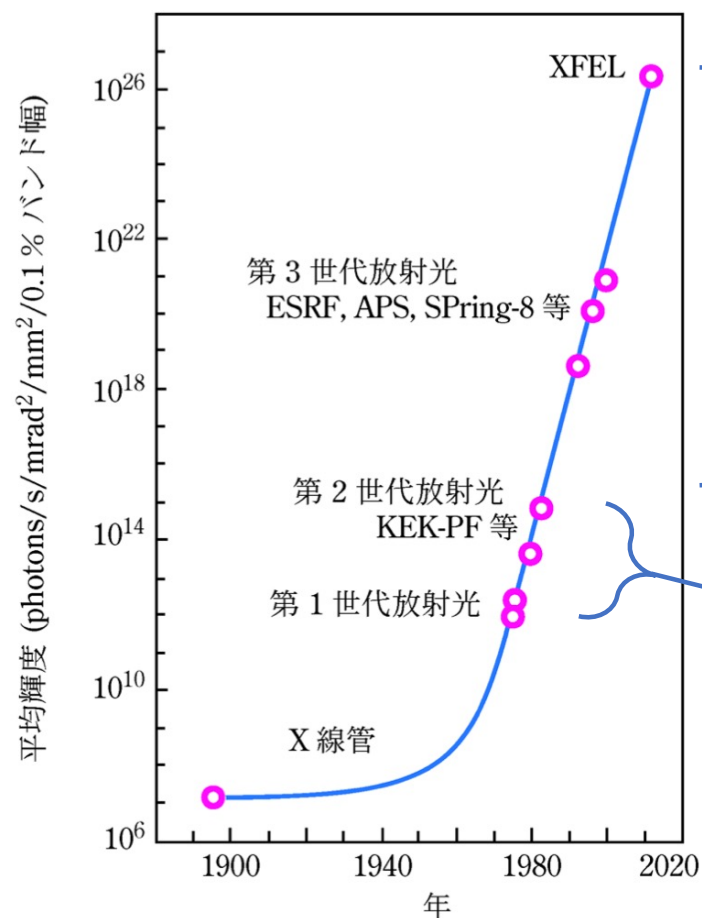


レーザープラズマ電子加速を用いた 小型放射光源

量子科学技術研究開発機構(QST)

かんど まさき
神門 正城

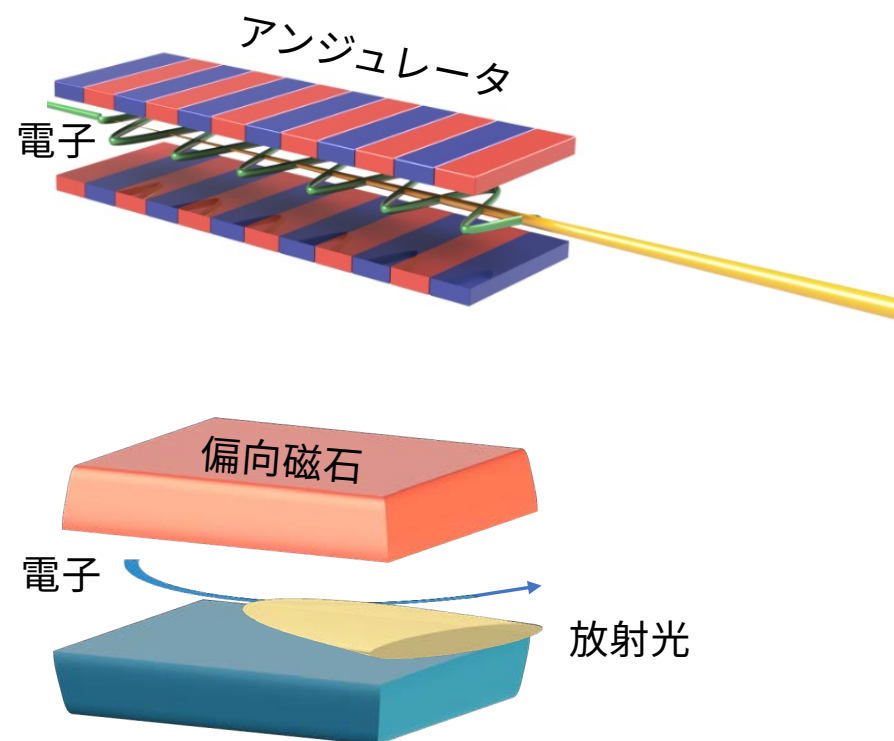
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
ー 電子加速システムの開発 ー
2025年11月7日（金）



後藤俊治 ぶんせき2015より

X線領域のレーザー

高輝度・短パルス・コヒーレント



XFELは役に立つが、サイズが大きい！

米田先生資料より



LCLS IIへ
(2018)



2011～ SACLA(日本)



~20 m

レーザープラズマ加速で
XFELの小型化を目指す



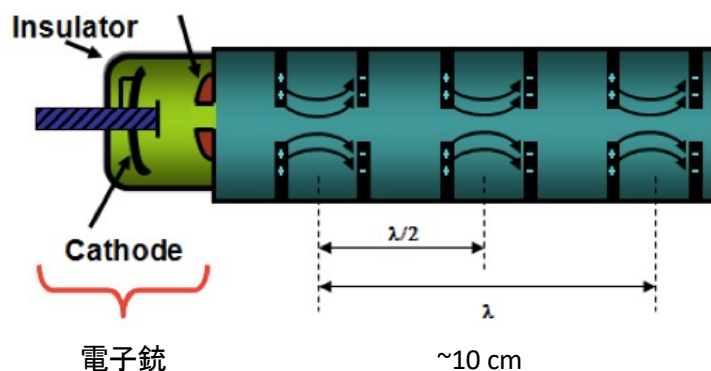
極めて魅力的な装置



サイズが大きい
直線型なのでビームライン少
気軽には使えない…

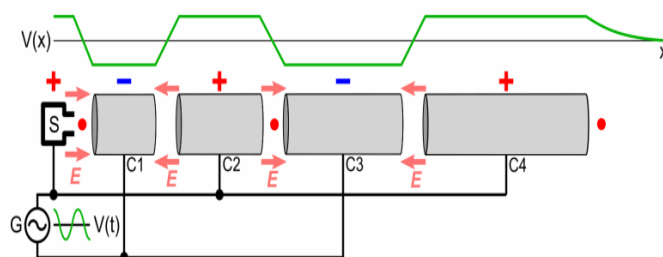


高周波加速器(リニアック)

