日本加速器学会年会、幕張、2016年8月8-10日

MeVフェムト秒電子線パルスを用いた超高速電子顕微鏡の開発

楊　金峰

大阪大学・産業科学研究所

Motivation

✓An observation in "real space（実空間）" and "real time（実時間）" has long been in goal for the scientists.

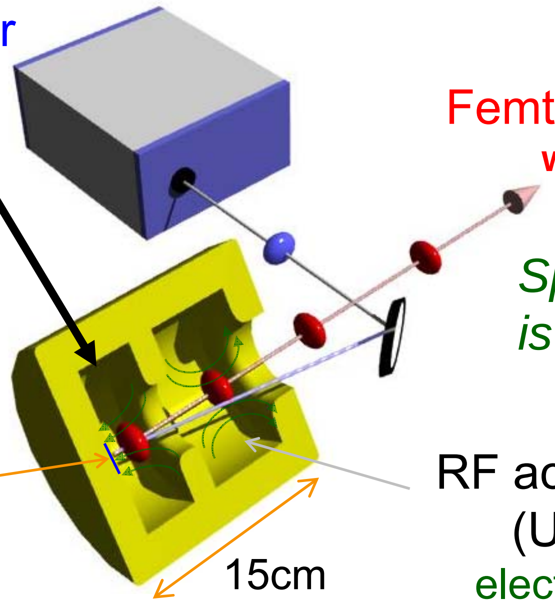
✓Many ultrafast phenomena or dynamics in materials begin in femtosecond time region over nanometer spatial dimension, e.g.

- Ultrafast chemical reactions (e.g. excitation, relaxation, making and breaking of bonds, …)
- Ultrafast dynamics in biology (e.g. charge/energy transfers, growth of damage, …)
- Structural changes in solids (e.g. phase transformations, melting and resolidification, …)

✓ Single-shot measurement is necessary, because many structural phenomena or dynamics are not reversible **（不可逆的な構造変化）**！

MeVフェムト秒電子線パルスを用いた超高速電子顕微鏡の開発

フォトカソードRF電子銃



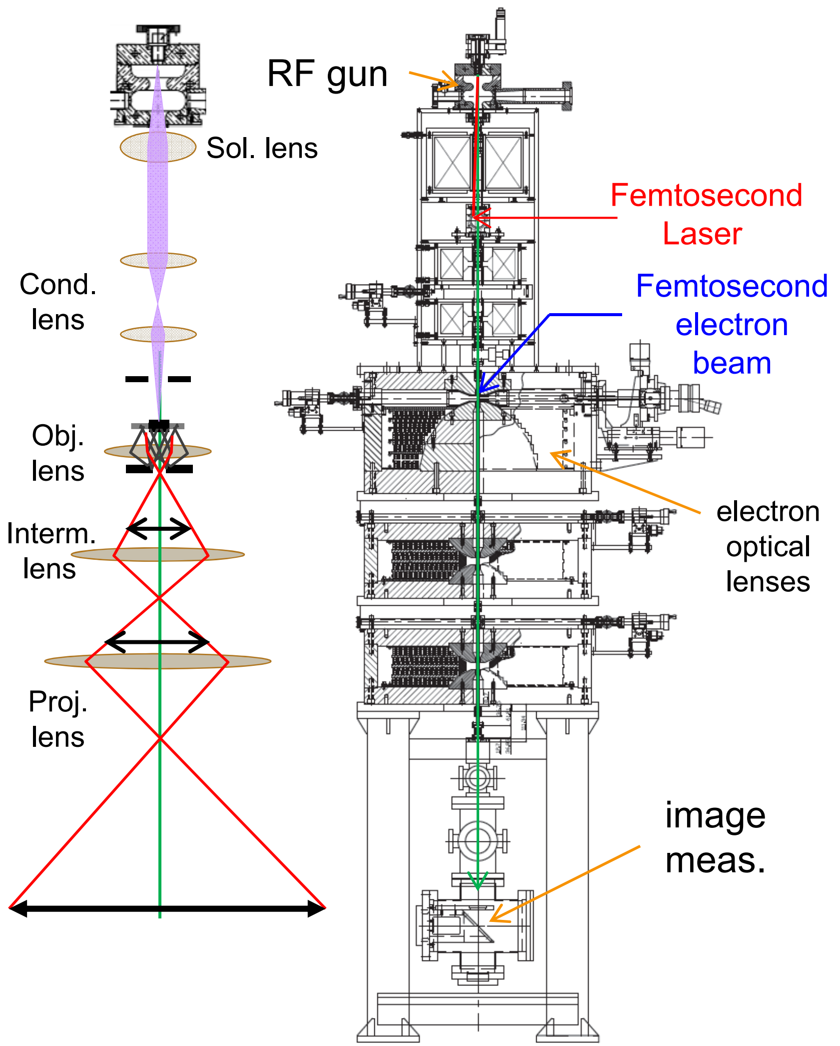
現在、X線FELなどの先端加速器分野に
利用されている。

期待される電子ビームの特性:

Electron energy: 1～5 MeV
Bunch length: 100 fs
Norm. emittance: 0.1 mm-mrad
Energy spread: 10^{-4} (10^{-5} for challenge)
No. of electrons: 10^7～10^8e$^-$'s/pulse

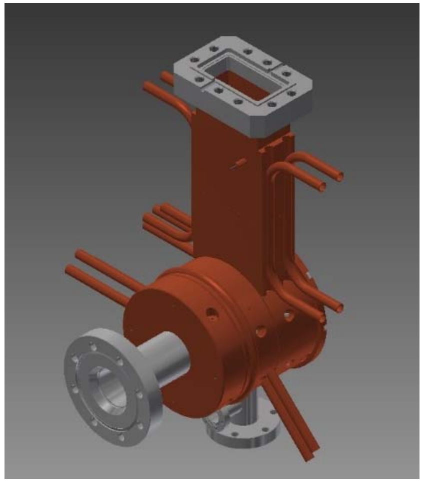
（現状）ほぼ達成！

Concept of RF gun based UEM



Prototype of MeV UEM

Femtosecond photocathode electron gun



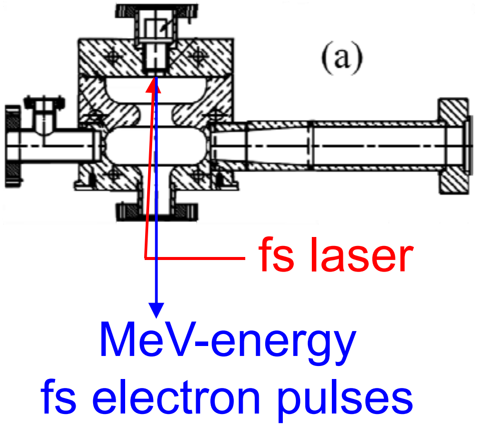
Electron energy：	1 ～ 3 MeV
Bunch length ：	100 fs
Emittance：	0.1 mm-mrad
Energy spread：	10^{-4} ～ 10^{-5}
Charge：	10^{7}～10^{8}e^{-}'s/pulse

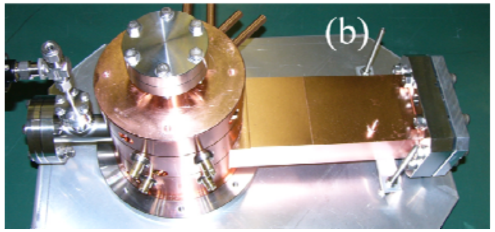
Time resolution: 100 fs

Spatial resolution: 1 nm

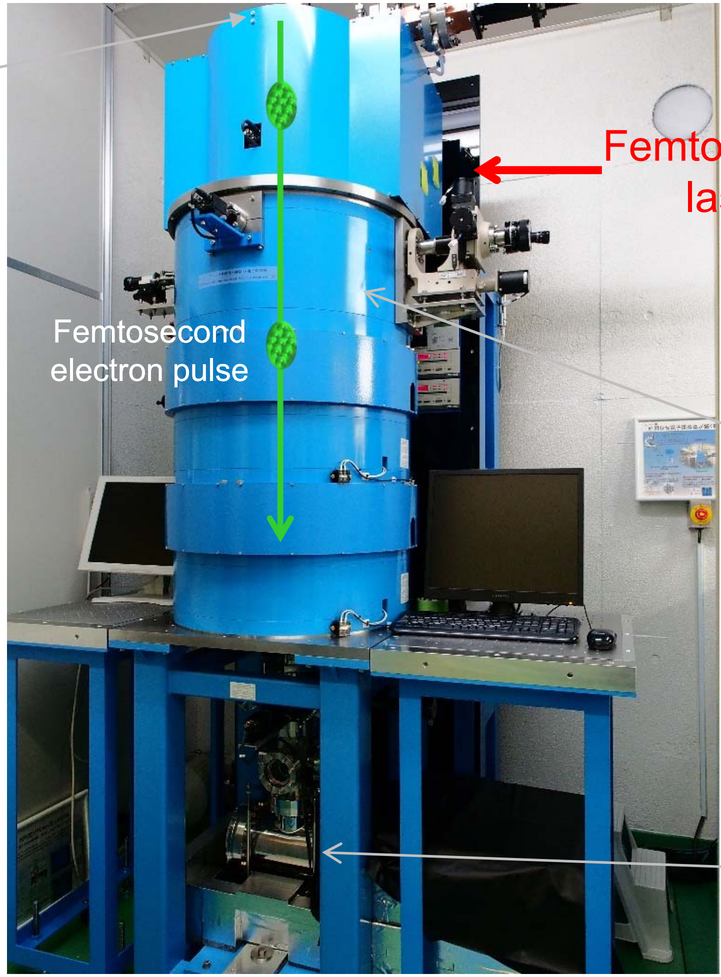
Challenge !

