



TOHOKU
UNIVERSITY

交叉型アンジュレータからの THz域コヒーレント放射の偏光特性

齊藤寛峻、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、二宮慎吾、森田希望、山田悠樹、濱広幸

東北大学電子光理学研究センター

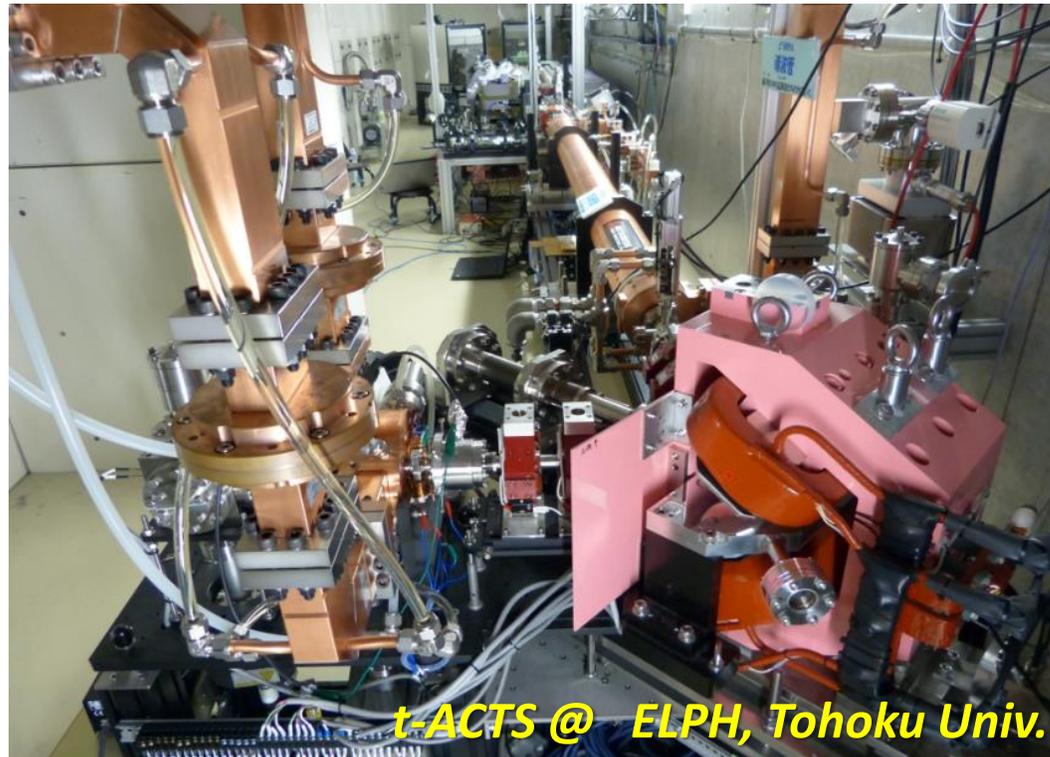
第15回日本加速器学会年会
2018年8月10日@ハイブ長岡

- ① はじめに
- ② 研究目的と課題
- ③ アンジュレータの設計
- ④ 交叉型アンジュレータ放射の偏光
- ⑤ まとめと今後の課題

はじめに

■ t-ACTS (test Accelerator as Coherent THz Source)

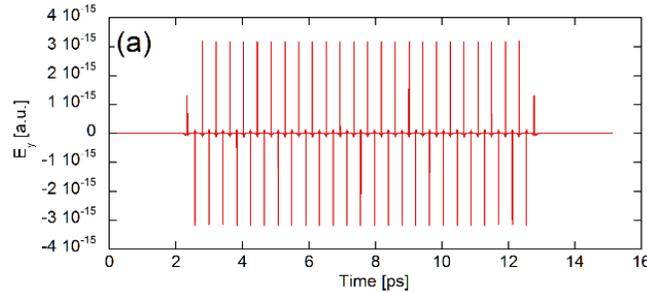
- 極短電子バンチ生成 ($\lesssim 100$ fs (RMS))
- 加速器ベースのコヒーレントTHz光源の研究開発
 - ✓ コヒーレント遷移放射 ($\lesssim 4$ THz)
 - ✓ コヒーレントアンジュレータ放射 (2.6~3.6 THz)



