



TOHOKU
UNIVERSITY

THOA04

THz域交叉型アンジュレータ 超放射光源の偏光度を決める要因

齊藤 寛峻, 武藤 俊哉, 柏木 茂, 日出 富士雄, 三浦 禎雄, 南部 健一, 長澤 育郎,
高橋 健, 鹿又 健, 柴田 晃太郎, 山田 悠樹, 山本 大喜, 山田 志門, 濱 広幸

東北大学電子光理学研究センター

第18回日本加速器学会

オンライン

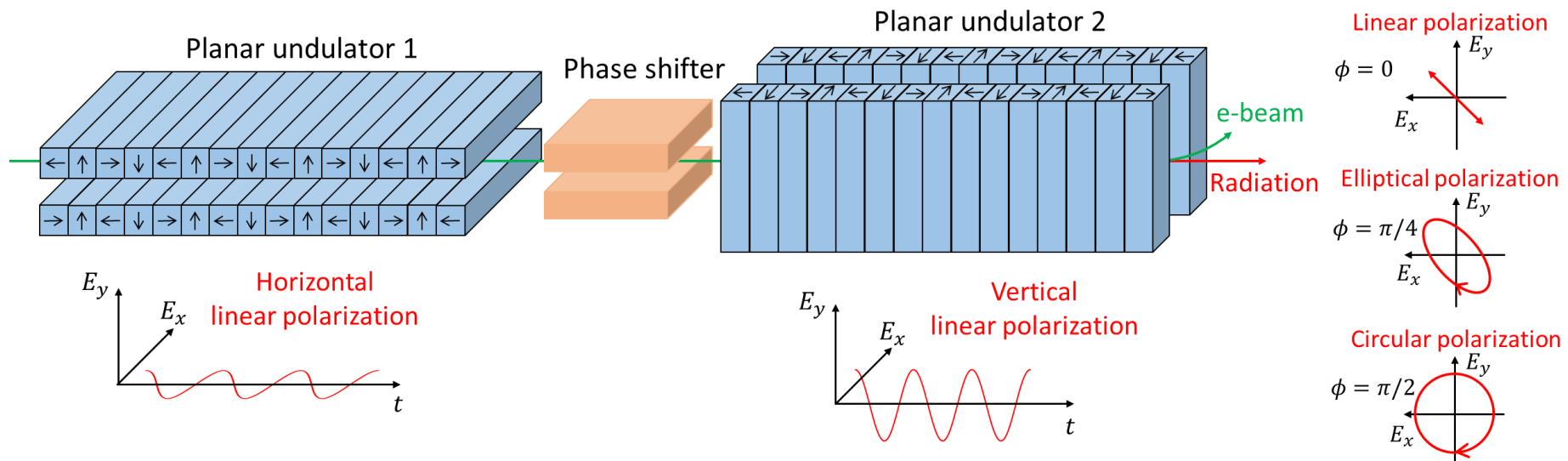
2021年8月12日(木)

はじめに

- THz放射 (周波数0.1~10 THz, 波長30 μm ~3 mm)
 - 生命科学分野でのイメージング・分光、医学診断、セキュリティなどへの応用
- THz域の偏光の応用例: 円二色性分光 (キラルな生体分子の構造解析)
 - 光源に制約あり (偏光素子が限られている)

交叉型アンジュレータを用いた偏光可変THz光源

- 直交する直線偏光成分の重畳による任意の偏光生成
- 短バンチからの超放射 (コヒーレントアンジュレータ放射) を利用
- 第一放射に可変遅延を与え位相調整



研究目的

交叉型アンジュレータを用いたTHz超放射の偏光度を決める要因、高い偏光度・強度を得るための条件を明らかにする

1. 偏光度に影響を及ぼす要因の理論的考察
2. 東北大学電子光理学研究センターの試験加速器t-ACTSでの実験を想定したプロトタイプシステムの偏光の数値評価
3. 偏光度、強度面で有利な設計条件、現実的に到達可能な偏光度、強度に関する考察

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利用

- S_0 : 全偏光(全強度)
- S_1 : 水平直線偏光の相対強度(水平-垂直)
- S_2 : 45°直線偏光の相対強度(45°-135°)
- S_3 : 右回り円偏光の相対強度(右円-左円)

✓ 完全単色光の場合

規格化ストークスパラメータ P_1, P_2, P_3 と全偏光度 P

位相差調整により P_2, P_3 が変化

電場

$$E_x = E_{0x}e^{-i\omega t}$$

$$E_y = E_{0y}e^{-i(\omega t - \psi)}$$

ψ : 位相差

$P_1 \equiv \frac{S_1}{S_0} = \frac{E_{0x}^2 - E_{0y}^2}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}$	$= 0$	水平直線偏光度	
$P_2 \equiv \frac{S_2}{S_0} = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \cos \psi$	$= \cos \psi$	45°直線偏光度	$-1 \leq P_1, P_2, P_3 \leq 1$
$P_3 \equiv \frac{S_3}{S_0} = \frac{2E_{0x}E_{0y}}{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \sin \psi$	$= \sin \psi$	円偏光度	
$P \equiv \sqrt{P_1^2 + P_2^2 + P_3^2}$	$= 1$	全偏光度	$0 \leq P \leq 1$

理想的な交叉型アンジュレータ放射($E_{0x} = E_{0y}$ のとき)

偏光度に影響を及ぼす要因(1)～(2)

