



TOHOKU
UNIVERSITY

THOT08

アンジュレータ超放射のコヒーレンスを用いた 電子ビーム特性測定の見直し

寺田健人[#], 柏木茂, 石附勇人、鹿又健、柴田晃太郎, 高橋健, 長澤育郎,
南部健一, 日出富士雄, 三浦禎雄, 武藤俊哉, 山田悠樹, 山本大喜, 濱広幸

東北大学電子光理学研究センター

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
- コヒーレントアンジュレータ放射

□ ダブルスリット干渉計による電子ビームサイズ測定

- ダブルスリット干渉計
- The van Cittert-Zernike theorem

□ t-ACTSにおけるビームサイズ測定実験

- 実験セットアップ
- アンジュレータとテラヘルツ検出器
- 空間コヒーレンス度とビームサイズの測定

□ まとめ

コヒーレントテラヘルツ光源の開発

加速器ベースのコヒーレントテラヘルツ光源の研究開発

t-ACTS: test-Accelerator as Coherent Terahertz Source

- 速度集群法(Velocity bunching)による極短電子ビーム生成
→ バンチ長 ~ 80fs

放射波長よりも電子ビームの時間幅が短い → 「コヒーレント放射」

- 遷移放射、チェレンコフ放射^{#1}、スミス=パーセル放射^{#2}、アンジュレータ放射^{#3}など

- ✓ 電子ビームからのコヒーレント放射を用いた
電子ビーム特性測定について検討

コヒーレント放射

コヒーレント放射：バンチ内の電子数 N の二乗に比例した強度が得られる

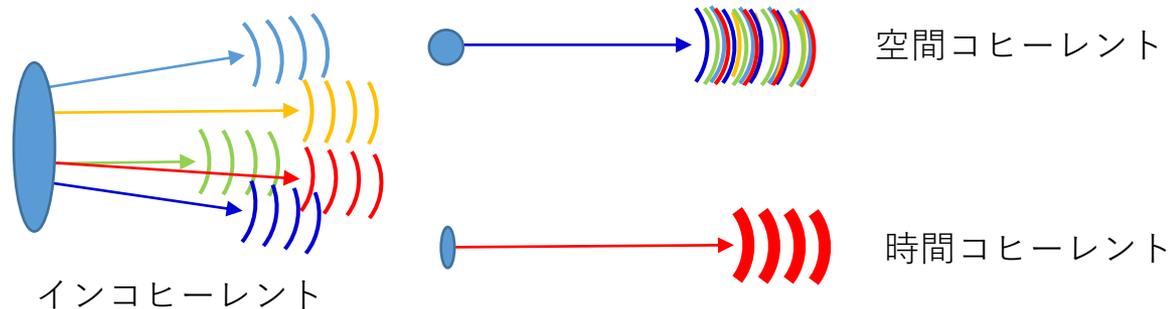
$$\text{放射強度: } P \Big|_{multi} = [N \underbrace{\{1 - F_{3D}\}}_{\text{Incoherent}} + \underbrace{N^2 F_{3D}}_{\text{Coherent part}}] \cdot P_0 \Big|_{single}$$

$$\text{電荷分布: } S_{3D}(x, y, z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma_x^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_y} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left(-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right)$$

σ_x, σ_y : 横方向ビームサイズ, σ_z : バンチ長

$$\text{バンチ形状因子: } F_{3D} = F_T F_L = \left| \exp\left(-\frac{\sigma_x^2 k_x^2}{2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\sigma_y^2 k_y^2}{2}\right) \cdot \exp\left(-\frac{\sigma_z^2 k_z^2}{2}\right) \right|^2$$

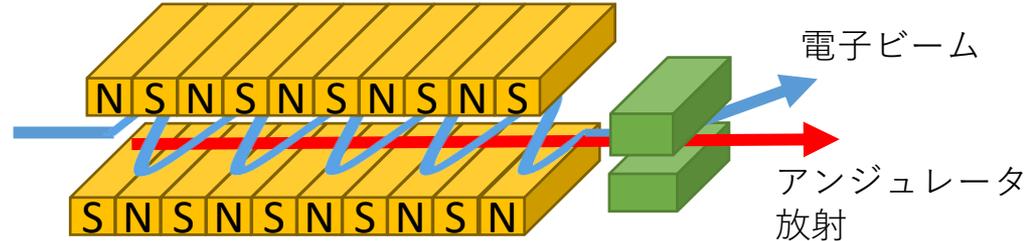
$k_x = 2\pi \sin \theta \cos \phi / \lambda$, $k_y = 2\pi \sin \theta \sin \phi / \lambda$, $k_z = 2\pi \cos \theta / \lambda$, λ : 放射波長, θ, ϕ : 観測角



アンジュレータ放射

電子がアンジュレータ内部で蛇行
放射スペクトル

→ ビームエネルギー・周期磁場で決まる



□放射波長

$$\lambda_R = \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2 \theta^2 \right)$$

