

レーザー航跡場加速の最適化： 高エネルギー単色電子ビームの安定生成

金 展^{1,3}、神門 正城^{2,3}、顧 彦珺^{1,3}、黄 開^{2,3}、中新 信彦^{2,3}、
大東 出^{2,3}、武藤 俊哉^{1,3}、山本 樹^{4,3}、細貝 知直^{1,3}





¹ 大阪大学 産業科学研究所

² 量子科学技術研究開発機構 関西光量子科学研究所

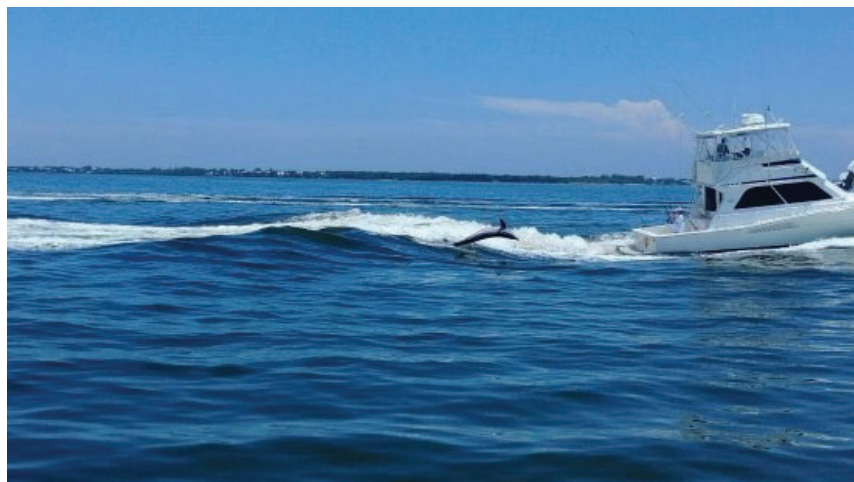
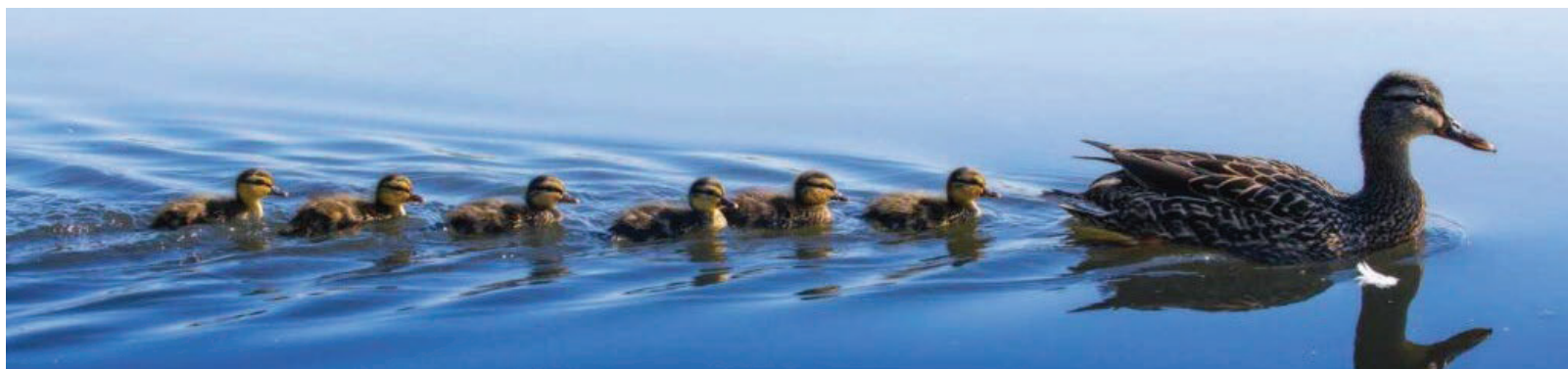
³ 理化学研究所 放射光科学研究センター

⁴ 高エネルギー加速器研究機構

OUTLINE

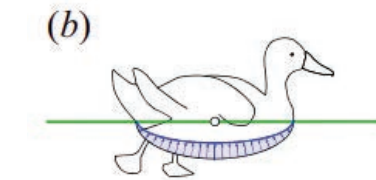
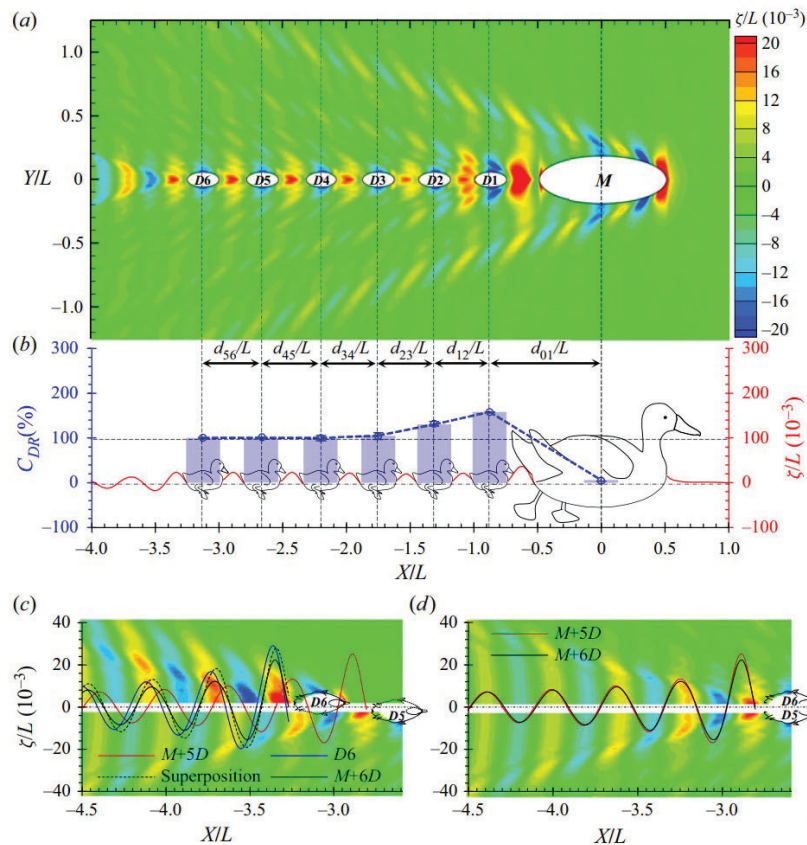
-  レーザー航跡場加速（LWFA）の紹介
-  LWFAプラットフォーム
-  自由電子レーザー（FEL）向け電子パラメータの最適化
-  今後の計画と展望

航跡場 (Wakefield)

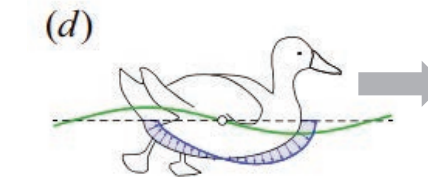


「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
ー 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 ー 2025/11/07開催

航跡場加速 (Wakefield Acceleration)



