

核融合科学研究所 第2回 研究部セミナー
2023年7月14日（金）

超高速計測を用いた 相対論的プラズマ現象の探索

核融合科学研究所 ・ 助教
太田雅人（可知化センシングユニット）

発表内容

1. イントロダクション
2. 研究内容 1 :
相対論的クーロン電場の超高速可視化
(加速器実験)
3. 研究内容 2 :
X線自由電子レーザーを用いた
サブマイクロプラズマ膨張の超高速計測
(大型レーザー実験)
4. 超高速計測を用いた今後の研究展開

発表内容

1. **イントロダクション**
2. 研究内容 1 :
相対論的クーロン電場の超高速可視化
(加速器実験)
3. 研究内容 2 :
X線自由電子レーザーを用いた
サブマイクロプラズマ膨張の超高速計測
(大型レーザー実験)
4. 超高速計測を用いた今後の研究展開

研究歴

- 2013年~2017年 広島大学理学部物理科学科（学部）

ビーム物理学研究室→加速器中のビームダイナミクスを
イオントラップを用いて再現、ビーム物性を実験室で調査

- 2017年~2022年 大阪大学理学研究科宇宙地球科学専攻（修士・博士）
2018年（3ヶ月） ドイツ ヘルムホルツ研究所（研修生）
2019年~2022年 フランス Ecole polytechnique（博士）

レーザー宇宙物理研究室 →宇宙線の起源をレーザープラズマ実験で探索
理学博士@大阪大学

” Ultrafast Diagnostics for Relativistic Laser-Plasma Interaction ”

