



TOHOKU
UNIVERSITY

THOT05

コヒーレントTHzアンジュレータ放射の偏光スイッチング

柏木茂, 齊藤寛峻, 寺田健人, 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,
全炳俊^{A)}, 入澤明典^{B)}

東北大学電子光理学研究センター
京都大学エネルギー理工学研究所^{A)}
大阪大学産業科学研究所^{B)}

□ はじめに

- 研究背景（左右円偏光テラヘルツ源）

□ コヒーレントアンジュレータ放射と偏光制御

- マーチンパレット型偏光制御システム
- コヒーレントアンジュレータ放射

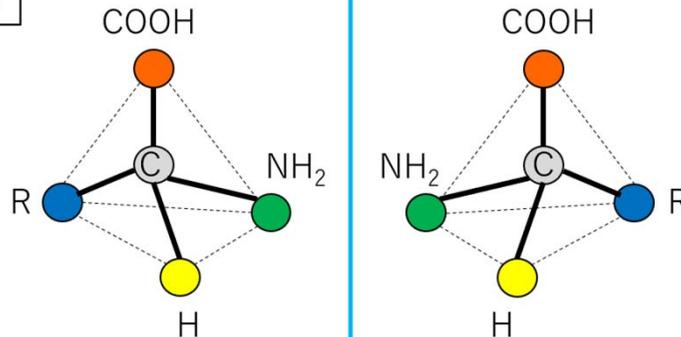
□ 試験加速器 t-ATCSにおけるビーム実験

- 実験セットアップ、ビーム調整
- ストークスパラメータと偏光度測定

□ まとめ

- 生体科学分野では、**蛋白質の立体構造変化や特定の立体構造への折りたたみ現象**が生体機能に及ぼす影響を調べる事が重要なテーマになっている。
- THz帯の振動円偏光二色性 (**VCD**) 計測は、蛋白質の立体構造変化や折りたたみ現象に対して感度が高く、左右円偏光THz波源は生体分析に大変有用である。
- THz帯における波長板の開発が遅れているため (特に3THz以上)、その波長域の偏光操作技術、偏向計測システムの開発が待たれている。
- **高強度THz波による高分子構造の操作** 保科宏道、化学工業68号 pp195-201 (2017)

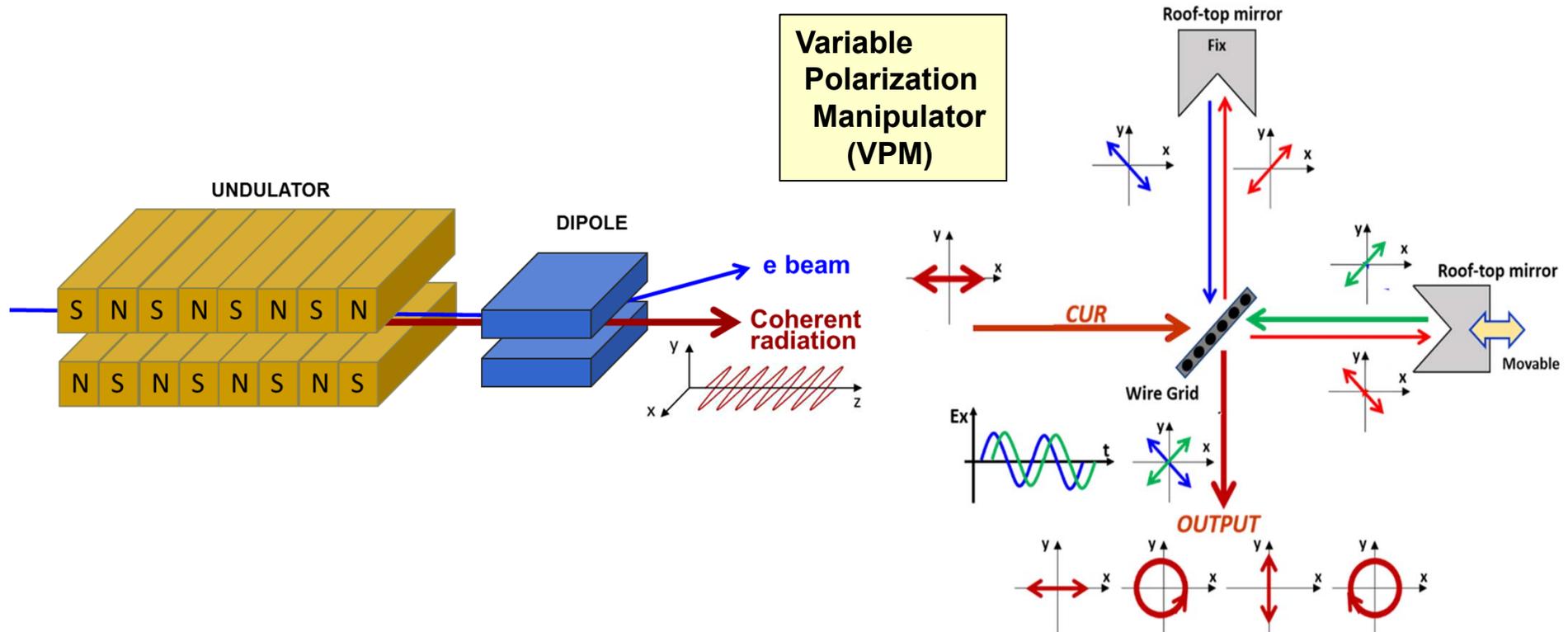
アミノ酸



左右円偏光に対する屈折率の差：旋光性
左右円偏光に対する吸光度の差：円二色性

□ 加速器ベースの大強度・偏光可変のテラヘルツ源の開発

- 1台のアンジュレータからの直線偏光コヒーレントアンジュレータ放射 (CUR) を利用する。



1. マーチンプレート型干渉計を使用
2. 光の輸送効率がよく、光源出力をそのまま使用できる
3. 干渉計内の可動ステージを $\lambda/4$ 移動させるだけで左右円偏光スイッチを実現
4. テラヘルツの電場サイクルと電子ビームが完全同期

