

# Attosecond X ray pulse generation using EEHG

K. Ohmi (KEK)

Compact ERL Science workshop

July 30-31, 2012

Acknowledge to S. Kamada, S. Adachi

# Introduction

- $10 \text{ asec} = 10^{-17} \text{ sec}$ ,  $ct = 3 \text{ nm}$ ,  $\lambda < 3 \text{ nm}$
- バンチ長  $3 \text{ nm}$  は難しい
- それでバンチ内の  $\sim \text{nm}$  の領域に微少密度構造を作り、パルス長  $\sim \text{nm}$  コヒーレント光を放出させる。
- バンチのそれ以外の部分からはインコヒーレント光が出るが弱い。

# どのようにして微小構造を作るか

## 1. 短パルスレーザー

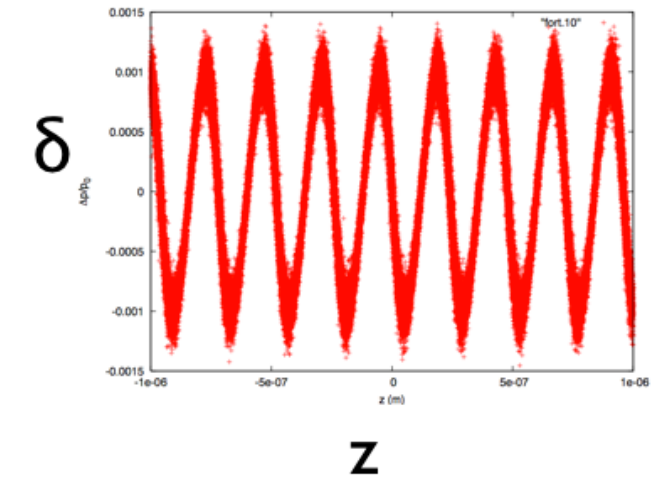
例えば Ti-Sapphire laser 800nm,  $\sigma_t < 10$  fsec,

## 2. Beam Echo, Echo Enabled Harmonic Generation

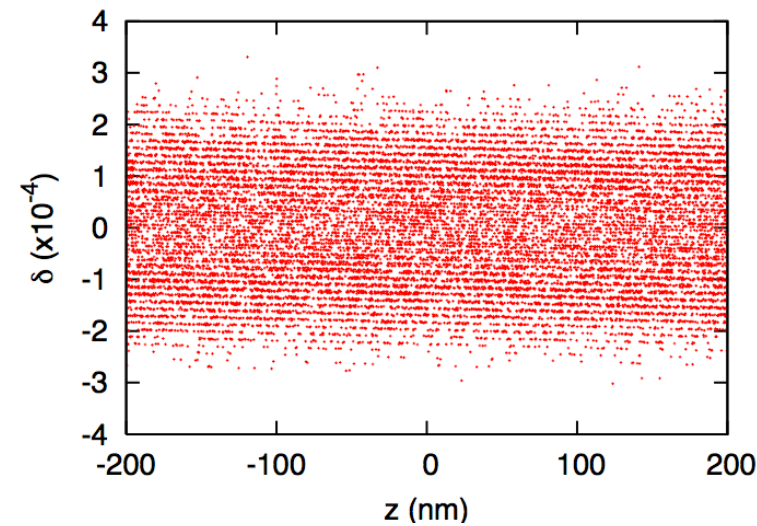
# Echo Enabled Harmonic Generation

G. Stupakov, PRL 102 (2009)

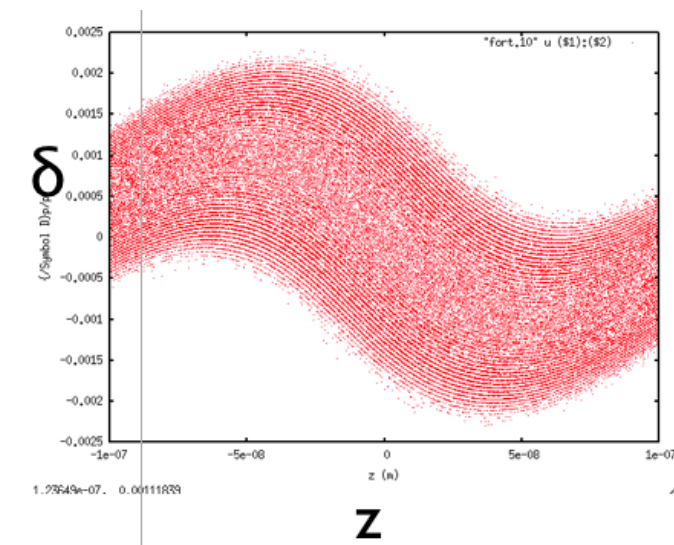
1. Laser beam interaction in undulator



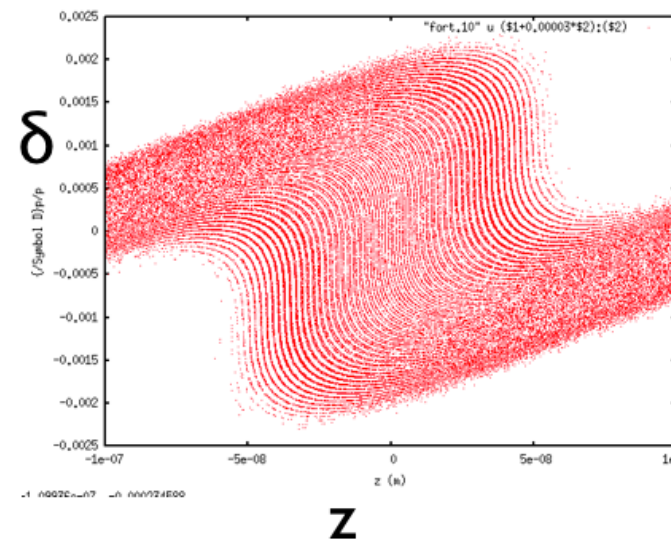
2. Large Slippage



3. Laser beam interaction in undulator



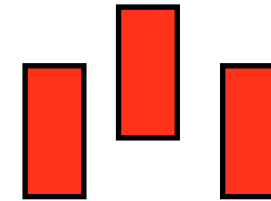
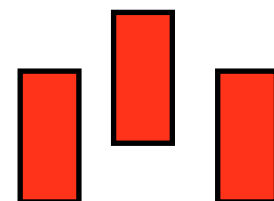
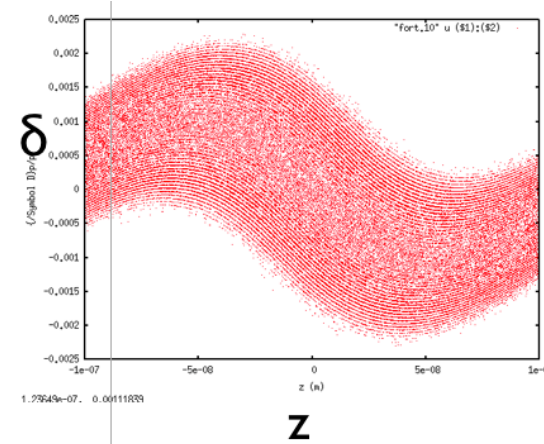
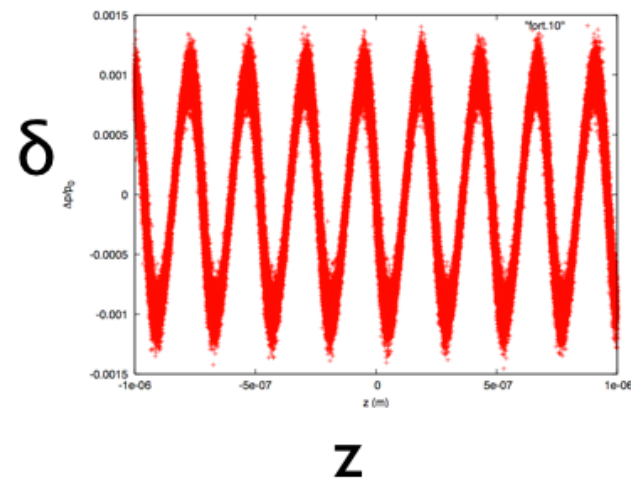
4. Short Slippage



5. Harmonic generation

点は各電子の進行方向位相空間位置( $z, \delta = \Delta p/p$ )

