

電気光学サンプリングによる電子ビーム周りの 電場のシングルショット計測

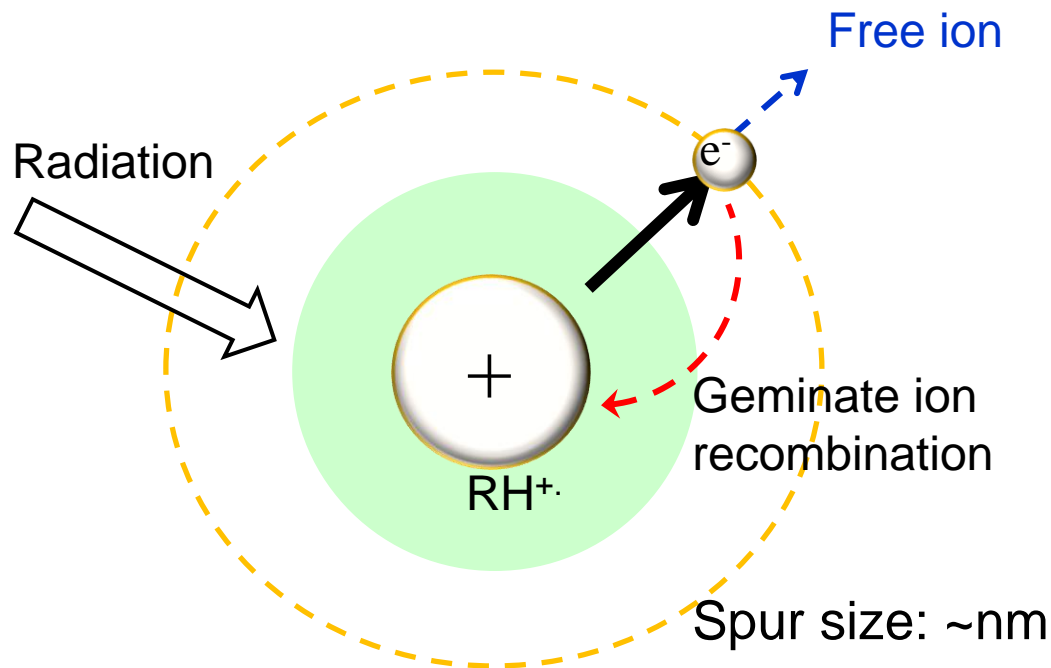


菅晃一¹、太田雅人²、王有為³、Verdad C. Agulto³、
Valynn Katrine Mag-usara³、有川安信³、松井龍之介⁴、坂和洋一³、中嶋誠³

