

レーザー励起X線源と その高効率化

NTT物性科学基礎研究所
量子光物性研究部 量子光デバイス研究グループ
中野 秀俊

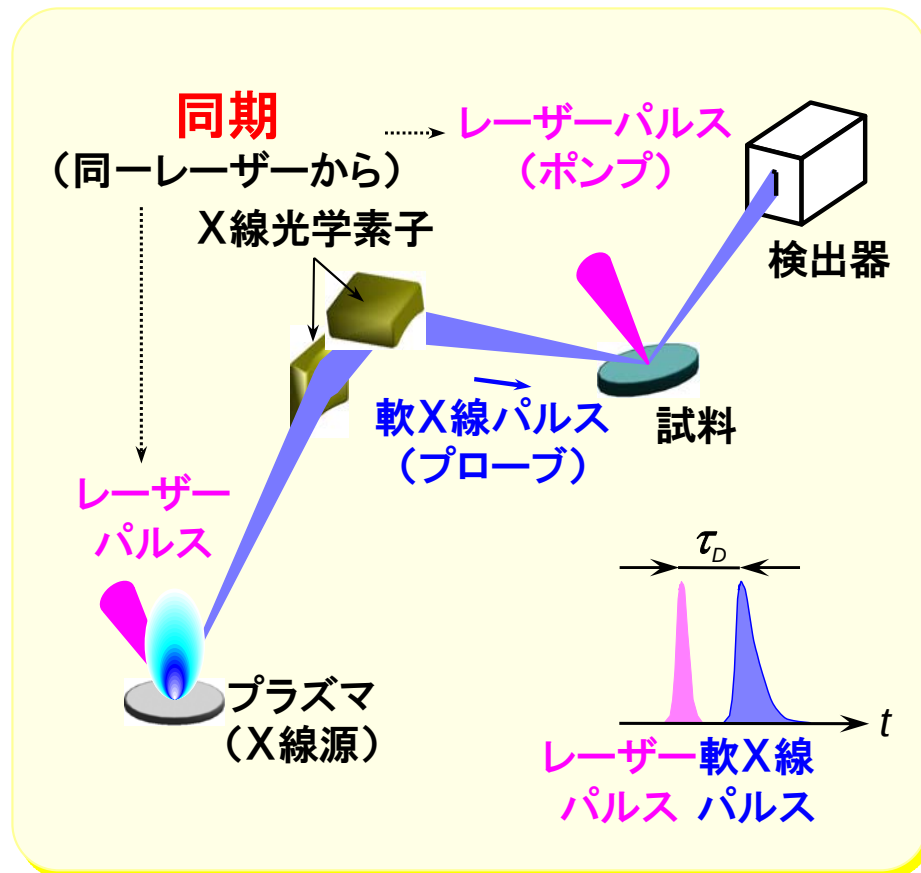
内 容

1. はじめに
2. プリパルス法：二連パルス化によるプラズマパラメータ制御
3. ナノ構造配列ターゲットの利用
4. まとめ

高強度レーザー光照射

- ⇒ ターゲットの電子加熱
- ⇒ 高温プラズマ生成 ⇒ **X線発生**

- 急峻な電子密度勾配
(スケール長 < 励起光の侵入深さ)
 - ◆ 高い電子熱伝導度 ⇒ プラズマの急冷
 - ◆ 短パルス発光
 - ◆ 小さな光源サイズ
 高輝度X線源
- プラズマ生成には高強度が必要。
超短パルスレーザー光の場合、比較的低いエネルギーでも、高強度が実現可能。
- レーザーパルスとX線パルスが同期。
⇒ ポンププローブ分光への応用。



レーザープラズマX線とレーザーパルスの組み合わせによるポンププローブ時間分解分光

レーザー生成プラズマX線源の効率化

基本方針: ターゲット材料の選択・光吸収の向上

ターゲット

材料

原子番号
複合材料

表面ナノ構造

ナノホール
ナノシリンダー
ナノチューブ
...

レーザーパルス

強度
波長

パルス波形 → プリパルス



プラズマパラメータの制御

X線

高密度プラズマ

電子・イオン温度
電子・イオン密度

原子
イオン

高速電子

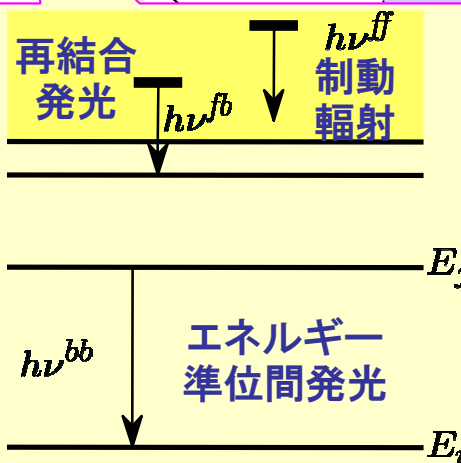
(硬)X線

高温プラズマ

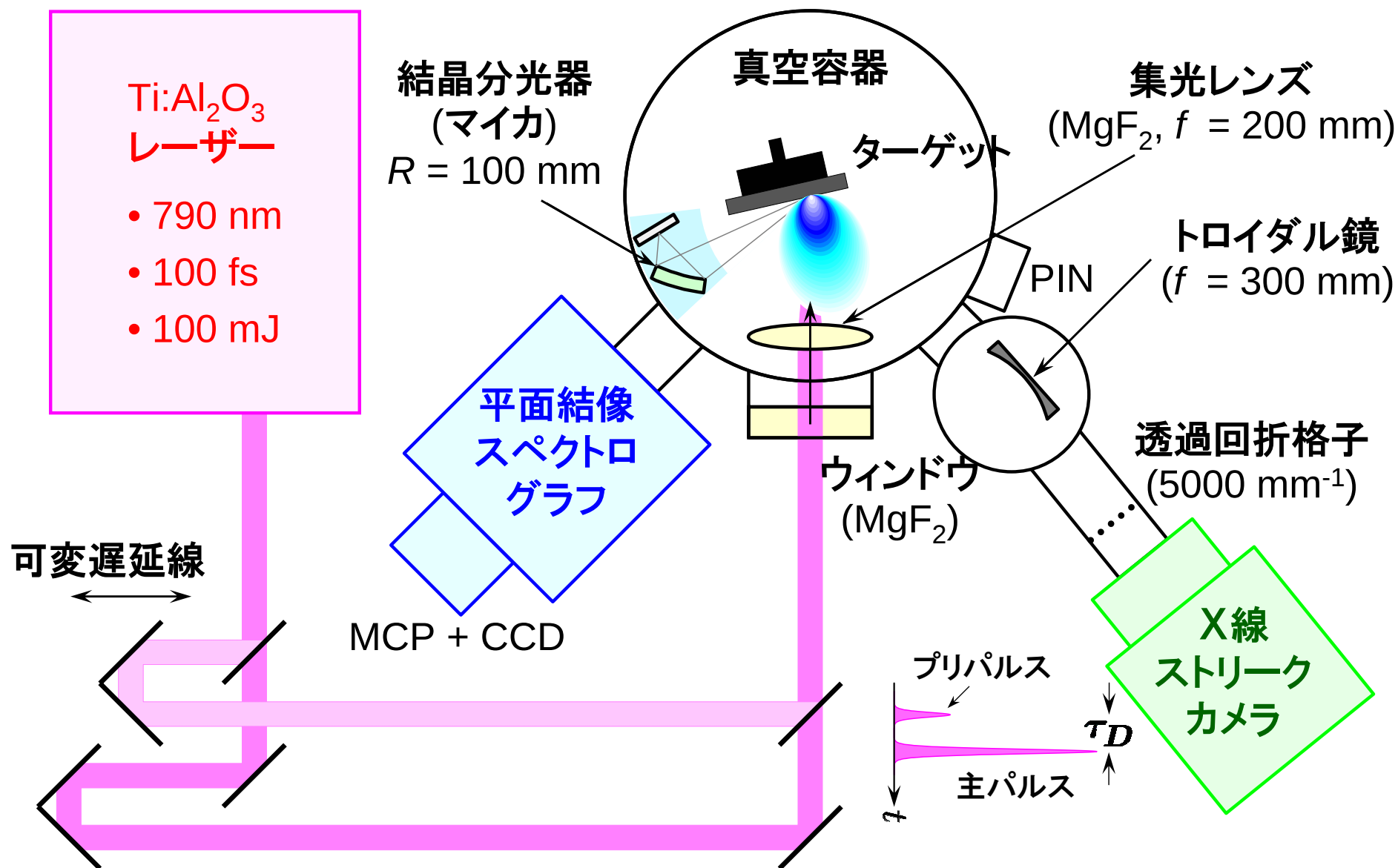
加熱部

X線発光

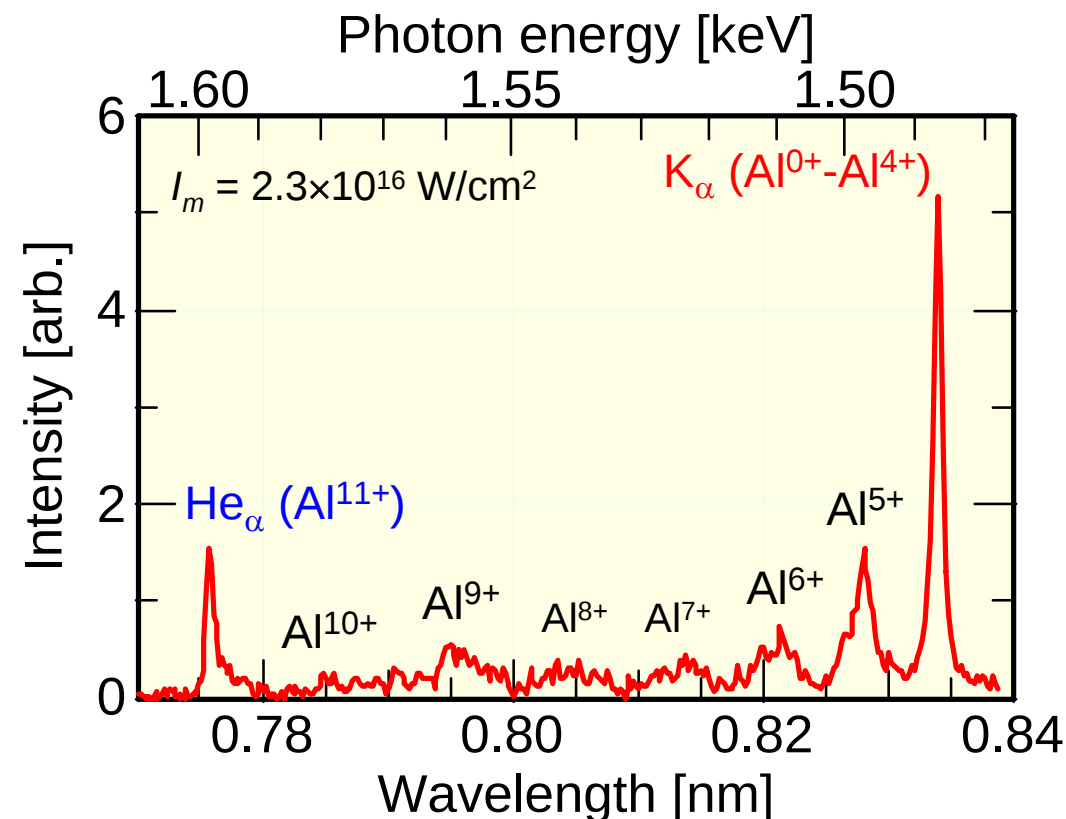
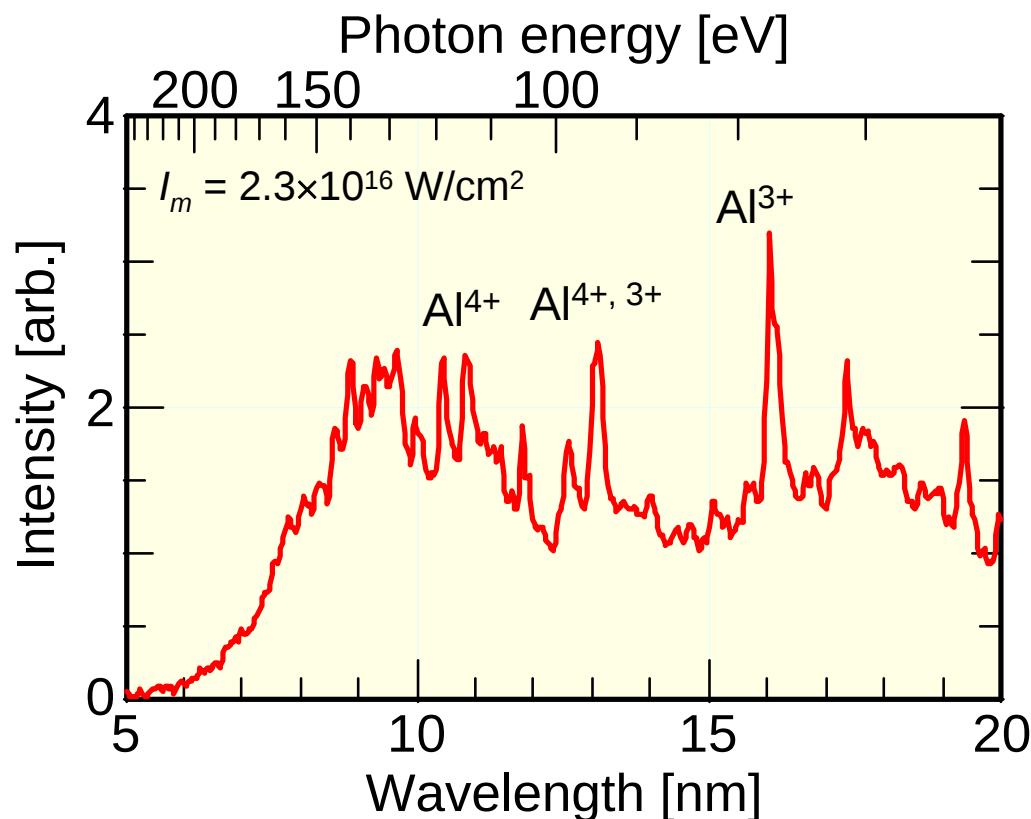
空間分布
スペクトル
パルス波形
変換効率