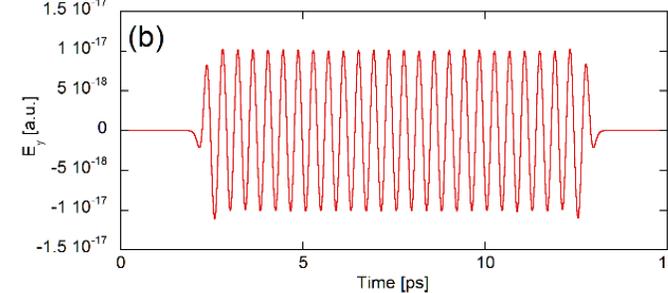
交叉型アンジュレータを用いた偏光可変THz光源

✓ 短バンチからのコヒーレントアンジュレータ放射の利用

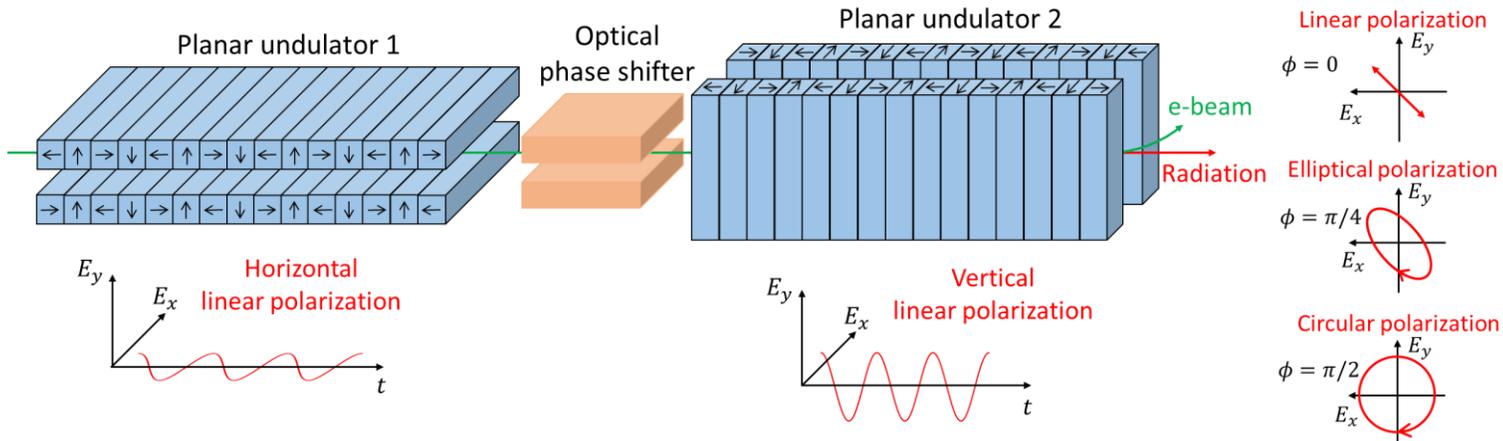
単一電子



$\sigma_z = 200\text{fs}$



■ 交叉型アンジュレータ



- 2台の平面型アンジュレータで互いに直交する直線偏光放射を発生
 - 2つの放射を重ね合わせ (光学移相器で位相差を調整)
 - 任意の偏光状態を生成

研究目的: 交叉型アンジュレータを用いた偏光可変コヒーレントTHz放射の生成

■ アンジュレータの設計

■ 交叉型アンジュレータの放射、偏光の評価(理論計算)

- 偏光の放射角依存性

本発表の内容

■ 光学移相器の設計

- 光遅延ライン
- 電子ビームバイパスライン

2台目のアンジュレータへの入射調整

■ 偏光測定系の構築

アンジュレータの設計

メインブロックサイズ(x, y, z) 60 mm × 30 mm × 20 mm

周期長、周期数 80 mm、7

全長 0.58676 m

磁石材質 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$

残留磁束密度 1.09 T

ギャップ 33 mm (最小)

ピーク磁場 0.454 T (最大)

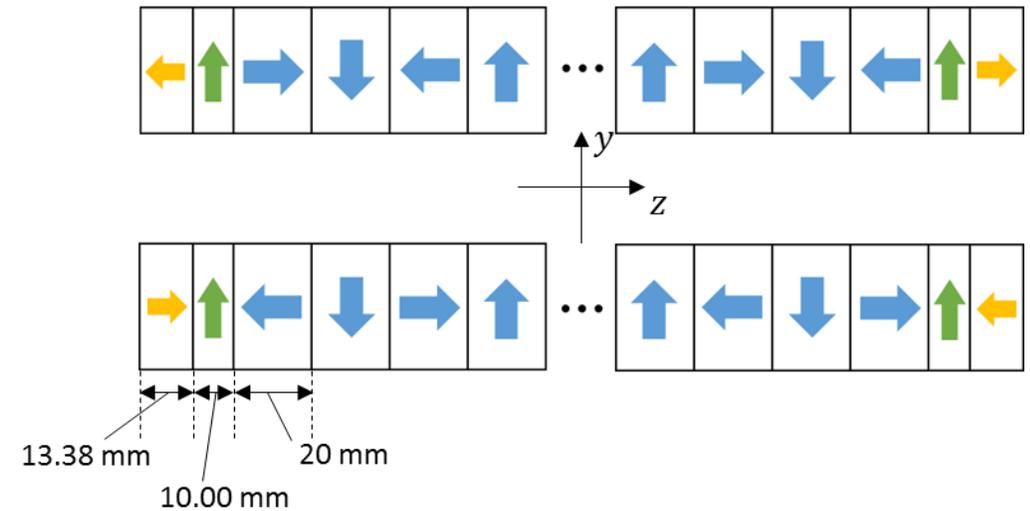
K値 3.39 (最大)