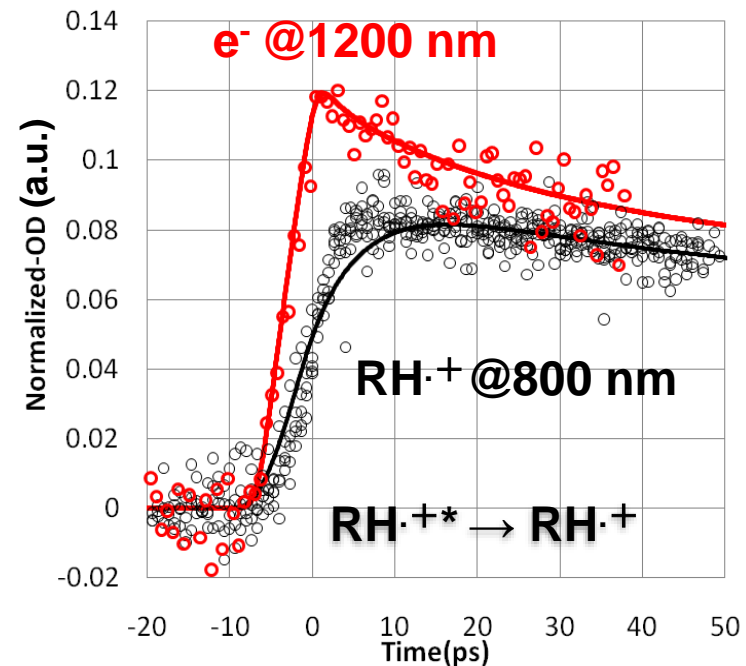
1:量研、2:核融合研、3:阪大レーザー研、4:三重大電気電子工

パルスラジオリシス（時間分解過渡吸収分光）

量子ビーム誘起超高速反応



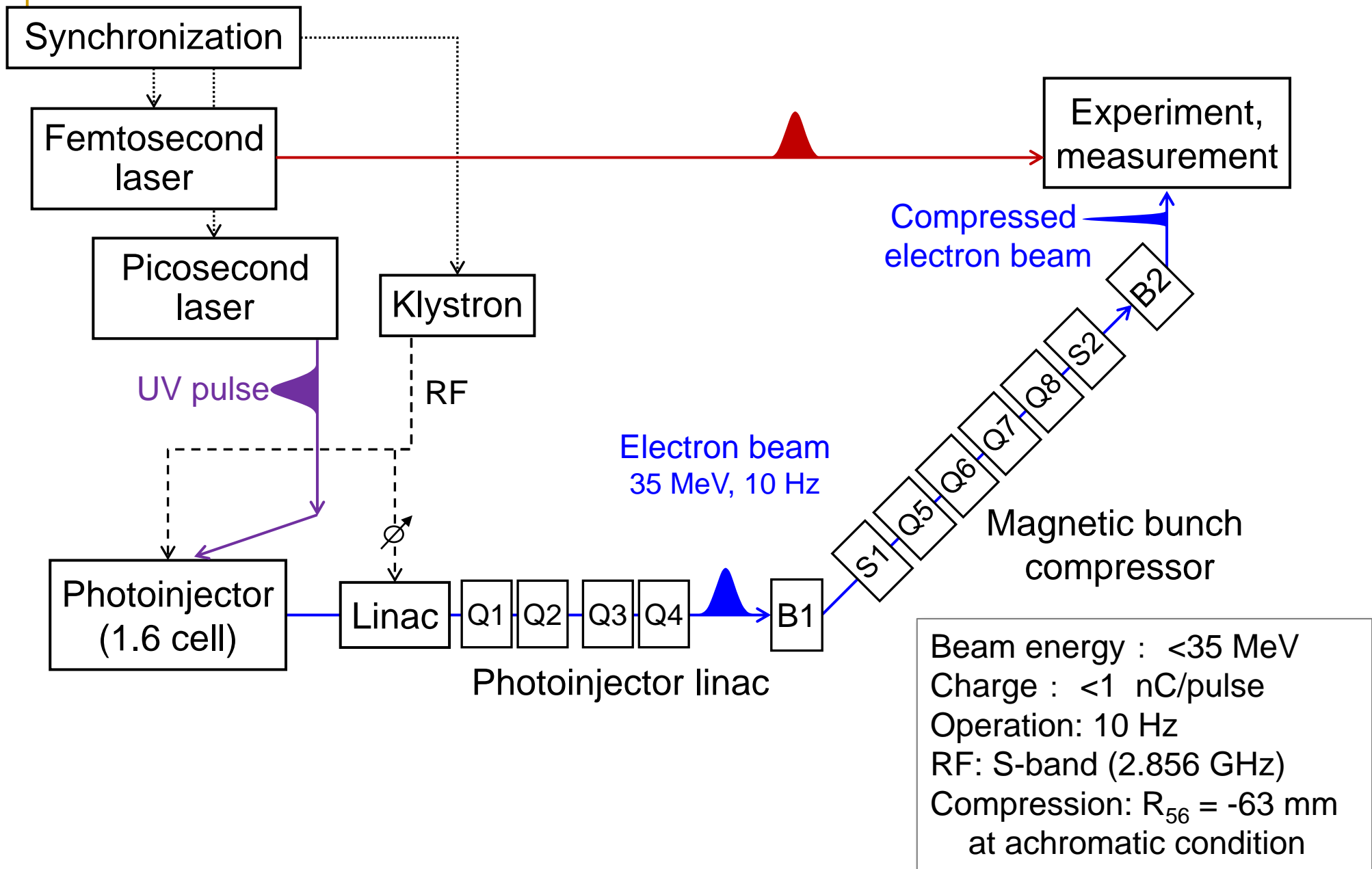
ドデカンにおけるカチオンラジカルと電子の時間変化



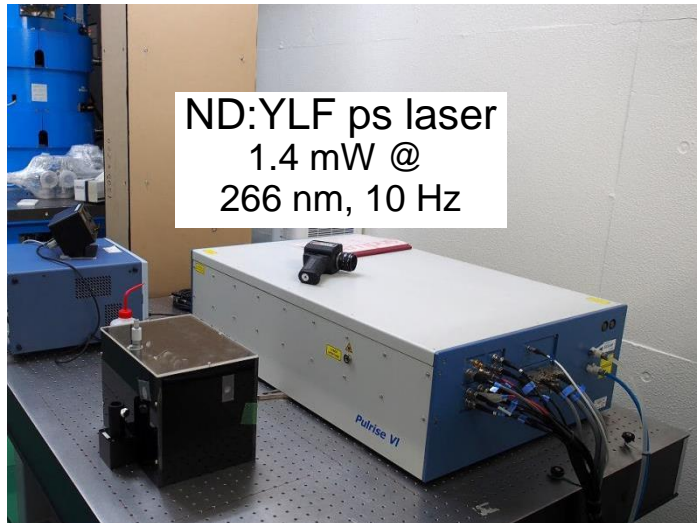
量子ビーム誘起超高速反応の解明は、その後起こる反応解析・制御のために重要

→電子ビーム診断を通して、反応解析の時間分解能の向上が可能

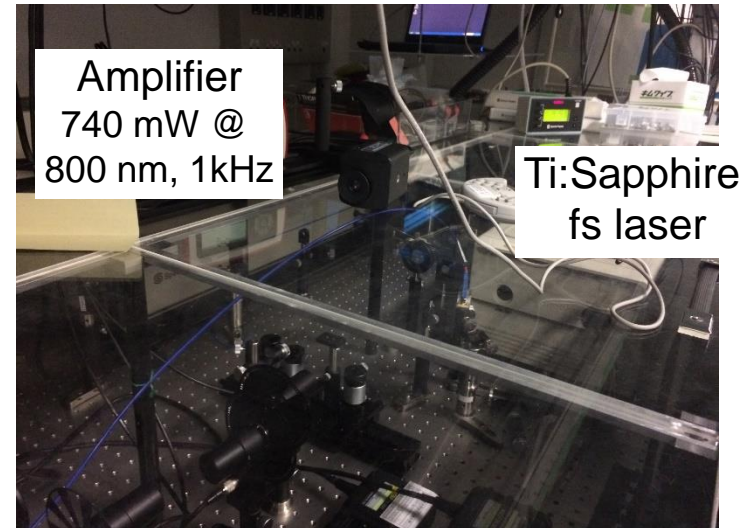
フォトカソード高周波電子銃加速器の構成