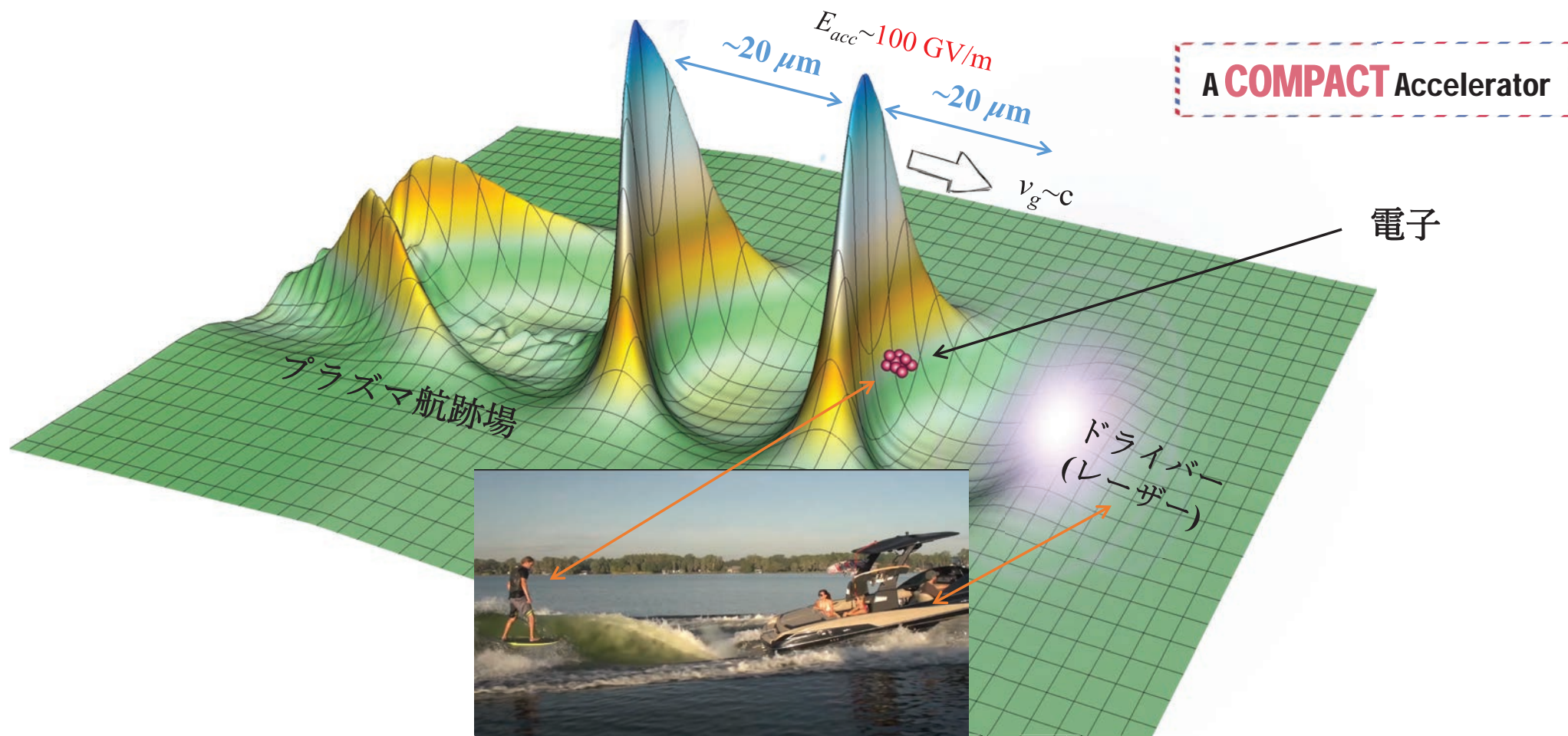
減速位相



加速位相

Zhi-Ming Yuan , Minglu Chen , Laibing Jia , Chunyan Ji and Atilla Incecik, J. Fluid Mech. (2021), vol. 928, R2, doi:10.1017/jfm.2021.820

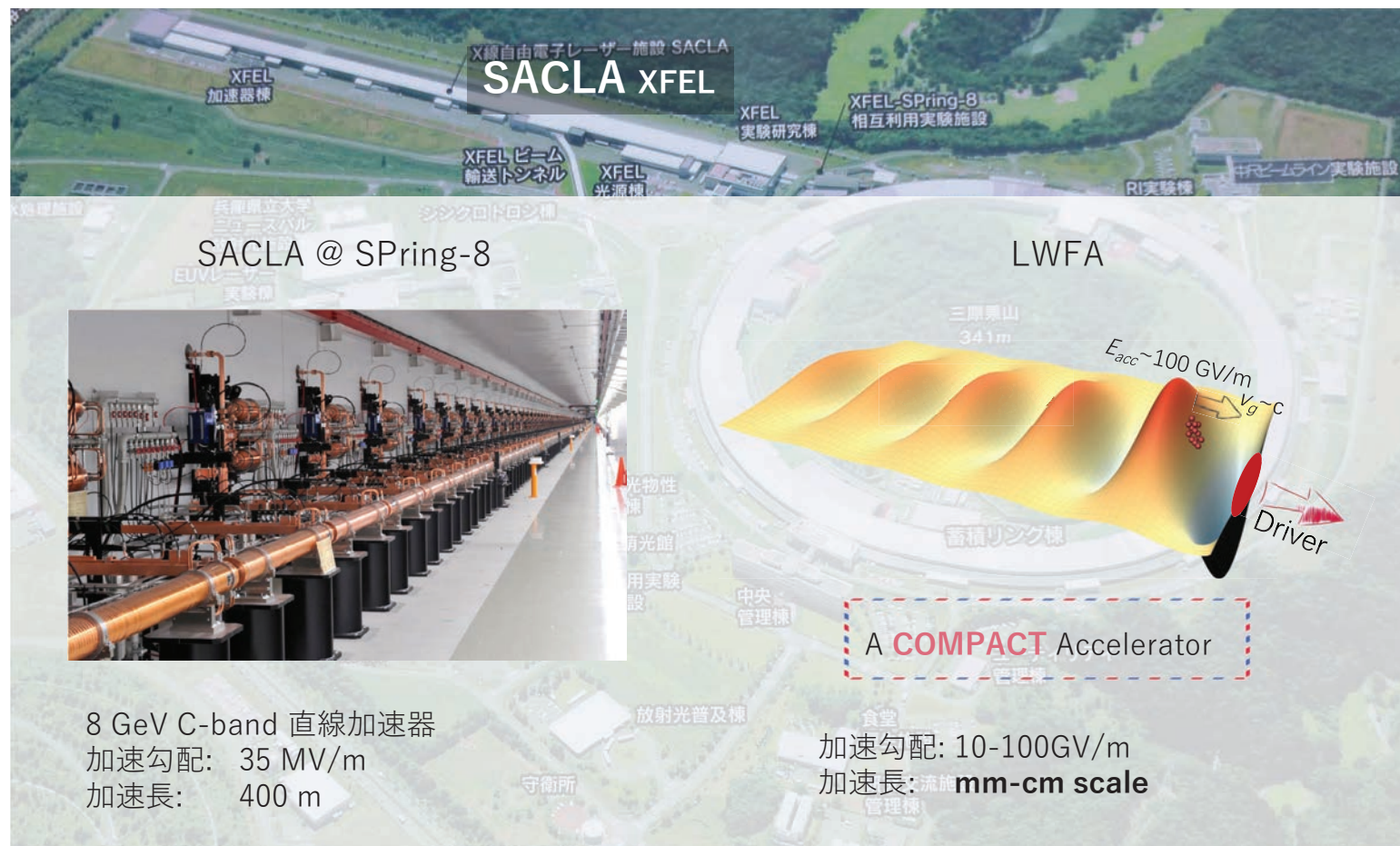
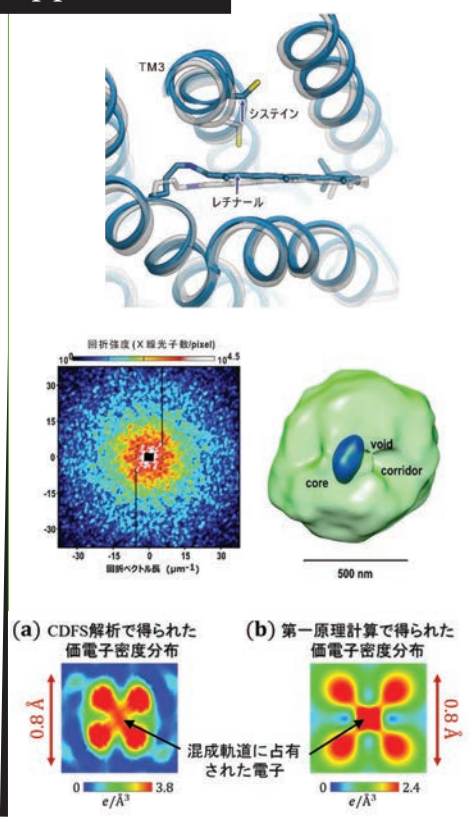
レーザー航跡場加速 (LWFA)



「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
— 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 — 2025/11/07開催