レーザープラズマX線計測用実験系



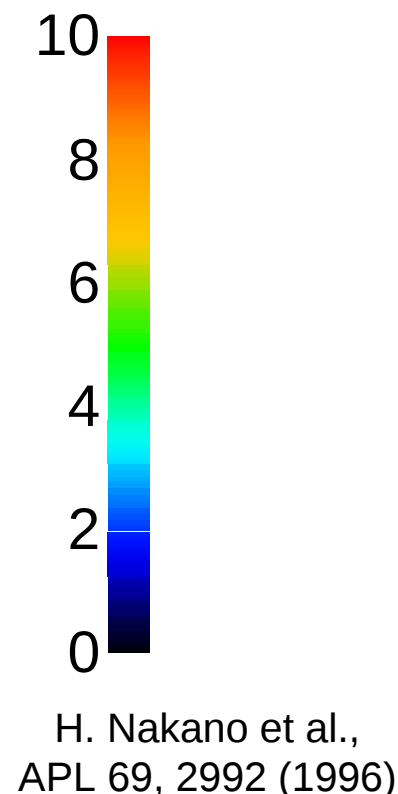
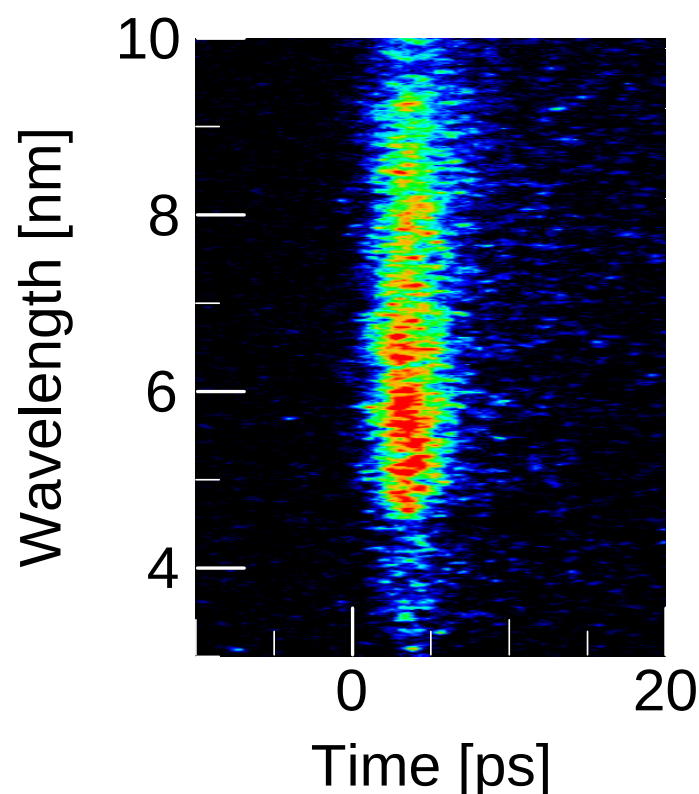
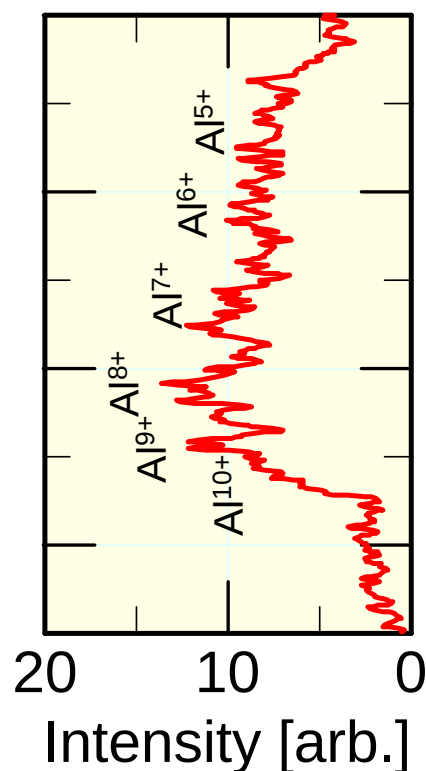
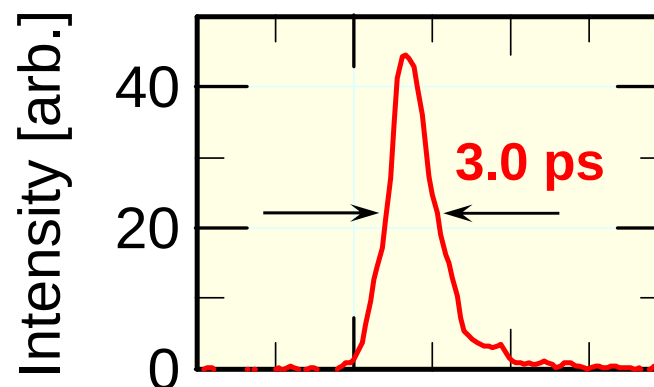
100 fs レーザーパルスによって生成された AlプラズマからのX線発光スペクトル



- 固体密度プラズマからの発光 ($n_e \gg n_c$)
- 低価イオン (Al⁰⁺-Al⁵⁺) からの発光が支配的
- 尖頭輝度 $> 10^{22} \text{ ph/s/mm}^2/\text{sr}/0.1\% \text{ BW @14 nm}$
 - ◆ パルス幅 ~ ps、光源サイズ ~ レーザーのスポットサイズ。

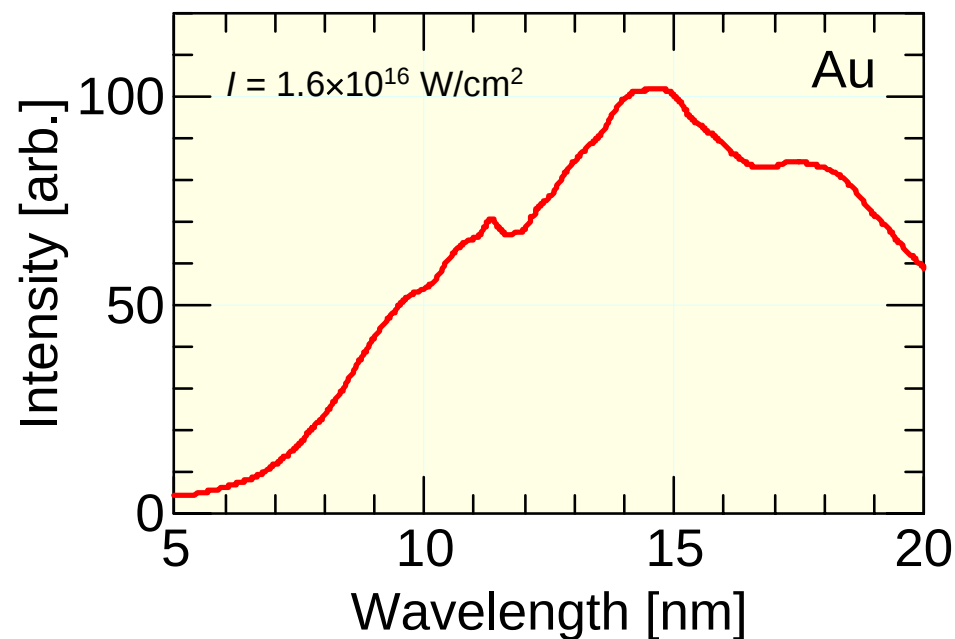
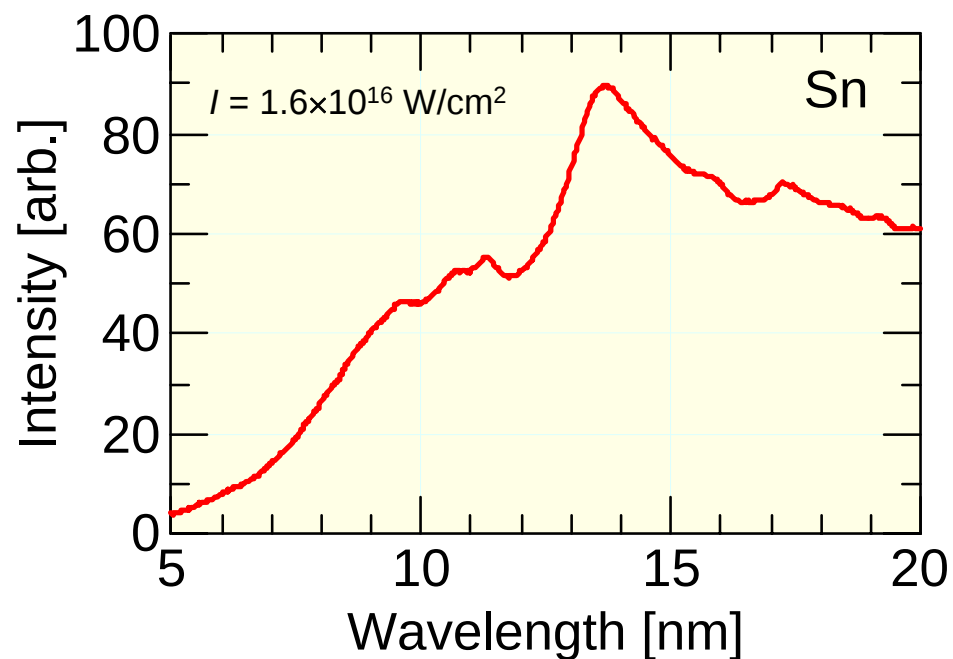
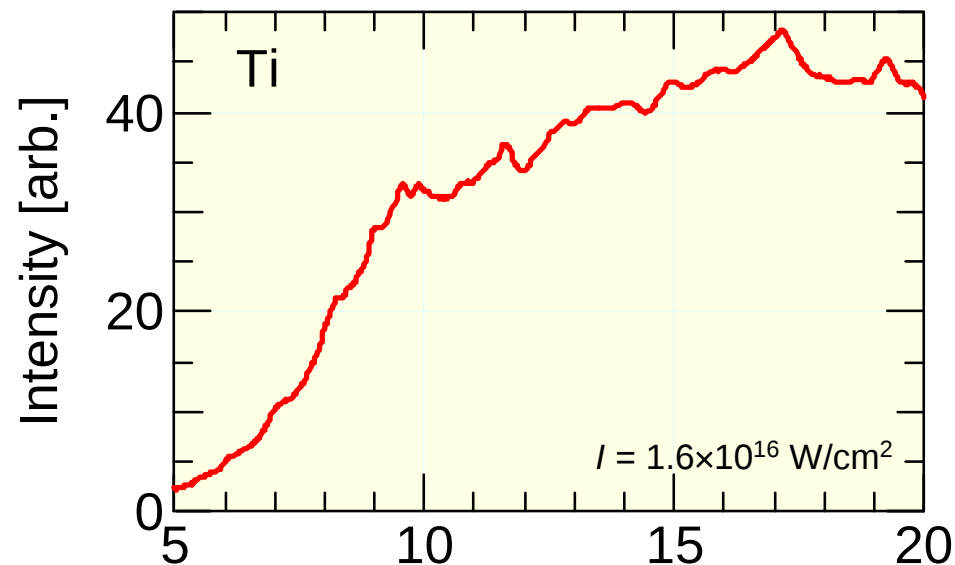
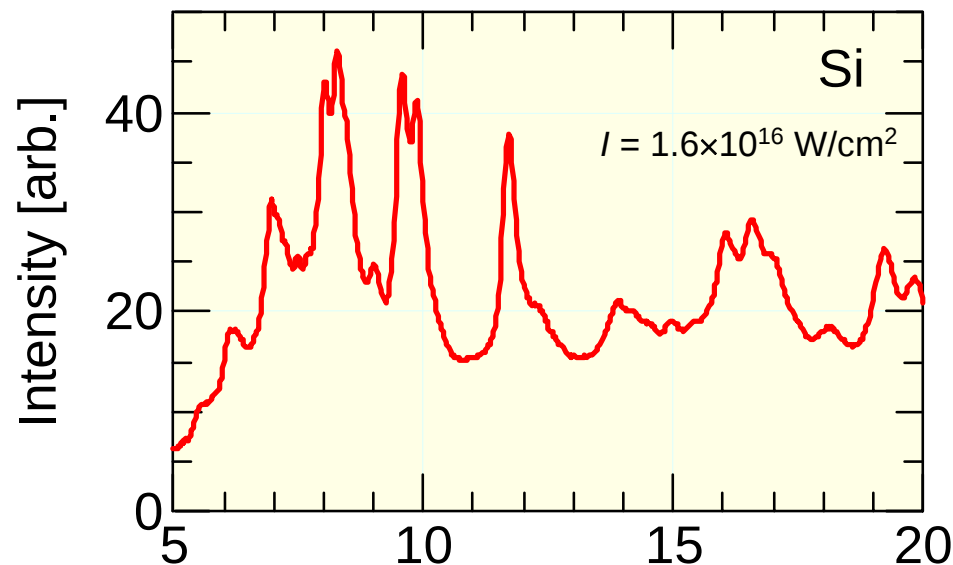
100 fs レーザーパルスによって生成された Alプラズマからの軟X線発光の時間発展

1- μm Al on Si wafer
 $I_m = 1.6 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$