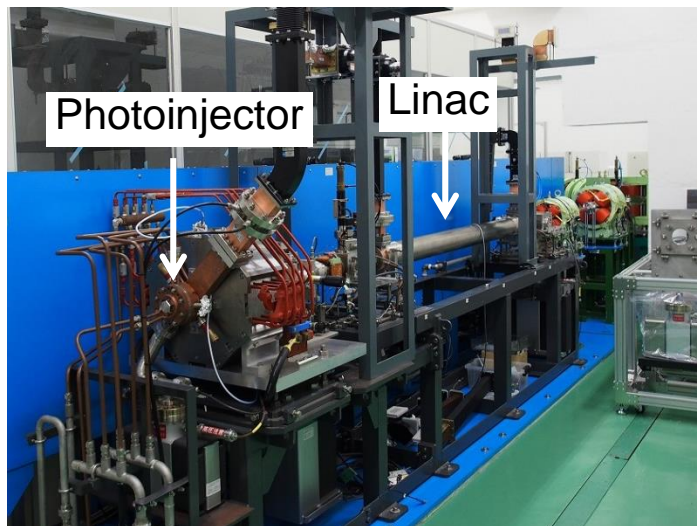
加速器の写真



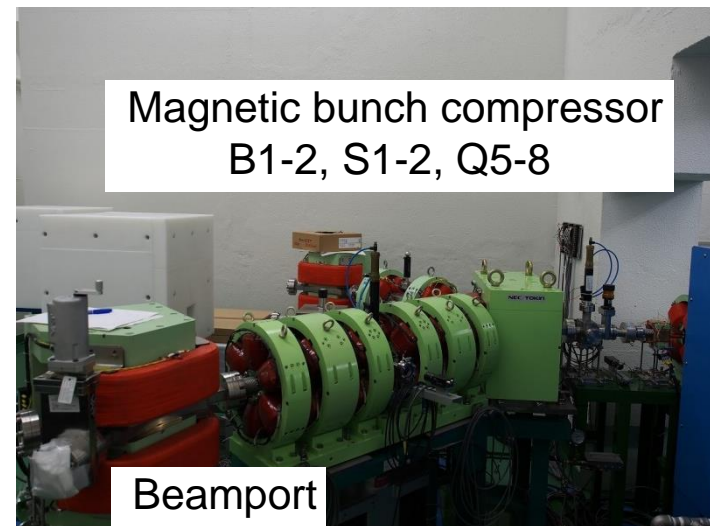
Picosecond laser



Femtosecond laser

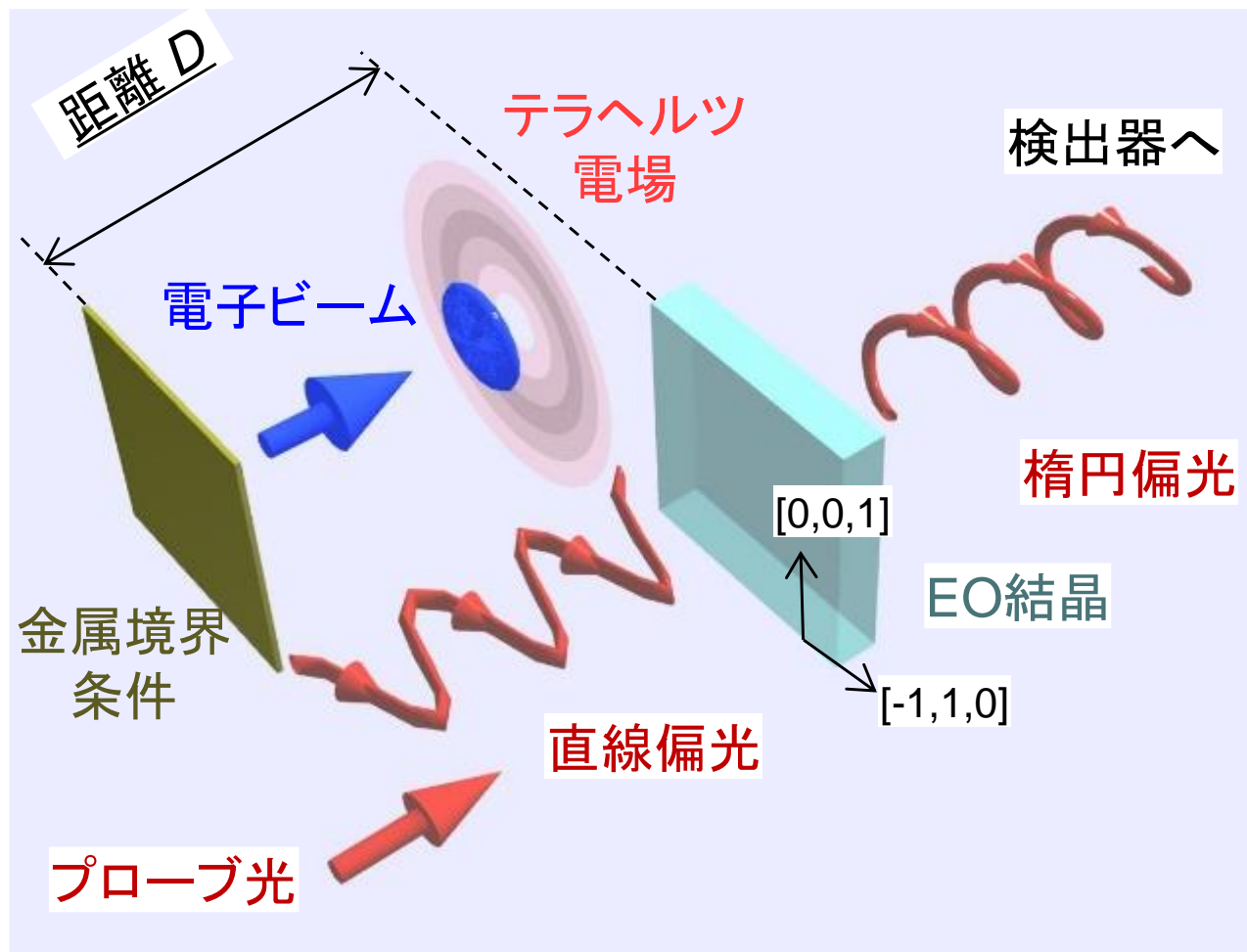


Accelerator



Magnetic bunch compressor

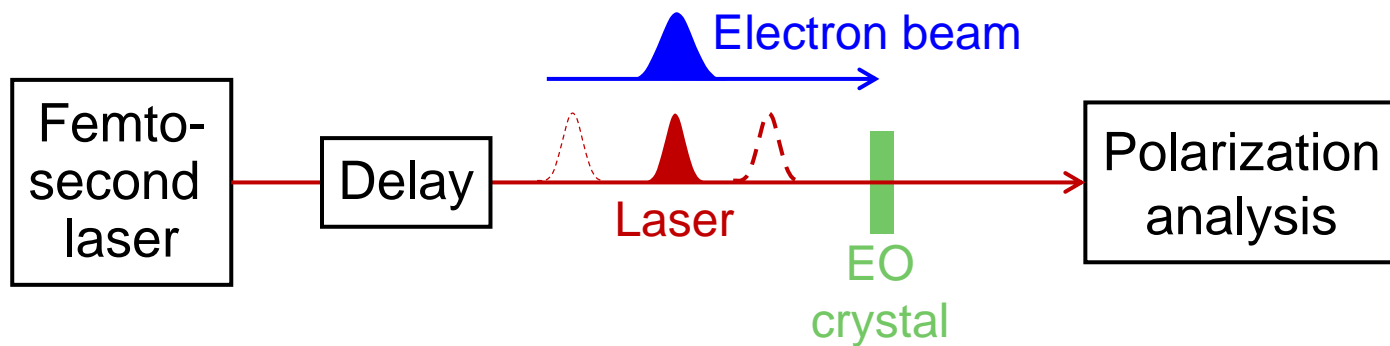
電気光学（EO, electro-optic）結晶による電場の計測



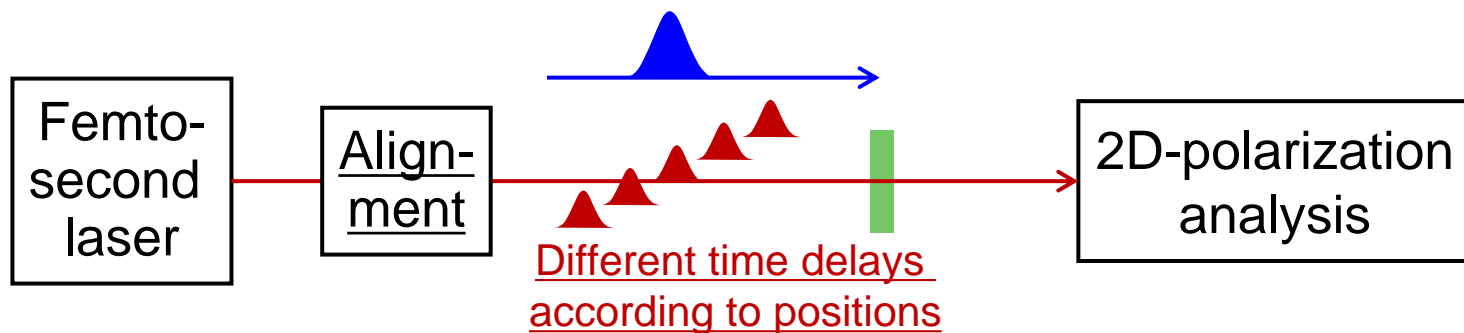
- 電子ビームの周りのテラヘルツ電場の計測
- 電気光学結晶のポッケルス効果により偏光が変化
- 空間分解・時間分解も可能