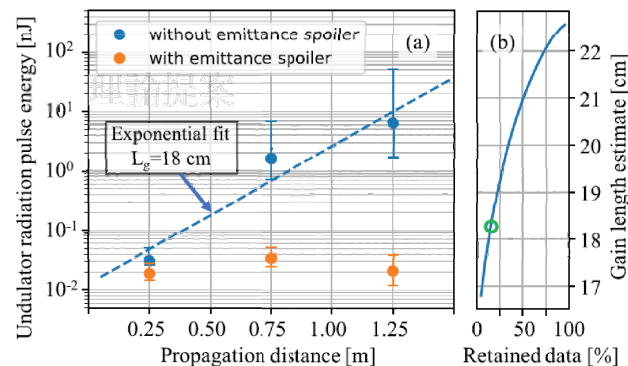
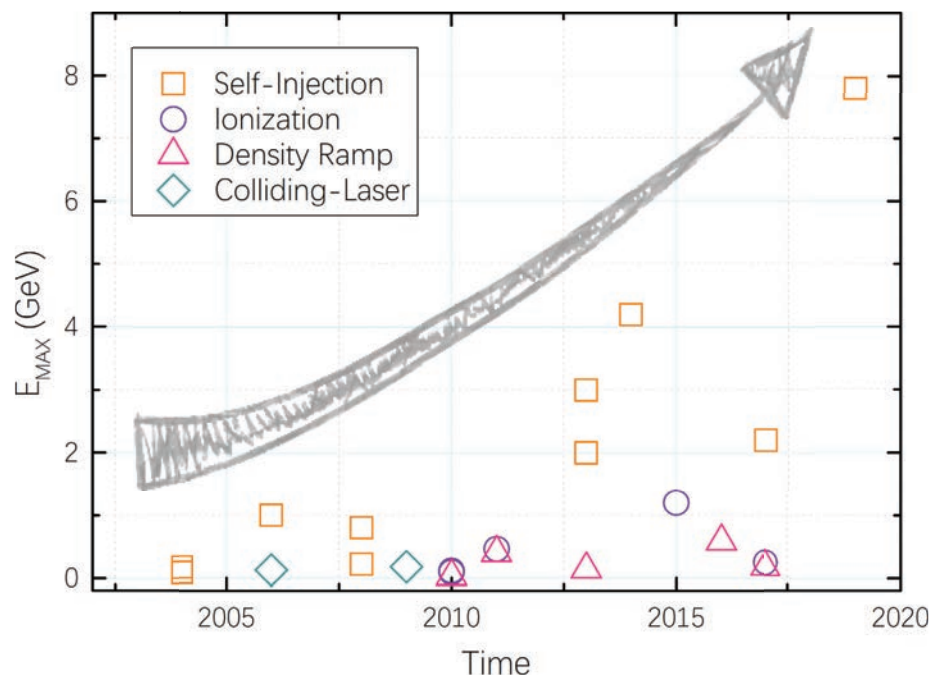
モチベーション

Applications



「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
— 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 — 2025/11/07開催

レーザー航跡場加速 (LWFA)



>1000 FEL増幅
@420 nm

Barber et al, PRL **135**, 055001 (2025)



- Faure et al., Nature **431**, 541, 2004; Mangles et al., Nature **431**, 535, 2004; Leemans et al., Nat. Phys. **2**, 696, 2006; Osterhoff et al., Phys. Rev. Lett. **101**, 085002, 2008; Kneip et al., Phys. Rev. Lett. **103**, 035002, 2009; H. T. Kim et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 165002, 2013; Wang et al., Nat. Commun. **4**, 1988, 2013; Li et al., Phys. Plasmas **24**, 023108, 2017;
- Faure et al., Nature **444**, 737, 2006; Rechatin et al., Phys. Rev. Lett. **102**, 164801, 2009
- Schmid et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams **13**, 091301, 2010; Buck et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 185006, 2013; Khrennikov et al., Phys. Rev. Lett. **114**, 195003, 2015;
- Swanson et al., Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 051301, 2017; Gonsalves et al., Nat. Phys. **7**, 862, 2011; Wang et al., Phys. Rev. Lett. **117**, 124801, 2016;
- McGuffey et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 025004, 2010; Pak et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 025003, 2010; Pollock et al., Phys. Rev. Lett. **107**, 045001, 2011; Mirzaie et al., Sci. Rep. **5**, 14659, 2015; Couperus et al., Nat. Commun. **8**, 487, 2017

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
— 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 — 2025/11/07開催

レーザー航跡場加速プラットフォーム



2014-2018



2017-



「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
— 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 — 2025/11/07開催

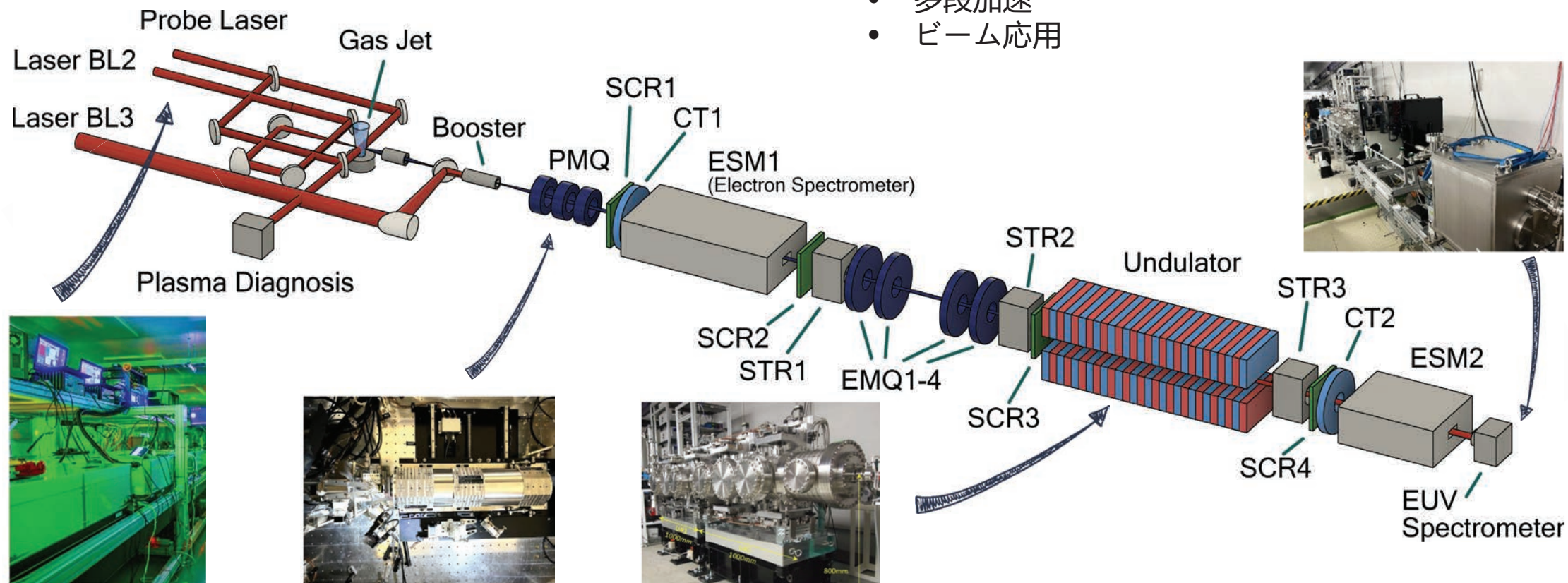
レーザー航跡場加速プラットフォーム

レーザーパラメータ(BL-2):

エネルギー: 600 mJ on target
パルス幅: 21fs

目標:

- 安定な単色電子加速
- アンジュレータ放射の増幅
- 自由電子レーザー
- 多段加速
- ビーム応用



自由電子レーザー(FEL)に要求される電子ビームパラメータ (XUV領域)

放射の波長:

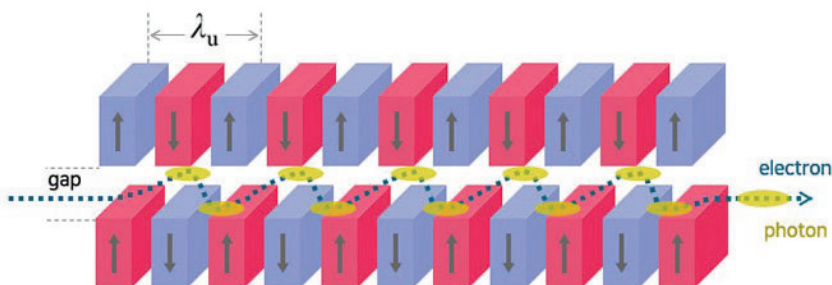
$$\lambda_r = \frac{\lambda_u}{2\gamma_0^2} \left(1 + \frac{K_0^2}{2} + \gamma_0^2 \varphi^2 \right)$$

アンジュレータ:

$$\lambda_u = 2.5 \text{ cm}$$

$$K_0 = 1.4$$

目標波長: $\lambda_r = 40\text{-}50 \text{ nm}$ (XUV)



| | |
|----------|-------------|
| 中心エネルギー | 360-400 MeV |
| エネルギー幅 | < 1% |
| エネルギー安定性 | < 10 MeV |
| 電荷量 | 17 pc |
| バンチ長 | < 25 fs |
| 指向安定性 | < 1 mrad |