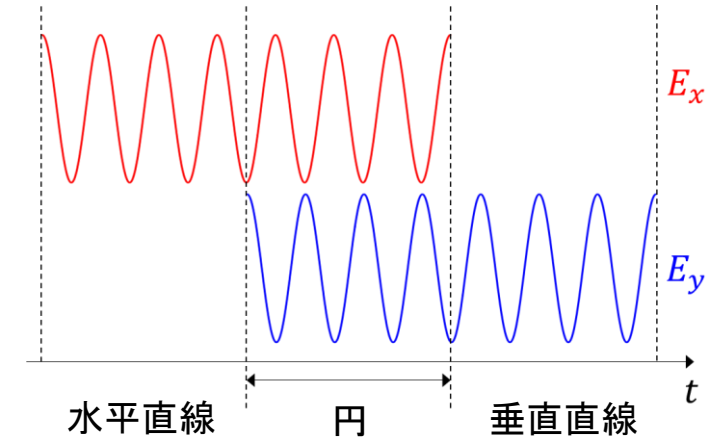
(1) アンジュレータ周期数の有限性(周期数に起因する周波数広がり $\Delta f/f \sim 1/N$)

偏光度

$$P_N(\psi) = \begin{cases} 1 - \frac{|\psi|}{2\pi N} & (|\psi| \leq 2\pi N) \\ 0 & (|\psi| > 2\pi N) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} P &\geq P_N(\psi = \pi) \\ &= 1 - 1/2N \\ &= 0.9(N = 5) \\ &= 0.95(N = 10) \end{aligned}$$

影響は限定的



(2) 電子ビームのエネルギー広がり(に起因する周波数広がり)

軸上のアンジュレータ放射波長

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

γ : 電子ビームエネルギー
 λ_u : アンジュレータ周期数
 K : アンジュレータ偏向定数

周波数広がり

$$\frac{\Delta f}{f} = 2 \frac{\Delta \gamma}{\gamma}$$

(1)との比較から、典型的なビーム($\Delta \gamma/\gamma \lesssim 1\%$)
 ではほぼ無視できる

偏光度に影響を及ぼす要因(3)～(4)

(3) 2台のアンジュレータ放射の強度のずれ

$$U_2 \text{強度} \equiv (1 + r) \times U_1 \text{強度}$$

$$P_1 = -\frac{r}{2+r}$$

$$P_2 = R(r) \cos \psi$$

$$P_3 = R(r) \sin \psi$$

$$P = 1$$

$$R(r) \equiv \frac{2\sqrt{1+r}}{2+r}$$

→ P_2, P_3 の振幅(最大値)が低下

$R = 1 \rightarrow 0.99$ に低下する強度のずれ
 $r = 0.34$

ビーム光学系設計、ビーム調整
により十分抑制可能

(4) 観測角度に依存する位相差のずれ

光路長のずれ

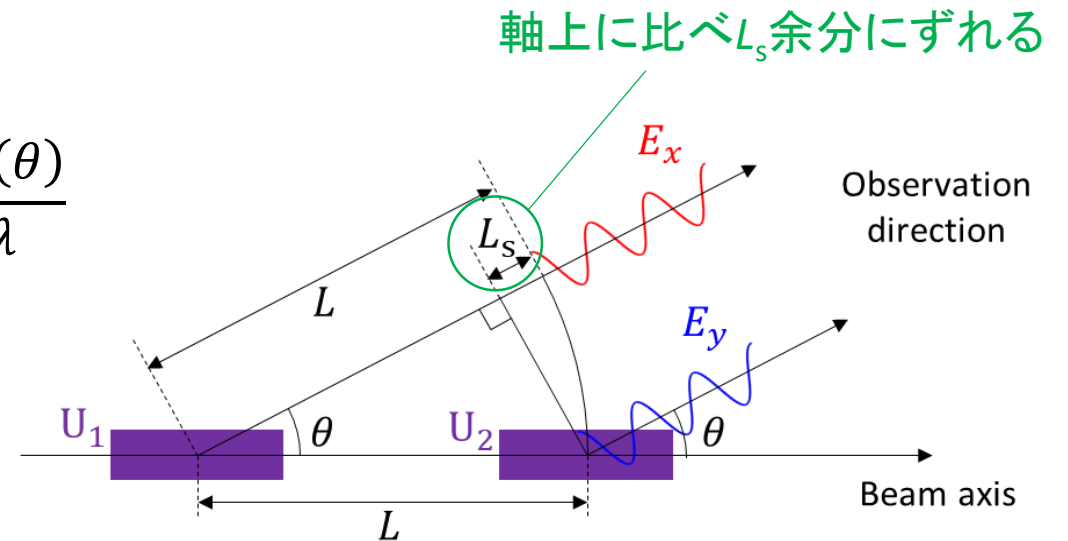
$$L_s(\theta) = L(1 - \cos \theta)$$

$\theta = 10 \text{ mrad}, L = 3 \text{ m}$ のとき
 $L_s = 150 \mu\text{m}$ (THz光の波長と同程度)

位相差のずれ

$$\Delta\psi(\theta) = -2\pi \frac{L_s(\theta)}{\lambda}$$

影響は大きい?



光源点が L 離れた光の重ね合わせ

粒子トラッキング

- 任意の磁場中の運動方程式の計算 (アンジュレータ)
- 6×6転送行列による位相空間座標の転送計算 (移相器)

放射電場

- 運動する荷電粒子からの放射電場の計算

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = -\frac{e}{4\pi\epsilon_0} \left[\frac{\vec{n} - \vec{\beta}}{\gamma^2 R^2 (1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta})^3} + \frac{\vec{n} \times \left\{ (\vec{n} - \vec{\beta}) \times \frac{d\vec{\beta}}{dt} \right\}}{cR(1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta})^3} \right]_{t_r}$$

- 電場の各偏光成分 E_j ($j = \sigma, \pi, 45, R$) の計算

$$E_\sigma = \vec{e}_\sigma \cdot \vec{E} \quad \vec{e}_\sigma = \frac{1}{\sqrt{1 - n_y^2}} \begin{pmatrix} n_z \\ 0 \\ -n_x \end{pmatrix}$$