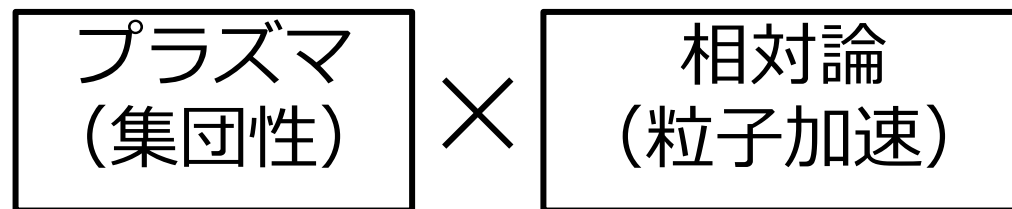
- 2022年~ 2023年 大阪大学レーザー科学研究所（特任研究員）

光量子ビーム科学研究グループ→テラヘルツ技術を用いた超高速計測の開発

- 2023年~現在 核融合科学研究所（助教）

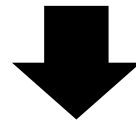
相対論的（実験室）プラズマとは

- 高エネルギー荷電粒子ビーム（非中性プラズマ）
→ 加速器実験
- 高エネルギーレーザー生成プラズマ
→ 大型レーザー実験



超高速計測とは

ピコ秒スケールのプラズマダイナミクス



非線形光学効果を用いたプラズマ診断技術

核融合科学研究所 第2回 研究部セミナー
2023年7月14日（金）

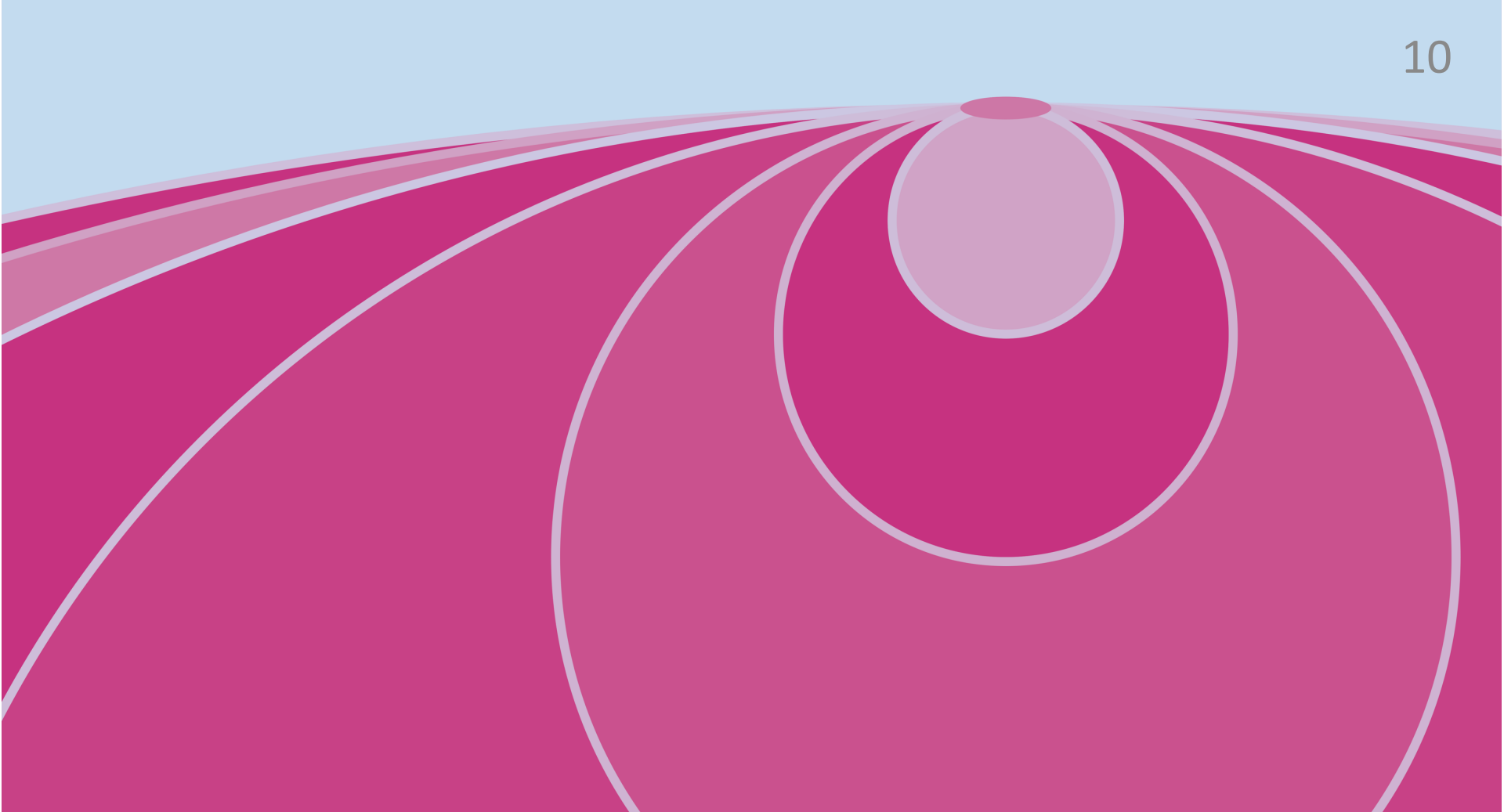
超高速計測を用いた 相対論的プラズマ現象の探索

核融合科学研究所 ・ 助教
太田雅人（可知化センシングユニット）

発表内容

1. イントロダクション
2. 研究内容 1 :
相対論的クーロン電場の超高速可視化
(加速器実験)
3. 研究内容 2 :
X線自由電子レーザーを用いた
サブマイクロプラズマ膨張の超高速計測
(大型レーザー実験)
4. 超高速計測を用いた今後の研究展開

相対論的クーロン電場の 超高速可視化



本研究成果を一言でまとめると
「**相対性理論の可視化**」

M. Ota, et al. Nature Physics 18, 1436–1440 (2022).

相対性理論とは「相対性の理論」

**物理現象の見え方は
観測者によって相対的に変わる**

相対性理論 (A. アインシュタイン)

1905年
特殊相対性理論
(重力含まない)

本研究テーマ

拡張



1915年
一般相対性理論
(重力含む)

- ブラックホール
(ノーベル賞2020)
- 重力波
(ノーベル賞2017)

