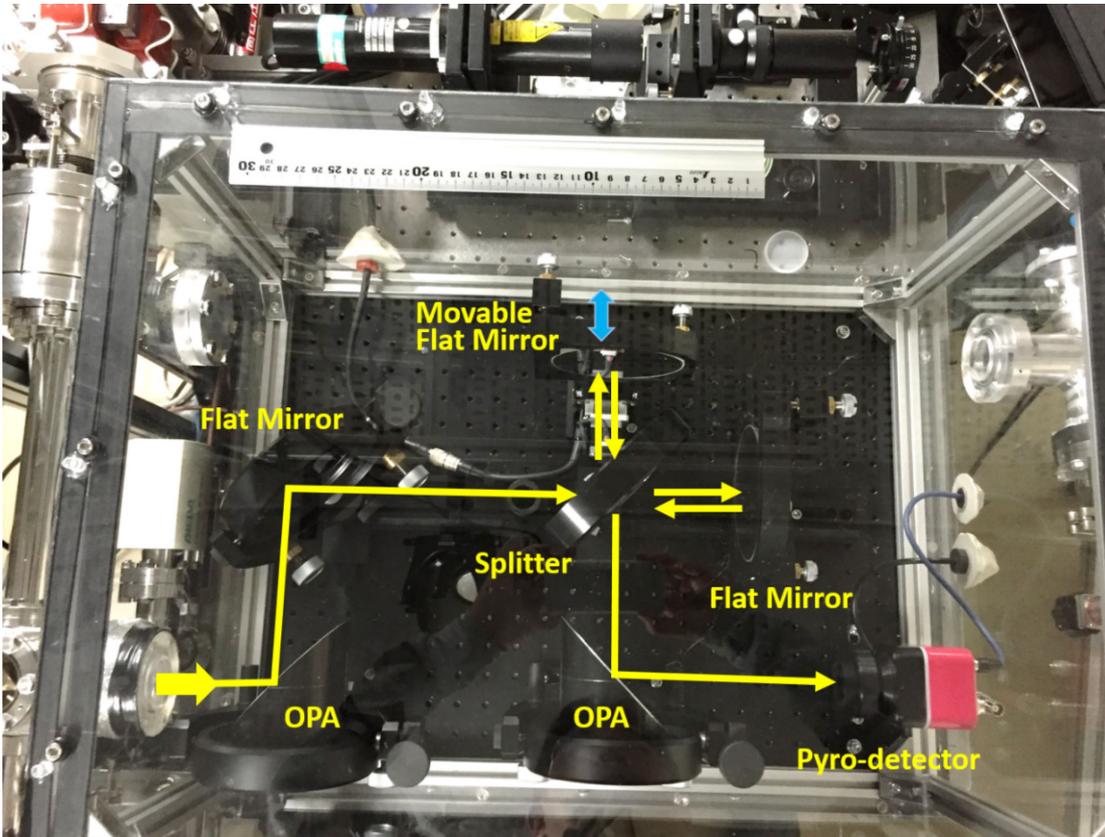
水平方向の空間分布



$\theta \sim 1/\gamma$  の位置にピークを確認

# スペクトル計測

- マイケルソン干渉計を使い、フーリエ分光により周波数スペクトルを測定



## 測定条件

ミラー移動範囲: 1200  $\mu\text{m}$

$\rightarrow \Delta\nu \sim 0.125 \text{ THz}$

ミラー移動ステップ: 10  $\mu\text{m}$

$\rightarrow \nu_{max} \sim 7.5 \text{ THz}$

\*水蒸気による光の吸収を減らすため  
密閉容器内を窒素置換して測定

検出器: 焦電検出器

Detector: PYD-1 [PHLUXi]

Spectral range: 1-850 THz (350 nm – 300  $\mu\text{m}$ )