# アンジュレータとslippage section R<sub>56</sub>の 組み合わせ



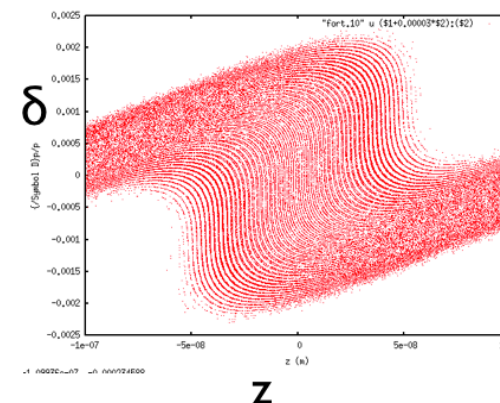
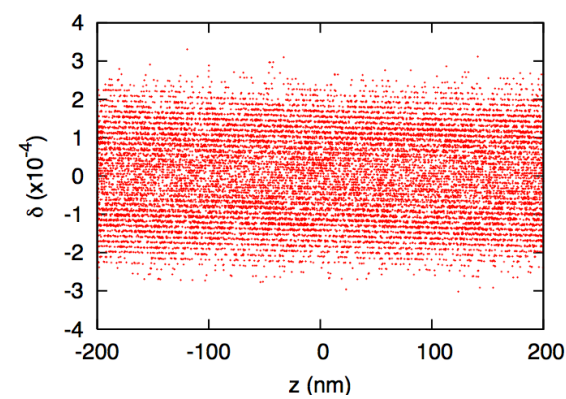
Laser 1

R<sub>56</sub><sup>(1)</sup>

Laser 2

R<sub>56</sub><sup>(2)</sup>

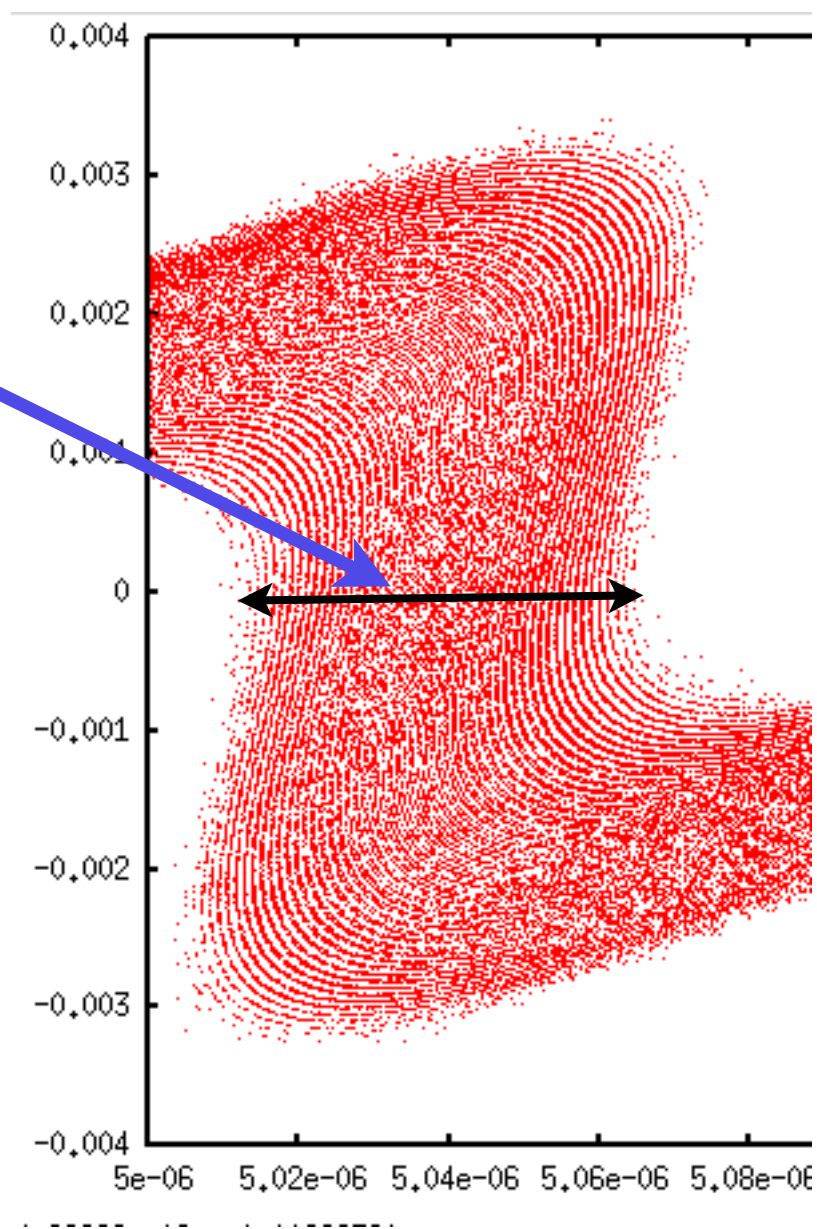
Harmonic generation



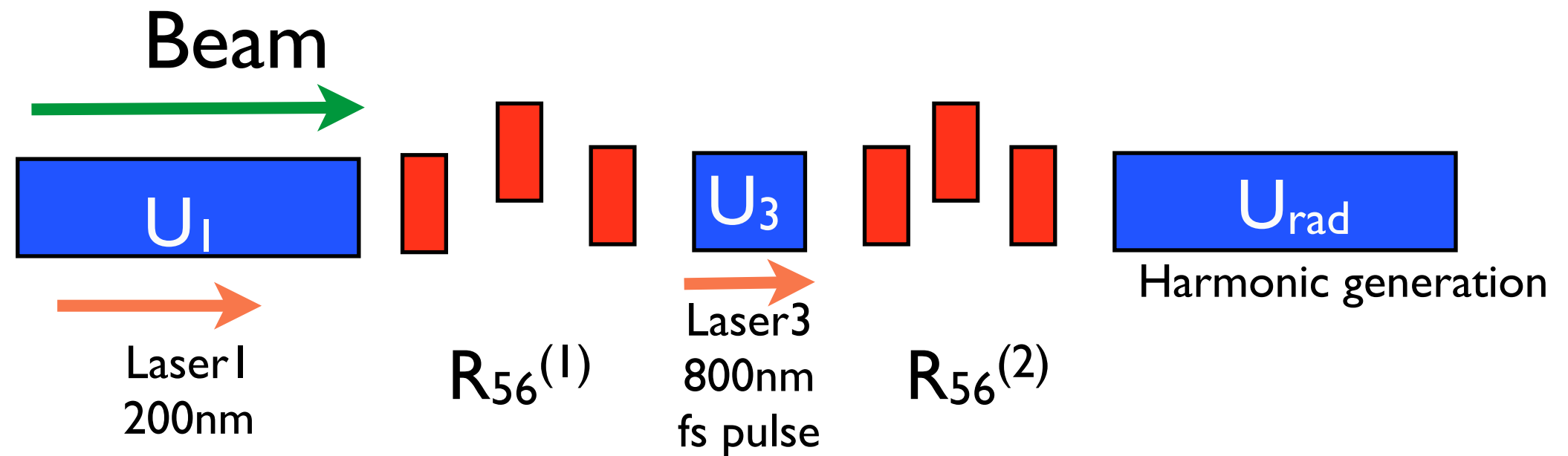
# Atto-sec pulse generation

D. Xiang et al., PRST-ABI 2 (2009)

- パルス長として使う。
- EEHGでは長パルスレーザーを用いるためレーザー周波数のコヒーレント光のマイクロパルスの繰り返し。
- 短パルス高強度レーザーにより単パルス発生



# Parameters ERL



- $E=3$  GeV
- $N_e=6.25 \times 10^8$ ,  $\sigma_z=0.1$  mm,  $I=300$  A
- $\gamma\epsilon=1$  mm mrad
- Energy spread  $\sigma_{\Delta E}=600$  keV,  $\sigma_{\Delta E}/E=2 \times 10^{-4}$
- U1 and U2 :  $\lambda_U=25$  cm 10 period
- U3 :  $\lambda_U=20$  cm 2 period

# Laser beam interaction at U<sub>1</sub>

- E=3GeV,  $\lambda_L=200$  nm
- $\lambda_u=0.25$ m,  $a_u=7.36$ ,  $B_u=0.315$ T,  $L_u=1.5$ m

$$\frac{cB_{u,y}}{E_0} = \frac{1}{\gamma} \frac{\partial a_{u,x}}{\partial s} = -\frac{a_u k_u}{\gamma} \sin k_u s \quad a = \frac{e}{mc} \begin{pmatrix} A_x \\ A_y \end{pmatrix}$$

