

# 交叉型アンジュレータを用いた THz域偏光可変超放射発生の研究

齊藤 寛峻 (高エネルギー加速器研究機構)

武藤 俊哉, 柏木 茂, 日出 富士雄, 濱 広幸 (東北大学電子光理学研究センター)

第19回加速器学会年会

オンライン

2022年10月20日

## ■ THz光源 (周波数0.1-10 THz、波長3000-30 μm)

- 従来型光源が利用不可 → 近年は多くの光源が登場
- 加速器ベース光源 → 強度にアドバンテージ

### 超放射(コヒーレントアンジュレータ放射)

波長より十分短いパルス長 $\leq 100$  fs (30 μm)のビームを利用

## ■ 偏光の利用

- 応用例: 円二色性分光(キラルな生体分子の構造解析)

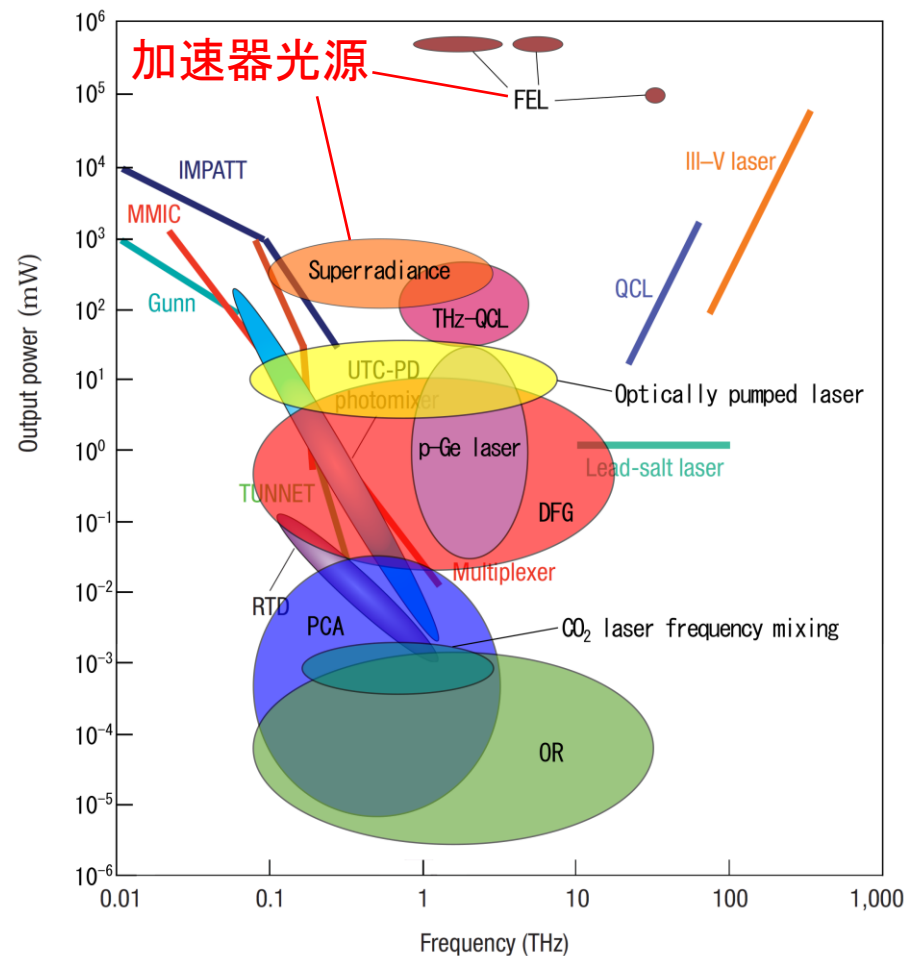
実験例 光源: UCSBのTHz FEL  
 周波数: 1.53, 1.98, 2.52 THz  
 平均パワー: 数mW

J. Xu et al., Proc. of SPIE 5268, pp.19-26 (2004).

- 偏光素子の制限(波長板製作が困難)