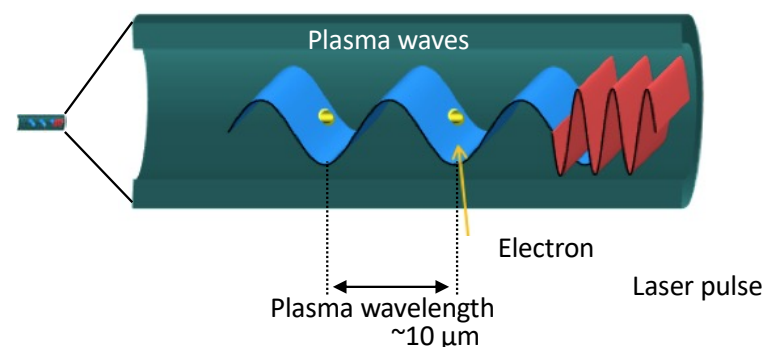


加速勾配

~10-100 MV/m



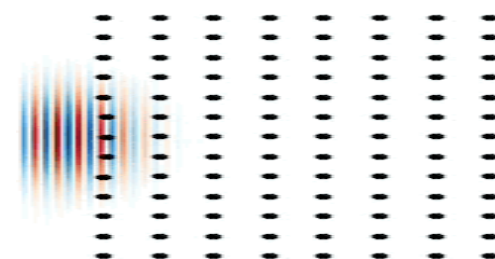
レーザープラズマ加速



~10-100 GV/m

~1000倍の
加速勾配

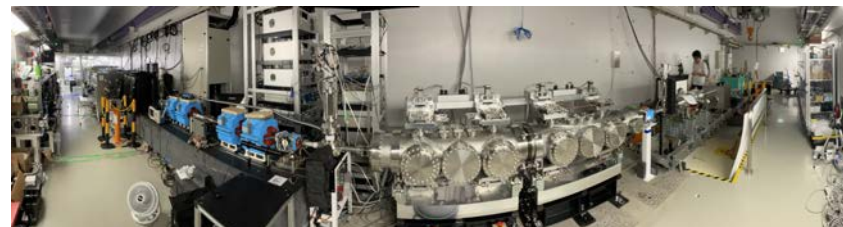
→小型化が可能



https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_particle_accelerator

<http://wp.lancs.ac.uk/spiral/research/laser-driven-plasma-wakefield-acceleration/>

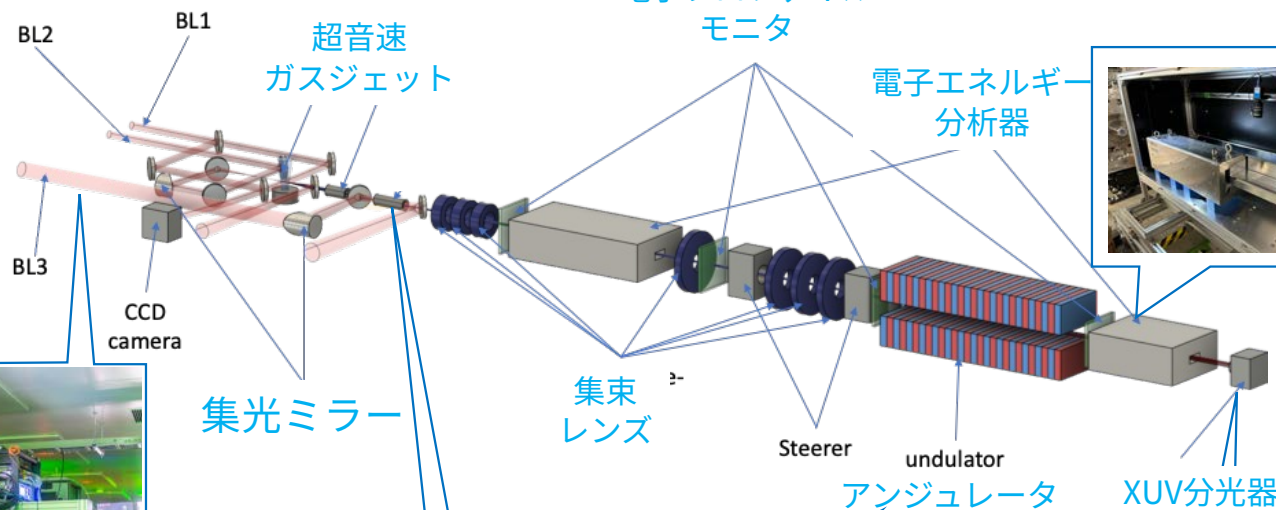
レーザープラズマ電子加速プラットフォーム



東北大学



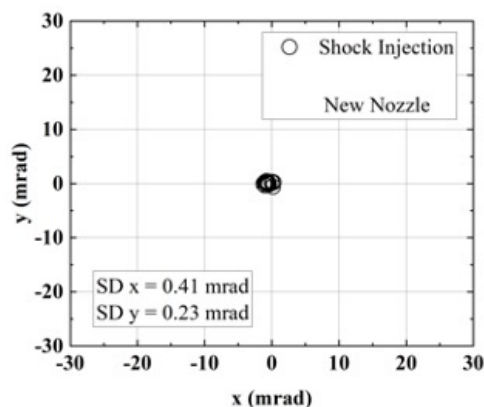
東北大学



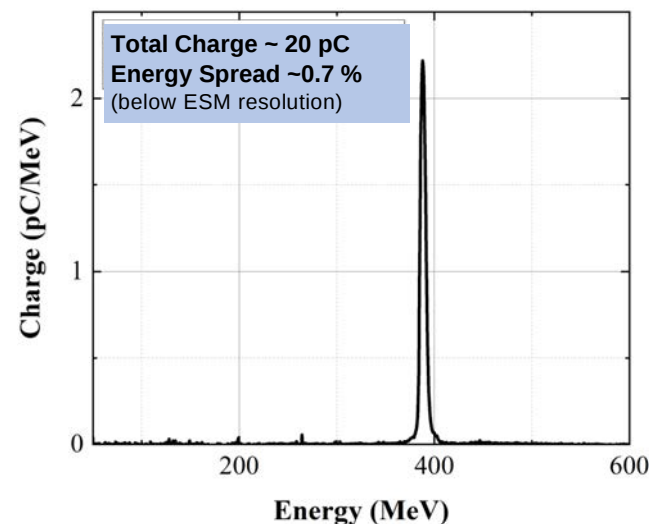
「レーザー駆動による量子ビーム加速器の開発と実証」2025年度第2回シンポジウム
- 電子加速システムと高強度小型レーザーの開発 - 2025/11/07開催

