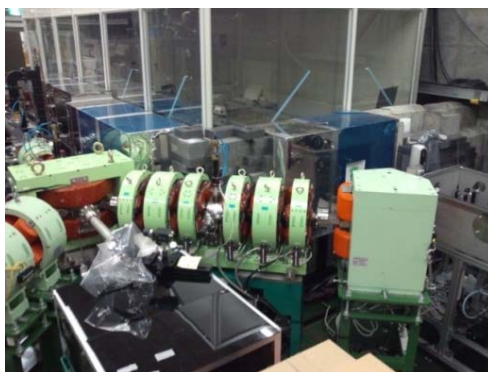


超短パルス電子ビームの発生・計測およびその利用

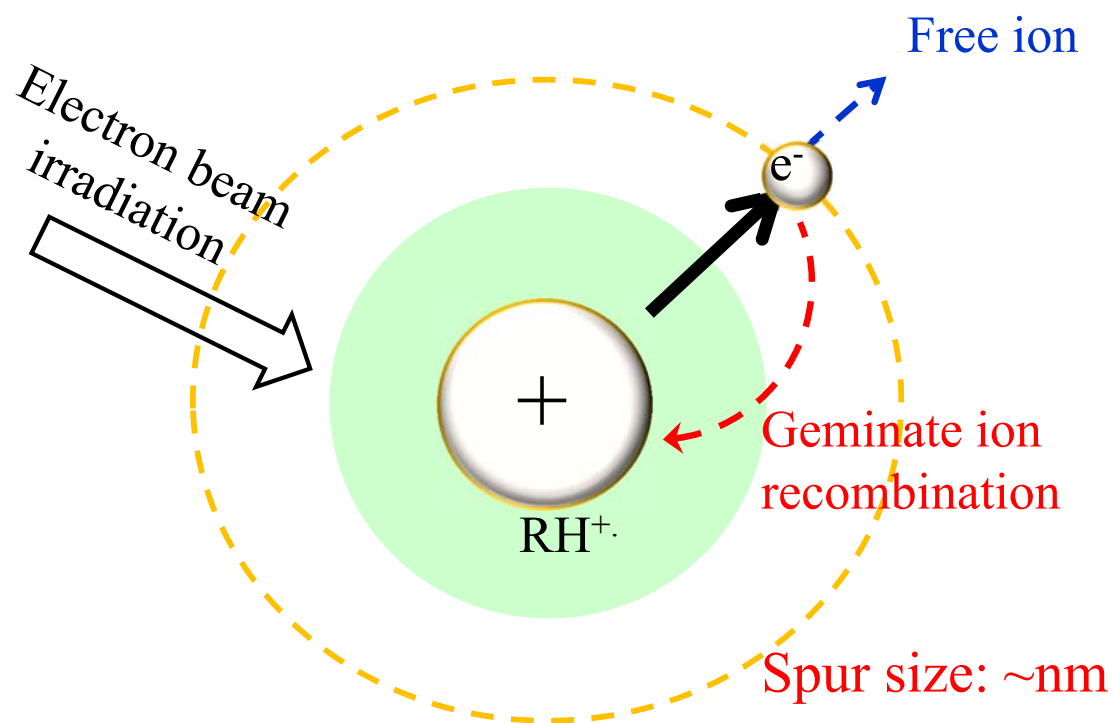


大阪大学 産業科学研究所

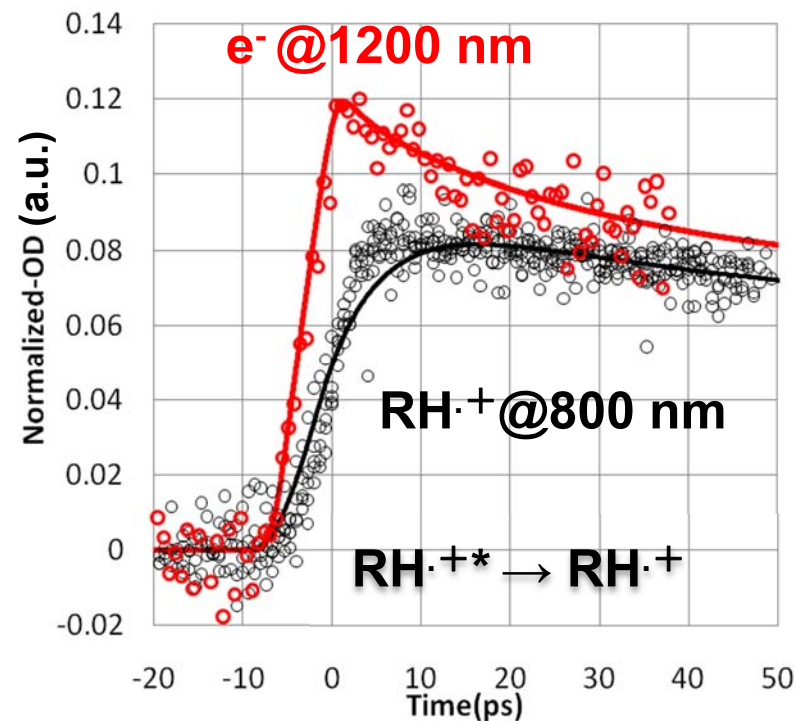
菅晃一、楊金峰、小方厚、近藤孝文、神戸正雄、

野澤一太、樋川智洋、法澤公寛、小林仁、吉田陽一

超短パルス電子ビームを用いた反応解析



量子ビーム誘起超高速反応

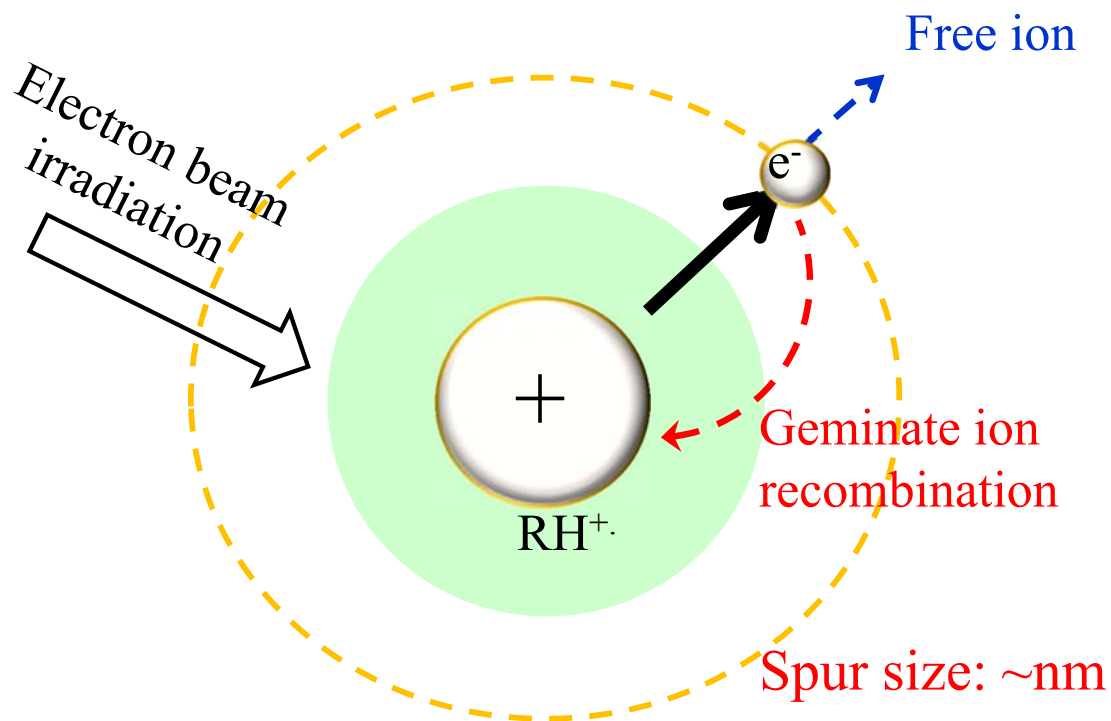


ドデカンにおけるカチオンラジカルと電子の時間挙動

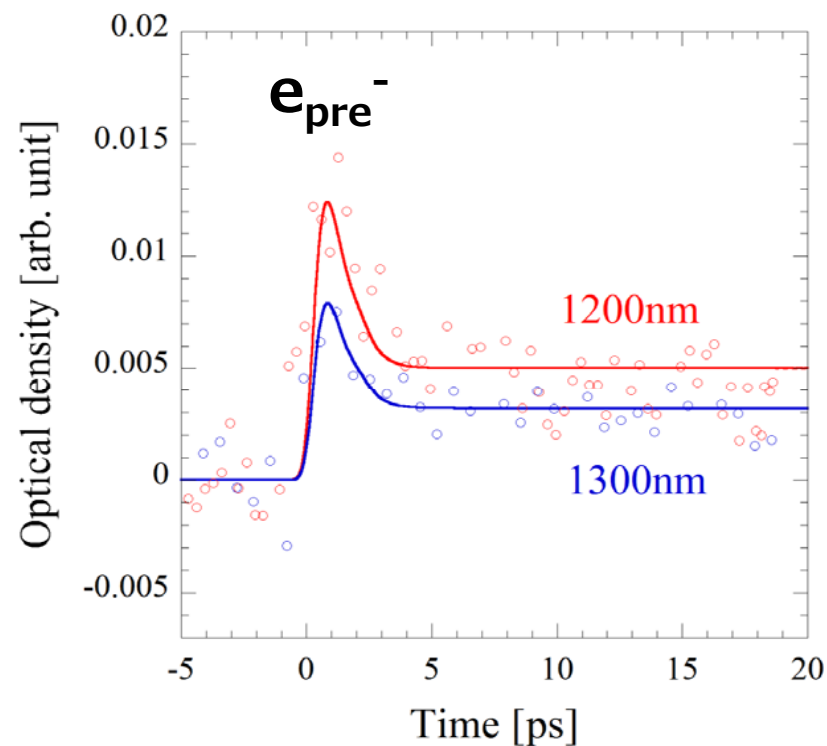
量子ビーム誘起超高速反応の解明は、その後にかかる反応解析・制御のために重要

→放射線治療、原子炉水化学、ナノファブ리케이션に対する新たな知見

超短パルス電子ビームを用いた反応解析



量子ビーム誘起超高速反応



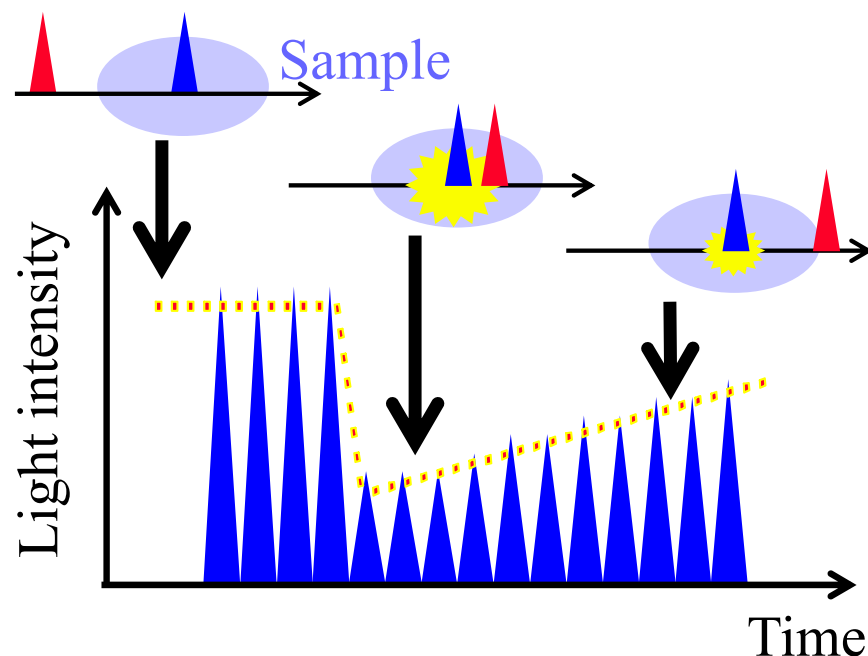
水における水和電子前駆体の
生成・減衰時間挙動

量子ビーム誘起超高速反応の解明は、その後にかかる反応解析・制御のために重要

→放射線治療、原子炉水化学、ナノファブリケーションに対する新たな知見

パルスラジオリシスの時間分解能の向上

Electron bunch
Light pulse from laser



ストロボスコピック法を用いた
パルスラジオリシス

時間分解能, g

$$g \cong \sqrt{\delta t_{e\text{-beam}}^2 + \delta t_{\text{laser}}^2 + \delta t_{\text{jitter}}^2} + (n-1) \frac{L}{c}$$