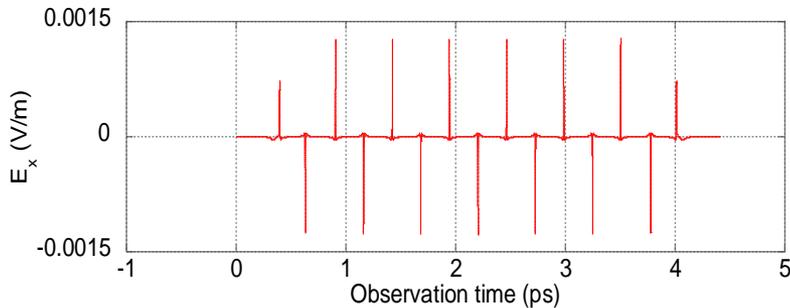
□偏向パラメータ

$$K = \frac{eB_u \lambda_u}{2\pi m_e c}$$

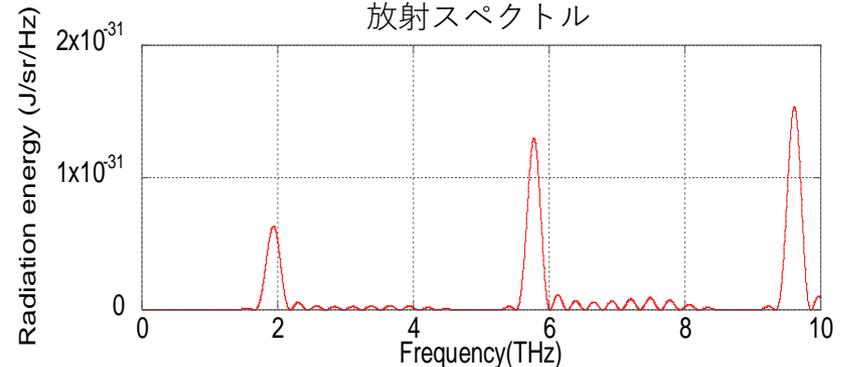
λ_u : 周期長 γ : 電子ビームエネルギー
 B_u : ピーク磁場 K : 偏向パラメータ
 θ : ビーム軸に対する観測角

$K = 3.51$
 $E = 22 \text{ MeV}$

単一電子からの放射電場



単一電子からの放射スペクトル

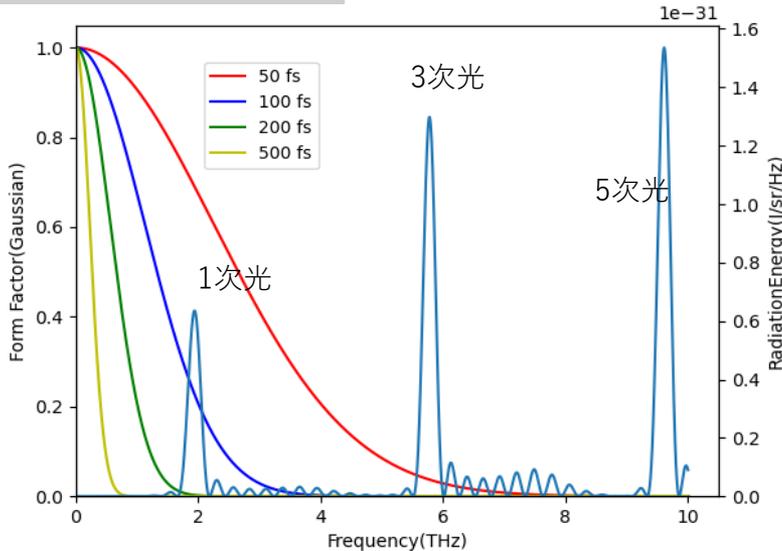


コヒーレントアンジュレータ放射

縦方向

$$F_L(\lambda) = \left| \exp\left(-2\pi^2 \frac{\sigma_b^2}{\lambda^2}\right) \right|^2$$

$K = 3.52, E = 22 \text{ MeV}$



t-ACTS

電子ビーム: $\sigma_b \approx 80 \text{ fs}$
 アンジュレータ放射: $\lambda = 155 \text{ [\mu m]}$

$$F_L = 0.40$$

横方向

$$F_T = \left| \exp\left(-\frac{\sigma_T^2(k_x^2 + k_y^2)}{2}\right) \right|^2$$

$$k_x^2 + k_y^2 = (2\pi \sin \theta / \lambda)^2$$

Angular spread: $\theta^2 = \frac{\lambda}{2N\lambda_u} + \sigma'_B{}^2$

(λ_u : アンジュレータ周期長、 σ'_B : 電子ビーム角度拡がり)

Source size: $\sigma_T^2 = \frac{\lambda \cdot N\lambda_u}{8\pi^2} + \sigma_B^2$

(σ_B : 電子ビームサイズ)

