

# コヒーレント遷移放射を用いた 超短パルス電子ビームの観測



阪大産研

○野澤一太、菅晃一、楊金峰、小方厚、  
近藤孝文、法澤公寛、小林仁、吉田陽一

2013年1月10・11日

第10回高輝度高周波電子銃研究会

@SPring-8

# 概要

## ✓ 背景

超短パルス電子ビーム  
パルスラジオリシス法

## ✓ 超短パルス電子ビーム発生法

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック  
磁気パルス圧縮器  
短パルス化のための改善点

## ✓ コヒーレント遷移放射によるパルス幅測定法

コヒーレント遷移放射  
光学系・測定法の概要

## ✓ 超短パルス電子ビームパルス幅測定結果

## ✓ 結論と展望

# 概要

## ✓ 背景

パルスラジオリシス法

超短パルス電子ビーム

## ✓ 超短パルス電子ビーム発生法

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック

磁気パルス圧縮器

短パルス化のための改善点

## ✓ コヒーレント遷移放射によるパルス幅測定法

コヒーレント遷移放射

光学系・測定法の概要

## ✓ 超短パルス電子ビームパルス幅測定結果

## ✓ 結論と展望

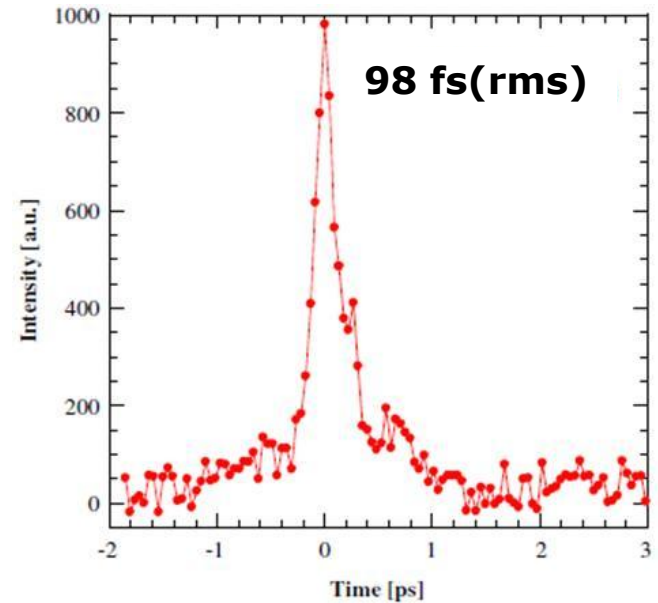
# 背景

## なぜ超短パルス電子ビームが必要なのか？

放射線化学初期過程を解明するため  
応用分野：原子炉化学、がん治療、  
半導体リソグラフィ

→パルスラジオリシス法では、化学  
反応の時定数より短い電子ビームが  
必要となる。

現状の最短パルスは100fs



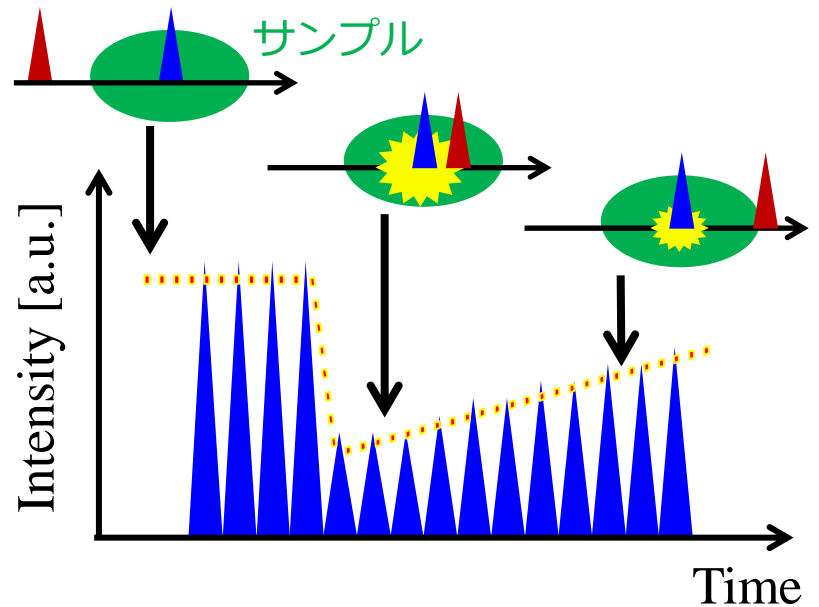
最先端超短パルス  
電子ビーム

# 背景

## パルスラジオリシス法

- 放射線化学反応の時定数より短い放射線パルスを照射
- サンプルを励起・イオン化し、短寿命中間活性種を生成
- 時間分解計測手法により、その挙動を直接的に観測

電子ビーム パルス  
レーザー パルス



ストロボスコピック法

# 背景

## パルスラジオリシス法の時間分解能 $g$

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

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

$\delta t_{laser}$  : レーザーパルス幅

$\delta t_{jitter}$  : RF同期時間ジッター

$L$  : サンプル長

$g$  : 時間分解能

時間分解能の向上には全てのパラメータを低減する必要がある。

パルスラジオリシス法の時間分解能向上のために、アト秒・フェムト秒の超短パルス電子ビーム発生が必要となる。

# 研究目的

## アト秒パルスラジオリシス実現のための アト秒電子ビームの発生と計測

- フェムト秒RF電子銃・高次収差補正用磁気パルス圧縮器・スリットの導入により、アト秒電子ビームを発生する。
- 従来よりも高時間分解能を有する新しい超短パルス電子ビームのパルス幅計測法の開発を行う。