$\delta t_{e\text{-beam}}$: 電子ビームパルス幅 (201 fs)

δt_{laser} : レーザーパルス幅 (107 fs)

δt_{jitter} : 同期時間ジッター (61 fs)

L : サンプル長 (200 fs for 0.2 mm water)

g < 100 fs、サブフェムト秒の実現

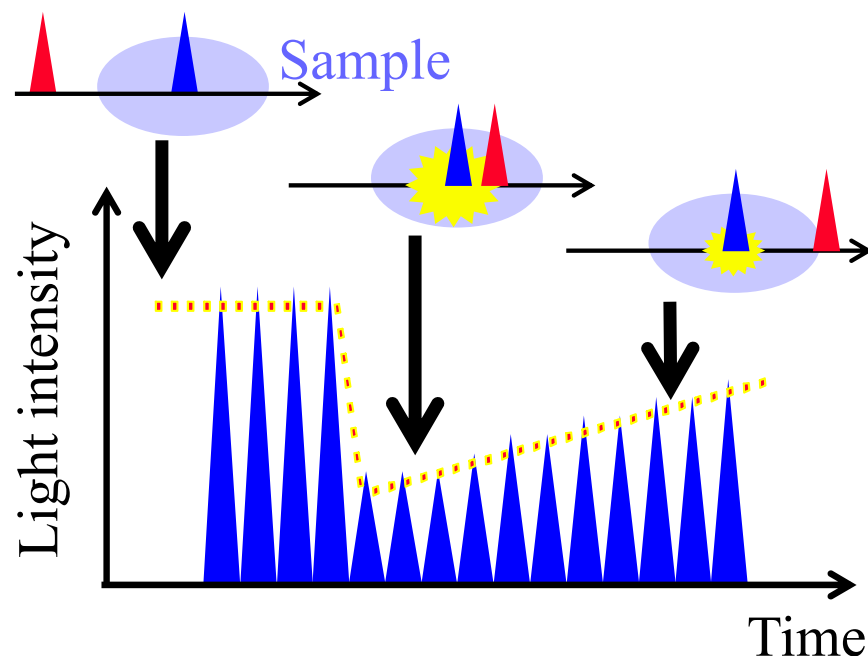
Ref.: J. Yang et al., Nucl. Instr. and Meth. A 629, 6 (2011).

時間分解能を向上するためには、フェムト秒・サブフェムト秒の

超短パルス電子ビーム発生・計測が必要

パルスラジオリシスの時間分解能の向上

Electron bunch
Light pulse from laser



ストロボスコピック法を用いた
パルスラジオリシス

時間分解能, g

$$g \cong \sqrt{\delta t_{e\text{-beam}}^2 + \delta t_{laser}^2 + \delta t_{jitter}^2} + (n-1) \frac{L}{c}$$

$\delta t_{e\text{-beam}}$: 電子ビームパルス幅 (201 fs)

δt_{laser} ← ダブルデッカーパルスラジオリシス
K. Kan et al., Rev. Sci. Instrum. 83, 073302 (2012).

δt_{jitter} ←

L ← 等価速度分光法
J. Yang et al., Radiat. Phys. Chem. 78, 1164 (2009).

g < 100 fs、サブフェムト秒の実現

Ref.: J. Yang et al., Nucl. Instr. and Meth. A 629, 6 (2011).

