



共振器型XFEL (XFEL-O) の原理と光源特性

羽島良一

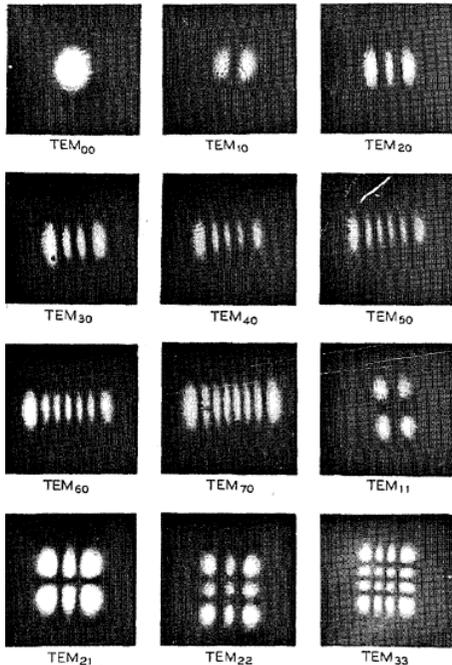
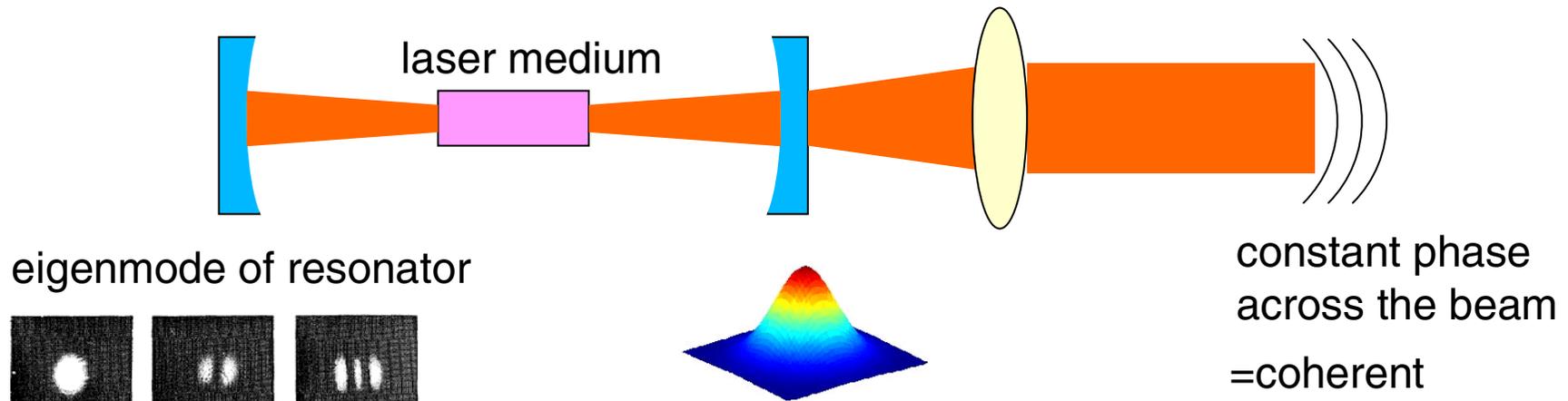
日本原子力研究開発機構

ERL光量子源開発研究グループ

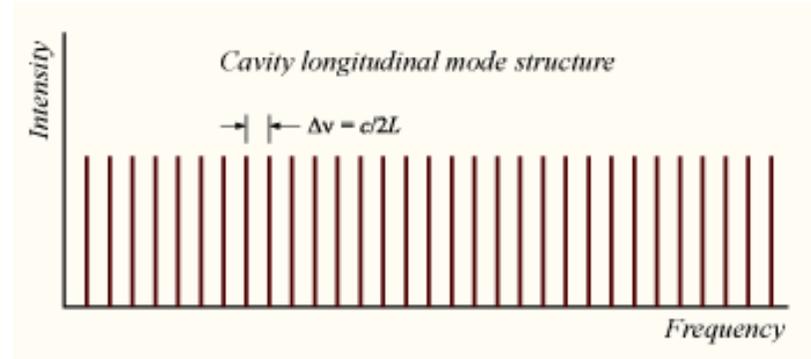
ERLサイエンスワークショップ

2009年7月10日

レーザー発振器における光共振器の役割

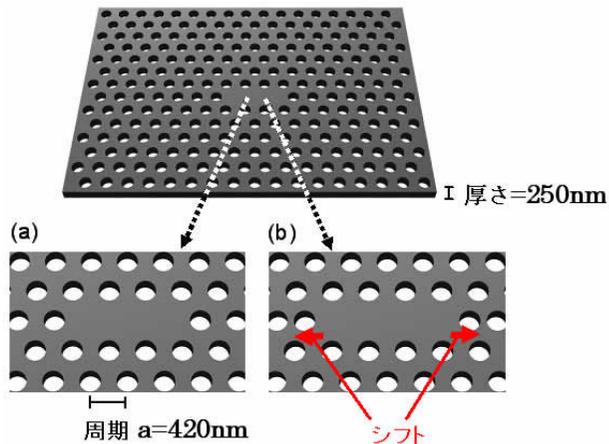


1. ゲイン媒質と光パルスの繰り返し相互作用 (フィードバック)
2. 空間方向に境界条件 = 横モードの選択
3. 時間・周波数に境界条件 = 縦モードの選択



H. Kogelnik and T. Li
Appl. Optics (1966).

さまざまな光共振器



フォトニック結晶光ナノ共振器
Y. Akahane et al., Nature (2002)



重力波検出施設(LIGO)、4kmの光共振器
<http://www.ligo.caltech.edu/>

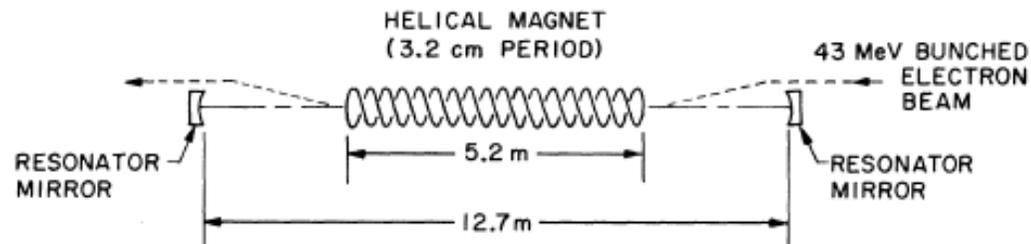
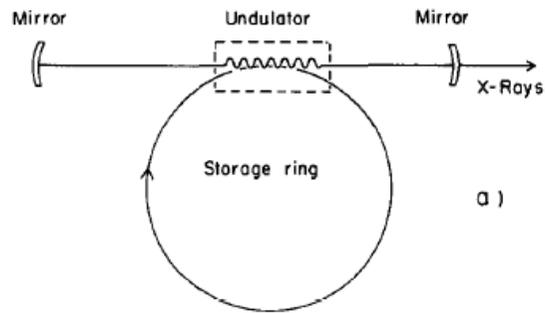


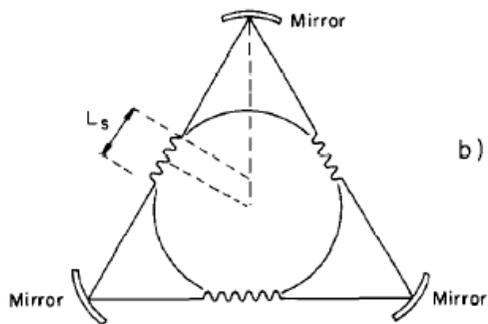
FIG. 1. Schematic diagram of the free-electron laser oscillator. (For more details see Ref. 6.)

世界最初の自由電子レーザー(Stanford Univ.)
DAG Deacon et al., Phys. Rev. Lett (1977)

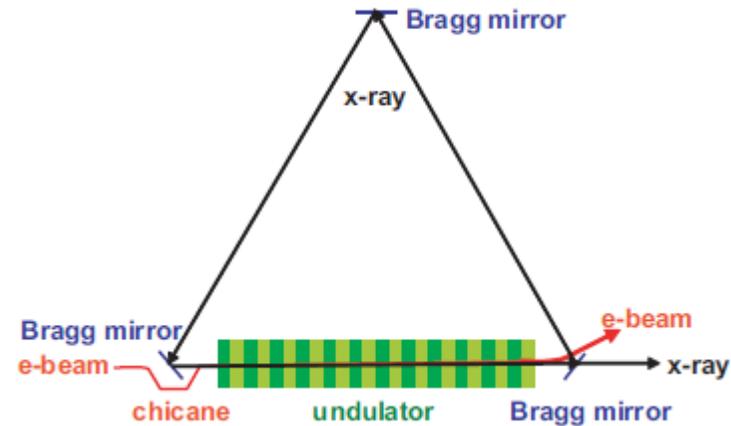
共振器型のXFELの提案



a)



b)



Z. Huang, D. Ruth

Phys. Rev. Lett. (2006).

SLAC-LCLSの電子ビームパラメータで
再生増幅型XFELを提案。(10パス程度で飽和)

R. Colella, A. Luccio,
Opt. Comm. (1984)

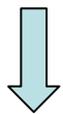
蓄積リングの電子ビームで
2-3 Å のXFELを提案。

1. X線領域で利用可能な“反射率の高い”ミラー
2. 高品質、かつ、“高繰返し”の電子ビーム

この両者がそろわない限り、実現は不可能！

K-J. Kimらによる共振器型X線自由電子レーザーの提案

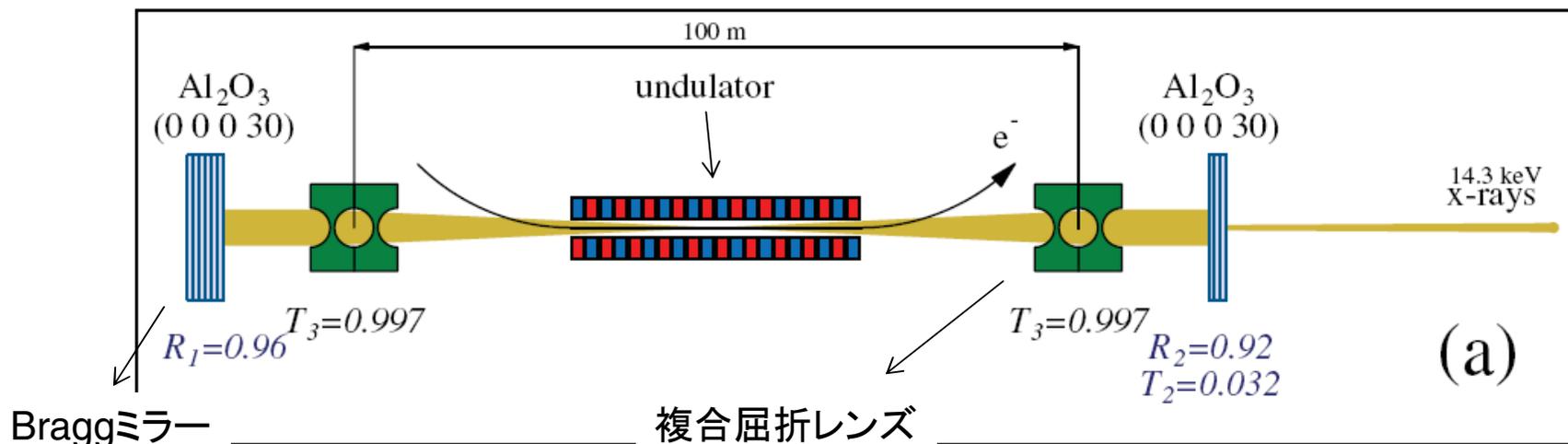
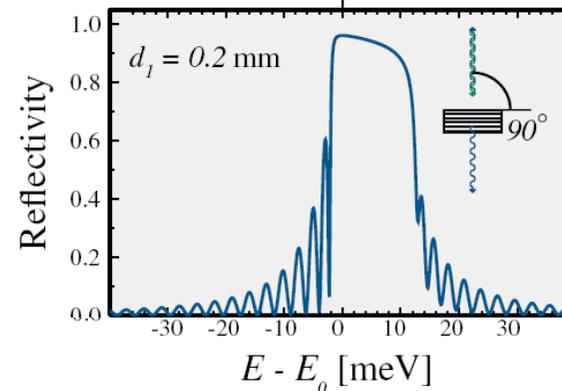
完全結晶によるX線のBragg反射を利用。
“ERL quality”の電子ビームを利用。



K-J. Kimら ERL-2007 WS
PRL 100, 244802 (2008)

SASEとは異なるX線レーザー
空間・時間コヒーレンスに優れる
高輝度電子バンチ >1MHz
ERL放射光源に組み込み可能

Al₂O₃によるBragg反射(14.3keV)



XFEL-Oの構成 (K-J. Kim et al.)