本プロジェクトで達成された電子ビーム性能

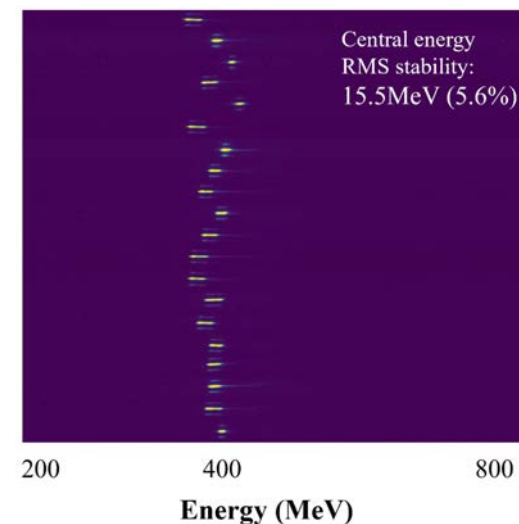
■ ポインティング安定性



■ 電子エネルギー分布

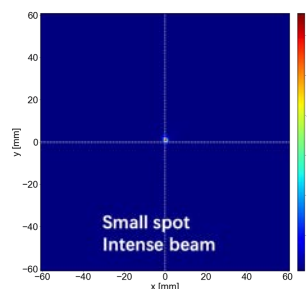


■ 電子エネルギー分布の安定性

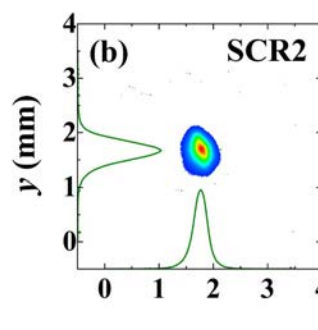


■ 空間プロファイル

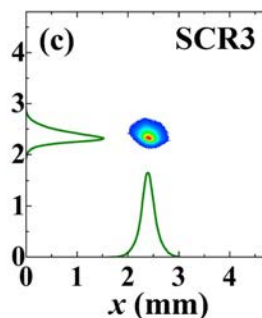
L=0.5 m



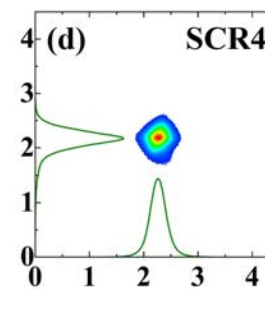
L=3.1 m



L=6 m



L=9.2 m



ビーム輸送後も良好なプロファイル

・磁場吸引力相殺型の小型アンジュレータ開発

- ・長さ 4.5 m
- ・周期長 18 mm



旧SCSSアンジュレータ（真空封止型）
> 10,000 kg

- ・長さ変更(1m x 2 設置完了)
- ・磁石交換、周期長 (25 mm)

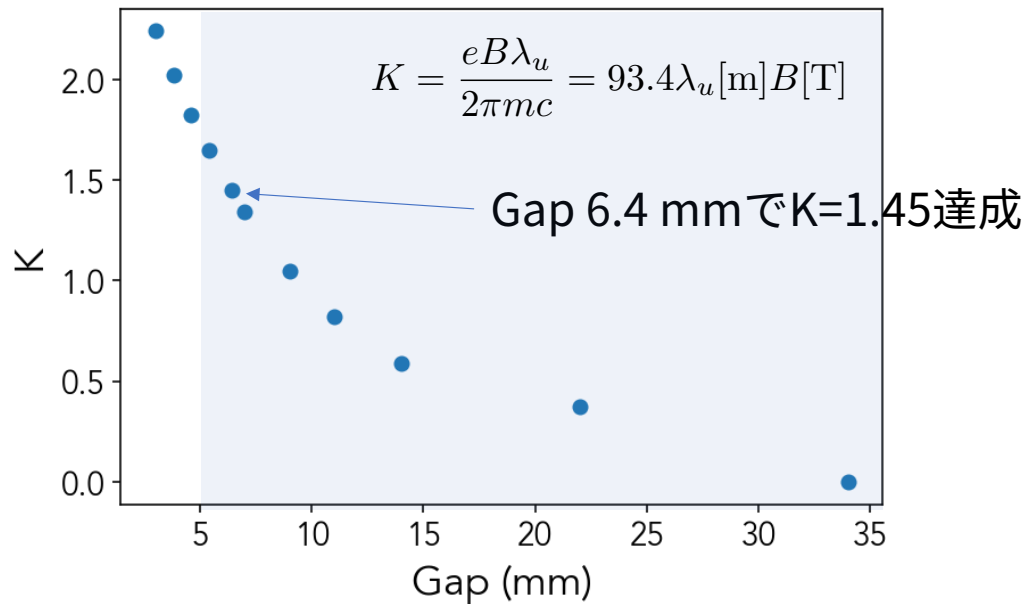


磁場吸引力相殺型
< 500 kg
駆動機構、架台が軽量化

• 磁場吸引力相殺型の小型アンジュレータ開発

- 長さ変更(1m x 2 **設置完了**)
- 磁石交換、周期長 (25 mm)

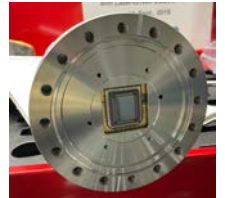
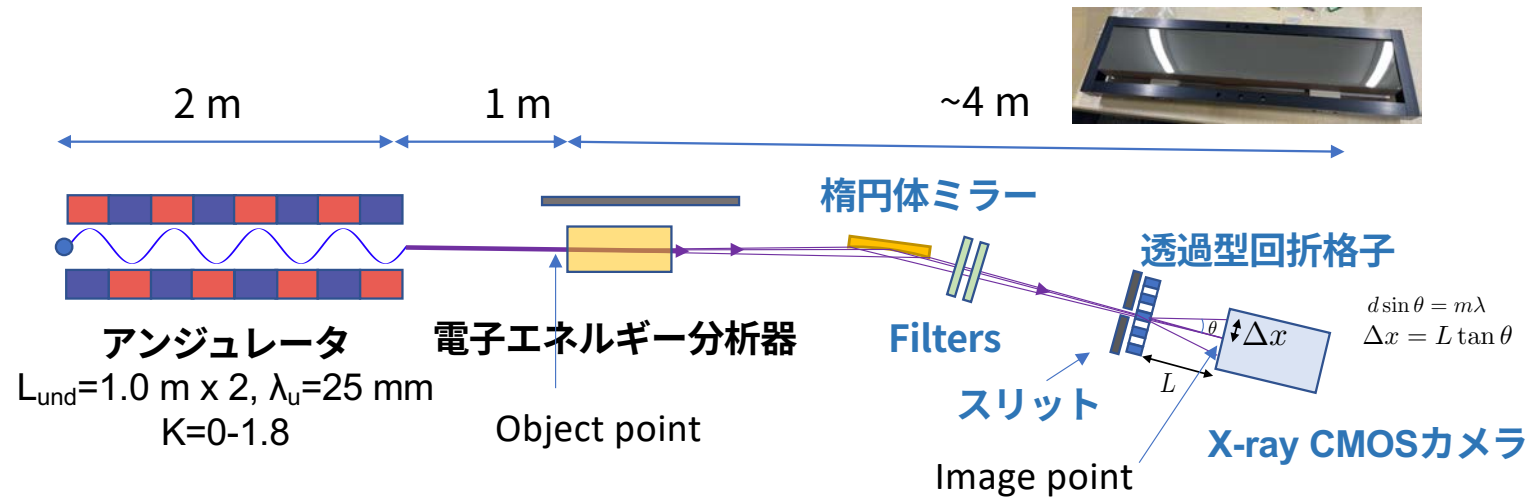
磁場計測結果