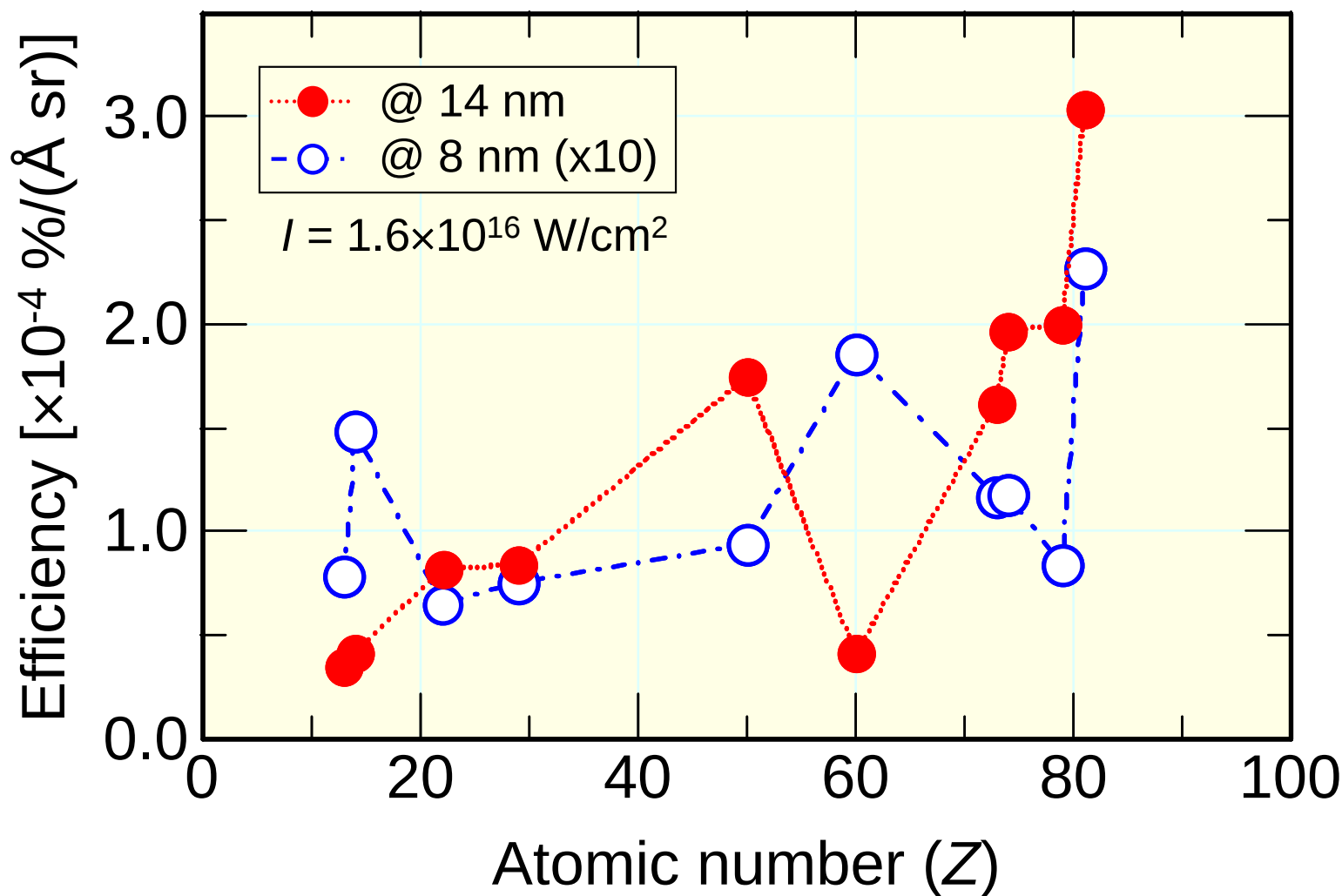


H. Nakano et al.,
 APL 69, 2992 (1996)

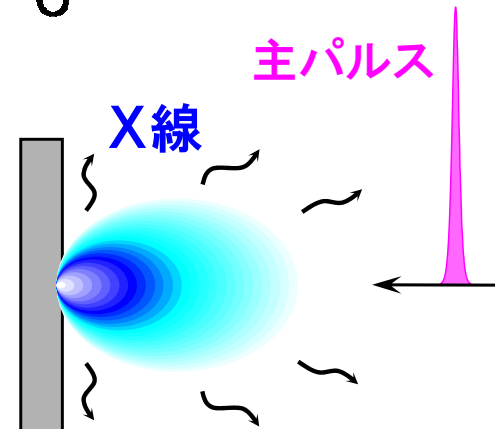
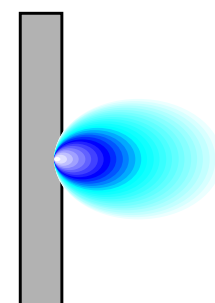
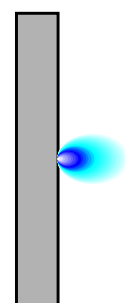
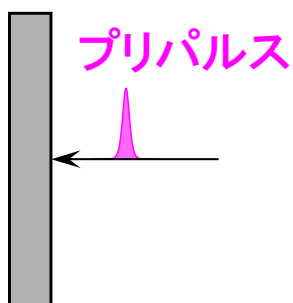
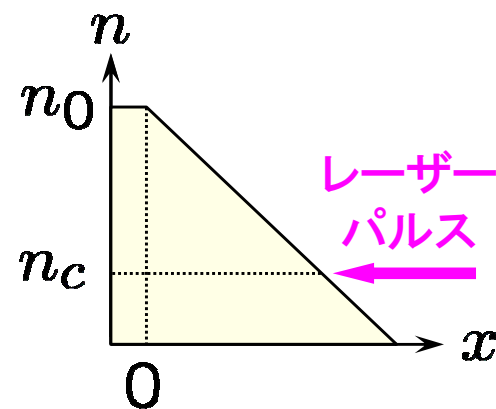
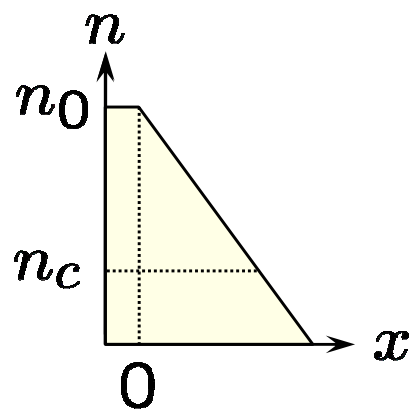
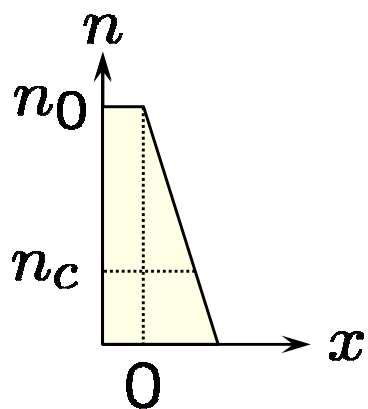
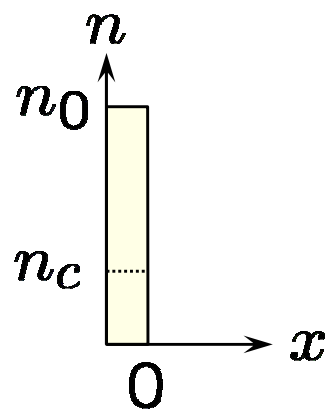
各種金属ターゲットからの 軟X線発光スペクトル



軟X線発生効率の原子番号依存性



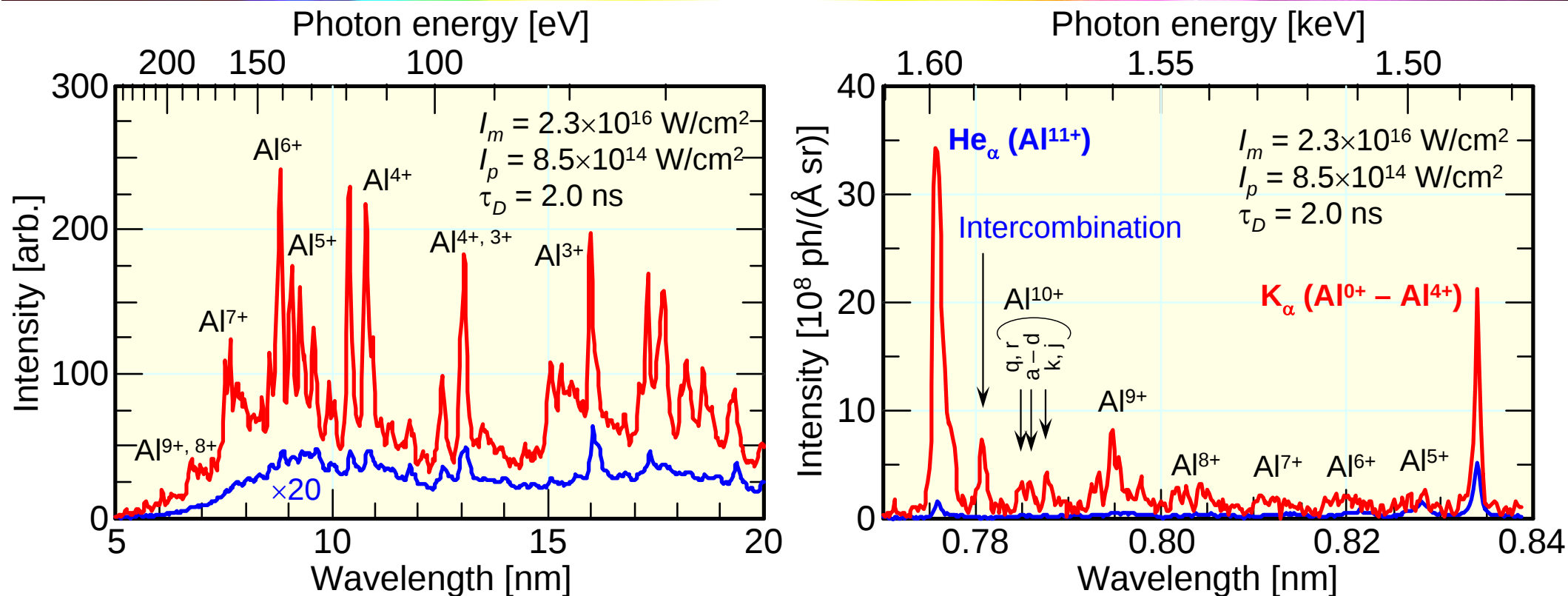
プリパルス法によるX線発生増強 — プリパルスによるプラズマ条件制御 —



プリパルス照射 → プリプラズマ生成 → プリプラズマ拡散 → 主パルス照射
プリプラズマの加熱

X線発生
(高効率、高エネルギー?)

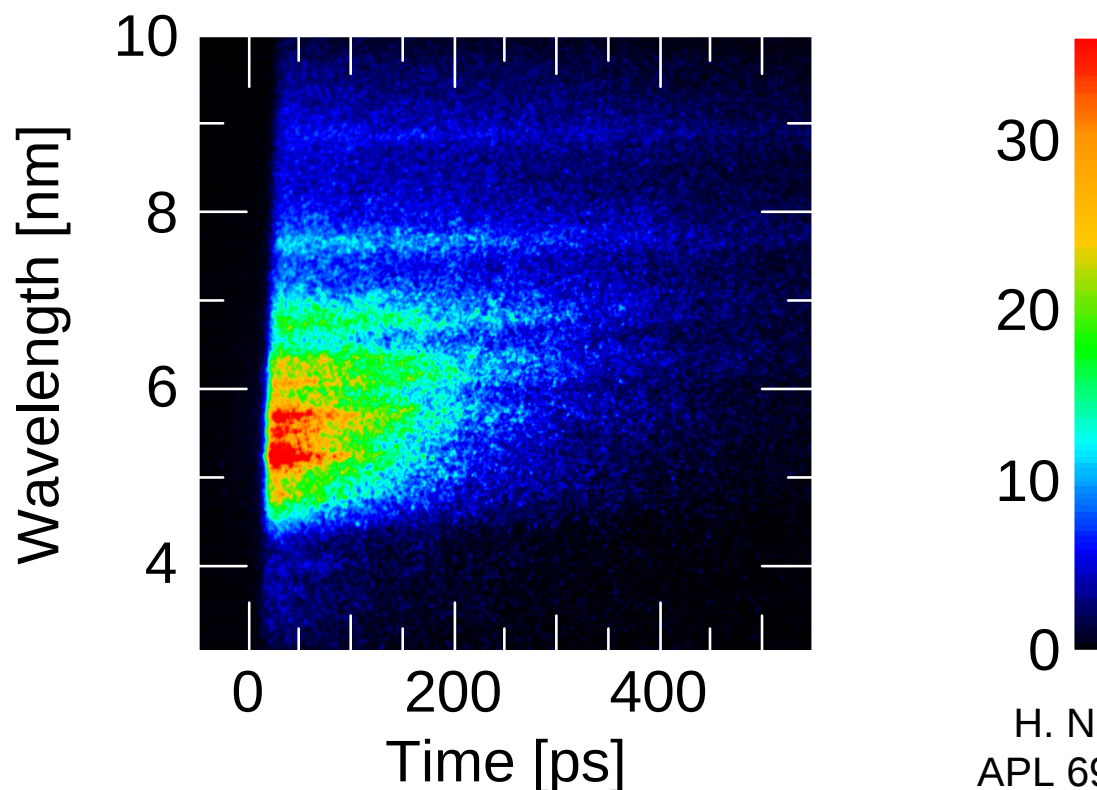
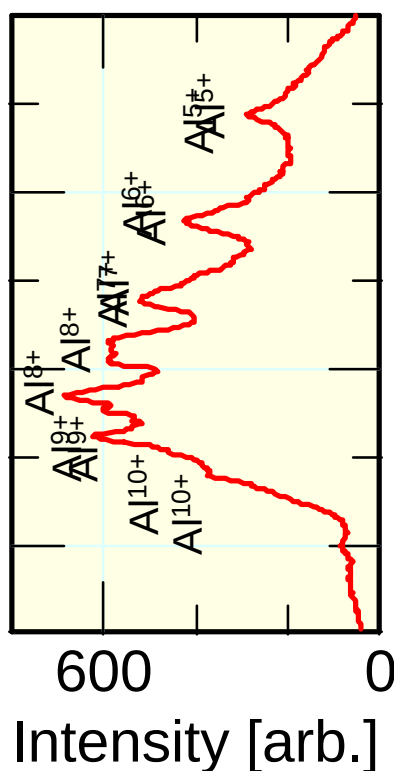
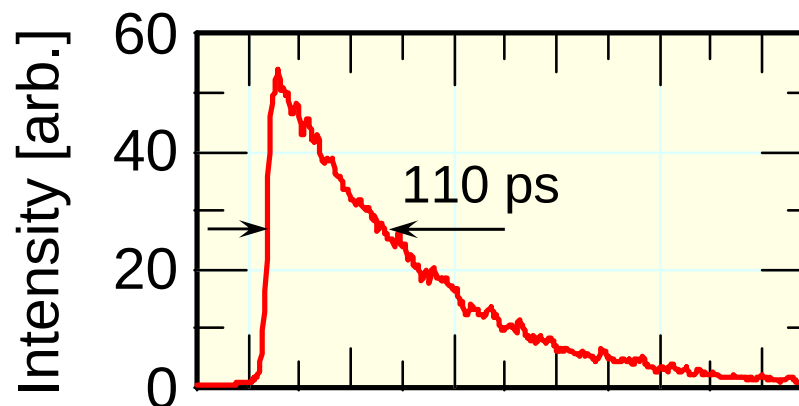
プリパルスによる AlプラズマからのX線発生量向上



- (輝線)発光量の増大 ($> \times 30-100$)
- 臨界密度近傍からの発光 ($n_e \sim n_c$)
- $\text{Al}^{6+}-\text{Al}^{10+}$ イオンからの発光が顕著に増加
- パルス幅 ~ 100 ps @sub-keV, ~ 30 ps @keV