RF電子銃を用いた
超高速電子顕微鏡実証機の写真

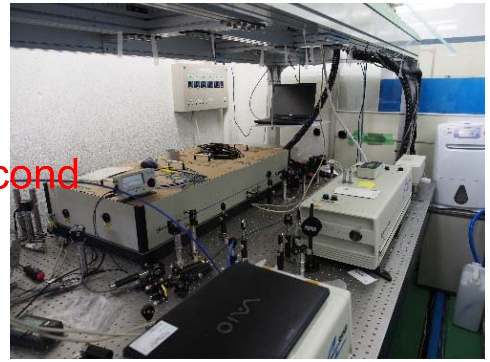


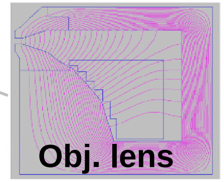


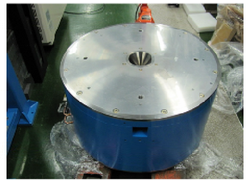
本装置は、関連研究者の経験と知恵・努力を結集して独自に設計・製作したもの！

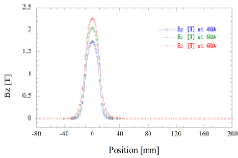


Size: 3m(H) x 0.7m(D)





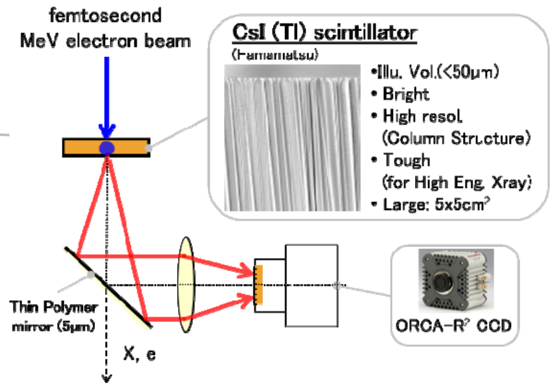




Bore diameter: 13mm
Magnetic field: 2.2Tesla
Ampere-turn: 35,000

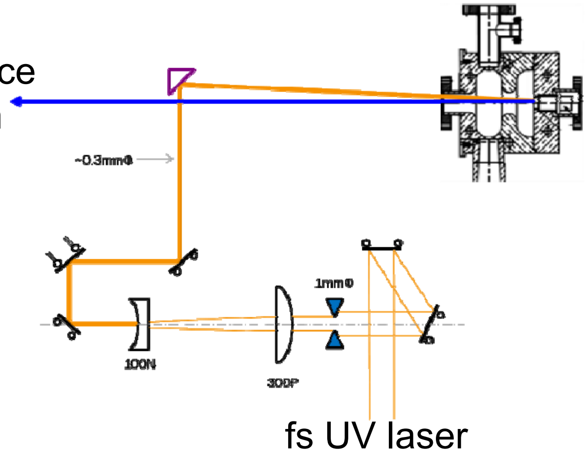
f = 5 mm for 2MeV e⁻
C_s (C_c) ~ 4 mm

70 cm (D) x 35 cm (H)