# 概要

## ✓ 背景

パルスラジオリシス法

超短パルス電子ビーム

## ✓ 超短パルス電子ビーム発生法

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック

磁気パルス圧縮器

短パルス化のための改善点

## ✓ コヒーレント遷移放射によるパルス幅測定法

コヒーレント遷移放射

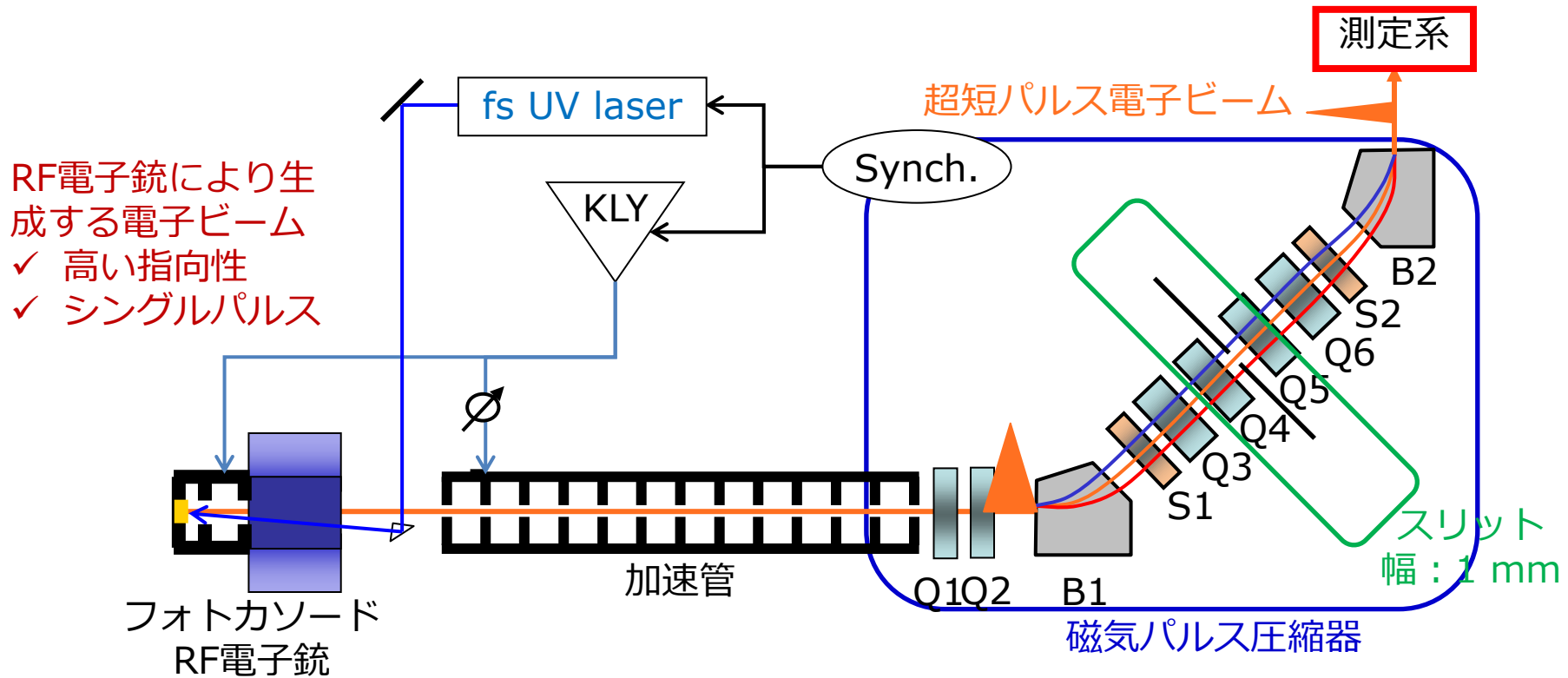
光学系・測定法の概要

## ✓ 超短パルス電子ビームパルス幅測定結果

## ✓ 結論と展望



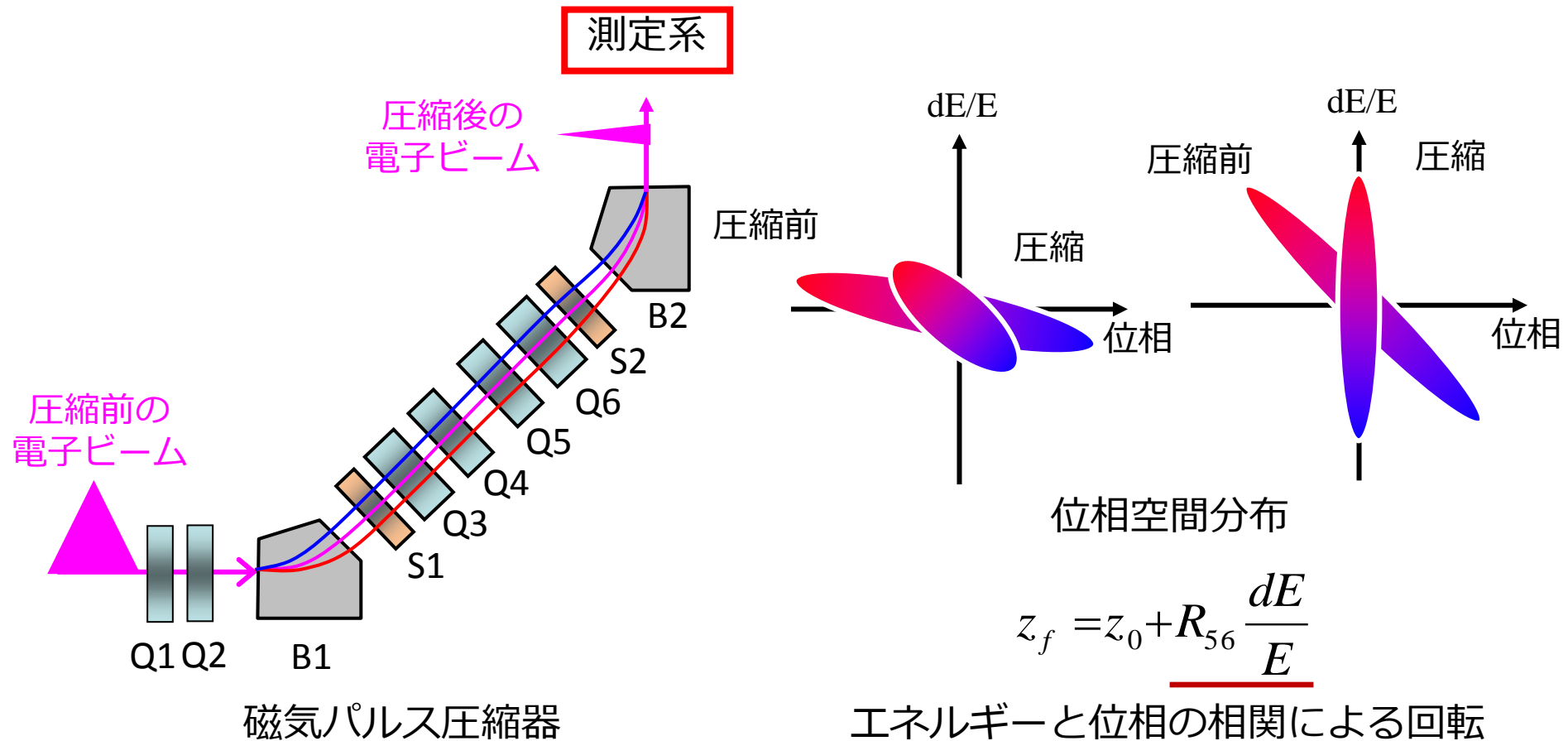
# レーザーフォトカソードRF電子銃ライナックを用いた 超短パルス電子ビーム発生法