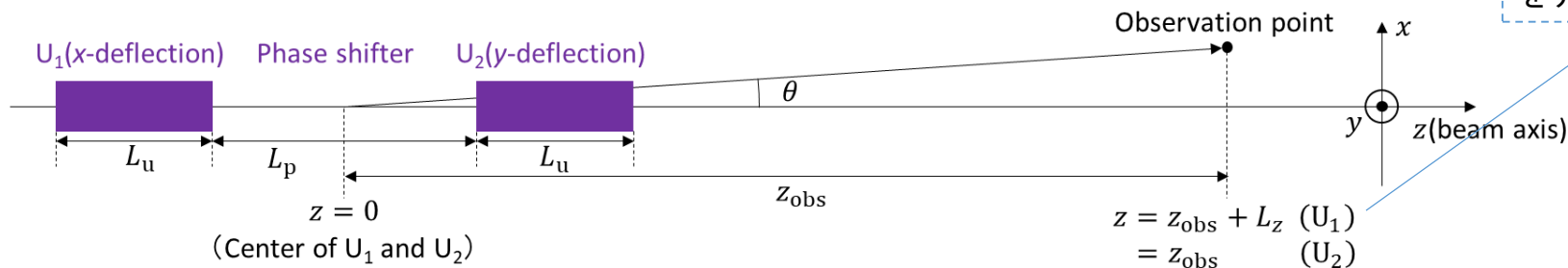
$$E_\pi = \vec{e}_\pi \cdot \vec{E} \quad \vec{e}_\pi = \frac{1}{\sqrt{1 - n_y^2}} \begin{pmatrix} -n_x n_y \\ 1 - n_y^2 \\ -n_y n_z \end{pmatrix}$$

$$E_{45} = \frac{E_\sigma + E_\pi}{\sqrt{2}}$$

$$E_R = \frac{E_\sigma + iE_\pi}{\sqrt{2}}$$

- 各粒子からの放射電場を積算 (共通の観測時刻における電場の値を補間)

ジオメトリ



U_1 放射計算時の観測点z座標をずらすことで位相差を導入

- ✓ 電子ビームエミッタンス
- ✓ 偏向方向のアンジュレータ磁場不均一性
- ✓ アンジュレータ中でのバンチ伸長

周波数スペクトル

$$\left(\frac{d^2W}{d\Omega df} \right)_j (\vec{r}, f) = 2\epsilon_0 c \left| \int E_{n, \text{tot}, j}(\vec{r}, t) e^{2i\pi f t} dt \right|^2$$

放射エネルギー

$$\left(\frac{dW}{d\Omega} \right)_j (\vec{r}) = \int \left(\frac{d^2W}{d\Omega df} \right)_j (\vec{r}, f) df$$

ストークスパラメータ、偏光度

$$S_0(\vec{r}) = \left(\frac{dW}{d\Omega} \right)_\sigma (\vec{r}) + \left(\frac{dW}{d\Omega} \right)_\pi (\vec{r})$$

$$S_1(\vec{r}) = 2 \left(\frac{dW}{d\Omega} \right)_\sigma (\vec{r}) - S_0(\vec{r})$$

$$S_2(\vec{r}) = 2 \left(\frac{dW}{d\Omega} \right)_{45} (\vec{r}) - S_0(\vec{r})$$

$$S_3(\vec{r}) = 2 \left(\frac{dW}{d\Omega} \right)_R (\vec{r}) - S_0(\vec{r})$$

$$P_1(\vec{r}) = S_1(\vec{r})/S_0(\vec{r})$$

$$P_2(\vec{r}) = S_2(\vec{r})/S_0(\vec{r})$$

$$P_3(\vec{r}) = S_3(\vec{r})/S_0(\vec{r})$$

$$P(\vec{r}) = \sqrt{P_1(\vec{r})^2 + P_2(\vec{r})^2 + P_3(\vec{r})^2}$$

プロトタイプシステム

試験加速器t-ACTSでの実験を想定した設計(第16回年会 THOI10, WEPI011)

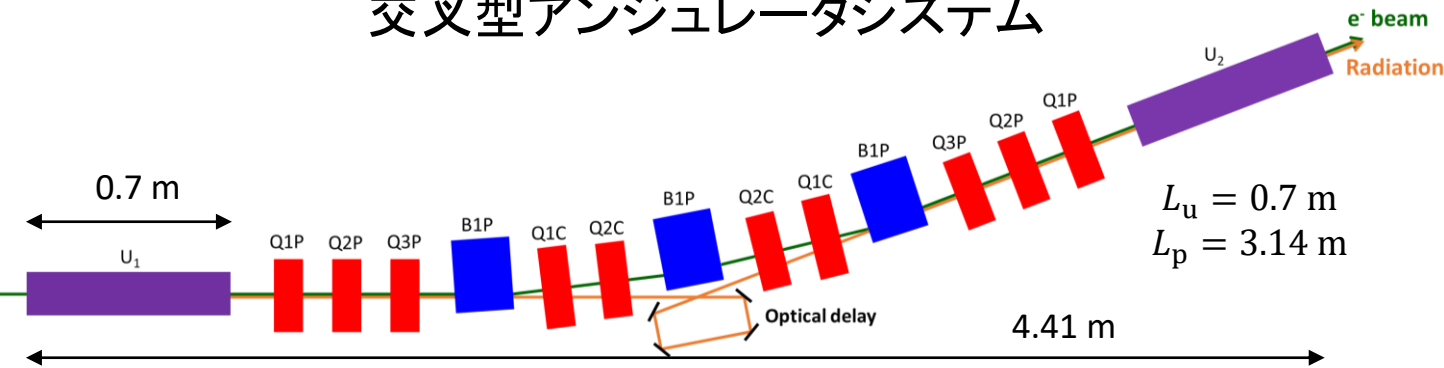
アンジュレータパラメータ

Magnet array	Halbach type
Block dimension x, y, z	70 mm × 23 mm × 20 mm
Period length λ_u	80 mm
Number of periods N	7
Magnet material	NdFeB ($B_r = 1.22$ T)
Gap	33 mm
Peak magnetic field	0.471 T ($K = 3.51$)
Fundamental frequency	