- z- $\delta$  運動  $H = \frac{1}{2\gamma_z^2} \delta^2 + \frac{a_u a_L}{2\gamma^2} \cos(k_L z + \phi)$

$$\Delta\delta \sim \frac{a_u a_L}{2\gamma^2} k_L L_u$$

- $\frac{\Delta\delta}{\sigma_\delta} = 3$  になるようレーザーでモジユ

レーションをかける。  $a_L=7.2 \times 10^{-5}$

$$\frac{\Delta\delta}{\sigma_\delta}$$

1以上だが $\Delta\delta$ を大きくしたくない。最終的にパルス長に効く



# Beam distribution after $U_1$

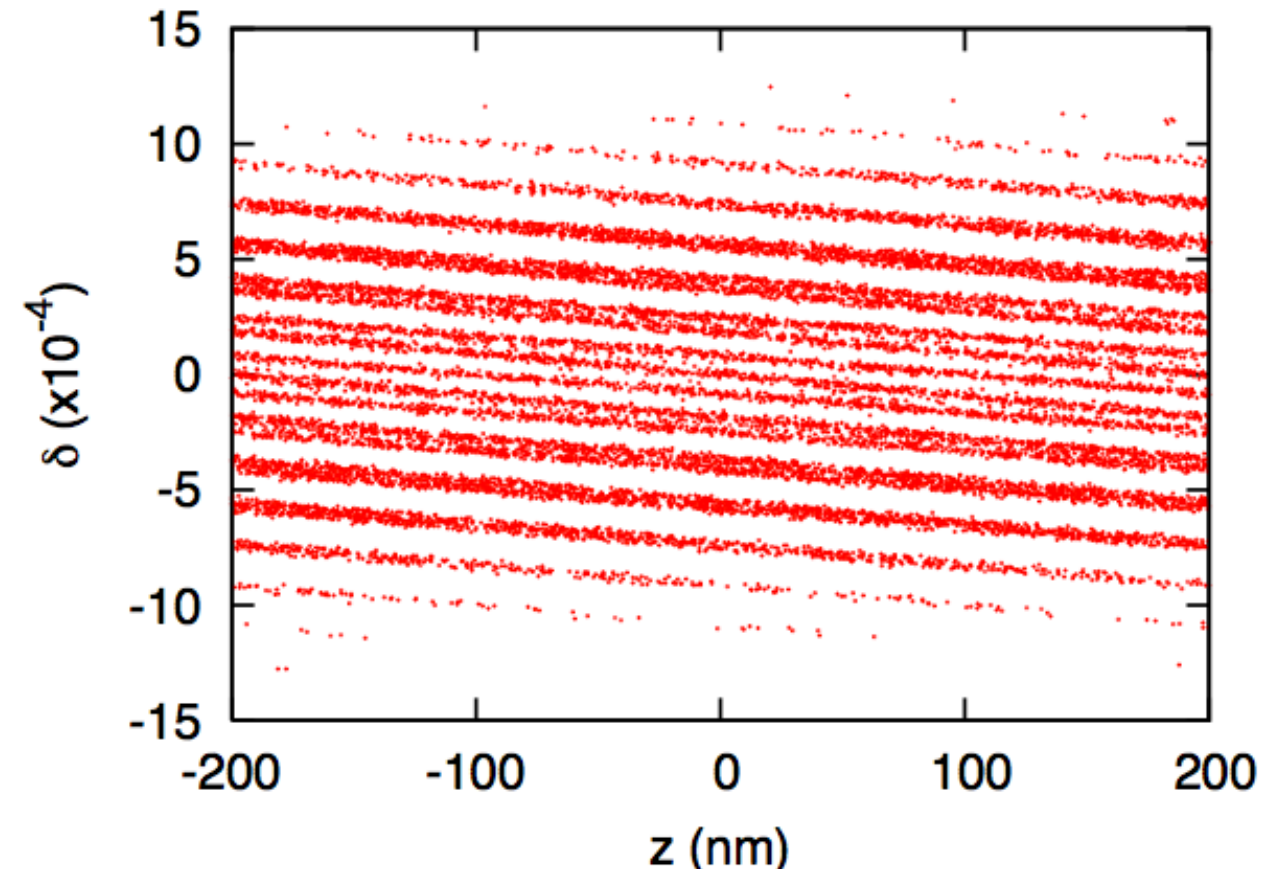
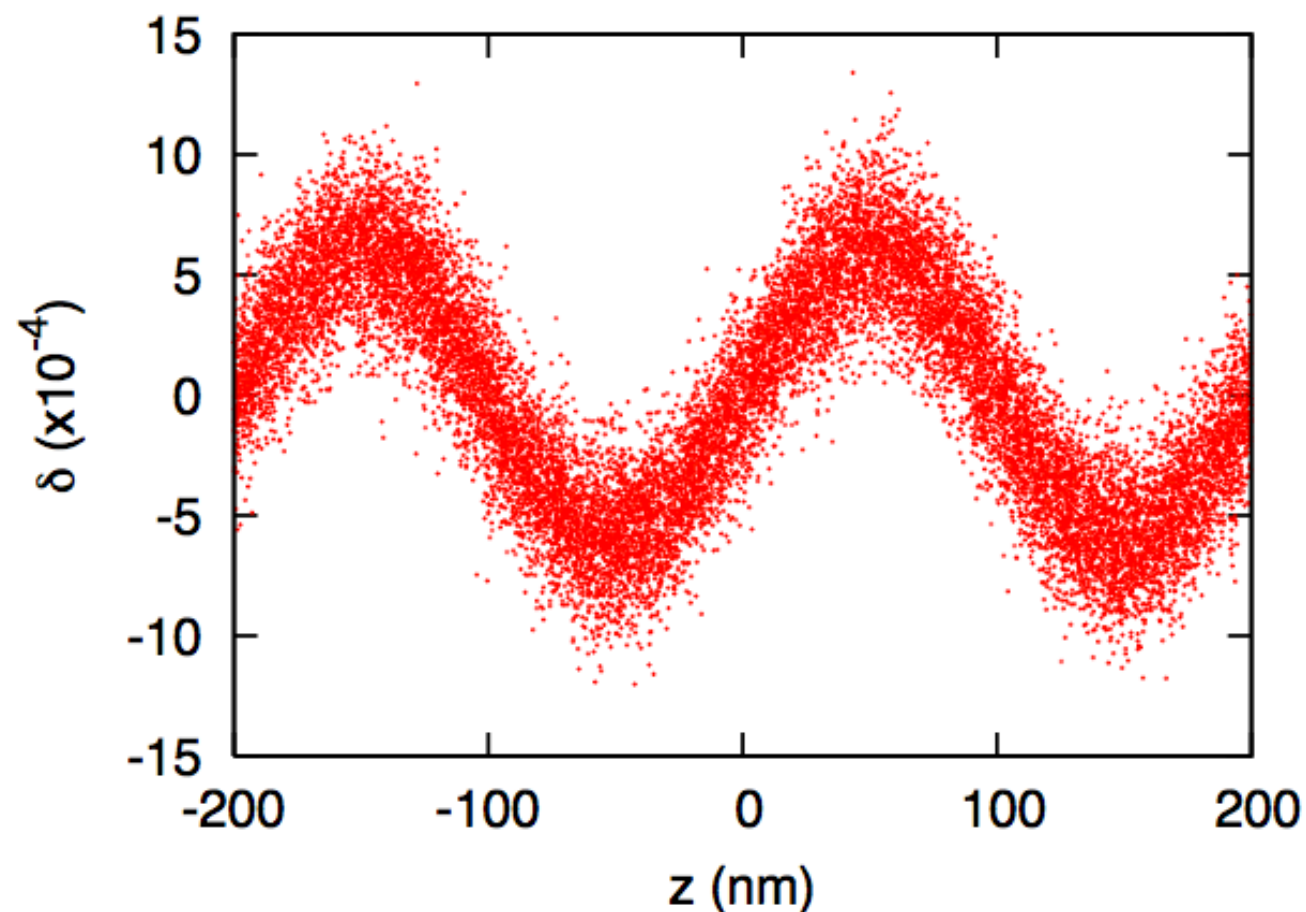
- $a_{L,1} = 7.2 \times 10^{-5}$ ,  $\Delta\delta / \sigma_\delta = 3$

$P = 0.26 \text{ mJ}$ ,  $260 \text{ MW}$

Slippage  $R_{56}^{(1)} = 1.1 \text{ mm}$

$$k_L \Delta\delta R_{56}^{(1)} = 22 \text{ にとる。}$$

~縞の数  $\pi$ などの係数あり

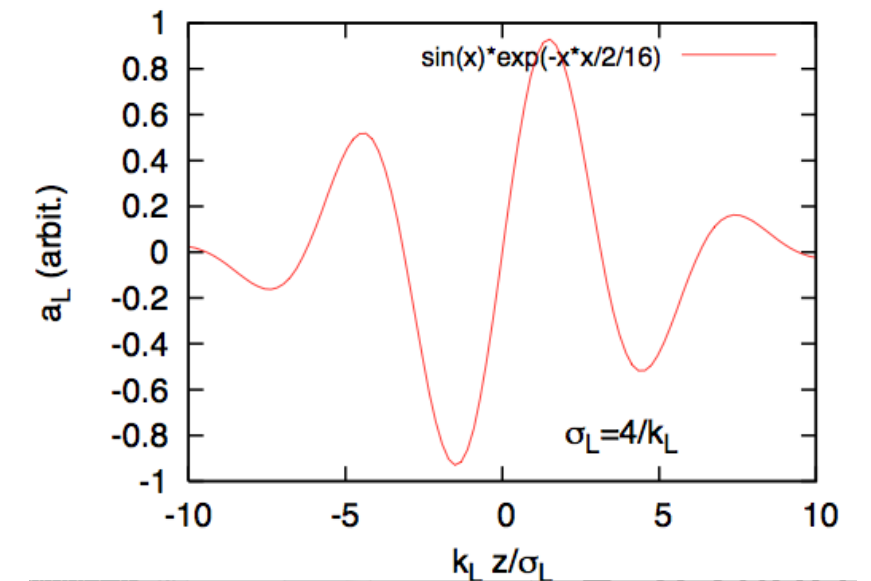


# 極短パルス発生

- 上述の方法でバンチ内に横縞(エネルギー方向)を作る。
- 短パルス(~10 fs)高強度レーザーを使い、ビームの一部に大きなChirpを作る。

$$H = \frac{1}{2\gamma_z^2} \delta^2 + \frac{a_u a_L}{2\gamma^2} e^{-z^2/2\sigma_L^2} \cos(k_L z + \phi)$$