## 超短パルス電子ビーム発生のための改善点

- フェムト秒レーザーフォトカソードRF電子銃
- 高次収差補正用磁気パルス圧縮器
- スリットの導入

# 磁気パルス圧縮器

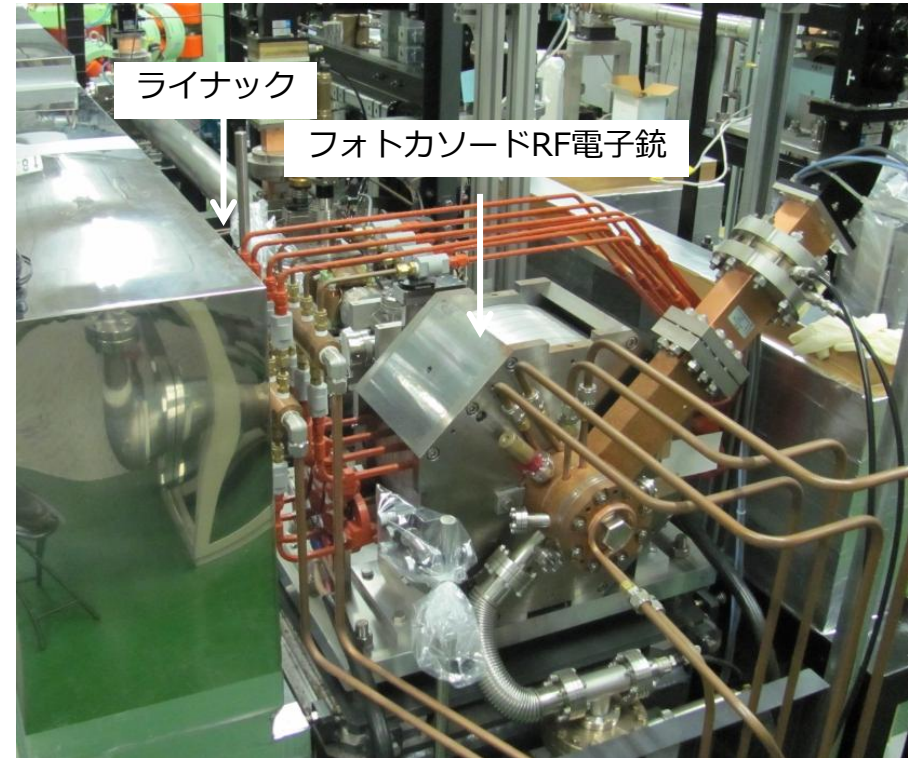


(一定電荷量時の) 加速管加速位相によるパルス幅の変化

# フェムト秒レーザーフォトカソードRF電子銃



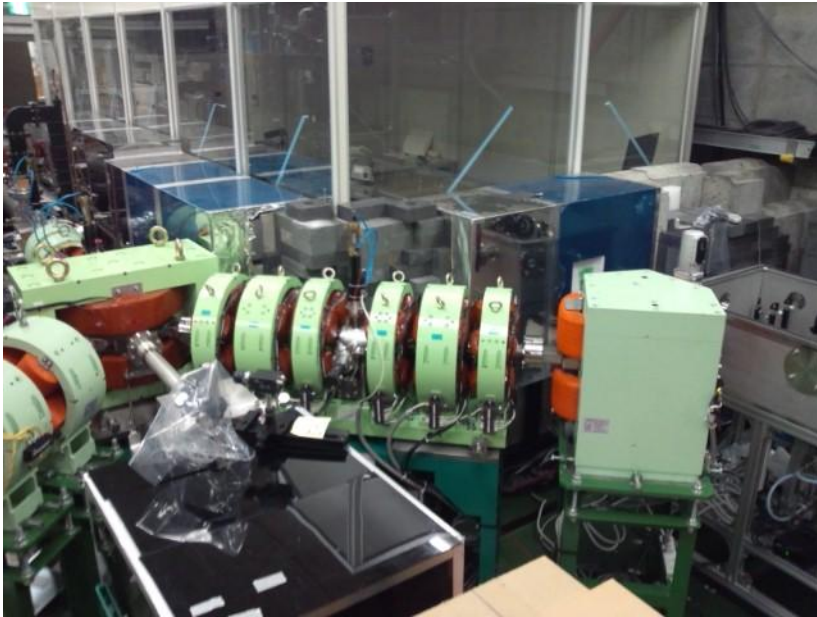
Ti:Sapphire fs laser



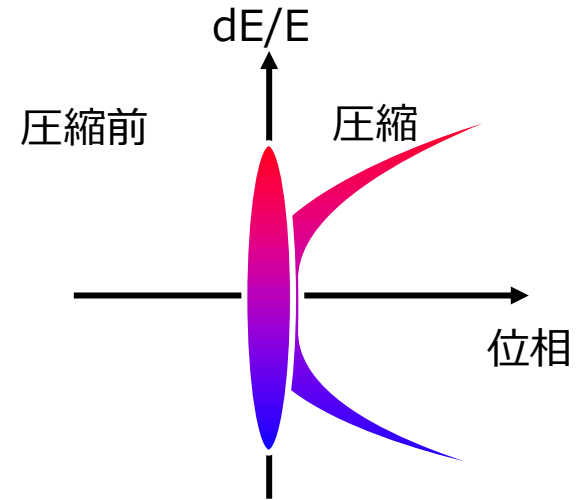
フォトカソードRF電子銃

フォトカソードRF電子銃を用いて、従来よりも  
短パルスの電子ビームを発生

# 高次収差補正用磁気パルス圧縮器



磁気パルス圧縮器

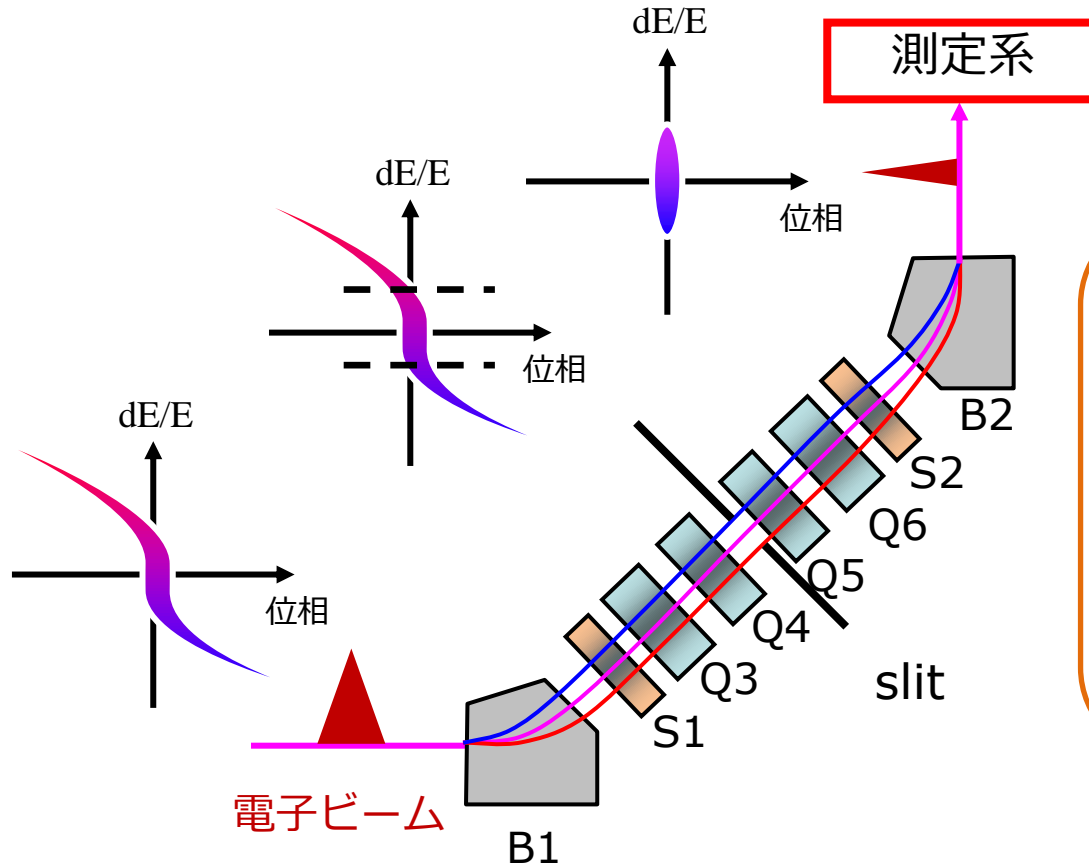


$$z_f = z_0 + R_{56} \frac{dE}{E} + \underline{T_{566} \left( \frac{dE}{E} \right)^2}$$

二次効果の影響

六極電磁石で2次効果を補正

# スリットの導入



スリットによる短パルス化

- ✓スリット幅：1 mm, 2mm
- ✓磁気パルス圧縮器の中間部に配置
- ✓エネルギーの高い・低い電子を除外し、longitudinal emittanceを減少

スリットの導入により、短パルス化

# 概要

## ✓ 背景

パルスラジオリシス法  
超短パルス電子ビーム

## ✓ 超短パルス電子ビーム発生法

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック  
磁気パルス圧縮器  
短パルス化のための改善点

