



ストリークカメラを用いたOTR測定による 極短電子ビームバンチ長計測

齊藤 寛峻, 柏木 茂, 日出富士雄, 武藤俊哉, 阿部太郎, 柴崎義信,
南部健一, 長澤育郎, 高橋健, 東谷千比呂, 小林恵理子, 浜広幸

東北大学 電子光物理学研究センター

第12回日本加速器学会年会

(2015年8月5日～7日 @プラザ萬象、あいあいプラザ)

1. Introduction

- ✓ Velocity Bunchingによる極短パルス電子ビーム生成

2. t-ACTSにおける極短パルス電子ビーム生成と計測

- ✓ 実験セットアップ
- ✓ OTR
- ✓ 測定結果

3. OTR光輸送により発生する時間拡がりに関する考察

- ✓ 波長分散による影響
- ✓ 集光光学系による影響

4. まとめと今後の課題

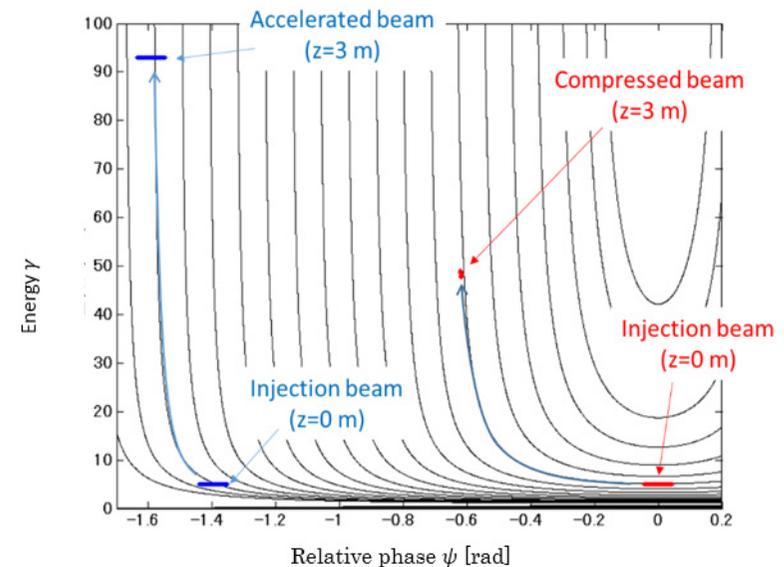
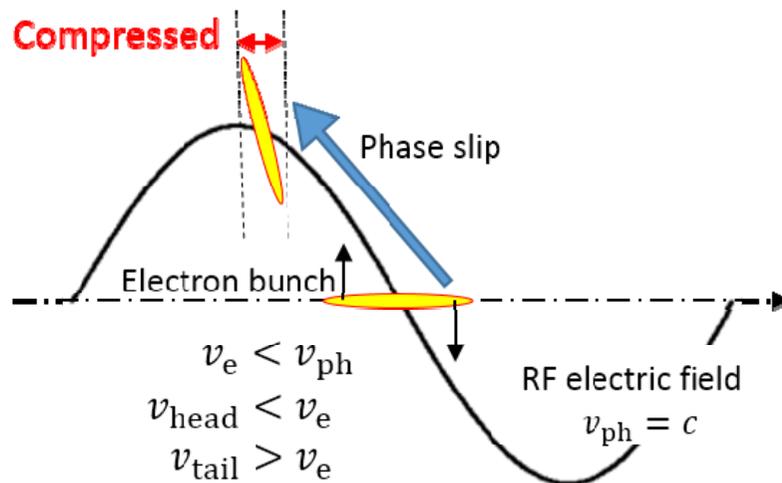
超短電子バンチ生成 (Velocity bunching)

L. Serafini and M. Ferrario, Proc. Of ICFA Workshop on the physics of, and Science with, The X-Ray Free-Electron Laser, Sept 2000.