t-ACTS

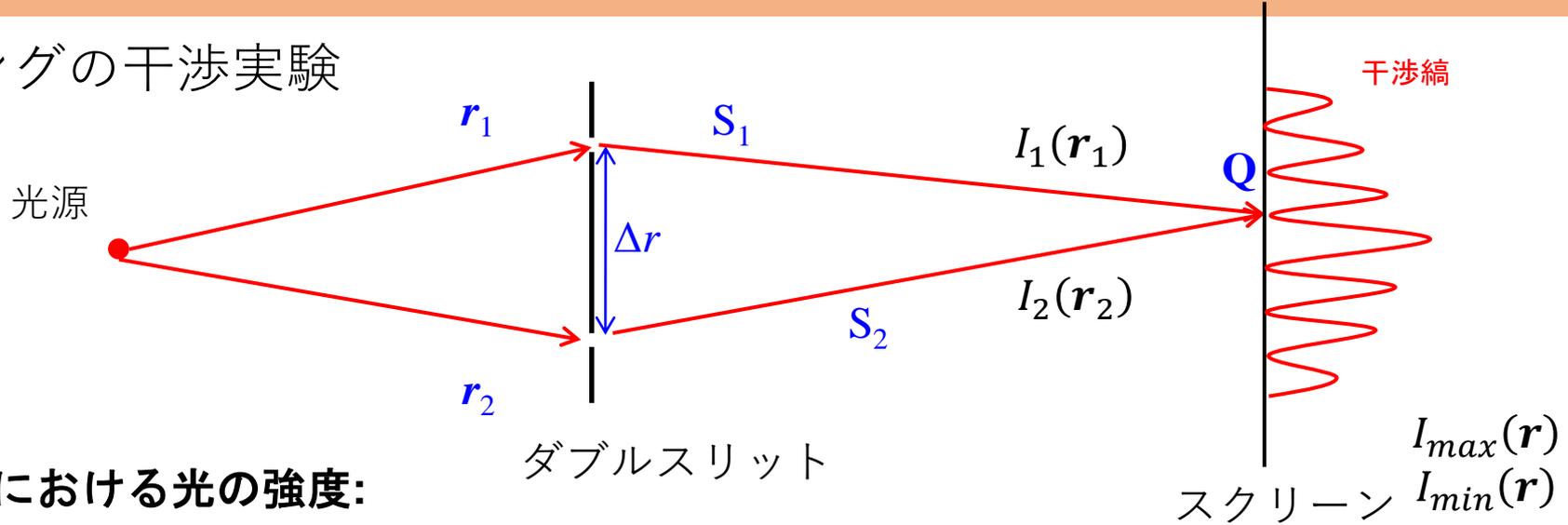
電子ビーム: $E = 22 \text{ MeV}$ $\gamma\varepsilon_T = 5 \text{ [mm mrad]}$
 $\sigma_B = 0.29 \text{ [mm]}$ $\sigma'_B = 0.29 \text{ [mrad]}$
 アンジュレータ: $\lambda_u = 0.08 \text{ [m]}$ $N = 7$
 アンジュレータ放射: $\lambda = 155 \text{ [\mu m]}$

$$\theta = 12 \text{ mrad}, \sigma_T = 1.4 \text{ mm}$$

$$F_T = 0.76$$

ダブルスリット干渉計

ヤングの干渉実験



✓ 点Qにおける光の強度:

$$I(\mathbf{r}) = I_1(\mathbf{r}_1) + I_2(\mathbf{r}_2) + 2\sqrt{I_1(\mathbf{r}_1)I_2(\mathbf{r}_2)} \operatorname{Re} \gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau) \quad \text{Here, } \tau = (s_1 - s_2)/c$$

✓ 複素コヒーレンス度

Mutual coherence function

$$\gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau) = \frac{\langle E^*(\mathbf{r}_1, t)E(\mathbf{r}_2, t + \tau) \rangle}{\sqrt{\langle |E(\mathbf{r}_1, t)|^2 \rangle \langle |E(\mathbf{r}_2, t)|^2 \rangle}} \quad \leftarrow \mathbf{0 \sim 1}$$

✓ Visibility:

$$V(\mathbf{r}) = \frac{I_{\max}(\mathbf{r}) - I_{\min}(\mathbf{r})}{I_{\max}(\mathbf{r}) + I_{\min}(\mathbf{r})} = \frac{2\sqrt{I_1(\mathbf{r}_1)I_2(\mathbf{r}_2)} |\gamma(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \tau)|}{I_1(\mathbf{r}_1) + I_2(\mathbf{r}_2)}$$

コヒーレント: $|\gamma| = 1$
 インコヒーレント: $|\gamma| = 0$
 部分コヒーレント: $0 < |\gamma| < 1$

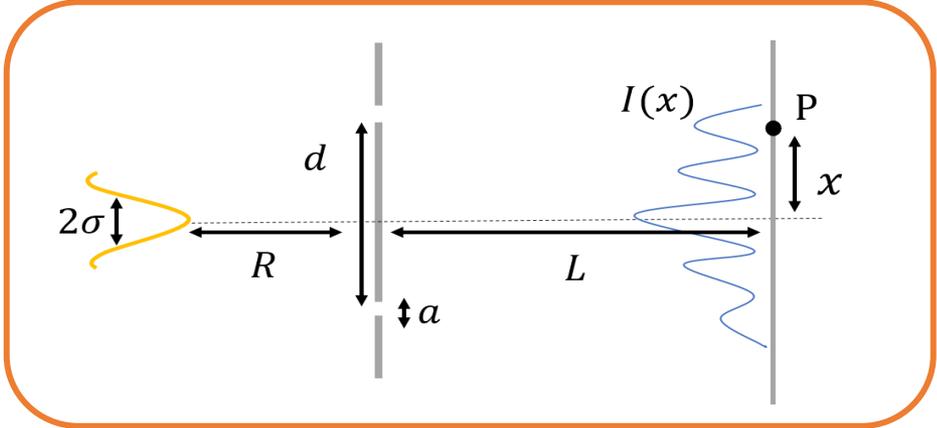
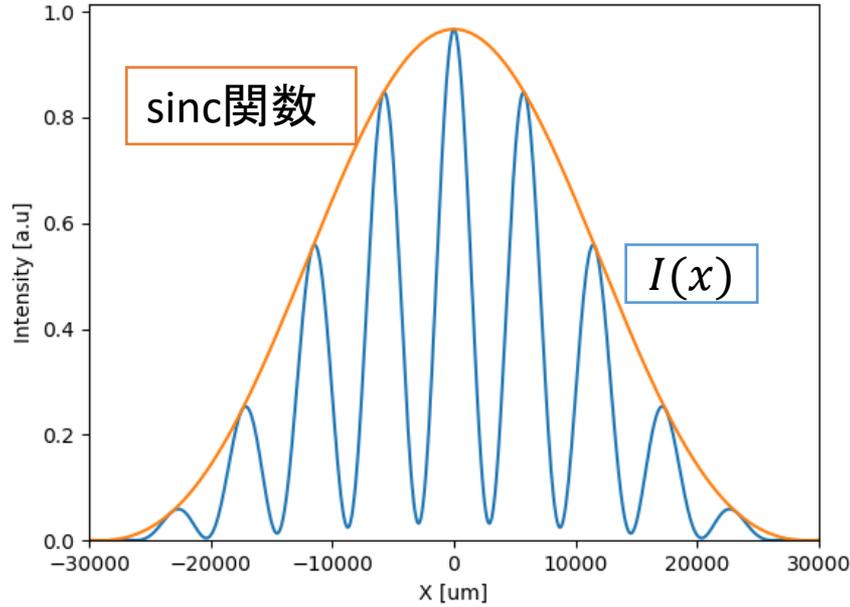
矩形ダブルスリットによる干渉縞