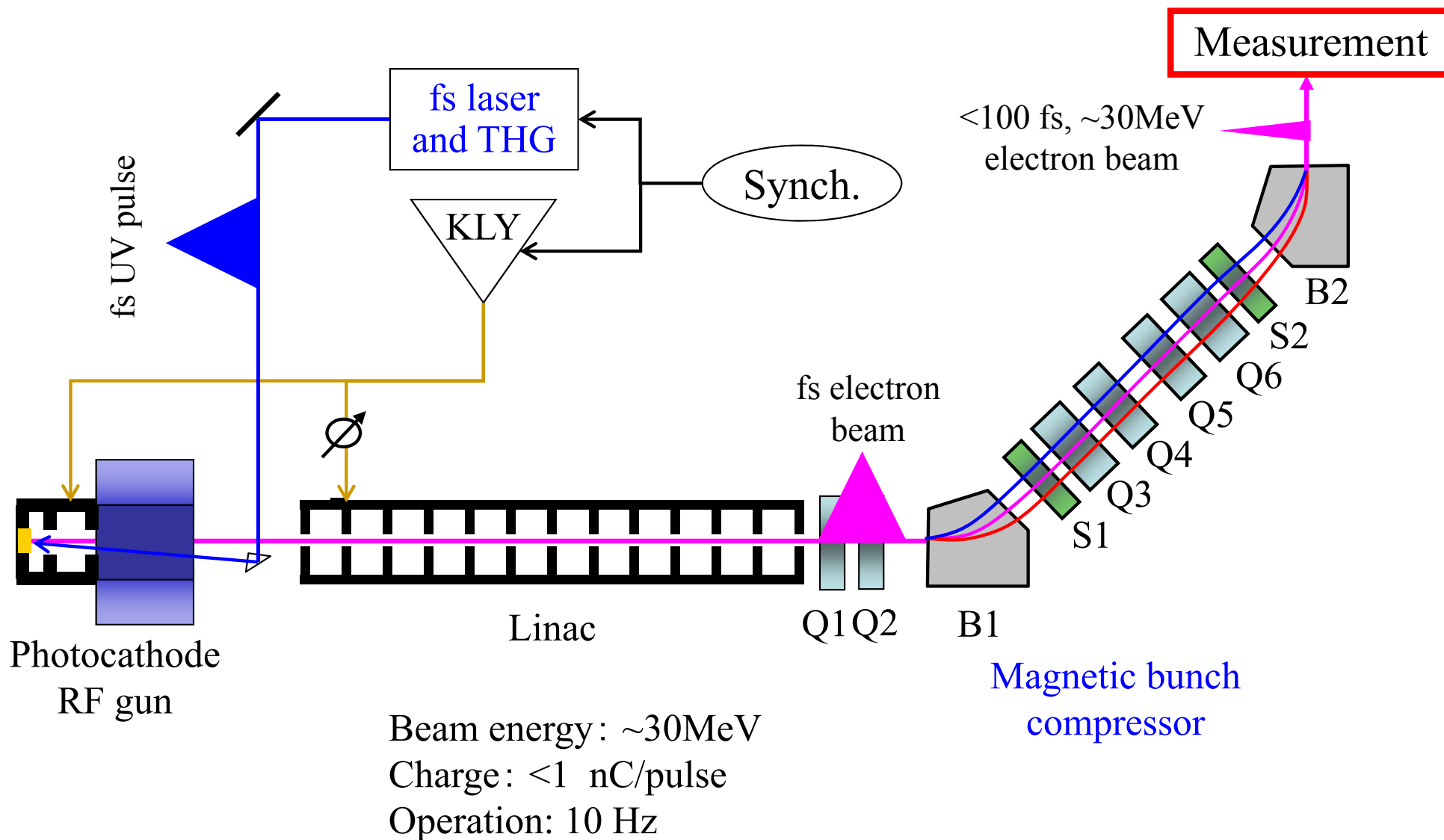
時間分解能を向上するためには、フェムト秒・サブフェムト秒の

超短パルス電子ビーム発生・計測が必要

研究目的

フェムト秒・サブフェムト秒パルスラジオリシスに利用可能な超短パルス電子ビーム発生・計測方法の確立を目的とする。

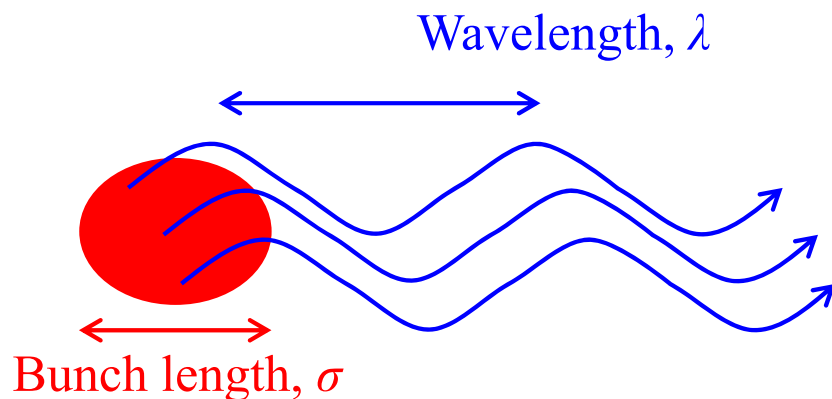
フォトカソードRF電子銃ライナックによる電子ビーム発生



フェムト秒電子銃の測定: K. Kan et al., Nucl. Instrum. Meth. A 659, 44 (2011).

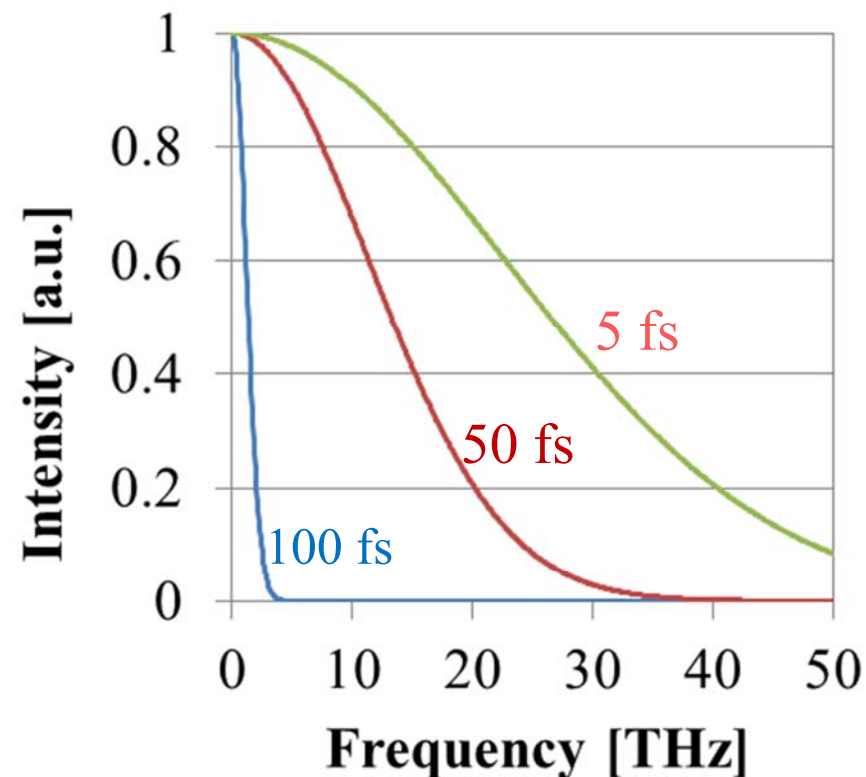
サブフェムト秒電子ビーム発生の計算: K. Kan et al., Nucl. Instrum. Meth. A 622, 35 (2010).

パルス電子ビームのコヒーレント放射



コヒーレントの場合

$$\lambda > \sigma, I \propto N^2$$



バンチ形状因子, $f_b(\sigma, \omega)$

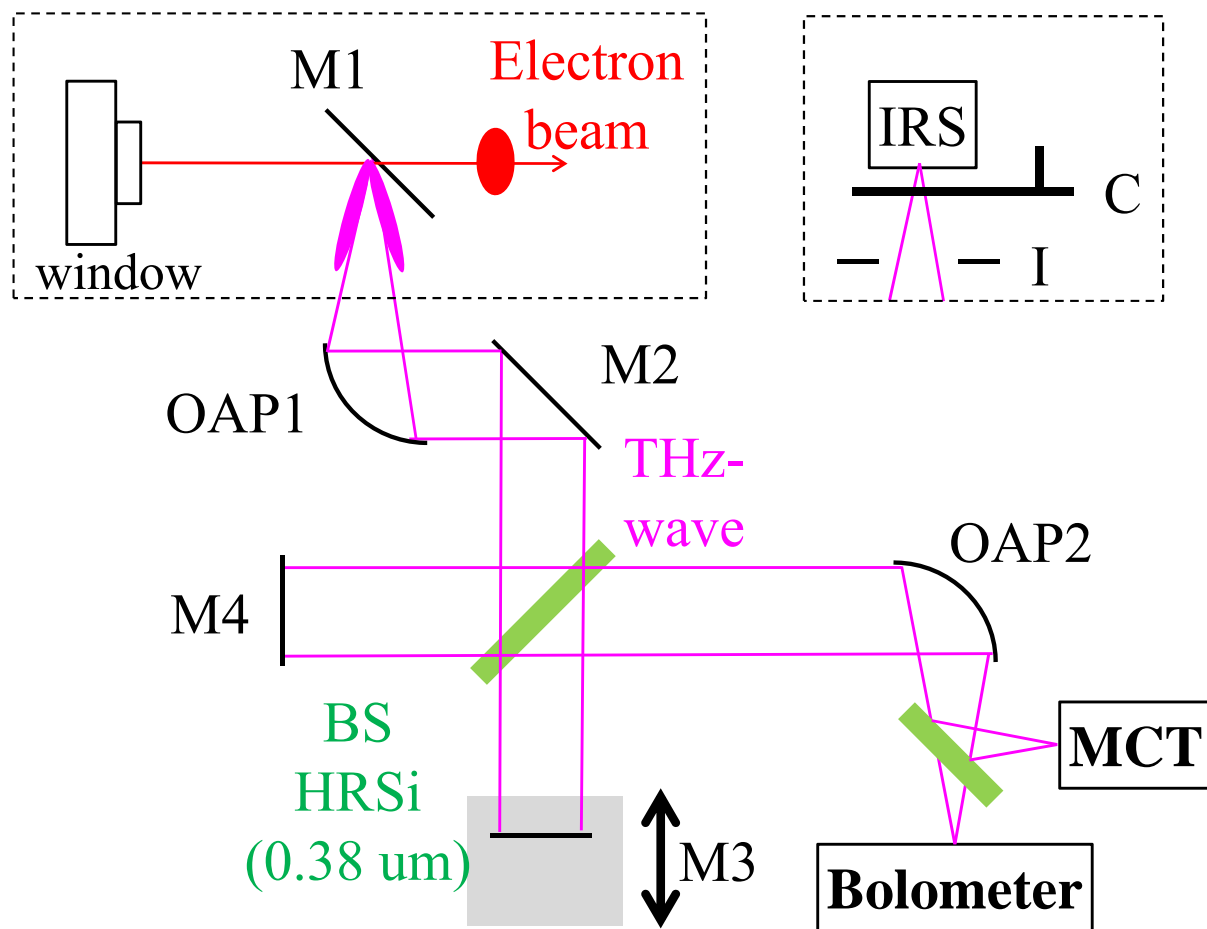
$$f_b(\sigma, \omega) = \exp(-(\sigma\omega)^2)$$