磁場吸引力相殺型
 < 500 kg
 駆動機構、架台が軽量化

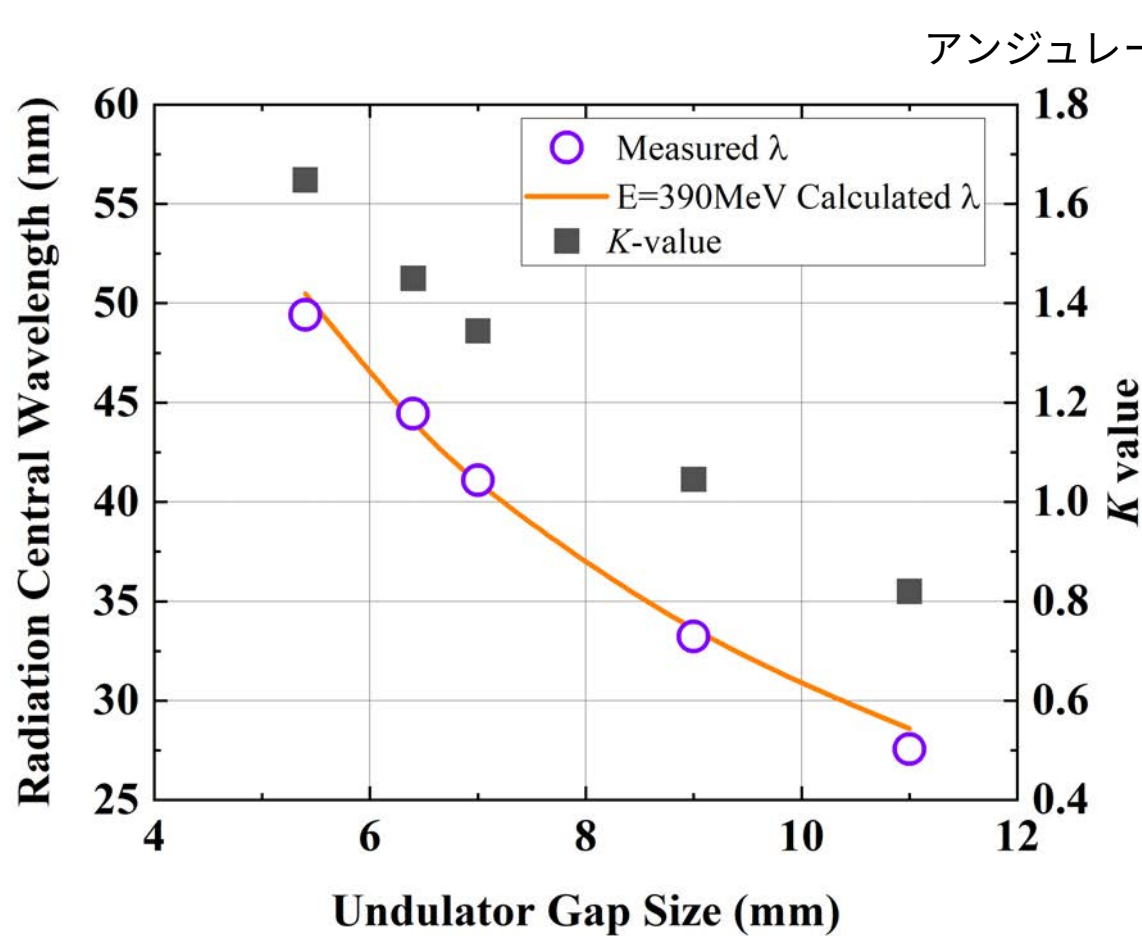
XUV 分光器

- 下記システムを組み上げ、アンジュレータからの光を計測



	Parameter	Design value
透過型回折格子	溝本数	2000 l/mm
	厚さ	Ta (100 nm)+SiN(200 nm)
	面積	2 mm × 2 mm
分光器	回折格子-CMOS間距離	50 mm (adsutable)
	波長範囲	10~128 nm
	分解能	1 nm (for l=50 nm, source=100μm)