ビームパラメータ

RF frequency	2856 MHz
Macropulse duration	2 μ s
Beam energy	22 MeV
Energy spread σ_δ	1% (rms)
Normalized emittance (x, y)	3, 6 mm·mrad
Bunch length σ_t	80 fs (rms)
Bunch charge Q	20 pC

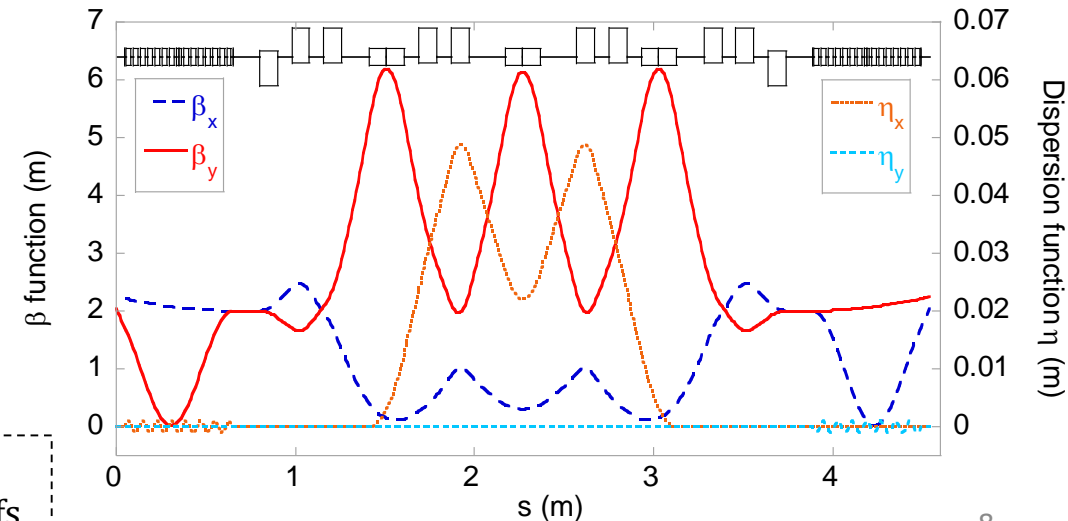
交叉型アンジュレータシステム



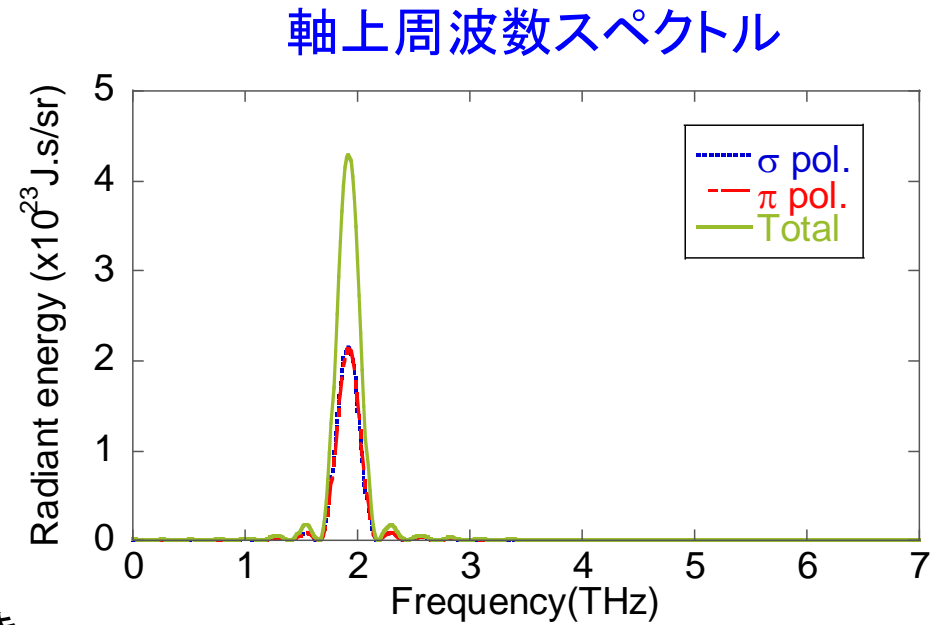
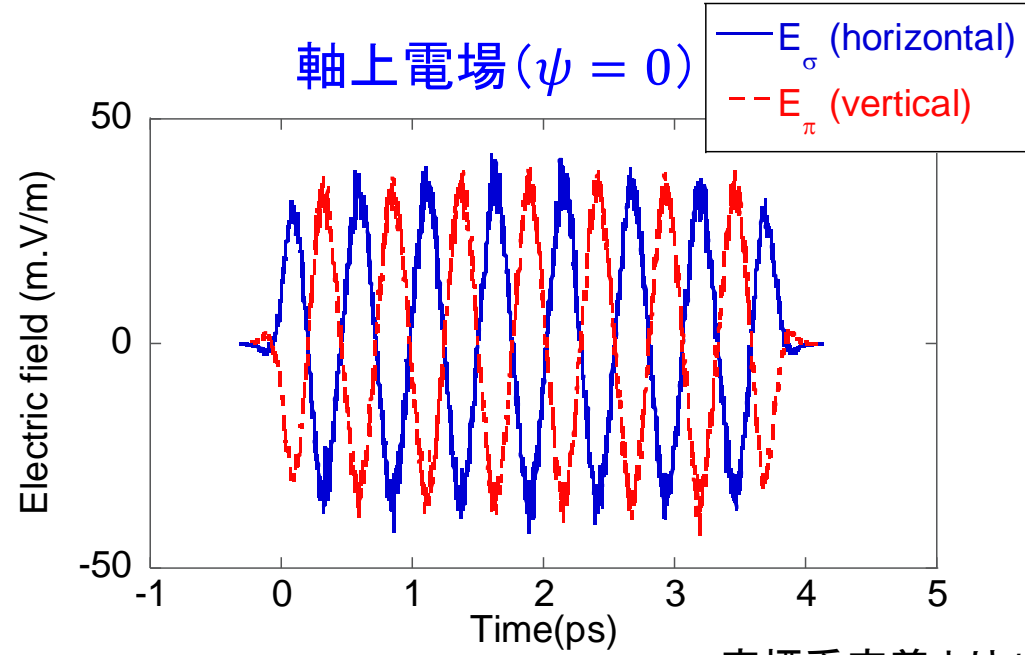
- トリプルベンド型の移相器ビームライン
- 移相器で第1アンジュレータの $R_{56} = 2.27$ mmを補正