@ Gaussian distribution

T. Takahashi et al., Phys.
Rev. E 50, 4041 (1994).

- 短パルス電子ビームほど、高周波の電磁波を放射
- 短パルス電子ビームの解析には、広帯域の電磁波計測が不可欠

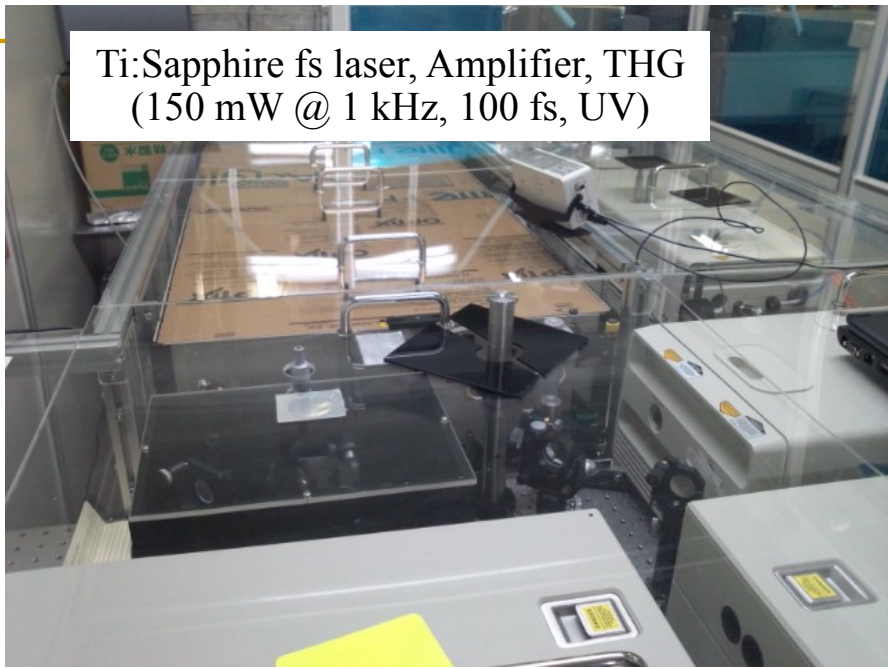
コヒーレント遷移放射の測定系



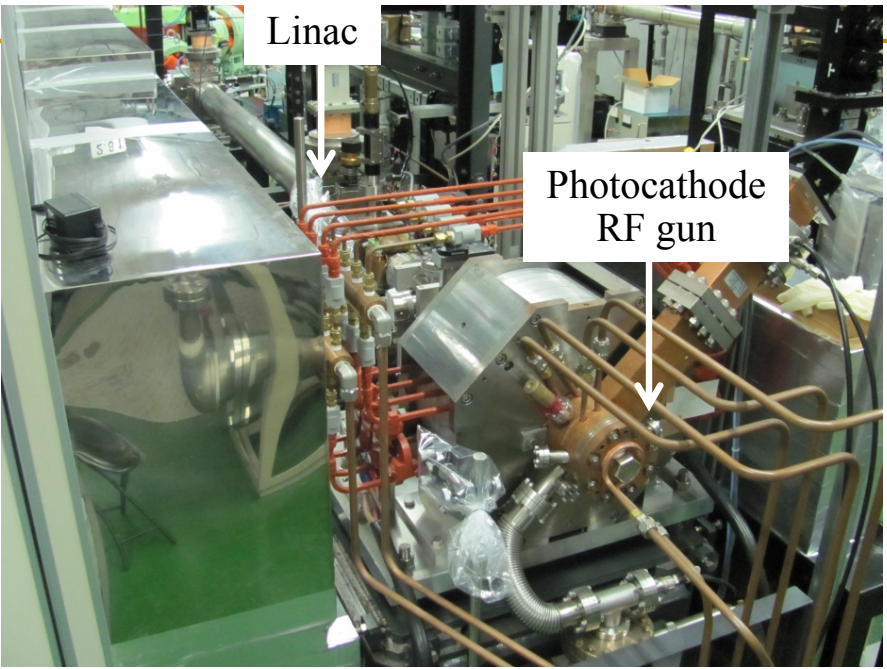
- 移動鏡の距離を変化させインターフェログラムを計測
- インターフェログラムの高速フーリエ変換 (FFT)により周波数スペクトルも解析可能
- 電磁波計測の広帯域化 (Bolometer: 低周波、MCT: 高周波)
- 赤外光源 (IRS) のロックイン検出を用いて、測定系を最適化・評価

マイケルソン干渉計

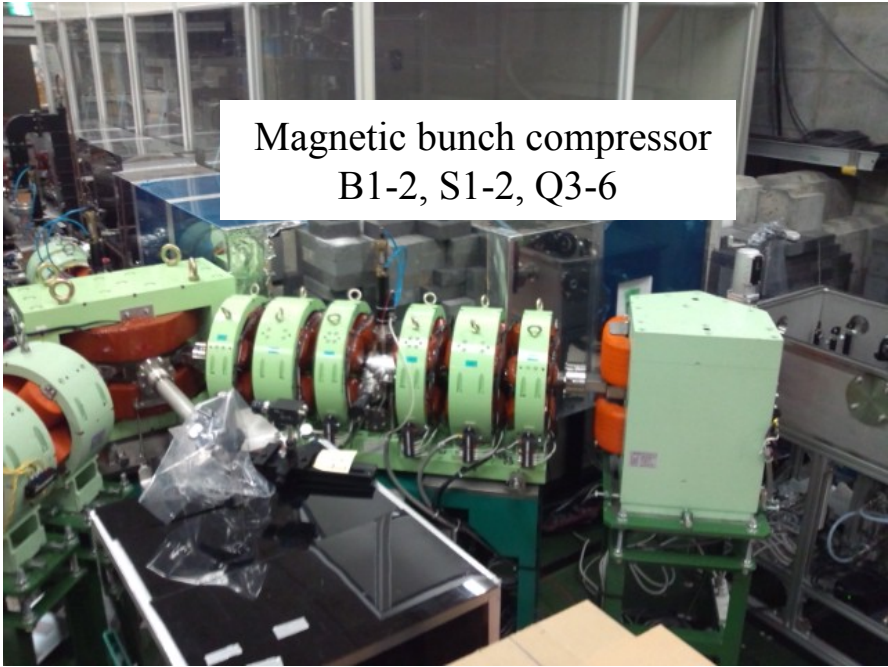
M: 平面鏡, OAP: 非軸放物面鏡, BS: ビームスプリッタ, IRS: 赤外光源, I: 絞り, C: 光チョッパー