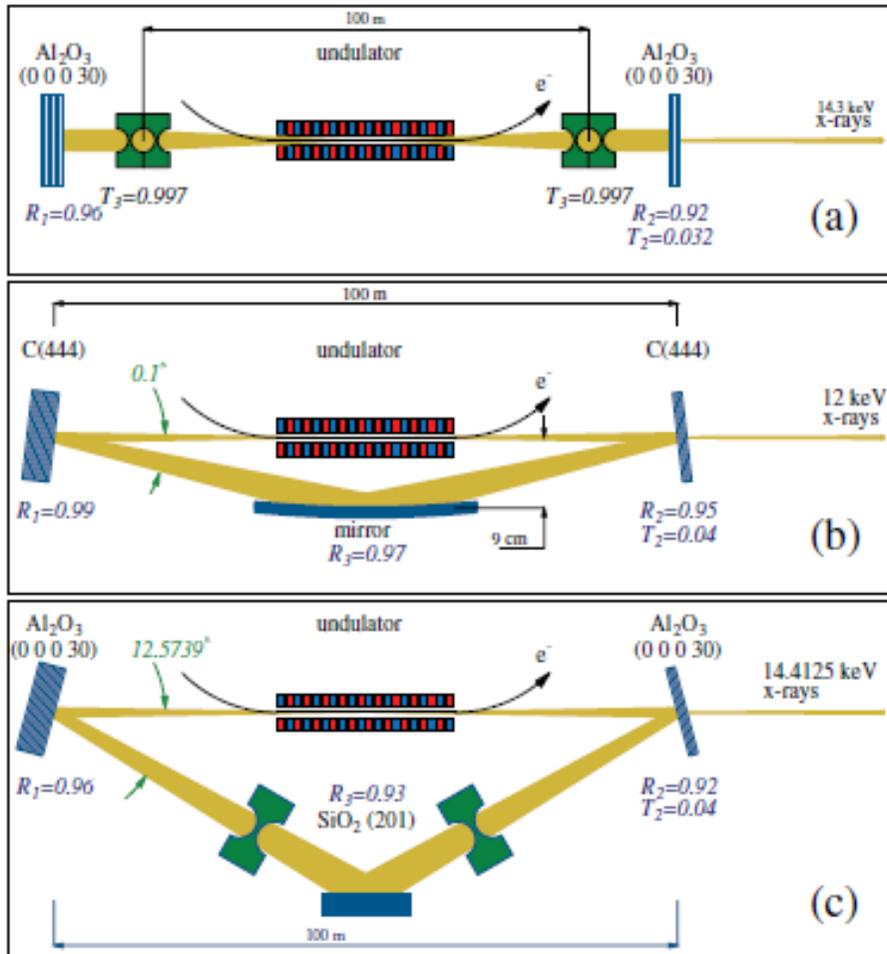
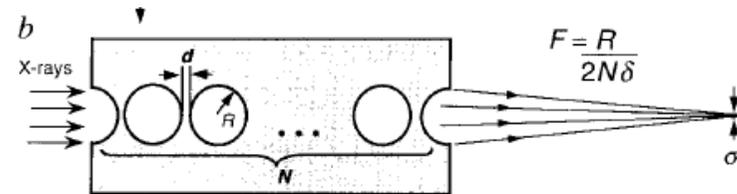


FIG. 2 (color). Schemes of x-ray cavities.

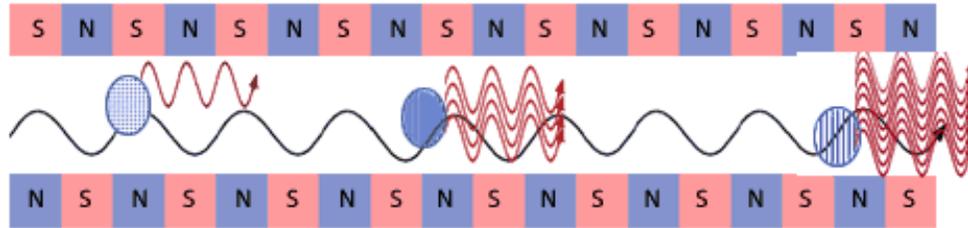
Bragg ミラー → 完全結晶 = 平面
収束用の光学素子を別に用意。



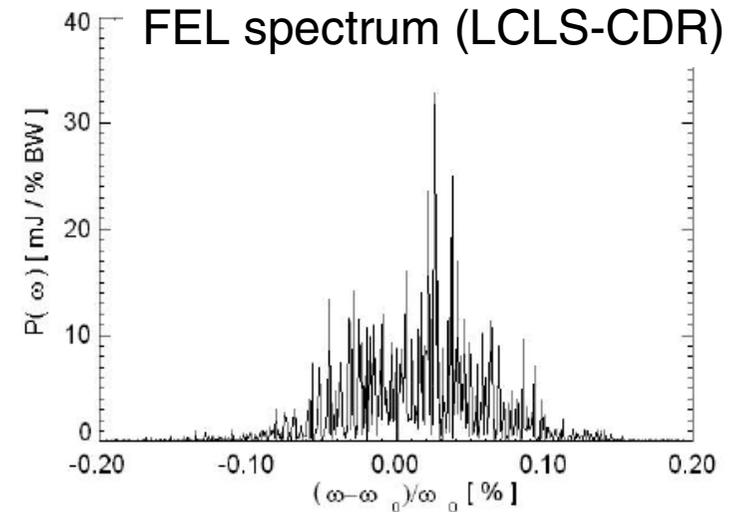
Compound Refractive Lens
A. Snigirev et al., Nature (1996).

SASE-XFELとXFEL-Oの比較

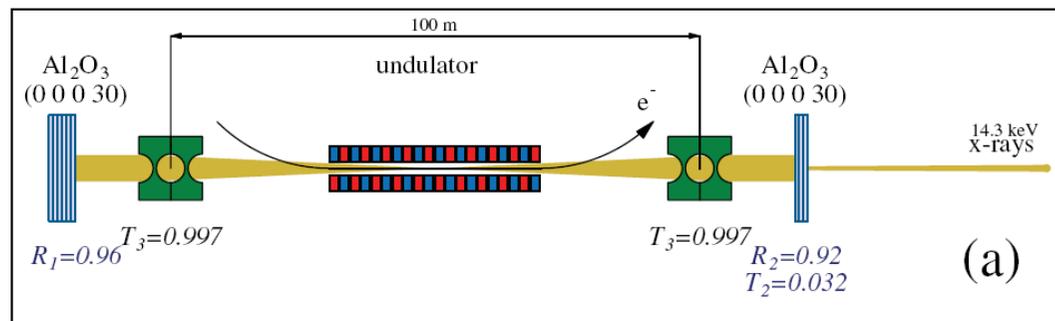
SASE = Self-Amplified Spontaneous Emission



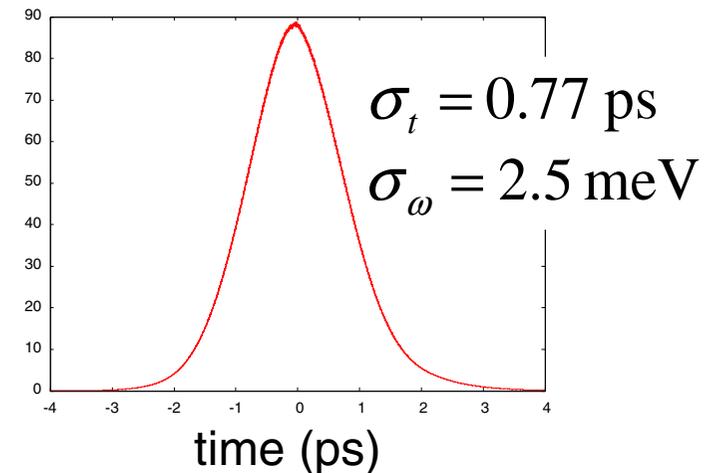
1パスでノイズから飽和まで(>10⁷倍)増幅
電子バンチ = 1nC, 100fs, 1mm-mrad, 10⁻⁴



XFEL- Oscillator



1パスの増幅率 > 1 (損失 < 増幅の条件)
電子バンチ = 20pC, 2ps, 0.1mm-mrad, 10⁻⁴



SASEと共振器FELの成長モードの違い

FELにおける電磁場の時間発展を解析すると、3つの固有モードが導かれる。

$$\zeta^3 - 2\rho^3\zeta - i\rho^3 = 0 \quad \text{分散関係} (\rho \text{ はFELパラメータ})$$

$$a(z) = \frac{1}{3} (e^{\Gamma_0 z} + e^{\Gamma_+ z} + e^{\Gamma_- z})$$

$$= \frac{e^{-i\Delta k z}}{3} \left(\underset{\substack{\uparrow \\ \text{振動}}}{e^{-i2k_w \rho z}} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{発散}}}{e^{\sqrt{3}k_w \rho z}} e^{ik_w \rho z} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{減衰}}}{e^{-\sqrt{3}k_w \rho z}} e^{ik_w \rho z} \right)$$

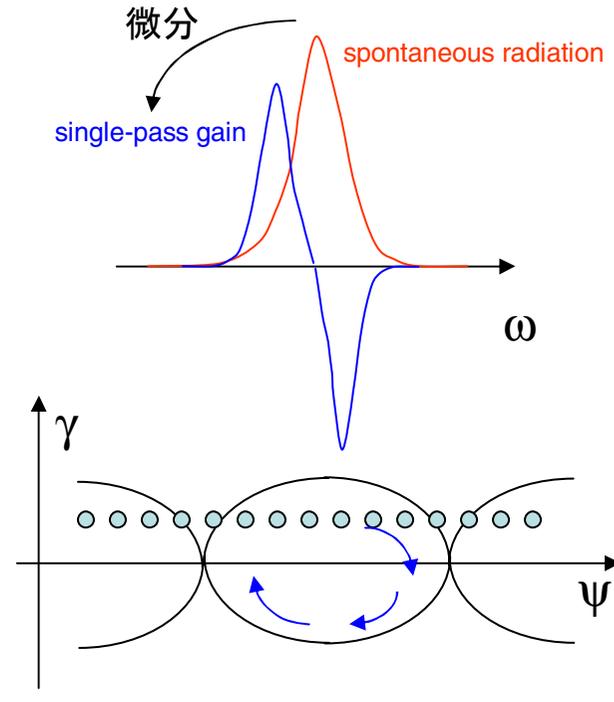
low-gain regime ($k_w \rho z \ll 1$)