→ THz域の偏光利用には制約

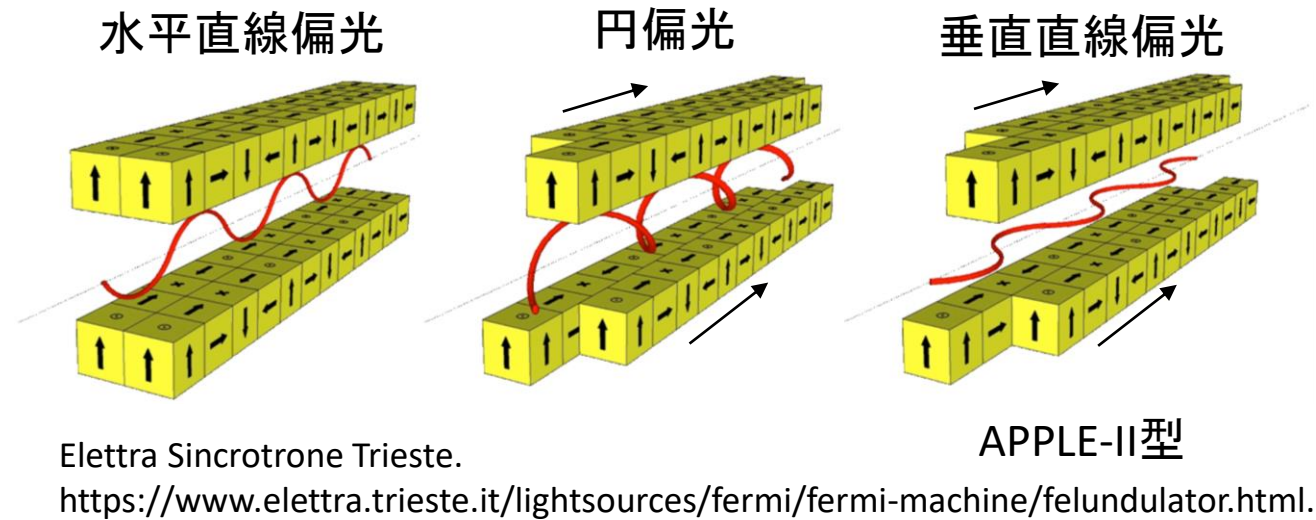
## THz光源の平均パワー



非加速器光源 < 数百mW  
 加速器光源 > 数百mW  
 直線: 従来型光源  
 楕円: 近年の光源

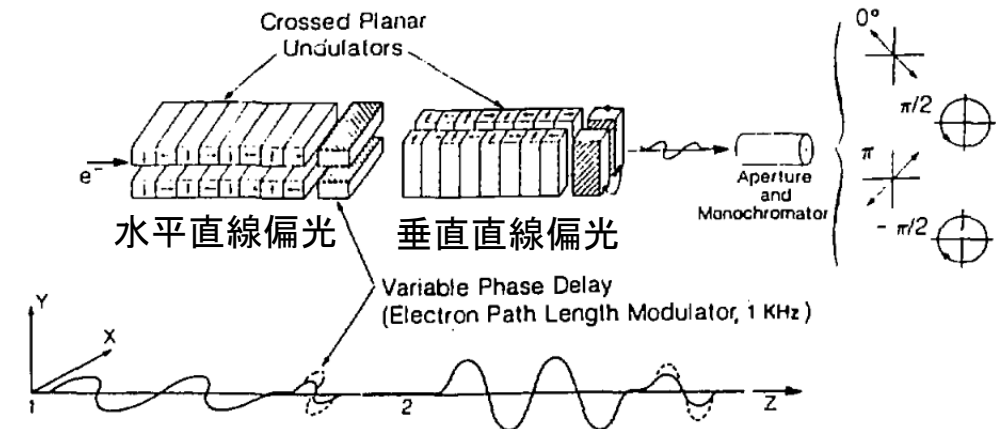
## ■ 磁石列駆動式のアンジュレータ

- 磁場分布を変化
- THz超放射光源でも採用(SINAP)
- ✓ 偏光切替速度が遅い(<0.1 Hz)



## ■ 交叉型アンジュレータ

- 2つのアンジュレータ放射を重畳
- THz域では応用例なし(可視光～紫外線領域のみ)
- ✓ 高速偏光切替可能(>10 Hz)



K.-J. Kim, LBL Report LBL-18313 (1984).