U_1 でのバンチ伸長
 $\Delta\sigma_t = R_{56}\sigma_\delta/c = 75.7$ fs

ビーム光学系



数値評価(1) 放射特性

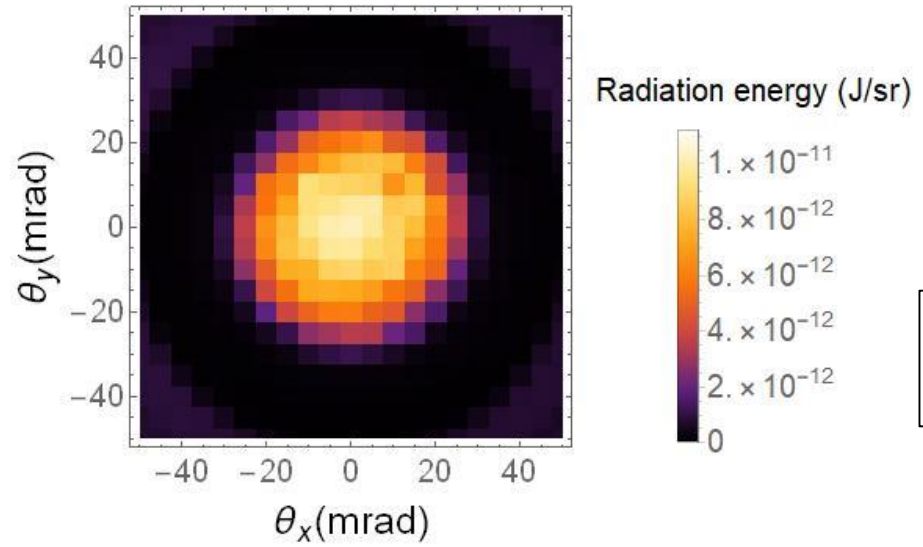


座標系定義より $\psi = 0$ のとき
 135° 直線偏光 ($P_2 = -1, P_3 = 0$)

粒子数 30000

基本周波数 $f_1 = 1.92$ THz
 周波数広がり $\sigma_f = 0.10$ THz

全強度空間分布



周波数バンド幅 $\pm 3\sigma_f$

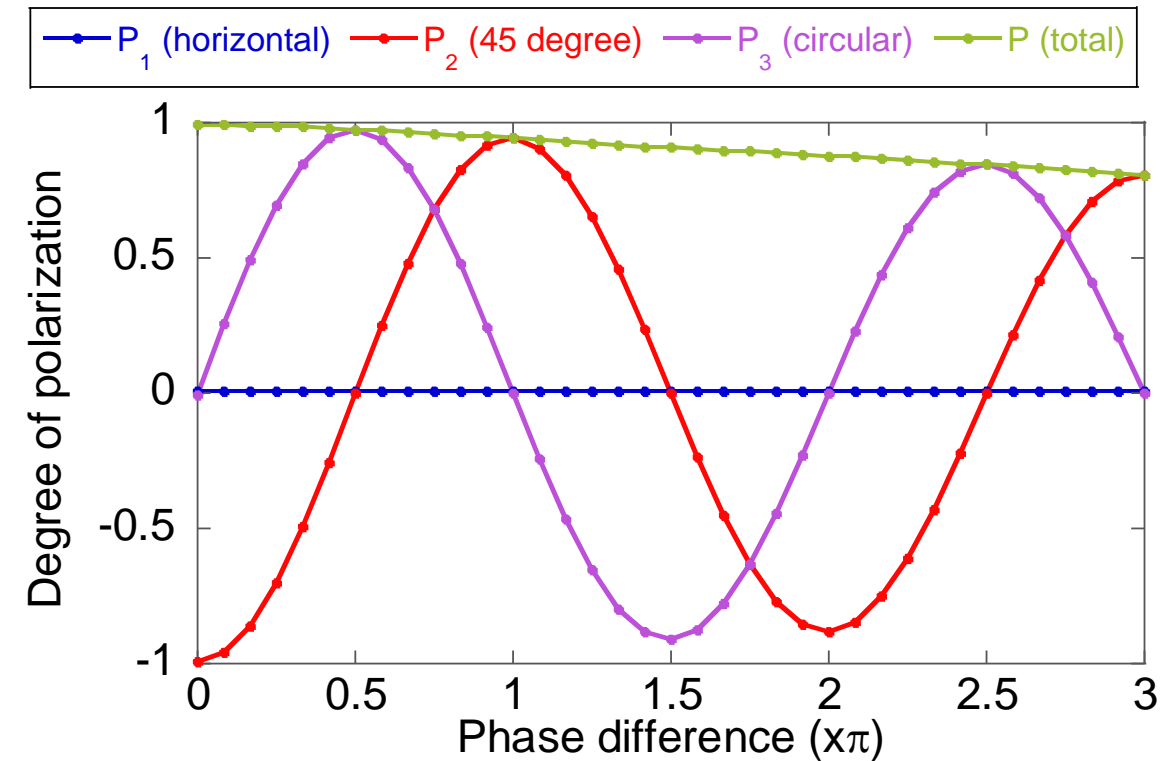
角度広がり $\sigma_\theta = 16.4$ mrad
 全強度 ($\theta \leq 3\sigma_\theta$) $W_{tot} = 285$ nJ/bunch (1.63 mJ/macropulse)