→ 振動するモードが支配的 = 共振器型FEL

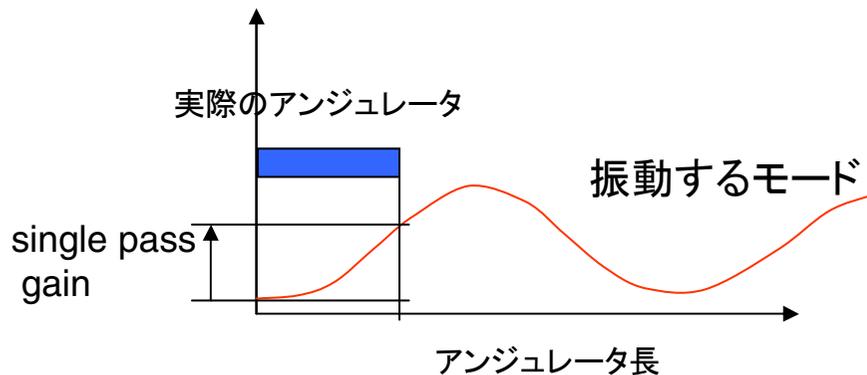
high-gain regime ($k_w \rho z \gg 1$)

→ 発散するモードが支配的 = SASE FEL

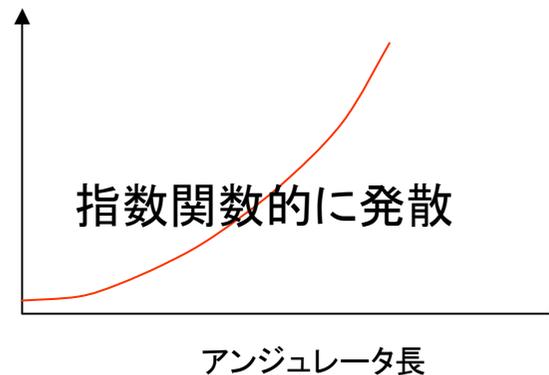
振動するモードのゲインカーブ



レーザパワー



レーザパワー



FEL のゲイン

小信号領域のシングルパスゲイン＝発振の立ち上がりを与える。

1次元の近似計算では、ゲインは以下の式で与えられる。

$$1\text{-D gain} \propto \rho^3 = \frac{1}{16\pi} a_w^2 \lambda_w^2 [JJ]^2 \frac{1}{\gamma^3} \frac{I_p}{I_A} \frac{1}{\Sigma}$$

$$JJ = J_0(\xi) - J_1(\xi), \quad \xi = \frac{a_w^2}{2(1+a_w^2)}$$

$I_A = 17\text{kA}$, $I_p = \text{peak current}$, $\Sigma = \text{mode area}$

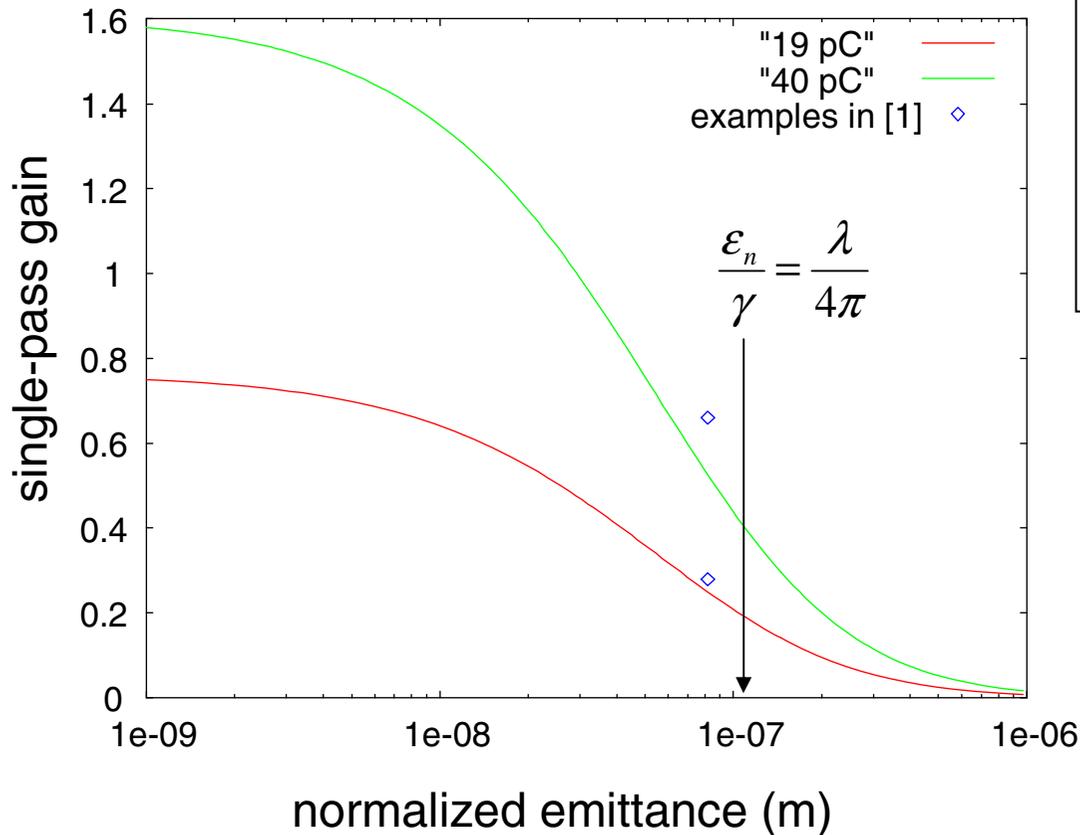
ゲインはピーク電流に比例し、光モードの断面積に反比例する。

電子ビームが光ビームより太い時は、上式の値から減少する。

解析式によるFELゲインの計算

FEL波長 = 1 Å

$$\lambda = \lambda_w \frac{1 + a_w^2}{2\gamma^2}$$



ERL の典型的なパラメータに基づく

$E = 7 \text{ GeV}$

$q = 19/40 \text{ pC}$

$\sigma_t = 2 \text{ ps}$

$\sigma_E/E = 1e-4$

$a_w = 1, \lambda_w = 1.88 \text{ cm}, N_w = 3000$

$\beta^* = Z_R = 10 \text{ m}$

共振器型FELの発振が可能！

19 pC, $\varepsilon_n = 0.1 \text{ mm-mrad}$
→ gain ~ 20 %

完全結晶によるBragg反射
を用いれば loss ~ 10%

loss < gain で発振

[1] K-J. Kim, Frontiers in FEL Physics and Related Topics, Sep. 8-14, 2007, Elba Island, Italy

共振器型XFELの主なパラメータ

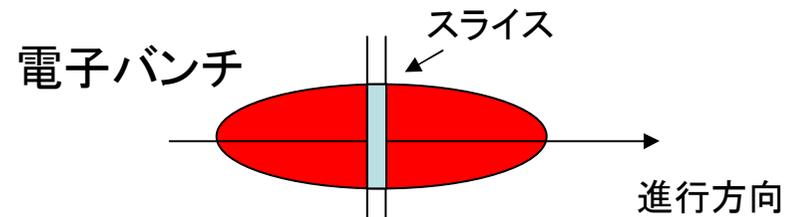
K-J.Kim らの論文と同様のパラメータを用いる。

→ ERL放射光源の周回軌道に組み込むことを想定

- FEL波長 = 0.1 nm (12 keV)
- アンジュレータ周期 = 3000 (スリップ長 300 nm)
- バンチ長 2 ps (FWHM) → 三角波形とする
- small signal gain = 27%
- 共振器損失 = 10%
- 共振器バンド幅 = 10 meV (相対幅 0.8×10^{-6})
- バンチ全体を対象 → 時間依存シミュレーション