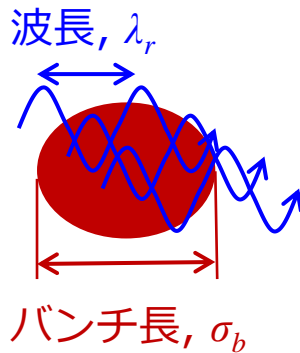
## ✓ コヒーレント遷移放射によるパルス幅測定法

コヒーレント遷移放射  
光学系・測定法の概要

## ✓ 超短パルス電子ビームパルス幅測定結果

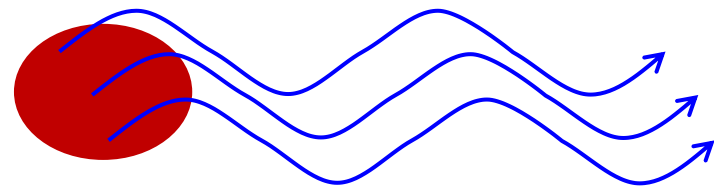
## ✓ 結論と展望

# コヒーレント放射とバンチ形状因子

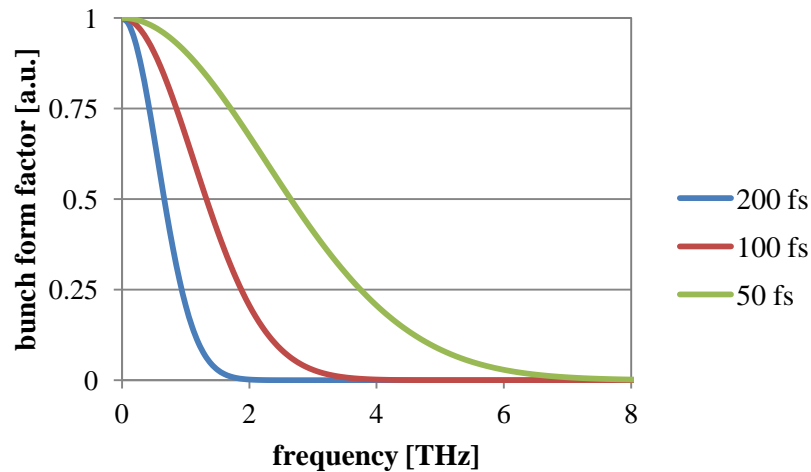


インコヒーレントな場合  $\lambda_r < \sigma_b$ ,  $I \propto N$

本研究



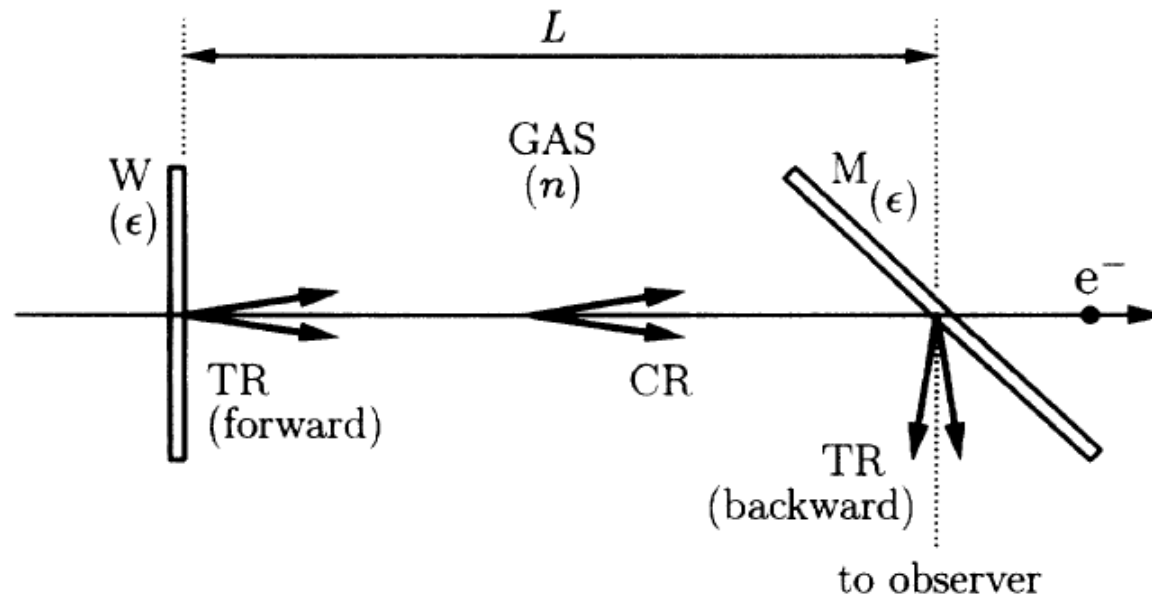
コヒーレントな場合  $\lambda_r > \sigma_b$ ,  $I \propto N^2$



バンチ形状因子

バンチ長が短くなるほど、高周波  
までの放射が可能となる。

# コヒーレント遷移放射 (CTR)



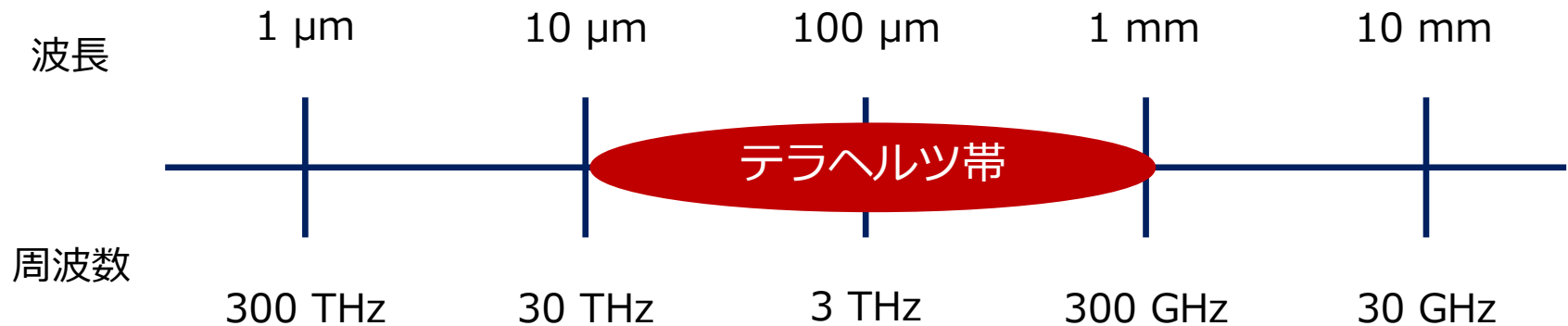
テラヘルツ波の発生

T.Takahashi et al., Phys. Rev. E 50, 4014 (1994).