LWFA電子の安定性

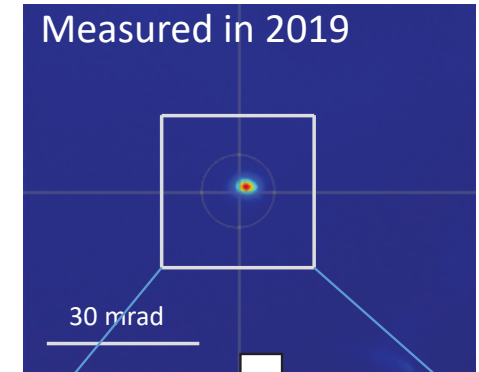
- 電子入射の制御
- レーザー安定性の改善 (特に波面の安定性)
- ガス標的の開発 (流体安定性)

指向安定性
~10 mrad

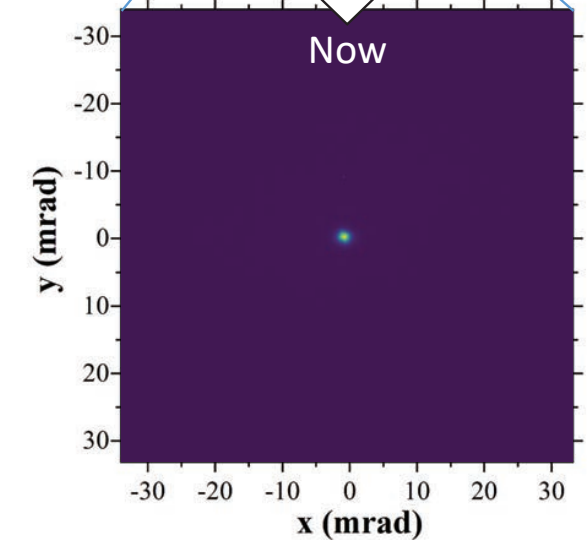
1/25

0.4 mrad

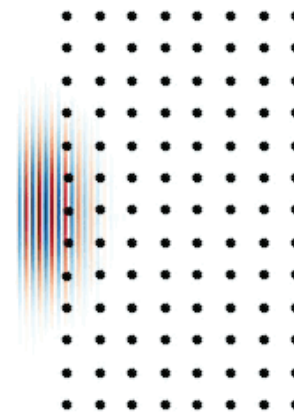
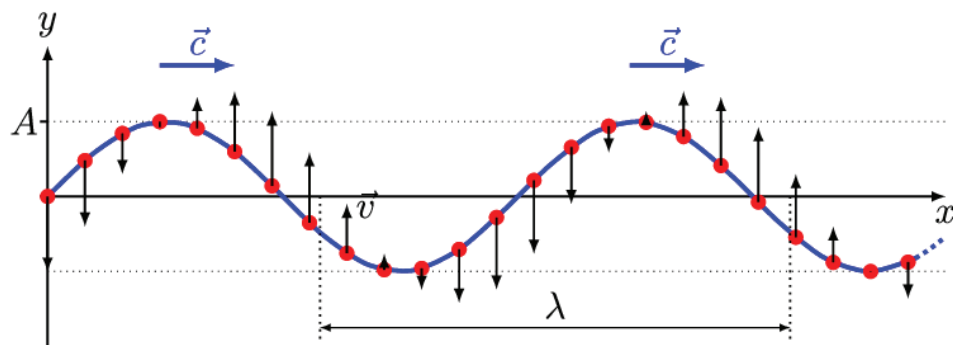
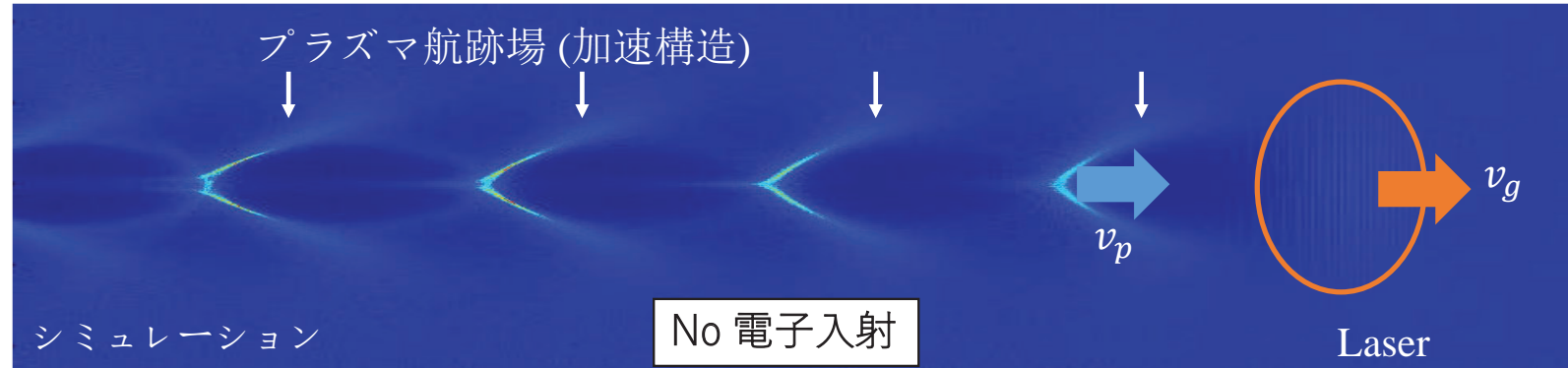
電子ビームプロフィール
Measured in 2019



Now



レーザー航跡場 & 加速構造 & 航跡場加速



No 電子入射

電子は平衡位置のまわりで振動している

No 加速

電子入射 (Injection)



外部入射

他の加速器から



自己入射

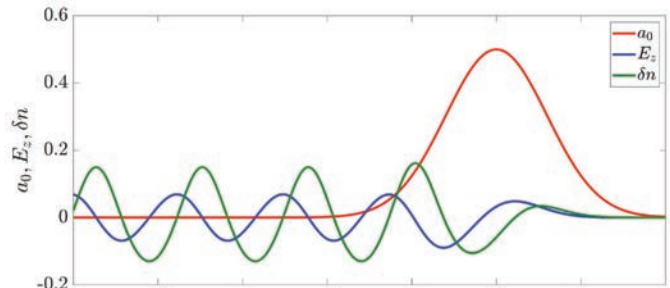
プラズマ自身から

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
ー 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 ー 2025/11/07開催