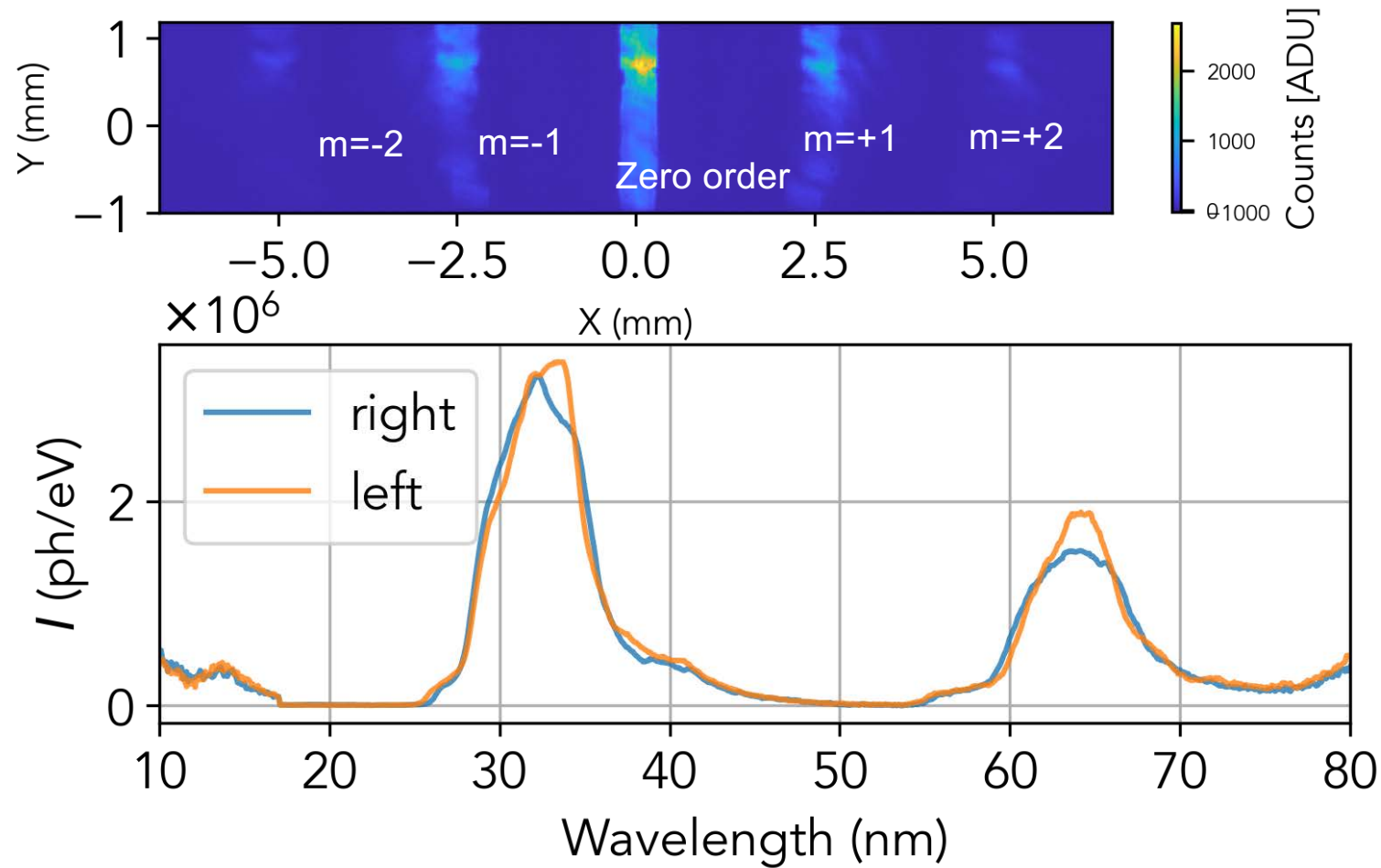
アンジュレータの強さ(K)を変えた場合のスペクトル



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

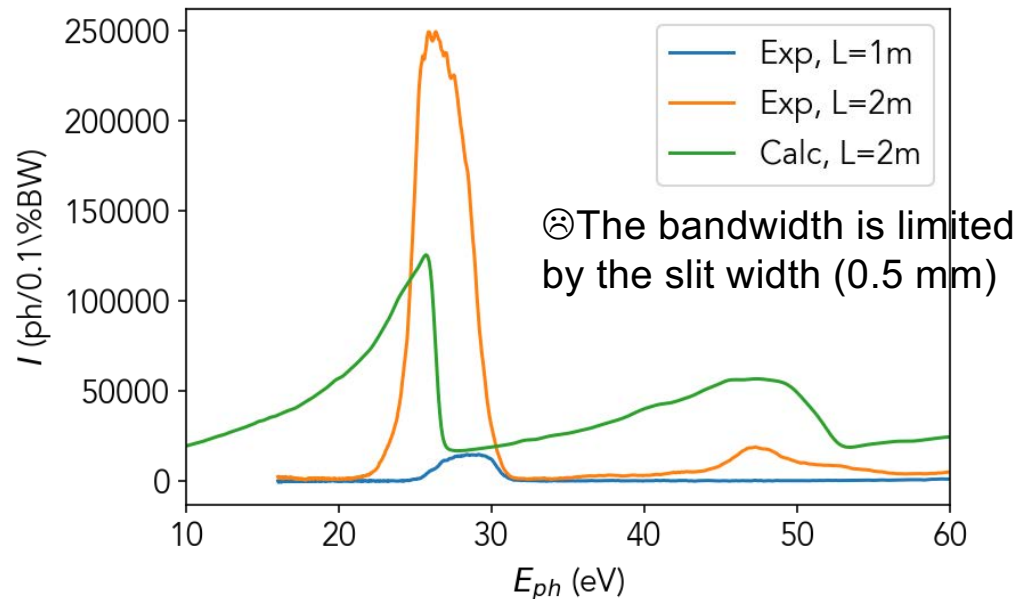
✓ 理論通りの波長シフトを観測

分光器の測定結果（例）



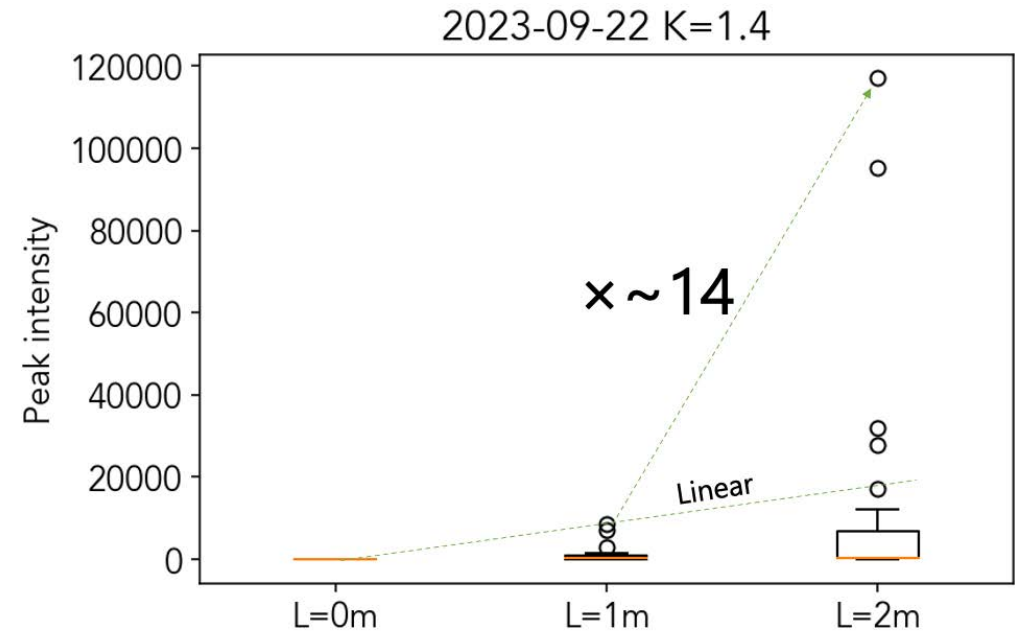
FEL実験結果(2023)