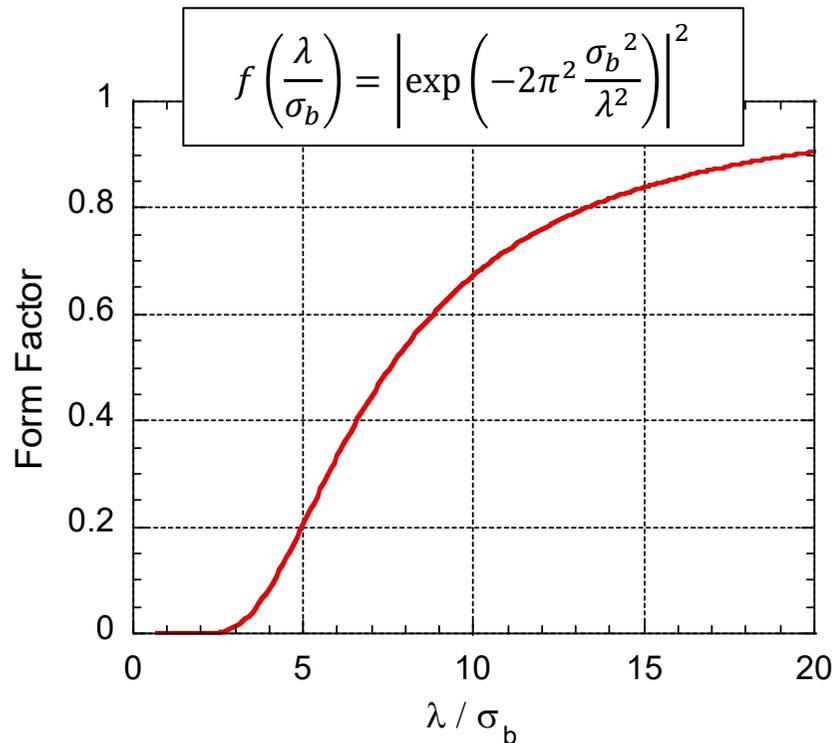
■ 電子パルスからの放射

単一電子からの放射パワー



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

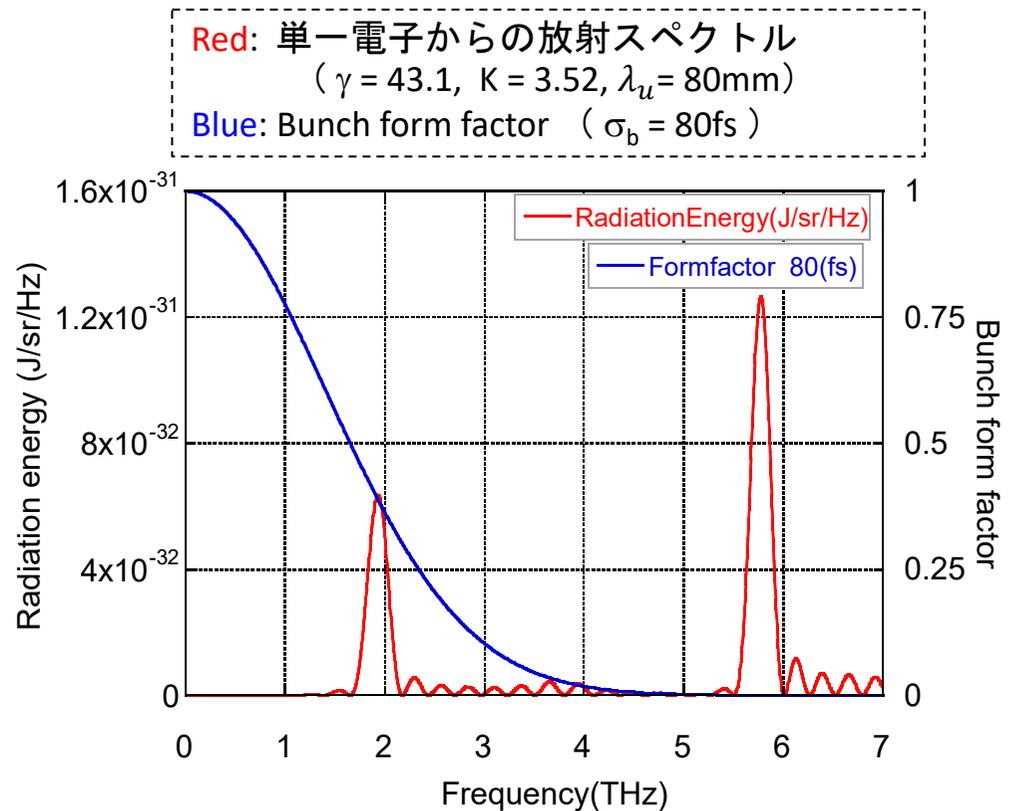
✓ 電子パルス長は放射波長よりも十分短く



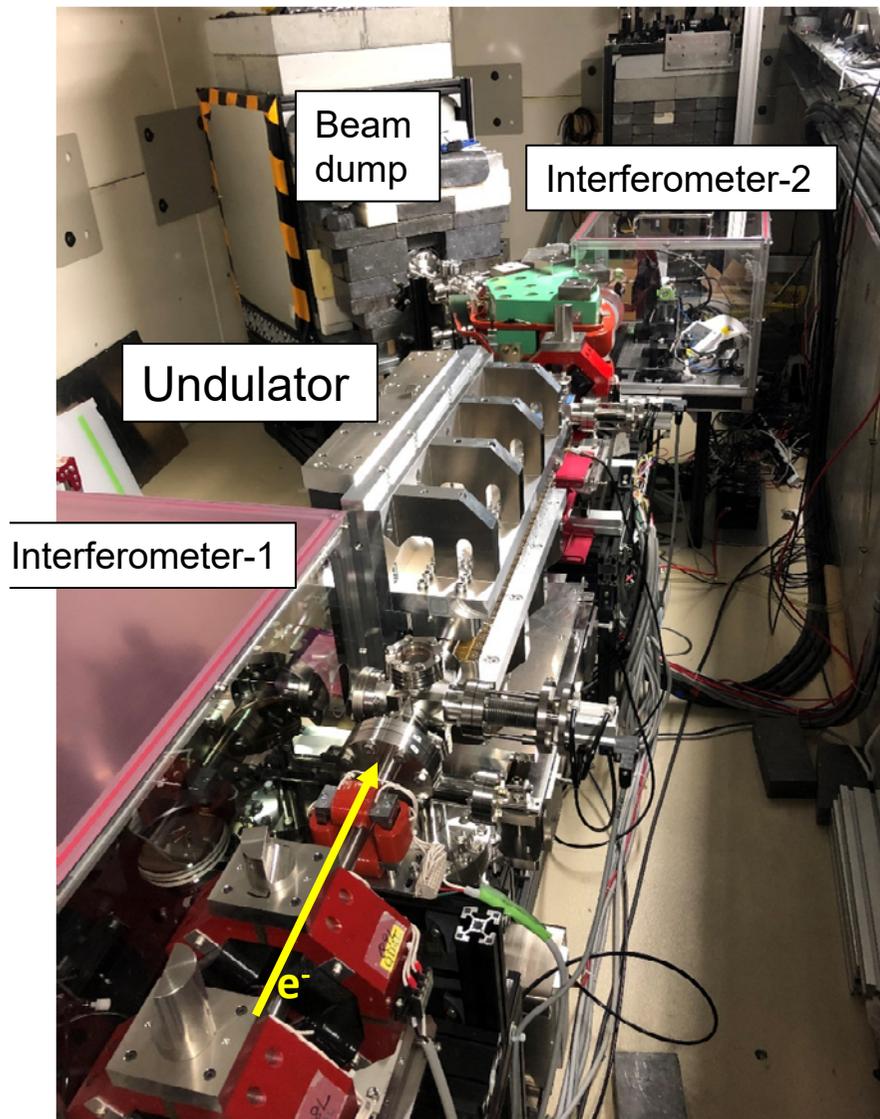
■ アンジュレータ放射

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

- ✓ THz波発生では、周期長は長く、K値は大きく、低エネルギーのビームが必要
- ✓ 放射の発散角が大きい



- t-ACTSでは、独立二空洞高周波電子銃と進行波加速管を用いたVelocity bunchingにより極短電子ビームの生成



■ Electron beam:

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

$$Q \sim 4 \text{ pC/bunch} \quad (5700 \text{ bunches})$$

$$\sigma_z \sim 80 \text{ fs}$$

■ Undulator:

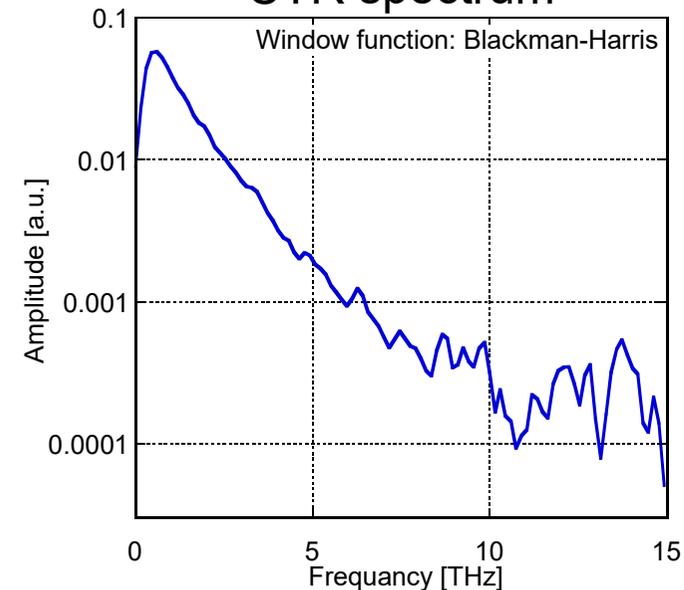
$$\lambda_U = 80 \text{ mm}$$

$$N_U = 7$$

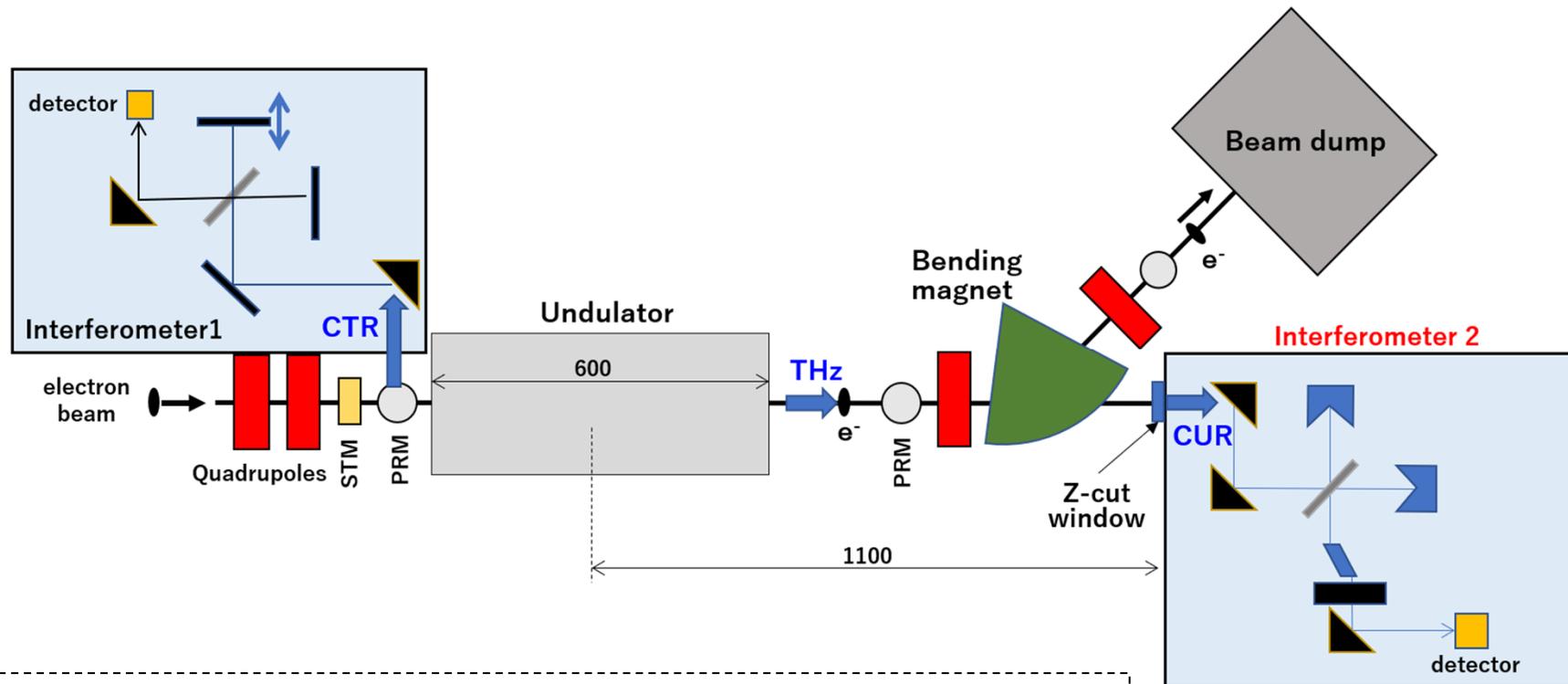
$$g = 33 \text{ mm (固定)}$$

$$K = 3.52$$