- Slippageにより縦縞に変換、 attosecパルス発生

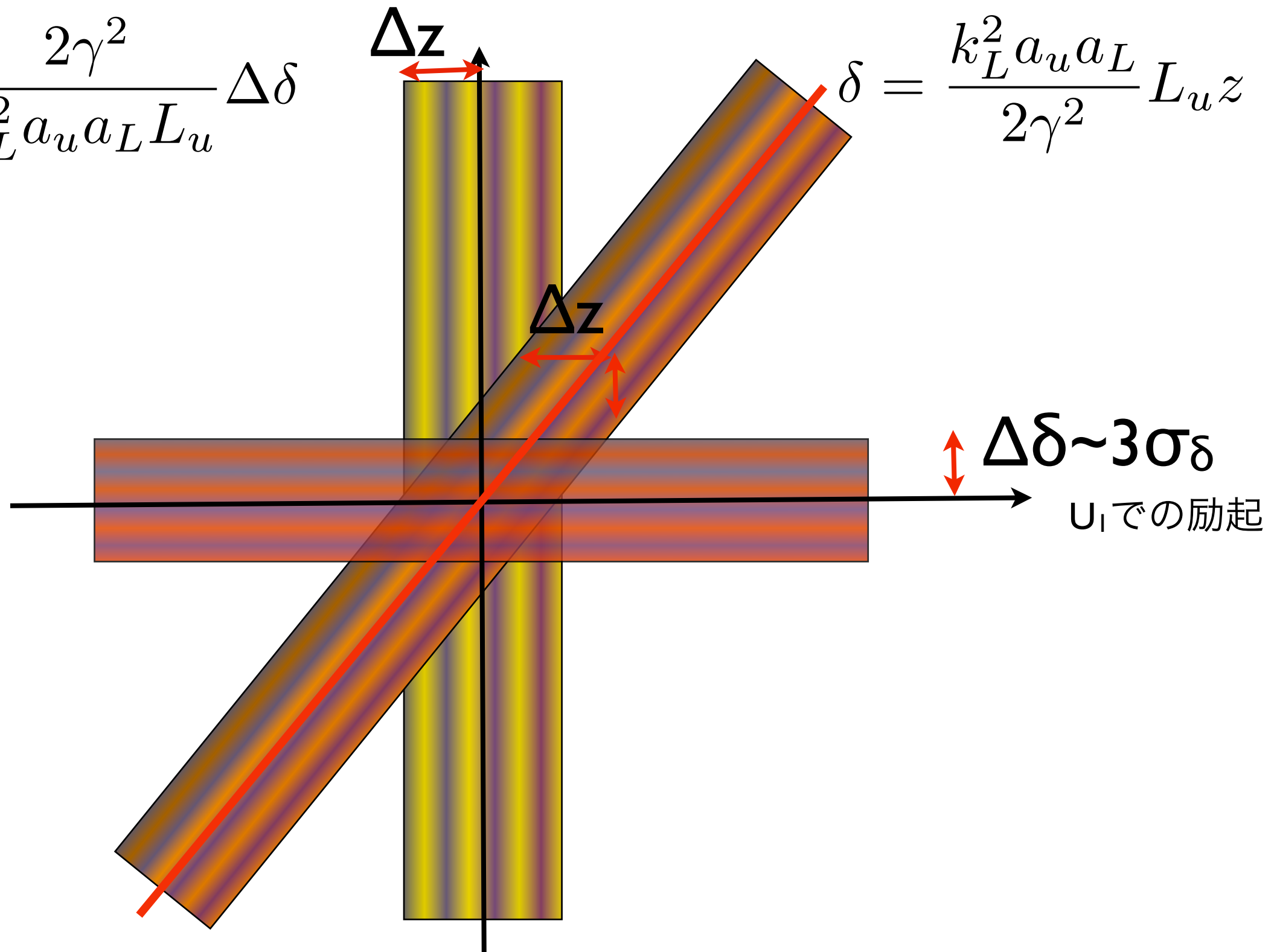


# パルス長 $\Delta z$

- Energy spread  $6 \times 10^{-4}$  のビームを位相空間内で立てる

$$\Delta z = \frac{2\gamma^2}{k_L^2 a_u a_L L_u} \Delta \delta$$

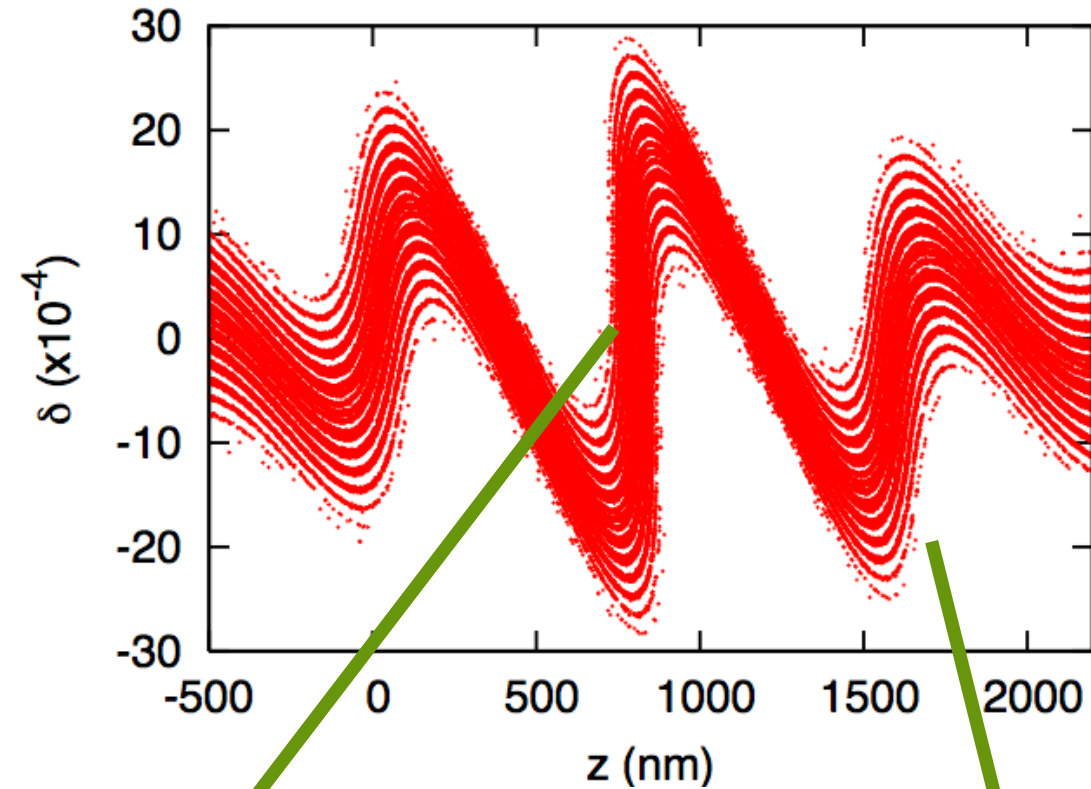
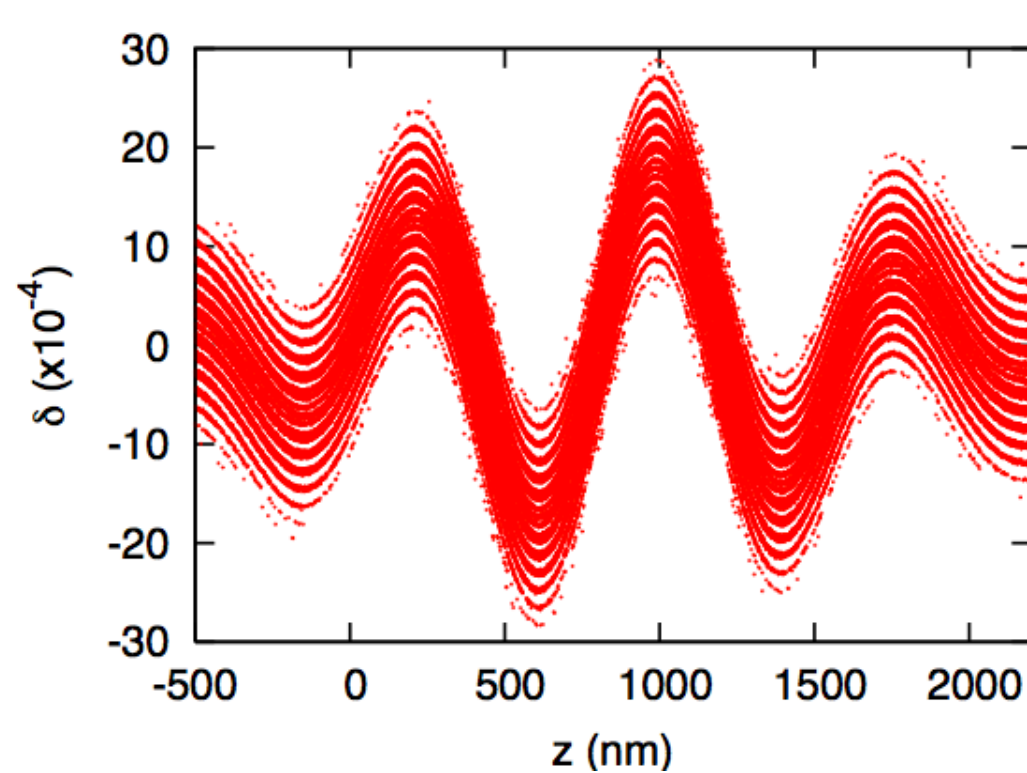
$$\delta = \frac{k_L^2 a_u a_L}{2\gamma^2} L_u z$$