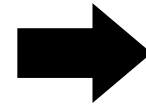
超放射 × 交叉型アンジュレータ

→ 強度面・偏光面ともメリットのあるTHz光源が実現できる？

## 交叉型アンジュレータを用いた偏光可変THz超放射光源の検討

従来の交叉型アンジュレータ光源との相違点

- 放射周波数
- ~100 fsの超短バンチ長維持の必要性



最適な光源システムの構成や  
光源としての実用性は自明でない

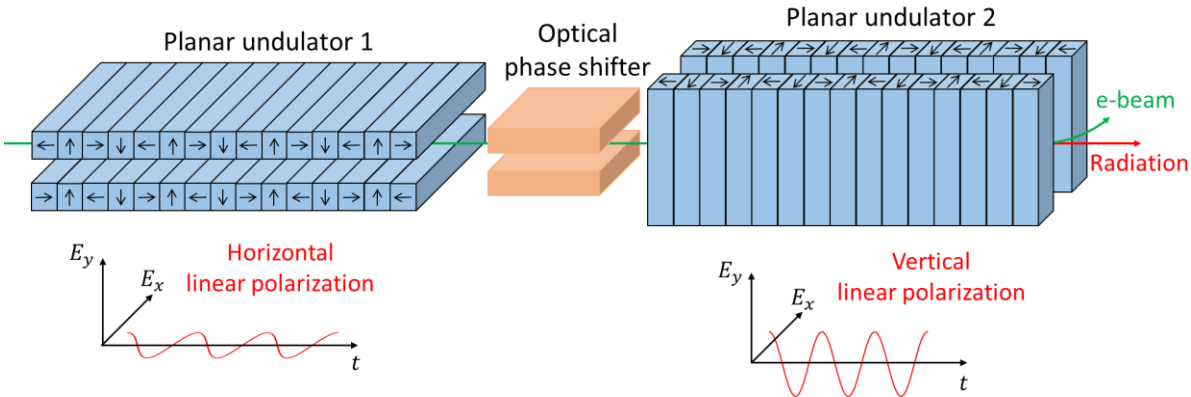
### (1) THz超放射に適した光源システムを明らかにする

- 移相器
  - 位相調整法
  - バンチ長調整の可能な電子ビームライン

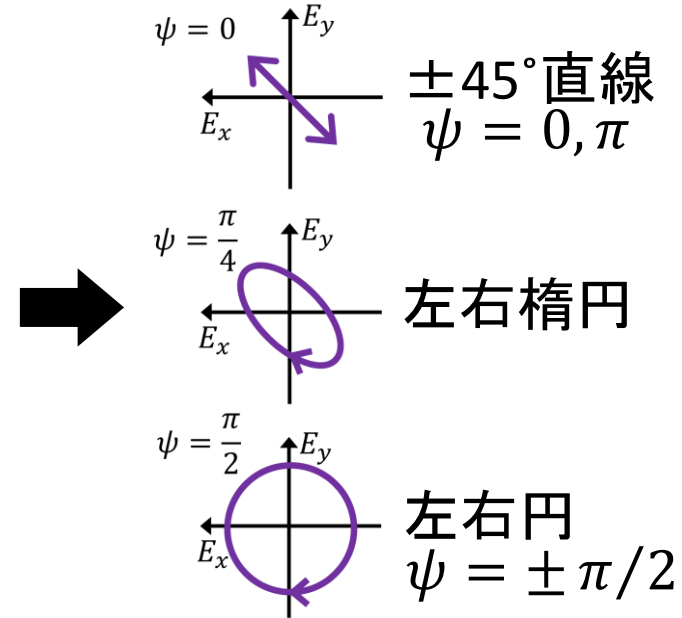
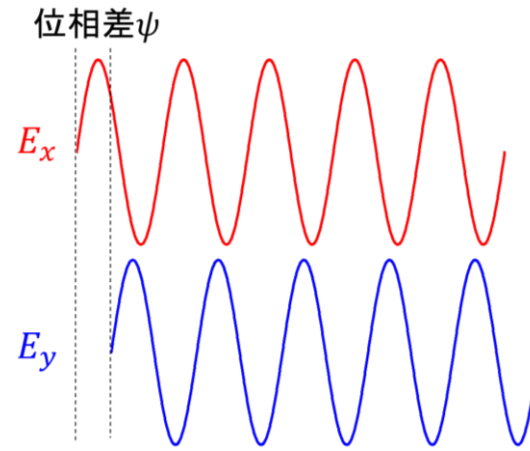
### (2) 放射特性(実現可能な放射強度、偏光度)を明らかにする

- 偏光度を決める要因
- 有効放射強度(十分な偏光度が得られる条件下での強度)