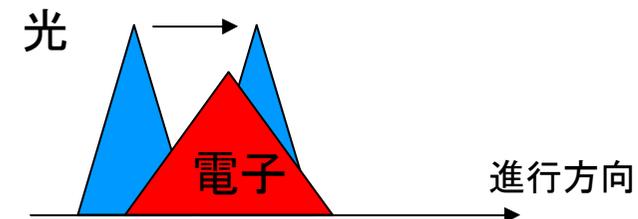
FEL シミュレーション、二つの方式

スライスシミュレーション



スライスを切り出して計算。
時間方向に周期境界条件を仮定

時間依存シミュレーション



光が電子を追い越していく様子を含めて、
時間方向の分布を考慮

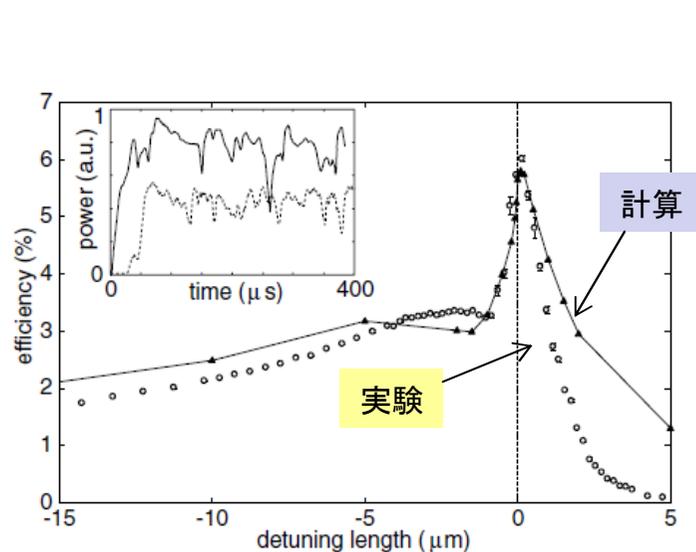
時間コヒーレンスの議論 → **時間依存シミュレーション**が必要！

実用的な計算時間では、横方向の分布を無視した1次元計算とせざるを得ない。

共振器型FEL＝横方向分布が共振器で決まるので、十分な近似を与える。

時間依存シミュレーションによる共振器FELの解析

共振器型FELの解析に多数の実績がある。JAERI-FELの例を紹介する



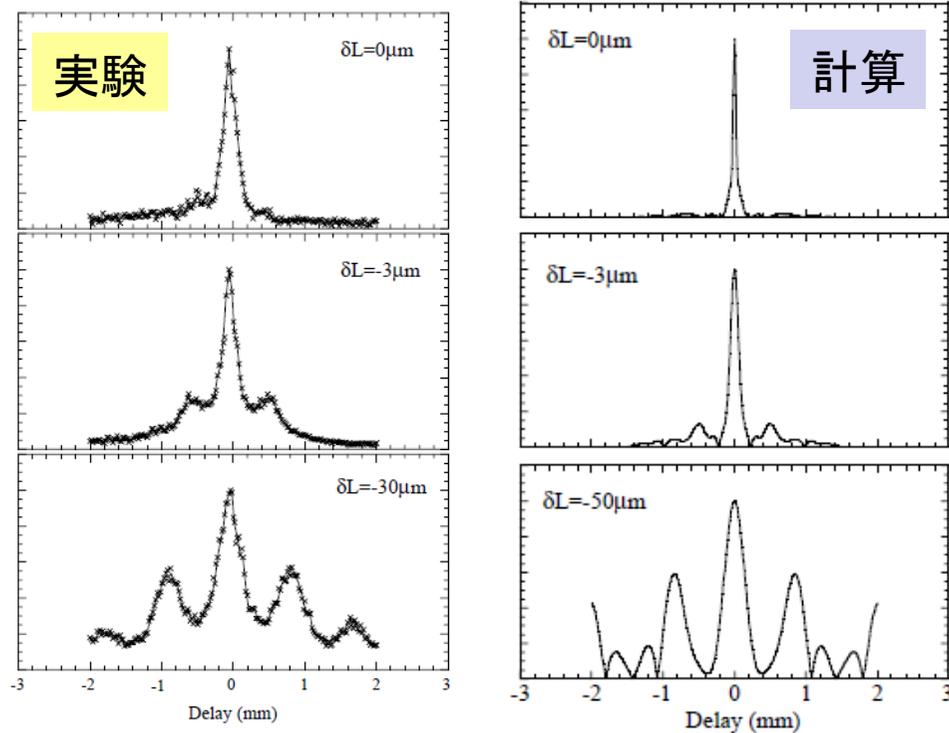
共振器長とFELパワーの関係

PRL 86, 5707 (2002)

実験結果をよく再現している



共振器型XFELの解析に適用

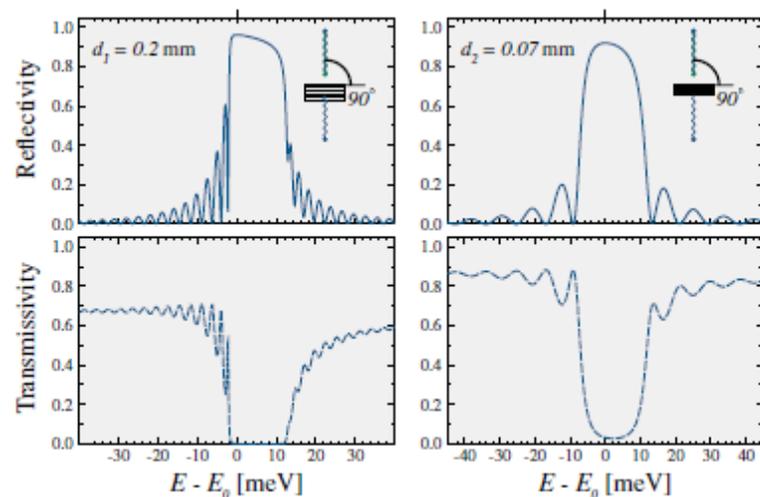


共振器長を変えながら
FELパルスの自己相関を調べた

NIMA 483, 129 (2002)

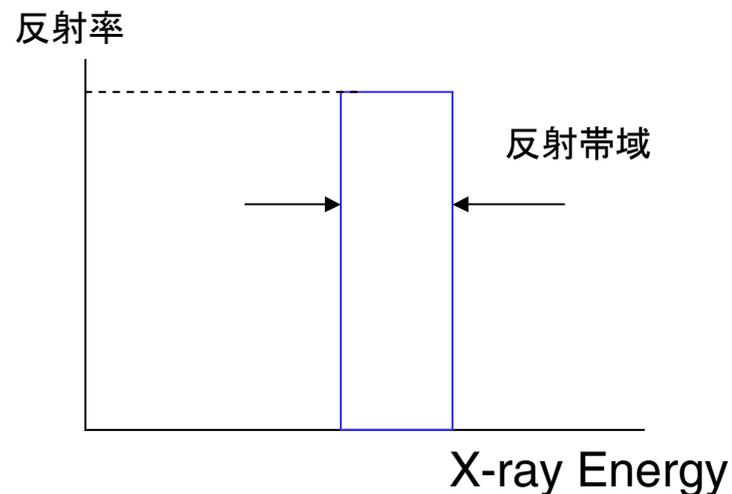
狭帯域反射ミラーの計算

完全結晶によるBragg反射



K-J. Kim et al., PRL 100, 244802 (2008).

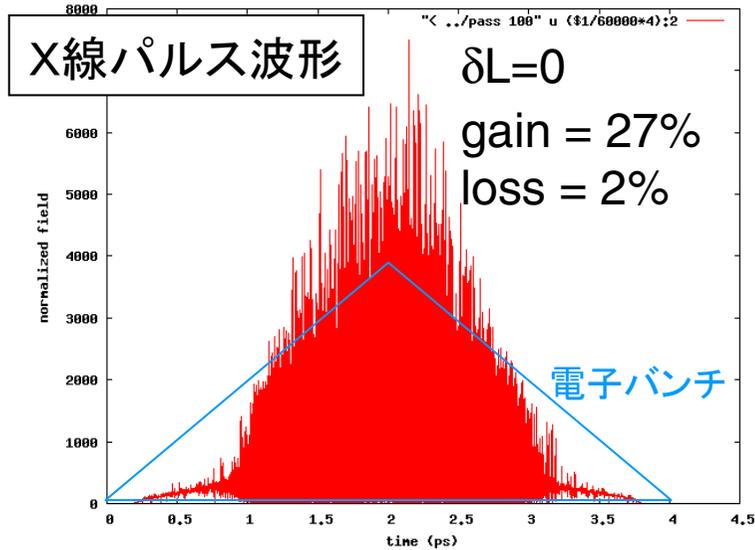
周波数フィルターで模擬



シミュレーションコードへの組み込み

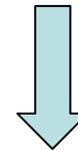


全帯域反射ミラーの場合



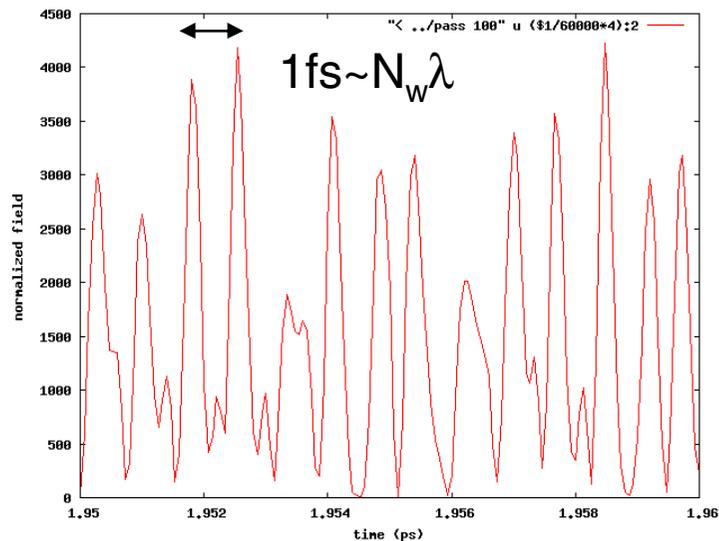
まず、はじめに、

仮想的な全帯域反射ミラーを用いた計算



×線パルスは無数のスパイクを含む

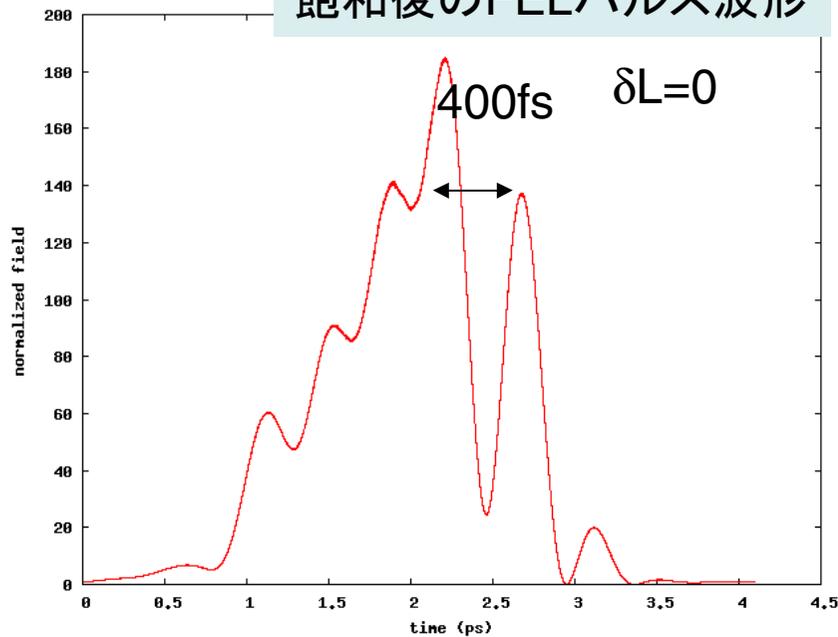
時間コヒーレンスはアンジュレート長で制限



狭帯域反射ミラーの場合

gain = 27%, loss = 10%

飽和後のFELパルス波形

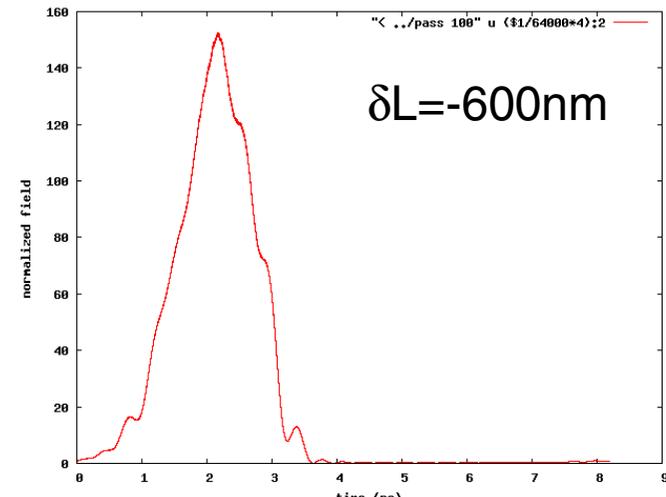


~400 fs の構造 (時間コヒーレンス長)

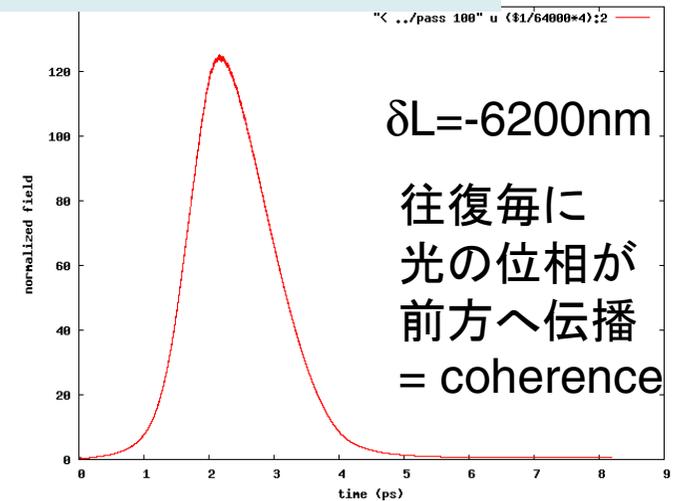
Bragg反射で得られる帯域

$(12\text{keV}/10\text{meV}) \times 0.1\text{nm} = 120\mu\text{m} \rightarrow 400\text{fs}$