■ 自発光との比較



✓ 光子フラックスは、自発光のフラックスの2倍以上

■ アンジュレータ長依存性



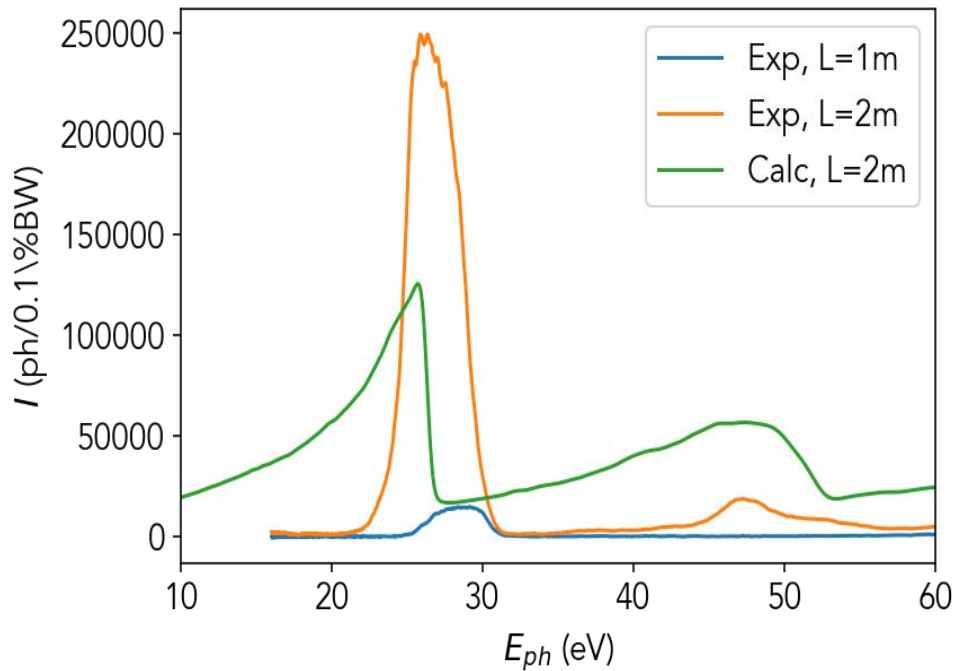
✓ 1 mから2 mで非線形な増大

最新の結果：XUVのスペクトル計測

分光器のスリット幅を0.5mm→**0.05 mm**へ変更し、詳細なスペクトルの取得を行なっている。

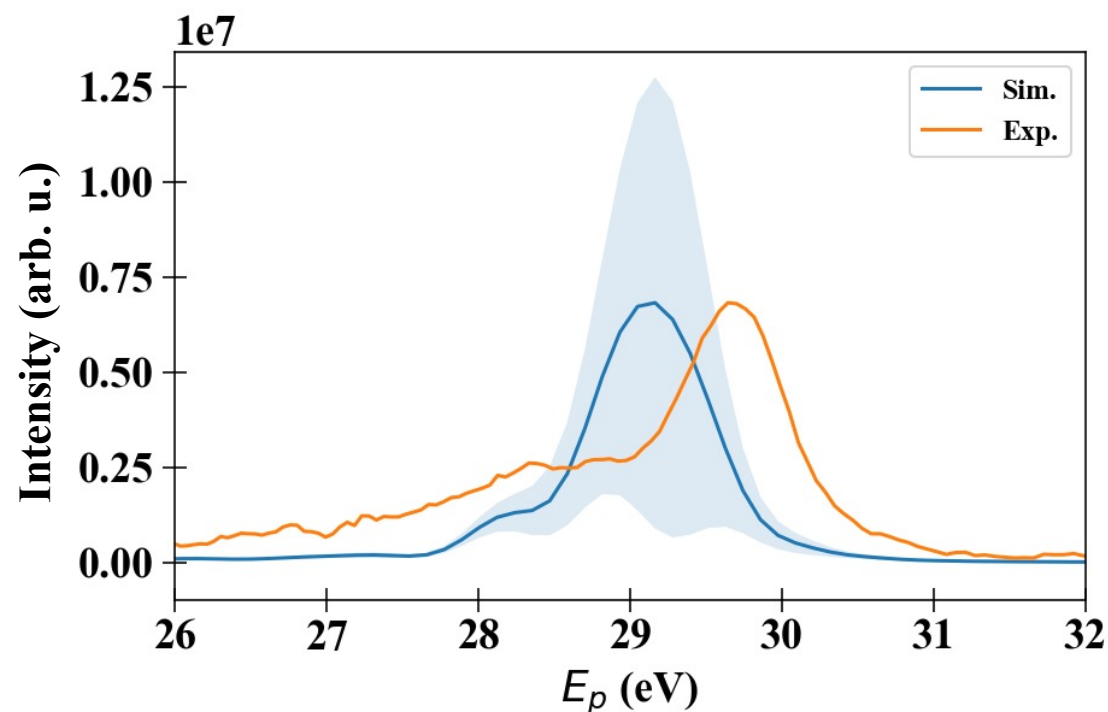
$K=1.45$, $L_{\text{und}}=2\text{m}$

2023の結果



論文公開前のため削除

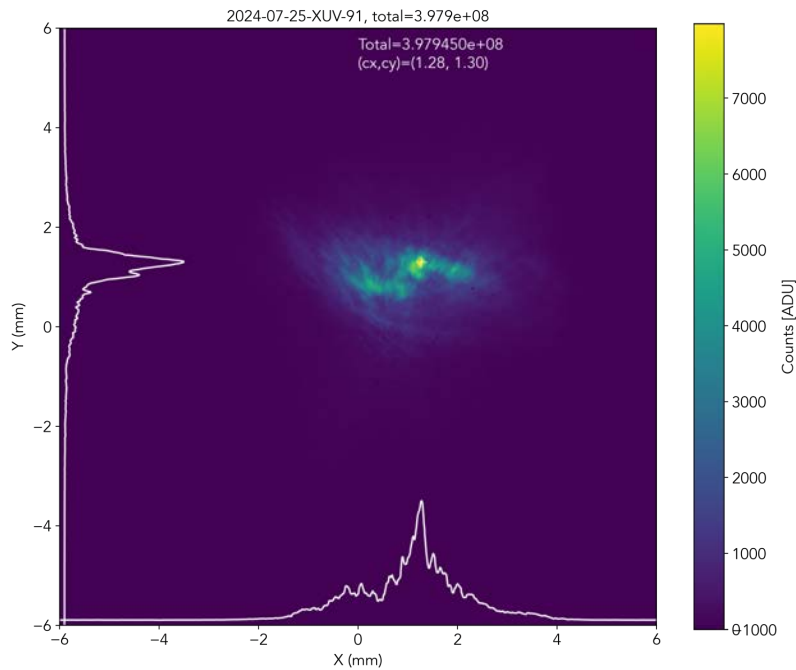
■ 自発光との比較



- ✓ 薄い水色は乱数シードを変えた場合
- ✓ 計算とピークが合っていないが、幅は同程度

K値を変えたときの放射光強度変化

$L_{\text{und}}=2\text{m}$



論文公開前のため削除

K値依存性から、FEL増幅を観測

世界的な位置付け（ベンチマーク）

Rev4

		本プロジェクト	SIOM (中国)	HZDR (ドイツ)	LBNL (米国)
レーザー	パワー	30 TW (0.6 J, 21 fs)	200 TW (~4.8J, 24 fs)	70 TW (2.1J, 30 fs)	66 TW (2.5 J, 38 fs)
加速方式		衝撃波入射	衝撃波入射	イオン化入射	衝撃波入射
電子	エネルギー	390 MeV (±5.6%)	490 MeV	188 MeV (±3.2%)	100 MeV (2.5% rms)
	rmsエネルギー 拡がり	0.7% (±38%)	Best 0.34%	6.3% (±0.8%)	2% (±1%)
	エミッタンス		0.25 mm-mrad*	0.36 mm-mrad	
	電荷量	17 pC (±60%)	22.8 pC	~75 pC (Max 110pC)	90±30 pC (±33%)
	rmsバンチ長	[< 2 fs] シミュレーション	[1.6 fs] シミュレーション	6.3 fs (±10%)	[~ 5 fs] (full 20 fs) est.
	繰り返し	0.03 Hz			1 Hz
特長		• 50 nm • 低エネルギー ノイズなし • 小型レーザー	27 nmのSASE FEL 増幅	260 nmのSeed FEL 増幅	420 nm 1000倍の増幅

レーザープラズマ加速によるFELの比較

- XUV（極端紫外領域）のFELは実現
 - 安定性の問題
 - 高エネルギー化?→ステージング加速による高エネルギー化
- エンドユーザーからの要求（群馬大 櫻井先生）
 - HIP接合の健全性検査（工場での）, **100 keV~MeV**, 0.1%のエネルギー分散
 - 高いfluxも必要