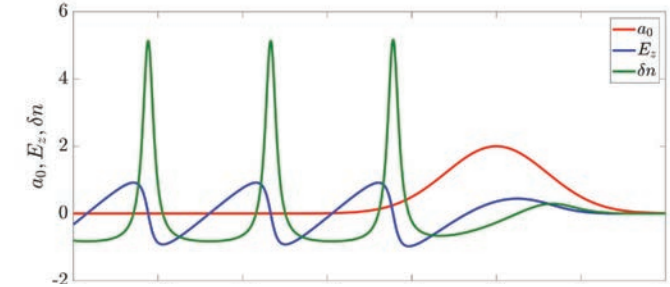
自己入射

線形

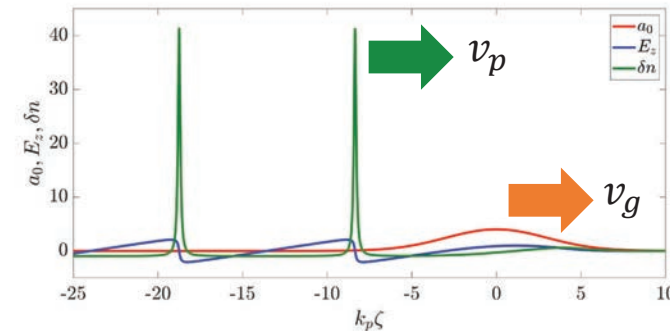
$a_0=0.5$



$a_0=2$



$a_0=4$



非線形

強いレーザー強度

高いプラズマ密度

粒子(電子)の速度

u

$=$

or

$>$

v_p

航跡場の位相速度

プラズマ波の波破壊

自己入射

力業でなんとかする！

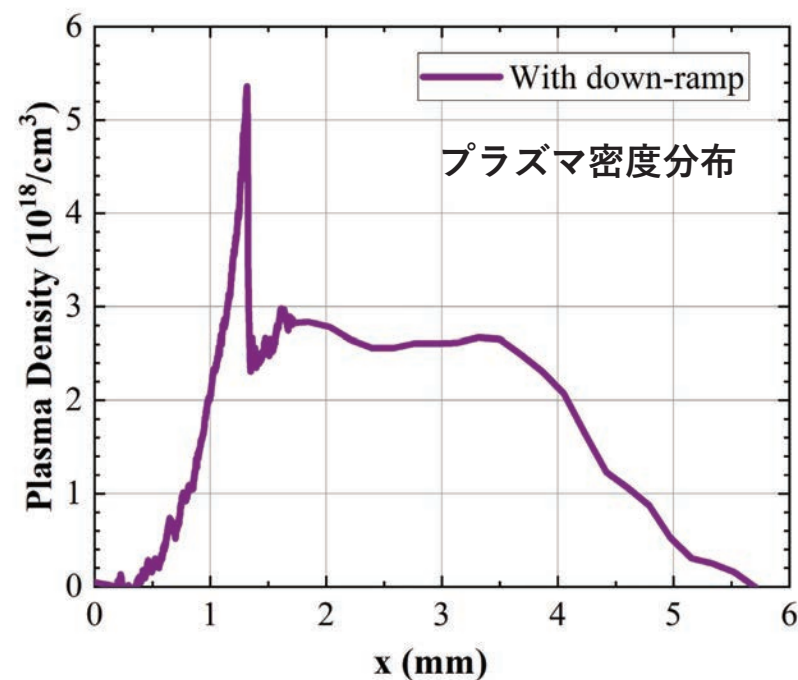
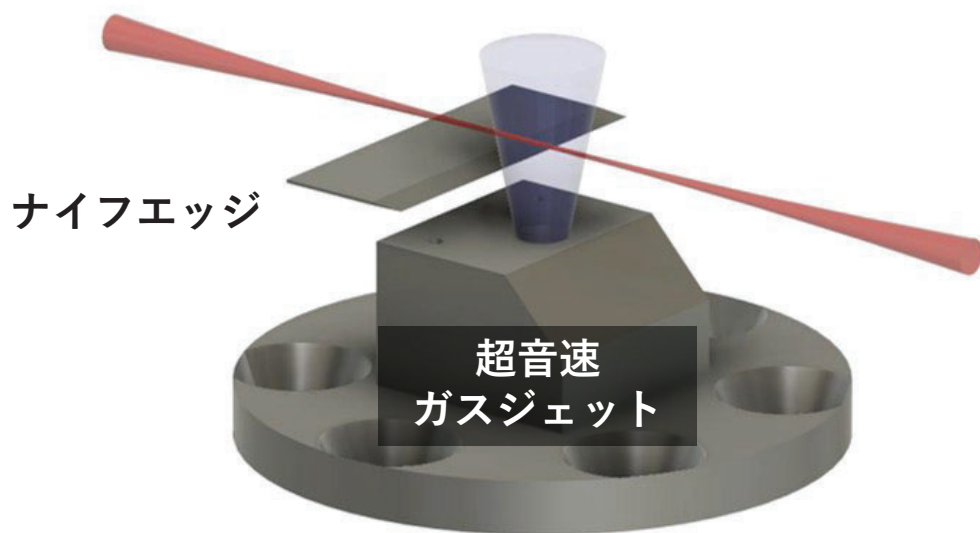
- × 再現性が良くない。
- × 入射の位置(タイミング)の制御が困難。
- × 複数回の入射が発生することがある。



入射制御 – 衝撃波入射

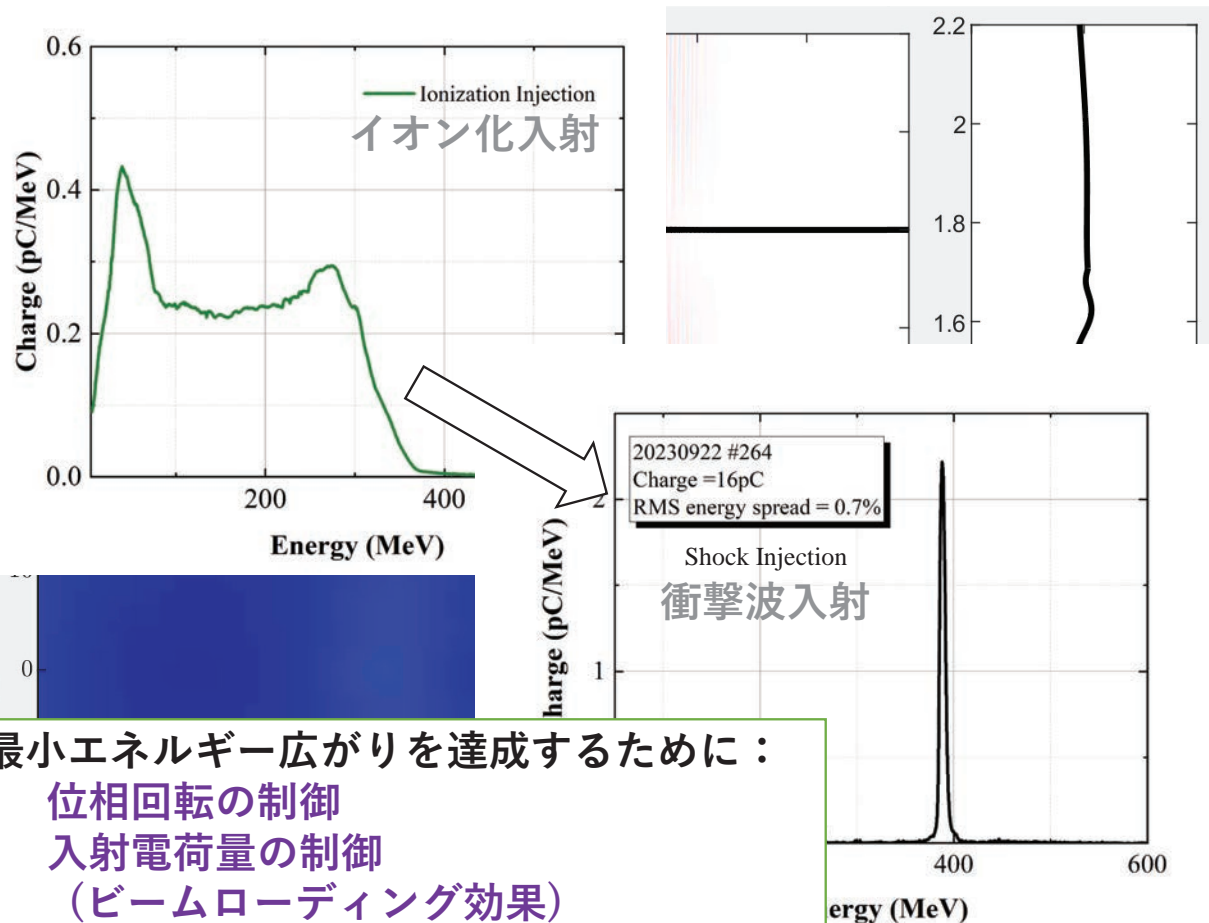
入射制御手法

- レーザー衝突パルス入射 Colliding laser pulses injection
- イオン化入射 Ionization injection
- 密度ダウンランプ入射 (衝撃波入射) Density down-ramp injection (Shock Injection)



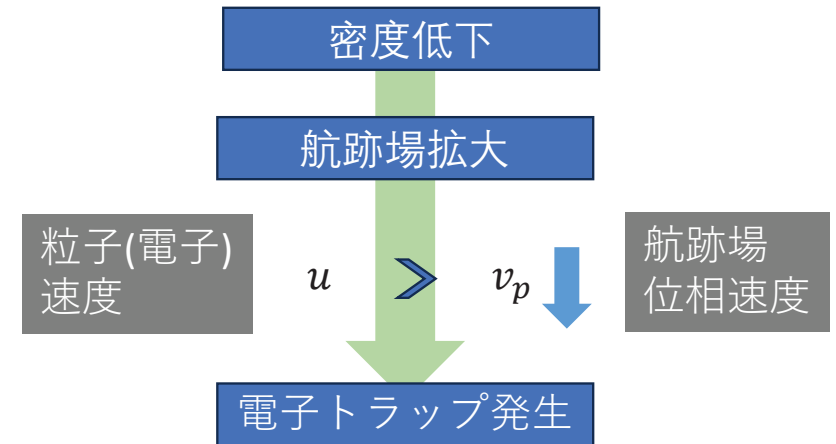
- [1] H. Ekerfelt, et al., Sci Rep, 7, 12229, 2017
 [2] J. Götzfried et al., Phys. Rev. X, 10, 041015, 2020
 [3] H.-E. Tsai et al., Physics of Plasmas, 25, 043107, 2018