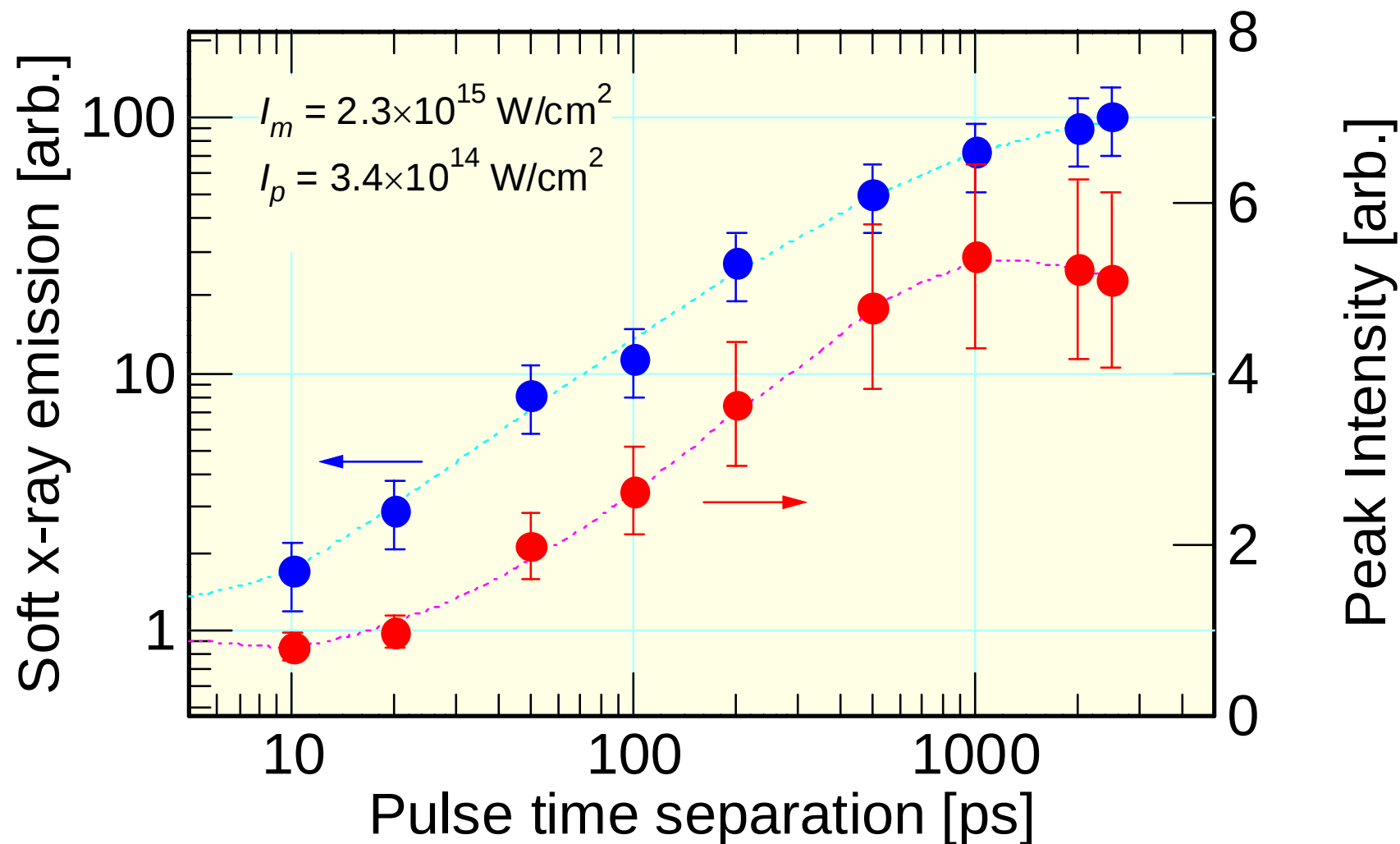
プリパルス照射時のAlプラズマからの 軟X線発光の時間発展

1- μm Al on Si wafer
 $I_m = 1.6 \times 10^{16} \text{ W/cm}^2$
 $I_p = 8.5 \times 10^{14} \text{ W/cm}^2$
 $\tau_D = 2.0 \text{ ns}$

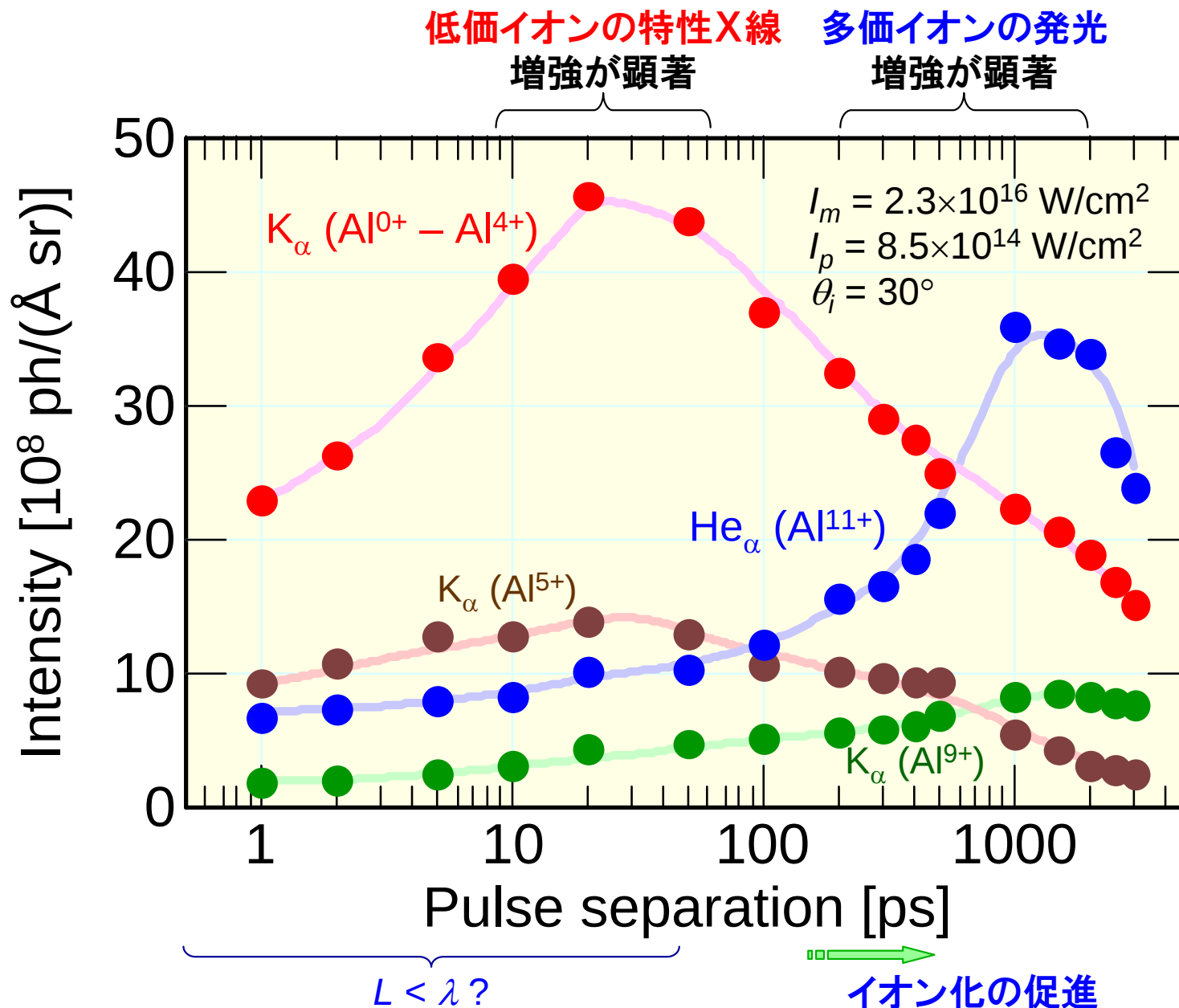


H. Nakano et al.,
 APL 69, 2992 (1996)

AIプラズマ軟X線発生量のパルス間隔依存性

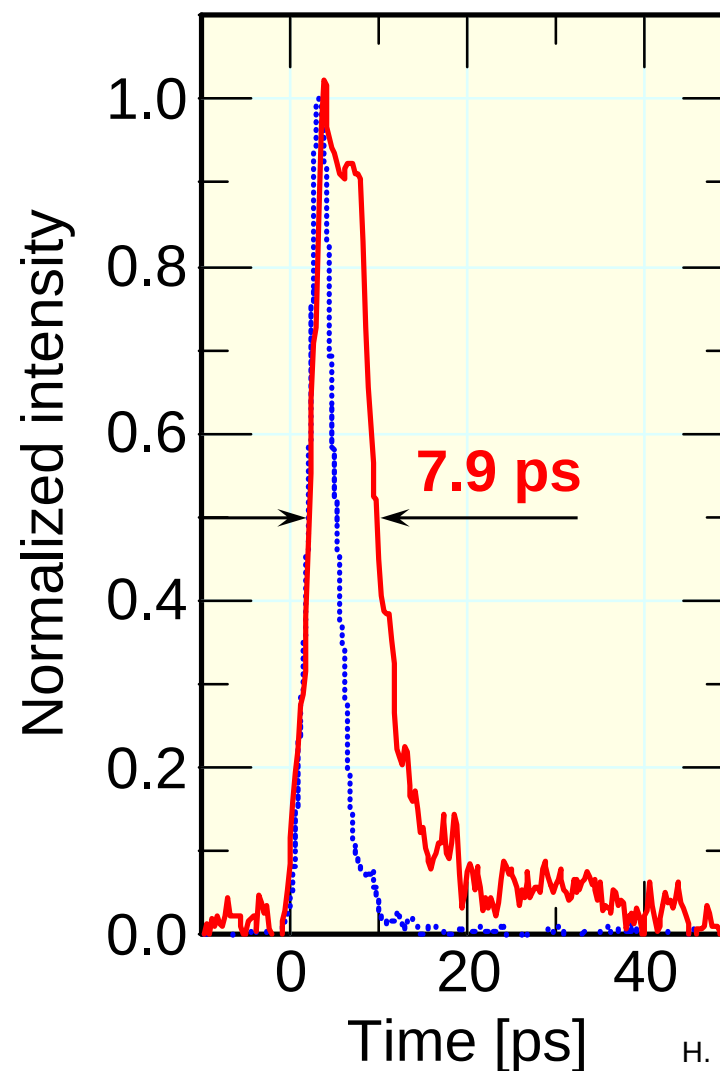
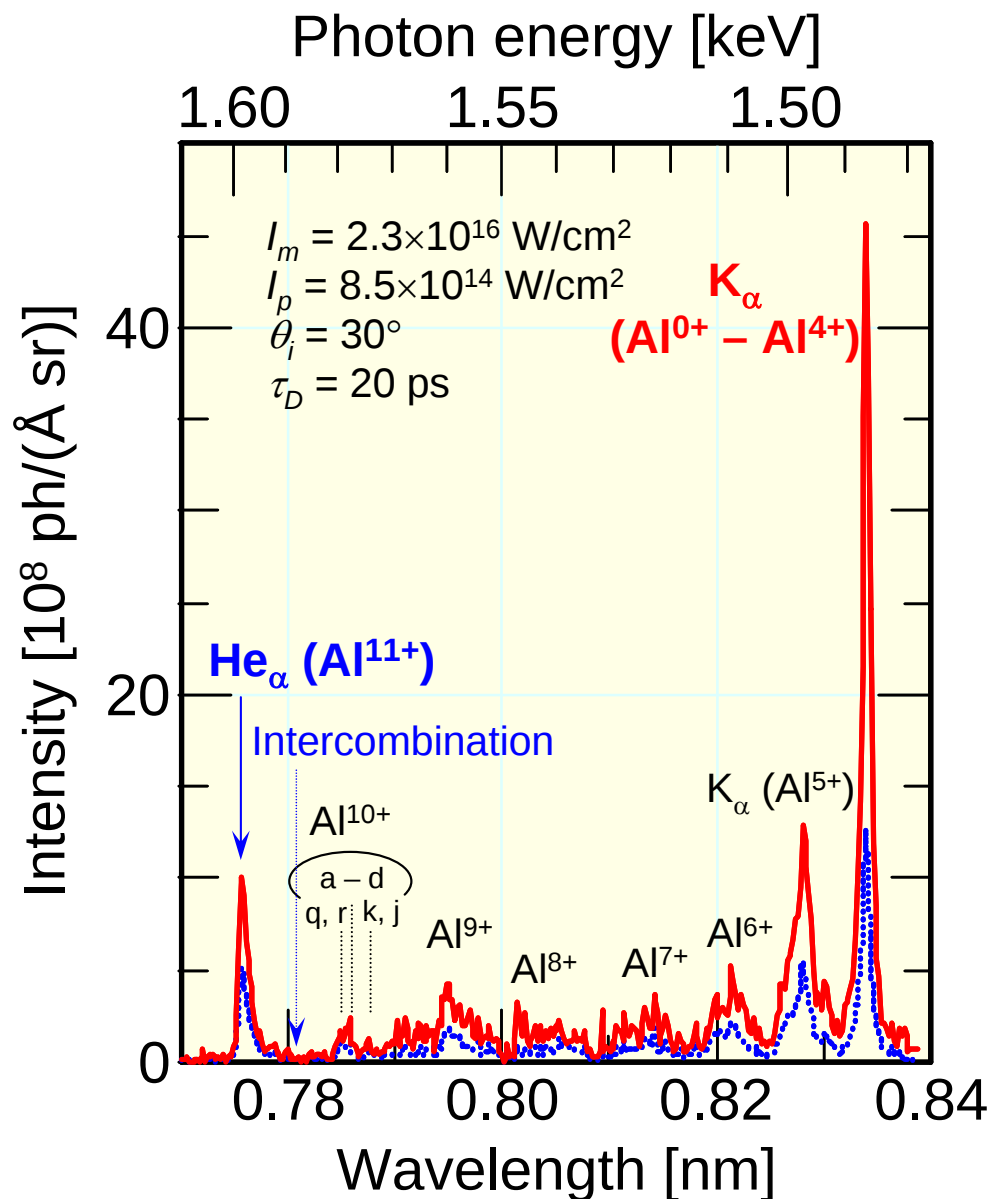