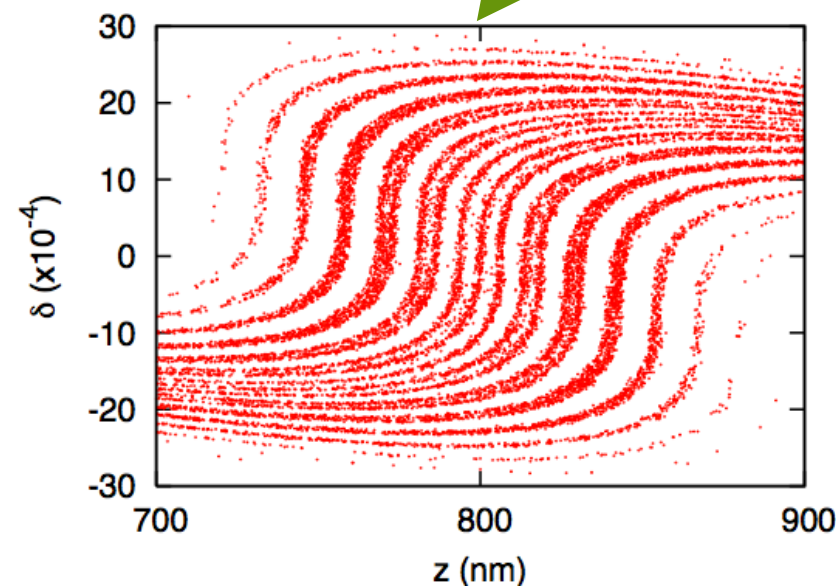
# パルス発生パラメータ

- ビームエネルギー広がり  $\sigma_\delta=2\times 10^{-4}$ .
- 高強度レーザーとして $\lambda_L=800\text{nm}$  (Ti-sapphire).  
パルス長  $\sigma_L=500\text{nm}=1.7\text{ fs}$ ,  $\sigma_{r,L}=0.18\text{mm}$
- アンジュレータ  $\lambda_u=20\text{cm}$ , 2極, 長さ40cm
- 100asec,  $a_L=0.0033$ ,  $P=0.19\text{mJ}$ , 19GW,  $R_{56}^{(2)}=0.075\text{mm}$
- 30asec,  $a_L=0.011$ ,  $P=2.2\text{mJ}$ , 216GW,  $R_{56}^{(2)}=0.022\text{mm}$
- 10asec,  $a_L=0.034$ ,  $P=19.\text{mJ}$ , 1.9TW,  $R_{56}^{(2)}=0.01\text{mm}$
- 10asec,  $\sigma_\delta=0.5\times 10^{-4}$ ,  $a_L=0.01$ ,  $P=1.2\text{mJ}$ , 122GW,  $R_{56}^{(2)}=0.025\text{mm}$

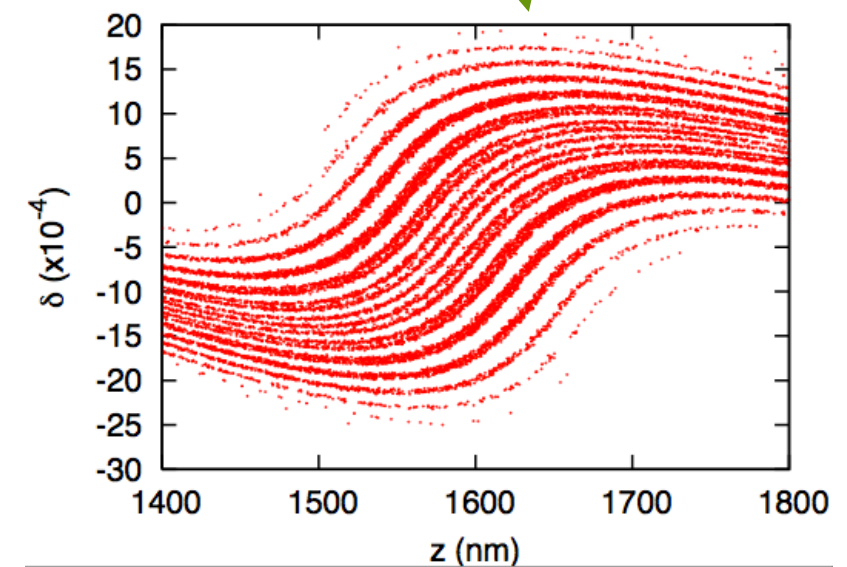
# Simulation Example: 100 asec



- Single asec pulse is generated.