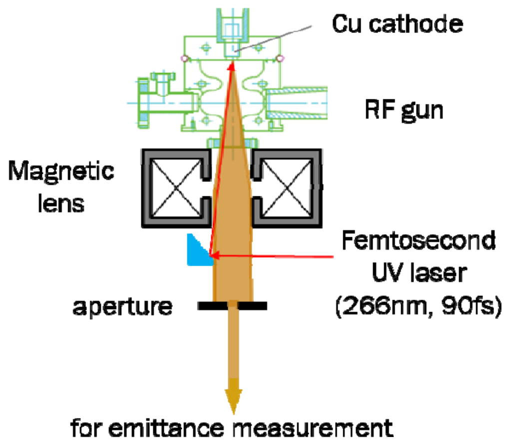


0.1μm- emittance electron beam generation

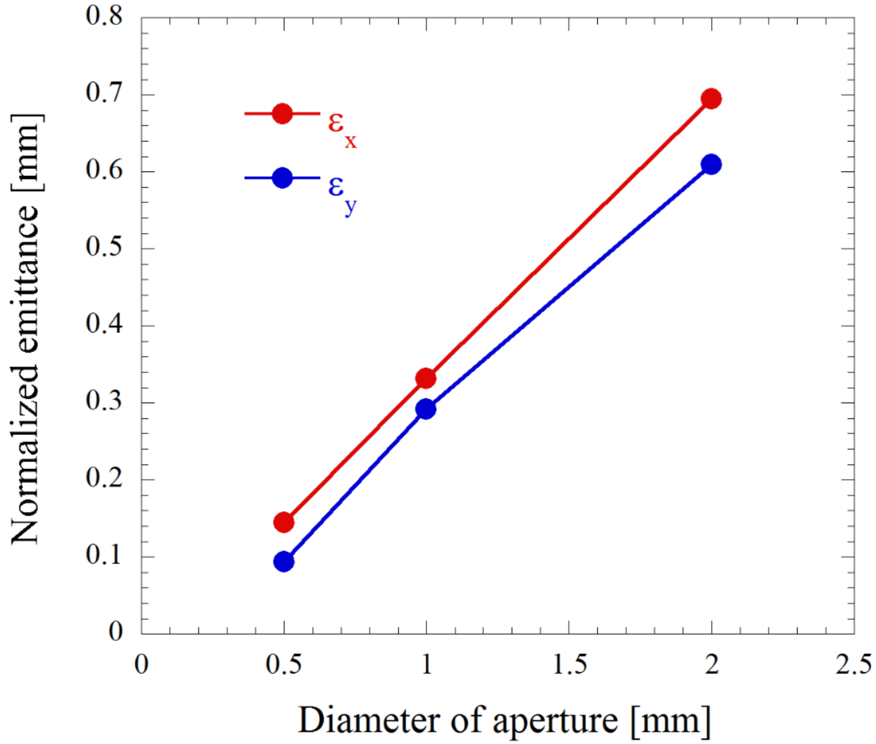
(1) reduce the thermal emittance by focusing laser on the cathode