干渉縞の強度分布

$$I(x) = I_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda L} x \right) \left[1 + |\mu_{12}| \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda L} x + \phi \right) \right]$$

ex.) 干渉縞

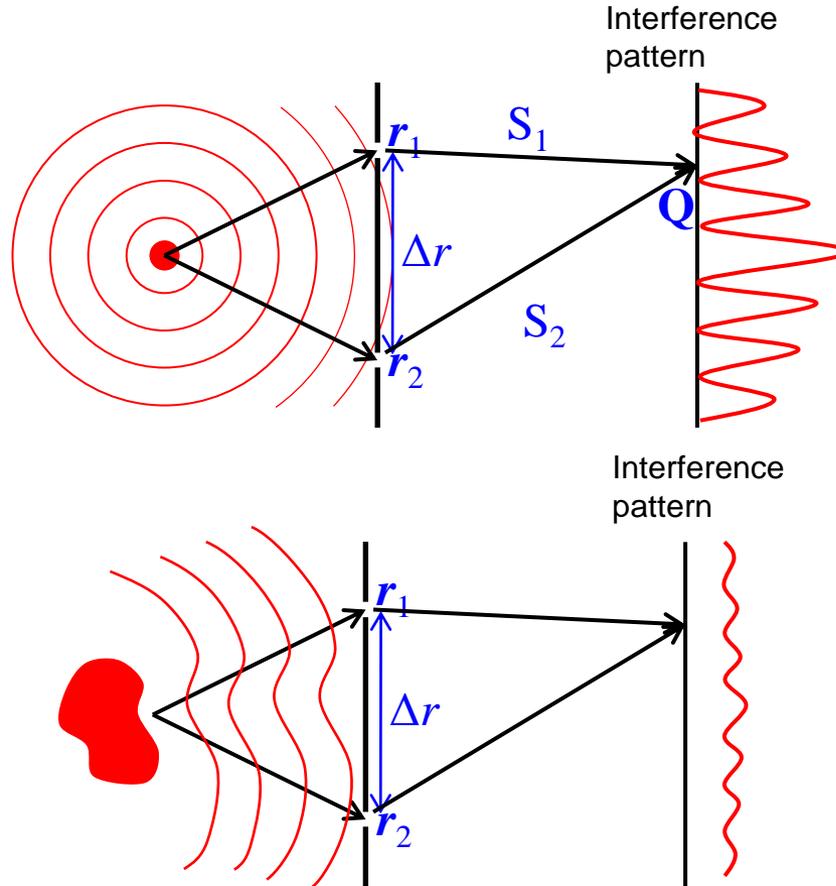
($a = 2\text{mm}$, $\lambda = 156\mu\text{m}$
 $L = 375\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$, $\mu_{12} = 0.8$)



干渉パターン
 包絡線形状 : a , λ , L
 干渉縞間隔 : d , λ , L

干渉縞と光源サイズの関係

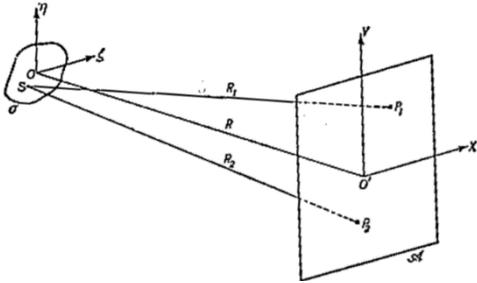
Spatially coherent



空間コヒーレンス度は光源の大きさによって変化する

The van Cittert-Zernike theorem

複素コヒーレンス度 μ_{12} は光源の強度分布をフーリエ変換し、それを正規化したものに等しい。



$$\mu_{12} = \frac{e^{i\psi} \iint_{\sigma} I(\zeta, \eta) e^{-ik(p\zeta + q\eta)} d\zeta d\eta}{\iint_{\sigma} I(\zeta, \eta) d\zeta d\eta}$$

(M.Born et al., 草川徹・横田英嗣(訳), “光学の原理III” 1975.)

$$p = (X_1 - X_2)/R, q = (Y_1 - Y_2)/R, \psi = k[(X_1^2 + Y_1^2) - (X_2^2 + Y_2^2)]/2R$$