Al K殻発光強度のプリパルス位置依存性

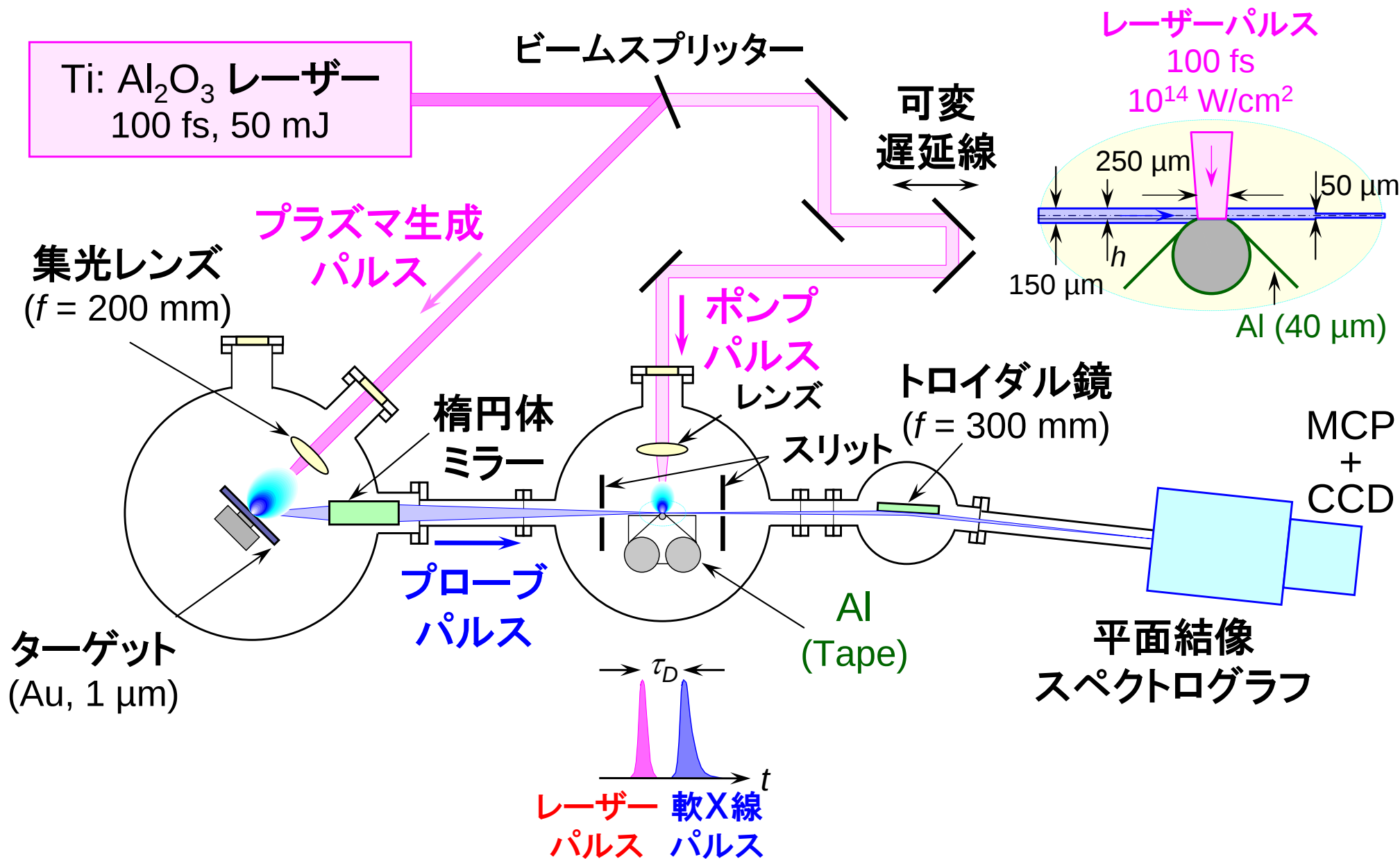


H. Nakano et al.,
APL 79, 24 (2001)
APB 79, 469 (2004)

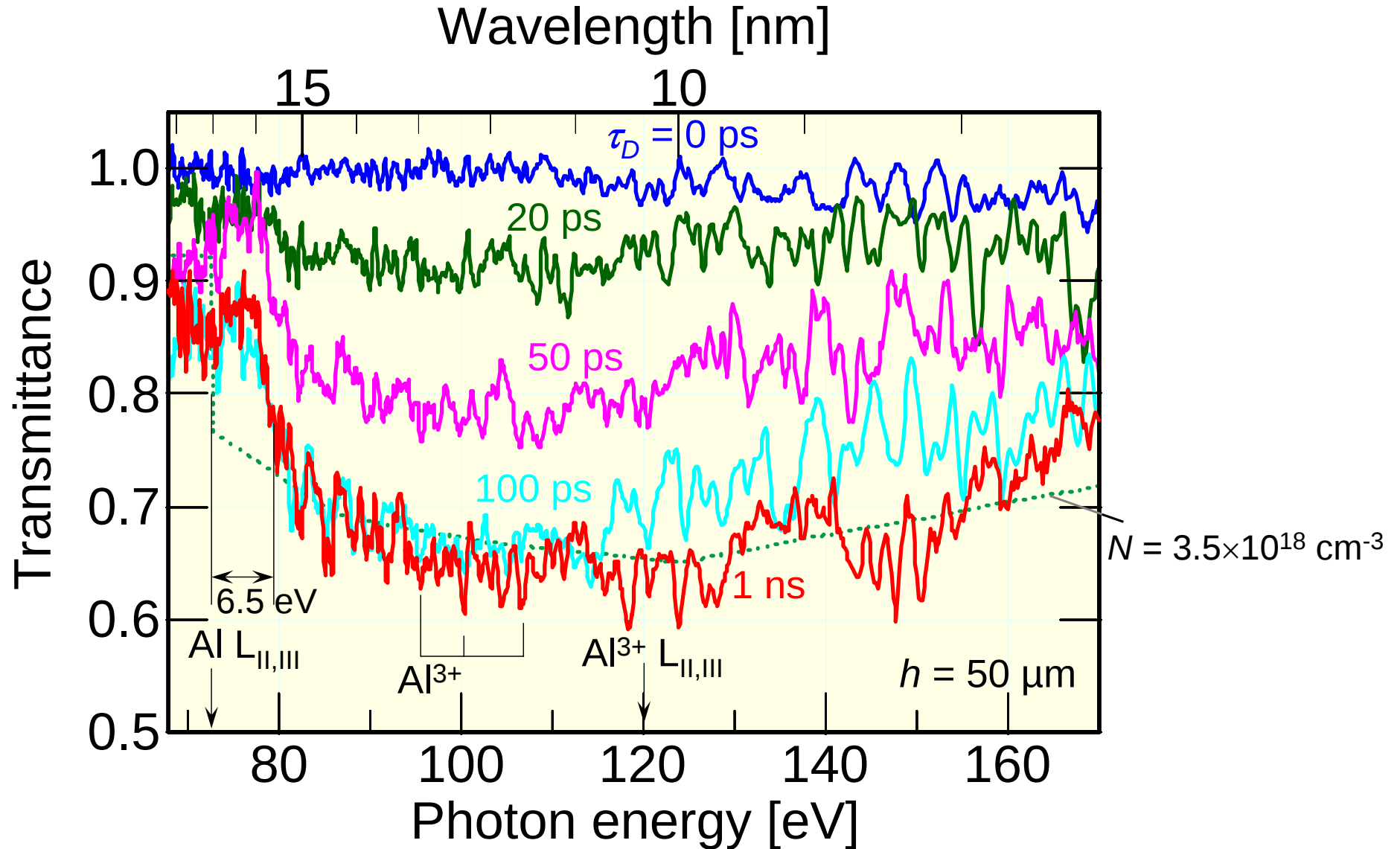
30°入射時のAl K殻発光スペクトル ならびにパルス波形



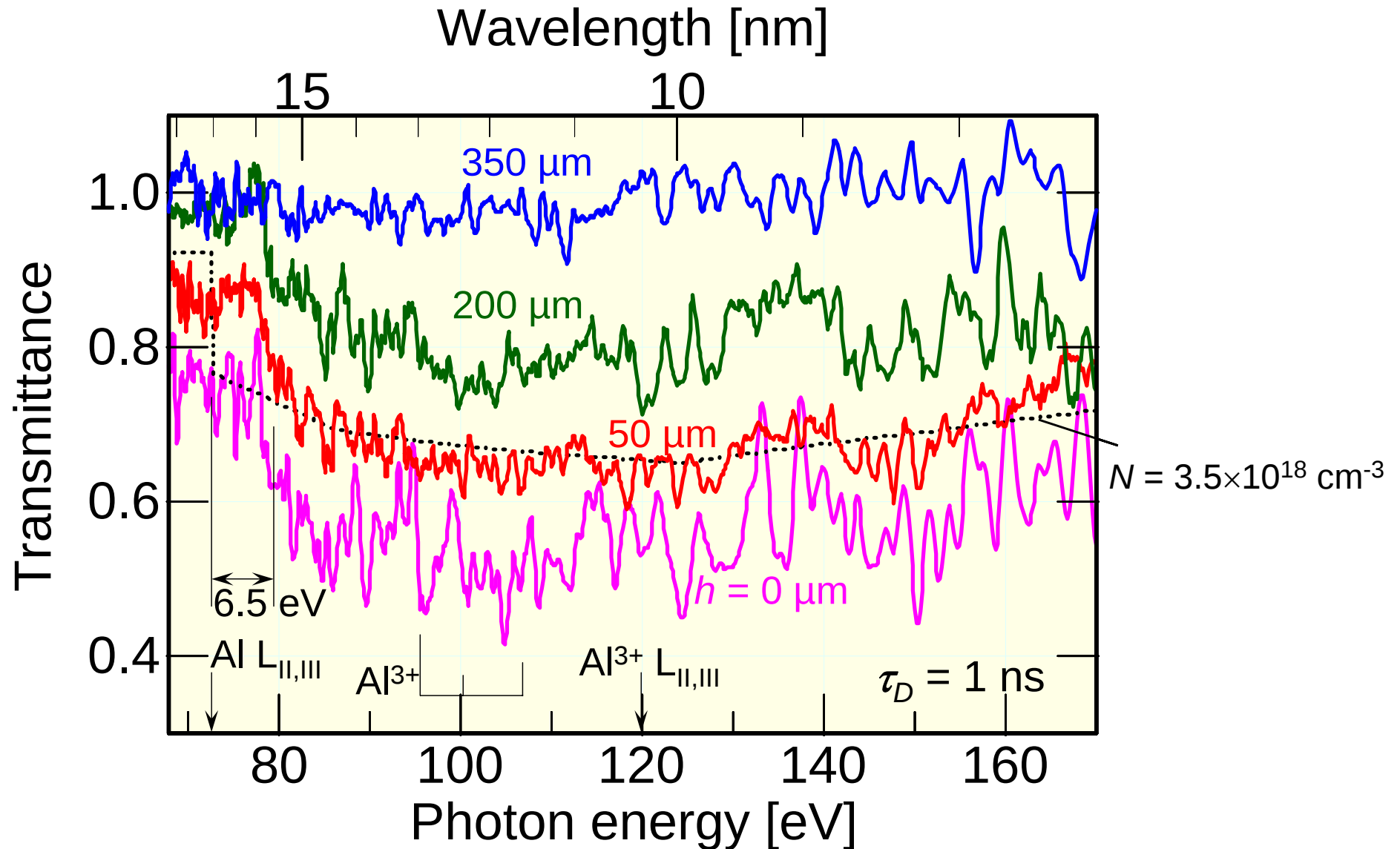
ピコ秒軟X線パルスによる Alプラズマの時間空間分解計測



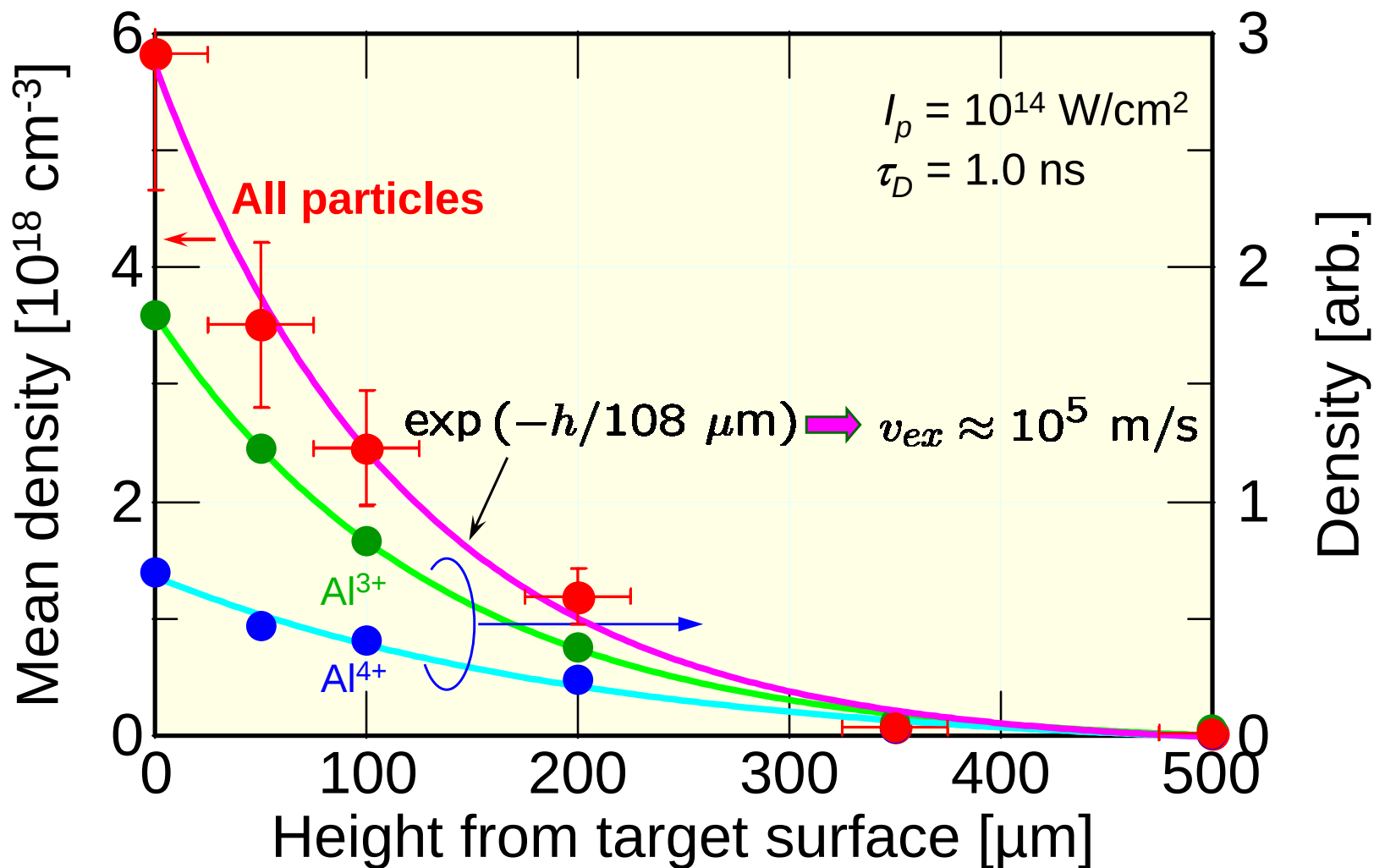
Alプラズマ透過スペクトルの時間発展



Alプラズマ透過スペクトルの空間分布



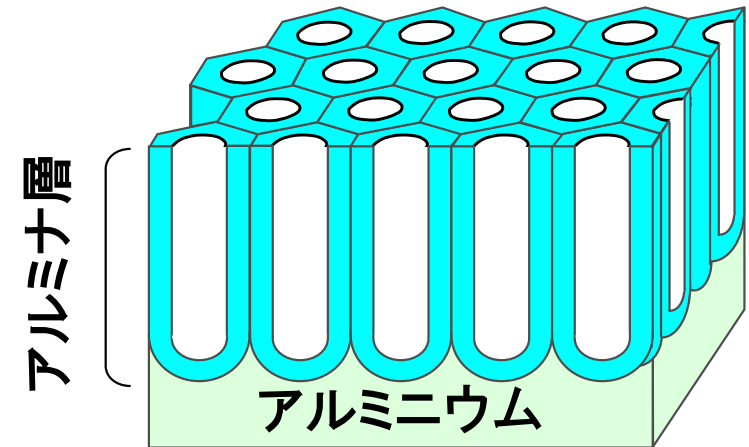
飛散粒子密度の空間分布



微細構造ターゲットによるX線発生量の増強

変換効率の向上