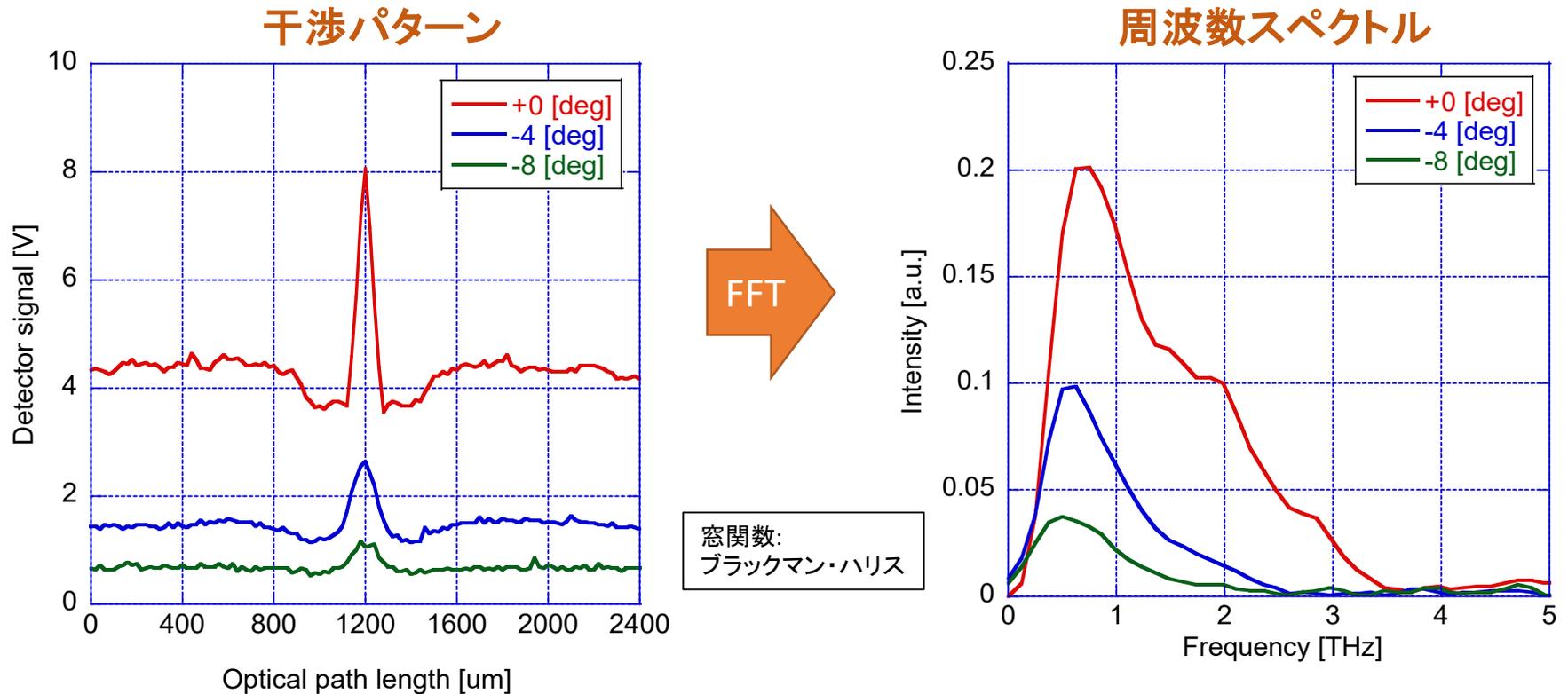
ブラックポリエチレン使用

ビームスプリッター

Mylar film

# 干渉パターンと周波数スペクトル

- 干渉パターン・スペクトルのビーム入射位相依存性を測定  
(ストリークカメラを用いたバンチ長計測で時間分解能の制限がかかっていた領域)



- ✓ 放射強度が大きく変化
- ✓ 信号振幅の変化にともない干渉パターンの幅も変化
- ✓ 放射強度が最も強い位相 (RFゼロクロス付近) で 3.5 THz におよぶコヒーレント放射を確認