CTR spectrum



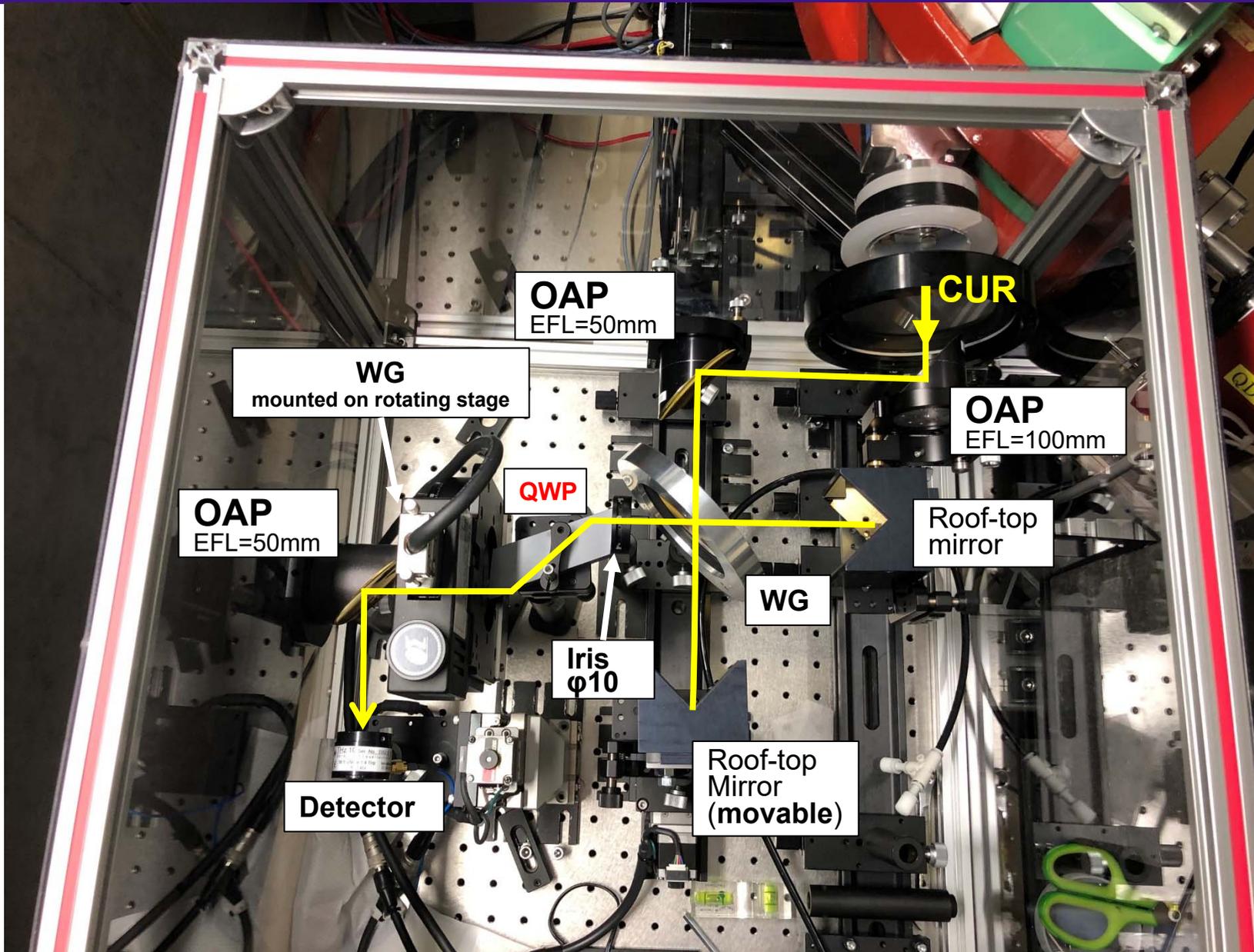
1. アンジュレータの上流の干渉計1を使い、バンチが最も短くなる（CTR強度最大）ようにビームの加速管への入射位相を調整。
2. 干渉計2でCURが最大になるよう再度ビーム入射位相を微調整。