Velocity bunching

- 進行波型加速管のRFの位相速度よりわずかに遅い速度 ($v_{\text{beam}} < v_{p,\text{RF}}$) でビームを加速管に入射

➡ 電子ビームの縦方向位相空間分布は、加速管の中で phase slip をしながらバンチ圧縮され、同時に加速される。

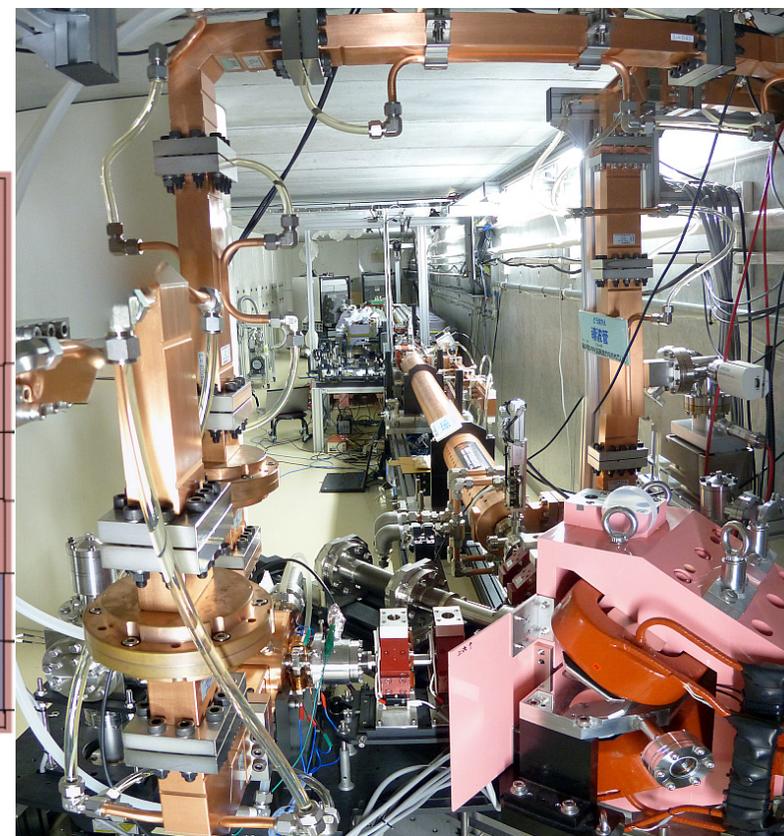
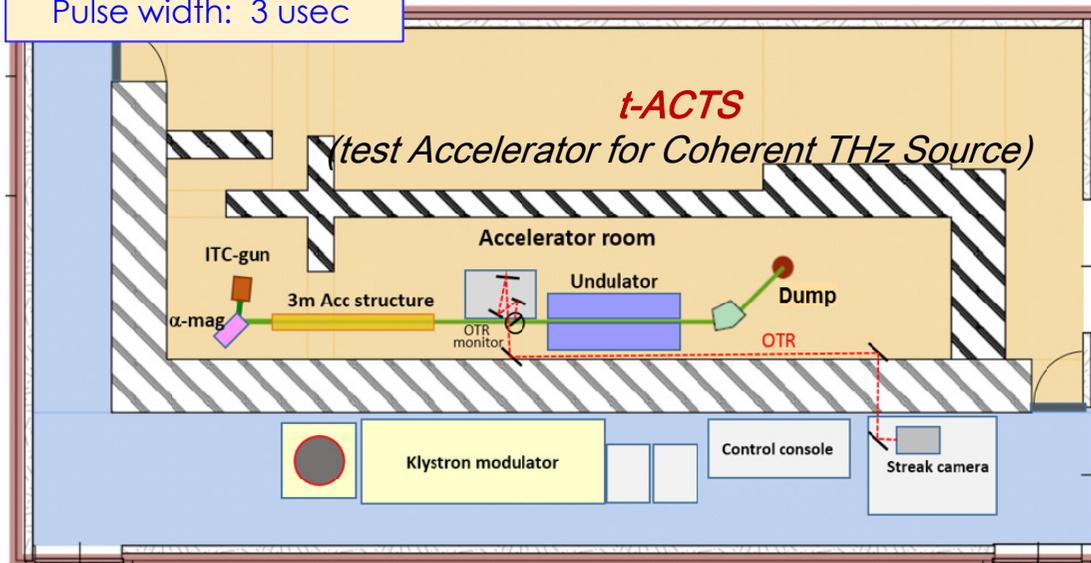


t-ACTSにおける超短電子バンチ生成と計測

- バンチ長計測： OTR光をストリークカメラを使い測定
(ビームの加速管への入射位相をパラメータにしバンチ長を測定)

Beam parameters

Energy: 50 MeV(max)
Peak current: 60 mA
Pulse width: 3 usec



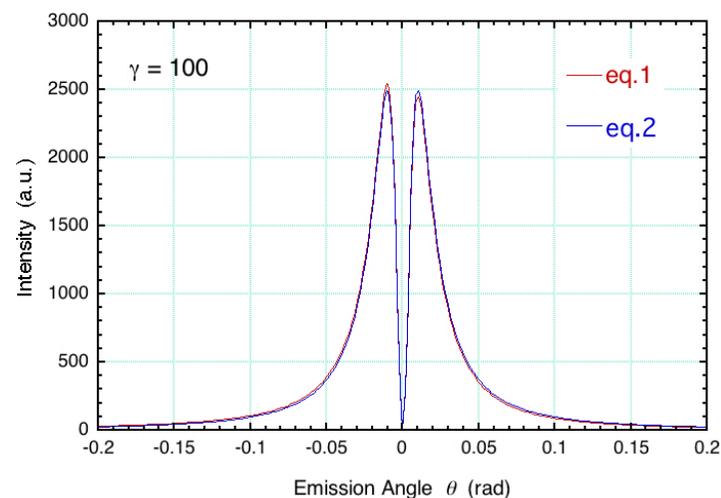
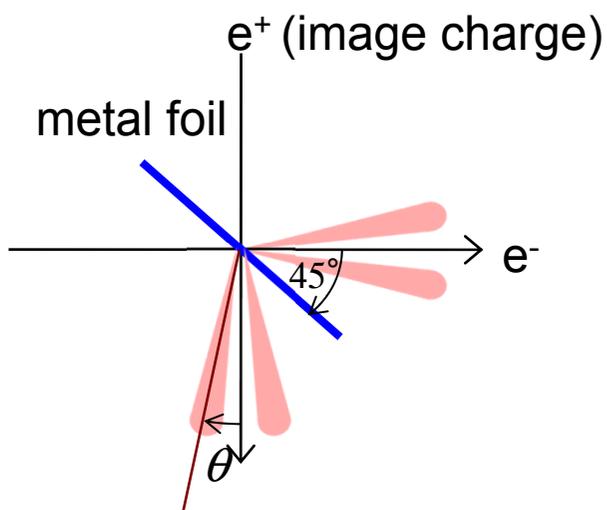
遷移放射光 (OTR)

Exact formula of OTR

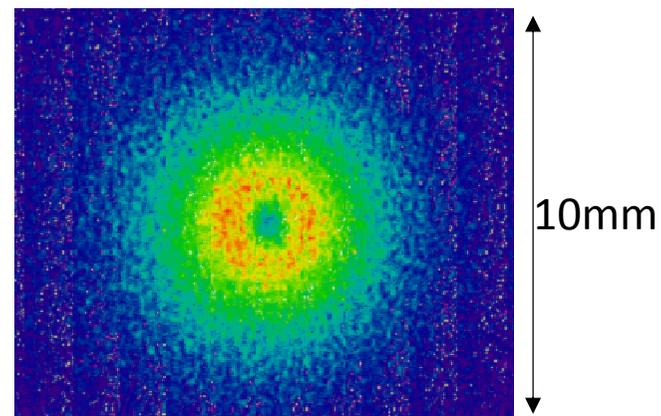
$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2}{4} \left| \frac{-\cos \theta}{1 + \beta \sin \theta} + \frac{\sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \right|^2 \quad (\text{eq. 1})$$