共振器長をわずかに短くする

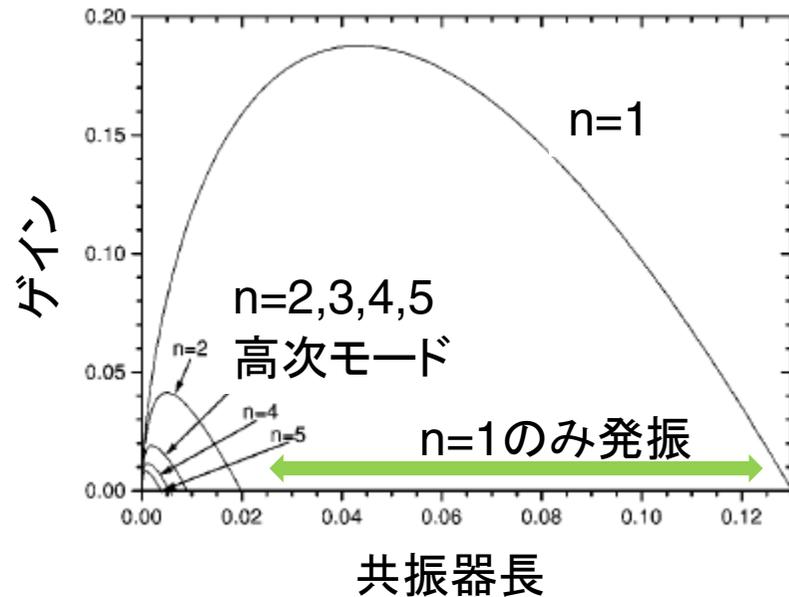


共振器長をさらに短くする



共振器FELにおける固有モード=supermode

共振器長を選べば発振するモードを制限できる

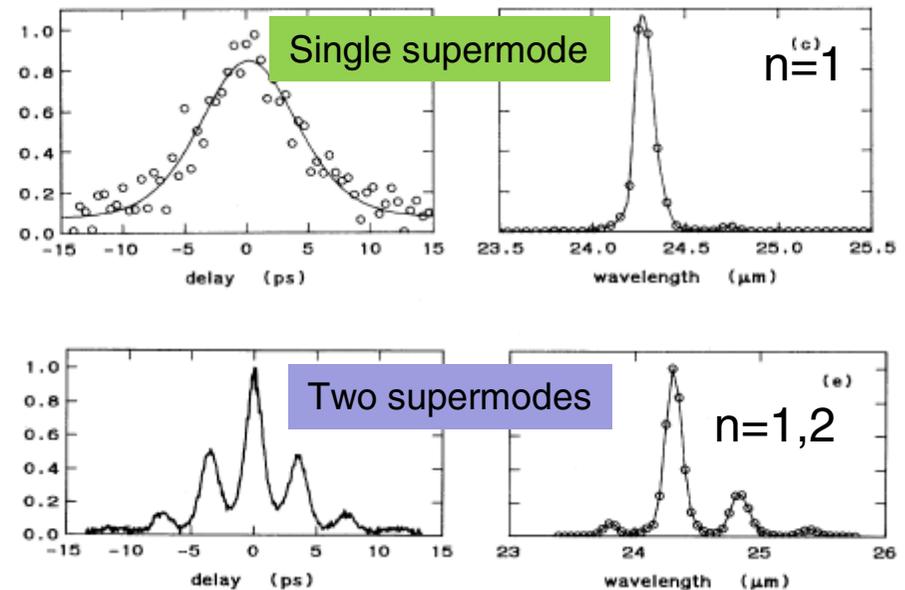


Supermode のゲイン線図
(赤外FELの解析)

P. Chaix et al., PRE 59, 1136 (1999)

自己相関

スペクトル

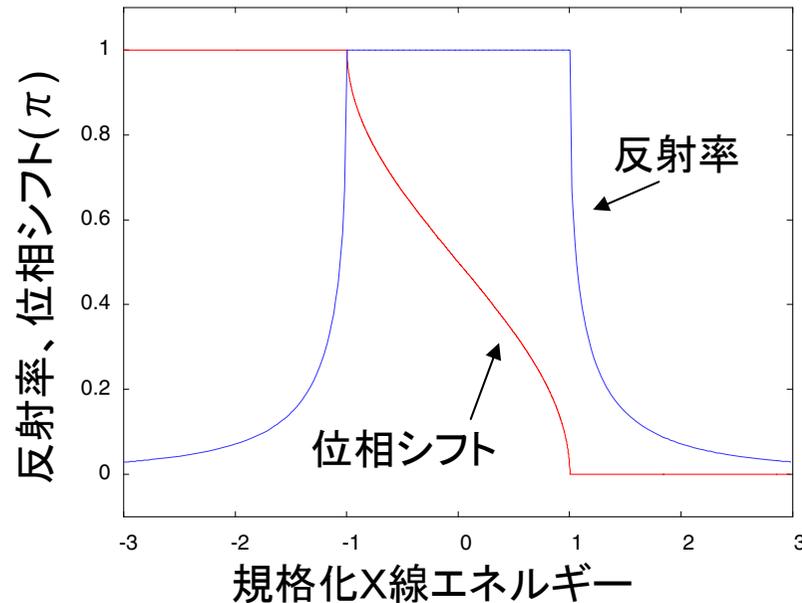


赤外FEL(FELIX)における計測例

G. Knippels et al., PRE 53, 2778 (1996)

Bragg反射における位相シフトの考慮

完全結晶のBragg反射 = Darwin Curve



複素反射率の計算式

$$r(x) = \left(\frac{S_0}{T_0} \right) = \begin{cases} x - \sqrt{x^2 - 1} & \text{for } x \geq 1 \\ x - i\sqrt{1 - x^2} & \text{for } -1 \leq x \leq 1 \\ x + \sqrt{x^2 - 1} & \text{for } x \leq -1 \end{cases}$$

Jens Als-Nielsen, Des McMorrow,
Elements of Modern X-ray Physics.
Wiley

反射帯域の中で大きな位相変調 = π が存在する

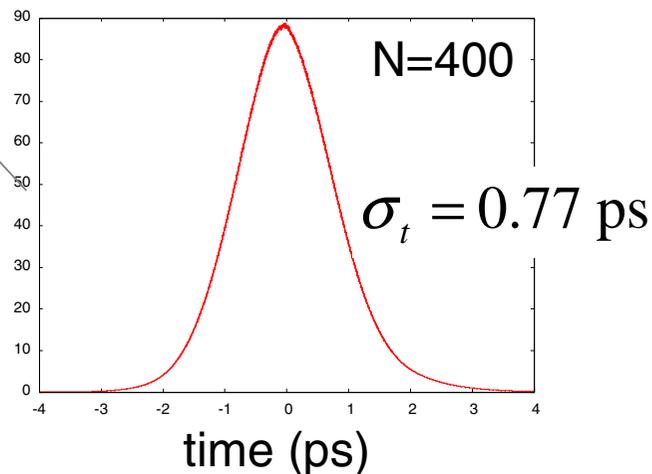
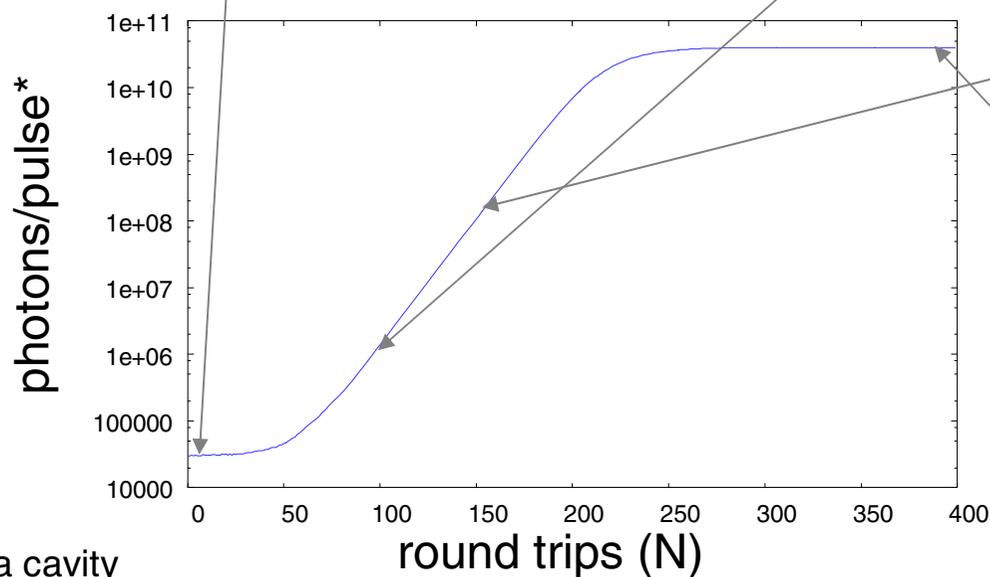
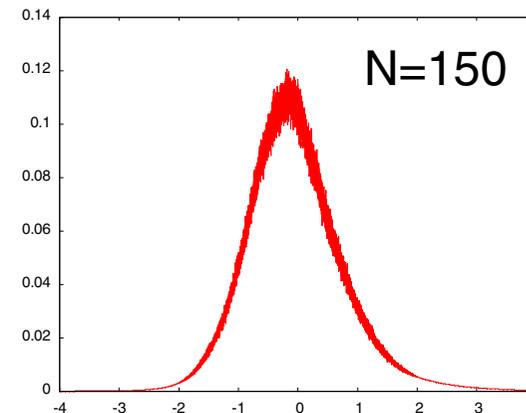
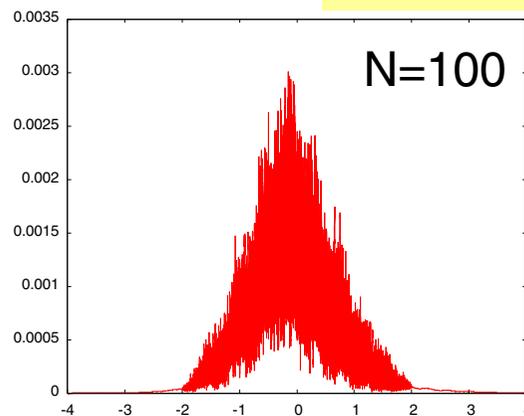
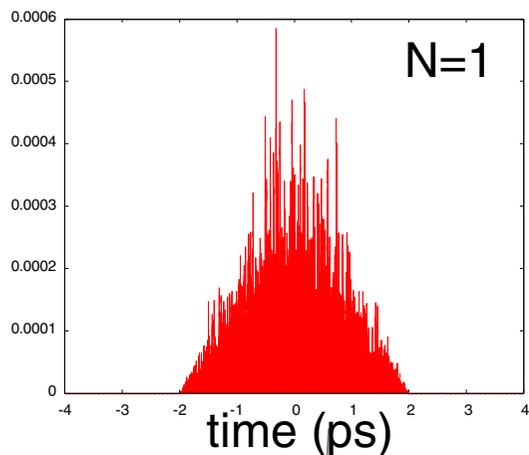
位相変調の線形成分 (= 群遅延) は、共振器長で補償可能。