アンジュレータ放射基本周波数 2.06 THz ($g = 33$ mm)

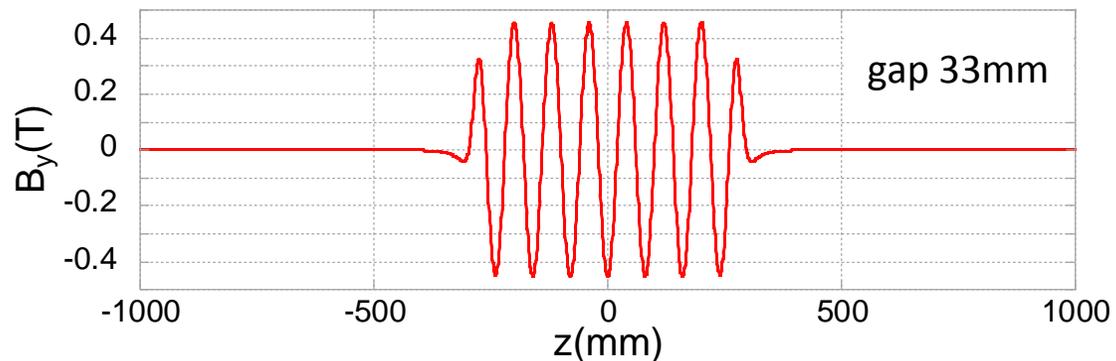
✓ 要件

$$E = 22 \text{ MeV}, f_r = 2 \text{ THz}, L_u < 1 \text{ m}$$

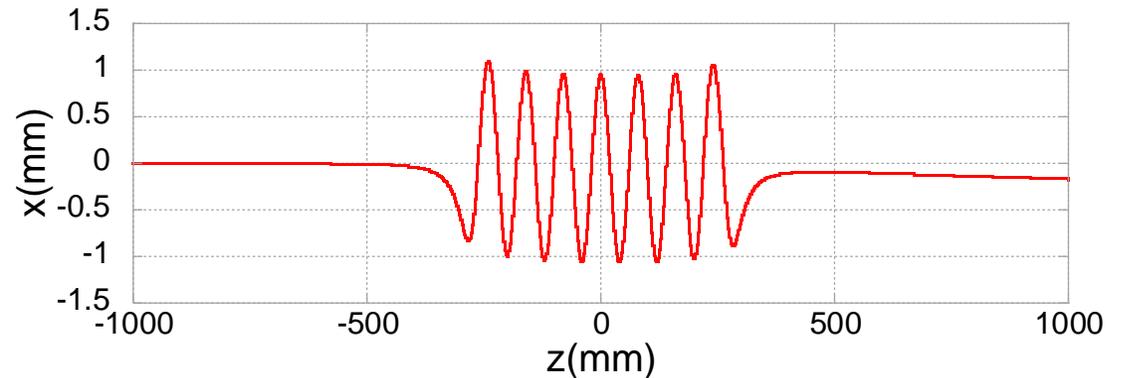
Halbach配列



軸上磁場



電子軌道

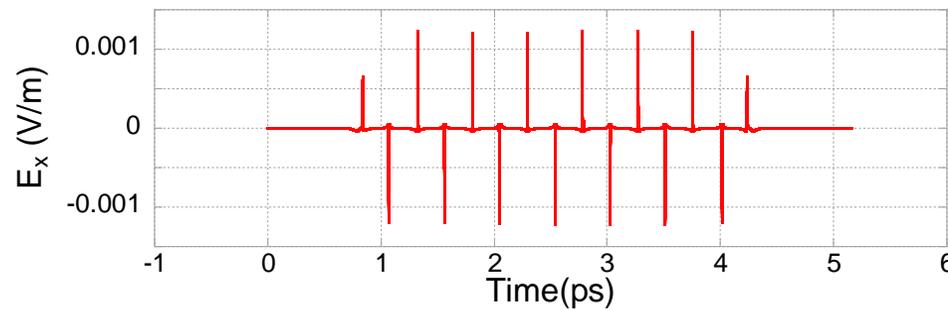


アンジュレータ放射(単一電子)