Ginzburg-Frank Formula

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2} \quad (\text{eq. 2})$$

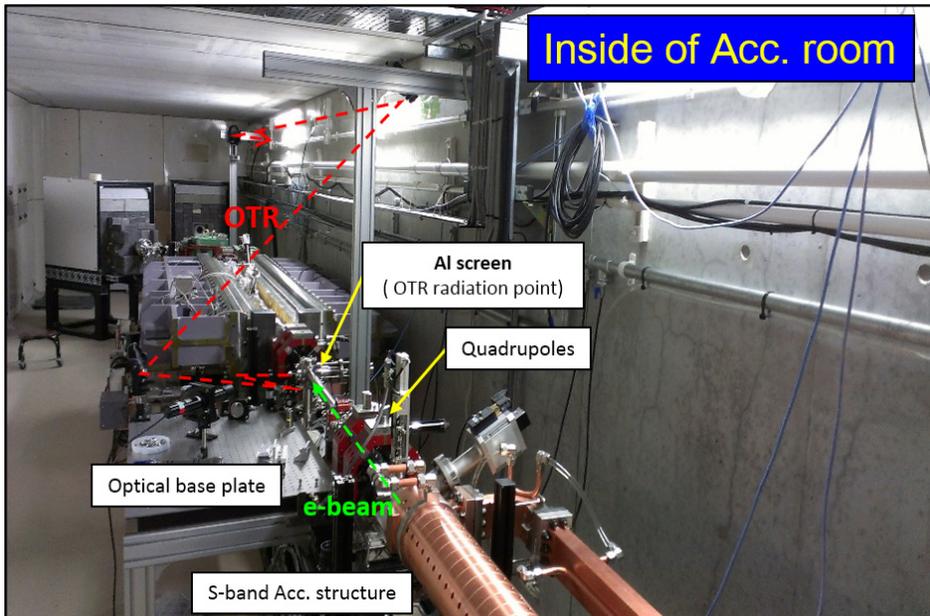
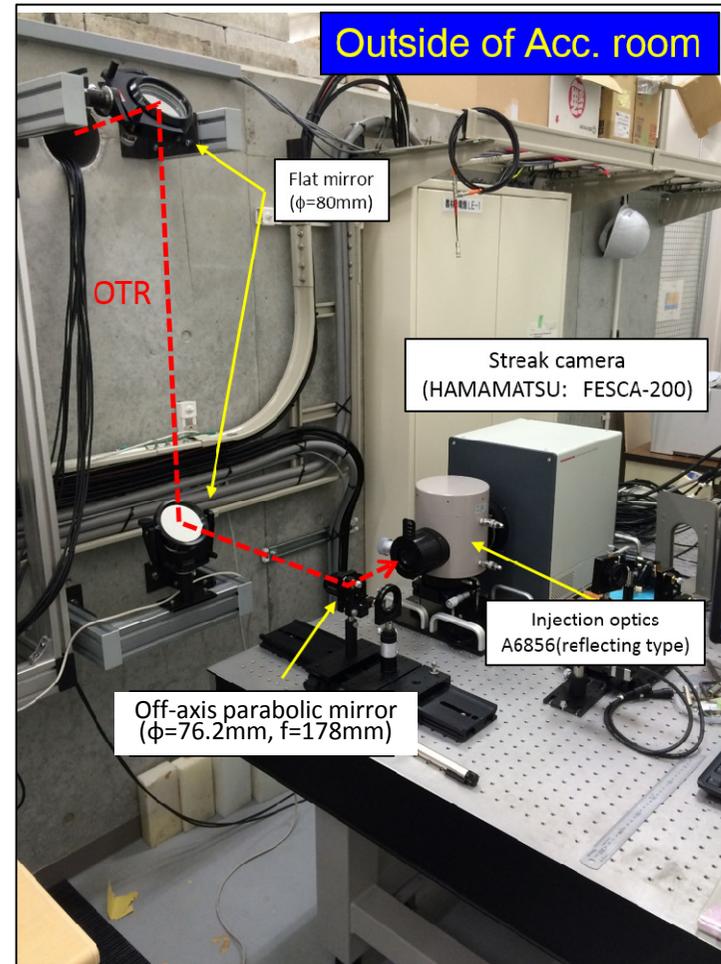
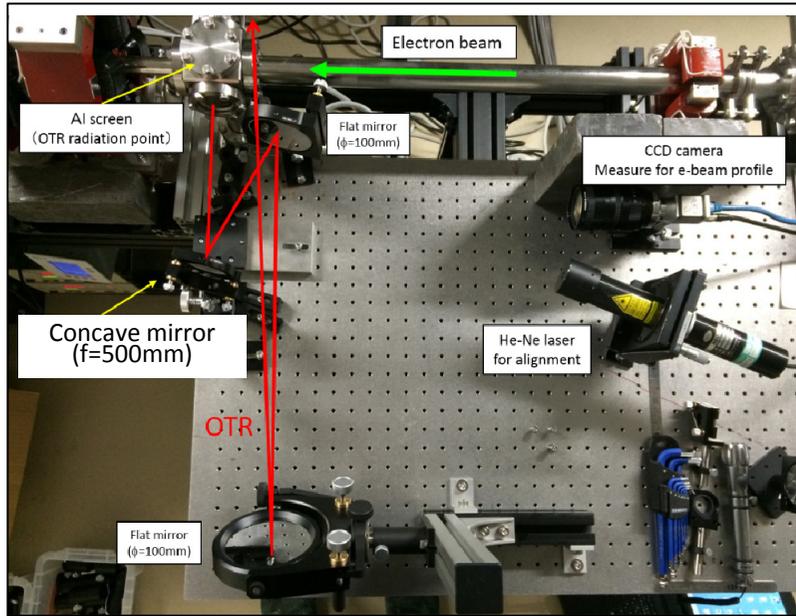