非線形成分の影響は？

Bragg反射の位相シフトを含んだ計算 FEL発振に伴うX線パルス波形の変化

Darwin curve に基づく位相シフトを考慮
共振器長 $\delta L = -100\mu\text{m}$

パルスの増幅と狭帯域化が同時に起こる。
飽和後は Gaussian-like な時間波形



* intra cavity

K-J. Kimらの解析との比較

K-J. Kim ら

本報告

- スライスシミュレーションによる発振飽和特性の解析
- supermode 解析による時間コヒーレンスの解析
- 時間依存シミュレーションによる発振飽和特性と時間コヒーレンスの解析

- Bragg反射の位相シフトは考慮していない
- Bragg 反射の位相シフトを考慮

- 最低次の supermode のみ考慮
- 高次のsupermode も自動的に考慮

- gain = 28%、loss = 10% → $P_{\text{sat}} = 19 \text{ MW}$ 、 $\sigma_t = 0.85 \text{ ps}$ 、 $\sigma_\omega = 2.3 \text{ meV}$
- gain = 27%、loss = 10% → $P_{\text{sat}} = 40 \text{ MW}$ 、 $\sigma_t = 0.77 \text{ ps}$ 、 $\sigma_\omega = 2.5 \text{ meV}$
- single supermode 発振が得られる

光共振器のout-couple = 4% とすると、 $F = 10^9 \text{ ph/pulse}$ 、 $B_{\text{ave}} = 10^{26} - 10^{28} \text{ (1-100MHz)}$

5GeV ERL で発振可能か？

FEL波長 0.1nm、アンジュレータギャップ 5mm を保ったまま、
電子エネルギーを 7 GeV → 5 GeV としてみる。

$$7 \text{ GeV}, \lambda_w=1.88\text{cm}, \text{gap}=5\text{mm}, a_w=1 \rightarrow \lambda=0.1\text{nm}$$

$$5 \text{ GeV}, \lambda_w=1.43\text{cm}, \text{gap}=5\text{mm}, a_w=0.59 \rightarrow \lambda=0.1\text{nm}$$

$$1\text{-D gain} \propto \rho^3 = \frac{1}{16\pi} a_w^2 \lambda_w^2 [JJ]^2 \frac{1}{\gamma^3} \frac{I_p}{I_A} \frac{1}{\Sigma}$$
$$JJ = J_0(\xi) - J_1(\xi), \quad \xi = \frac{a_w^2}{2(1+a_w^2)}$$

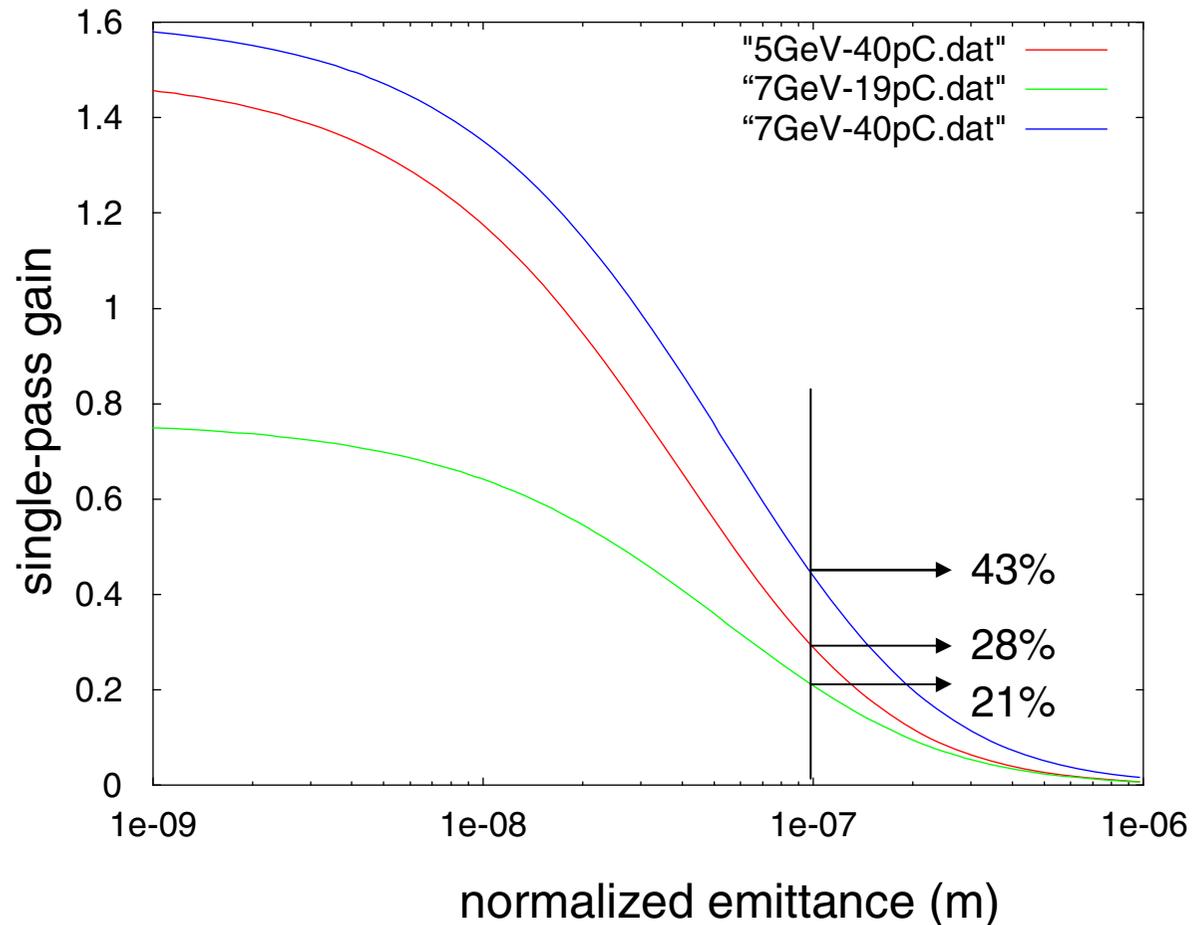
$I_A = 17\text{kA}$, $I_p = \text{peak current}$, $\Sigma = \text{mode area}$

peak current, mode area は同じと仮定すると、

$$\frac{\rho^3(5\text{GeV})}{\rho^3(7\text{GeV})} = 0.65$$

7 GeV → 5 GeV で 1-D gain は 2/3 程度になる。

5GeV ERL で発振可能か？



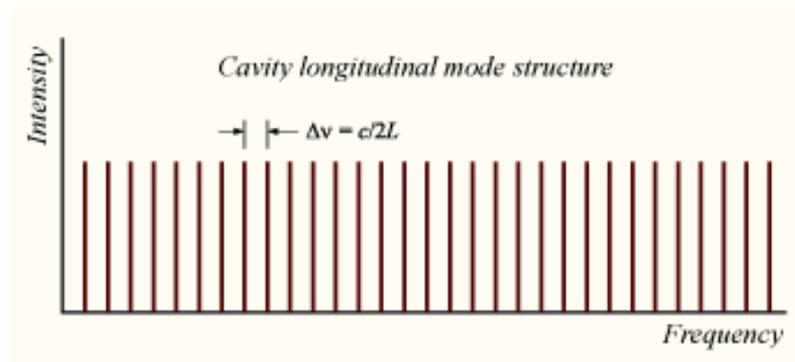
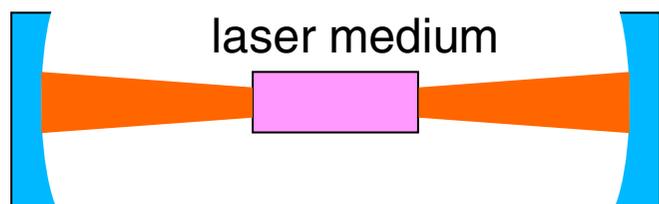
$E = 5/7 \text{ GeV}$
 $q = 19 \text{ or } 40 \text{ pC}$
 $\sigma_t = 2 \text{ ps}$
 $\sigma_E/E = 1e-4$
 $a_w = 0.59/1$
 $\lambda_u = 1.43/1.88 \text{ cm}$
 $N_w = 3000$
 $\beta^* = Z_R = 10 \text{ m}$

規格化エミッタンス=0.1mm-mradの時、

7GeV, 40pC → 43%
7GeV, 19pC → 21%
5GeV, 40pC → 28%

(注: $N\omega=3000 \rightarrow 3900$ としてもゲインは増えない。
エネルギー広がりがあるので。)

共振器長を波長精度で合わせる必要がある？



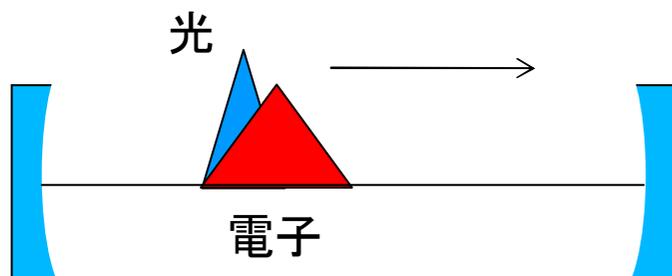
CW レーザーでは、定在波ができる。

単一縦モードを得るには、共振器長の固定が必要。

共振器FELでは、ゲイン媒質(電子バンチ)が毎回リフレッシュされる。

→ ゲイン媒質は位相情報を記憶しない。CWでなくパルスレーザ(定在波ではない)。

→ 電子バンチと光パルスのオーバーラップが確保できる精度でよい。



具体的は、数 μm の精度でよい。

共振器長アラインメントの要求精度

K-J. Kim 論文における記述

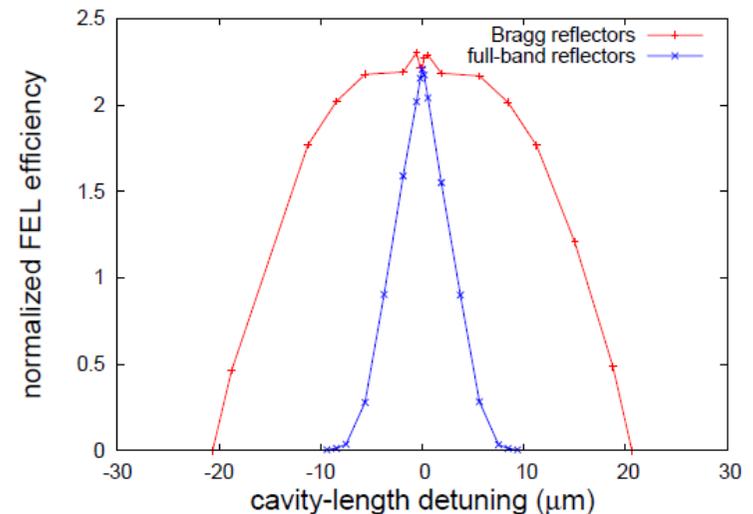
To limit the reduction in the effective gain by the second term in Eq. (2) to within 1%, we require $u < 0.2\tau_M$, which becomes $u < 20$ fs in the present case. The tolerance in the timing of the electron beam is therefore 20 fs, and the corresponding tolerance in the optical cavity length is $3 \mu\text{m}$. The angular tolerance $\Delta\theta$ of the mirror may be determined by requiring that the change of the optical axis of the cavity be less than one tenth of the rms mode angle. We obtain $\Delta\theta \leq 0.8(Z_R/L_{\text{opt}})^2 \sqrt{\lambda/2L_U}$, where L_{opt} is the length of the optical cavity. Taking $L_{\text{opt}} \approx 100$ m, we find $\Delta\theta \leq 8$ nrad. These tolerances are tight but should be achievable.