設計したアンジュレータの放射特性

■ 放射電場

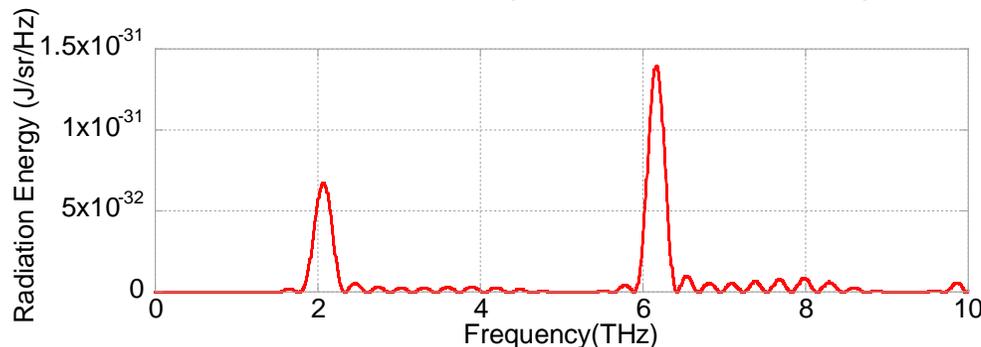
$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{e}{4\pi\epsilon_0 c} \left[\frac{\vec{n} \times \{(\vec{n} - \vec{\beta}) \times \dot{\vec{\beta}}\}}{R(1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta})^3} \right]_{\text{ret}}$$



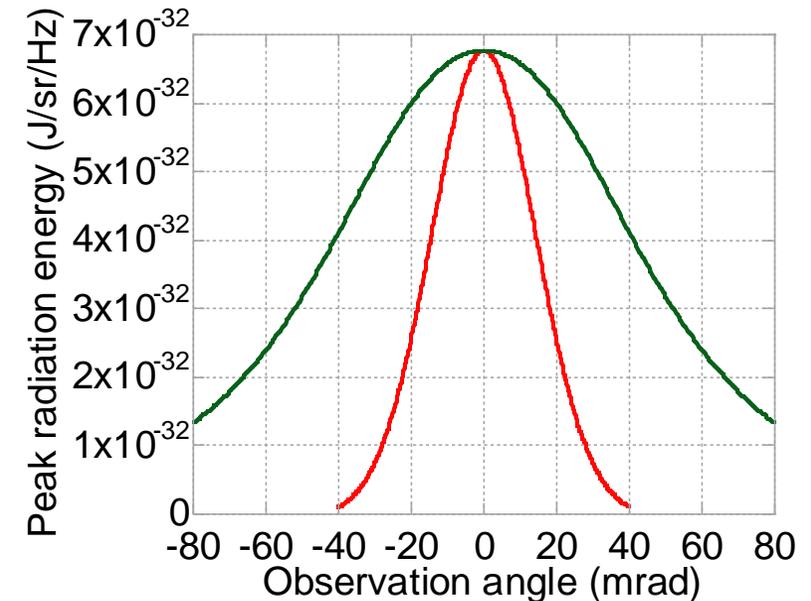
■ 周波数スペクトル

↓ フーリエ変換

$$\frac{d^2W}{d\Omega d\omega} = \epsilon_0 \frac{c}{\pi} \left| \int_{-\infty}^{\infty} R(t_r) \vec{E}(t) e^{-i\omega t} dt \right|^2$$



■ 空間分布(基本波)



赤線: x方向(電子の振動方向)

角度広がり 34 mrad (FWHM)

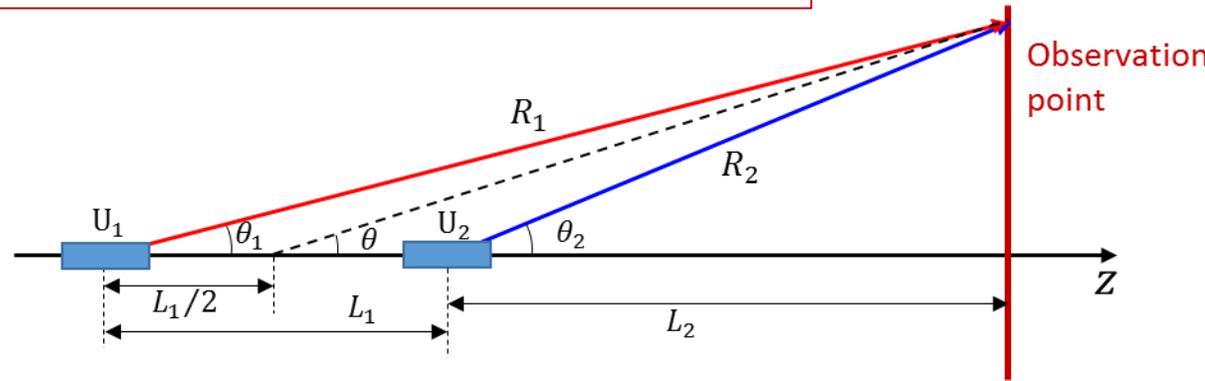
緑線: y方向

角度広がり 96 mrad (FWHM)

偏光の放射角依存性に関する考察①

2つの直線偏光を重ね合わせたときに得られる偏光について考察

- ① アンジュレータ放射波長 $\lambda(\theta)$
- ② 観測面までの光路長差 $L_\delta(\theta)$
- 交叉型アンジュレータ放射の偏光は放射角依存性を持つ