- $1/\lambda$ に比例する広い波長スペクトルをもつ。
- OTRは電子ビームのエネルギーに依存した発散角を持つ。
- ストリーク光輸送系に集光素子が必要。



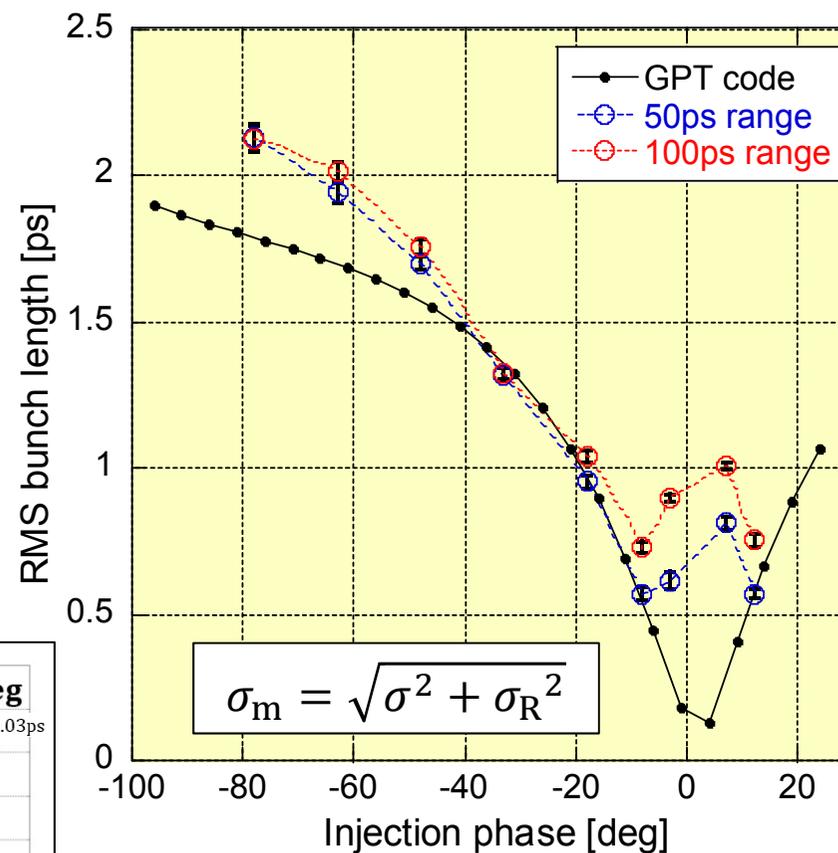
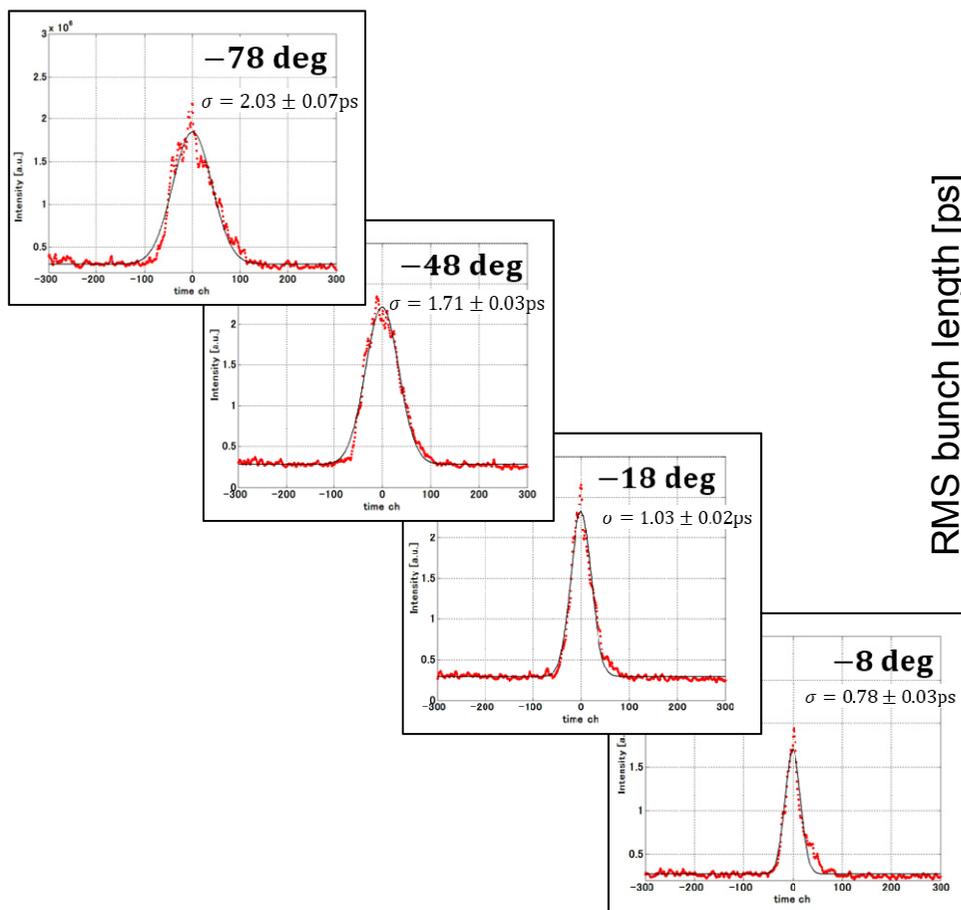
OTR image (I.I. camera)