## 交叉型アンジュレータ



直交する直線偏光の重ね合わせによる偏光操作

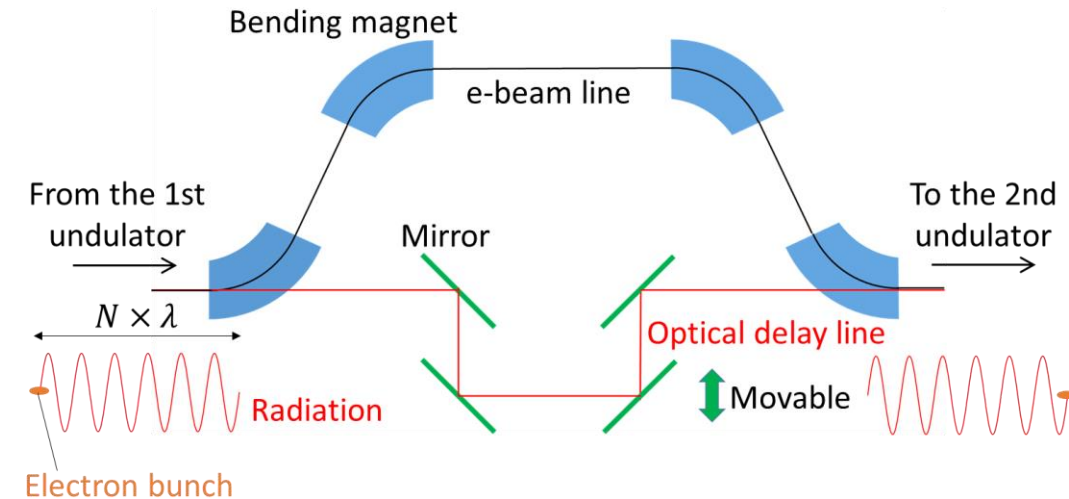


## 位相調整

第1の放射の光路長調整による位相操作を採用

- スリッページの補正 → 2つの放射の時間的な重畳
- 移相器でのバンチ長調整(超放射特有、後述)
- 高速偏光切替

## 移相器の概念図



# (1) 光源システム 移相器の電子ビームラインの要件

✓ 超放射の強度：バンチ長/放射波長 に指数関数的に依存

→ 各アンジュレータでのバンチ長を揃える必要あり

## アンジュレータ内でのバンチ伸長

スリッページ長(電子と光の縦方向ずれ) エネルギー偏差  $\delta \equiv \frac{\Delta\gamma}{\gamma_0}$  による電子の縦方向ずれ

$$N\lambda(\gamma) = N \frac{\lambda_u}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad \longrightarrow \quad \Delta z = -N[\lambda(\gamma_0 + \Delta\gamma) - \lambda(\gamma_0)] \approx 2N\delta \cdot \lambda(\gamma_0)$$

→ 波長に対して無視できない( $2N\delta$ 倍)縦方向分散が発生

$$R_{56} = 2N\lambda(\gamma_0)$$

→ アンジュレータ間でバンチ長補正が必要

## 移相器の電子ビームラインの要件

- 十分な角度でのビームの偏向(光輸送ラインのスペース確保)
- バンチ長の補正
  - 1台目のアンジュレータの $R_{56}$ 補正
  - 移相器で発生するバンチ伸長の抑制

$N$ : 周期数  
 $\lambda$ : 共鳴波長  
 $\lambda_u$ : 周期長  
 $K$ : 偏向定数  
 $\gamma$ : 電子ビームエネルギー

# (1) 光源システム 交叉型アンジュレータシステムの例

東北大ELPHの試験加速器t-ACTSでの実験を想定した設計(詳細は第16回年会発表THOI10)