# バンチ長の推定 (カットオフ関数の導入)

## ➤ 低周波数部分の信号減衰の原因

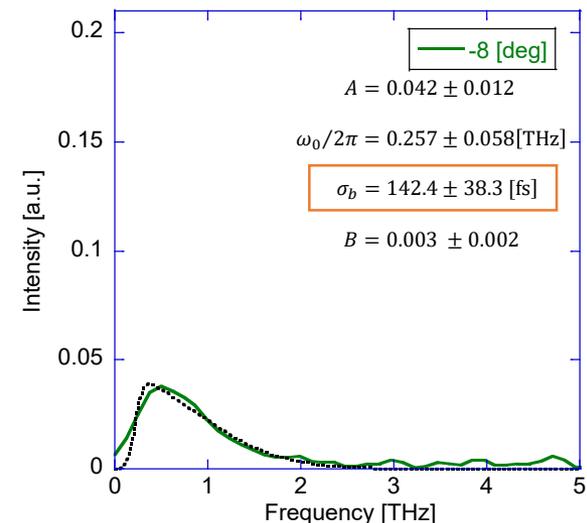
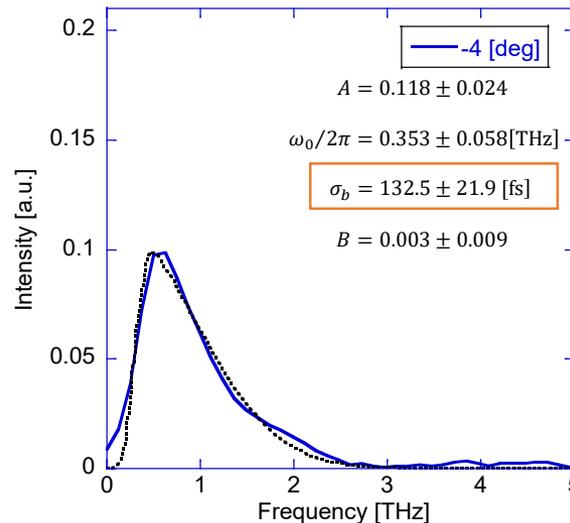
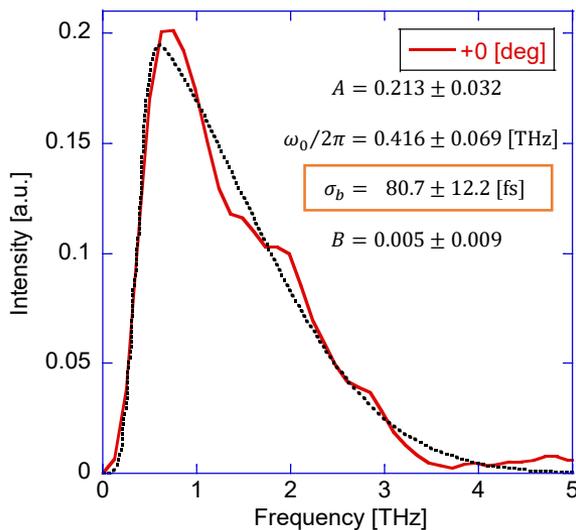
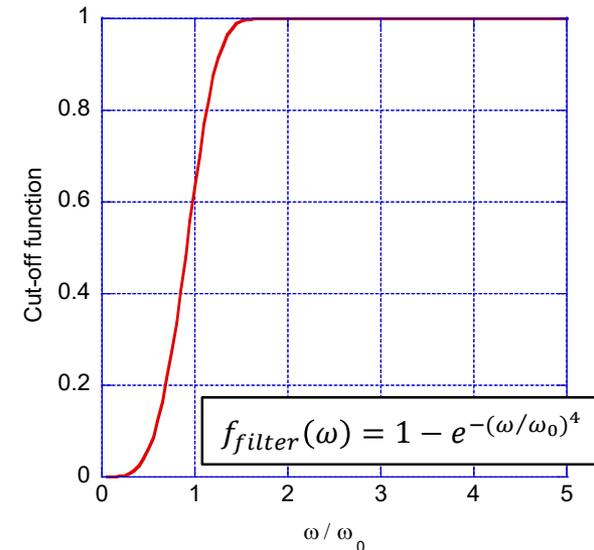
- ✓ 検出器の感度
- ✓ 回折損失 (干渉計の開口、AI板の径)