入射制御 – 衝撃波入射



最小エネルギー広がり達成するために：

- 位相回転の制御
- 入射電荷量の制御
(ビームローディング効果)



- ✓ 局所的な電子入射
- ✓ 密度ギャップによる入射電荷量の制御
- ✓ 高品質電子ビームの生成
- × レーザーおよび密度プロファイルの安定性に強く依存

LWFA電子の安定性

- 電子入射の制御

- レーザー安定性の改善 (特に波面の安定性)

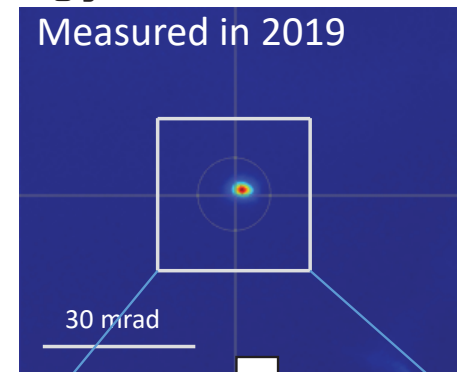
- ガス標的の開発 (流体安定性)

指向安定性
~10 mrad

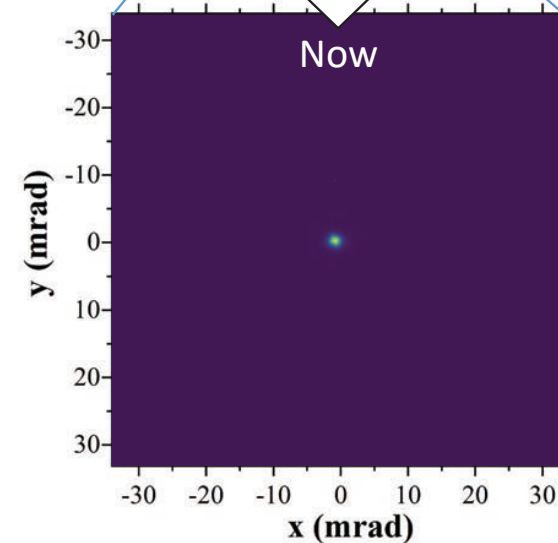
1/25

0.4 mrad

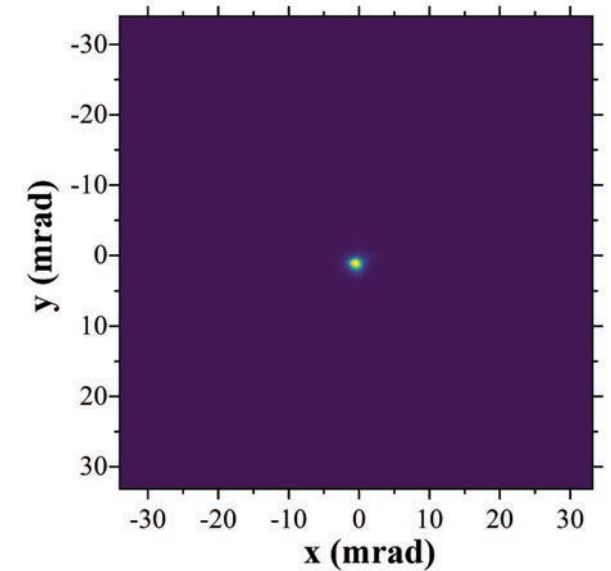
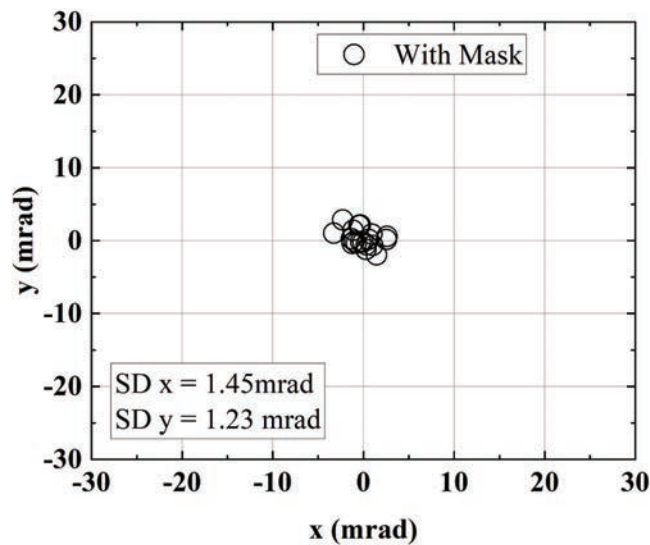
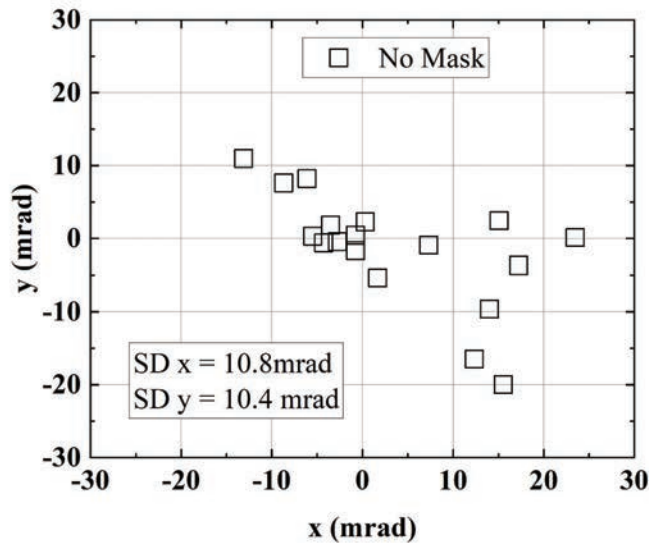
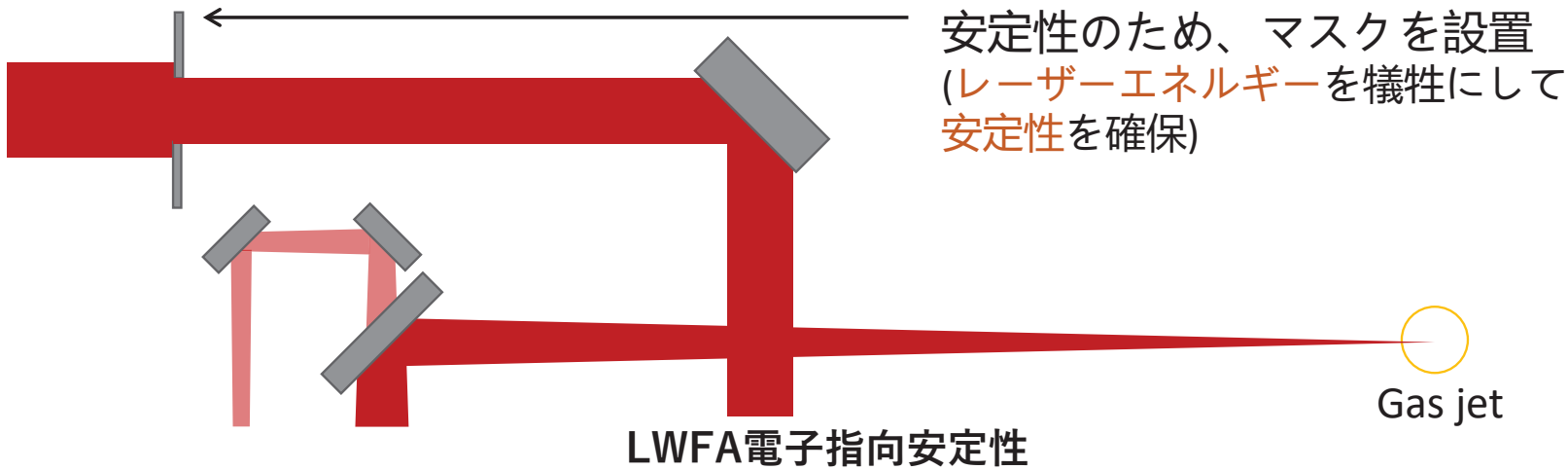
電子ビームプロフィール
Measured in 2019