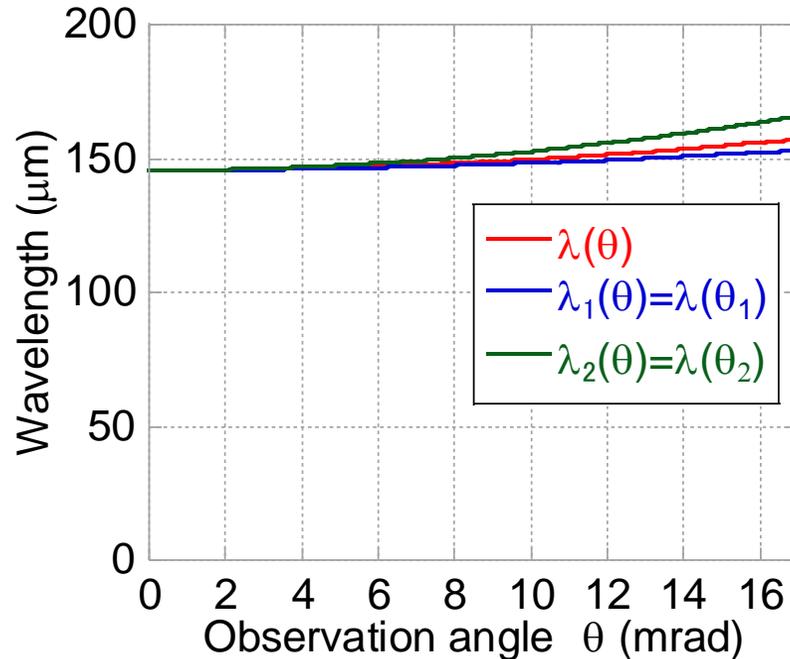
① アンジュレータ放射波長

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

- $\lambda(0) = 146 \mu\text{m} \rightarrow \lambda(17 \text{ mrad}) = 157 \mu\text{m}$
(+8 %)
- $\Delta\lambda(17 \text{ mrad}) = \lambda_2 - \lambda_1 = 13 \mu\text{m}$
→ $7 \times \Delta\lambda = 91 \mu\text{m} \approx 0.6\lambda$

偏光への影響は無視できない

放射波長の角依存性



- $L_3 \equiv L_1 - L_u = 2 \text{ m}$
($L_1 = 2.59 \text{ m}$)
- $L_2 = 4 \text{ m}$

17 = x方向アンジュレータ放射
角度広がりHWHM 8

② 光路長差

➤ U_1, U_2 から観測点までの光路長差

$$\Delta R_{12}(\theta) = R_1 - R_2 = \frac{L_1 + L_2}{\cos \theta_1} - \frac{L_2}{\cos \theta_2}$$

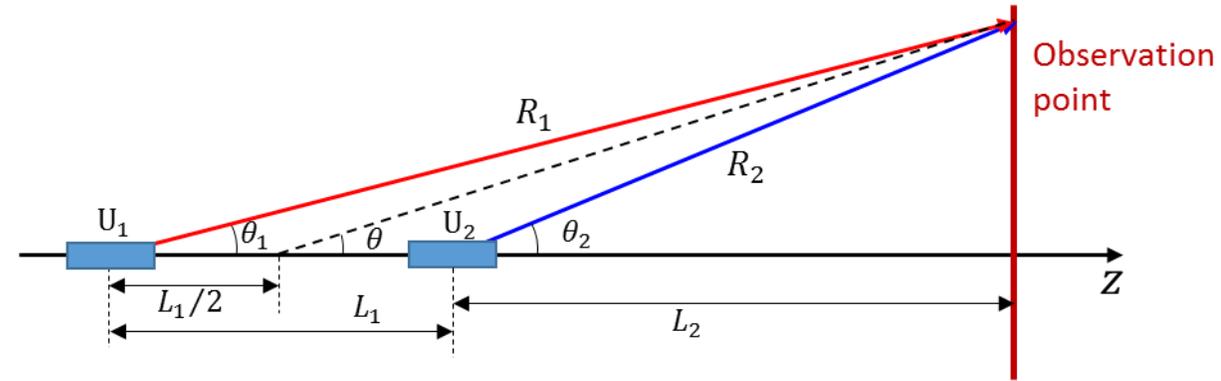
➤ 観測角 θ と軸上 ($\theta = 0$) における ΔR_{12} の差

$$L_\delta(\theta) \equiv \Delta R_{12}(\theta) - \Delta R_{12}(0) = \frac{L_1(1 - \cos \theta_1)}{\cos \theta_1} + L_2 \left(\frac{1}{\cos \theta_1} - \frac{1}{\cos \theta_2} \right)$$