A. Einstein,
“動いている物体の電気力学（和訳）”
Ann. Phys. 17, 891–921 (1905).

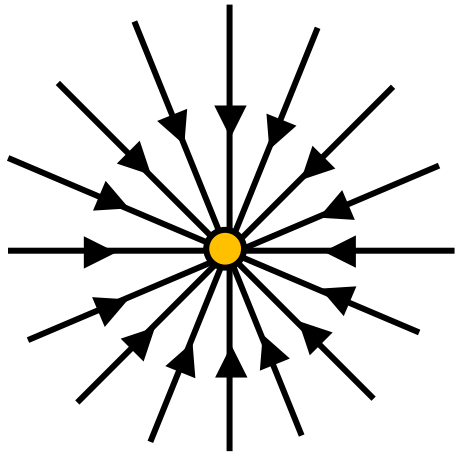
特殊相対性理論

- 時間の遅れ → GPS
- 静止質量 ($E = mc^2$) → 原子力発電
- 電場の収縮 → 未実証

電場の収縮

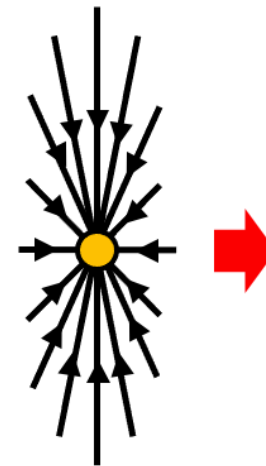
静止した電子

非相対論的電場分布



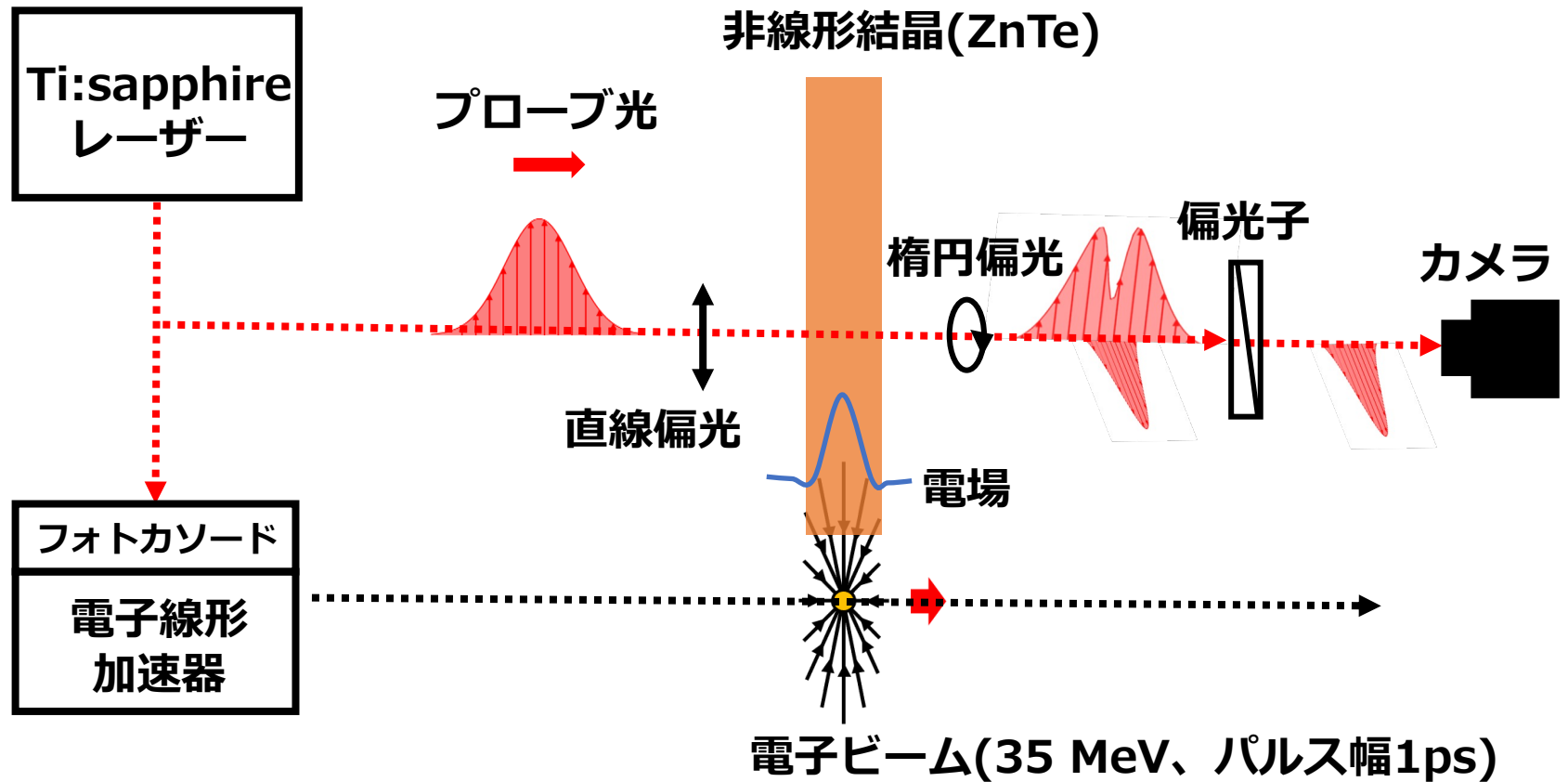
光に近い速度で
等速直線運動する電子

相対論的電場分布



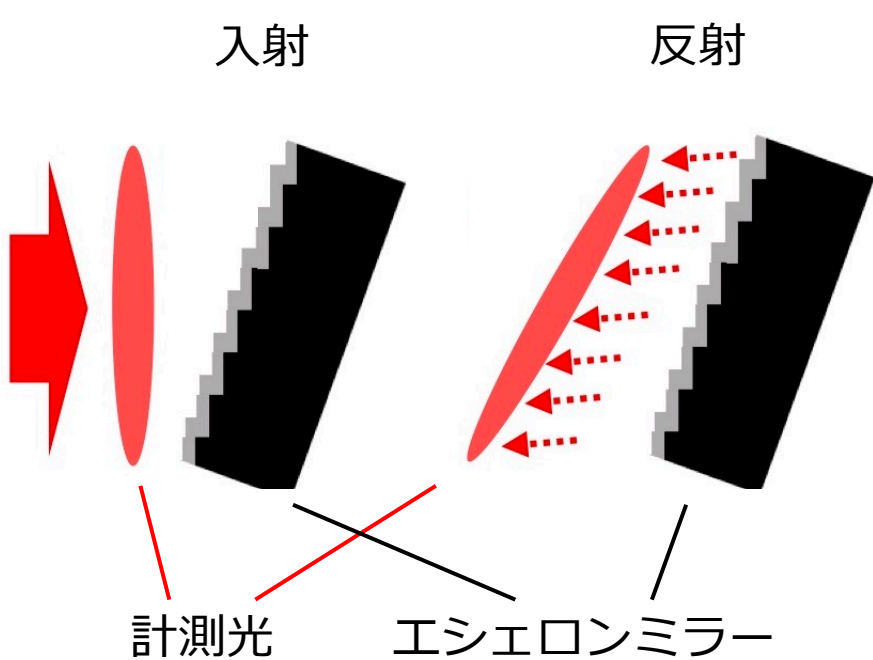
サブピコ(10^{-12})秒の超高速電場計測が必要！

電気光学検出

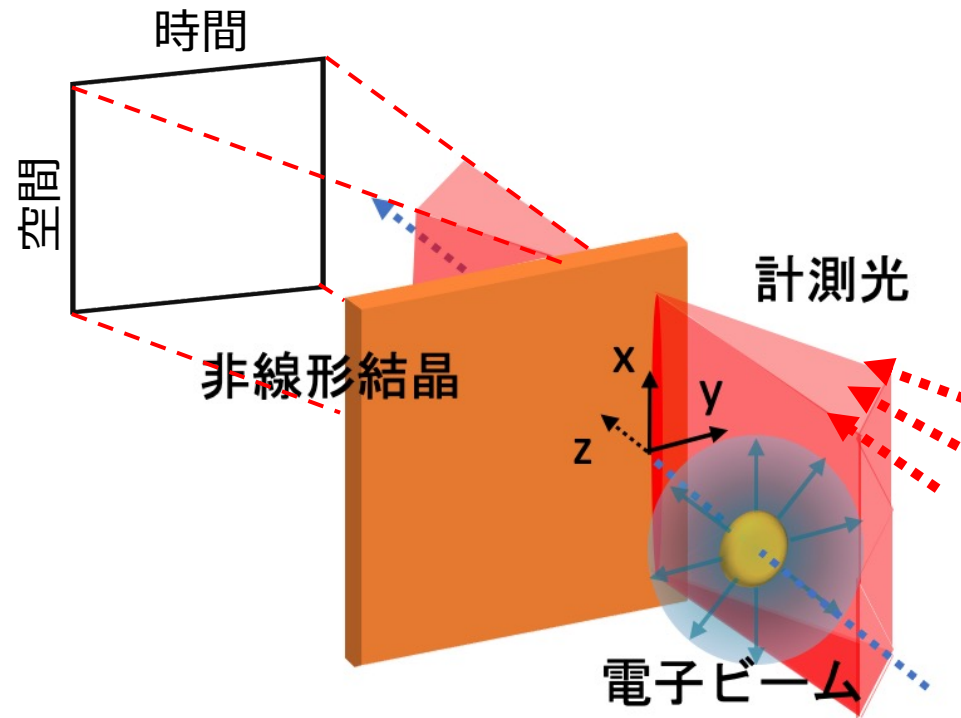