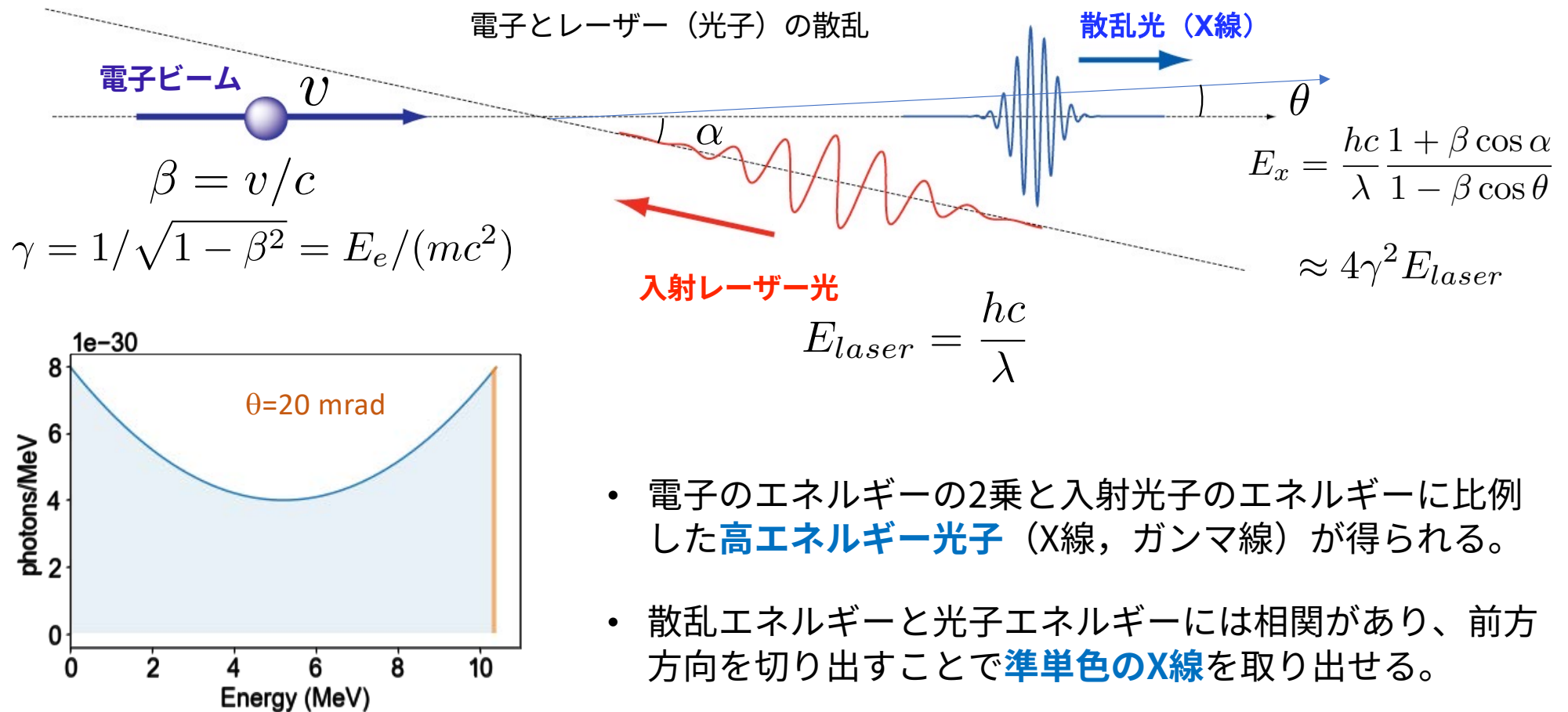
課題：MeVの高エネルギーX線はFELでは難しい

→逆コンプトン散乱

課題：高いFLUXはレーザー加速では難しい

→蓄積リング

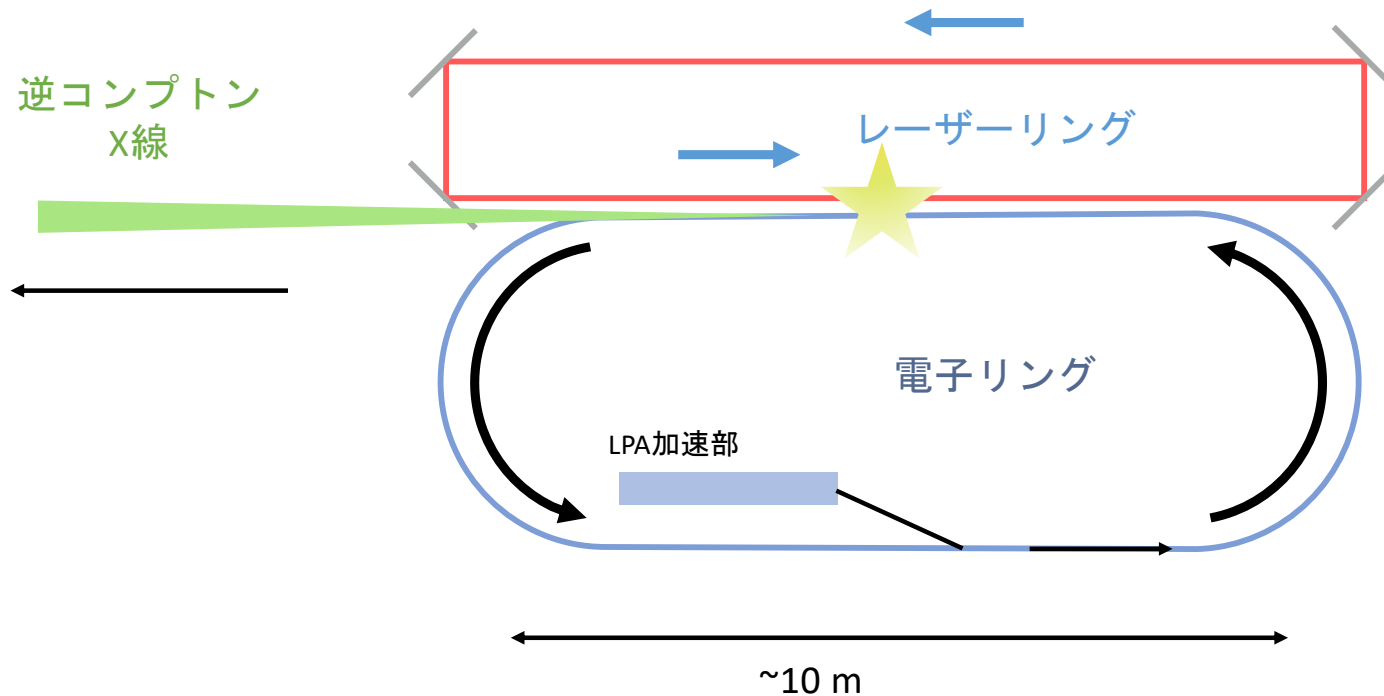
逆コンプトン散乱



- 電子のエネルギーの2乗と入射光子のエネルギーに比例した**高エネルギー光子**（X線，ガンマ線）が得られる。
- 散乱エネルギーと光子エネルギーには相関があり、前方方向を切り出すことで**準単色のX線**を取り出せる。

小型高エネルギーX線発生方法

レーザープラズマ加速+電子蓄積リング



- 電子ライナックはLWFAで小型化
 - 衝突レーザーもリング化で効率良く逆コンプトン散乱X線を生成
- ※繰り返しが高いため、レーザーはCWレーザーでもよい

入射器はレーザー加速で小型化。安定度、単色性は蓄積リング（加速器技術）で担保。お互い（レーザー加速と既存加速器）の欠点を補い合うソリューション

簡単な見積

			1 MeV	10 MeV
電子エネルギー	E_e	MeV	240	760
	γ		489.2	1506.8
	β		0.99999791	0.99999978
入射角度	α	deg.	10	10
観測角度	θ	deg.	0	0
レーザー波長	λ_0	nm	1070	1070
光子エネルギー	$\hbar\omega_0$	eV	1.16	1.16
X線エネルギー	E_x	MeV	1.0	10.0
0.1%の観測角度	θ_c	deg.	0.0037	0.0012
レーザー集光サイズ	σ_{Wp}	μm	100	100
	σ_{Hp}	μm	100	100
電子集光サイズ	σ_{We}	μm	100	100
	σ_{He}	μm	50	50
レーザーパワー	P_L	W	5000	5000
レーザー光子数	N_p	ph/s	2.7e22	2.7222
電流	I_e	mA	50	50
電子数	N_e	e/s	3.1e17	3.1e17
バンチ長	σ_{Le}	mm	33	33
周回周波数	f_r	MHz	12	12
X線の数 (0.1%)	N_x^{obs}	ph/s	1.1e13	1.1e13