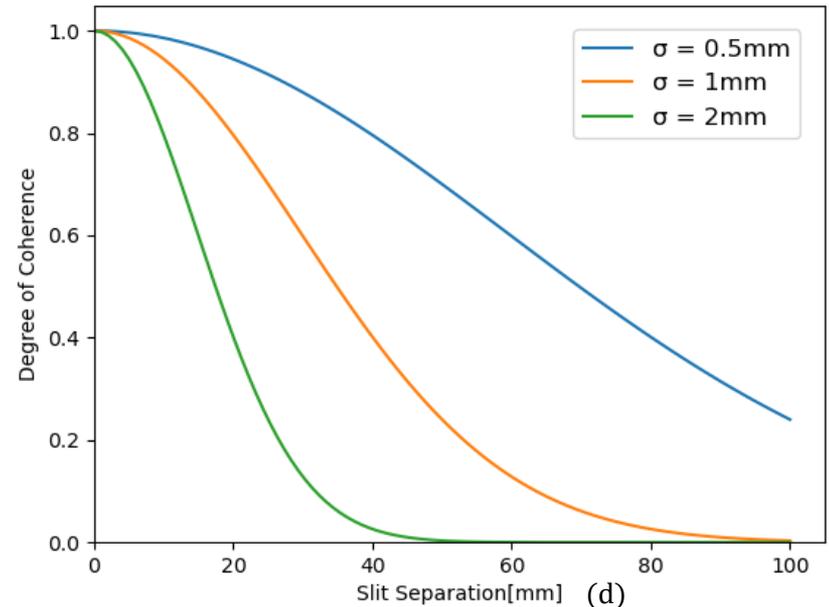
ex.)電荷分布がガウス分布の場合

空間コヒーレンス度： $|\mu_{12}| = \exp \left[-2 \left(\frac{\pi \sigma d}{\lambda R} \right)^2 \right]$

RMSビームサイズ： $\sigma = \frac{\lambda R}{\pi d} \sqrt{\frac{1}{2} \ln \frac{1}{|\mu_{12}|}}$

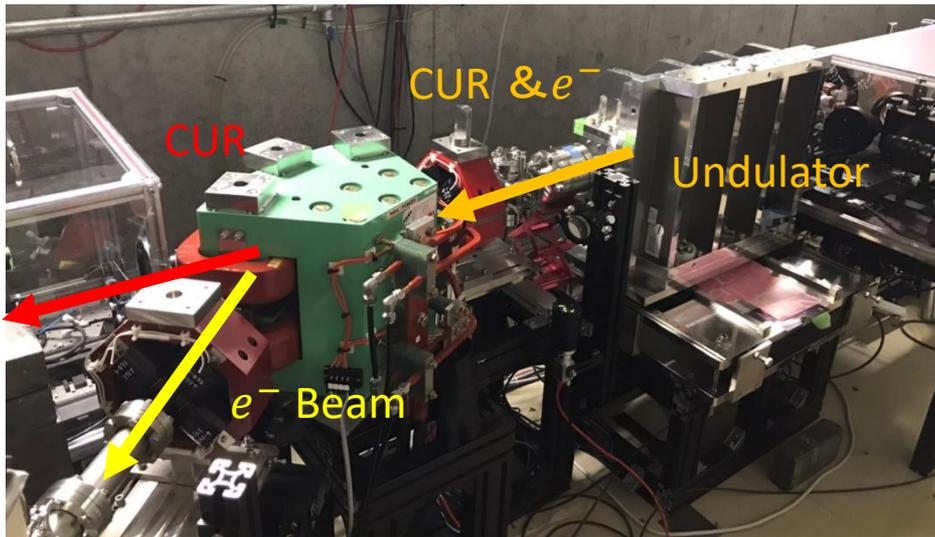
d: スリット間隔 R: 周期長

σ : ビームサイズ λ : 放射波長



t-ACTSにおける光源サイズ測定試験実験

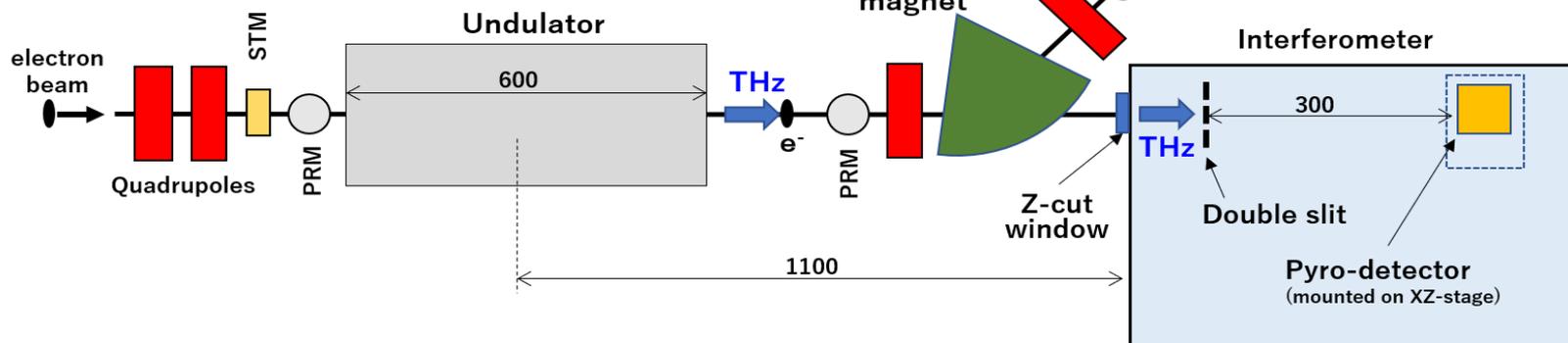
- t-ACTSで極短電子ビームを生成し、コヒーレントアンジュレータ放射を発生
- 偏向電磁石の下流に設置した、ダブルスリット干渉計でビームサイズを計測