(2) collimate the emittance after RF gun

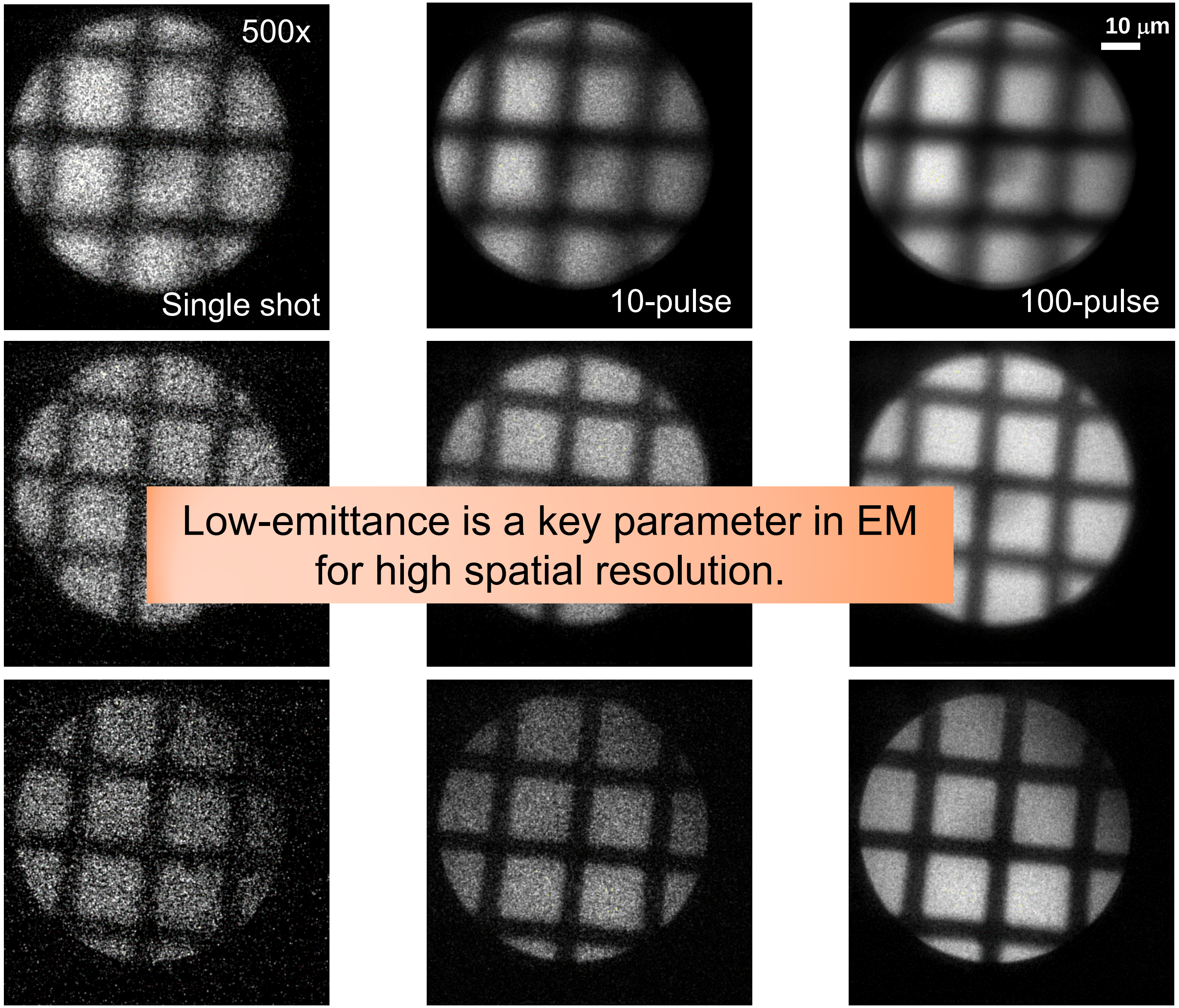


Measurement results of emittance as a function of aperture diameter



~0.1 mm-mrad using <0.5mmφ aperture!

Dependence of image contrast on emittance



Low-emittance is a key parameter in EM for high spatial resolution.

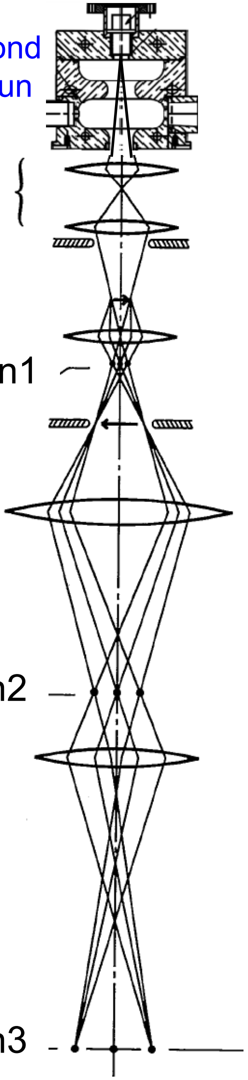
Sample:
Cu grid(1000-mesh)

3.1 MeV
0.6 mm-mrad
7 pC/pulse
6×10^{9} $e^{-}/mm^{2}mrad^{2}$

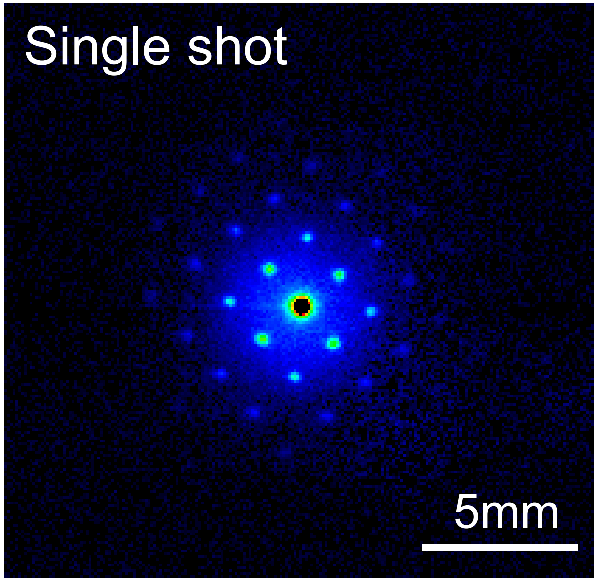
3.1 MeV
0.3 mm-mrad
4 pC/pulse
1.4×10^{10} $e^{-}/mm^{2}mrad^{2}$