- レーザパルスと固体ターゲットとの相互作用体積を拡大し、光エネルギーを有効利用するために：
 - 平均密度の低減。
 - 相互作用体積の拡大。

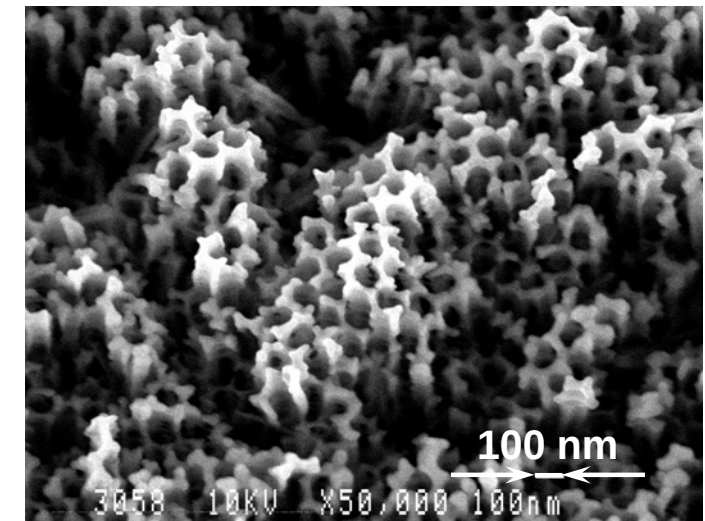


パルス幅拡大の防止

- 高い冷却速度を維持するために：
 - 高い局所密度を維持（～固体密度）。

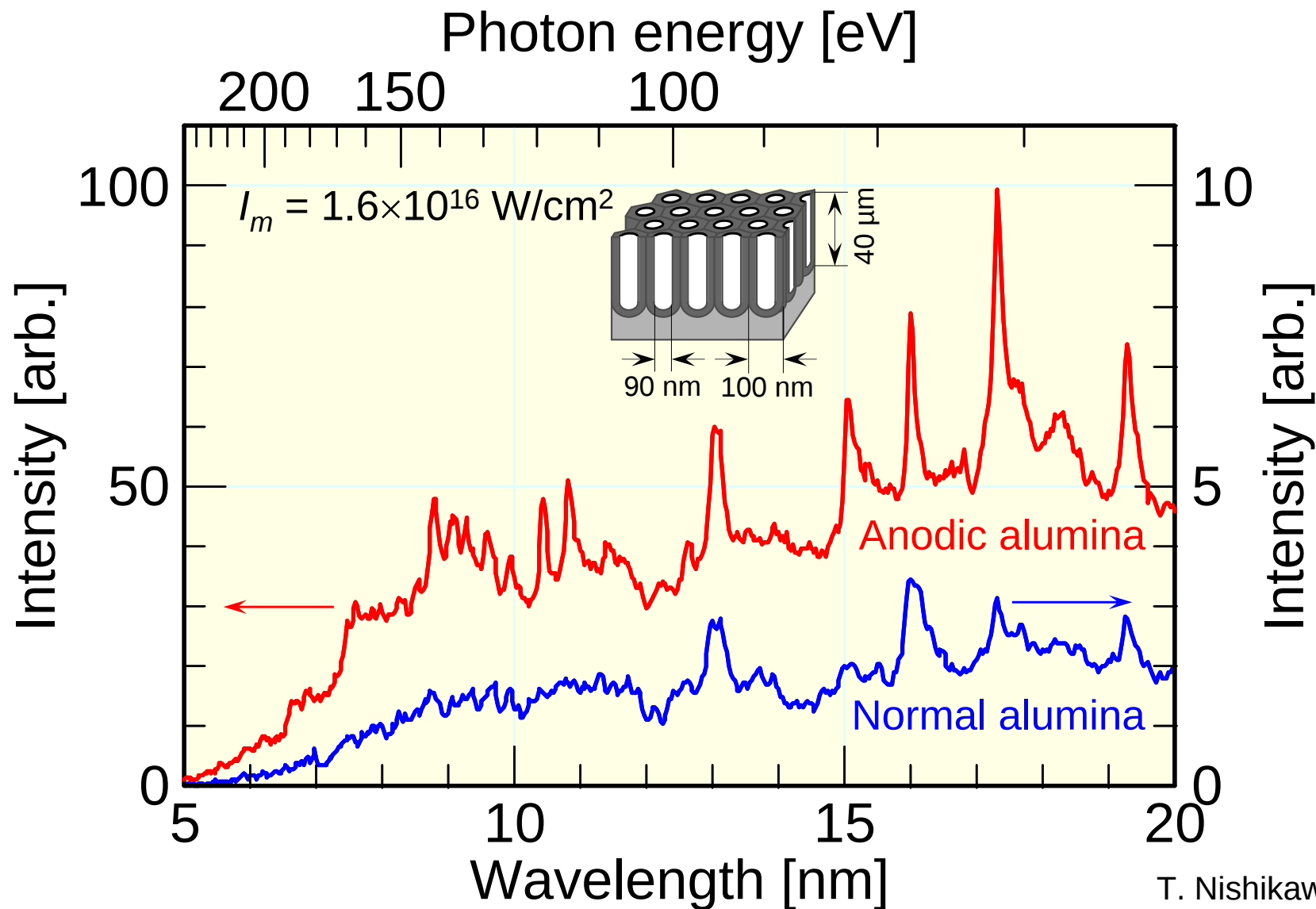


**ターゲット表面の微細構造化
(ポーラス、ナノホール、ナノシリンダ、...)**



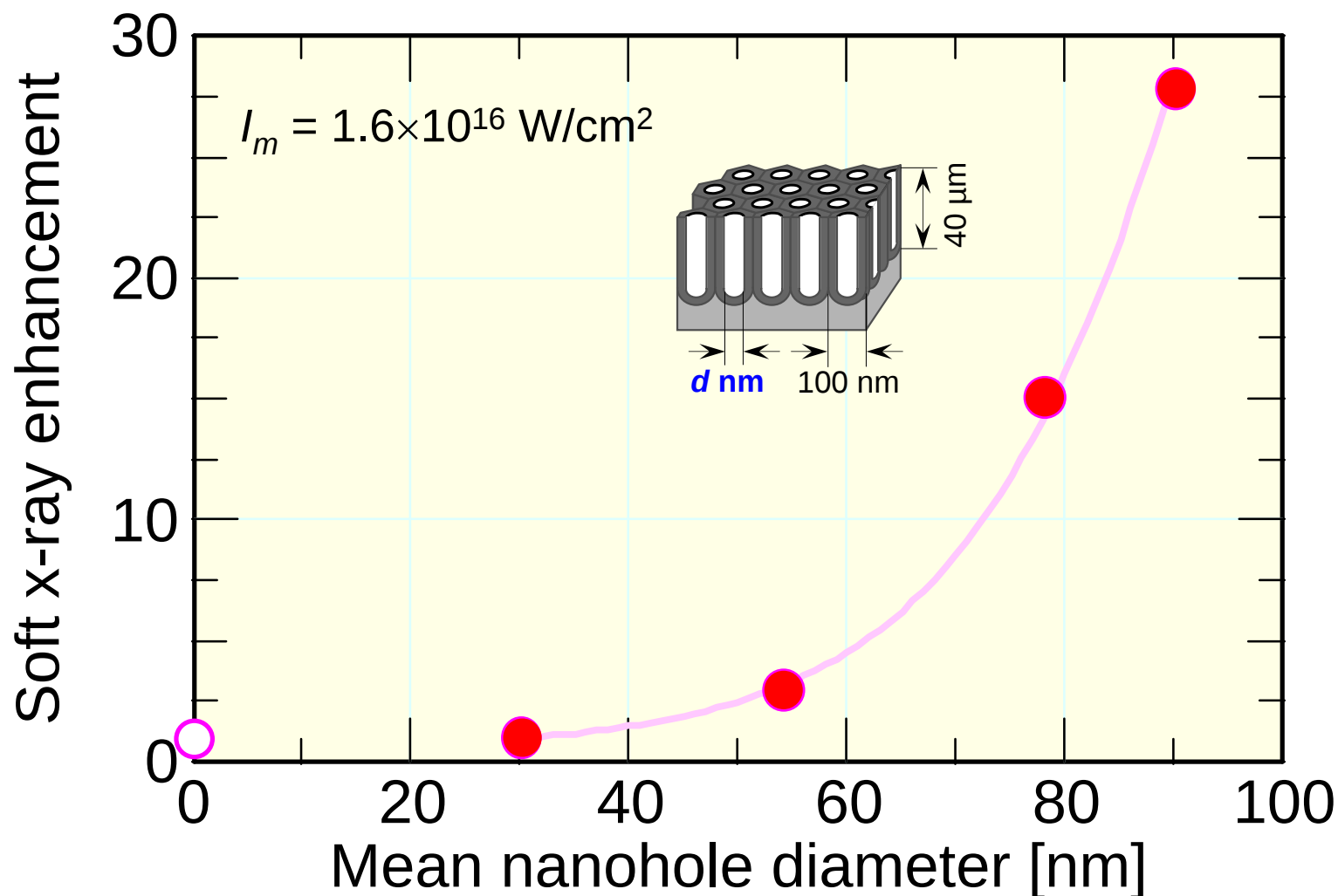
陽極酸化アルミナ表面の
走査電子顕微鏡像

陽極酸化アルミナターゲットによる 軟X線発生量の増強



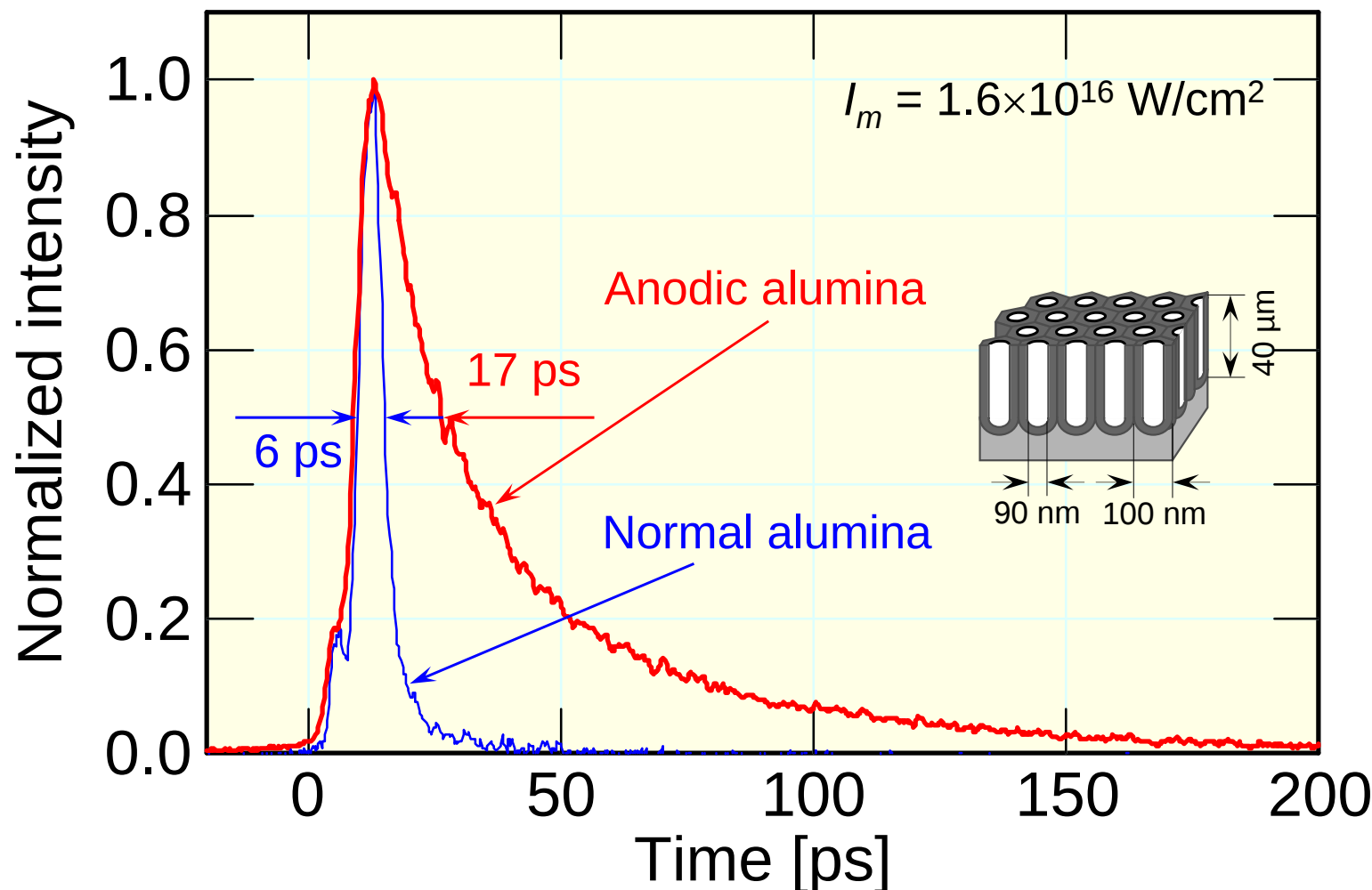
T. Nishikawa et al.,
APL 75, 4079 (1999)