20 pC

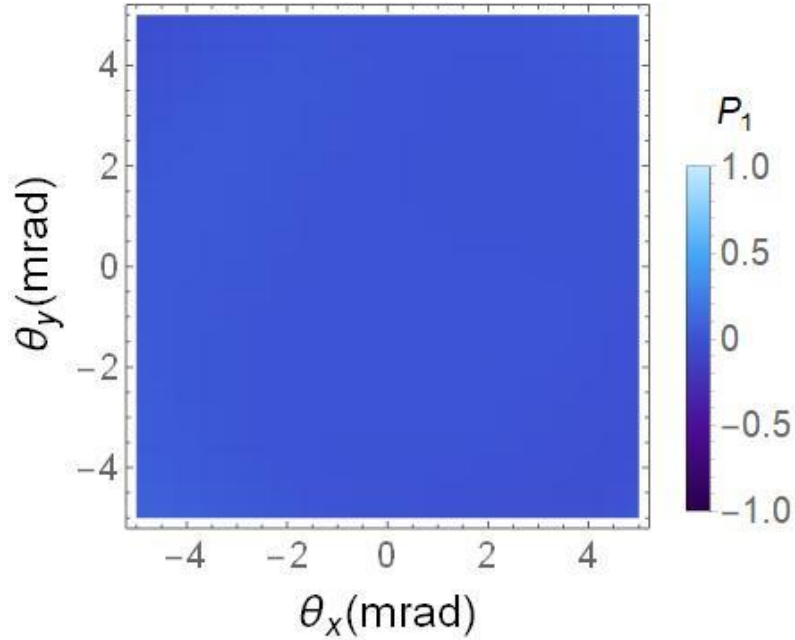
Sバンド 2 μ s

- 全偏光度 P は位相差が増えるにつれリニアに減少
- $P = 1 - \frac{|\psi|}{2\pi N}$ によるフィット $\rightarrow N = 7.3$
 \rightarrow 要因(1)の効果(周期数の効果)が見えている
 要因(2), (3)は無視できる
- 軸上では $P \geq P(\psi = \pi) = 0.94$ を持つ任意の偏光生成が可能

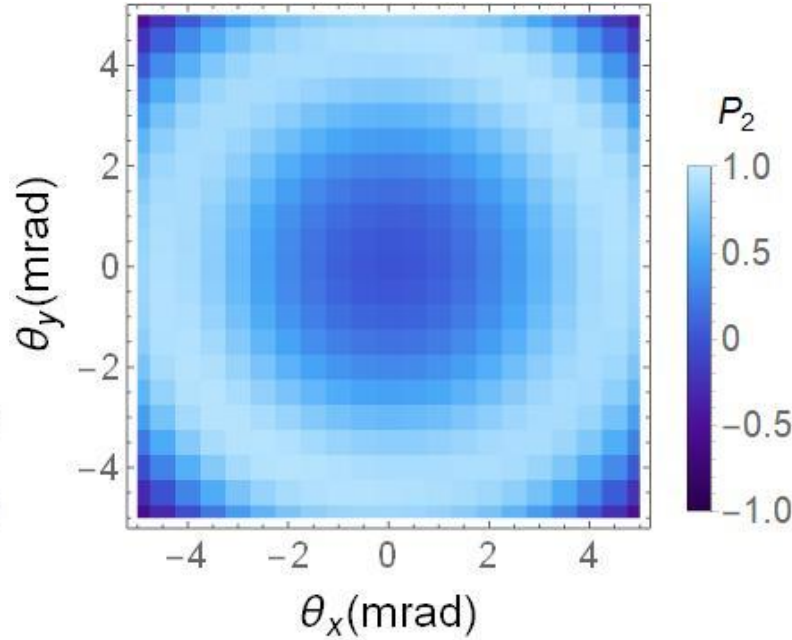
偏光度の位相差依存性



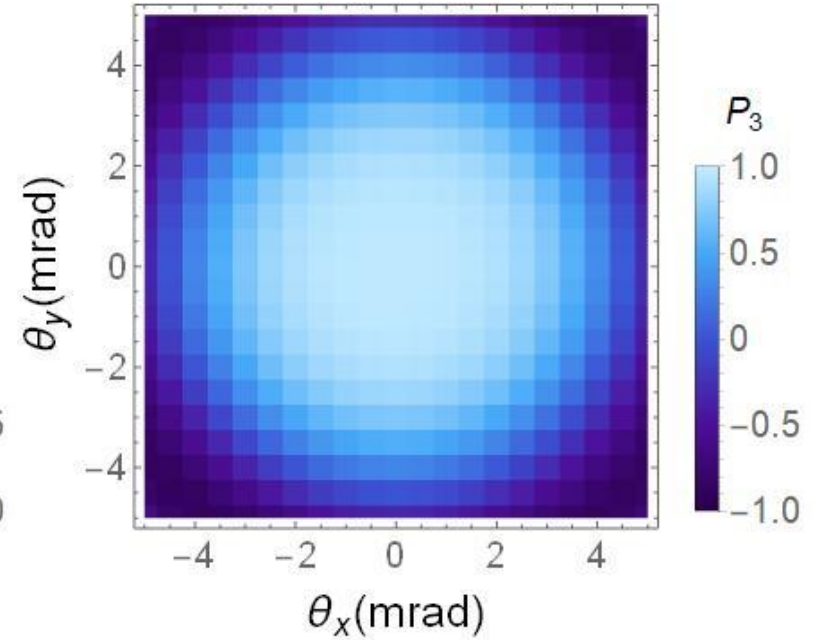
P_1 (水平直線偏光)



P_2 (45°直線偏光)



P_3 (円偏光)



- 偏光状態 (P_2, P_3) が放射軸からの角度 ($\angle \sigma_\theta$) に依存して大きく変化する
→ 要因(4) (角度による位相差のずれ) の効果
- 高い偏光度を得るには角度制限が必要になる