バンチタイミングの精度 $< 20\text{fs}$

共振器ミラー傾きの誤差 $< 8\text{nrad}$

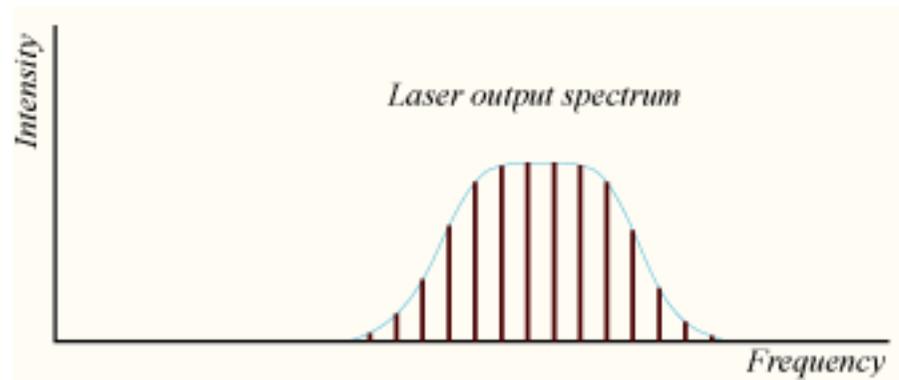
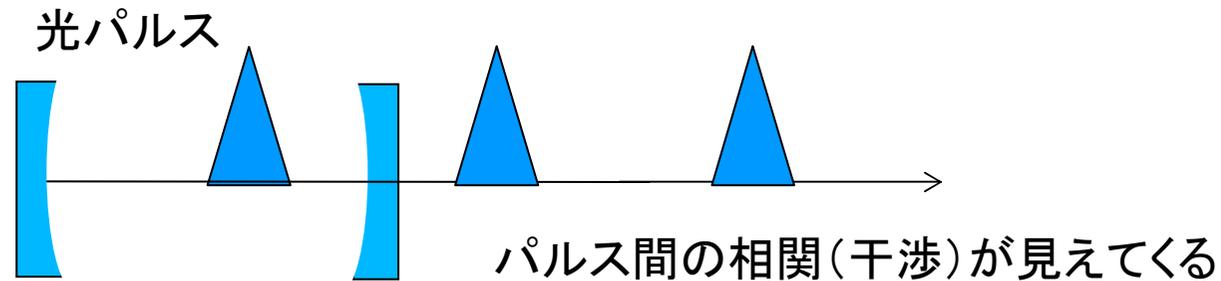
JAERI-FEL では、14mの共振器長を $1\mu\text{m}$ 以下の精度で制御できた。
レーザーコンプトン光源用の laser super cavity (数十センチ)では
フィードバックでサブナノメートルの精度でミラー制御が実現している。

1次元シミュレーション



K-J. Kim 論文で示されたように、
共振器長(バンチタイミング)は
 $6\mu\text{m}$ (20fs)の精度で十分。

もしも、共振器長が波長精度で制御できたら、、、



縦モードの間隔 = 40neV for 1MHz repetition

Bragg ミラーの仕様と熱負荷の問題は？

共振器の全損失 = 10-20% にしたい → 完全結晶が必要

- 材料の候補は、シリコン、ダイヤモンド、サファイアなど。
- X線ビームのスポット (100 μm 程度) のサイズでよい。

XFEL-O, 1MHz 運転のパラメータ

ミラー面のX線スポット、平均パワーは、21W、2kW/mm²

→ 第3世代光源のアンジュレータ光、5-10kW、2kW/mm²

X線光学の専門家からコメントをいただきたい。

XFEL-0におけるFEL波長の可変性は？

Bragg ミラーの角度を調節することで [K-J. Kim et al., PR ST-AB 12, 030703 \(2009\)](#).
波長可変を実現できる

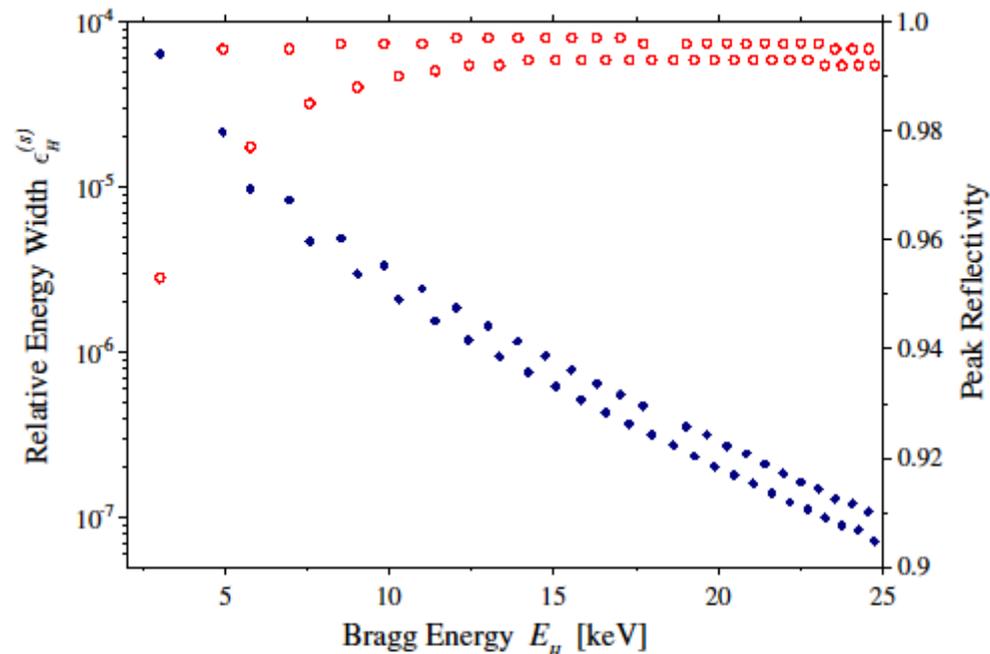
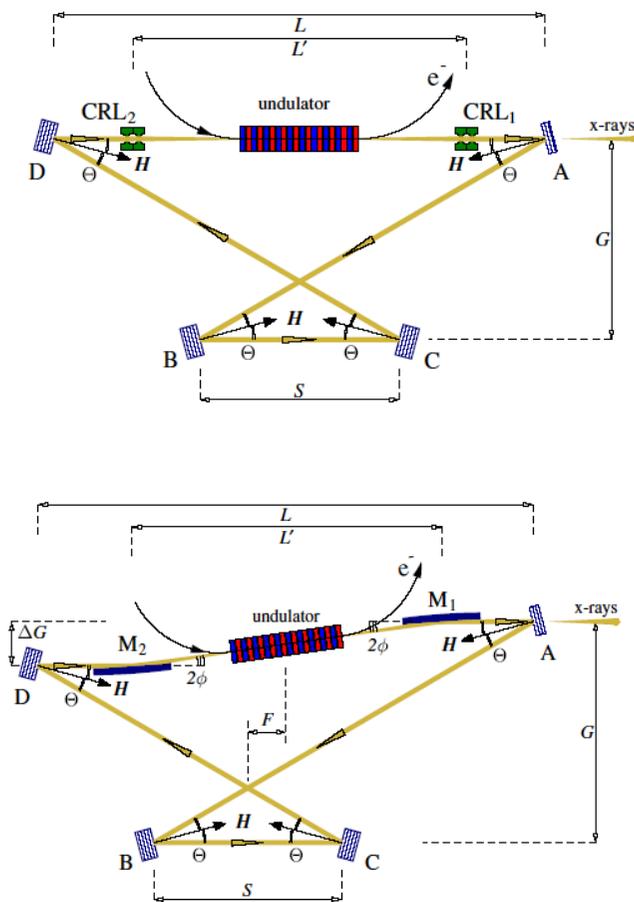


FIG. 5. (Color) Closed circles: relative energy width $\epsilon_H^{(s)}$ of all allowed Bragg reflections in diamond (C) crystals, in the symmetric scattering geometry, for Bragg energies E_H up to 25 keV. Open circles: the same for the peak reflectivity. Calculations are performed with dynamical theory of x-ray diffraction in thick crystals as described in [11]. Debye-Waller factors are calculated using 2200 K Debye temperature.