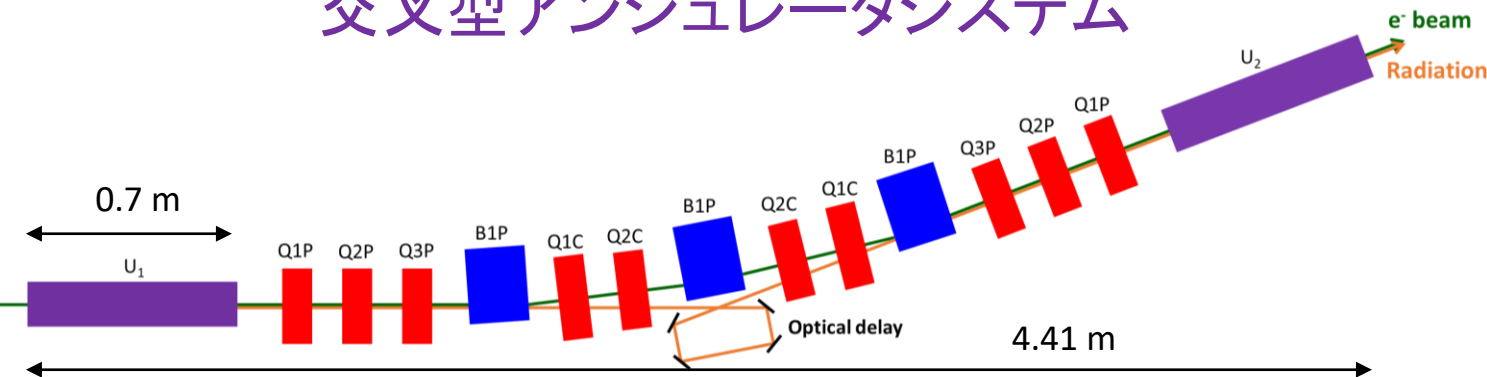
## アンジュレータパラメータ

Magnet array	Halbach type
Block dimension ( $x, y, z$ )	70 mm × 23 mm × 20 mm
Period length $\lambda_u$	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	1.93 THz (155 $\mu$ m) ( $E = 22$ MeV)

## 電子ビームパラメータ

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

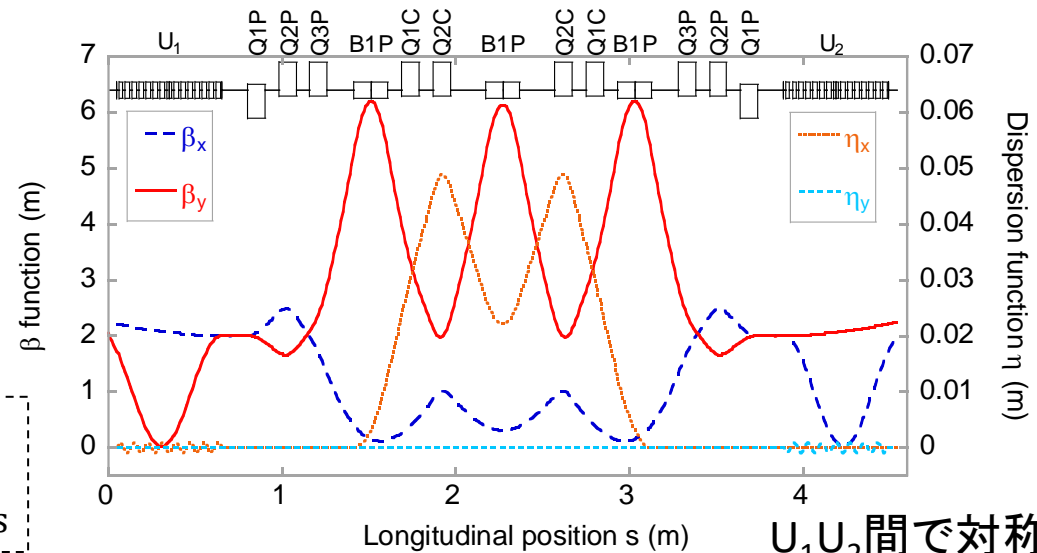
## 交叉型アンジュレータシステム



- トリプルバンド型の移相器ビームライン(偏向角 $7^\circ \times 3$ )  
 $R_{56} < 0$  (アンジュレータと逆符号)の実現に有利
- $R_{56}$  可変  $\rightarrow$  周波数変化にも対応可

$U_1$ でのバンチ伸長  
 $R_{56} = 2.27$  mm  
 $\Delta\sigma_t = R_{56}\sigma_\delta/c = 75.7$  fs

## ビーム光学系

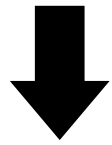


$U_1 U_2$ 間で対称



## 位相差のずれ

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



放射の角度広がりが  $\sigma_\theta = \sqrt{\frac{\lambda}{2N\lambda_u}}$  で  
 角度を規格化  $\theta_n \equiv \frac{\theta}{\sigma_\theta}$