電子蓄積リングはまだ設計完了していないので既存のリングなどからの概算

サイズはB=1.2Tを仮定し、1MeV, 10 MeVで
曲率半径 0.67 m, 2.1 m

Fujikura製ファイバーレーザー
CW, 5 kW, 1070 nm



パルスレーザーを用い、Green光, UV光などを利用することで電子エネルギーを下げることは可能

レーザー加速電子に特化したリングの設計、
コスト、サイズを含めた最適化が必要

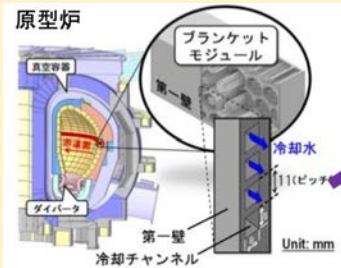
新しい応用先の開拓～高エネルギーX線による非破壊検査

エンドユーザーの課題

核融合用ブランケット
HIP接合

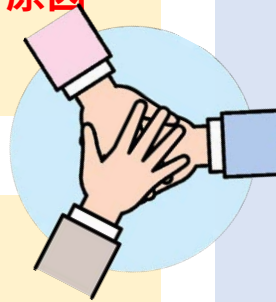
金属技研

QST六ヶ所研

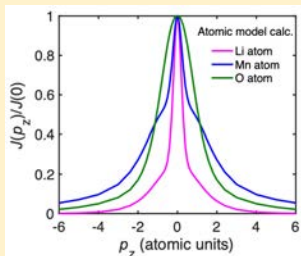


良い接合面と悪い接合面がある
どのように検査・管理するか？

接合面に析出する酸化物が原因



学術機関での基礎研究



高エネルギーX線を用いた
コンプトンプロファイル技術が使えないか？

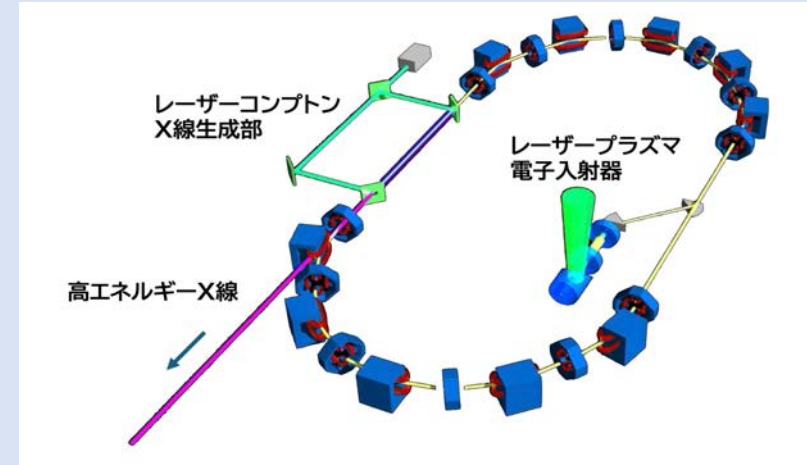
SPring-8などで実証実験

群馬大学 櫻井先生

技術解決 未来社会

レーザープラズマ電子加速を用いた
単色・高エネルギーX線発生装置
(工場に設置可能な大きさ)

レーザープラズマ入射器+蓄積リング
良いところ取りで、実用化を短縮化

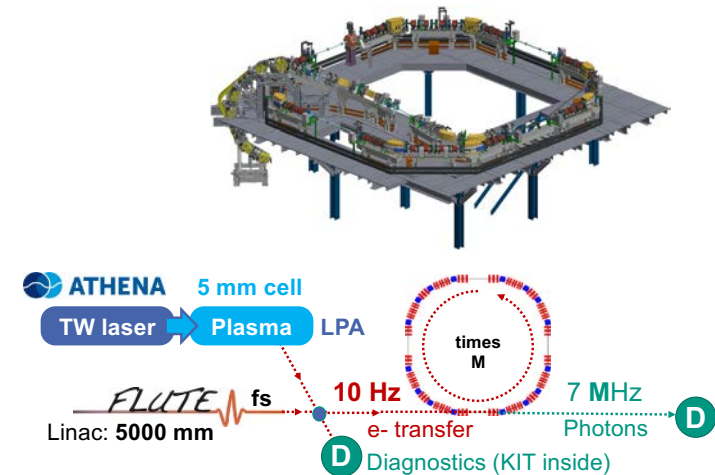


現在、金属技研様と一緒にリングの設計中

・光源加速器の入射器としての検討

・ドイツ KIT (カールスルーエ工科大)

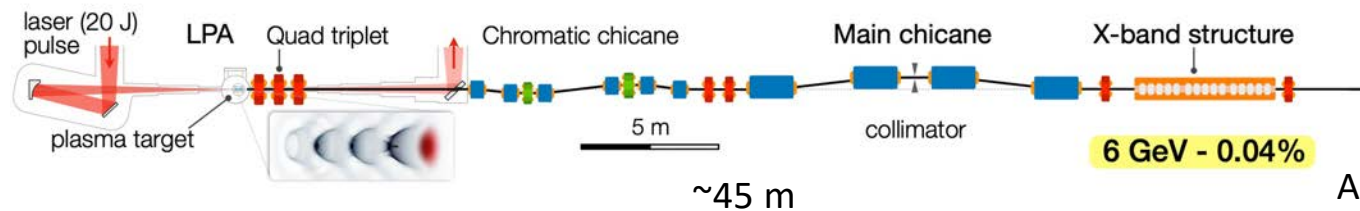
- ・ 入射器は通常のLINACも併設
- ・ fsの短パルスを蓄積しようとする計画
- ・ cSTART
- ・ **40-90 MeV**, 2027運転目標
- ・ 75 TWのレーザーを準備



A. Müller, iFAST2024

・ドイツ Hamburg (PETRA IV)

- ・ PETRAIV用の入射option
- ・ **6 GeV**レーザー加速+RF buncher
- ・ 20 J, 345 TW (53 fs)のレーザー



A. Maier, FLS2023

- 本プロジェクト（未来社会創造事業）では、
レーザープラズマ加速による加速器の小型化を行い、
XUV領域（10~100 nm）の自由電子レーザー(FEL)増幅を実証。
- レーザープラズマ電子加速と加速器技術（蓄積リング）の組合せ
で**高フラックスの高エネルギーX線を設計。**
- 海外では、放射光リングへの入射器として検討中。
- 本プロジェクトでは、電子ビームのピークエネルギーの安定性を
向上させるため、レーザーの安定性向上や電子との相関計測を実施している。

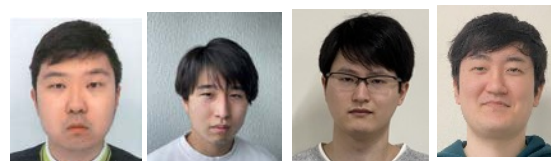
謝辞：



大阪大学 産業科学研究所
量子ビーム物理研究分野
理化学研究所レーザー加速チーム



細貝 知直, 金 展, 顧 彦珺, 武藤 俊哉



雷 臻哲, 佐藤 新吾, 佐野 弘明, 内藤 圭祐



量子科学技術研究開発機構 (QST)
関西光量子科学研究所 (KPSI)



神門 正城, 中新 信彦, 黄 開, 大東 出



高エネルギー加速器研究機構
(KEK)



山本 樹



JPMJMI17A1

謝辞

群馬大学 櫻井浩
QST六ヶ所研 野澤貴史

金属技研

設楽弘之 長澤 豊
竹内 浩 土屋 将央