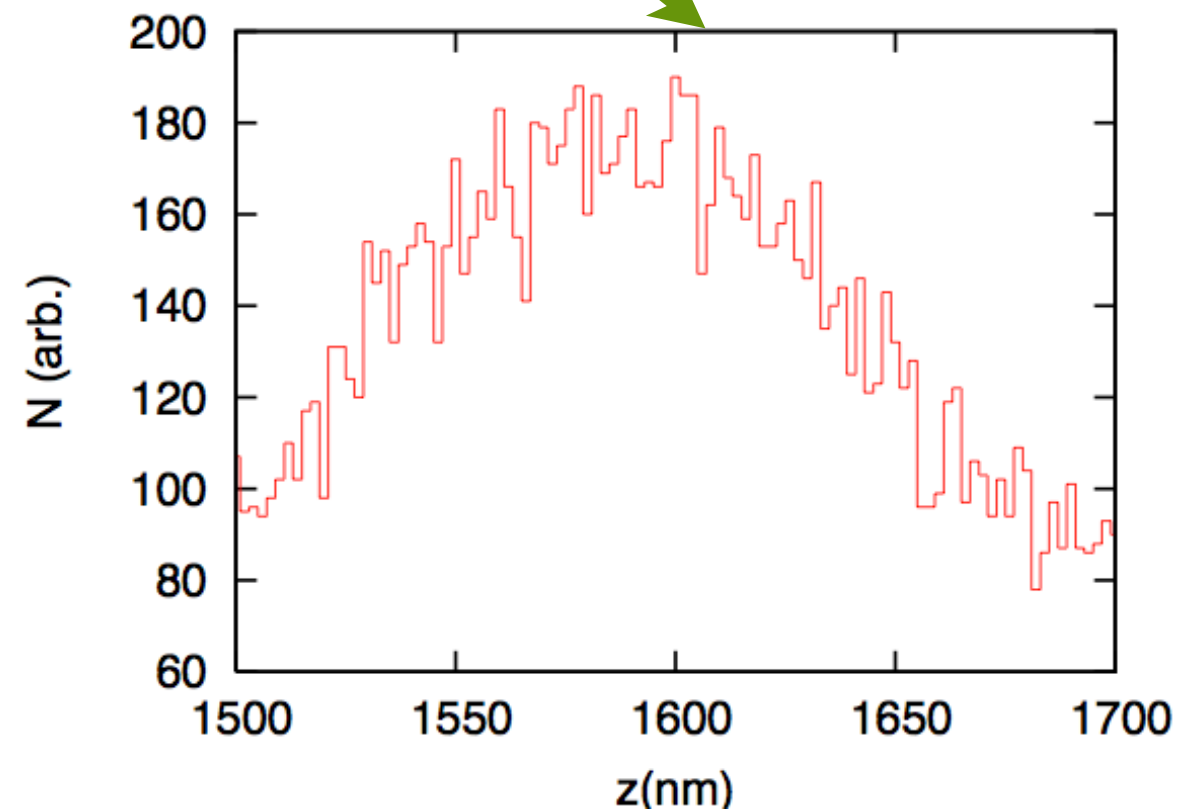
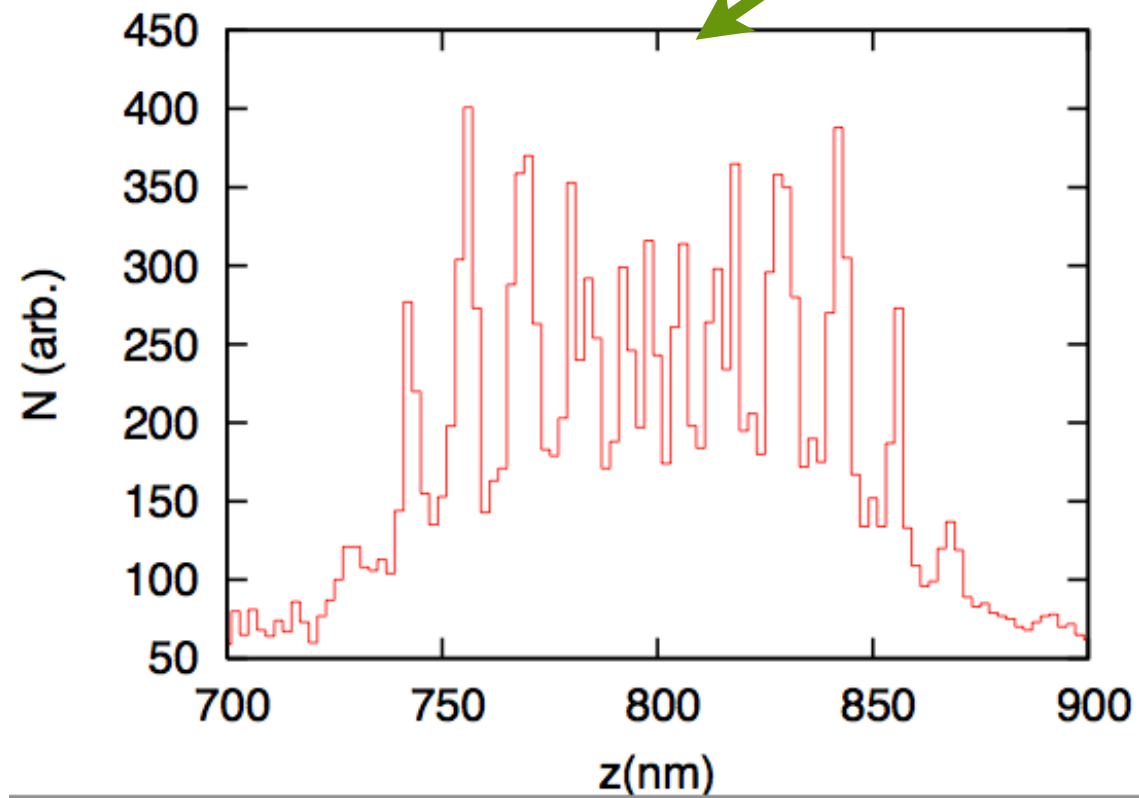
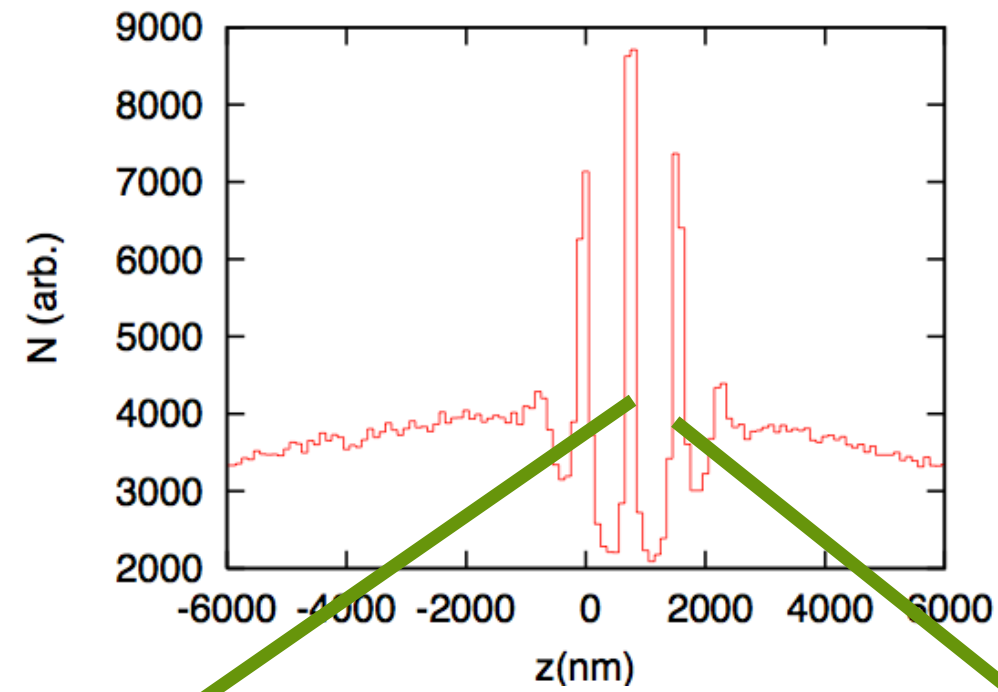


Coherent radiation



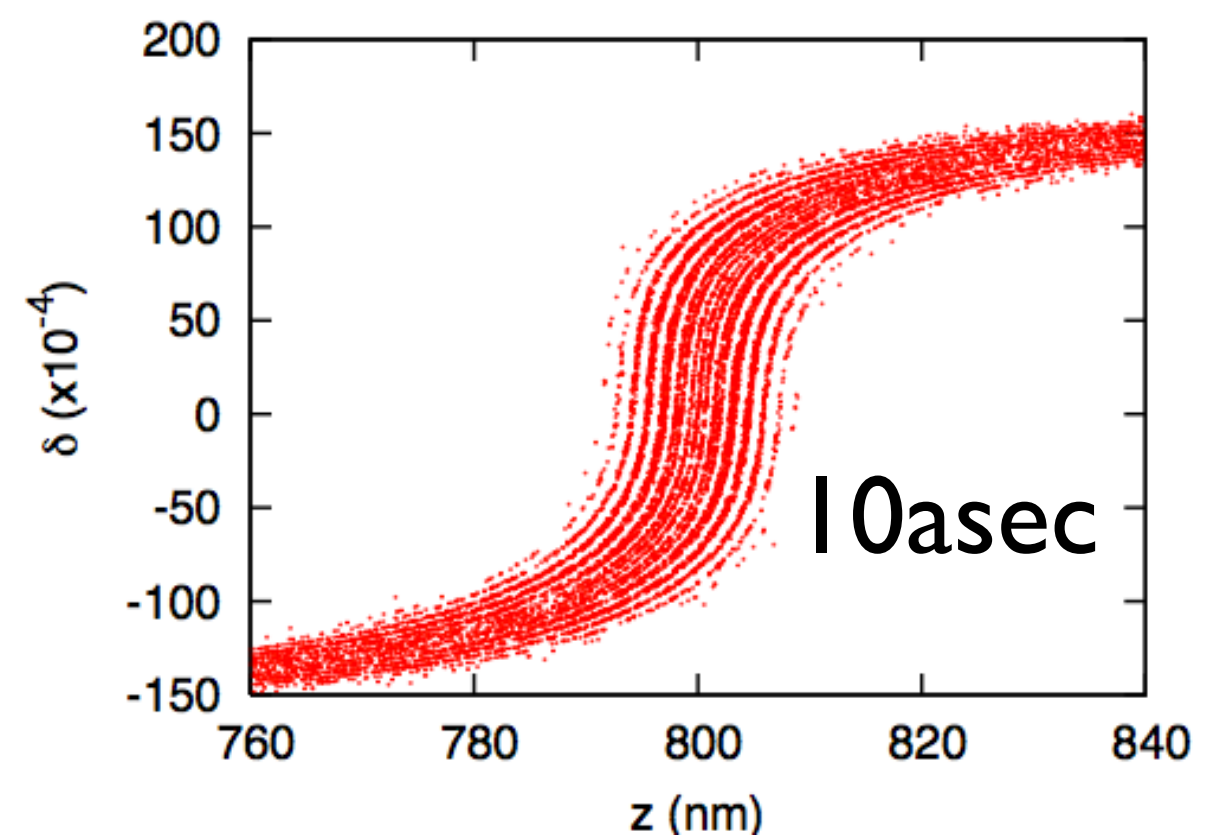
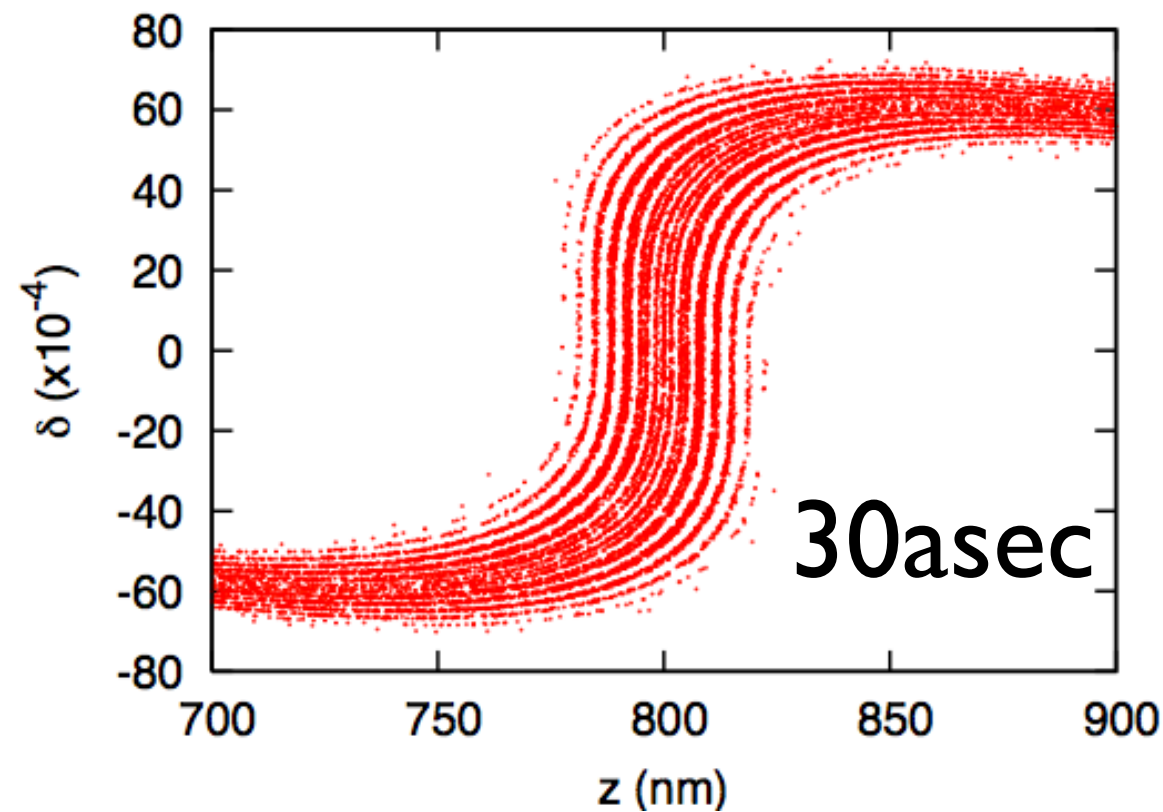
No coherence