光を用いた超高速計測によって線形加速器で生成された高エネルギー電子ビーム周りの電場を可視化

エシエロン式シングルショット計測¹⁶



ステップ高さは3 μm
→時間差~20 fs

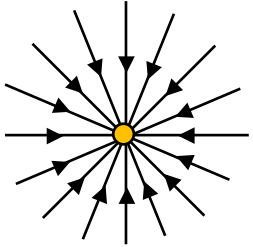


高精度なシングルショット
電場時空間分布計測が可能

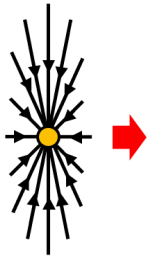
Are you ready?

相対論的な電場の収縮を可視化

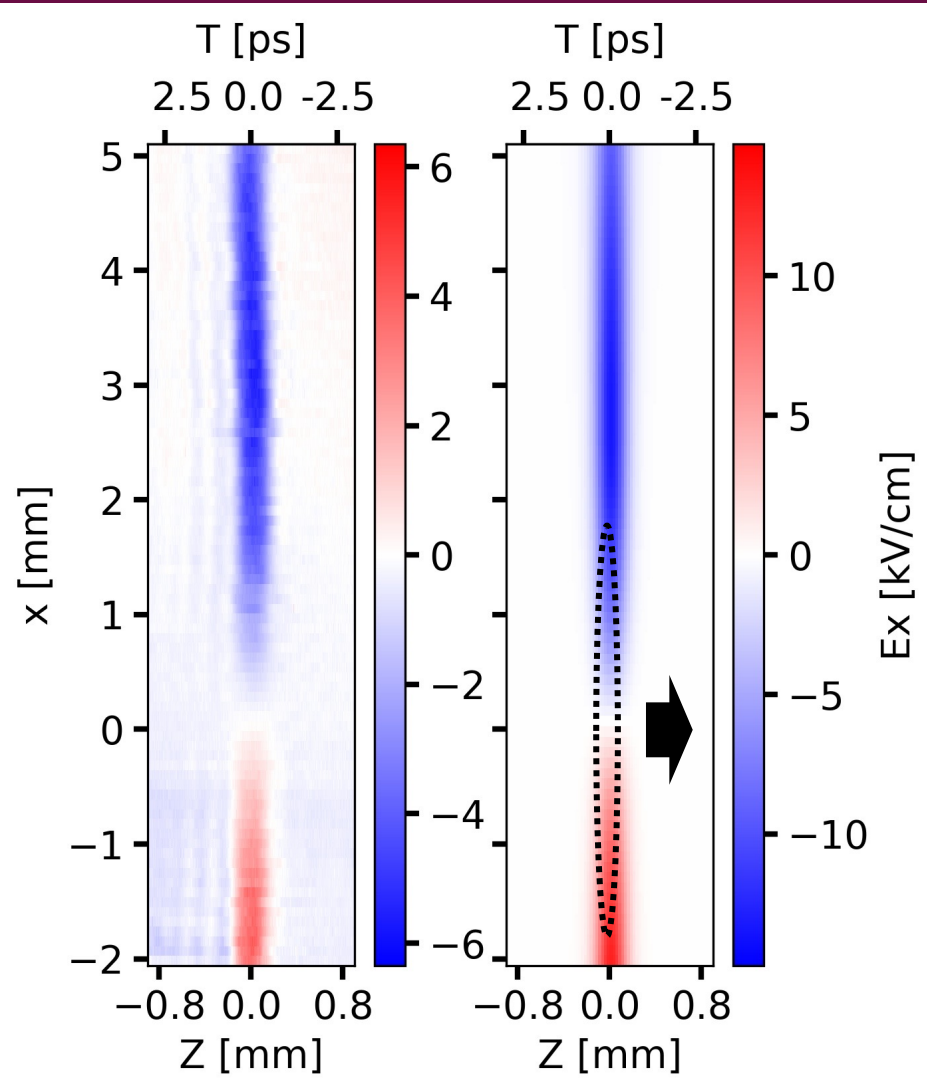
非相対論的
電場分布



相対論的
電場分布



エネルギー：35 MeV
パルス幅：1 ps



実験結果

理論計算

総括1

研究課題：特殊相対性理論が予言する収縮電場の実証

問題点：サブピコ秒の超高速電場計測の必要性

解決方法：電気光学検出
(エシェロン式シングルショット計測)