OTR光輸送系



✓ OTR optical path length: $\sim 10\text{m}$

バンチ長測定結果



- これまで測定の時間分解能として考慮していたもの
 - ストリークカメラのスリット幅の影響

Measured range	Temporal resolution
100 ps range	1.05 ps
50 ps range	0.37 ps

OTR光輸送により発生する時間拡がりに関する考察

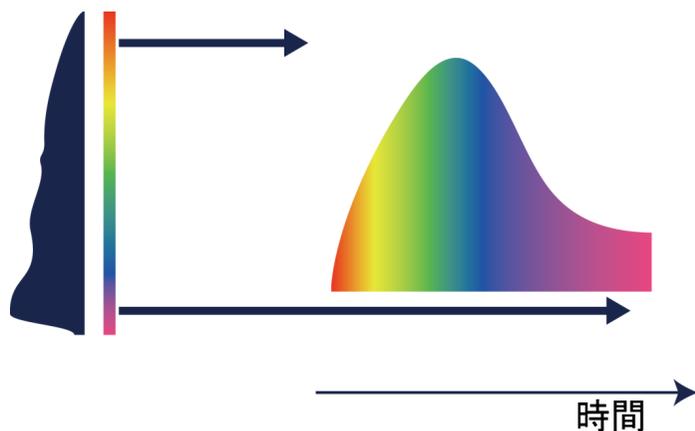
1. 波長分散による時間拡がり
 - 空気の屈折率
 - 光輸送系の透過率(真空窓、ミラー)
 - ストリークカメラ光電面の量子効率
2. 集光光学系による時間拡がり
 - 凹面鏡・軸外し放物面鏡の収差

空気中の分散による時間拡がりへの影響

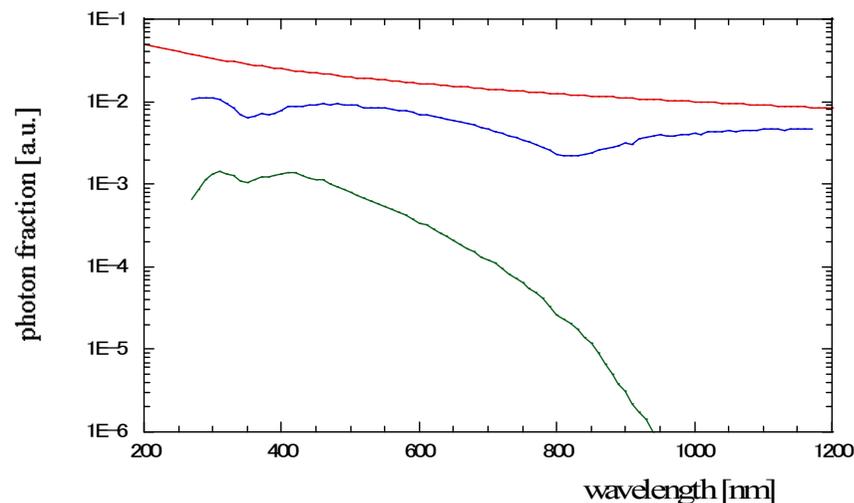
空気中の分散による広がりへの影響

短い波長ほど屈折率が大きくなるので、時間がかかる

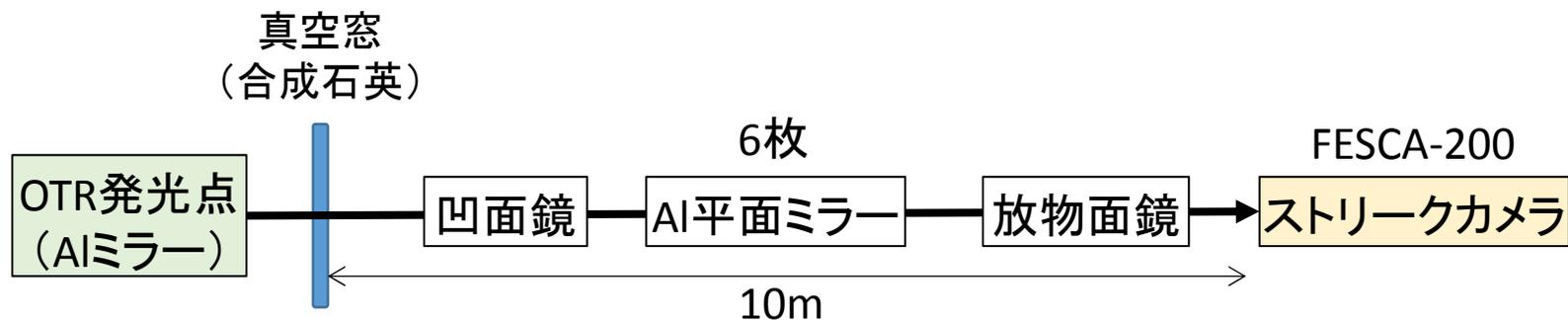
OTRのスペクトル
+ 光素子の特性



OTRの各波長成分が同時に放出されたとしても、分散により時間拡がりを生じる



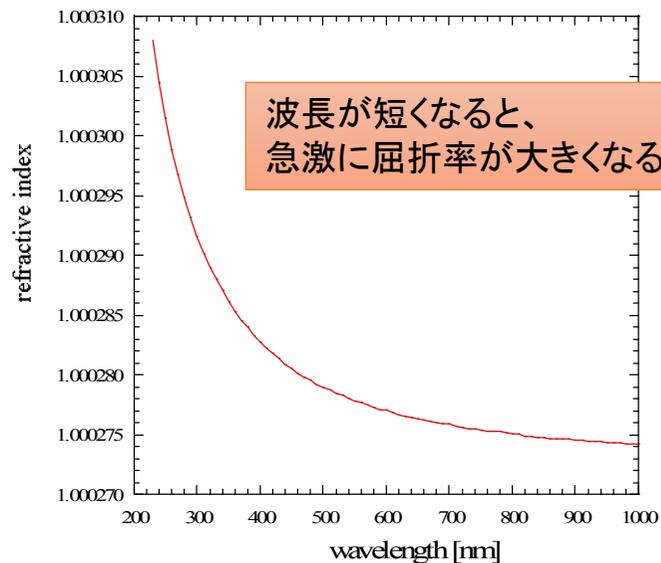
赤: OTRの波長スペクトル($\sim 1/\lambda$)
 青: 赤 \times 窓の透過率 \times ミラーの反射率
 緑: 青 \times ストリークの量子効率