ビームパラメータ

| | |
|---------------------------------|-------------|
| Beam energy | 22 MeV |
| Emittance($\gamma\epsilon_T$) | ~ 5 mm mrad |
| Bunch length (σ_b) | ~ 80 fs |
| Bunch charge | 4 pC /bunch |

t-ACTS下流部の実験セットアップ



アンジュレータ

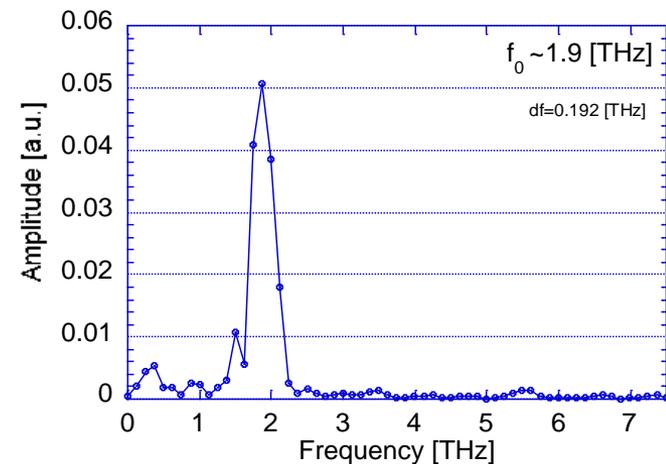


アンジュレータ
(水平偏光)

- 交叉型アンジュレータとして開発したうちの1台を使用。

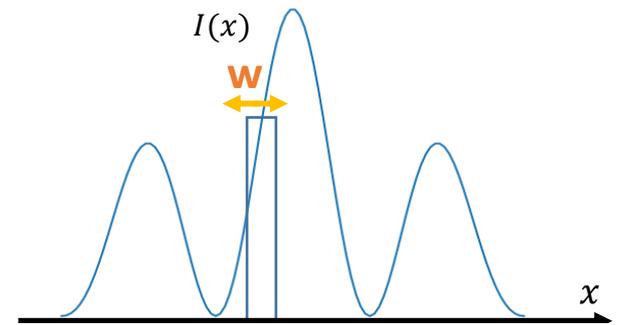
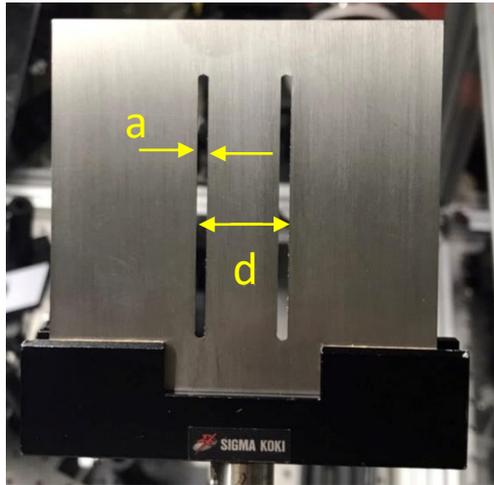
| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Magnet array | Halbach type |
| Period length λ_u | 80 mm |
| Number of periods N | 7 |
| Magnet material | NdFeB ($B_r=1.22$ T) |
| Gap | 33 mm (fix) |
| Peak magnetic field | 0.471 T ($K=3.52$) |