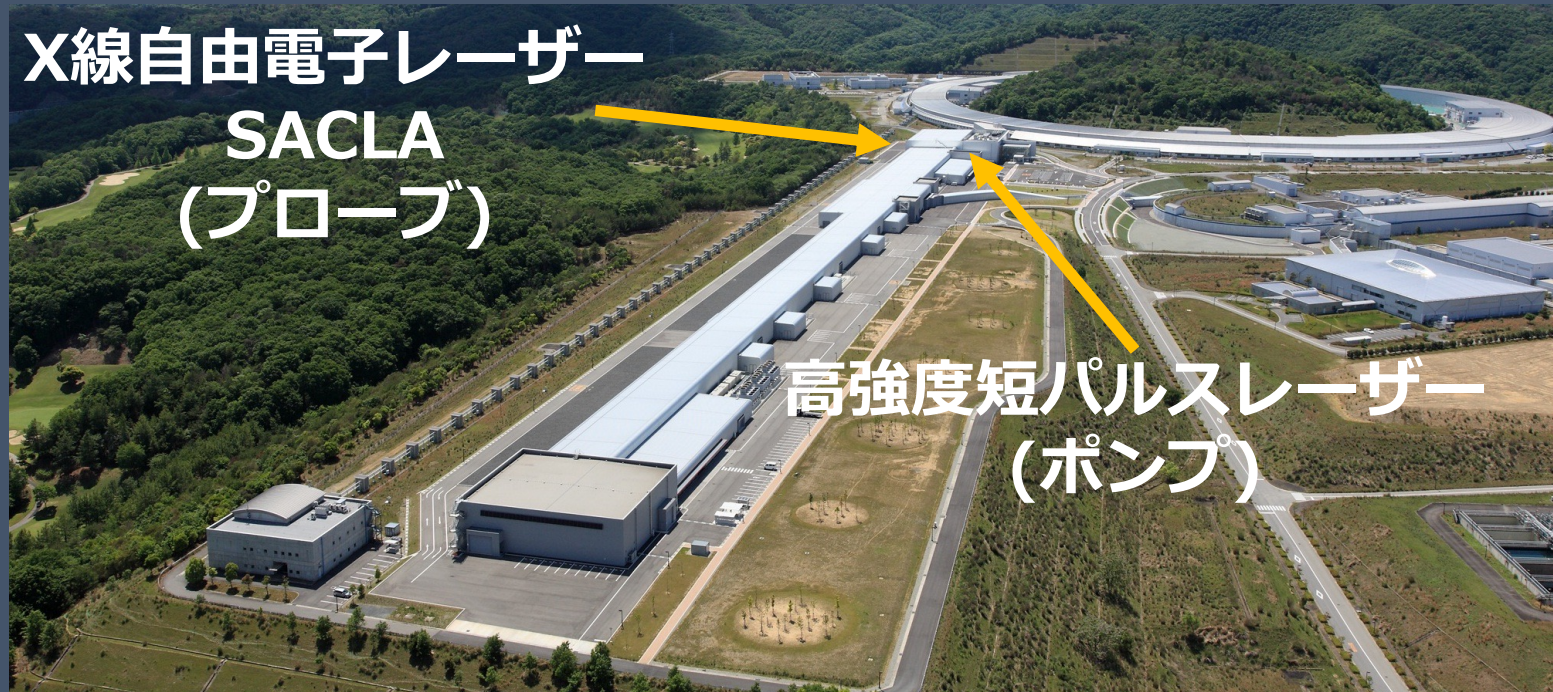
研究成果：
収縮電場の二次元的可視化

発表内容

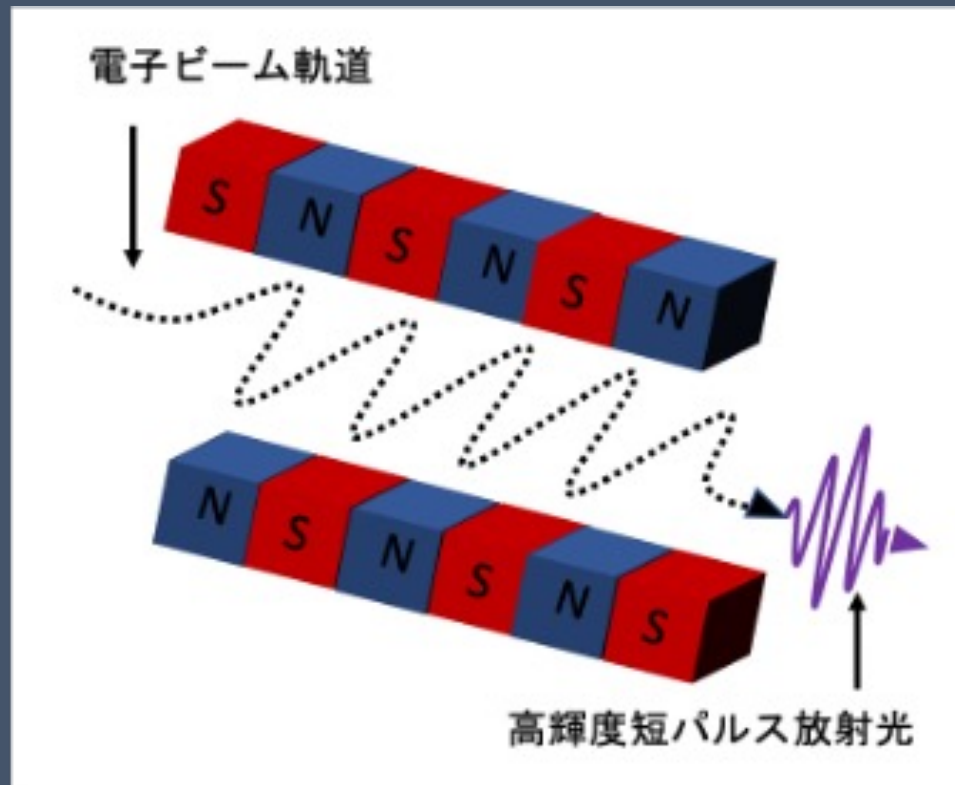
1. イントロダクション
2. 研究内容 1 :
相対論的クーロン電場の超高速可視化
(加速器実験)
3. 研究内容 2 :
X線自由電子レーザーを用いた
サブマイクロプラズマ膨張の超高速計測
(大型レーザー実験)
4. 超高速計測を用いた今後の研究展開