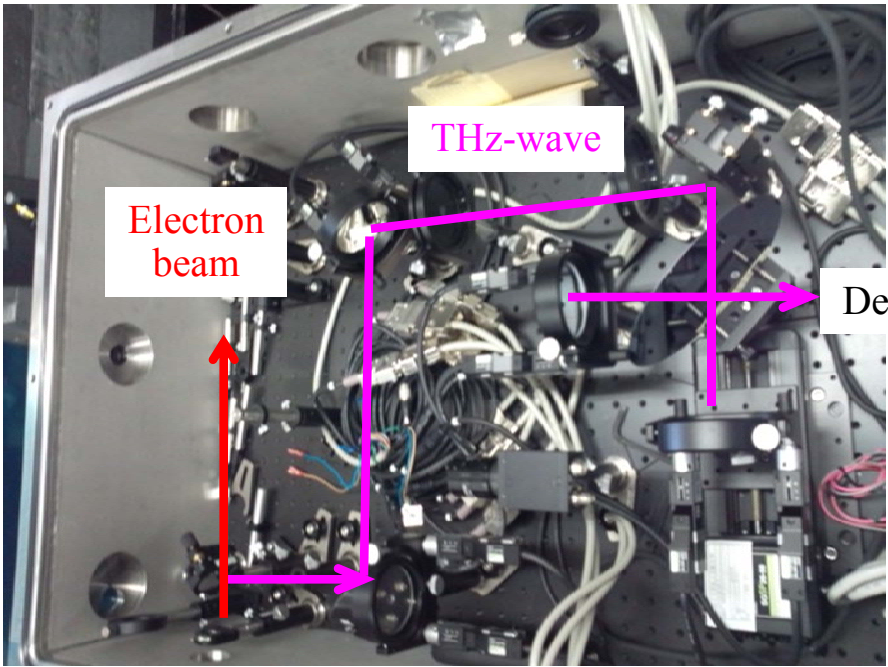
フェムト秒レーザー



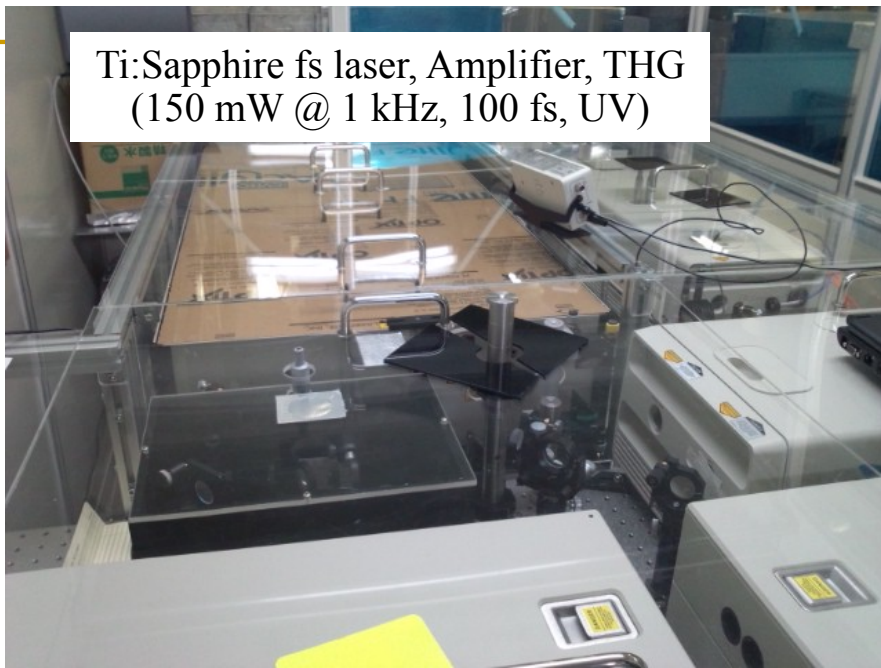
加速器



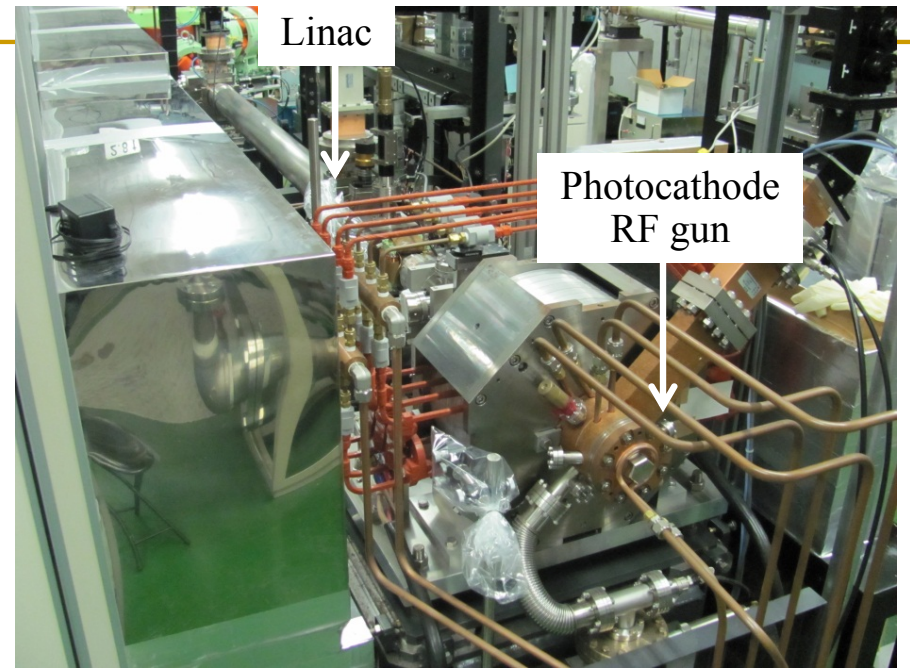
磁気パルス圧縮器



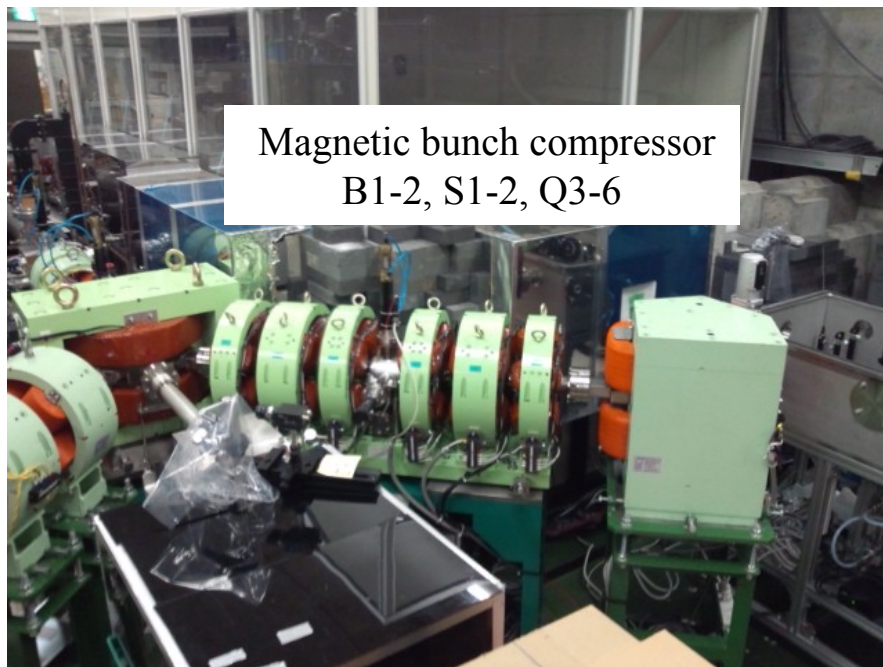
干渉計



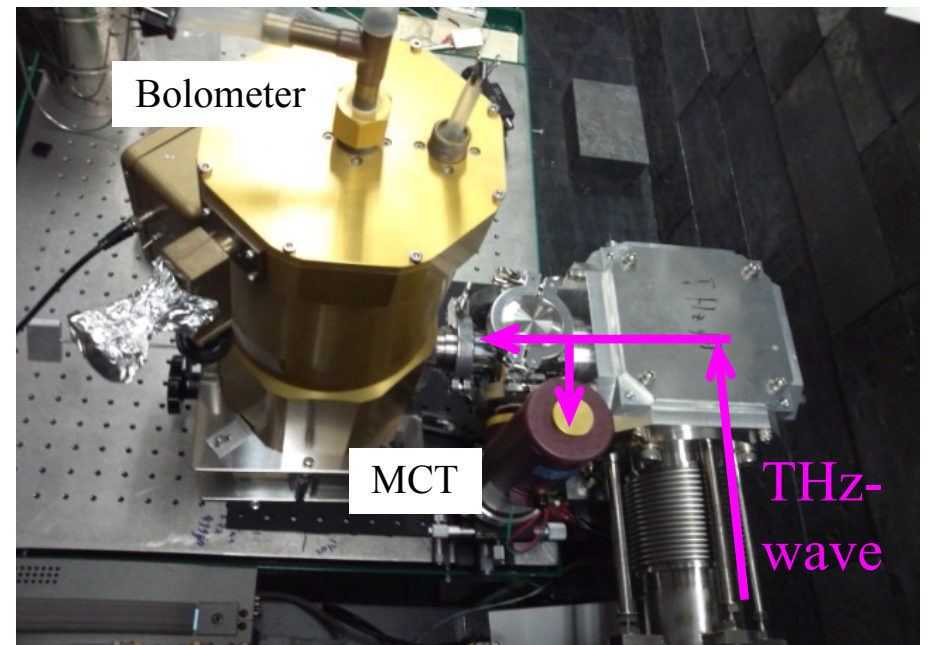
フェムト秒レーザー



加速器



磁気パルス圧縮器



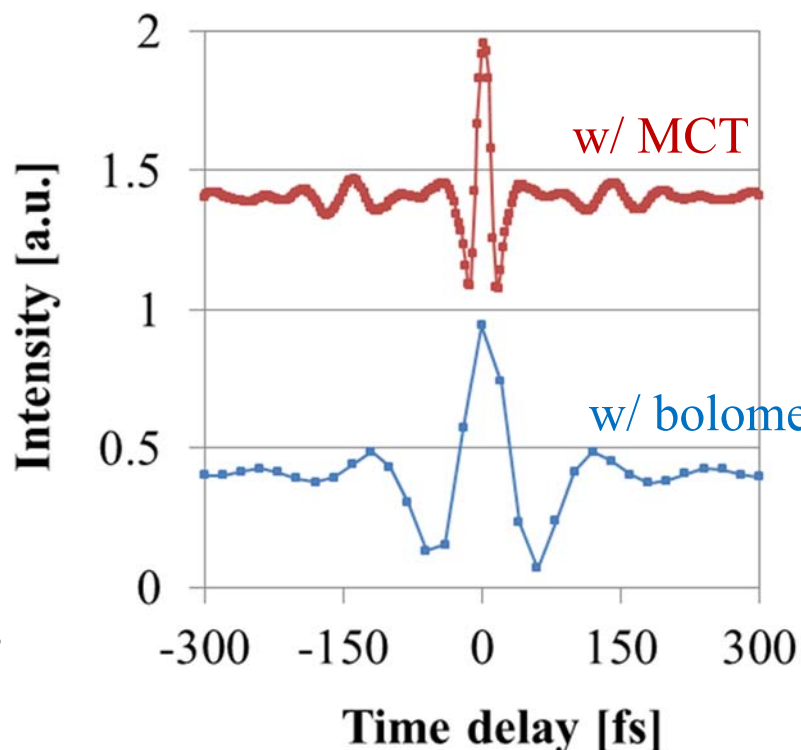
2つの検出器

赤外光源を用いた光学系の最適化・評価

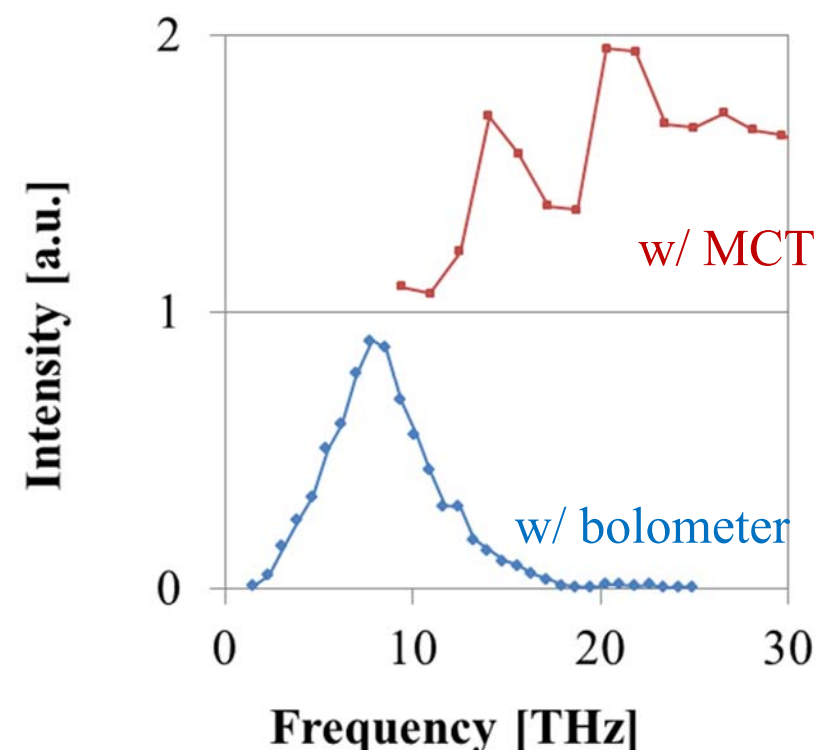


赤外光源

本体: IRS-001C,
黒体塗料: JSC-3号



FFT

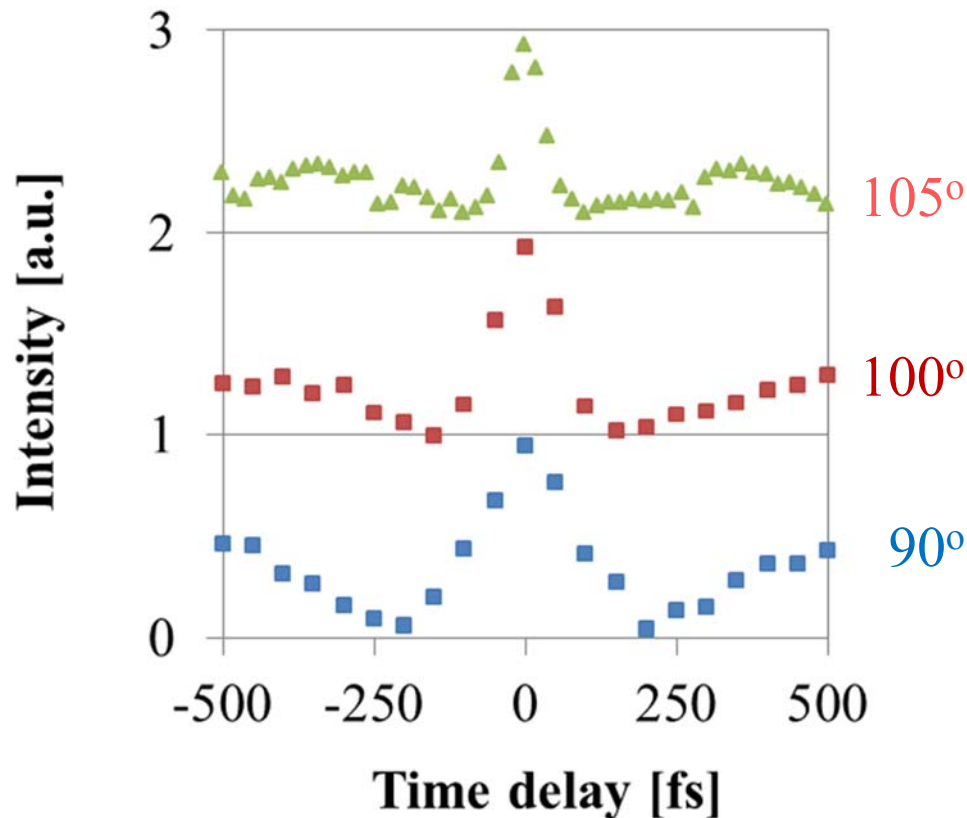


真空中における赤外光源の インターフェログラムと周波数スペクトル

- ・比較のため、いずれもファクター・オフセットを調整
- ・放射温度: 850~950°C (公称値)