シングルショット計測の開発の方針

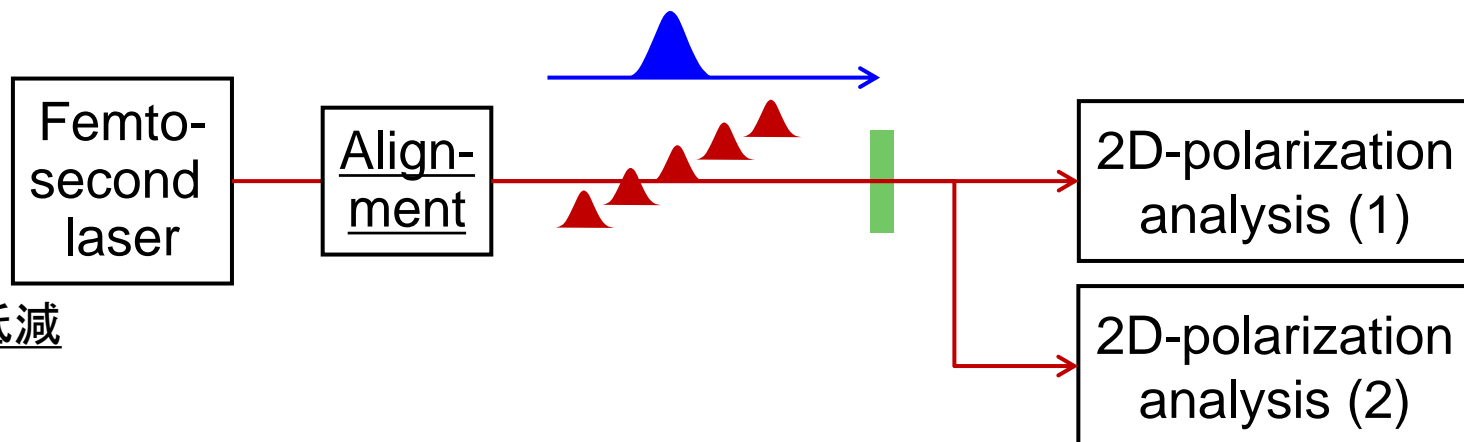
- 多数回計測
- ・光学系が単純
 - ・ジッター影響あり



- 一光路シングルショット計測
- ・光学系が多素子
 - ・2回測定で電場解析
 - ・ジッター影響低減



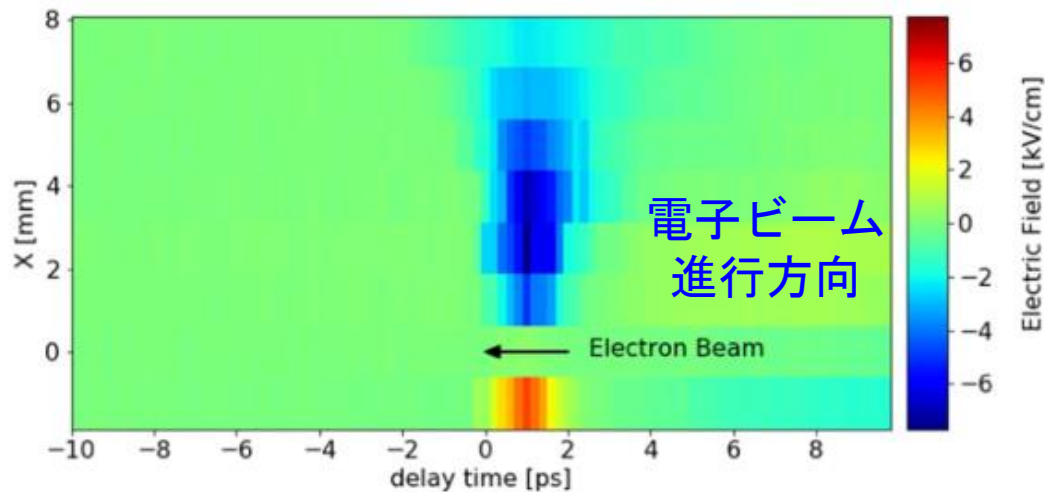
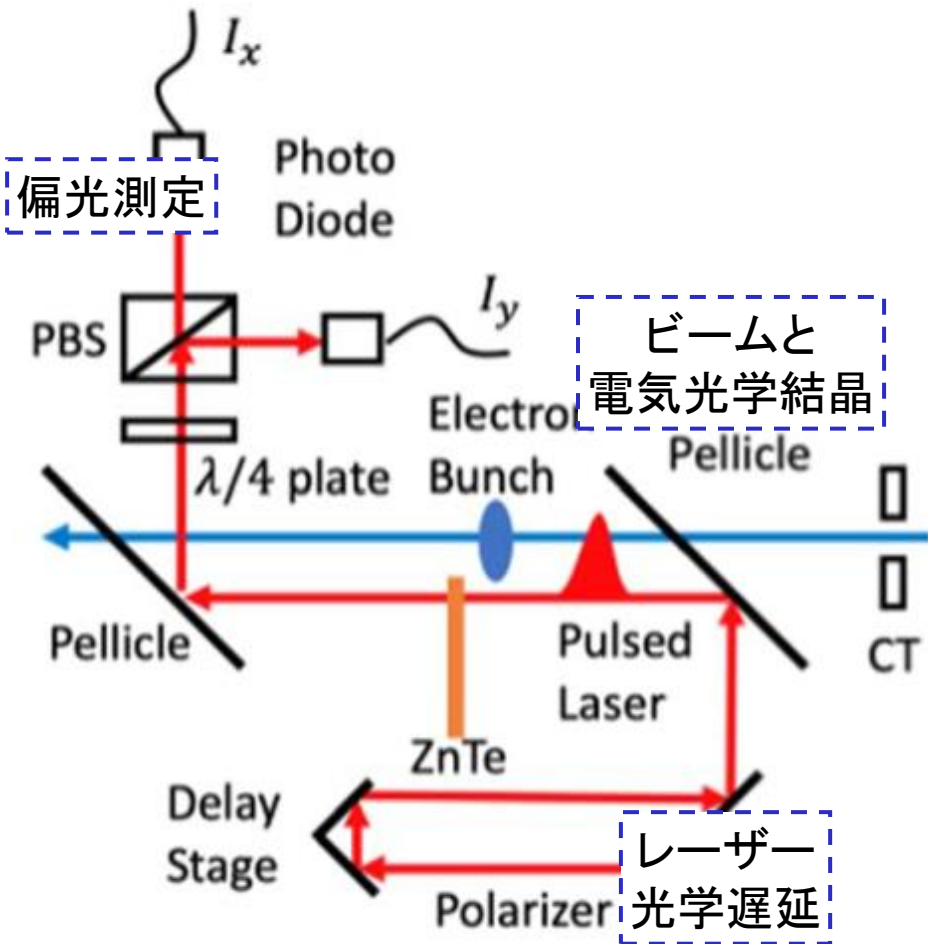
- 二光路シングルショット計測
- ・光学系がより多素子
 - ・1回測定で電場解析
 - ・ジッター影響をより低減



電気光学結晶による電場分布測定

電子ビーム周りの電場計測

電場の分布

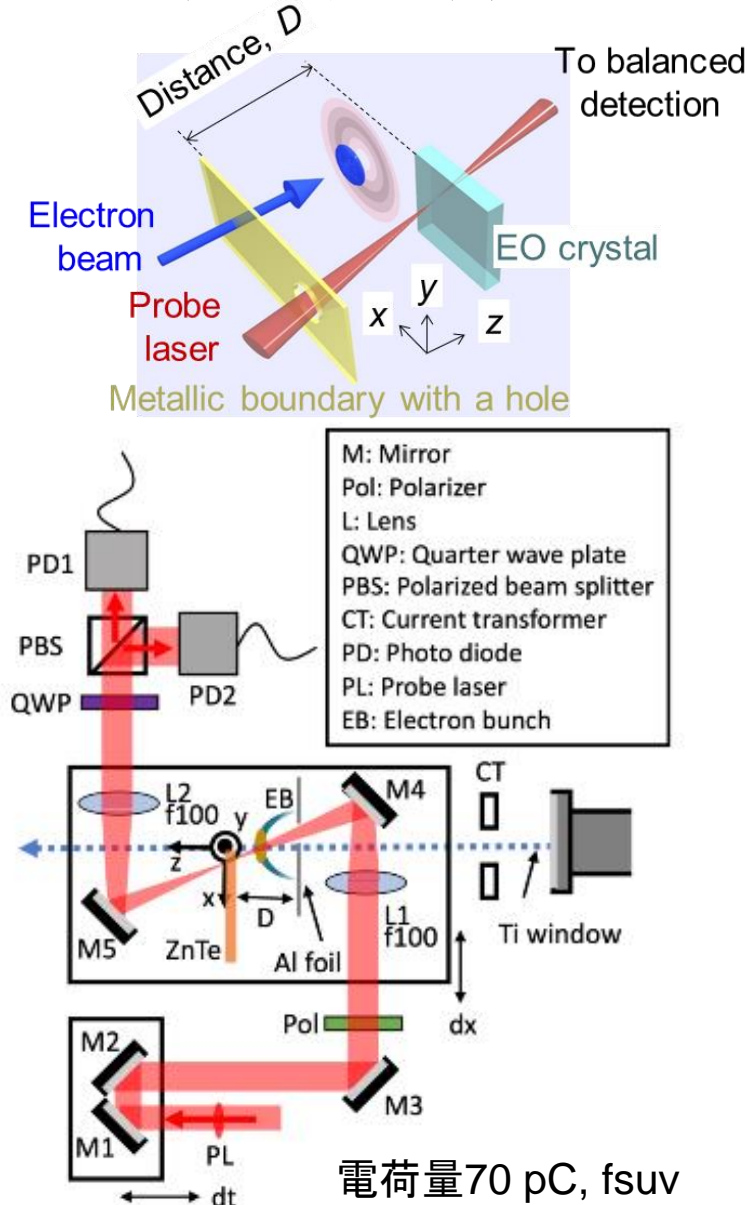


- 電子ビームの位置を変えては時間掃引して多数回計測
- バランス検出 (電場 $E \propto (I_x - I_y) / (I_x + I_y)$)
- 完全な時空間分布ではない
- 電荷量 370 pC, psuv