空気中の分散による時間拡がりへの影響

標準空気の屈折率

dry air at 15 °C, 101 325 Pa
and with 450 ppm CO₂ content

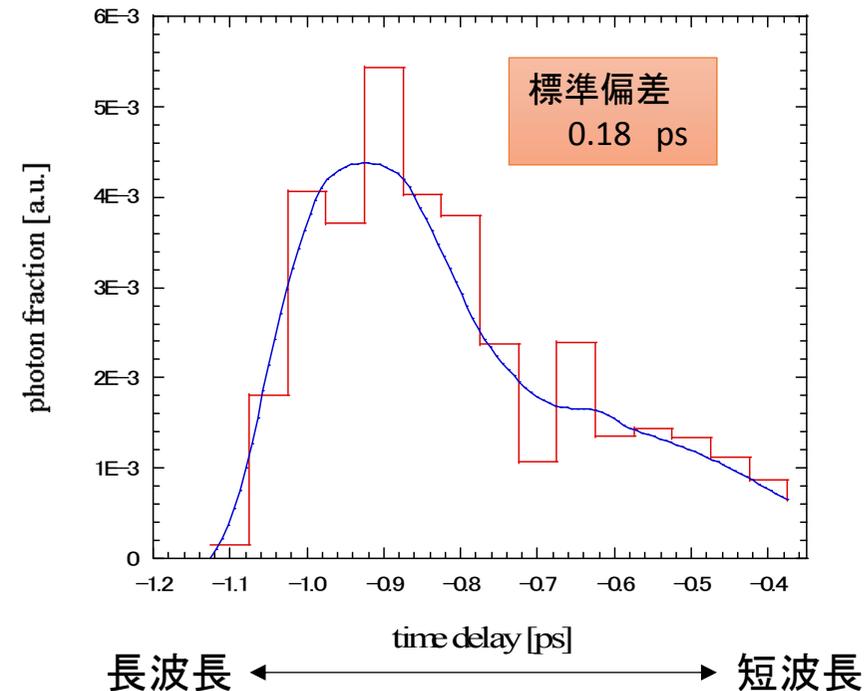


波長に依存して空気の屈折率が違うために、10m先で生じる光の到達時間の差

$$t_{delay} = \frac{L_{path} \times n}{c} - t_0$$

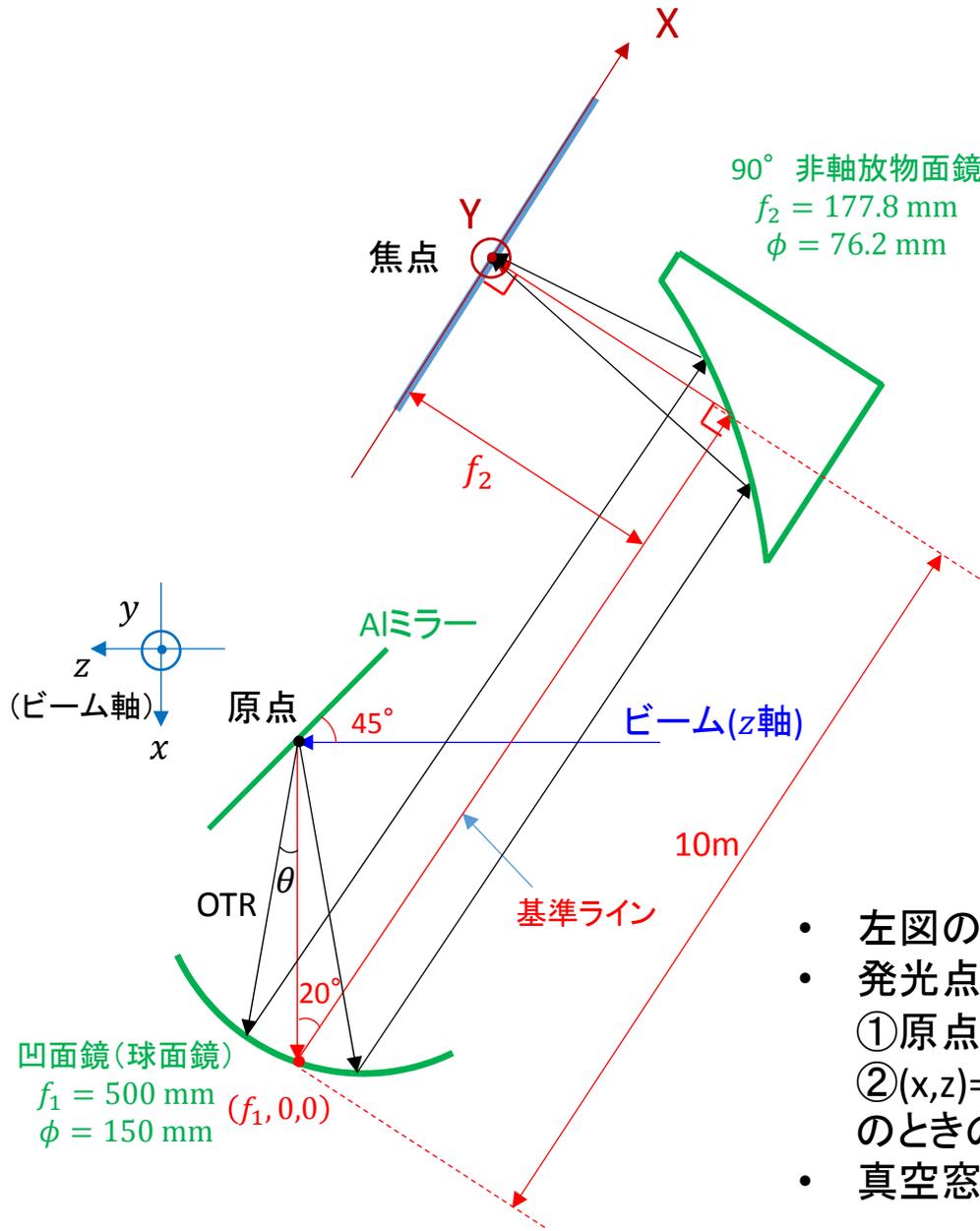
L_{path} : 光路長 (10 m)
 n : 屈折率
 c : 光速
 t_0 : 基準時間 @230 nm