## 実効的な位相差の角度依存性

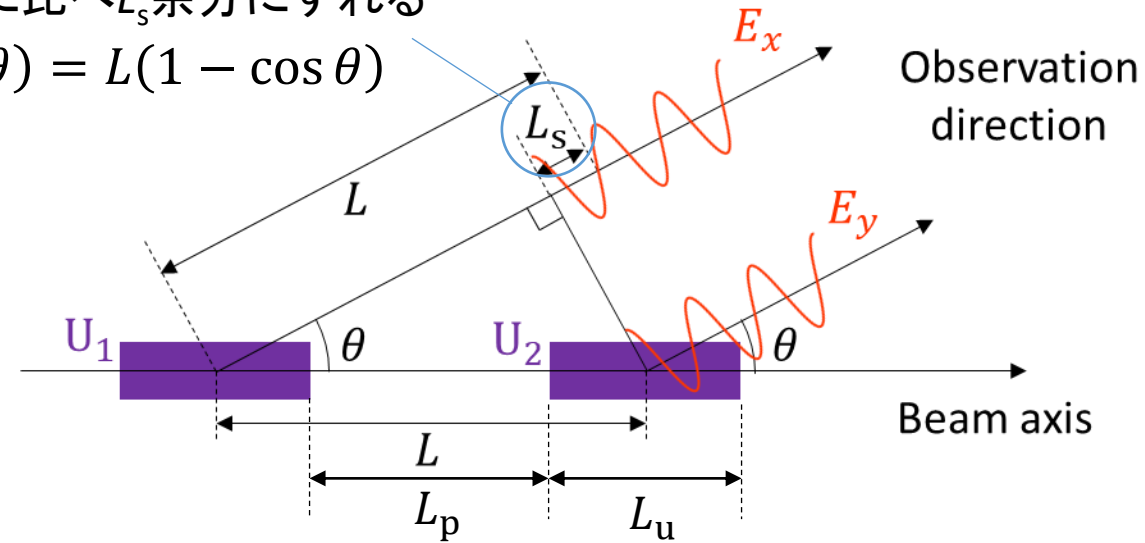
$$\Delta\psi(\theta_n) = -2\pi \frac{(1 + L_p/L_u)\theta_n^2}{4 + \theta_n^2/N}$$

- 角度依存性に関わる量
  - 光源間距離  $L_p$
  - 周期数  $N$  (角度広がりが  $\sigma_\theta$ )  
 (波長(ビームエネルギー、磁場)には非依存)
- 角度依存性改善の限界

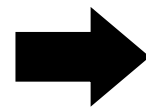
$$|\Delta\psi(\theta_n = 1)| = 2\pi \frac{1 + L_p/L_u}{4 + 1/N} > \frac{2}{5}\pi$$