- マイケルソン干渉計スペクトルを測定



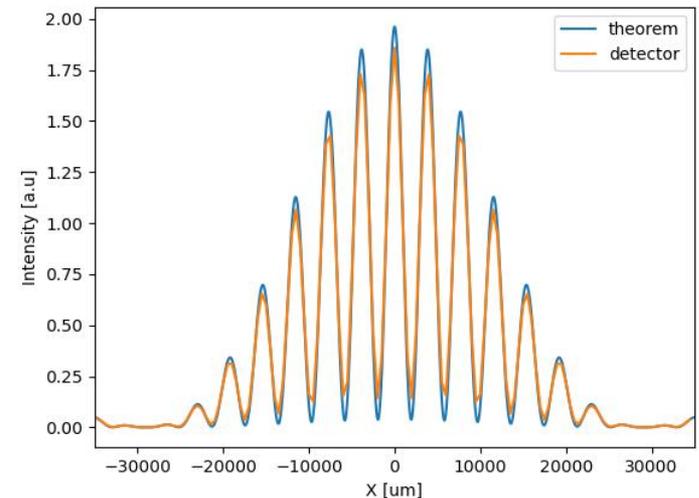
ダブルスリットとテラヘルツ検出器

- CURの干渉測定には、常温で使用可能な焦電検出器を使用した。
- 検出器ヘッドにもスリットを装着した。



ダブルスリット
 $a: 2\text{mm}$
 $d: 5, 10, 15\text{mm}$

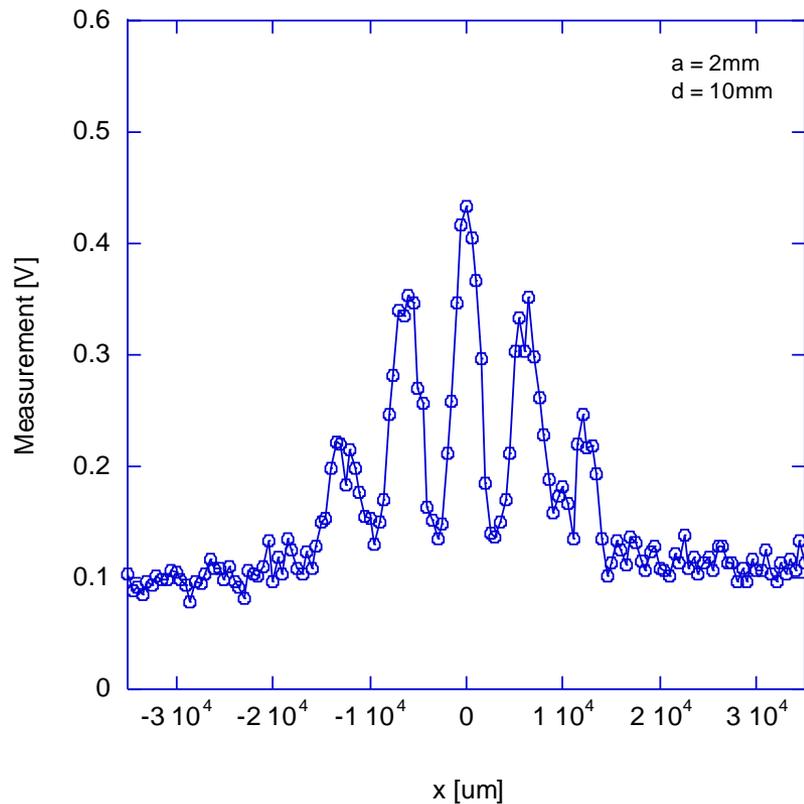
焦電素子
 THz10
 検出有効径: $\phi 10\text{mm}$



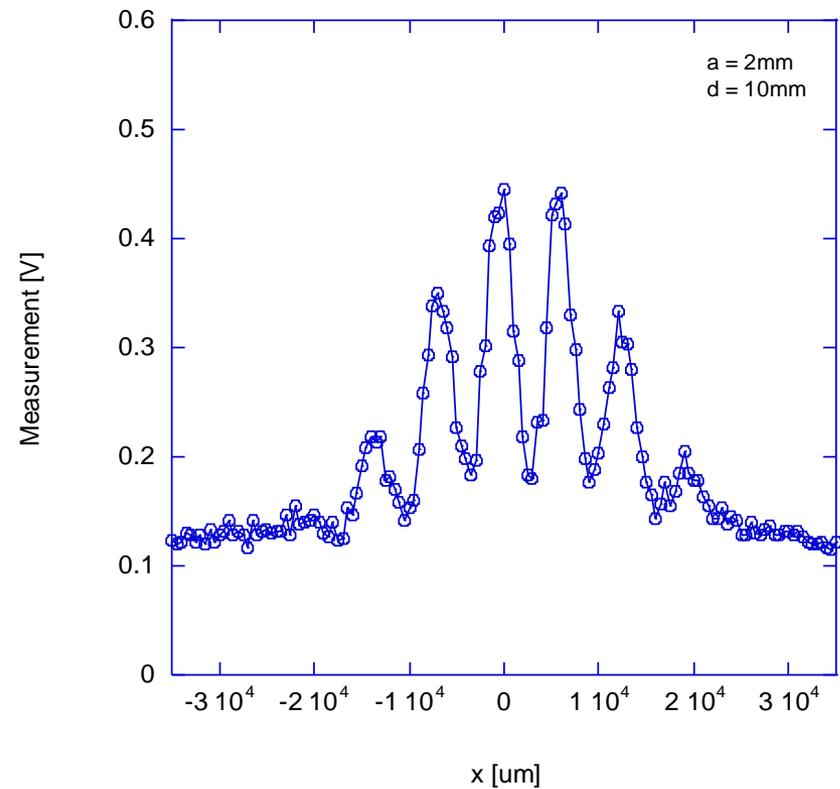
測定結果

$$I(x) = I_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda L} x \right) \left[1 + |\mu_{12}| \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda L} x + \phi \right) \right] + C$$

水平方向



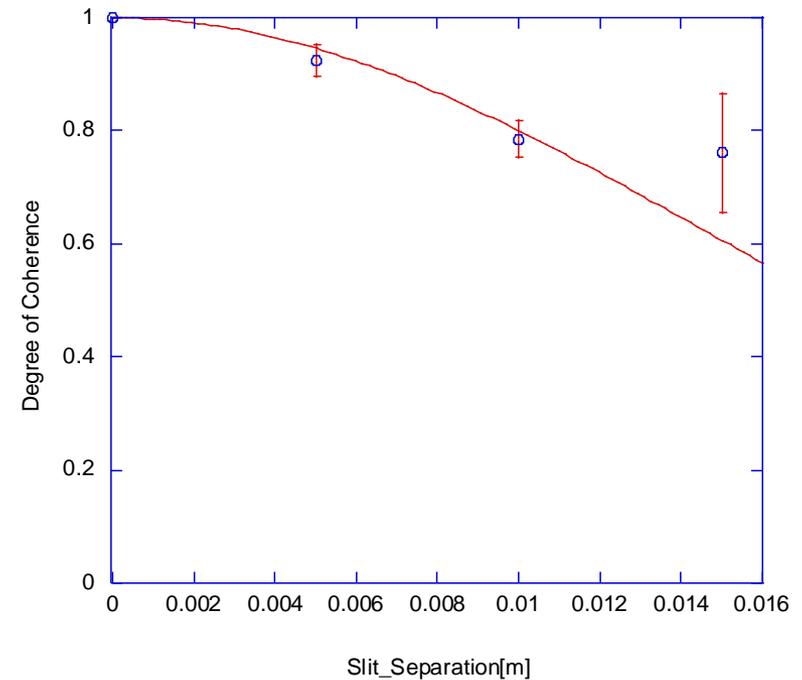
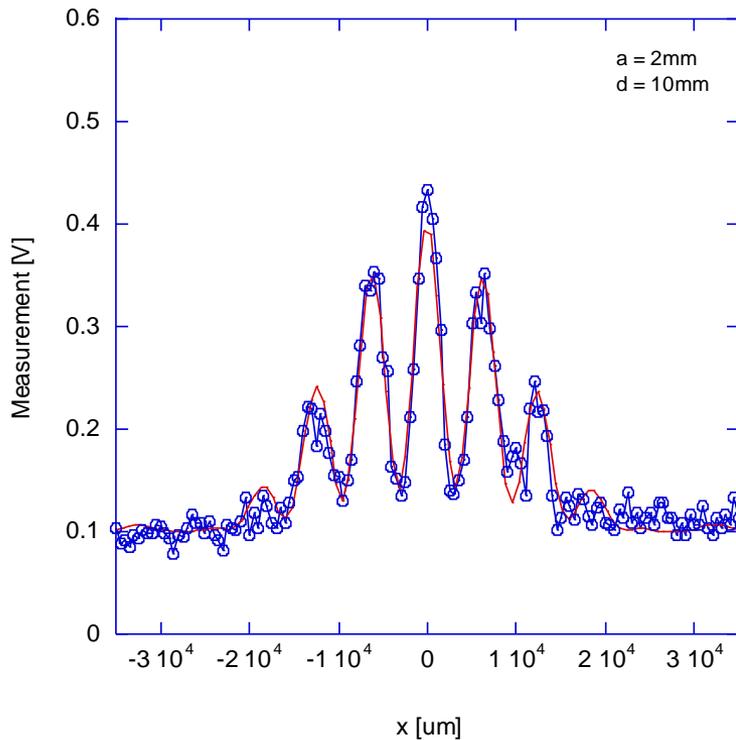
垂直方向