Now



レーザー安定性の改善—マスクの追加



LWFA電子の安定性

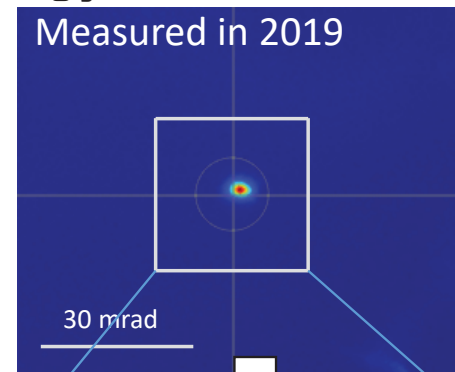
- 電子入射の制御
- レーザー安定性の改善 (特に波面の安定性)
- ガス標的の開発 (流体安定性)

指向安定性
~10 mrad

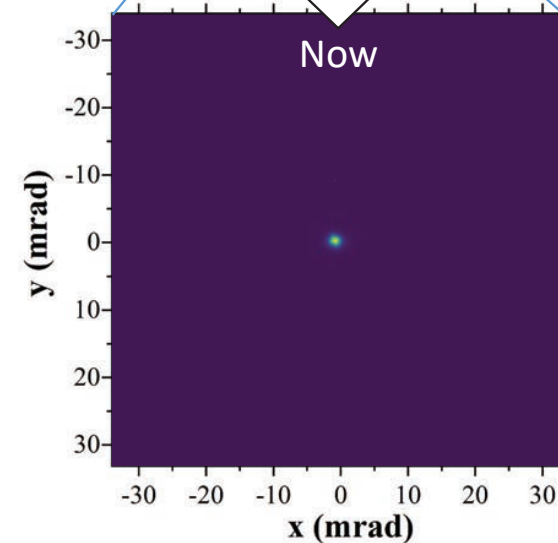
1/25

0.4 mrad

電子ビームプロフィール
Measured in 2019

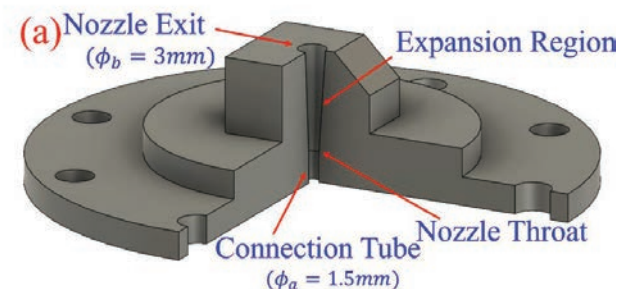
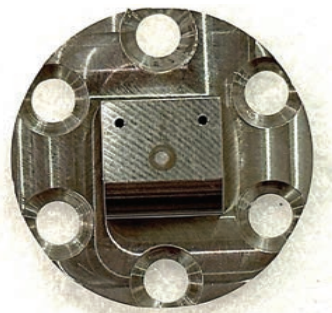


Now



ガス標的の開発—流体不安定性を抑制するため

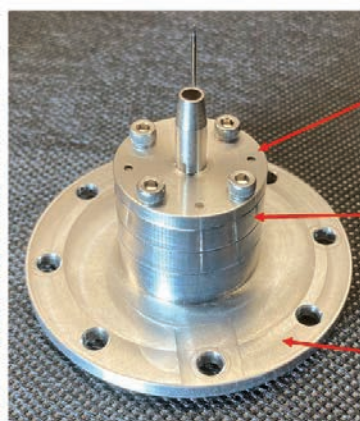
単純な円錐形ノズル
(Simple conical nozzle)



モジュラー式ノズル
(modular nozzle)

整流チャンバー
(Stilling Chamber)

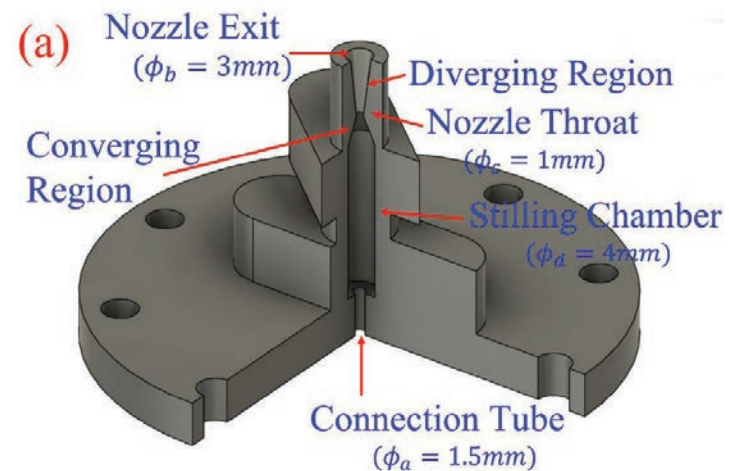
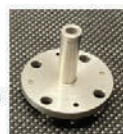
整流メッシュ
(Stilling Mesh)



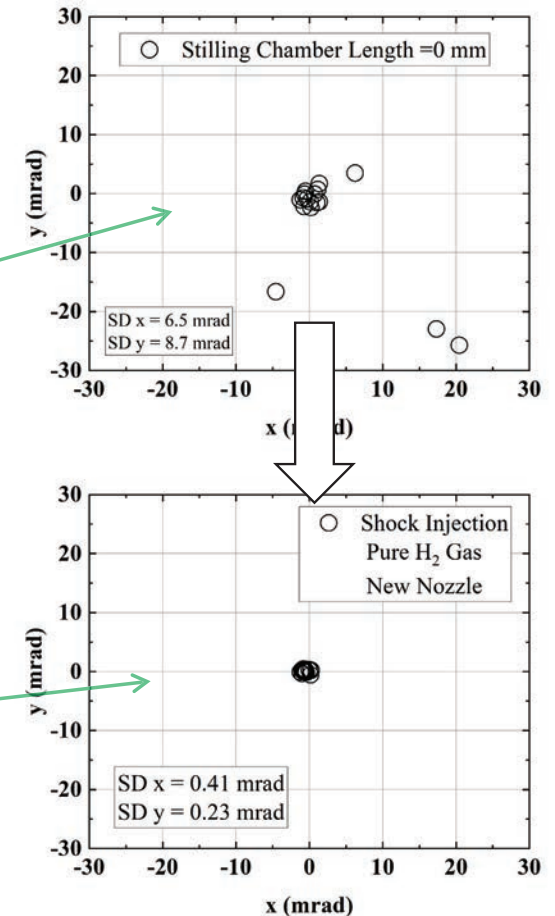
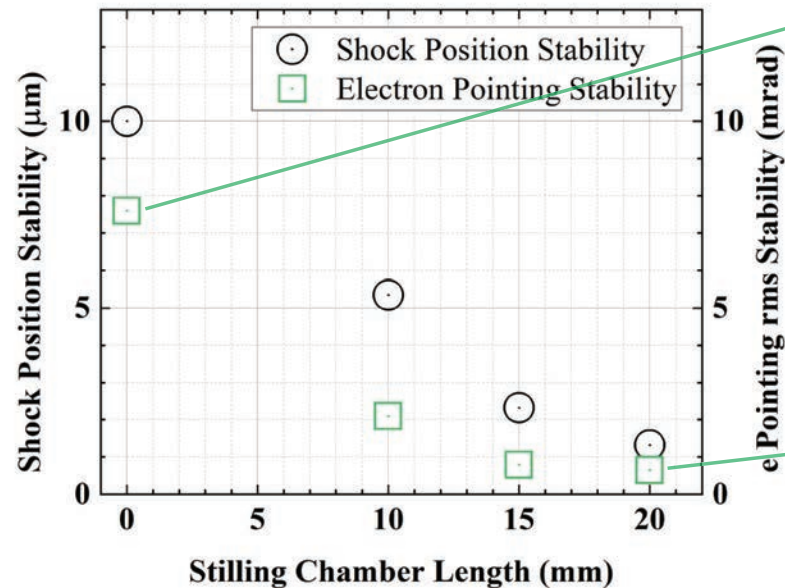
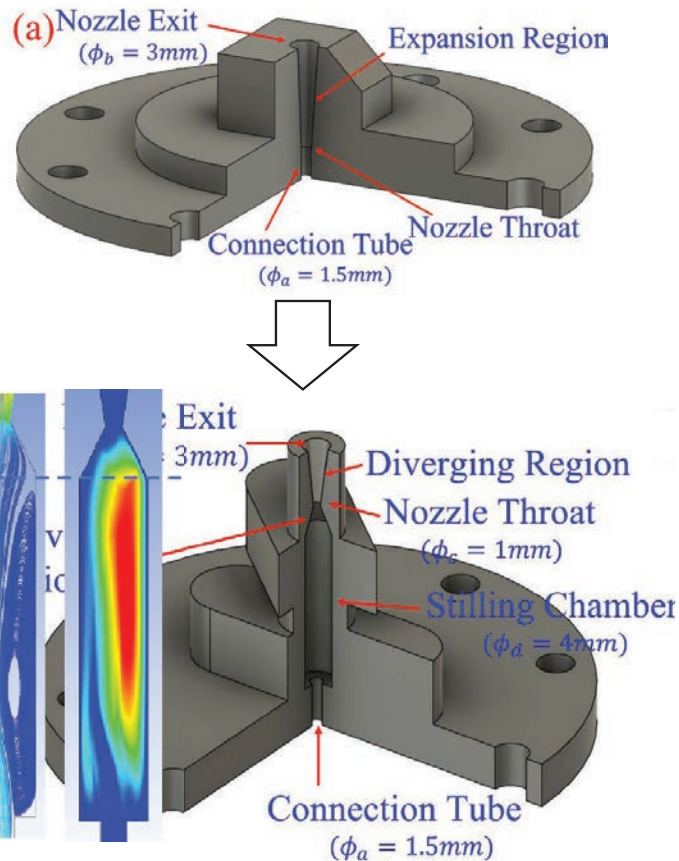
Converge & diverge section