X線自由電子レーザーを用いた サブマイクロプラズマ膨張の 超高速計測

高強度短パルスレーザーとX線自由電子レーザー のポンプ・プローブ実験



X線自由電子レーザー



波長：サブnm
パルス幅：数fs

Small-angle x-ray scattering (SAXS) ²⁴

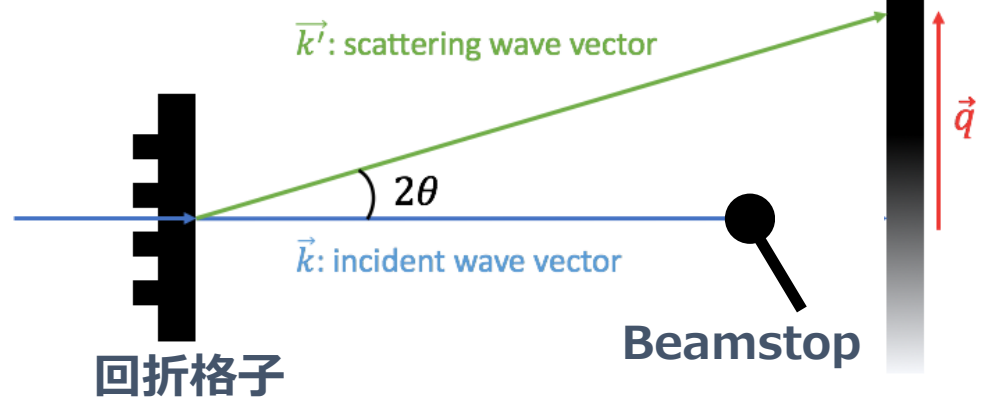
一言で言うと、小角領域の回折。

SAXSで得られる情報：

1. 形状
2. 大きさ
3. 構造
4. 表面粗さ

Wavevector Transfer:

$$\vec{q} = \vec{k}' - \vec{k} \\ = 4\pi\sin\theta/\lambda$$



遠方での二次元回折パターンは
X線から二次元的に射影した電子密度のフーリエ変換!
微小構造→大角散乱

実験セットアップ@SACLA

XFEL (X-ray free-electron laser)