ボロメータ: <~20 THz、MCT: <~100 THzの電磁波を検出可能

ボロメータを用いた電子ビームの測定例



$$s(\tau) \propto \left[e^{-(\tau-\tau_0)^2/4\sigma^2} - \frac{2\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \xi^2}} e^{-(\tau-\tau_0)^2/4(\sigma^2 + \xi^2)} + \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + 2\xi^2}} e^{-(\tau-\tau_0)^2/4(\sigma^2 + 2\xi^2)} \right] \quad (20)$$

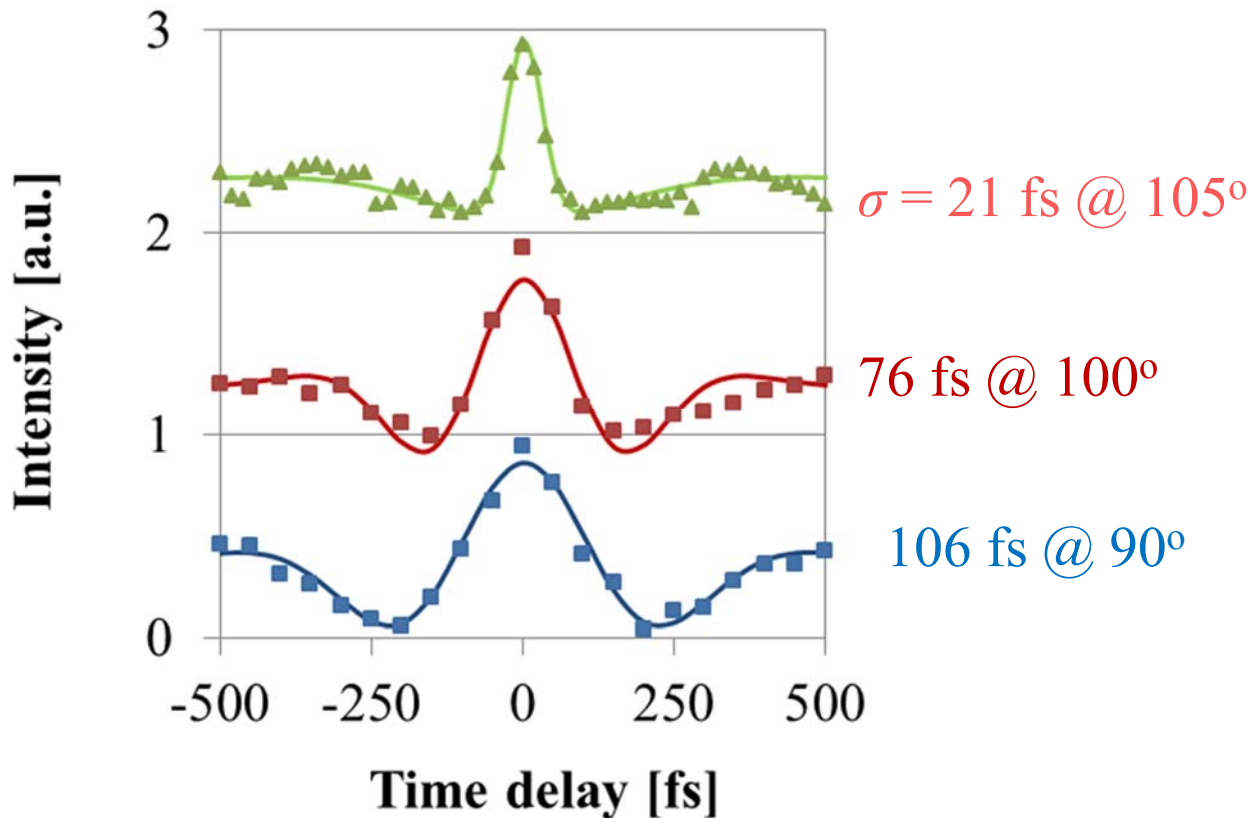
Ref.: A. Murokh et al., Nucl. Instrum. Meth. A 410, 452 (1988).
Z. Wu et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 022701 (2013).