軸上に比べ  $L_s$  余分にずれる

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



光源点の違いによる2つの放射の波面のずれ

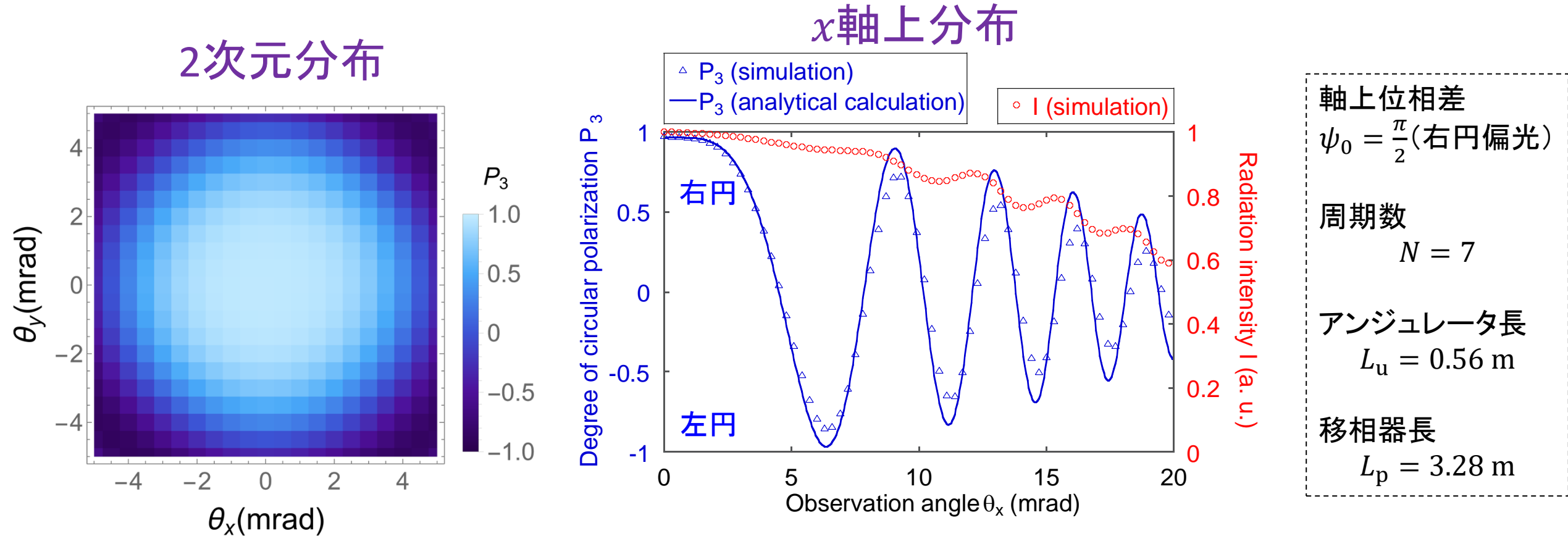


- 有意な位相差のずれは不可避
- 一般に偏光度を決める要因



## (2)放射特性(偏光) 典型的な偏光特性

多粒子放射シミュレーションにより得られた設計光源の円偏光度



- 放射の角度広がり範囲内で偏光状態が大きく変化
- 軸上では高い偏光度
- ✓ 角度制限により高い偏光度の実現は可能

## 角度制限下の放射強度(有効強度)を評価

円偏光度0.9の角度制限に対応する強度

### SINAP

- APPLE-II型アンジュレータを採用
- 既存の強度最大のTHz超放射光源

J. Zhang et al., Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. Accel. Spectrometers Detect. Assoc. Equip. 693, pp. 23-25 (2012).

円二色性分光実験強度:  $P_a \sim 1$  mW

$P_p$ : ピークパワー  
 $P_a$ : 平均パワー

	Designed source (t-ACTS) (simulation)	SINAP (measurement)
電子ビーム		
バンチ長	80 fs	250 fs
ビームエネルギー	22 MeV	26 MeV
電荷量	20 pC	68 pC
マイクロパルス繰り返し	2856 MHz	2856 MHz
マクロパルス長	2 $\mu$ s	3.6 $\mu$ s
マクロパルス繰り返し	10 Hz	50 Hz
アンジュレータ		
周期長	80 mm	100 mm
周期数	7x2	5
放射周波数	1.9 THz	0.8 THz
放射特性		
パルスエネルギー (total: 角度制限なし)	4.4 nJ/bunch (total 0.29 $\mu$ J/bunch)	2.4 $\mu$ J/bunch
放射パワー( $P_p/P_a$ ) (total: 角度制限なし)	13 W/ <b>0.25 mW</b> (total 0.81 kW/16 mW)	6.9 kW/ <b>1.2 W</b>
偏光	可変(高速切替可)	可変(高速切替不可)