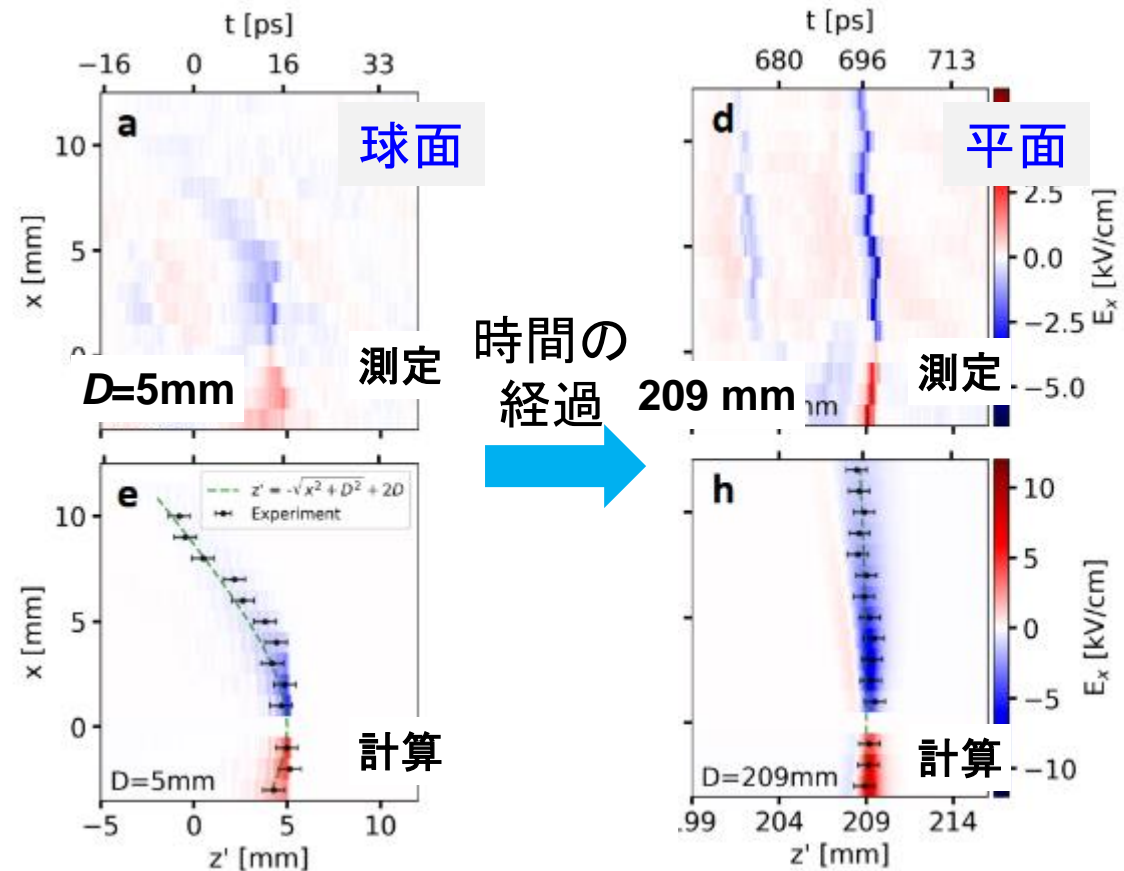
電子ビームのクーロン電場分布計測

電場の時空間分布の変化

多数回測定の改良

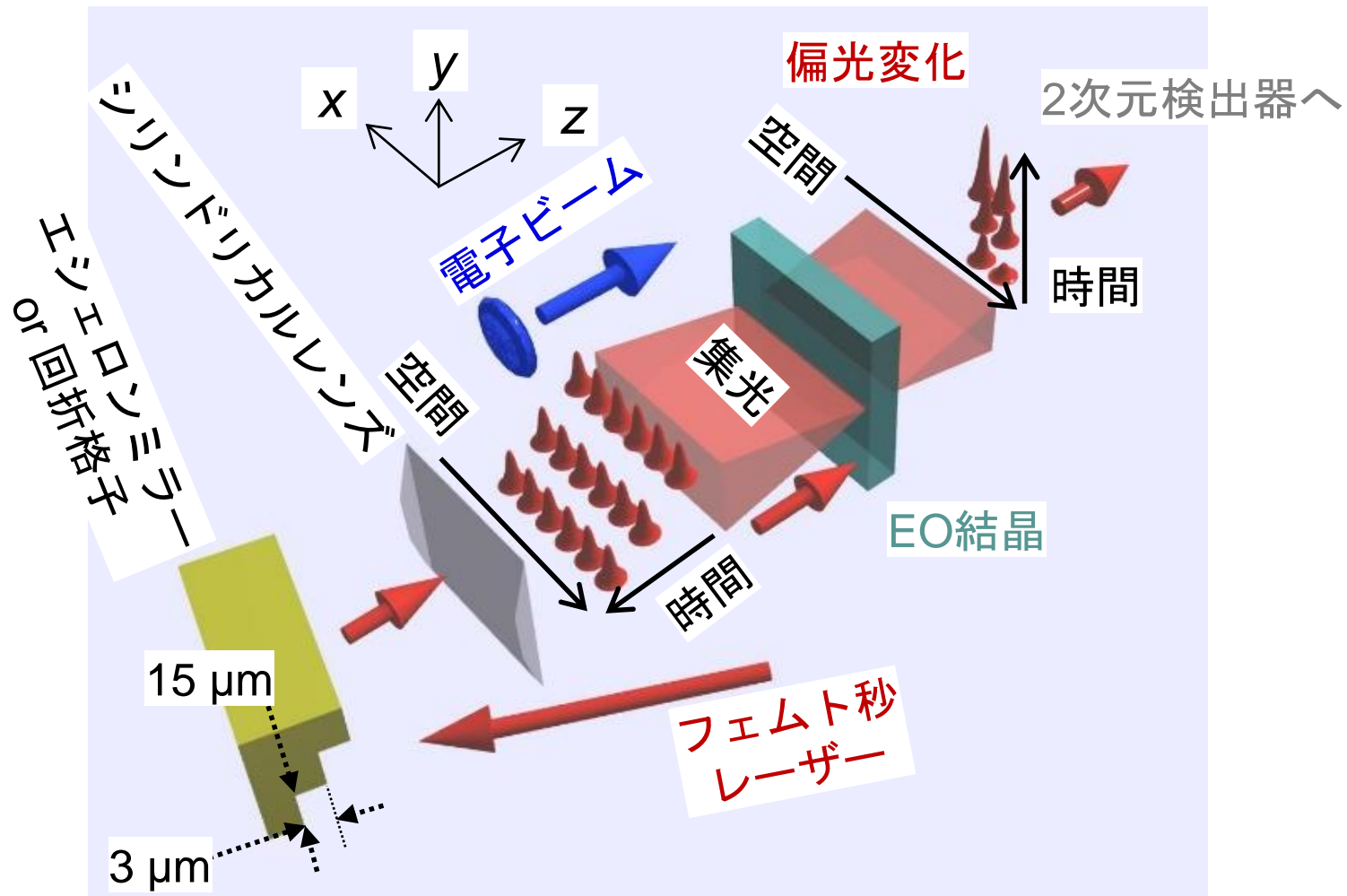


多数回測定の時間遅延と観測点変更で測定



同期時間ジッターの影響はあるが、
 D による曲率・分布の変化を観測

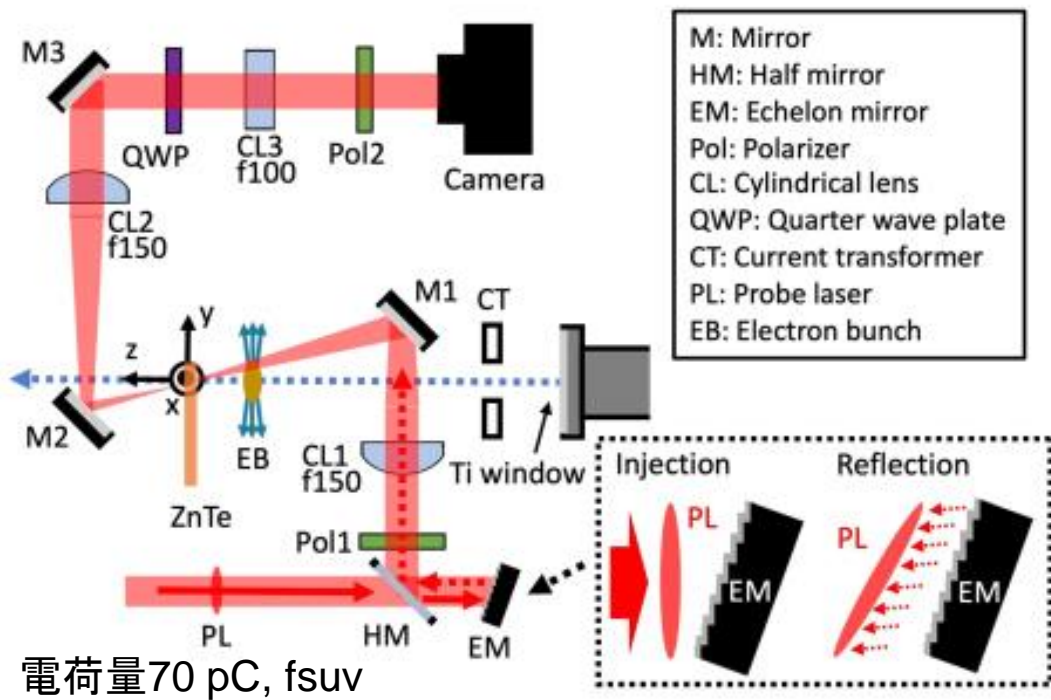
シングルショットで時空間分布を可視化



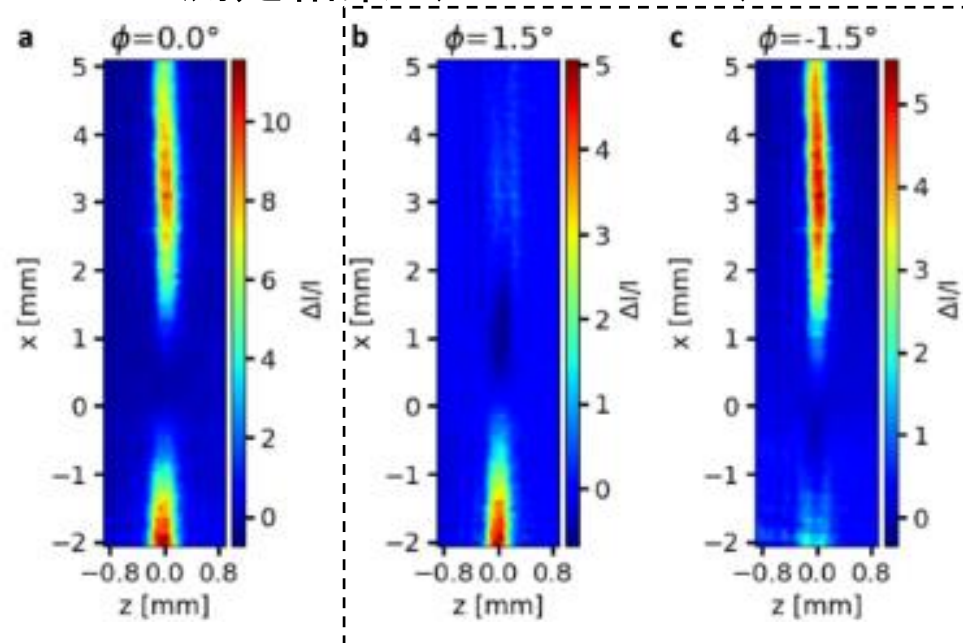
- レーザーの時空間分布を調整 (15 μm毎に~0.02 psの光学遅延)
- 偏光変化の時空間分布をカメラで検出
- 空間方向 (x) と時間方向 (進行方向, z) の電場分布に展開して解析

エシロンミラー導入とシングルショット計測

カメラによる計測



測定結果 ($D = 204$ mm)



位相オフセット法、4枚の画像、電場算出

$$\frac{I(+\phi, \Delta)}{I(+\phi, 0)} - \frac{I(-\phi, \Delta)}{I(-\phi, 0)} = \frac{2 \sin \Delta}{\sin 2\phi}$$

$$\Delta = \frac{2\pi n^3 r_{41} E L}{\lambda}$$

c.f., G. Asai et al., Optics Express 29, 3515 (2021).

- 1/4波長板(QWP)位相、 $\phi = 0^\circ$ では電場の絶対値が分かる
- $\phi = \pm 1.5^\circ$ の画像演算により、電場符号と分布を解析可能