加速管加速位相を変化させた場合の
インターフェログラム

・電子銃加速位相: ~15°、電荷量: ~2 pC

- 解析解により電子ビームパルス幅を算出
- 21~106 fsの電子ビームパルス幅を解析
- 加速管加速位相の最適化

ボロメータを用いた電子ビームの測定例



$$s(\tau) \propto \left[e^{-(\tau-\tau_0)^2/4\sigma^2} - \frac{2\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \xi^2}} e^{-(\tau-\tau_0)^2/4(\sigma^2 + \xi^2)} + \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + 2\xi^2}} e^{-(\tau-\tau_0)^2/4(\sigma^2 + 2\xi^2)} \right] \quad (20)$$

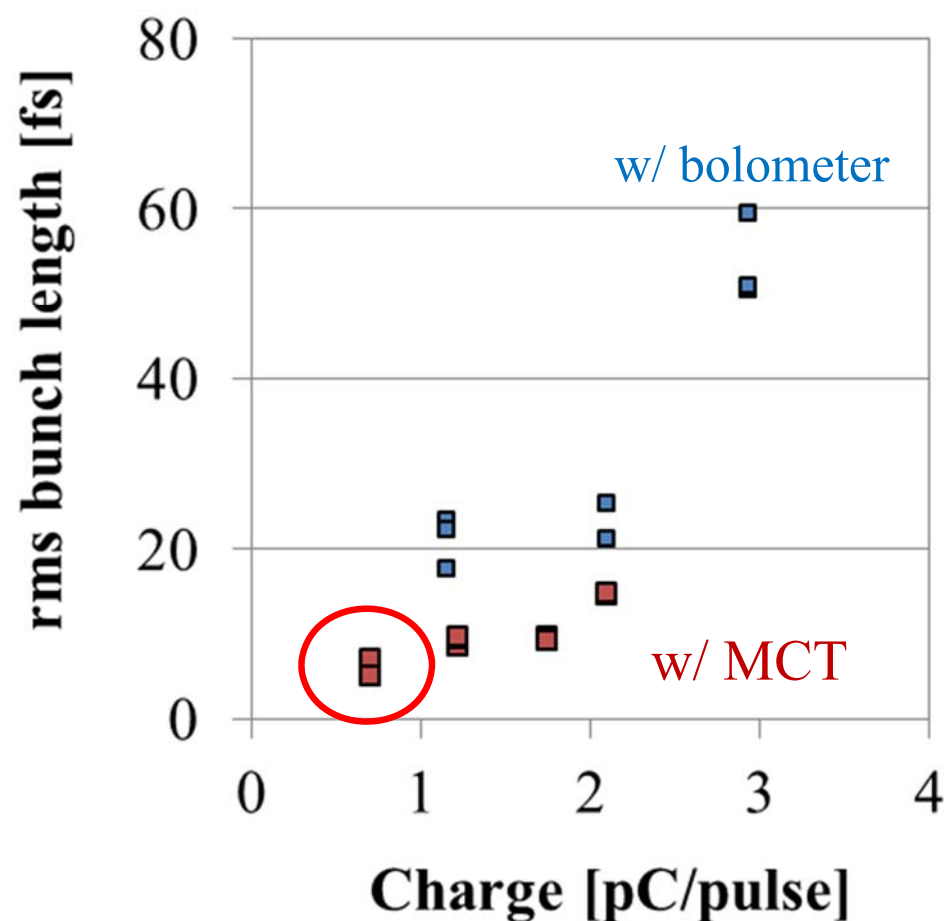
Ref.: A. Murokh et al., Nucl. Instrum. Meth. A 410, 452 (1988).
Z. Wu et al., Rev. Sci. Instrum. 84, 022701 (2013).

加速管加速位相を変化させた場合の
インターフェログラム

・電子銃加速位相: ~15°、電荷量: ~2 pC

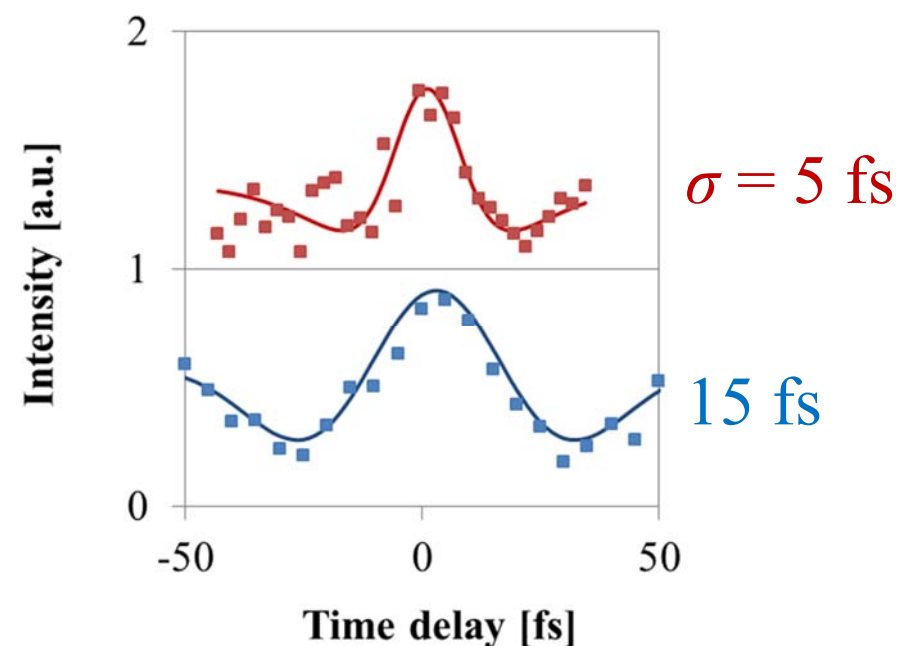
- 解析解により電子ビームパルス幅を算出
- 21~106 fsの電子ビームパルス幅を解析
- 加速管加速位相の最適化