空気の分散によるOTRの時間拡がり



- * 空気の分散で **180 fs** 程度広がる
- * 波長にして300~500 nm程度の光が最も光量が多いが、~300 nm以下の短波長の光は後ろのテールへの寄与が大きい

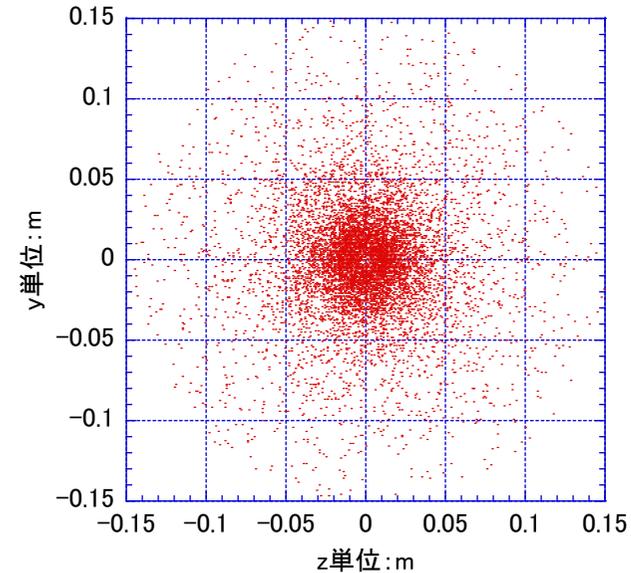
OTR集光光学系による時間拡がりへの影響(評価方法)



Ginzburg-Frank Formula

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{e^2}{4\pi^3 \epsilon_0 c} \frac{\beta^2 \sin^2 \theta}{(1 - \beta^2 \cos^2 \theta)^2}$$

面x=1mでのOTR分布



- 左図のようなOTR集光光学系で3次元レイトレーズを行った
- 発光点が
 - ①原点(ずれがないとき)
 - ② $(x,z)=(1\text{mm},1\text{mm})$
 のときの時間拡がり进行评估
- 真空窓と平面ミラーは考慮していない

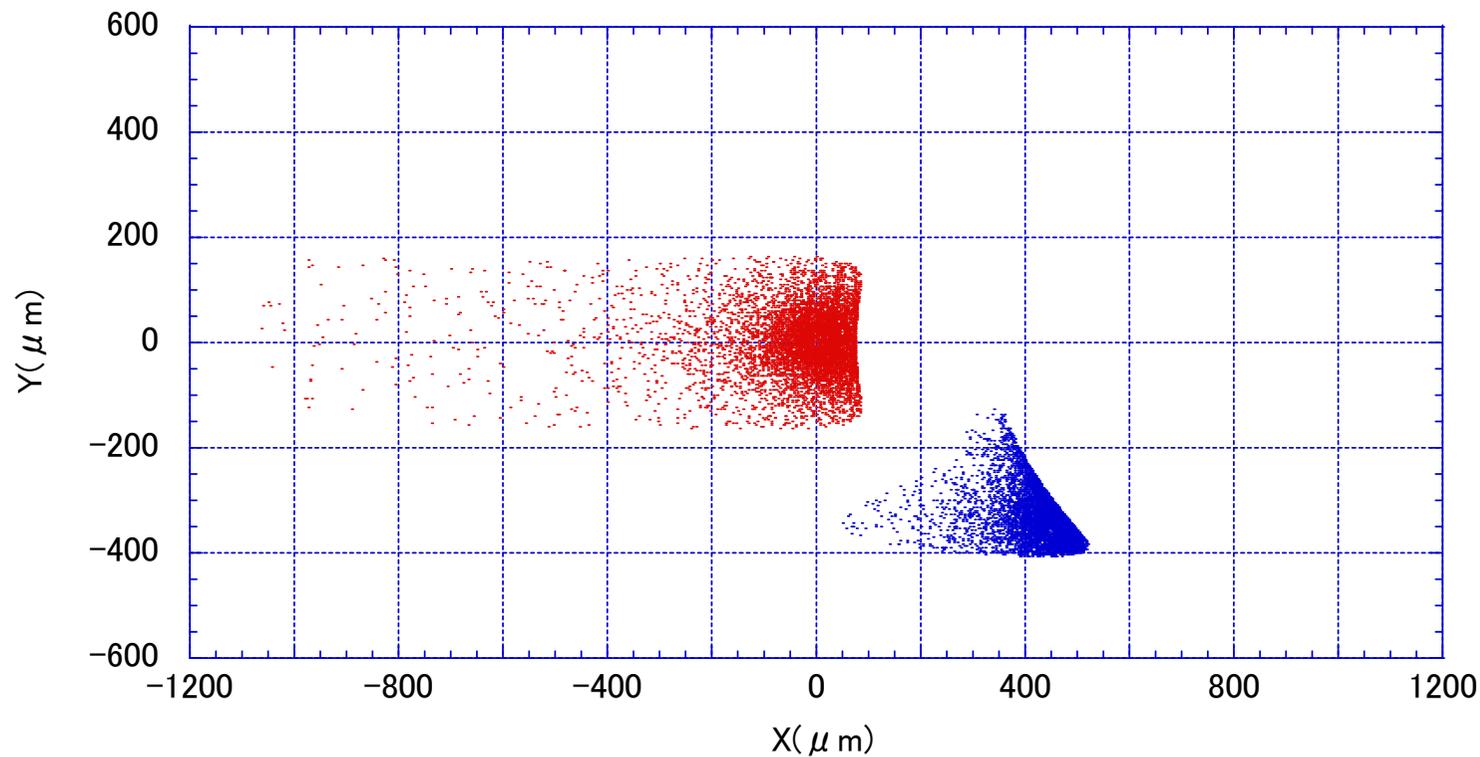
XY面でのプロファイル

発光点のずれがないとき

X方向: $\sigma = 53.0 \mu\text{m}$ 中心= $10.3 \mu\text{m}$
Y方向: $\sigma = 61.2 \mu\text{m}$ 中心= $0.956 \mu\text{m}$