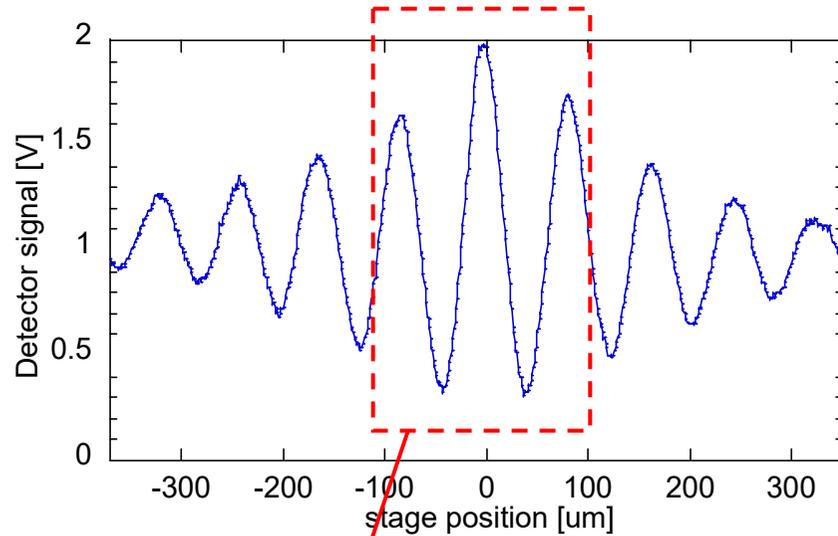
✓ アンジュレータ内でのバンチ伸長あり

$$R_{56,und} = 1.895 \text{ [mm]}, \quad \delta \sim 0.8 \text{ [%]}$$

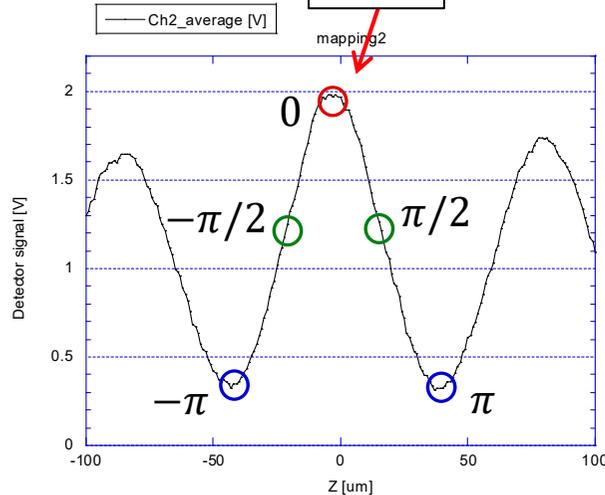
[7] N. Morita et al., Proc. of the 16th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, THO110 (2019) pp157-160.



- 偏光操作のマーチンパレット型干渉計を用いてスペクトルを測定
- 検出器前の偏光子 (wire-grid) は水平偏光が透過するように設定 ($\delta = 0$)

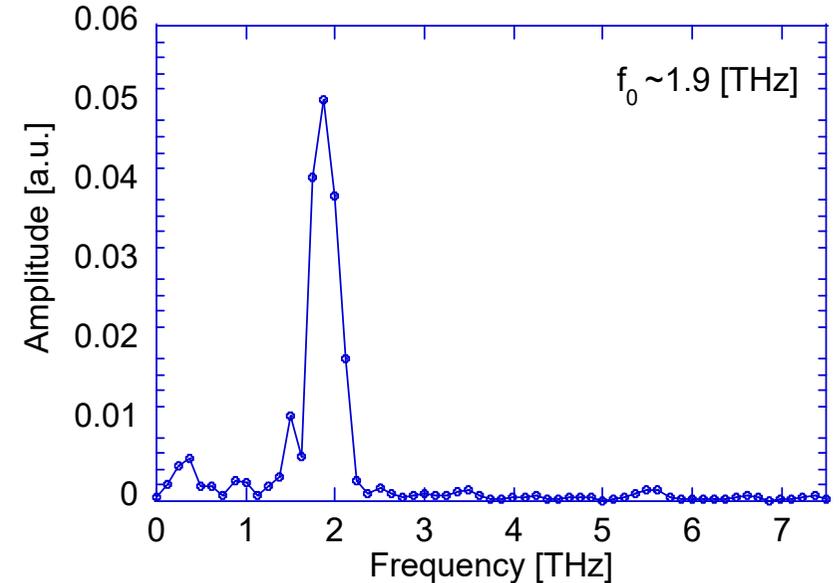


拡大



- 水平直線偏光
- 円偏光
- 垂直直線偏光

Undulator: $\lambda_U = 80 \text{ mm}, K = 3.51, N = 7$



$f_0 \sim 1.9 \text{ THz}$ ($\lambda_0 \sim 158 \mu\text{m}$)

周波数分解能と測定可能周波数
 $\Delta\nu = c/2L$, L : 全移動距離
 $\nu_{max} = c/4l$, l : 移動ステップ

ストークスパラメータ： 完全偏光、部分偏光、無偏光にも適用化

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad \begin{array}{l} S_0 : \text{Total pol.} \\ S_1 : \text{Linear horizontal pol.} \\ S_2 : \text{Linear +45 pol.} \\ S_3 : \text{Right circular pol.} \end{array}$$

✓ 各偏光 (LHP, L45 and RCP) の優位性を表す.