エネルギー: 7.0 keV

パルス幅: <10 fs

スポットサイズ(FWHM) = 13 μm

Drive laser

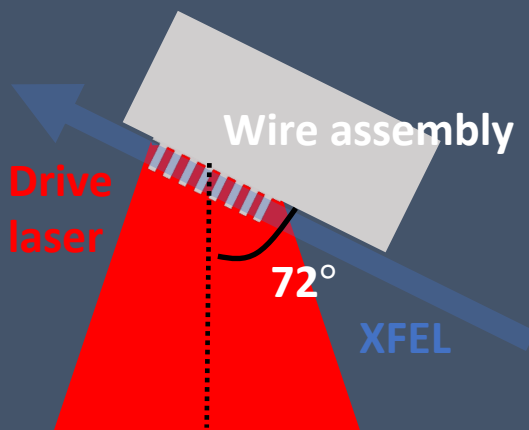
波長: 800 nm

パルス幅: 40 fs

スポットサイズ(FWHM): 10 μm

エネルギー: 0.6 J

レーザー強度: 5.0×10^{18} W/cm²



Wire assembly

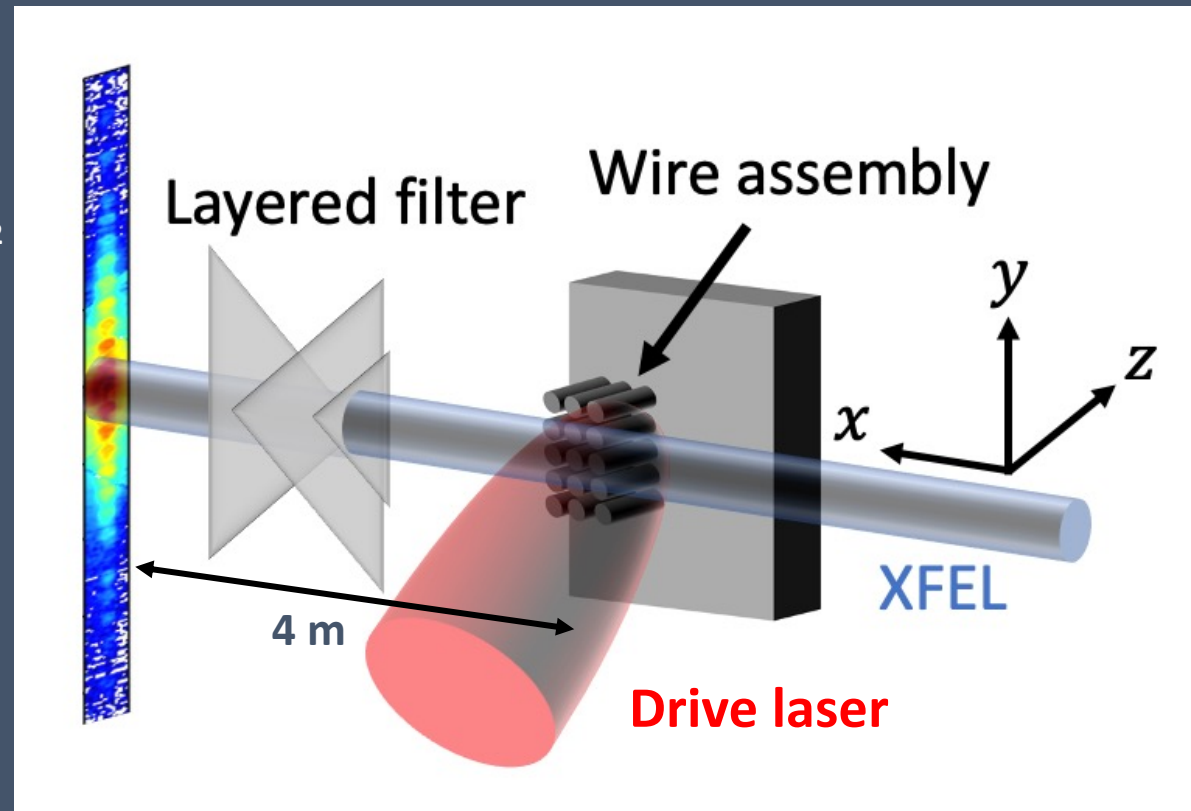
京都大学 (岸本研)

直径: 500nm

間隔: 1000 nm

高さ: 10 μm

配列: 15x30



総括2

- **研究課題：**
高時間（サブピコ秒）、高空間分解（サブマイクロ）
プラズマ密度計測
- **解決方法：**
X線自由電子レーザーを用いた、SAXS
- **研究成果：**
サブマイクロWire集合体ターゲットの
超高速プラズマ膨張の時間発展計測

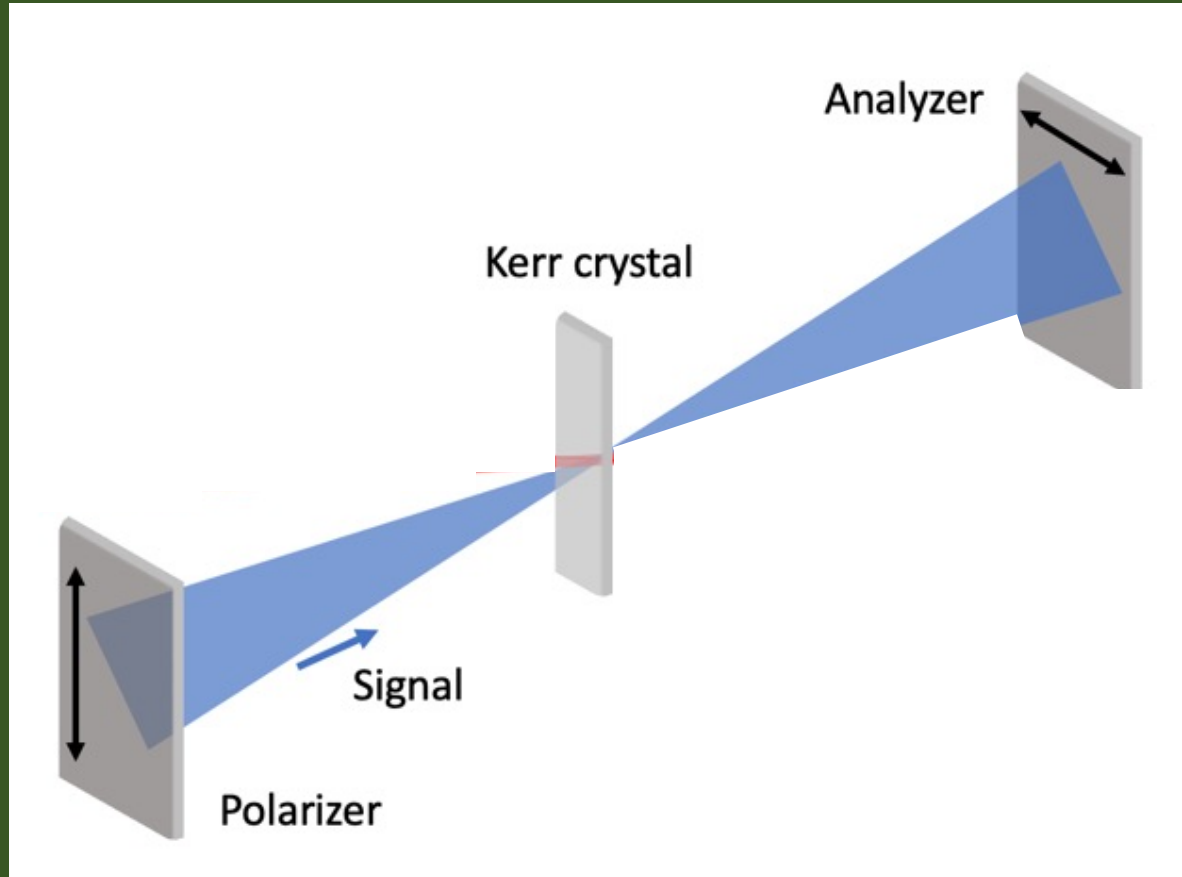
発表内容

1. イントロダクション
2. 研究内容 1 :
相対論的クーロン電場の超高速可視化
(加速器実験)
3. 研究内容 2 :
X線自由電子レーザーを用いた
サブマイクロプラズマ膨張の超高速計測
(大型レーザー実験)
4. 超高速計測を用いた今後の研究展開