# Longitudinal profile



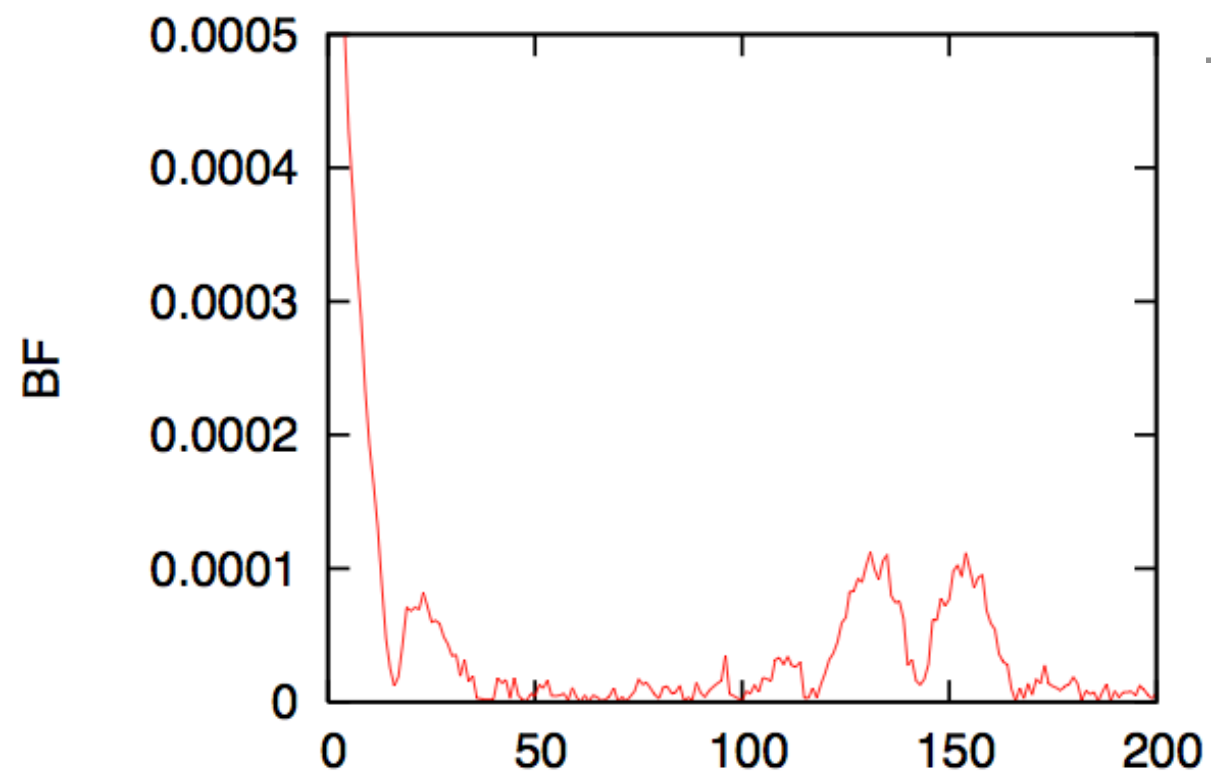
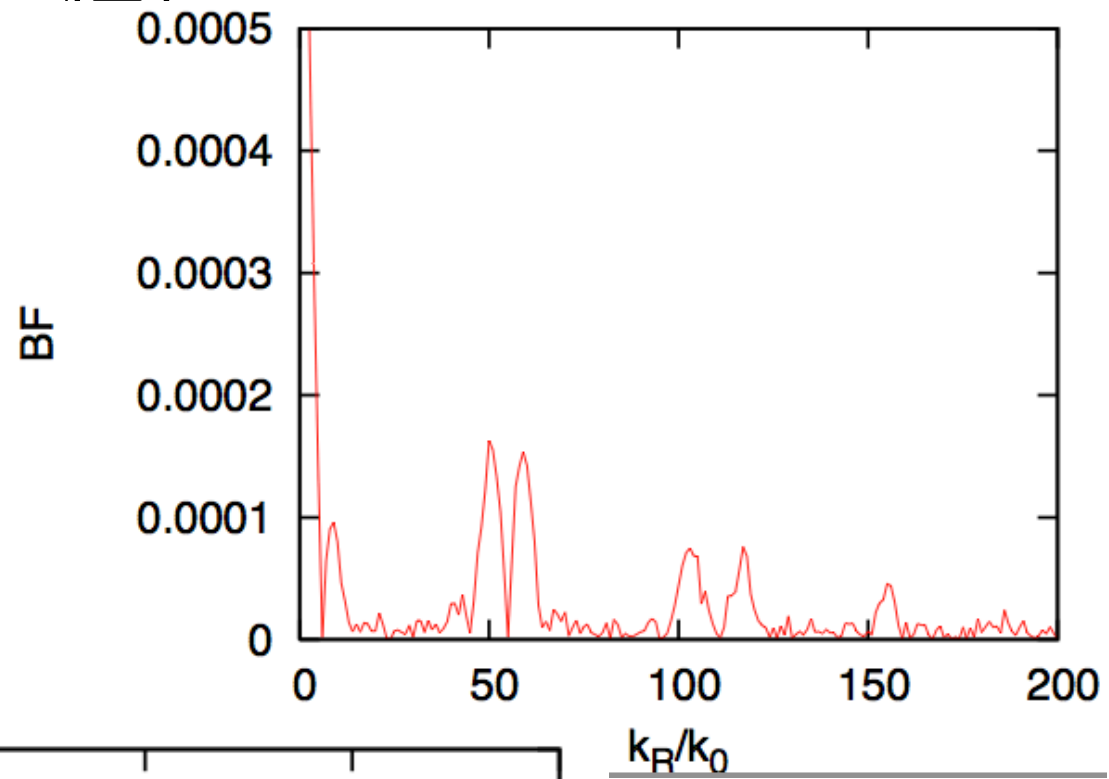
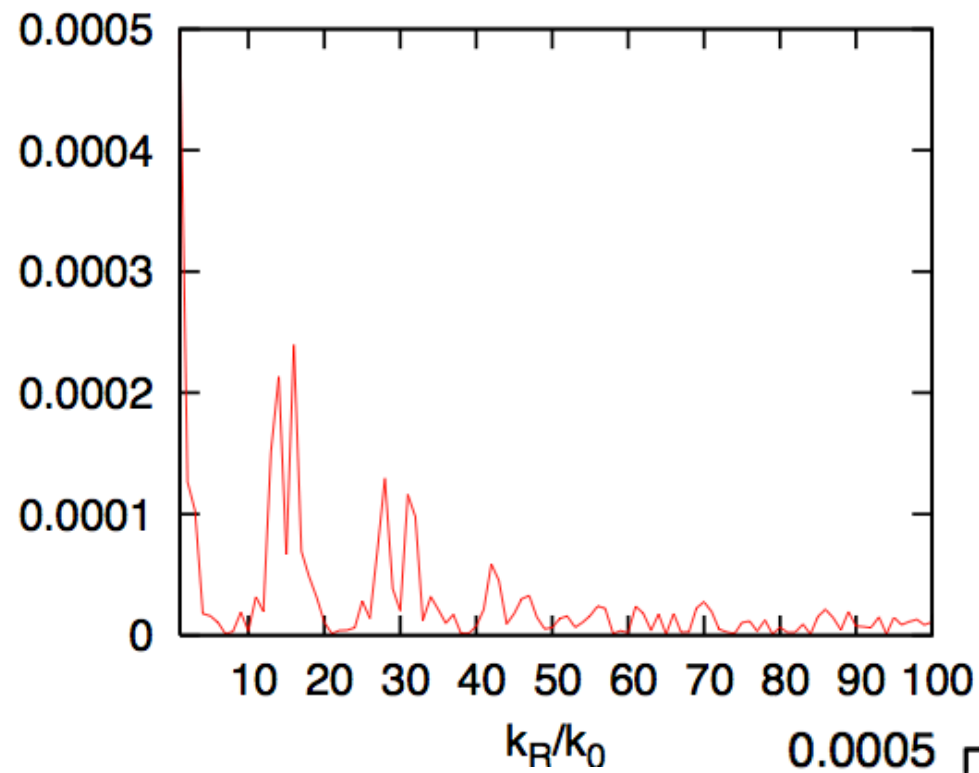
# 30 asec, 10 asec