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

Un-polarized polarized

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

Linear Horizontal

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

Linear Vertical

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

45°Linear

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

135°Linear

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

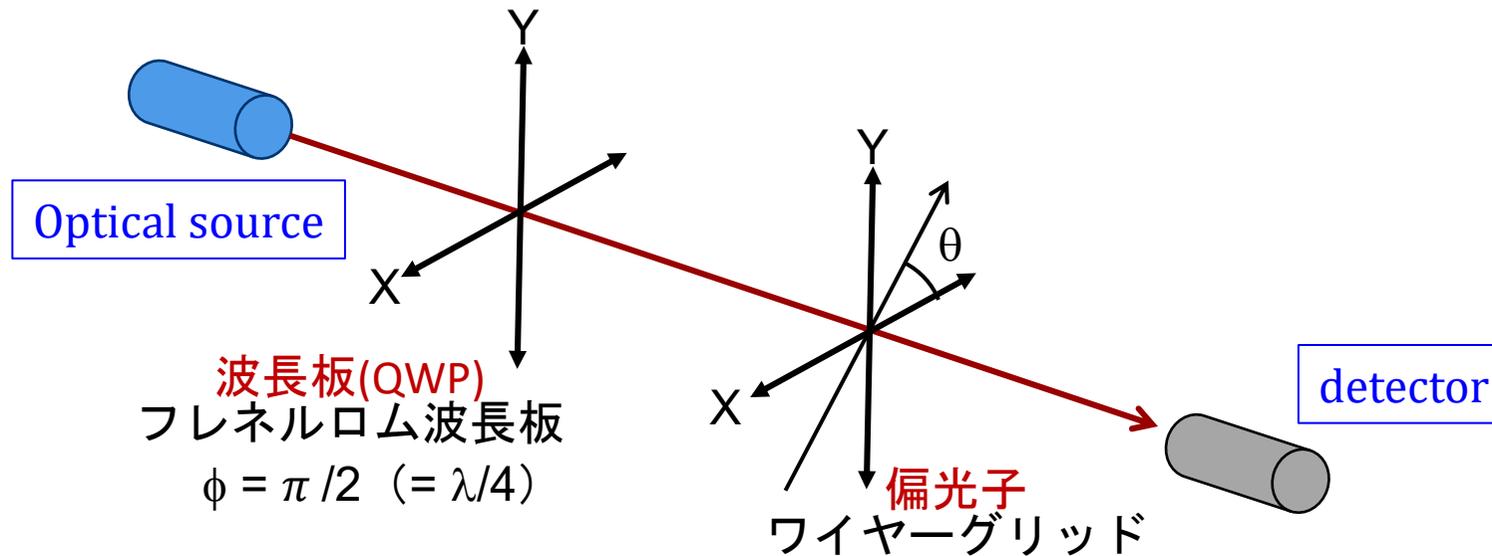
Right circular

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

Left circular

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

P : 偏光度 (DOP: degree of polarization)



4つの状態で強度を測定する

$$\begin{aligned} \theta = 0, \phi = 0 &\Rightarrow I(0, 0) \\ \theta = \pi/2, \phi = 0 &\Rightarrow I(\pi/2, 0) \\ \theta = \pi/4, \phi = 0 &\Rightarrow I(\pi/4, 0) \\ \theta = \pi/4, \phi = \pi/2 &\Rightarrow I(\pi/4, \pi/2) \end{aligned}$$

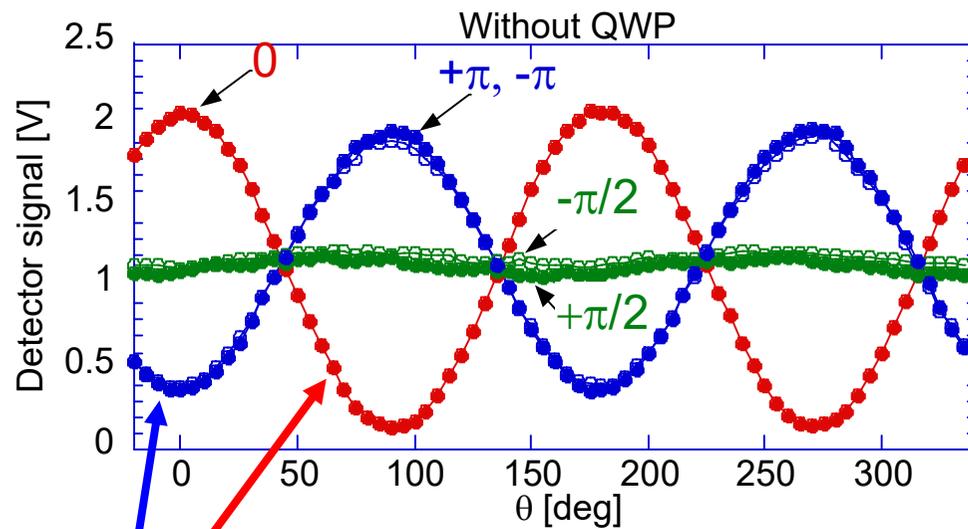
ストークスパラメータ

$$\begin{aligned} S_0 &= I(0, 0) + I(\pi/2, 0) \\ S_1 &= I(0, 0) - I(\pi/2, 0) \\ S_2 &= 2 \cdot I(\pi/4, 0) - S_0 \\ S_3 &= S_0 - 2 \cdot I(\pi/4, \pi/2) \end{aligned}$$