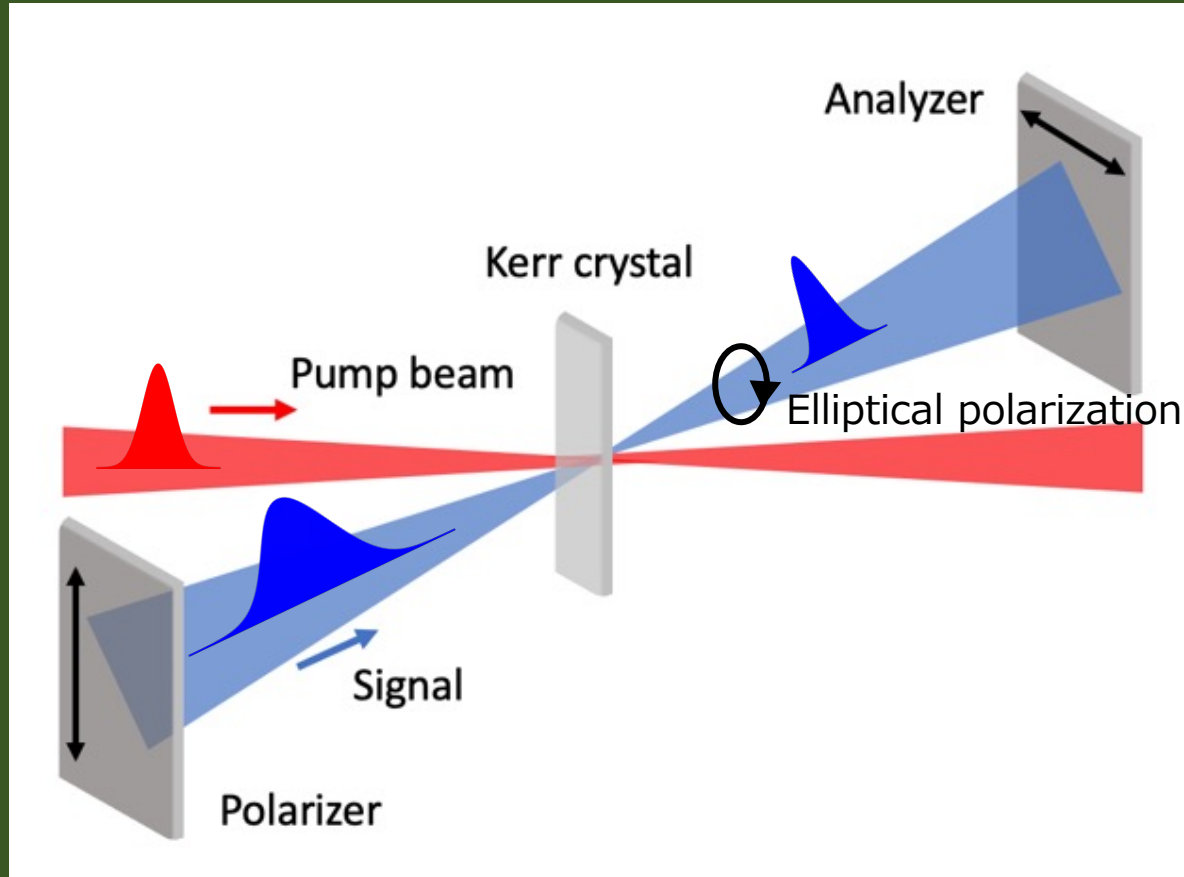
開発を行っている超高速計測

1. 電気光学検出
2. X線自由電子レーザー
3. 光カーシャッター

光カーシャッター原理



光カーシャッター原理



研究背景

目的：高強度短パルス（サブピコ秒）レーザー実験を想定した相対論的
プラズマ診断手法の開発

従来 電気シャッター
(ナノ秒領域：時間分解能数百ps)



本研究 光シャッター
(ピコ秒領域：時間分解能100fs)

例：プラズマイメージング

プローブ計測（既存）

対象：気体密度プラズマ
($10^{19}/\text{cc}$ 以下)

- 航跡場電子加速

自発光計測（未開発）

臨界密度プラズマ
($10^{21}/\text{cc}$ 程度)

- 航跡場イオン加速
(in カーボンナノチューブ)
- クラスタークーロン爆発
- 無衝突衝撃波

光カーシャッターを用いた プラズマ診断応用例

光カーシャッター単体

- プラズマ自発光の二次元イメージング（空間・空間）

光カーシャッター&エシエロンミラー

- プラズマ自発光のストリーク像（時間・空間）
- 分光時間発展計測（時間・波長）

光カーシャッター&プローブレーザー

- 時間的バックグラウンド除去（空間・空間・時間）

核融合研究における超高速計測

磁場閉じ込め核融合

- 電気・磁気光学計測による高速磁気リコネクション現象の観察
- 光カーシャッター計測でとにかくデータを取得

レーザー慣性核融合（高速点火方式）

- 電気光学計測による中性子発生計測を通じた燃焼履歴
[Y. Arikawa, RSI 91, 063304 (2020).]