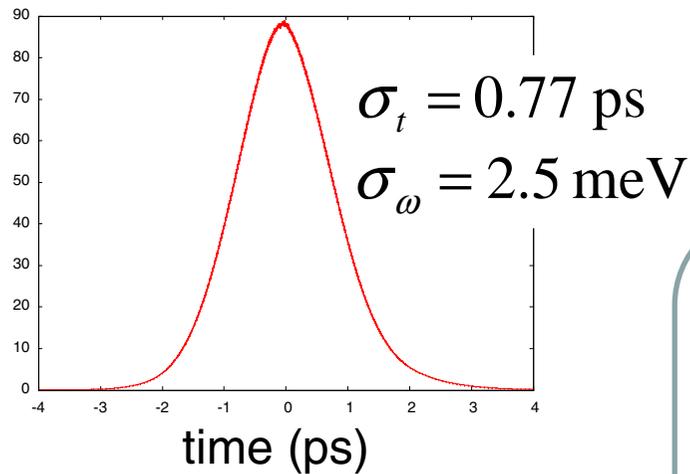
XFEL-Oの発振帯域は何で決まるのか？

$$\sigma_{\omega} = \frac{1}{2\tau} = \frac{g^{1/4}}{\sqrt{8\tau_{el}\tau_M}}$$

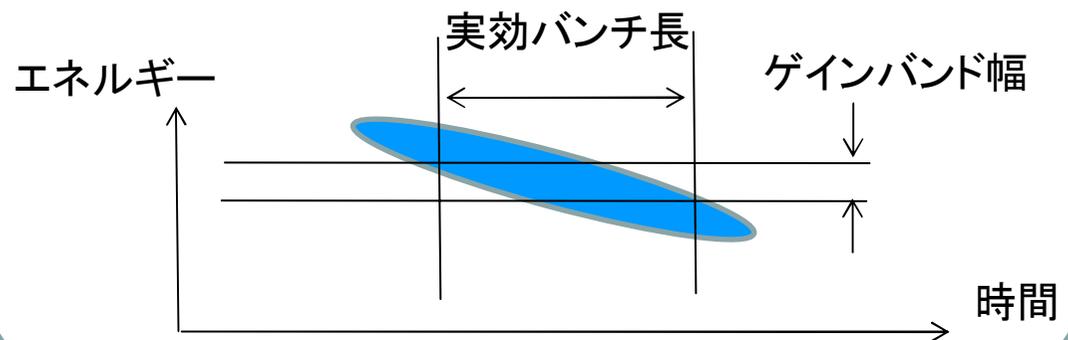
$$\tau_M = \frac{1}{2\sigma_M}$$

Bragg ミラーの帯域

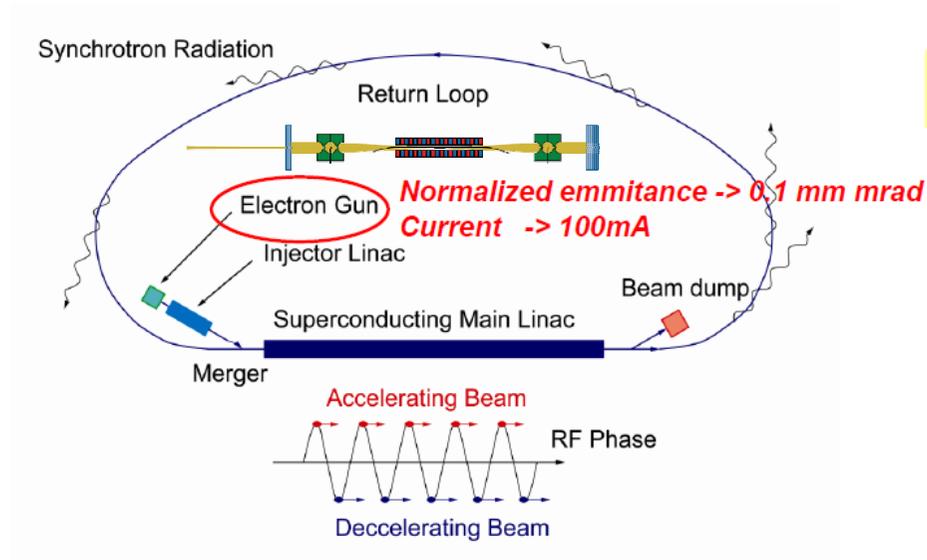
τ_{el} 電子バンチ長



電子バンチにエネルギー変調を与えて、
 実効的なバンチ長を短くできる



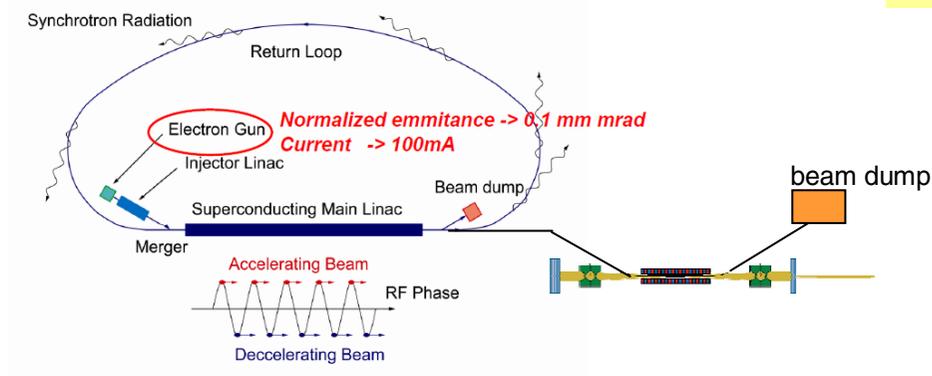
ERL光源とXFELOの組み合わせ



周回軌道に組み込む構成

FEL発振により生じる
電子のエネルギー広がり
は $1/N_w$ のオーダー → ERLと両立

($N_w=3000$)



周回軌道と独立に設置

超伝導リニアックは共有
運転モードで切り替える

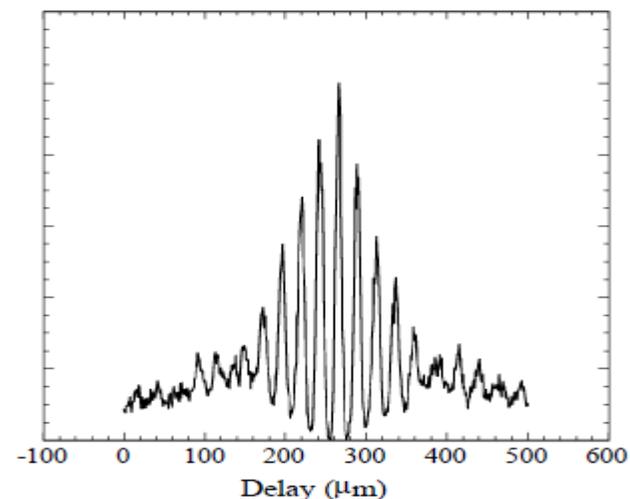
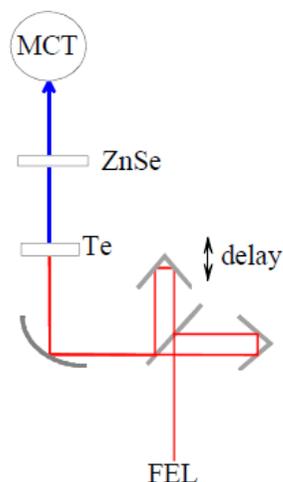
40 pC, 1 MHz = 40 μ A

エネルギー回収なしで運転可能
ただし、ビームダンプは必要

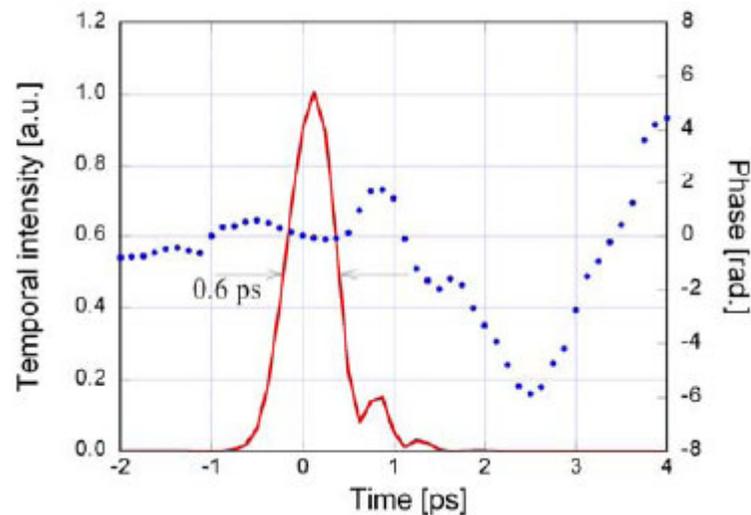
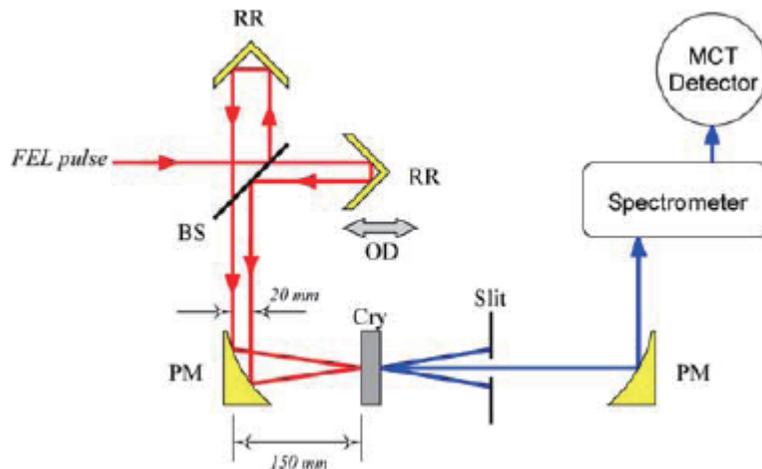
共振器FELの非線形効果を使った実験例(原研FEL)

SHG自己相関による
パルス波形の測定
(電場波形の直接測定)

Phys. Rev. Lett. (2002).



SHG-FROGによる
パルス波形と位相の測定(飯島、加速器学会2008)



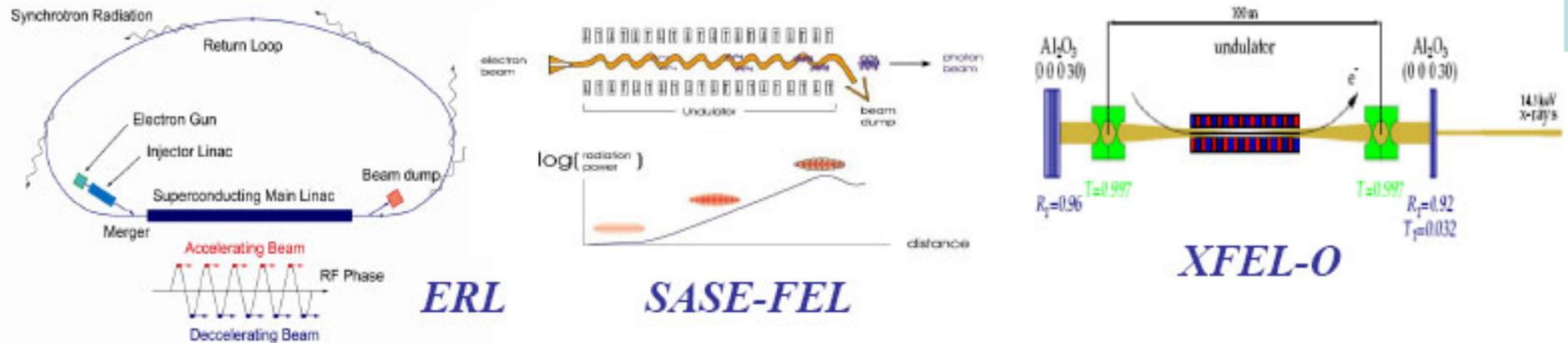
同一の光パルスが高繰り返しで来る = 再現性を保ってdelay を変えられる

まとめ

- K-J. Kimらによる共振器型XFELの提案を受けて、FELの解析を実施した。
- 位相シフトを含むBragg反射を模擬した計算（1次元時間依存のFELシミュレーション）。
- 発振の狭帯域化が見られた。飽和後は Gaussian-like な時間波形。
- 12 keV X線、パルスあたり 10^9 photon、帯域 2.5 meV、
- 繰り返し 1-100 MHz、 $B_{\text{ave}}=10^{26}\text{-}10^{28}$ ph/mm²/mrad²/s/0.1%BW
 $B_{\text{ave}}=10^{26}\text{-}10^{28}$ ph/mm²/mrad²/s/ 10^{-6} BW
- 5 GeV ERL では、40 pC、2 ps、0.1 mm-mrad で、ゲイン 28% となる。
- Bragg ミラーの作成、熱負荷への対応、共振器の姿勢制御などチャレンジングな課題はあるが、ERLの~~オプション~~として極めてユニークな光源。

目玉

Functions of ERL, SASE-FEL & XFEL-O



	average brilliance	peak brilliance	repetition rate (Hz)	coherent fraction	bunch width(ps)	# of BLs	Remark
ERL	$\sim 10^{23}$	$\sim 10^{26}$	1.3G	$\sim 20\%$	0.1~1	~ 30	Non-perturbed measurement
XFEL-O (Option)	$\sim 10^{27}$	$\sim 10^{33}$	$\sim 1M$	100%	1	Few	Single mode FEL
SASE-FEL	$\sim 10^{22\sim 24}$	$\sim 10^{33}$	100~10K	100%	0.1	~ 1	One-shot measurement
3rd-SR	$\sim 10^{20\sim 21}$	$\sim 10^{22}$	$\sim 500M$	0.1%	10~100	~ 30	Non-perturbed measurement

(brilliance : photons/mm²/mrad²/0.1%/s @ 10 keV)