Connector
(chamber holder)

Nozzle base



ガス標的の開発—流体不安定性を抑制するため



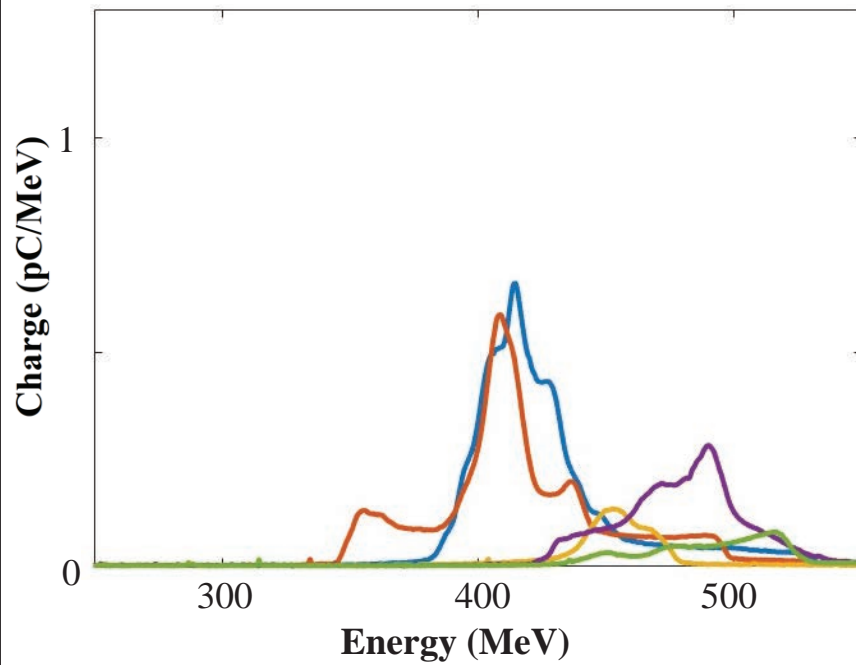
Z. Lei, et al., *High Power Laser Sci. Eng.* **11**, e91 (2023)

Z. Lei, et al., *Rev. Sci. Instrum.* **95**, 015111 (2024)

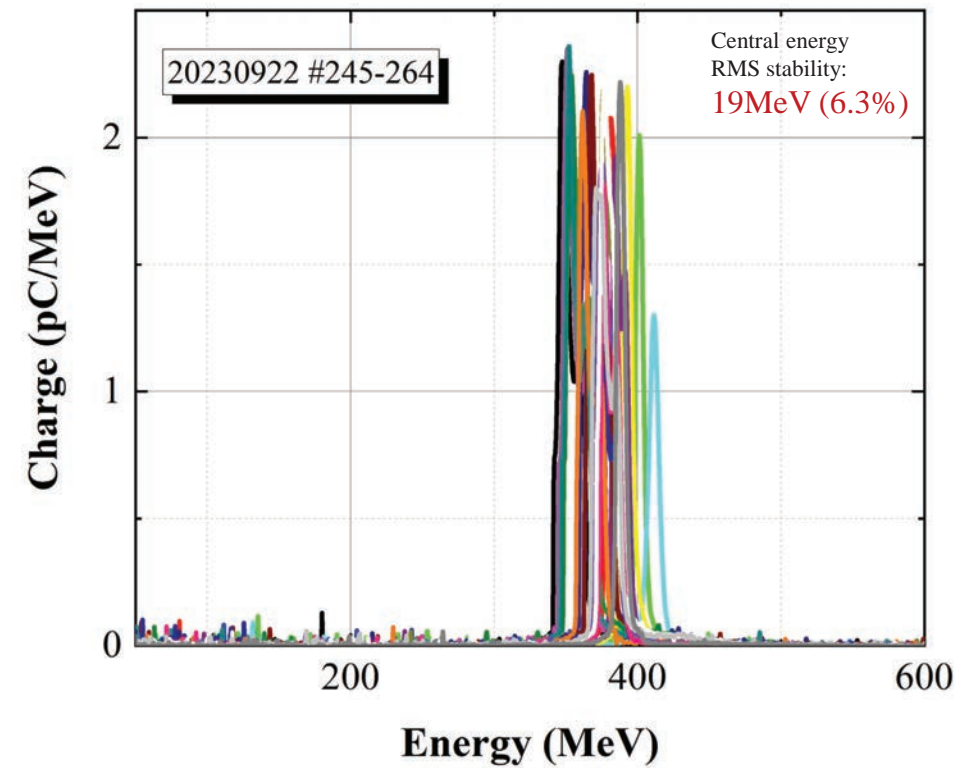
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
— 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 — 2025/11/07開催

最適化後の電子ビームエネルギー

以前 (2019年)



現在



※ 残りのエネルギー不安定性の要因：ビームローディング効果（注入電荷が安定していないため）

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
— 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 — 2025/11/07開催

最適化後の電子ビームパラメータ

| | Request | Exp Result | |
|----------|-------------|------------|---|
| 中心エネルギー | 360-400 MeV | ~390 MeV | ○ |
| エネルギー幅 | < 1% | 0.7% ※ | ○ |
| エネルギー安定性 | < 10 MeV | 19 MeV | △ |
| 電荷量 | 17 pc | 20 pC | ○ |
| バンチ長 | < 25 fs | < 10 fs † | ○ |
| 指向安定性 | < 1 mrad | 0.4 mrad | ○ |

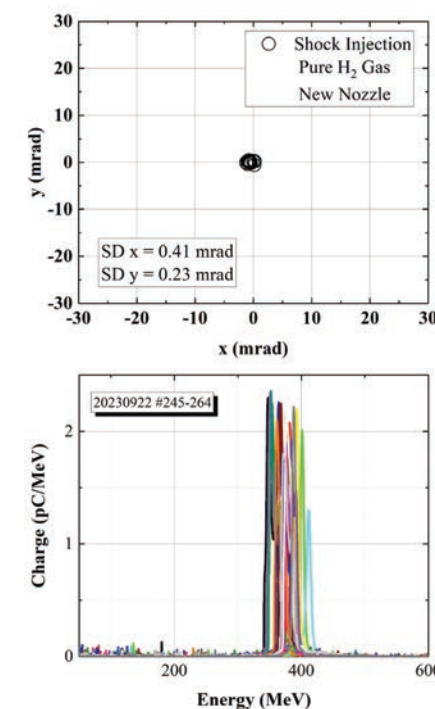
※ 0.2% after deconvolution.

† Need further experimental confirmation.

まとめ

- LWFA電子ビームの品質は以下の最適化によって改善された：
 - 入射制御の導入
 - レーザー安定性の向上
 - ガス標的安定性の向上
 - 位相回転およびビームローディングの制御
- アンジュレータ放射光の増幅を実験的に確認。
- さらなるビーム品質の向上のために
 - レーザーと電子ビームのパラメータ相関性
 - レーザーシステムの改造（安定性を一層高める）

課題



今後の計画と展望

技術開発

レーザー技術開発

ガス標的の開発

多段加速

差動排気

光学素子の開発

電子入射制御

プラズマ制御

目標

電子の安定化

電子の高エネルギー化

電子の高繰り返し化

電子の短パルス化

加速器応用

「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
ー 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 ー 2025/11/07開催

ご清聴ありがとうございました。

Experiment Team



This work was supported by the JST-MIRAI Program (Grant No. JPMJMI17A1).