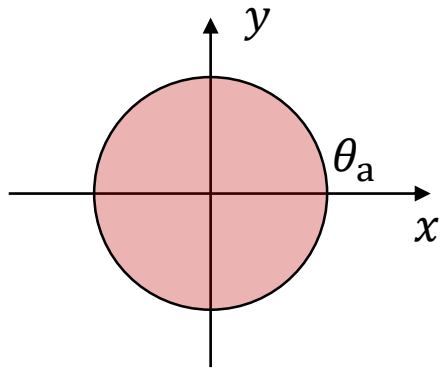
軸上の位相差

$$\psi_0 = \frac{\pi}{2}$$

放射強度角度広がり

$$\sigma_\theta = 16.4 \text{ mrad} \quad 11$$

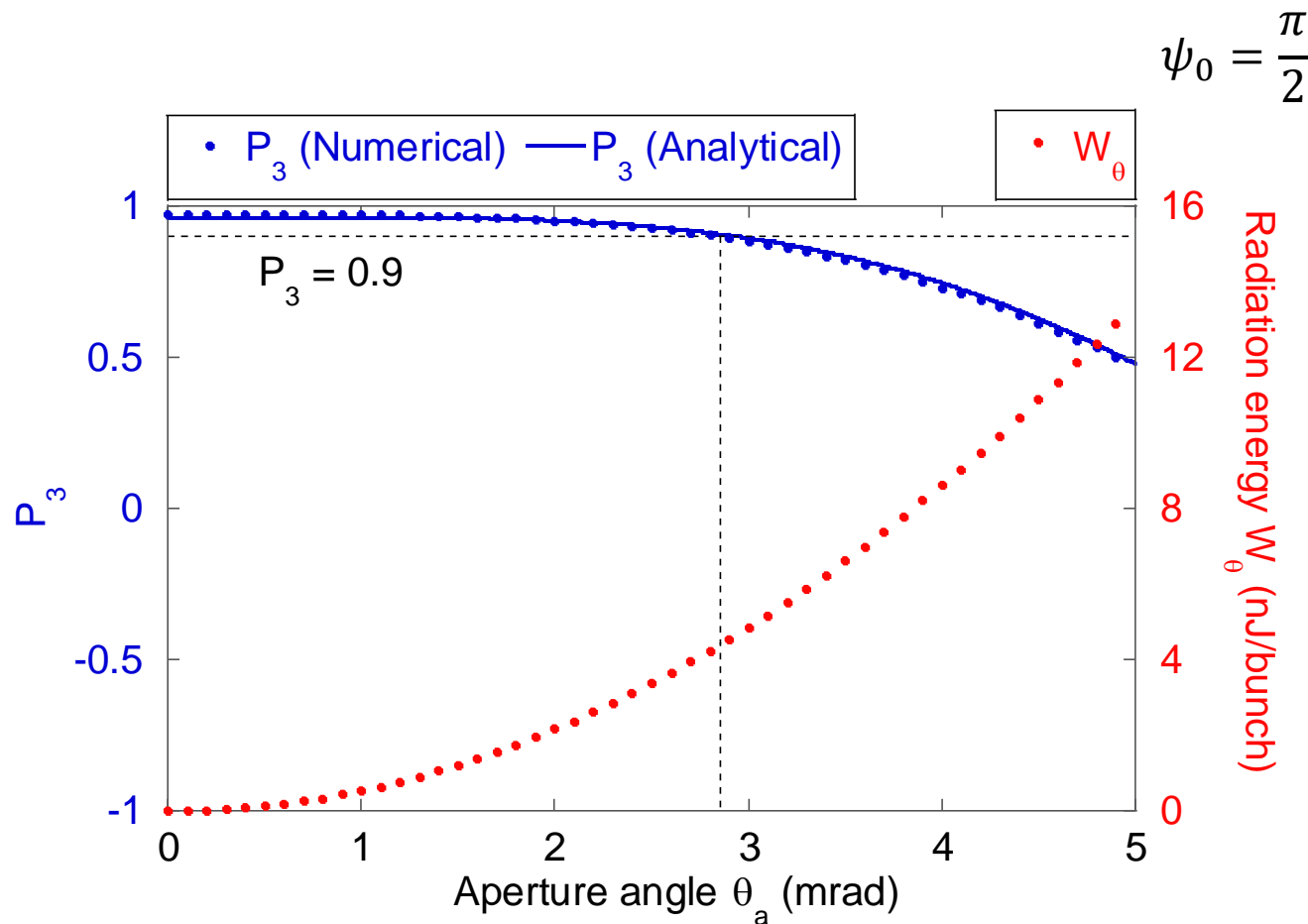
数値評価(4) 偏光度、強度のアパーチャー角度依存性



角度 $\theta = 0 \sim \theta_a$ 内の積分光
について計算

- $P_3 = 0.9$ を得る場合
 - 有効角度 $\theta_a = 2.9$ mrad
 - 有効強度 $W_\theta = 4.4$ nJ/bunch
(25 μ J/macropulse)
 - 有効強度比 $W_r \equiv W_\theta / W_{tot} = 1.6\%$

偏光度と有効強度は位相差の角度依存性
(要因(4))でほぼ決まる



✓ 解析計算 (次ページ以降の考察に利用)

- ガウシアン型強度分布

$$\text{角度広がり } \sigma_\theta = \sqrt{\frac{\lambda}{2N\lambda_u}}$$

- 位相差の角度依存性

$$\Delta\psi(\theta) = -2\pi \frac{L_s(\theta)}{\lambda(\theta)} \approx -2\pi \frac{L\gamma^2\theta^2}{\lambda_u \left(1 + \frac{K^2}{2} + \gamma^2\theta^2\right)}$$

- 円偏光度の角度依存性

$$P_3(\psi_0, \theta) = P_N(\psi_0 + \Delta\psi(\theta)) \sin(\psi_0 + \Delta\psi(\theta))$$

位相差の角度依存性の一般化

有効強度を増加させる条件について理論的に考察

放射の角度広がり σ_θ で規格化した位相差の角度依存性

$$\Delta\psi(\theta_n) = -2\pi \frac{(1 + L_r)\theta_n^2}{4 + \frac{\theta_n^2}{N}}$$