電子ビームが異なる媒質間の境界面で、その電場により、媒質の分極を引き起こし、それが電磁波として伝播する。



# テラヘルツ波

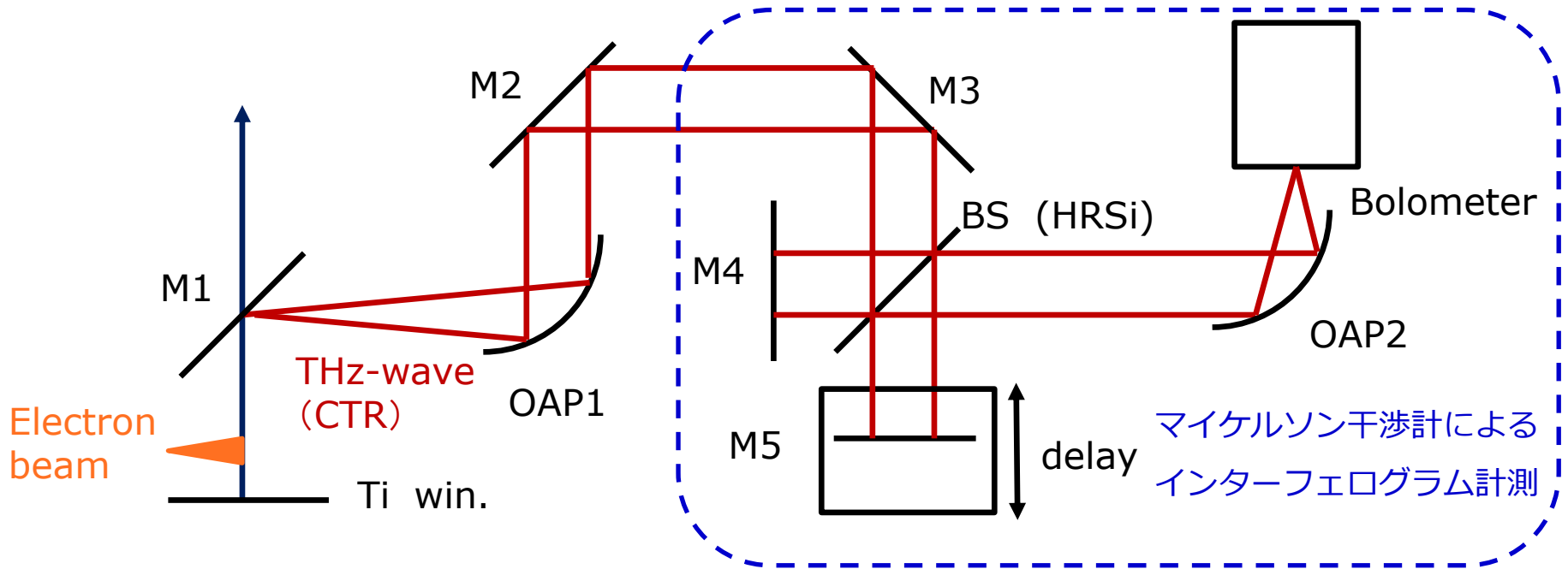


テラヘルツ帯の範囲

## テラヘルツ波の性質

- 光と電波の境界付近の波長の電磁波
- 近年、検出器の進歩により、検出可能となった。

# 光学系

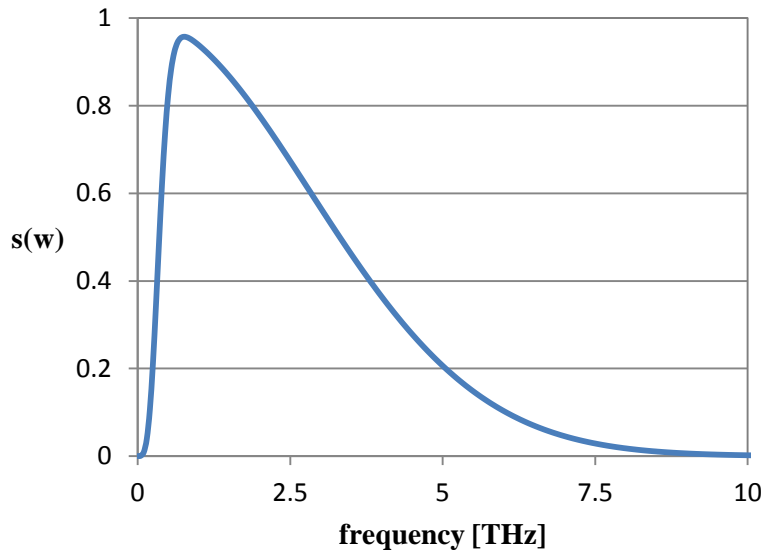


コヒーレント遷移放射測定系

コヒーレント遷移放射によって発生したテラヘルツ波  
の自己相関をマイケルソン干渉計で取得する

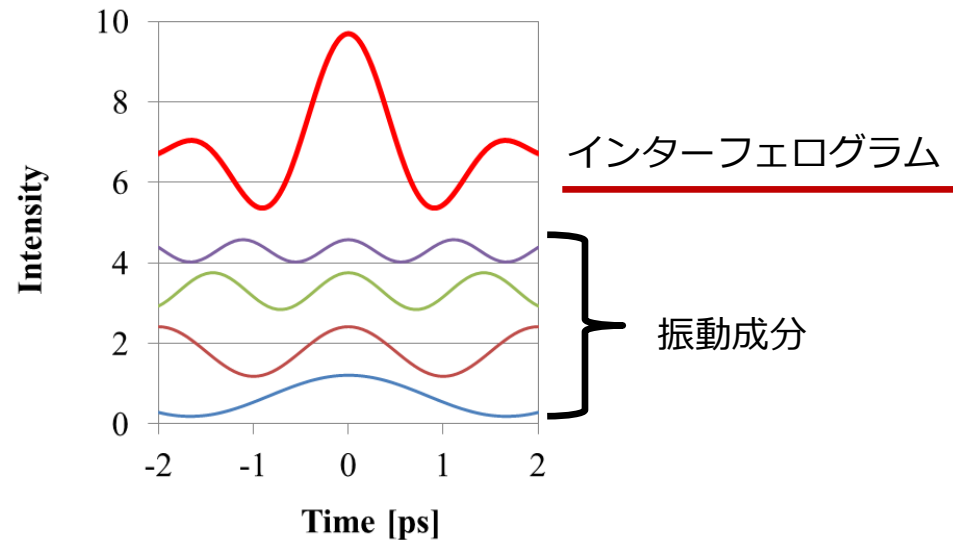
# パルス幅測定の実験的アプローチ

$$S(\omega) = e^{-(\sigma\omega)^2} - 2e^{-(\sigma^2 + \xi^2)\omega^2} + e^{-(\sigma^2 + 2\xi^2)\omega^2}$$



周波数スペクトル ( $\sigma = 40$  fs,  $\xi = 0.5$  ps)

$$s(\tau) \approx \left[ \begin{aligned} & \exp\left\{-\frac{(\tau - \tau_0)^2}{4\sigma^2}\right\} - \frac{2\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \xi^2}} \exp\left\{-\frac{(\tau - \tau_0)^2}{4(\sigma^2 + \xi^2)}\right\} \\ & + \frac{\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + 2\xi^2}} \exp\left\{-\frac{(\tau - \tau_0)^2}{4(\sigma^2 + 2\xi^2)}\right\} \end{aligned} \right]$$



インターフェログラム

実験的に得たインターフェログラムに解析的な関数をフィッティングすることにより、パルス幅を測定する。

# 概要

## ✓ 背景

パルスラジオリシス法  
超短パルス電子ビーム

## ✓ 超短パルス電子ビーム発生法

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック  
磁気パルス圧縮器  
短パルス化のための改善点