空間コヒーレンス度と水平方向光源サイズの測定

$$I(x) = I_0 \operatorname{sinc}^2 \left(\frac{\pi a}{\lambda L} x \right) \left[1 + |\mu_{12}| \cos \left(\frac{2\pi d}{\lambda L} x + \phi \right) \right] + C$$

$$\mu_{12} = \exp \left[-2 \left(\frac{\pi d \sigma}{\lambda R} \right)^2 \right]$$



検出器による悪化を補正  $|\mu_{12}| = 0.79 \pm 0.03$

$\sigma = 2.2 \pm 0.2\text{mm}$

水平方向の電子ビームサイズ測定とその評価

1. ダブルスリットで測定された光源サイズから電子ビームを求める。

$$\sigma_B^2 = \sigma_T^2 - \frac{\lambda_R \cdot N \lambda_u}{8\pi^2}$$

$$\sigma_T = 2.2\text{mm}$$



ビームサイズ: $\sigma_B = 1.9\text{mm}$

2. アンジュレータ直前での
Qスキャンによるビームサイズ
水平方向規格化エミッタンス
: $4.95\text{ mm} \cdot \text{mrad}$

$$\beta_x: 6.90\text{ m}$$



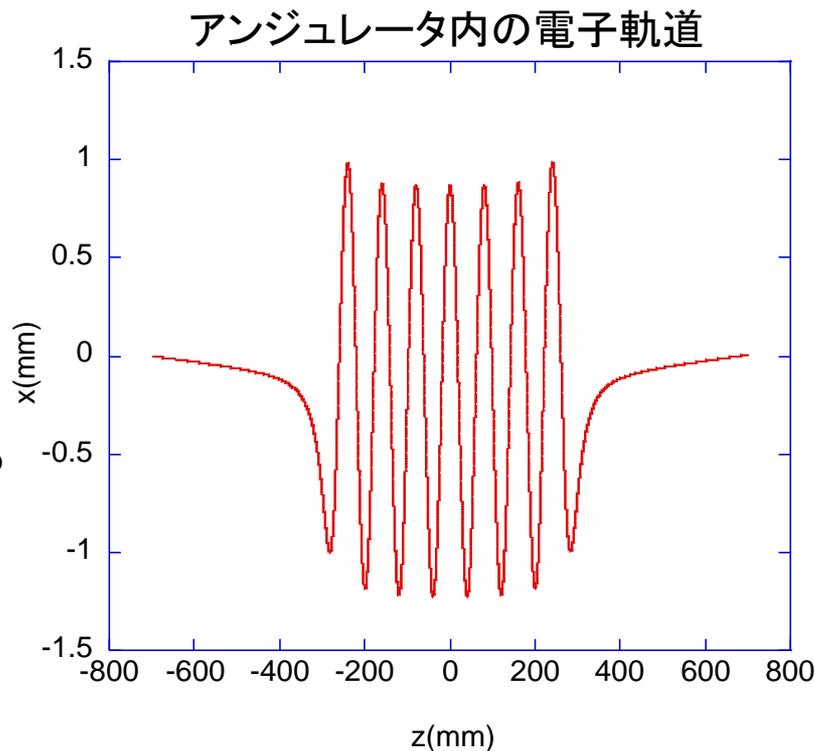
ビームサイズ: $\sigma_B = 0.89\text{mm}$

3. アンジュレータ内での軌道変位を加える

$$\sigma_x = 0.74\text{ mm}$$



ビームサイズ: $\sigma_B = 1.2\text{mm}$



まとめ

- t-ACTSにおいて、テラヘルツ領域のアンジュレータ超放射の光源サイズ測定実験をダブルスリットを用いて試験的に行った。
- 測定の結果、電子ビームの水平方向サイズ(RMS)は約1.9mmであった。
- アンジュレータ直前でのQスキャンの結果より、アンジュレータ中の平均のビームサイズは約0.89mmと予測された。
- 測定値と計算値の差異の原因としてはアンジュレータ内でのビーム軌道変位が考えられ、その効果を考慮するとビームサイズは約1.2mmと求められた。
- 放射源であるアンジュレータと観測点の距離を離すなど、測定セットアップの改良を行う予定である。