M. Ota, K. Kan et al., Nature Physics, 18, 1436 (2022). 10

電子ビームの周りの電場の時空間分布の (シングルショット) 計測から得られたこと

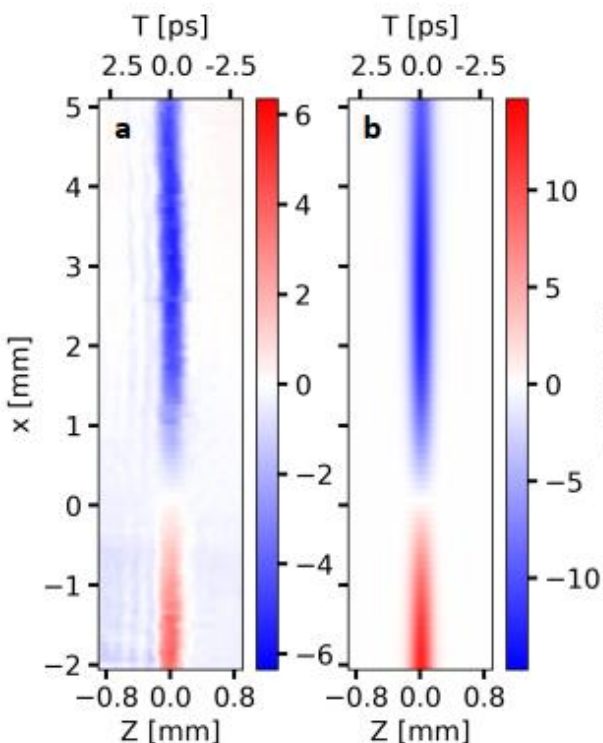
計測

計算

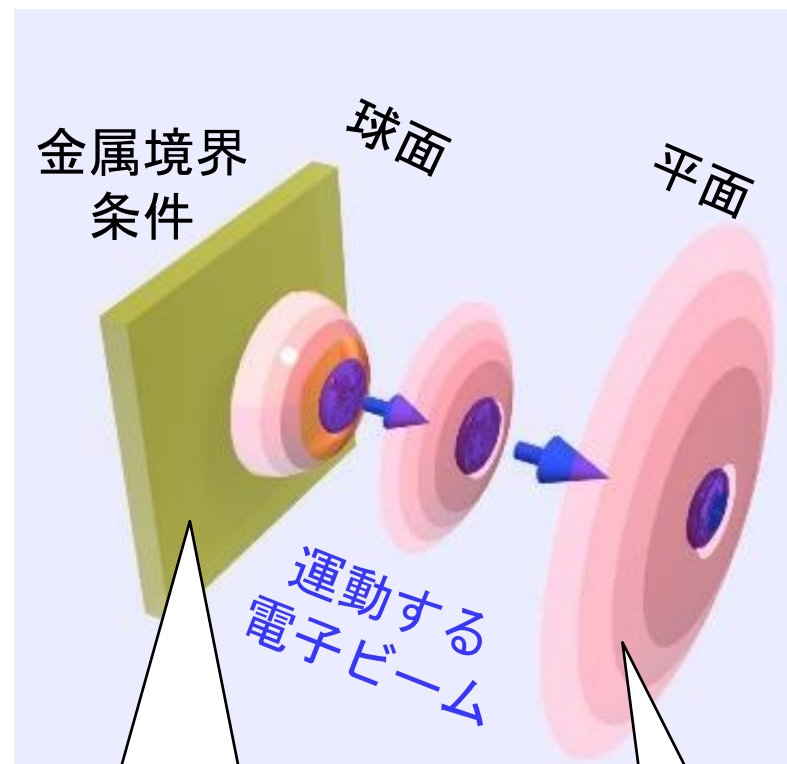
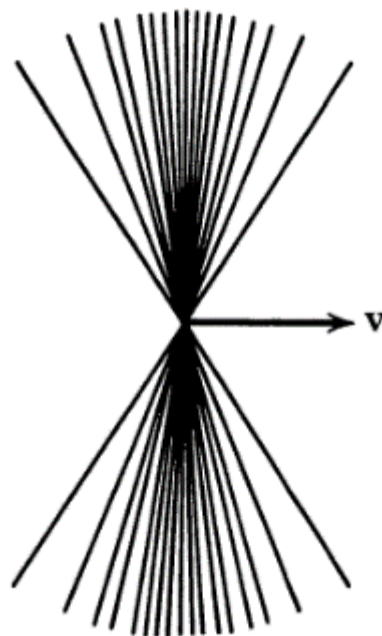
ローレンツ変換の概念図

電気力線 $v = \sim 0.94c$
J. D. Jackson, Classical
Electrodynamics

波面の概念図



$D = 204 \text{ mm}$

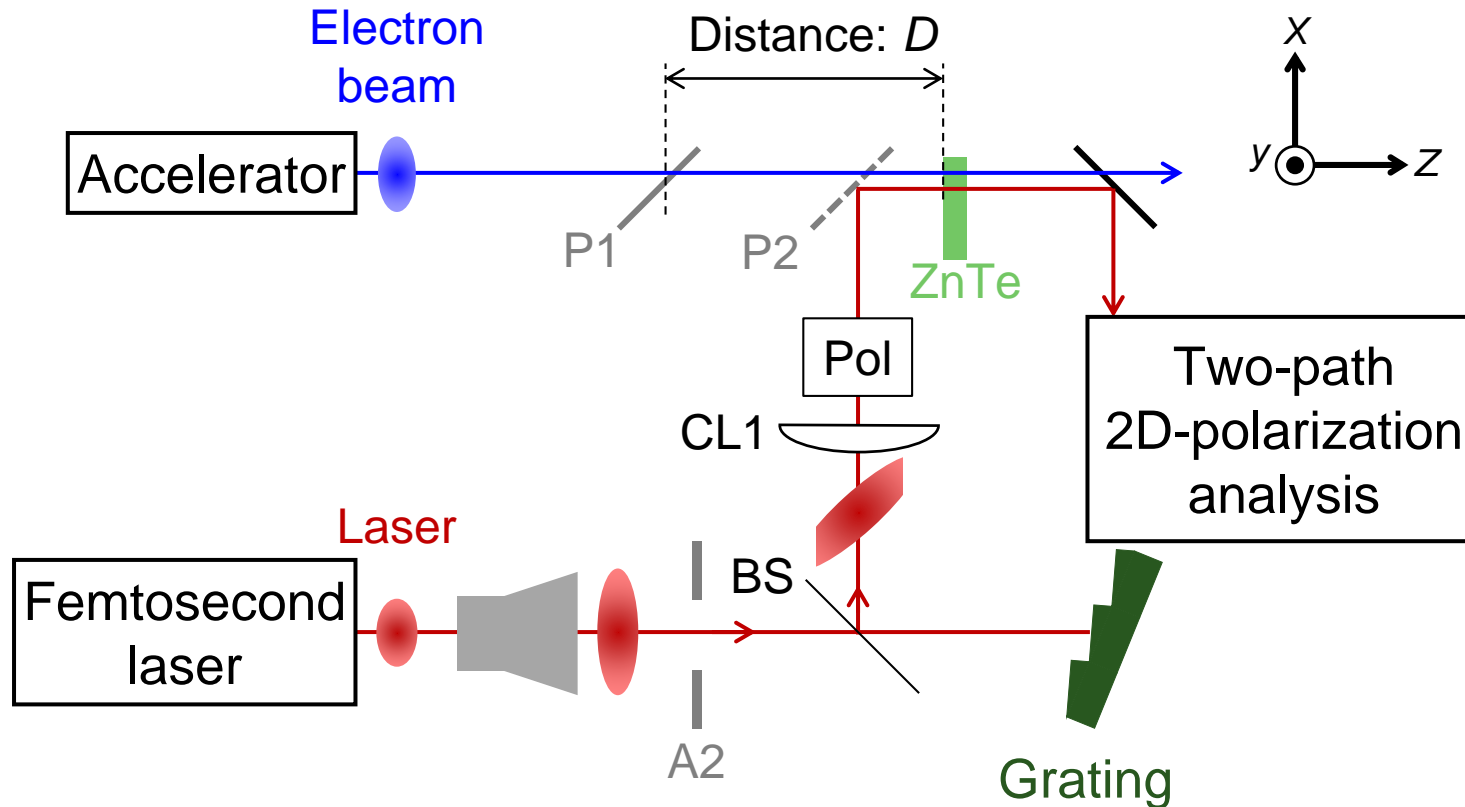


リエナール・ヴィーヘル
ト・ポテンシャル (LWP)

ローレンツ
変換 (LT)