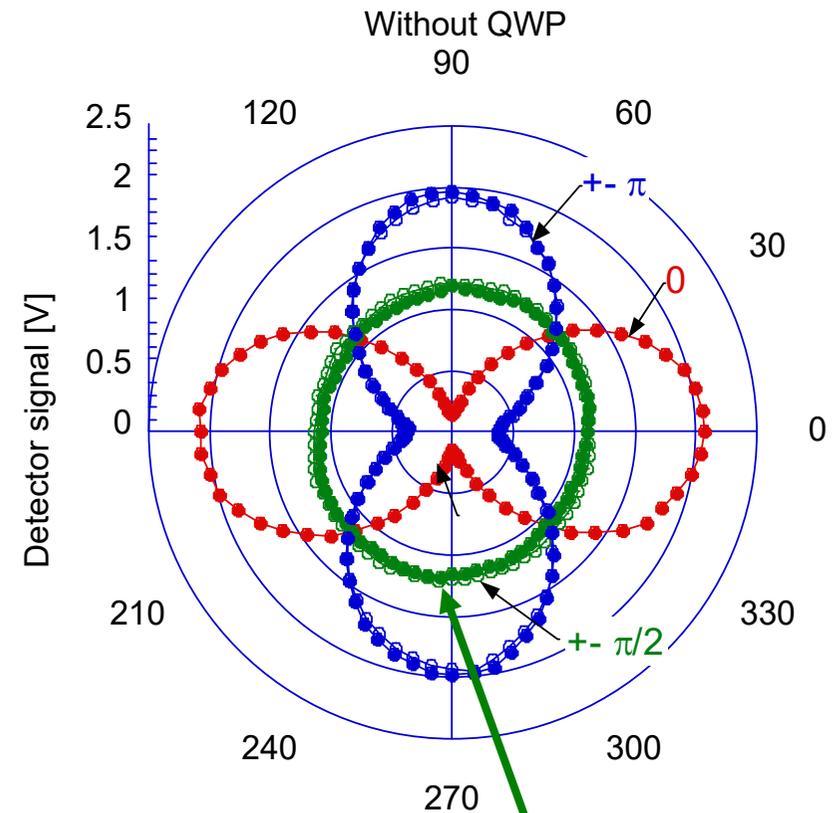
$$P = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2}}{S_0} = P_L^2 + P_C^2$$

$$P_L = \frac{\sqrt{S_1^2 + S_2^2}}{S_0}, \quad P_C = \frac{S_3}{S_0}$$

- 位相差(δ)を $0, \pm \pi/2, \pm \pi$ に設定し、5つの偏光状態について測定
- WG偏光子を回転 (5° ステップ) させ透過CUR強度を測定
- フレネルロム波長板なし