$\theta = 0$ のときに比べ $L_\delta(\theta)$ だけ
余分に光路長差 (= 位相差) が発生

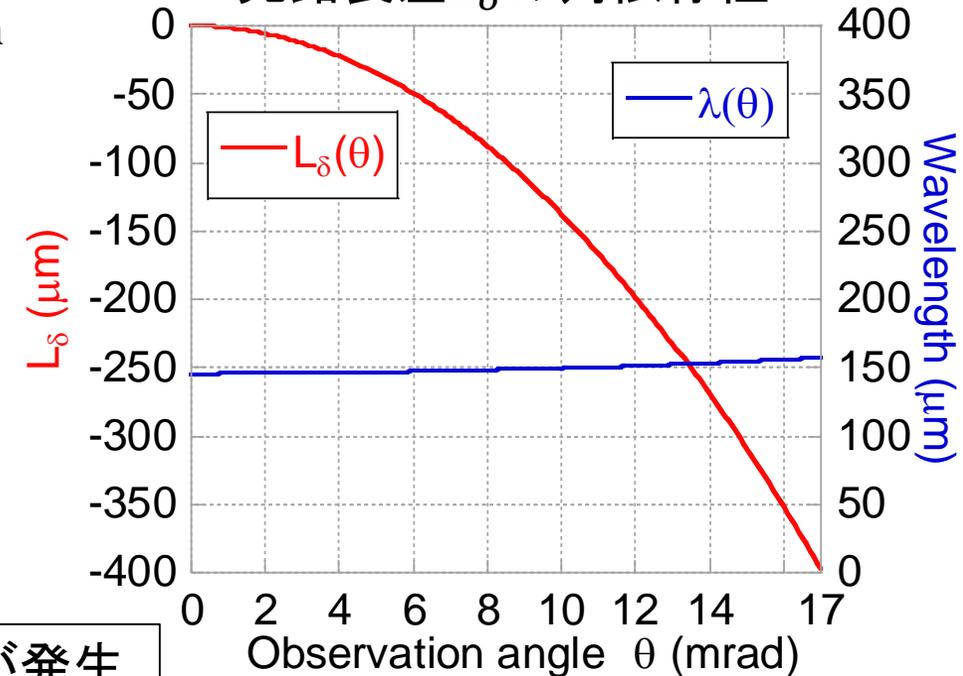
光路長差の角依存性が支配的な要因

アンジュレータ放射角度範囲内で放射波長の2倍以上の光路長差が発生
→ 偏光状態の角依存性を評価する必要性



- $L_3 = 2 \text{ m}$
- $L_2 = 4 \text{ m}$

光路長差 L_δ の角依存性



ストークスパラメータを用いた偏光の表現

放射光の偏光評価のため
ストークスパラメータを導入

- 偏光状態を表すストークスベクトルの4成分

$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$
 S_0 : 全偏光(全強度)
 S_1 : 水平偏光の相対強度
 S_2 : 45°偏光の相対強度
 S_3 : 右円偏光の相対強度

- 電磁波の強度の次元を持つ
→ 観測可能量

水平直線

$$S_{LHP} = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

垂直直線

$$S_{LVP} = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

45°直線

$$S_{L45P} = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

135°直線

$$S_{L135P} = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}$$

右円

$$S_{RCP} = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

左円

$$S_{LCP} = S_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} = (1 - P) \begin{pmatrix} S_0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + P \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix}$$

$P = 1$: 完全偏光
 $0 < P < 1$: 部分偏光
 $P = 0$: 無偏光

ストークスパラメータの定義

■ ストークスパラメータ

ストークスパラメータ	定義	完全単色光の場合
S_0	$2I_0$	$E_{0x}^2 + E_{0y}^2$
S_1	$2I_1 - 2I_0$	$E_{0x}^2 - E_{0y}^2$
S_2	$2I_2 - 2I_0$	$2E_{0x}E_{0y} \cos \delta$
S_3	$2I_3 - 2I_0$	$2E_{0x}E_{0y} \sin \delta$

$2I_0$: 全偏光成分の強度
 I_1 : 水平(x)偏光成分の強度
 I_2 : 45°偏光成分の強度
 I_3 : 右円偏光成分の強度

実際の観測では $I_0 \sim I_3$ を測定

■ 偏光度

偏光度	定義	値域
偏光度(P)	$\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2} / S_0$	$0 \leq P \leq 1$ 無偏光 完全偏光
直線偏光度(P_L)	$\sqrt{S_1^2 + S_2^2} / S_0$	$0 \leq P_L \leq 1$ 非直線偏光 直線偏光
円偏光度(P_C)	S_3 / S_0	$-1 \leq P_C \leq 1$ 左円偏光 右円偏光