電荷量依存性とMCTの導入



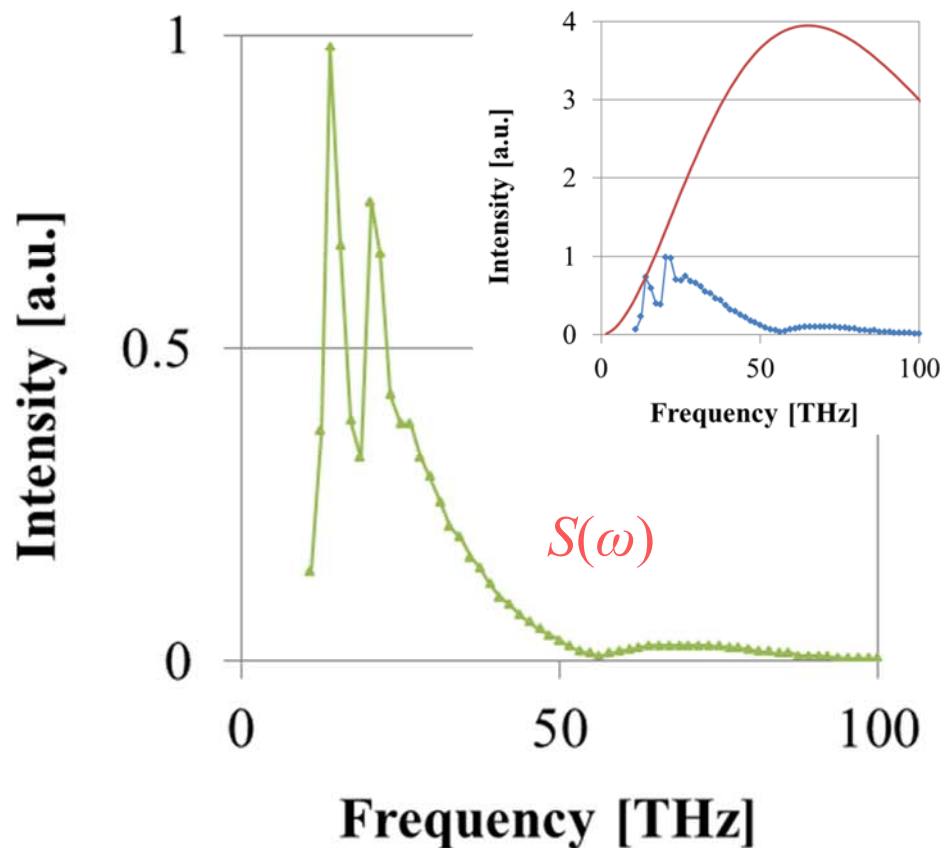
パルス幅の電荷量依存性

- MCTを用いた計測は、より高周波の検出が可能のため、分解能が向上
- しかし、測定系はあらゆる周波数に応答するとは限らない



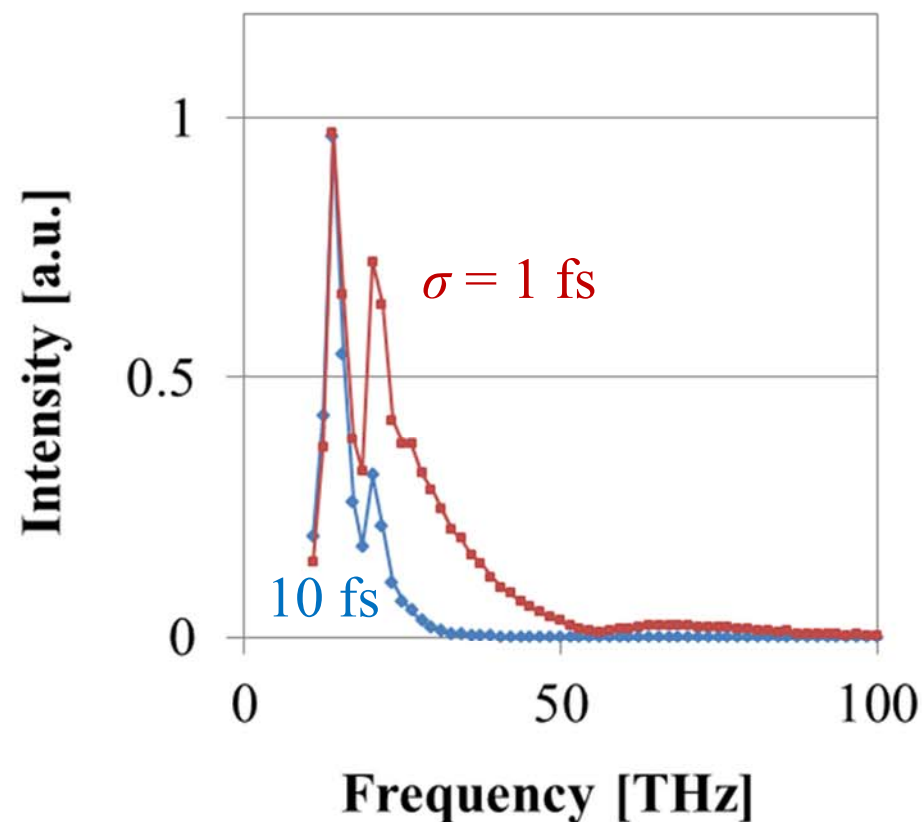
MCTを用いた測定例

MCTによる測定の感度補正



感度曲線 $S(\omega)$ の算出

右上: MCTによる測定と900°Cの黒体放射
周波数スペクトル比較



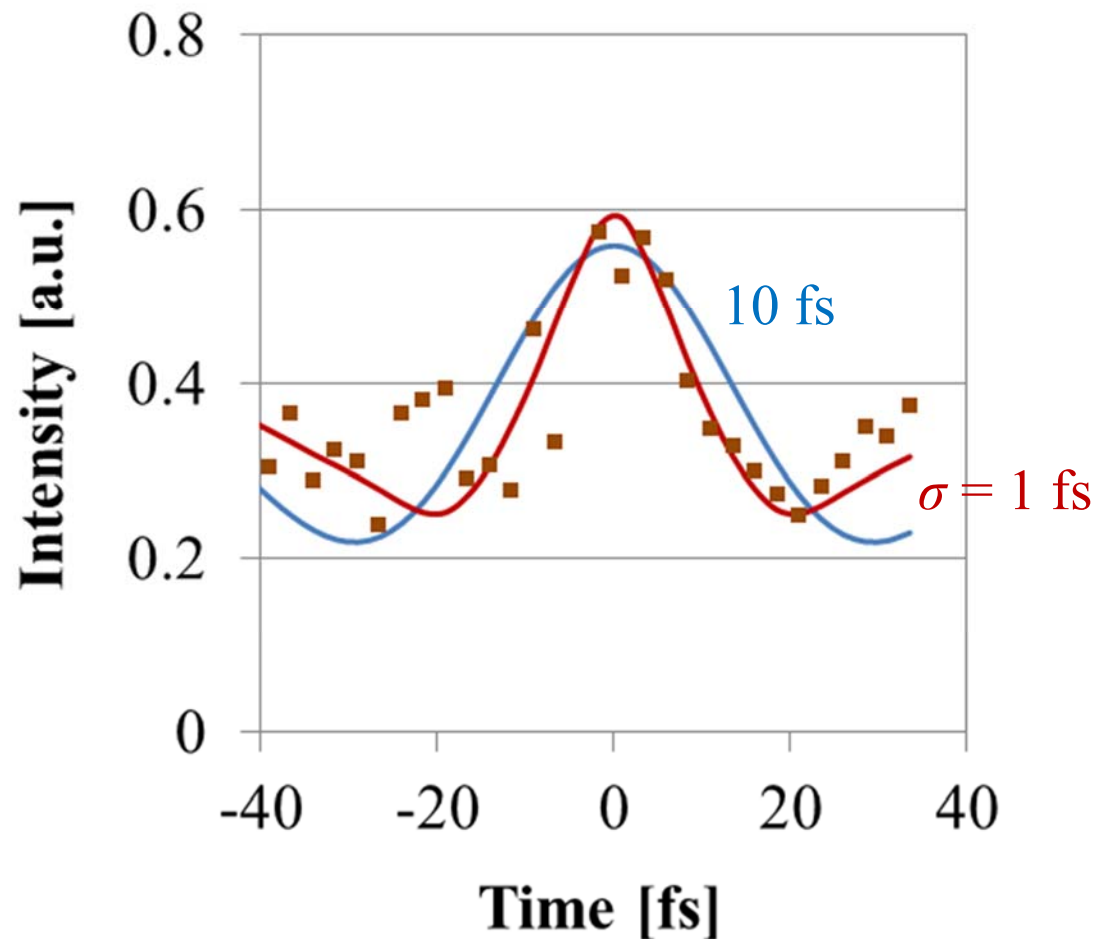
感度補正により予想される
周波数スペクトル

$$I(\omega) = S(\omega) \times F(\sigma, \omega)$$

$$= S(\omega) \times \exp\left(-(\sigma\omega)^2\right)$$

$I(\omega)$: 感度補正した周波数スペクトル、
 $S(\omega)$: 感度曲線、 $F(\sigma, \omega)$: バンチ形状因子

MCTによる測定の感度補正の結果



感度補正された曲線と測定結果の
インターフェログラム比較

電荷量: ~ 0.7 pC $i(\tau) = \sum S(\omega)F(\sigma, \omega)\cos(\omega\tau)$

- < 10 fsの電子ビームパルス発生可能
- パルス幅 σ : 1.3 fsの時、二乗誤差最小

フェムト秒・サブフェムト秒パルスラジオリシスに向けて

パルスラジオリシスの信号強度：電荷量に比例、セル長に反比例

時間分解能の劣化：セル長に比例

最近のパルスラジオリシス： $100 \text{ pC} / 100 \text{ }\mu\text{m}$ の電荷量／セル長の測定が可能
(ダブルパルス法、システムの安定化)

サブフェムト秒パルスラジオリシスを構築するためには、低電荷量、薄いセル・・・

- ・等価速度分光法の開発： $1 \text{ pC} / 100 \text{ }\mu\text{m}$ の測定 → 現状の 10^{-2} の信号強度

($100 \text{ }\mu\text{m}$ の電子ビーム径、分布を精密に制御)

- ・高繰り返し(>100 Hz)によるロックイン検出：現状よりも 10^3 の高感度化

- ・ダブルデッカーパルスラジオリシスの利用

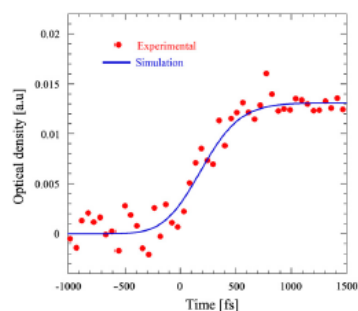


Fig. 3. Transient absorption kinetics of the hydrated electron measured by the femtosecond pulse radiolysis in the 0.18-mm-thick water sample.

J. Yang et al., Nucl. Instrum. Meth. Phys. A 637, S24 (2011).

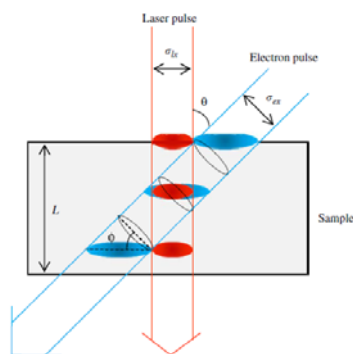
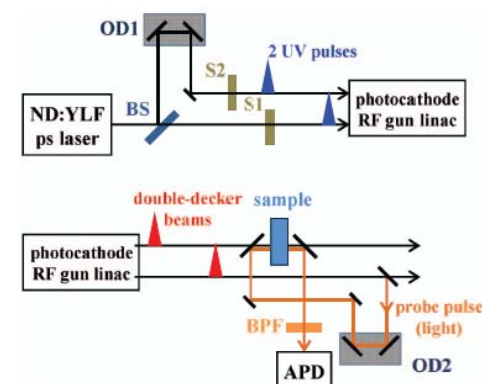


Fig. 1. Concept of EVS for pulse radiolysis by using rotated electron pulse.

J. Yang et al., Radiat. Phys. Chem. 78, 1164 (2009).



K. Kan et al., Rev. Sci. Instrum. 83, 073302 (2012).

まとめ

フェムト秒・サブフェムト秒パルスラジオリシスに利用可能な超短パルス電子ビーム発生・計測方法の確立とその利用における検討を行った。

- フェムト秒電子銃、磁気パルス圧縮を用いた超短パルス電子ビーム発生
- 異なる2つの周波数帯域を持つ検出器を用いたマイケルソン干渉計の構築
ボロメータ: 20 ~ 100 fs、MCTと感度補正: ~1 fs の電子ビームパルス幅 @ ~1 pC
- 等価速度分光法、ロックイン検出等による時間分解能向上の検討

今後、システム全体の最適化によるさらなる短パルス化を行うとともに、アト秒パルスラジオリシスの実現や集団励起等の新現象発見への応用展開を目指す。

本研究の一部は、科研費 (21226022, 23109507, 25870404) により支援された。



ご清聴ありがとうございました！！