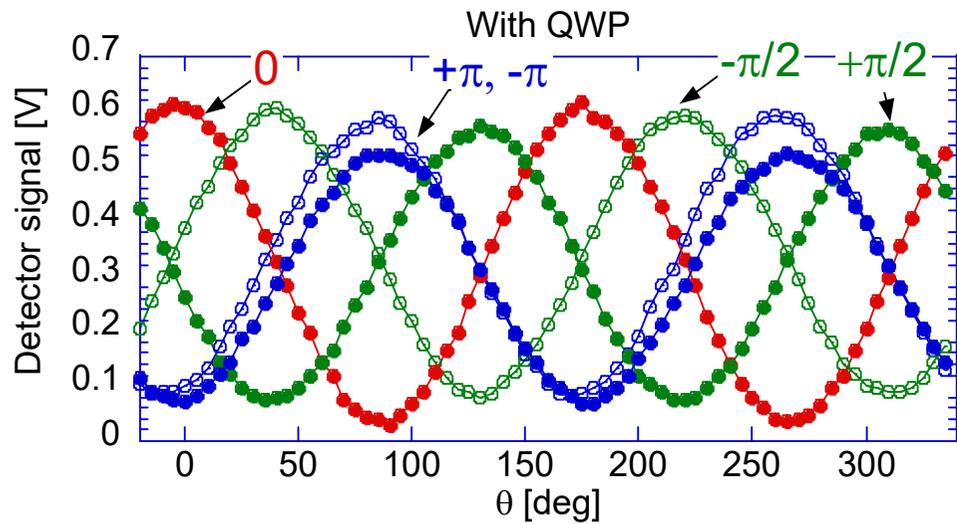


水平偏光(赤): 7周期のCURが完全にオーバーラップ
 垂直偏光(青):
 パルスの最初と最後の半周期(π)がオーバーラップしていない

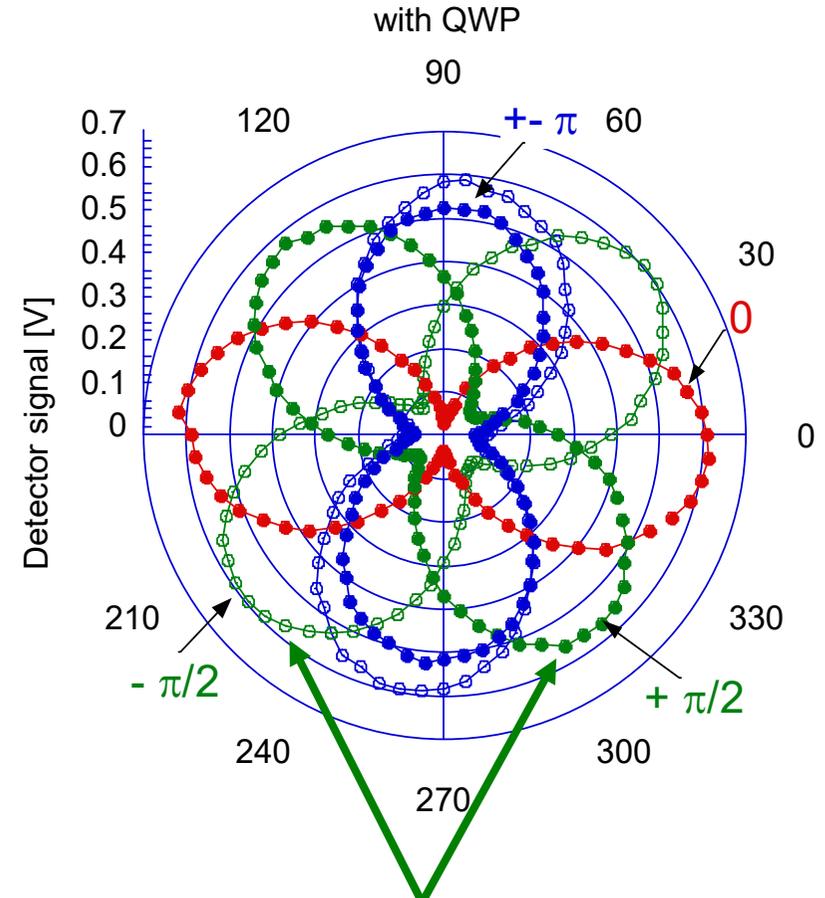


円偏光の左右回転方向
 の区別がつかない

- 位相差(δ) : $0, \pm\pi, \pm\pi/2$ の5つの偏光状態で測定
- フレネルロム波長板をワイヤーグリッド偏光子の前に設置して測定



*QWPを入れることで信号振幅が1/3に減少
 **QWPに水平・垂直偏光を入力し透過率を測定
 (V-pol.: 0.29, H-pol.: 0.28)

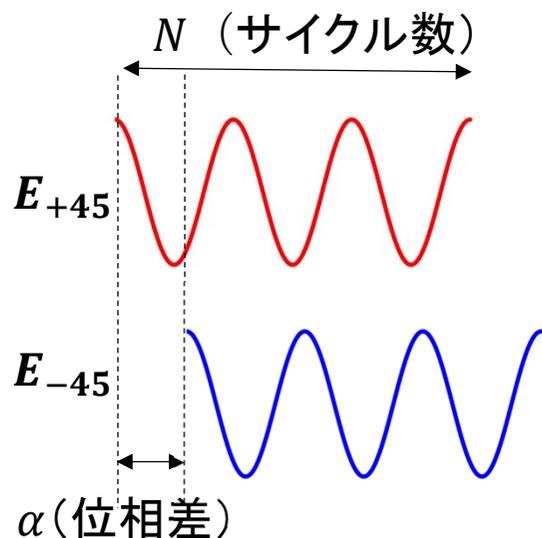


円偏光の左右回転方向の区別できた
 (45度、135度直線偏光へ)

■ 5つの偏光状態において、偏光子(θ)と波長板(ϕ)を使い測定された
 $I(0, 0), I(\pi/2, 0), I(\pi/4, 0), I(\pi/4, \pi/2)$
 から、偏光度 P 、直線偏光度 P_L 、円偏光 P_C を求めた。

Pol. state	δ	P	P_L	P_C
Ver. Linear	π	0.707	0.67	0.227
Right Circular	$\pi/2$	0.752	0.039	0.751
Hor. Linear	0	0.883	0.875	0.116
Left Circular	$-\pi/2$	0.768	0.054	-0.766
Ver. Linear	$-\pi$	0.683	0.682	0.043

←
 反転
 ←



- ✓ 位相差なし($\delta = 0$)のとき、約12%が無偏光成分
- ✓ 位相差が増えると偏光度 P が減少(重畳部の減少)
- ✓ 部分偏光の中では、想定した偏光状態が高い偏光度で作り出されている($P_L/P \sim 1, P_C/P \sim 1$)
- ✓ 左右円偏光のヘリシティの反転を確認

- 水平直線偏光のコヒーレントアンジュレータ放射を用いて、任意の偏光状態を作り出すことができるマーチンパレット型偏光制御システムを構築し、東北大学電子光物理学研究センターt-ACTSでビーム実験を実施した。
(コヒーレントアンジュレータ放射：約1.9 THz)
- 干渉計内の光学遅延をかえることにより、直線偏光したアンジュレータ放射から、水平垂直直線偏光および左右円偏光状態への偏光操作した。
- ワイヤーグリッド偏光子とフレネルロム波長板を用いて、ストークスパラメータの計測を行い偏光操作後の偏光度の評価を行なった。その結果、各偏光状態で高い偏光度が実現されていることを確認することができた。
- 今後、テラヘルツ帯において左右の円偏光に対して反射・吸収が異なる金属マイクロコイル^[#]などを使って、VCDの試験的測定を行いたいと考えている。
(#K. Kamata et al., Sci Rep 4, 4919 (2014).)

謝辞

*本研究は、京都大学エネルギー理工学研究所・ゼロエミッションエネルギー研究拠点共同研究（ZE31C-12）および科研費・挑戦的萌芽研究（18K18758）の補助のもと実施されました。