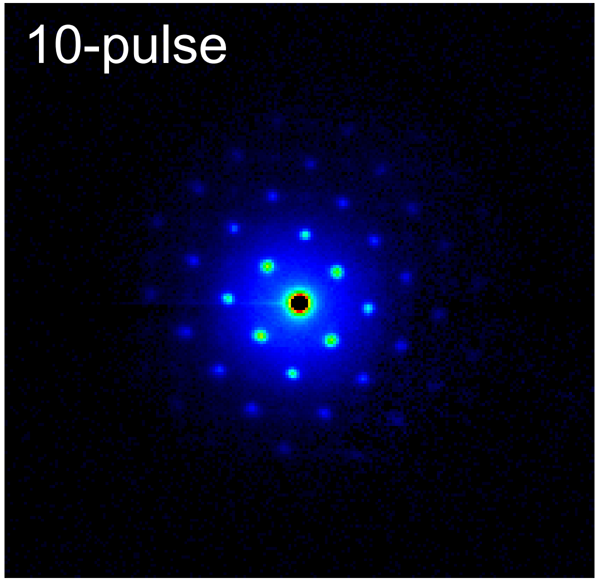
3.1 MeV
0.14 mm-mrad
1 pC/pulse
1.6×10^{10} $e^{-}/mm^{2}mrad^{2}$

フェムト秒電子線パルスによる電子回折の測定結果



Diffraction measurement





Sample:
Single-crystal Au
Thickness: ~10nm

Electron beam:
Energy: 3.1 MeV
Pulse length: 100 fs
e- charge: ~1pC/pulse (10^7e-'s/pulse)

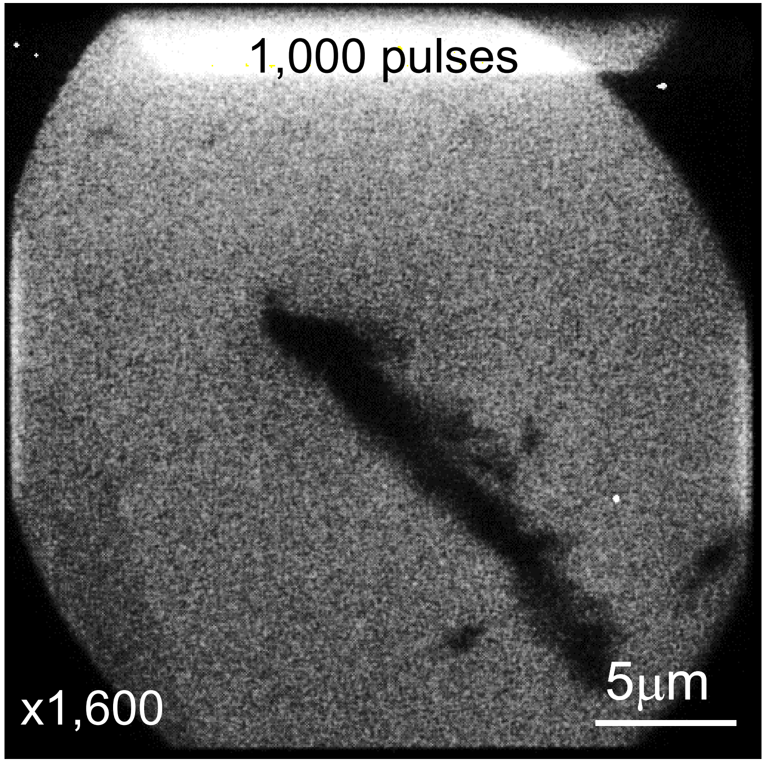
Results:

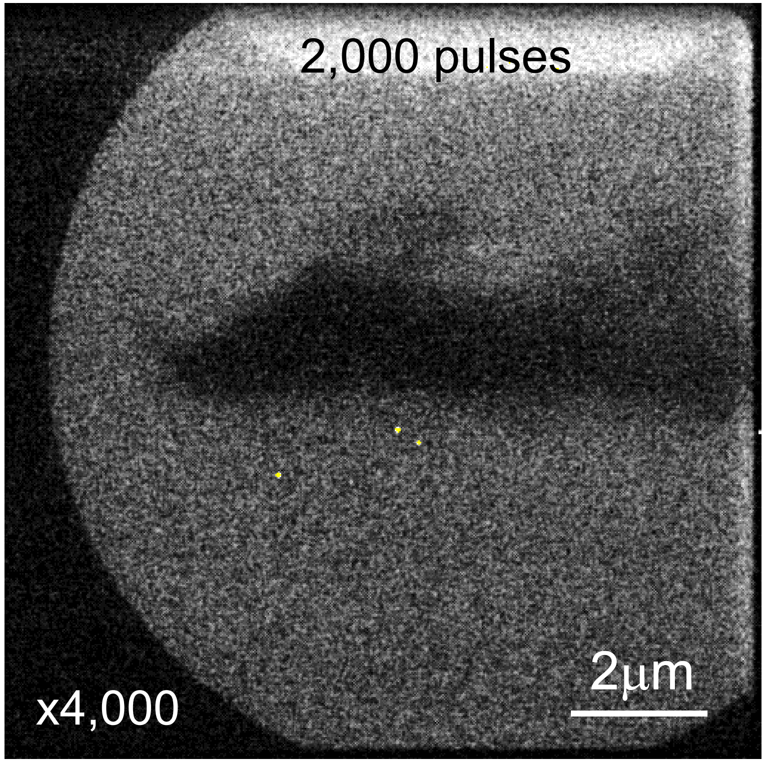
- High-quality MeV electron diffraction patterns can be observed with MeV-high-energy e- pulses.
- Single-shot measurement is available.

MeV TEM imaging of MoO_3 crystal

Electron beam: 3.1 MeV, 100 fs, ~1pC/pulse

Diameter of MoO_3 crystal: ~2μm



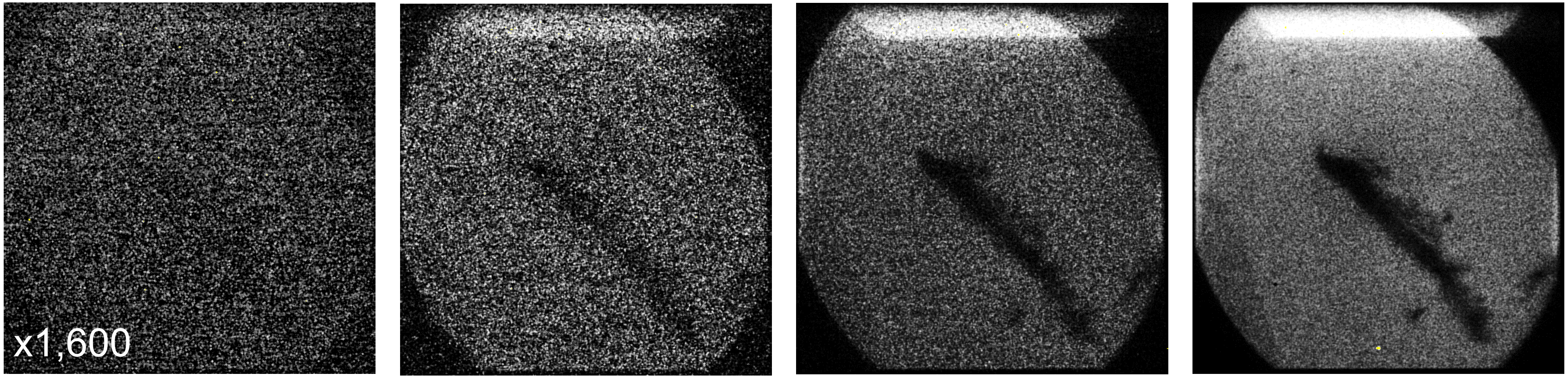


Dependence on electron pulse number

Electron beam: 3.1 MeV, 100 fs, ~1pC/pulse

Sample: MoO_3 crystal (diameter: ~2μm)