- 放射波長(ビームエネルギー、磁場強度)にはよらない
→ 波長を変えても有効強度比は増減しない
- L_r が小さいほど角度依存性が弱まる
 - 移相器を短くする
 - アンジュレータ周期数を増やす(放射の角度広がりを狭める)
- $N \rightarrow \infty, L_r \rightarrow 0$ の極限でも角度依存性は残る → 改善には上限

$$\lim_{N \rightarrow \infty, L_r \rightarrow 0} \Delta\psi(\theta_n) = -\frac{\pi}{2} \theta_n^2$$

アンジュレータ放射の角度広がり

$$\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\lambda}{2N\lambda_u}}$$

規格化角度

$$\theta_n \equiv \frac{\theta}{\sigma_\theta}$$

アンジュレータ長に対する移相器長

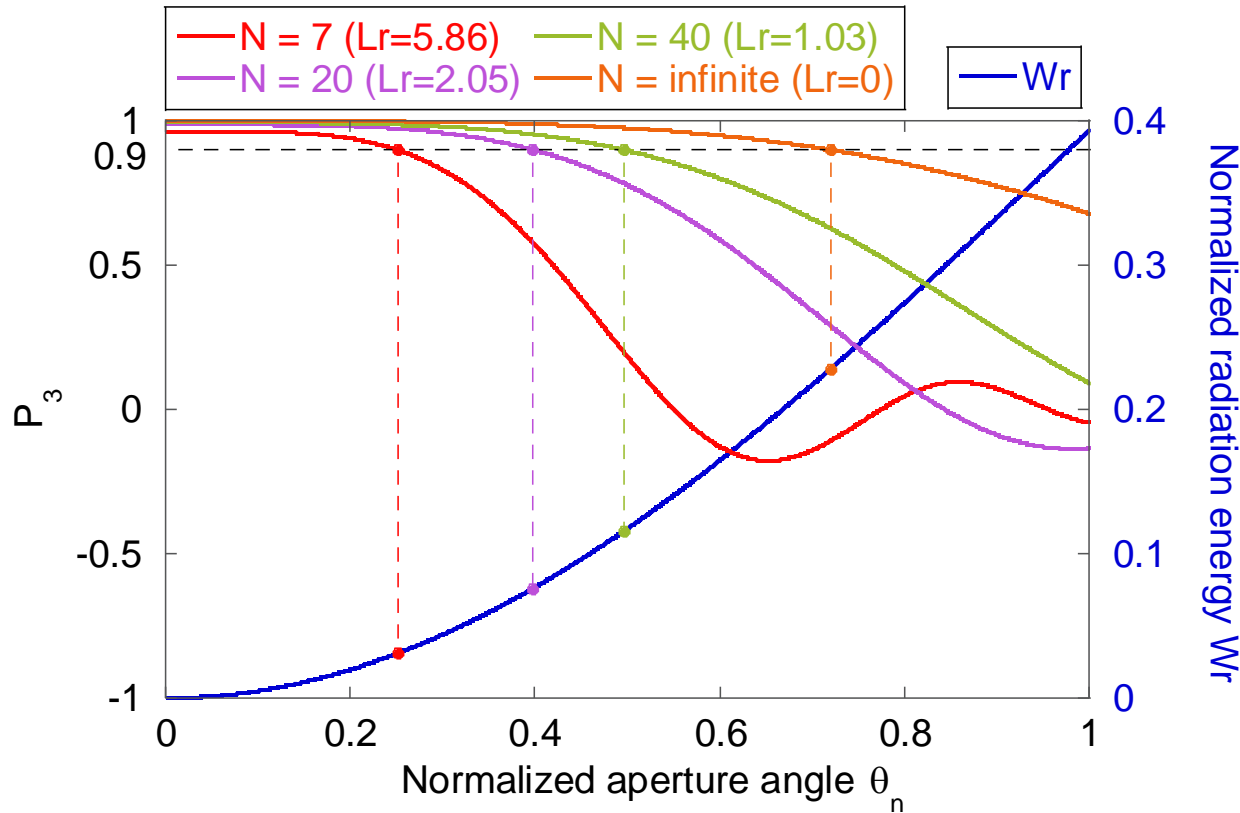
$$L_r \equiv \frac{L_p}{L_u}$$

周期数による有効強度の増加

プロトタイプのパラメータを基準とした解析計算による見積もり

$$\psi_0 = \frac{\pi}{2}$$

円偏光度と有効強度比



$P_3 = 0.9$ 制限下における
絶対強度 W_θ の増加

N	L_r	θ_n	W_r	W_θ
7	5.86	0.25	0.031	1 (基準)
20	2.05	0.40	0.076	7.0
40	1.03	0.50	0.116	21.5

円偏光度0.9の制限下において、

- 現実的な周期数では $W_r \lesssim 10\%$
- $N = 7 \rightarrow 20$ で絶対強度は約7倍 (31 nJ/bunch (178 μ J/macropulse)*)に増加

* $N = 7$ の数値計算結果仮定

まとめ

- 交叉型アンジュレータを用いた偏光可変THz超放射光源の偏光度を決める要因、高い偏光度・強度を得るための条件について調べた。
- 偏光度を決める支配的な要因は幾何学的な光路長のずれに起因する位相差の角度依存性である。この影響は大きく、有効な角度範囲、強度の割合は制限される。これは放射波長によらない性質であると考えられる。
- アンジュレータ長に対する移相器長を小さくすることにより角度依存性の効果を緩和できる。ただし円偏光度0.9における有効強度の割合の上限は10%程度である。

✓ プロトタイプシステム ($E = 22 \text{ MeV}$, $Q = 20 \text{ pC}$, $f = 1.9 \text{ THz}$, $N = 7$) の例

アパーチャー角度 2.9 mrad

円偏光度 0.9

放射エネルギー 4.4 nJ/bunch, 25 μJ /macropulse (全強度に対し1.6%)
($N = 20$ に増やした場合、約7倍に増加)