陽極酸化アルミナターゲットにおける 軟X線発生量増強度のホール径依存性



T. Nishikawa et al.,
APL 75, 4079 (1999)

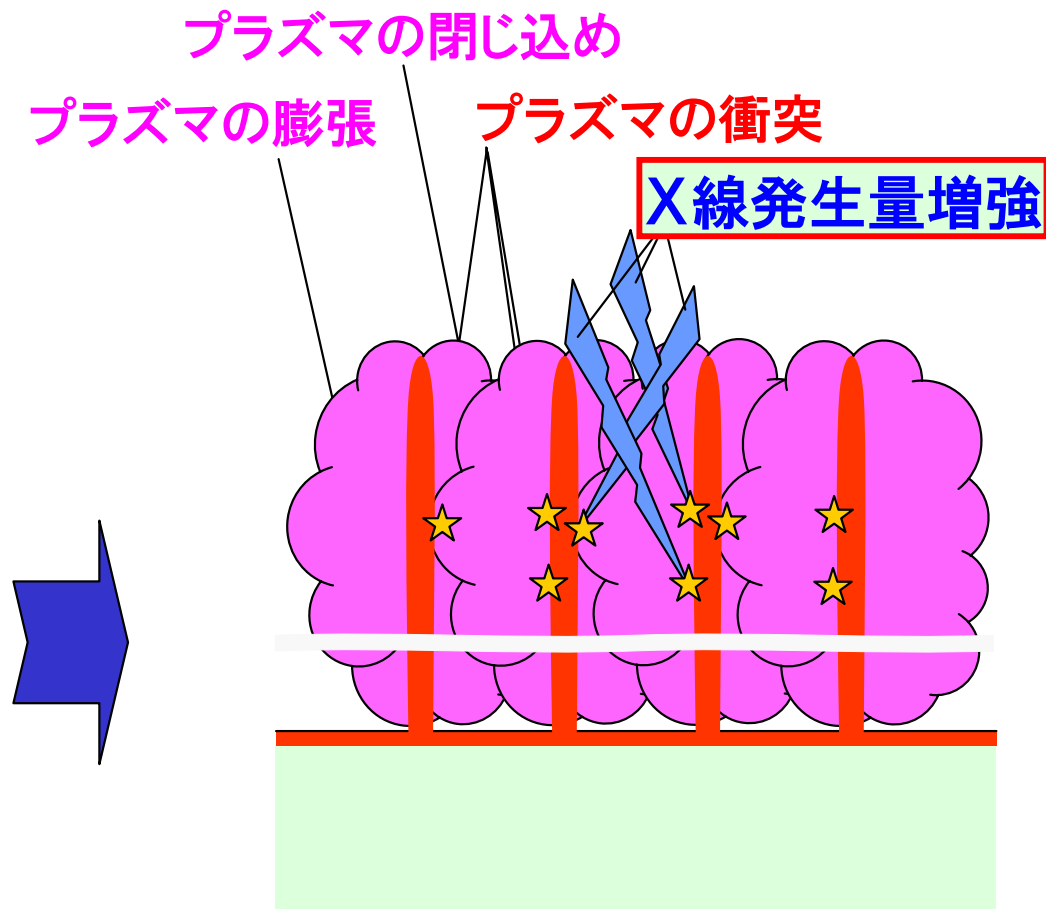
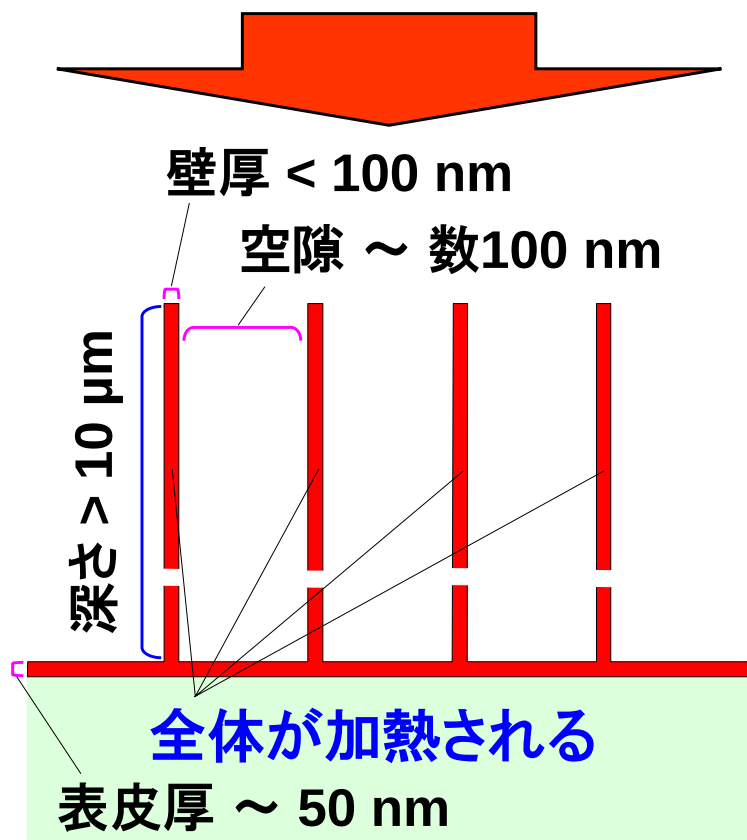
陽極酸化アルミナターゲットからの 軟X線パルス波形



T. Nishikawa et al.,
APL 75, 4079 (1999)

微細構造ターゲットによるX線発生増強機構

高強度超短パルスレーザー光入射



大きな増強効果を得るためのナノ構造サイズ条件

ナノ構造壁厚: 100 nm 以下

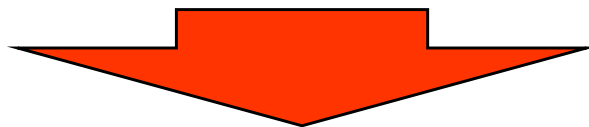
ナノ空隙: 100 ~ 1000 nm

ナノ構造深さ: 10 μm 以上

カーボンナノチューブターゲットの利用

■ 大きな増強効果を得るためのナノ構造サイズ条件

- ナノ構造壁厚: 100 nm 以下
- ナノ空間サイズ: 100~1000 nm
- ナノ構造深さ: 10 μm 以上



■ 垂直配向多層カーボンナノチューブターゲットの利用

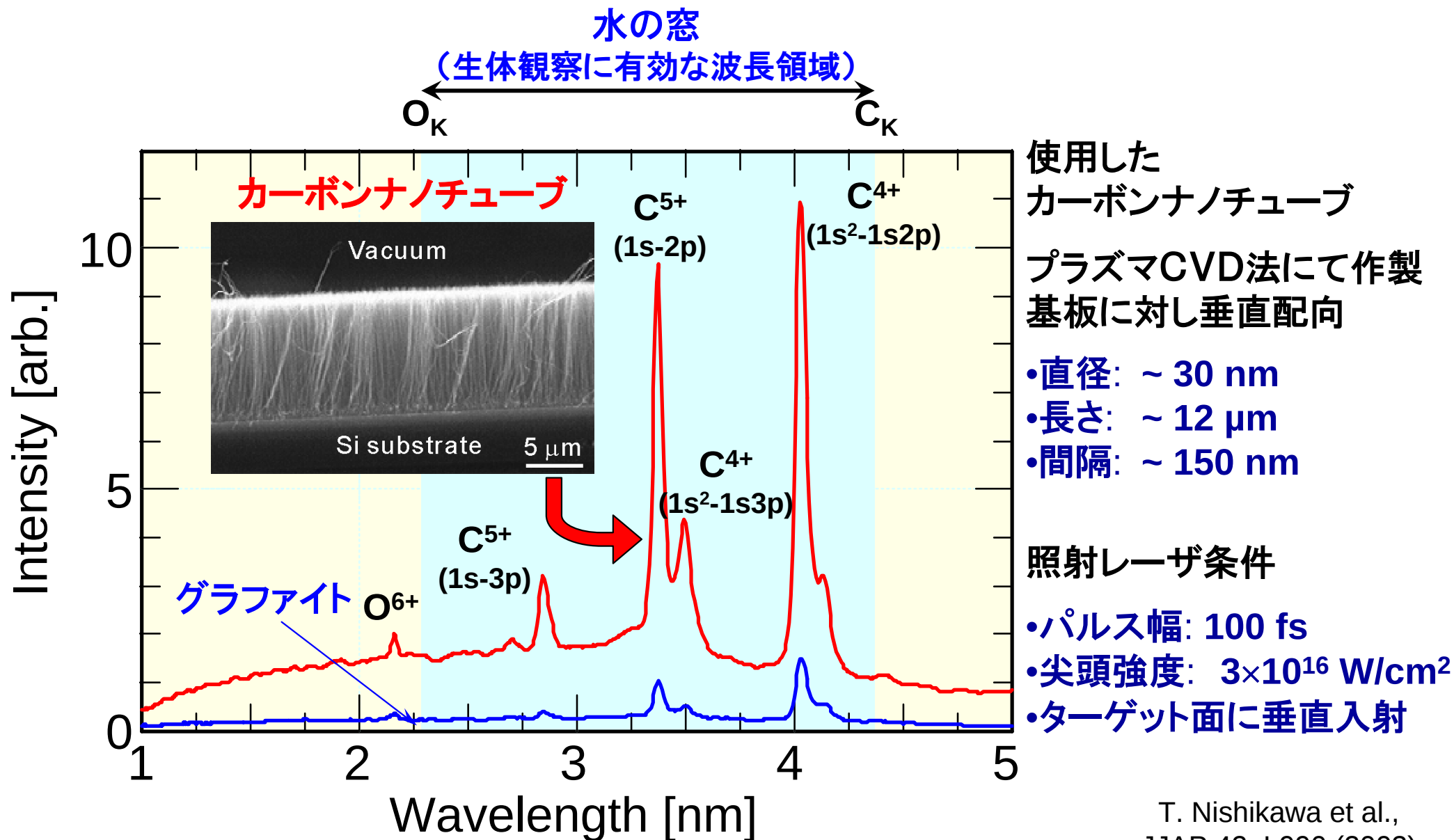
- 上記ナノ構造サイズ条件を満たす
- カーボンの水の窓領域に強い遷移線を有する



生体観察光源に利用可能

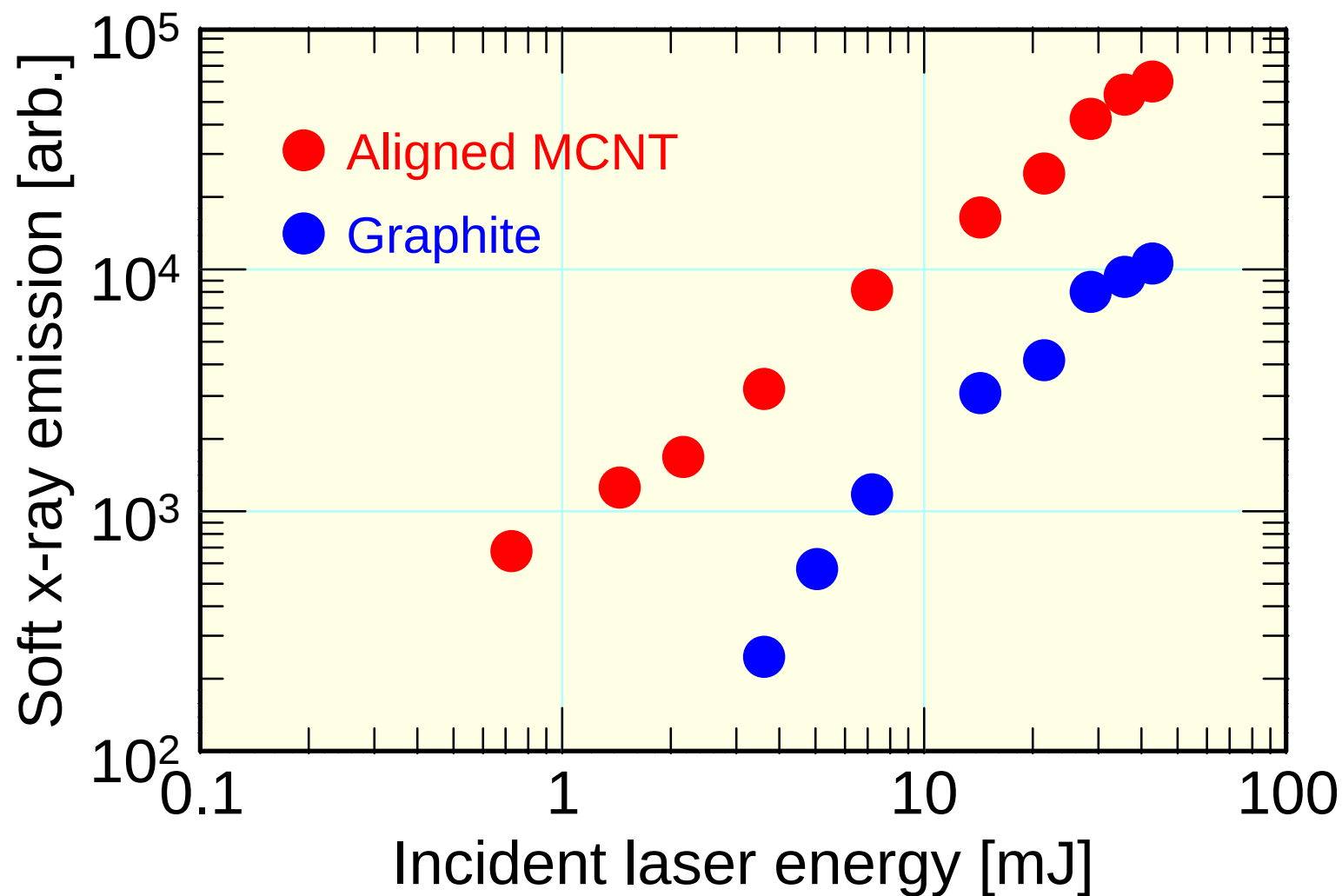
- 化学反応で作製するので大面積化が容易
- 安価での大量生産技術が開発されつつある