## ✓ コヒーレント遷移放射によるパルス幅測定法

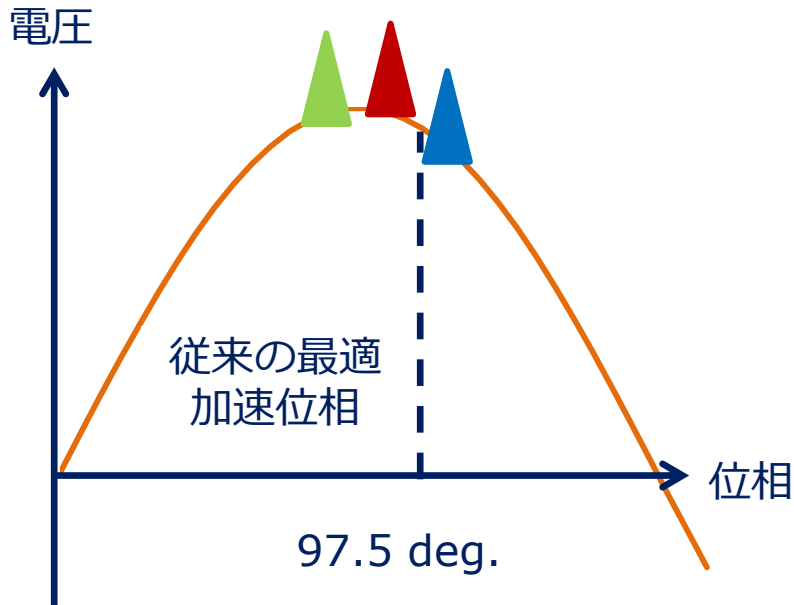
コヒーレント遷移放射  
光学系・測定法の概要

## ✓ 超短パルス電子ビームパルス幅測定結果

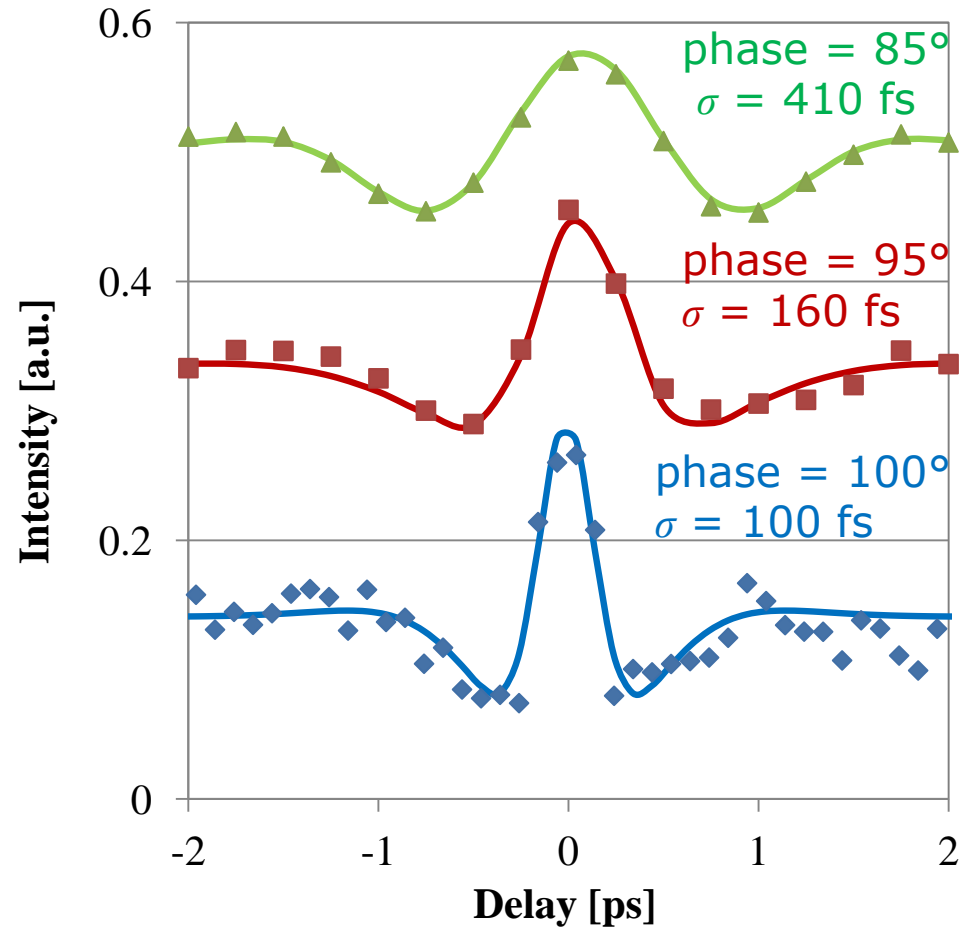
## ✓ 結論と展望

# パルス幅の加速管加速位相依存性

- フェムト秒RF電子銃
- 高次収差補正用磁気パルス圧縮器



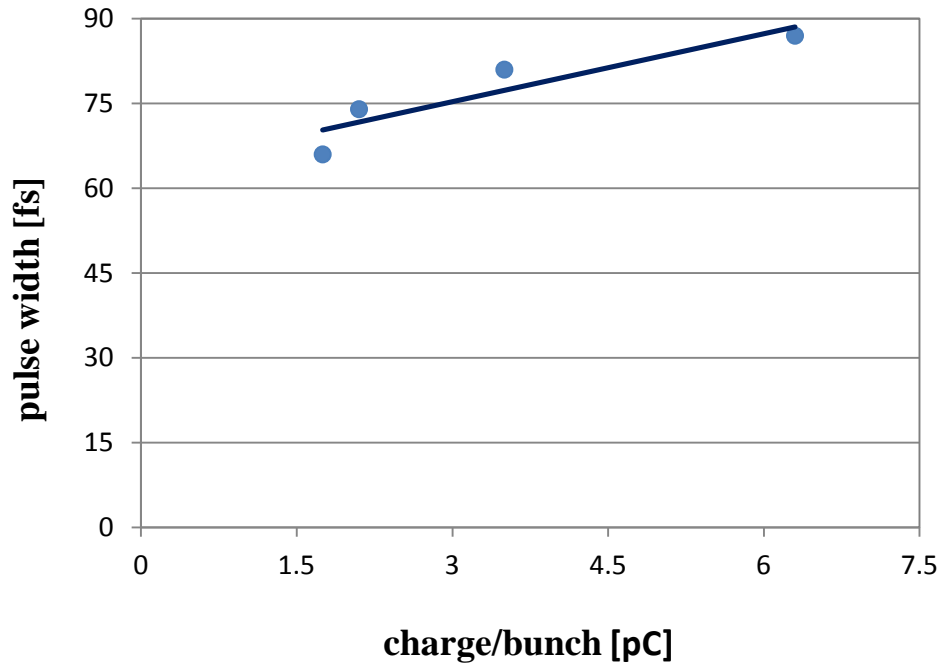
加速位相



インターフェログラムを用いたパルス幅測定

CTRを用いたパルス幅測定手法を確立したため、  
<100 fsの電子ビーム発生に挑戦！

# パルス幅の電荷量依存性

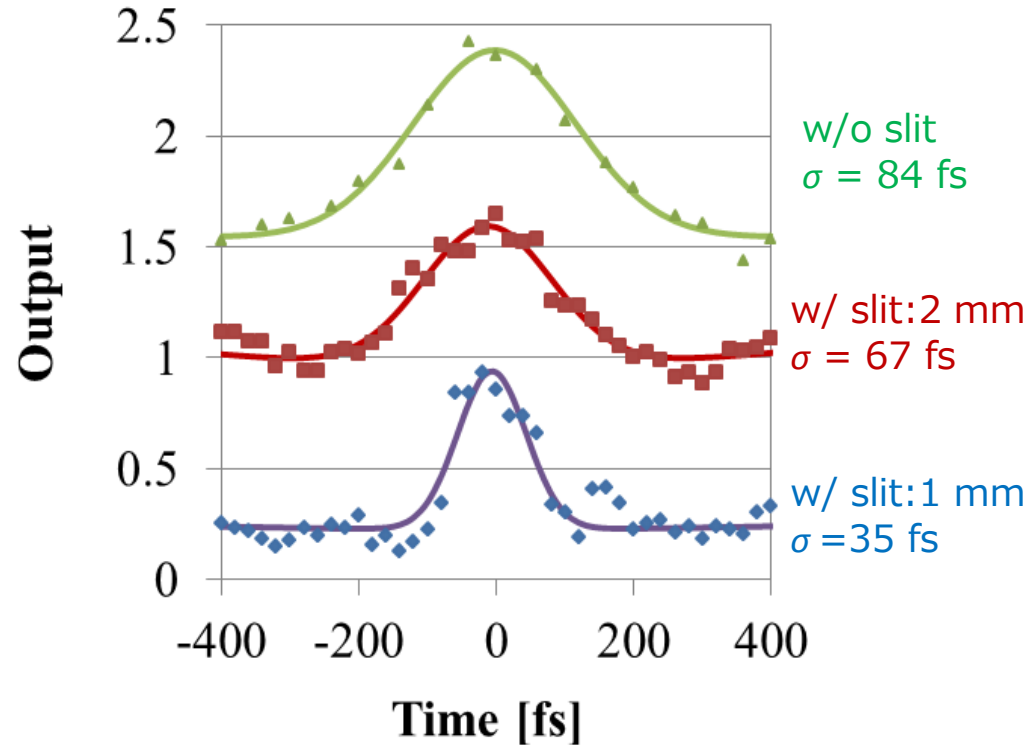
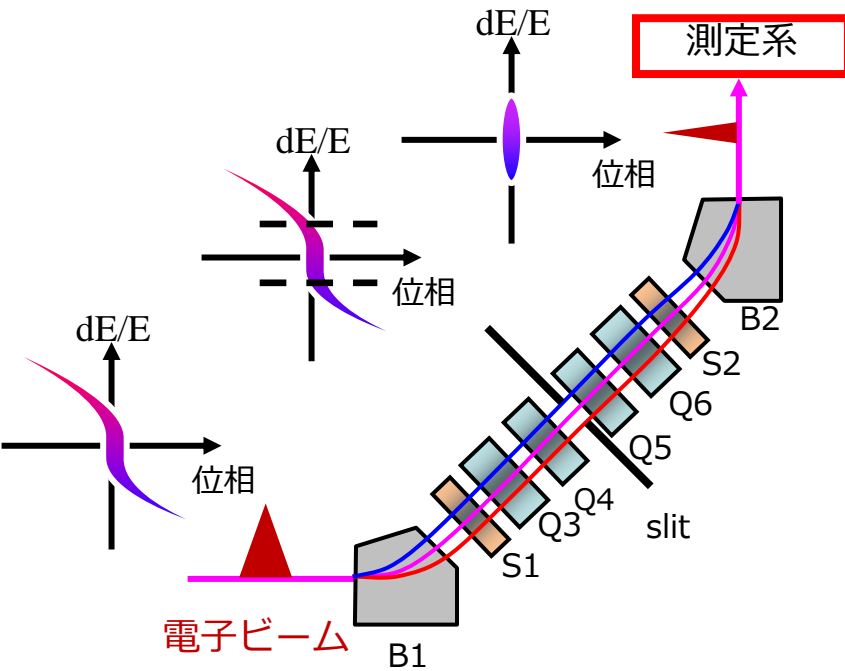


- ✓レーザー出力：15  $\mu$ J
- ✓電荷量：1.75 – 6.3 pC
- ✓パルス幅：66 – 87 fs
- ✓加速管加速位相：105 deg.
- ✓w/o slit

パルス幅の電荷量依存性

バンチ当たりの電荷量を減少させるほど、パルス幅が短くなる傾向

# スリットの導入によるパルス幅の低減



スリットを導入した磁気パルス圧縮器

スリット幅を変更した際のパルス幅依存性

1 mm幅のスリットを用いてパルス幅を35 fs まで低減 (従来: 100 fs)

# 概要

## ✓ 背景

パルスラジオリシス法

超短パルス電子ビーム

## ✓ 超短パルス電子ビーム発生法

レーザーフォトカソードRF電子銃ライナック

磁気パルス圧縮器

短パルス化のための改善点

## ✓ コヒーレント遷移放射によるパルス幅測定法

コヒーレント遷移放射

光学系・測定法の概要

## ✓ 超短パルス電子ビームパルス幅測定結果

## ✓ 結論と展望



# 結論と展望

## 結論

- CTRを用いた、従来よりも高時間分解能の電子ビームパルス幅測定法を開発した。
- 超短パルス電子ビーム発生系の改善により、35fsの電子ビームを発生した。

## 展望

- 圧縮条件の最適化により、アト秒電子ビームの発生を行う。
- パルス幅測定法を最適化し、より短パルスの電子ビームのパルス幅測定に適用できるようにする。