E_{0x} : 電場水平偏光成分の振幅
 E_{0y} : 電場垂直偏光成分の振幅
 δ : 水平、垂直偏光成分の位相差

交叉型アンジュレータ放射の偏光評価

- ✓ アンジュレータ放射電場として7サイクルの正弦波(完全単色)を仮定

$$E_x(t) = E_{0x}(t)e^{i(k_x z - \omega_x t)} \quad E_{0x}(t) = \begin{cases} E_{0x} & (t_{x1} \leq t \leq t_{x2}) \\ 0 & (t < t_{x1}, t_{x2} < t) \end{cases}$$

$$E_y(t) = E_{0y}(t)e^{i(k_y z - \omega_y t + \delta)} \quad E_{0y}(t) = \begin{cases} E_{0y} & (t_{y1} \leq t \leq t_{y2}) \\ 0 & (t < t_{y1}, t_{y2} < t) \end{cases}$$

- ✓ 各偏光成分の強度を解析的に計算

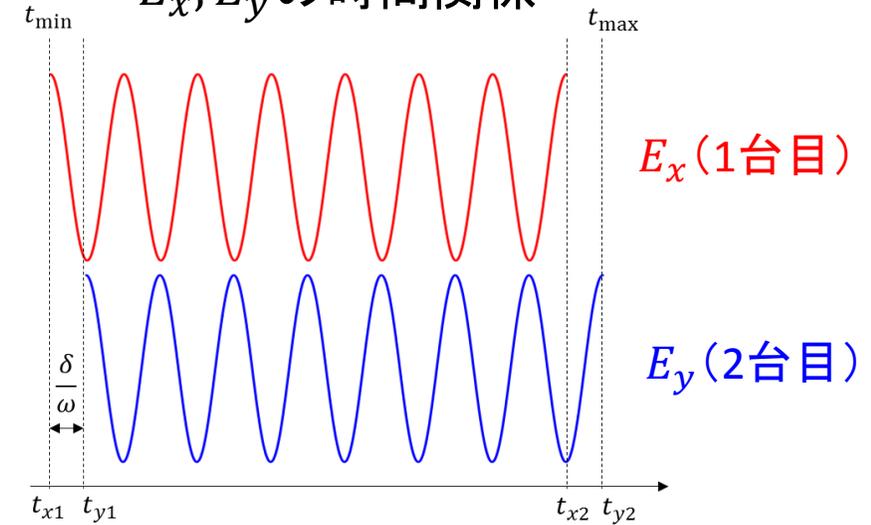
$$2I_0(\theta) = \frac{1}{T} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \left\{ E_{0x}(t)^2 \cos^2(k_x(\theta)z - \omega_x(\theta)t) + E_{0y}(t)^2 \cos^2(k_y(\theta)z - \omega_y(\theta)t + \delta(\theta)) \right\} dt$$

$$I_1(\theta) = \frac{1}{T} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} E_{0x}(t)^2 \cos^2(k_x(\theta)z - \omega_x(\theta)t) dt$$

$$I_2(\theta) = \frac{1}{2T} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \left\{ E_{0x}(t) \cos(k_x(\theta)z - \omega_x(\theta)t) + E_{0y}(t) \cos(k_y(\theta)z - \omega_y(\theta)t + \delta(\theta)) \right\}^2 dt$$

$$I_3(\theta) = \frac{1}{2T} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} \left\{ E_{0x}(t) \cos(k_x(\theta)z - \omega_x(\theta)t) + E_{0y}(t) \sin(k_y(\theta)z - \omega_y(\theta)t + \delta(\theta)) \right\}^2 dt$$