カーボンナノチューブによる 水の窓領域軟X線発生量の増強

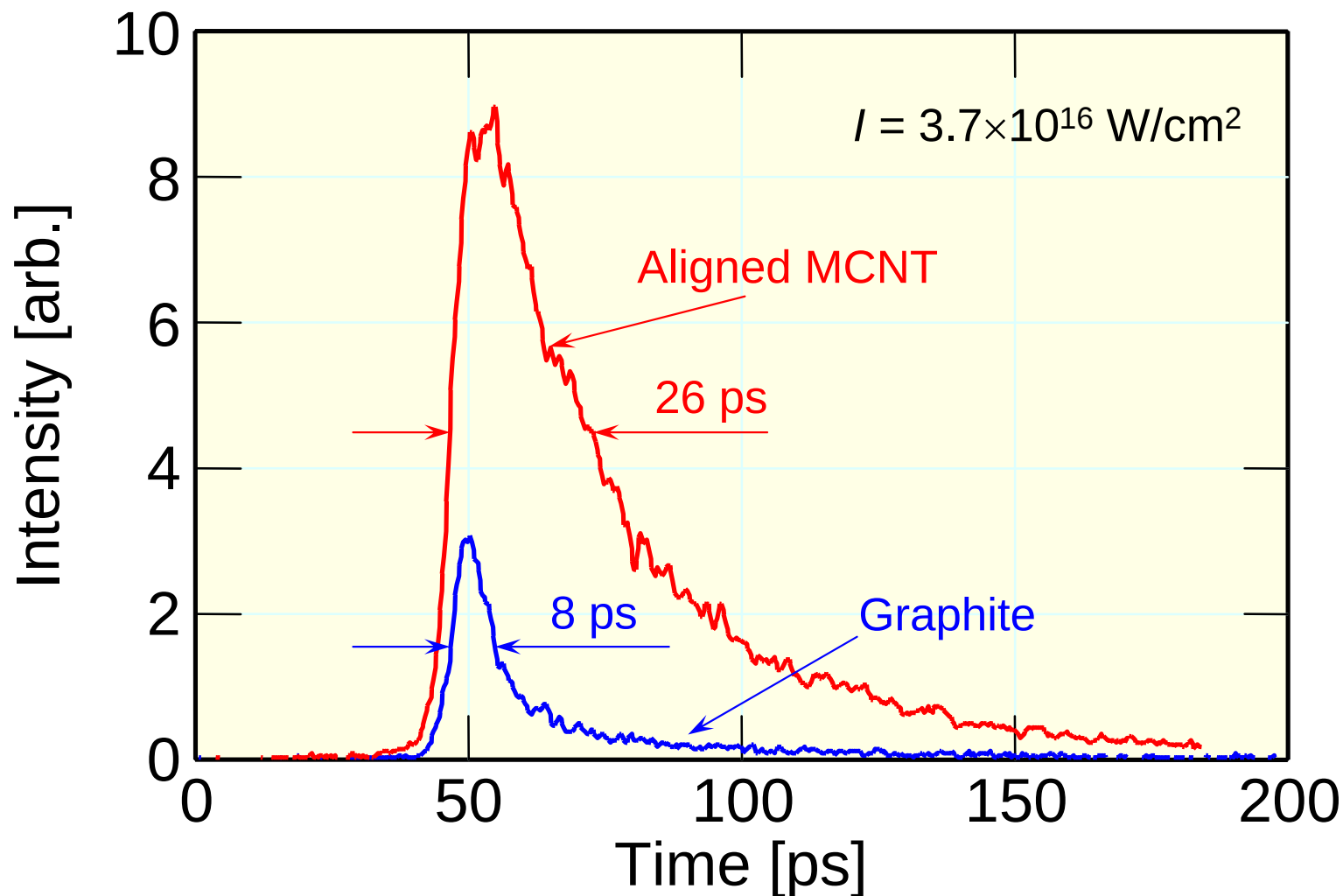


T. Nishikawa et al.,
JJAP 42, L990 (2003)

水の窓領域におけるX線強度の 入射レーザーパルスエネルギー依存性



カーボンナノチューブターゲットからの 軟X線 (0.05-1.5 keV) パルス波形



X線顕微鏡に利用した時に達成可能な イメージ空間分解能の見積もり

■ X線フルーエンス: $2 \times 10^{17} \text{ ph}/(\text{sr} \cdot \text{cm}^2)$, $2 \times 10^{12} \text{ ph}/\text{sr}$

■ 目的のイメージ空間分解能を得るためには一定量のX線吸収が必要

100 – 10 nm の空間分解能達成に必要な吸収線量 $\Rightarrow 10^4 - 10^7 \text{ Gy}$

[K. Shinohara and A. Ito, J. of Microscopy 161, 463 (1991).]

■ 密着型顕微鏡: 光源からの距離 = 0.5 cm

$10^{13} \text{ photons}/\text{cm}^2 \approx 10^4 \text{ Gy} \Rightarrow 100 \text{ nm}$ 空間分解能

■ 結像型顕微鏡: 立体角 = 0.1 msr, 反射率 = 50 %, 倍率 : 3倍

$10^{14} \text{ photons}/\text{cm}^2 \approx 10^5 \text{ Gy} \Rightarrow 50 \text{ nm}$ 空間分解能

■ X線パルス幅: 26 ps

■ X線照射に伴うサンプルの構造変化がイメージ解像度の低下をもたらす

[R. A. London, et al., Appl. Opt. 28, 3397 (1989).]

照射時間	達成可能な解像度
■ 5 ns (YAGレーザー)	$\Rightarrow 220 \text{ nm}$
■ 26 ps (本研究)	$\Rightarrow 40 \text{ nm}$

カーボンナノチューブ塗布ターゲットによる K α 線発生量増強機構

■ CNTからの水の窓領域X線発生

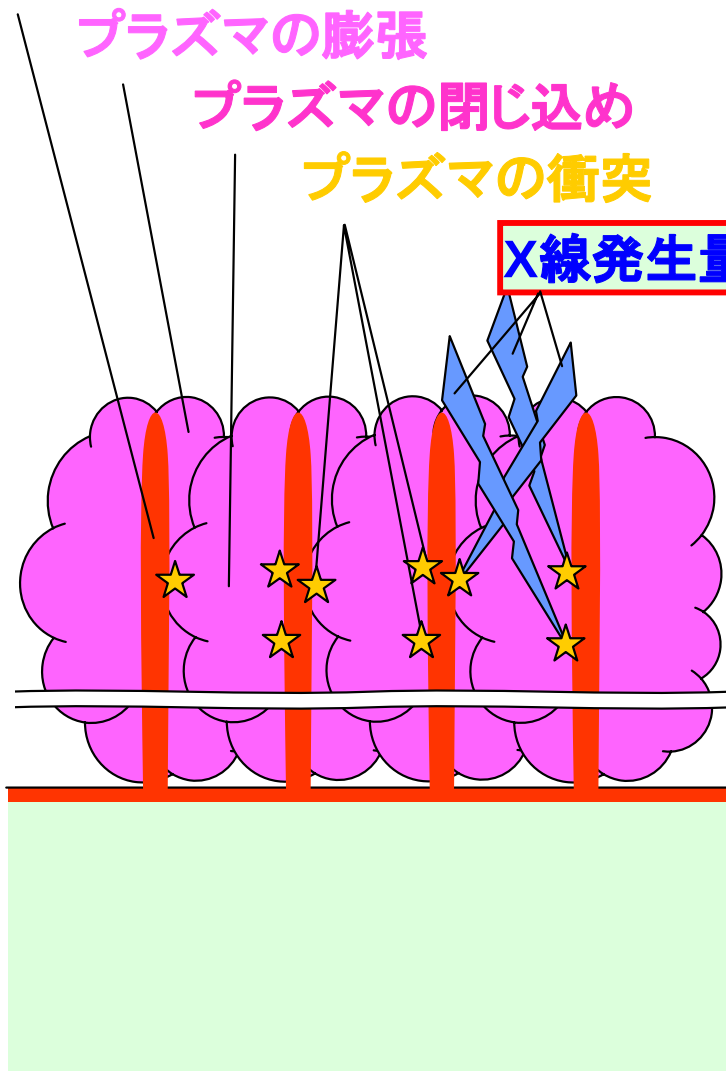
全体が加熱される

プラズマの膨張

プラズマの閉じ込め

プラズマの衝突

X線発生量増強

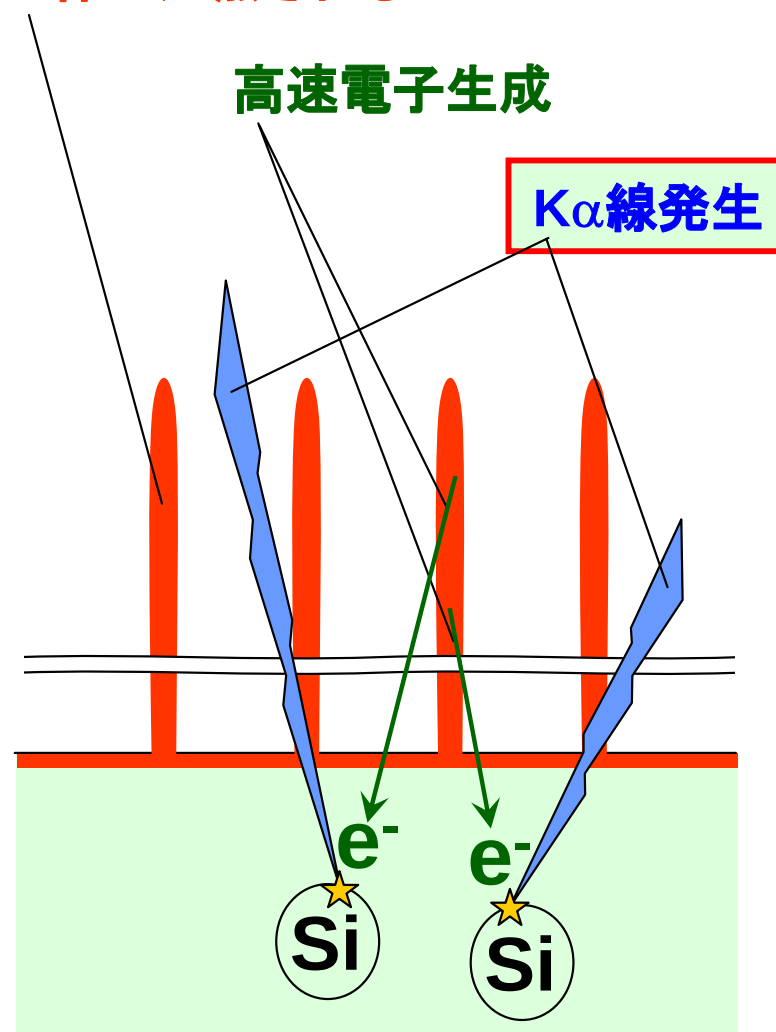


■ 基板からのK α 線発生

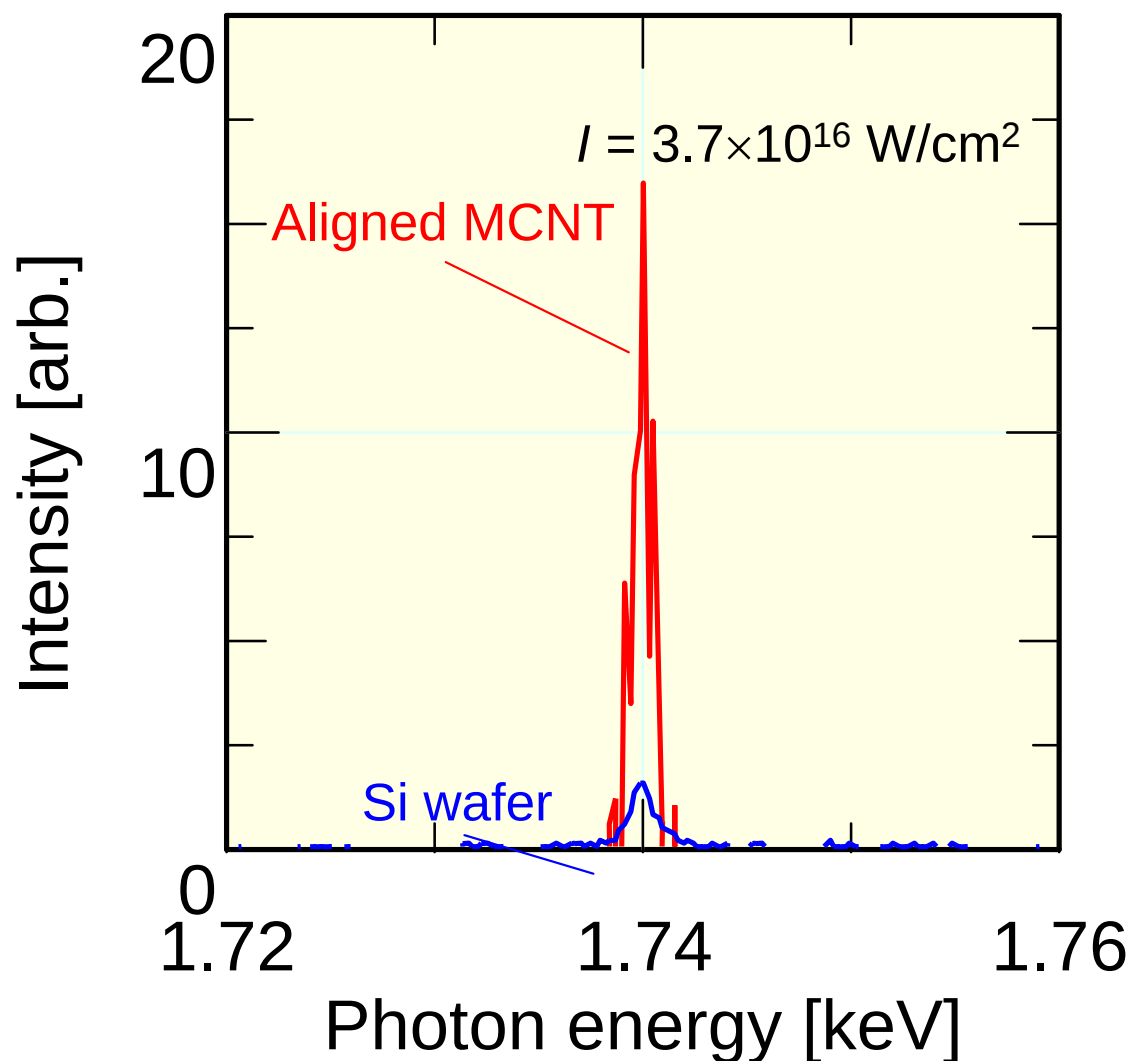
全体が加熱される

高速電子生成

K α 線発生



カーボンナノチューブターゲット基板からの SiK α 線発光スペクトル



- フェムト秒レーザー生成プラズマからのEUV、軟X線パルス発生効率向上への取り組み。
- プリパルス法： 2連パルスによるプラズマパラメータの制御。
プリパルス照射条件によるX線発光(パルス幅、発光量、...)が制御可
 - ☺ 高いX線発生量増強効果(20～100倍)
 - ☹ 著しいパルス幅の拡大
- ナノ構造配列ターゲット： ターゲット表面の微細構造化
ナノホールアルミナ、カーボンナノチューブなど
 - ☺ 相互作用領域の拡大によるX線発生量の増大(>20倍)
 - ☹ パルス幅は拡大するが、プリパルス法よりは緩和(←高い局所密度)
- 応用： 時間分解XAFS、単一露光X線顕微鏡など