- 帯の幅は $\Delta\delta$ 、帯の縞模様は $R_{56}^{(1)}$ で決まる。 $k_L\Delta\delta R_{56}^{(1)} = 22$
- あまり模様を多くすると、最終アンジュレータで光が出せるかが問題になる。
- $a_{L,3}$ を大きくしてエネルギー方向に引き延ばせば、パルス長は短くなる。



# Bunching factor

$$BF(h) = \frac{1}{N_e} \sum_{i=1}^{N_e} e^{-ihk_L^{(1)} z_i}$$





# 電磁場の変化(1次元モデル)

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial s^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) a_{L,x} = -\frac{e\mu_0}{mc} \dot{j}_x \quad \frac{\partial}{\partial x} (\nabla \cdot \mathbf{a}) = 0$$

$$a_{L,x}(s) = \int \hat{a}_L(s, \omega) \exp(k_L s - \omega t) d\omega$$

$$\frac{\partial^2 \hat{a}(s)}{\partial s^2} \approx 0 \quad k_L = \omega/c$$

- Source: beam motion

$$j_x(s, t) = \sum_i e \frac{a_u c}{\gamma} \cos k_u s \delta(s - s_i(t))$$

$$2i \int k_L \frac{\partial \hat{a}(s, \omega)}{\partial s} e^{i(k_L s - \omega t)} d\omega \approx - \sum_i \frac{e^2 \mu_0 a_u}{2\gamma} (e^{ik_u s} + e^{-ik_u s}) \delta(s - s_i(t))$$

- Integral over  $e^{i\omega t} dt$

$$2ik_L \frac{\partial \hat{a}(s, \omega)}{\partial s} \approx - \sum_i \frac{e^2 \mu_0 a_u}{2\gamma} (e^{-i(k_L s - \omega t_i - k_u s)} + e^{-i(k_L s - \omega t_i + k_u s)})$$

$$2ik_L \frac{\partial \hat{a}(s, \omega)}{\partial s} \approx - \frac{e^2 \mu_0 a_u}{2\gamma} \sum_i e^{-ik_L z_i}$$

$$z = s - ct + \frac{k_u}{k_L} s$$

# Radiation power

$$P(t) = \frac{e^2 c^2 Z_0 a_{u,R}^2 (J_0(\xi) - J_1(\xi))^2 k_R^2}{32\pi\sigma_x^2 \gamma^2 k_u^2} \left| \sum_j e^{ik_R c(t_j - t)} \right|^2$$

$$\xi = \frac{a_{u,R}^2}{4 + 2a_{u,R}^2} Z_0 = 377\Omega$$

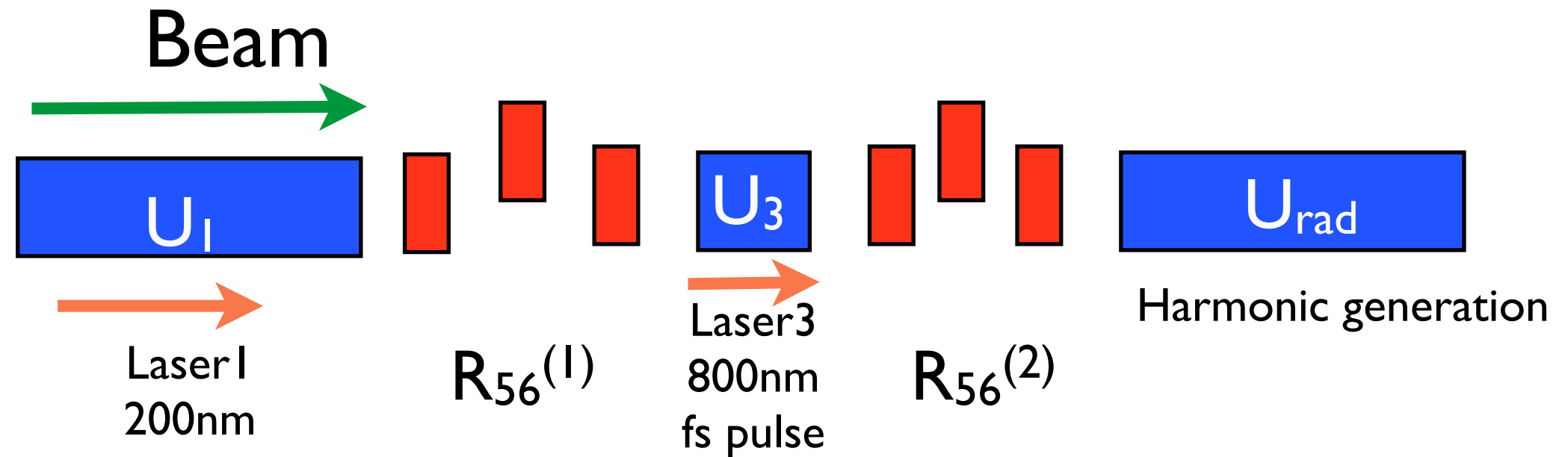
$$e^{ik_R c(t_j - t)} = e^{-ik_R z_j + ik_u c t} \quad z_i = s \left( 1 + \frac{k_u}{k_L} \right) - ct_i$$

- Undulator  $\lambda_R = 2\text{nm}$ ,  $\lambda_u = 4\text{cm}$ ,  $a_u = 1.6$ ,  $N_{\text{per}} = 12$
- $P = 110\text{ MW}$ .

# まとめ

- EEHGとcoherent radiationを使ったアト秒パルス生成は原理的に可能である。
- エネルギー広がり $\sigma_\delta$ をパルス長に変換するので、 $\sigma_\delta$ が小さい方が得。
- 空間電荷、3次元効果の影響は調べなければならぬ。ビーム強度は可変だが、パワーは自乗。インコヒーレント放射光効果は小さい。

# Parameters ERL



- $U_1: \lambda_u=0.25\text{m}, a_u=7.36, B_u=0.315\text{T}, L_u=1.5\text{m}$
- Laser I:  $\lambda_L=200\text{ nm}, a_{L,I}=7.2\times 10^{-5}, P=0.26\text{mJ}, 260\text{MW}$
- $R_{56}^{(1)}=1.1\text{mm}$
- $U_3: \lambda_u=0.2\text{m}, L_u=0.4\text{m}$
- Laser 3:  $\lambda_L=800\text{nm}, \sigma_L=500\text{nm}=1.7\text{ fs}, \sigma_{r,L}=0.18\text{mm}, a_L\sim 0.01, Pdt>1\text{mJ } P>100\text{GW}$
- $R_{56}^{(2)}<0.1\text{mm}$
- $U_{\text{rad}}: \lambda_u=0.04\text{ m}, L_u=0.5\text{m}$

**Thank you for your  
attention**