## ■ ビーム電流の増加

- ✓ 超放射の強度  $\propto$  電荷量の2乗  
マクロパルス長  
パルス繰り返し

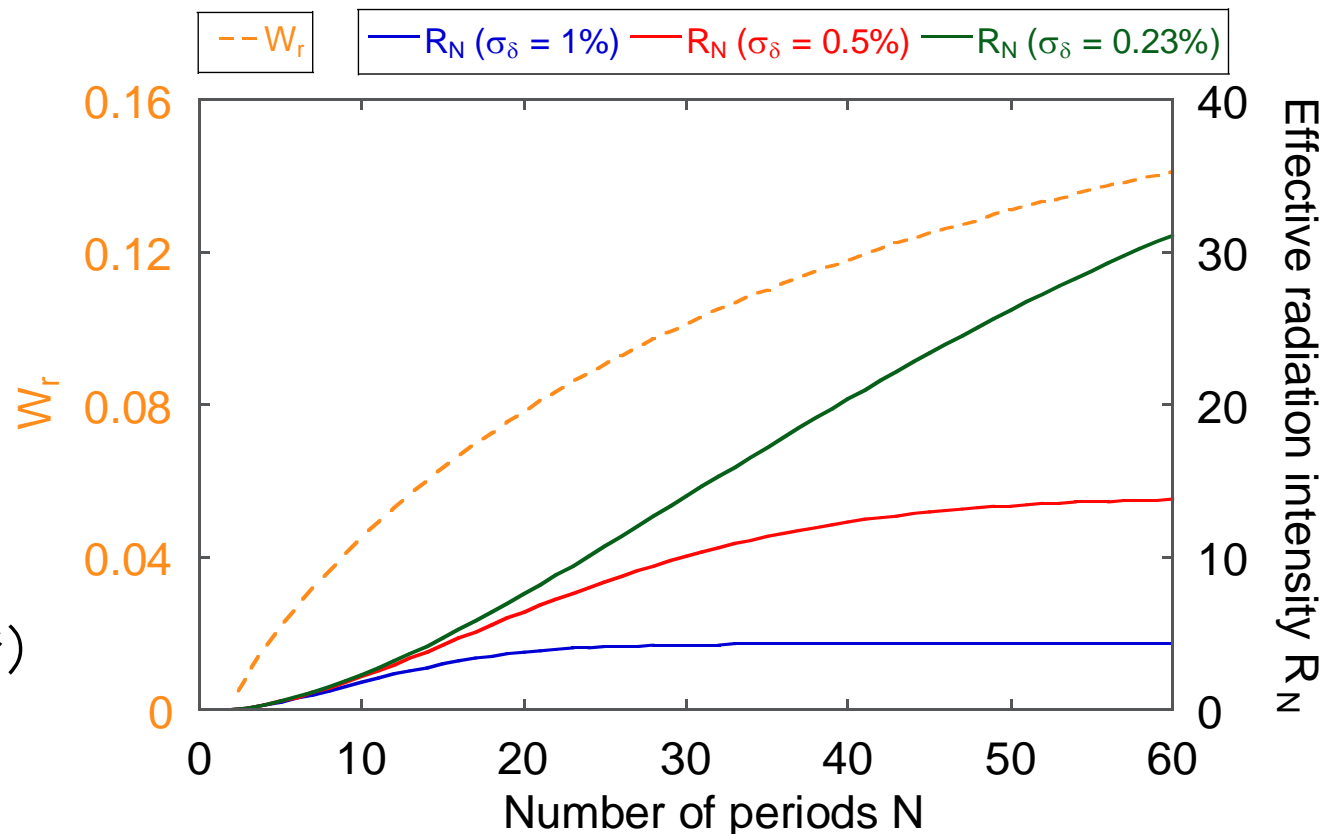
t-ACTS  $\rightarrow$  SINAPで107倍増加

## ■ アンジュレータ周期数の増加

- 偏光の角度依存性の緩和  
有効強度の割合増加 ( $W_r =$  約10%まで)
- 全放射強度の増加  
バンチ伸長によるリミットあり

設計光源の10倍程度まで改善可能

## 有効強度の周期数依存性 (解析的な見積もり)

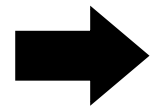


$W_r$  (左縦軸): 全強度に対する有効強度の割合

$R_N$  (右縦軸): 設計光源 ( $N = 7, \sigma_\delta = 1\%$ ) を1に規格化した有効強度

### 光源パラメータ例

- ビームエネルギー広がり  $\sigma_\delta = 0.23\%$  (t-ACTSのシミュレーション値)
- アンジュレータ周期数  $N = 30$
- ビーム電流 (SINAPのパラメータ)
  - 電荷量 68 pC
  - 電子ビームマクロパルス長 3.6  $\mu$ s
  - 電子ビーム繰り返し 50 Hz



有効強度

370 mW (平均パワー)

- 円二色性分光実験強度 (~1 mW) より十分大きい
- 多くの非加速器光源 ( $\leq$  数百mW) より大きい

実用上十分に高い有効強度が達成可能

# まとめ

交叉型アンジュレータによる偏光可変THz超放射光源を新たに検討

## ■ THz超放射に適した光源システム

- 放射の光路長調整による位相操作
- 第1アンジュレータによるバンチ伸長補正可能な移相器 → 各放射強度の一致  
移相器電子ビームライン例:  $R_{56}$ 可変トリプルベンド

## ■ 放射特性

### ● 偏光特性

- 光源点の異なる2つの放射の波面のずれに起因する強い観測角度依存性
- 高い偏光度は実現可能(角度制限が必要)

### ● 有効放射強度

- 全放射強度に対し数%~10%程度(円偏光度0.9の角度制限下)
- 達成可能強度  $\geq 100$  mW(平均) > 多くの非加速器光源、円二色性実験



実用的な偏光可変THz光源が実現可能

- 任意の偏光生成
- 高速偏光切替
- 高い強度・偏光度