発光点のずれが
 $\Delta x = \Delta z = 1\text{mm}$ のとき

X方向: $\sigma = 45.4 \mu\text{m}$ 中心= $435 \mu\text{m}$
Y方向: $\sigma = 48.5 \mu\text{m}$ 中心= $-349 \mu\text{m}$

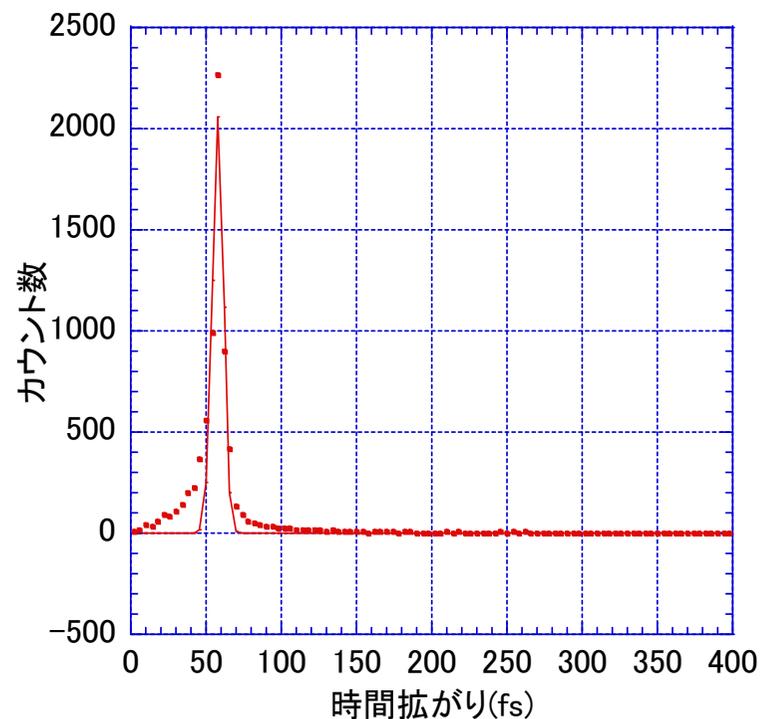


時間拡がり

発光点のずれがないとき

鏡のサイズ内に入る割合
 凹面鏡: 86%
 放物面鏡: 74%

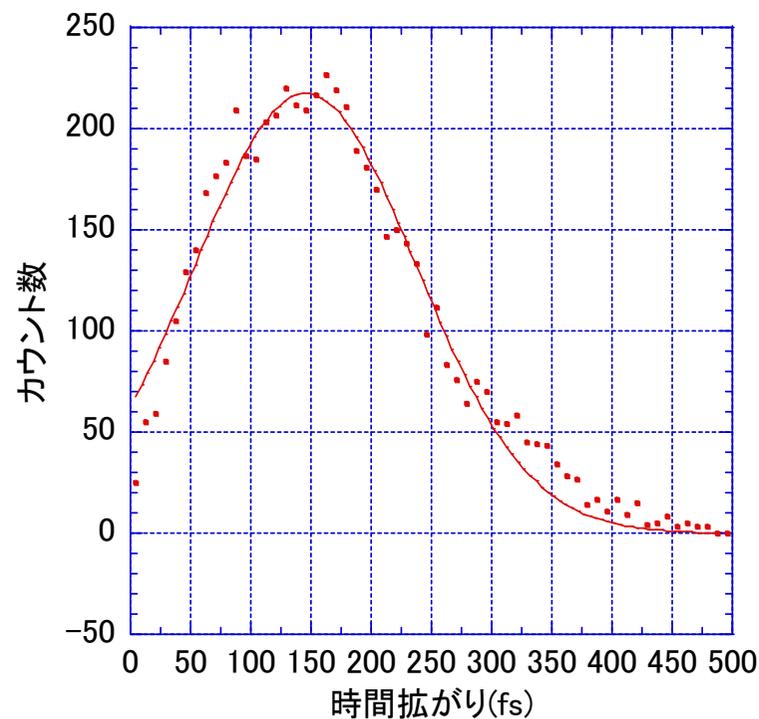
時間拡がり: $\sigma = 3.80$ fs



発光点のずれが
 $\Delta x = \Delta z = 1$ mmのとき

鏡のサイズ内に入る割合
 凹面鏡: 86%
 放物面鏡: 58%

時間拡がり: $\sigma = 92.4$ fs



まとめと今後の課題

- OTR光をストリークカメラで計測し、サブピコ秒時間幅の電子バンチの生成を確認した。しかし、測定されたバンチ長はシミュレーションの予測よりも長く、測定システムにOTRの時間幅を拡げている要因がないか考察した。
- 波長分散が測定時間幅に与える影響について考察を行い、約180 fsの時間拡がりが生じていることが分かった。
- 集光光学系が測定時間幅に与える影響について考察を行い、光源サイズとアライメントエラーがない場合には約4 fsの時間拡がりが生じるが、光源位置が1 mmずれると約90 fsの時間拡がりが生じることがわかった。
- アライメントエラーがある場合の集光光学系がOTRの測定時間幅に与える影響大きさについてはまだ見積もり切れしておらず、更に考察を進める必要がある。
- しかし今回評価を行った波長分散、集光光学系の影響だけではシミュレーションと実験でのバンチ長のずれは説明できず、別の原因があるかVelocity Bunchingが正しく行われていないということが考えられる。