観測点における電場成分
 E_x, E_y の時間関係



■ 観測角 θ における位相差

$$\delta(\theta) = \delta_0 + \delta_1(\theta)$$

$$\delta_1(\theta) \equiv -\frac{2\pi L_\delta(\theta)}{\lambda_y(\theta)}$$

δ_0 : 軸上における位相差

$I_0 \sim I_3 \rightarrow$ ストークスパラメータ ($S_0 \sim S_3$) \rightarrow 偏光度

偏光度の放射角依存性

● 計算条件

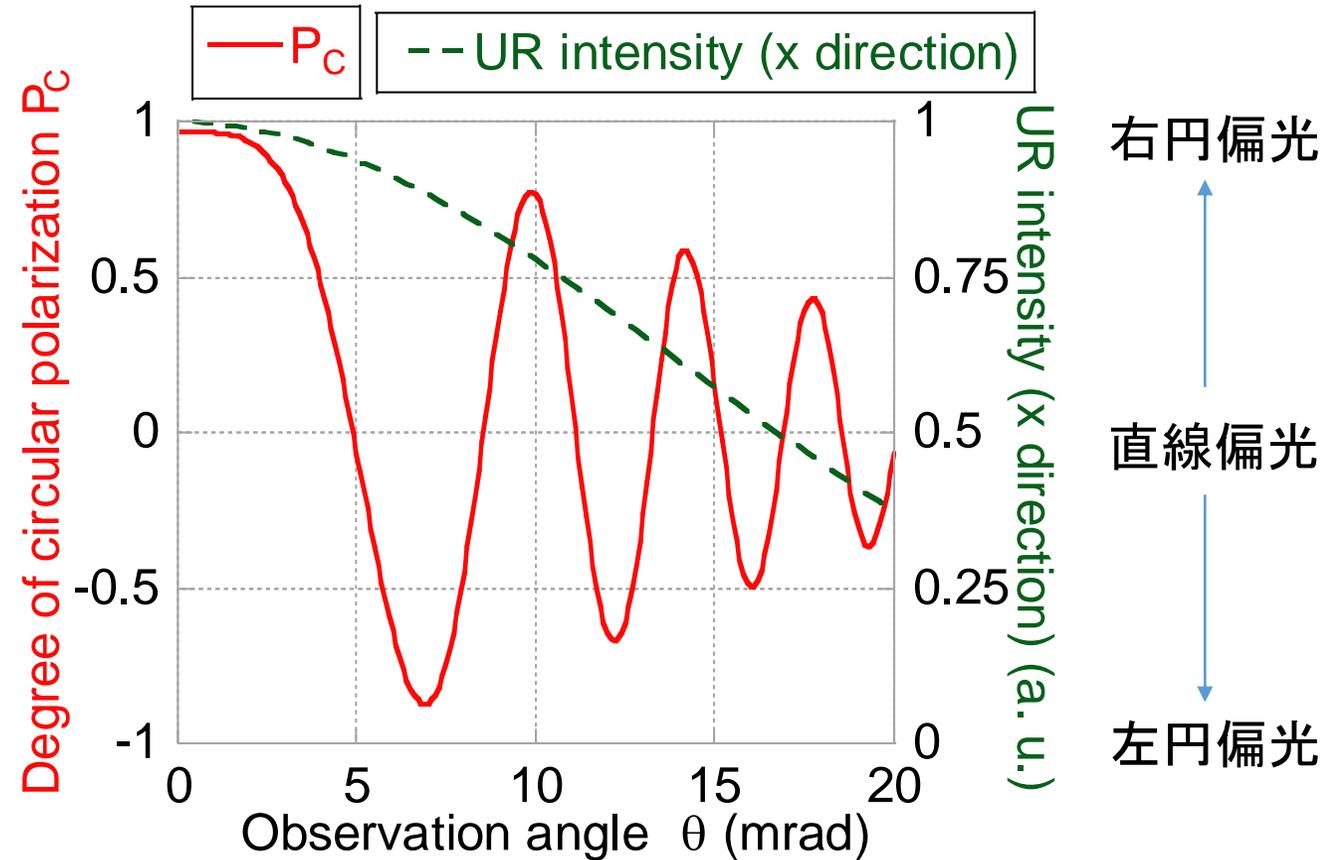
- $L_3 = 2$ m
- $L_2 = 4$ m
- $\delta_0 = \pi/2$ (軸上で右円偏光)
- $E_{0x} = E_{0y}$ (水平、垂直成分の振幅は同じ)

● 観測角が大きくなるにつれ偏光度が変化

- 約 5 mrad $\delta_0 + \pi/2$ 135°直線
- 約 7 mrad $\delta_0 + \pi$ 左円
- 約 10 mrad $\delta_0 + 2\pi$ 右円

- 円偏光度最大値 = $0.96 < 1$
(2成分が重ならない領域が生じるため)

円偏光度の角度依存性



理想的な偏光制御ができる角度範囲 < アンジュレータ放射の角度広がり

$P_C \geq 0.9$ が得られるのは $|\theta| \lesssim 2.5$ mrad

まとめ

■ 交叉型アンジュレータを用いた偏光可変THz光源の検討を行った。

2つの直交する偏光を持つコヒーレントアンジュレータ放射を生成

→ 光学移相器で位相差を調整し重ね合わせ → 偏光制御

● アンジュレータの設計を行った。

- 要件: ビームエネルギー22 MeV、放射周波数 2 THz、全長 < 1 m

- 設計パラメータ:

全長約0.59 m(周期長80 mm、周期数7)、 $K=3.39$ → 基本周波数2.06 THz

放射の角度広がり(FWHM) x 方向34 mrad y 方向96 mrad

● 交叉型アンジュレータ放射の偏光について考察を行った。

- 偏光は放射角依存性を持つ(約10 mradで 2π 変化)

- 理想的な偏光制御ができる角度範囲 < アンジュレータ放射の角度広がり

$P_C \geq 0.9$ の範囲は $|\theta| \lesssim 2.5$ mrad

- アンジュレータの製作
 - ・ 今年度内の完成を目指す

- 移相器の詳細設計
 - ・ 2台目のアンジュレータへのビーム入射条件調整
 - ・ アクロマティックなビーム輸送

- 放射、偏光計算
 - ・ 任意の初期分布を持つバンチからのアンジュレータ放射計算コードの開発
 - ・ アンジュレータ放射電場(非正弦波)の場合の偏光計算
 - ・ エネルギースプレッドの考慮
 - ・ ビーム入射条件依存性
 - ・ 磁場エラーの考慮