1-pulse 10-pulse 100-pulse 500-pulse

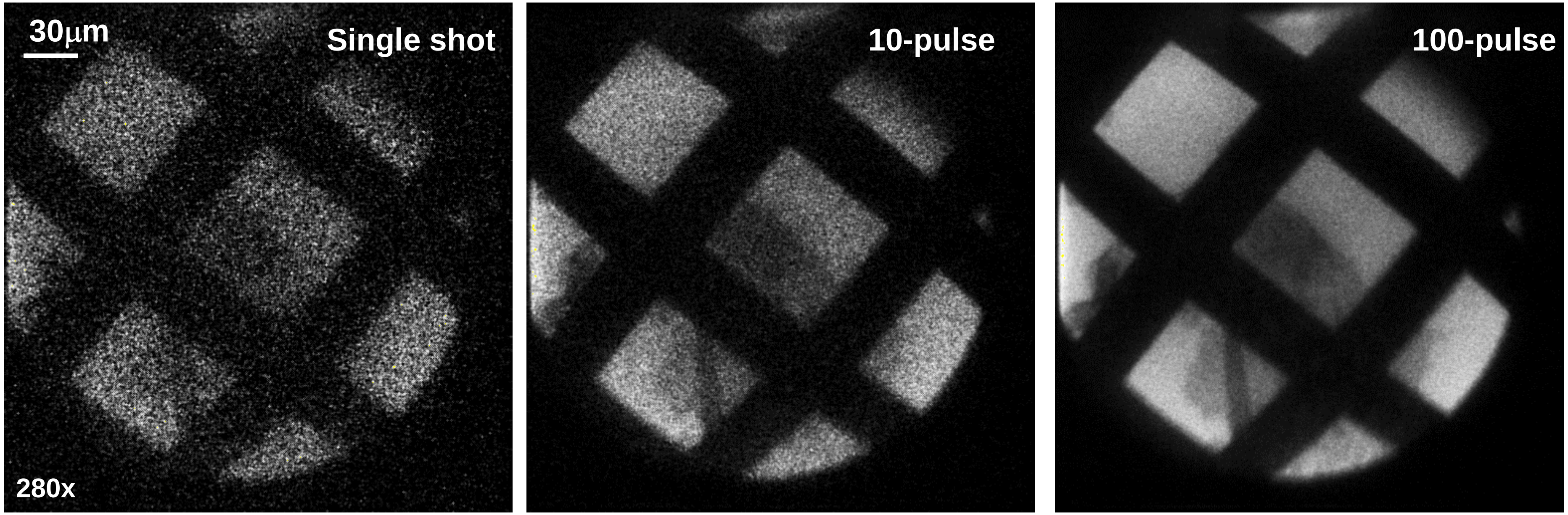


➢Contrast TEM images can be observed with 500 pulses.

シングルショットとパルス積算で観測したTEM像の比較

Electron beam: 3.1 MeV, 100 fs, ~1pC/pulse

Sample: single crystal gold (thickness: 10nm)



- In the averaging measurement, good-contrast TEM images can be observed for Au sample.
- At low-magnification observation, the single-shot imaging is available.

まとめ

- ✓ 世界先駆けて相対論的フェムト秒電子線パルスを用いた超高速電子顕微鏡実証機を開発し、原理実証に成功した。
- ✓ 電子回折の測定モードでは、シングルショットの観測でも十分明瞭な電子回折パターンを得ることができる。
- ✓ 電子顕微鏡像の測定モードでは、3MeVのフェムト秒電子線パルスを用いて、微粒子や微結晶等のTEM像の観測に成功し、低倍率ではシングルショットの観測も可能である。

<u>今後の課題:</u>

- ✓ 電子ビーム高輝度化
  → エミッタンスの低減(<0.1μm)、エネルギー分散の低減($\sim 10^{-5}$)
- ✓ 安定度($\sim 10^{-5}$)と検出効率の向上

⇒ *空間分解能の向上、フェムト秒超高速電子顕微鏡の実現!*

謝　辞

共同研究者

（阪大産研）淺川稜、菅晃一、近藤孝文、神戸正雄、吉田陽一

（阪大産研）吉田秀人、竹田精治

（阪大工）谷村克己、保田英洋

（北大）成瀬延康

（ローザンヌ工科大）室岡義栄

（KEK）高富俊和、照沼信浩、浦川順治

産研量子ビーム科学研究施設のご協力

科研費 KAKENHI

基盤研究(A)（22246127、H22～24)、基盤研究(A)（26246026、H26～28)、
萌芽研究 （16K13687、H28～29）