短距離でのLWPから長距離でのLTで表される
電場に変化する相対論的現象を直接観測

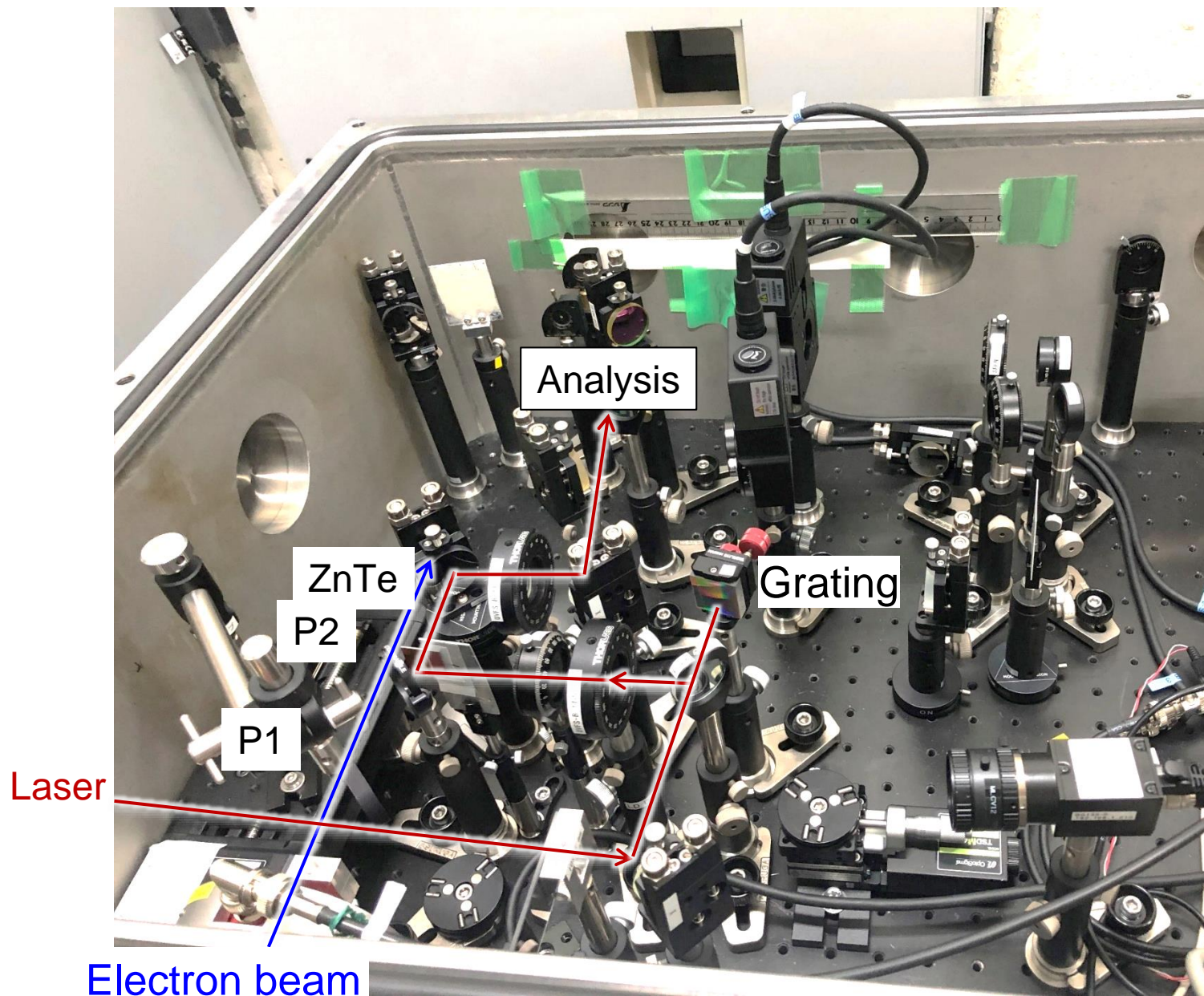
二光路のシングルショット計測の構築



- 位相オフセット法による高感度化
- 二光路の分岐・結像（4fと縮小）
- 従来より同期時間ジッターに強い光学系

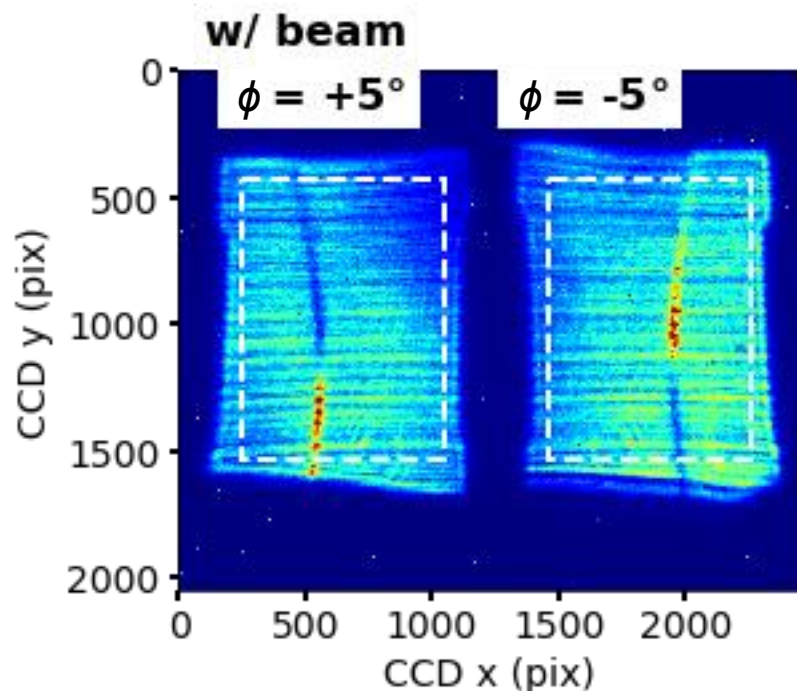
測定光学系

光学系の写真

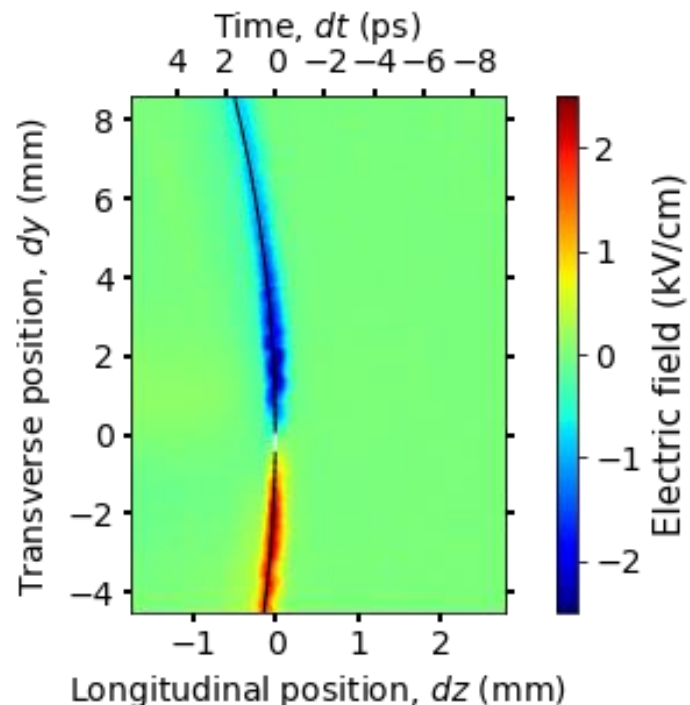


二光路シングルショット計測の画像・解析例

電子ビーム有り



解析例



1. 予めQWPの 0° を確認
2. QWPを光路に応じて調整
3. 電子ビームの有無の画像データを取得
4. 右側を左右反転、フィルター 11×11 pix medianで画像の演算と解析

- 波面の変化する様子を従来よりも詳細に確認
- 二光路シングルショット計測により、同期時間ジッターに強い系を構築

まとめ

電気光学サンプリングによるサブピコ秒電子ビーム（20~370 pC, 35 MeV）周りの電場のシングルショット計測

- 電子ビームの周りの電場の時空間分布として、ローレンツ収縮の直接的な観測
- エシェロンミラー・回折格子を用いたレーザーの時空間分布調整、位相オフセット法との組み合わせ
- その他の放射現象・テラヘルツ電場計測へ応用が期待される

本研究は、JSPS科研費（JP23K11702, JP20H02206, JP23H00281, JP19J20765, JP19K05331）による支援を受けました。本研究は、オートレースの補助を受けて実施しました（2022M-225）。

ご清聴ありがとうございました。

科研費
KAKENHI