## 低周波数カットオフ関数の導入

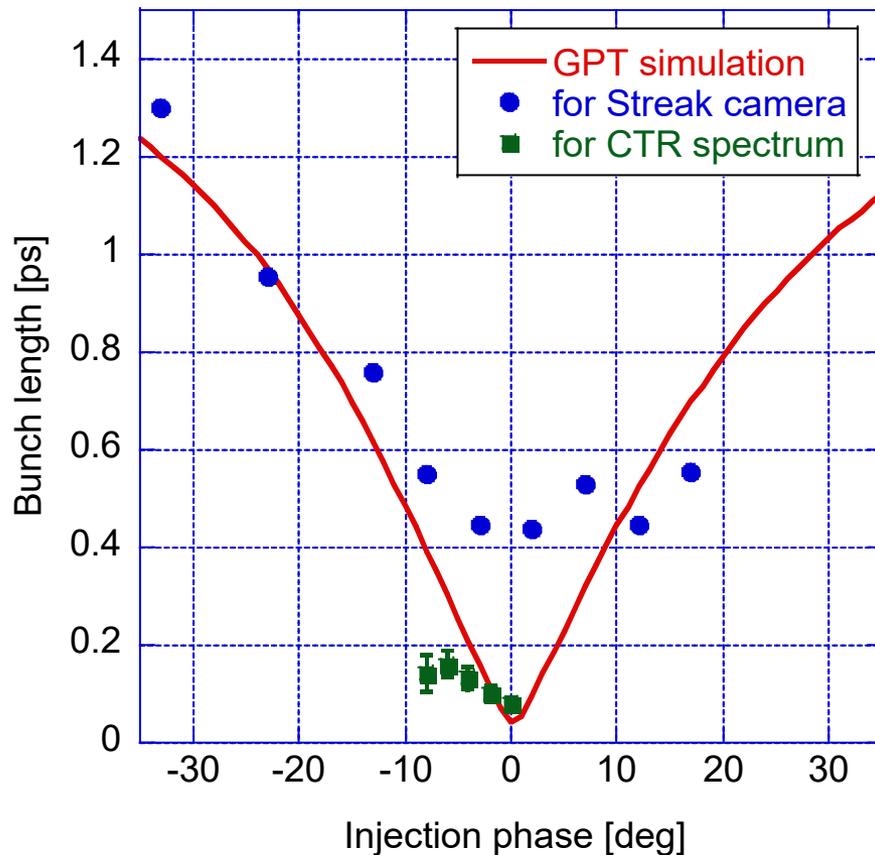
$$f_{fit}(\omega) = A \cdot f_{filter}(\omega) \cdot f(\omega) + B$$

$$= A \underbrace{\left(1 - e^{-(\omega/\omega_0)^4}\right)}_{\text{Cut-off function}} \underbrace{\left|e^{-\omega^2 \sigma_b^2 / 2}\right|^2}_{\text{Form factor (Gaussian)}} + B$$

[Ref] P. Evtushenko et al., AIP Conference Proceedings 868, 193 (2006)



# シミュレーションとの比較



- ✓ バンチ長のビーム入射位相依存性  
ゼロクロス付近において**100 fs程度**の極短電子バンチが生成できていることを示唆

## 課題

- カットオフ関数の導入の妥当性
  - 標準光源(黒体炉)を用いた測定系の感度較正
- 放射強度が弱くなる位相での測定精度
  - 高感度の検出器の導入
  - 参照光の同時測定
  - 測定回数を増やす

# まとめ

- t-ACTSにおいて、テラヘルツ領域のコヒーレント遷移放射の発生実験を行った
- 0.1 THz付近でコヒーレント遷移放射の電荷量依存性を確認 ( $P \propto N_b^2$ )
- テラヘルツ帯の遷移放射の空間分布、水平・垂直偏光成分を測定
- フーリエ分光測定により1~3.5 THzのコヒーレント放射を観測
- カットオフ関数を導入したスペクトルの解析からバンチ長を推定した。バンチ長の入射位相依存性が確認でき、放射強度が最大となる位相では、バンチ長が100 fs程度であったという結果が得られた。  
→ Velocity bunchingが正しく行われていることを示唆
- 今後、フーリエ分光測定システムの改善・特性測定を行なう