



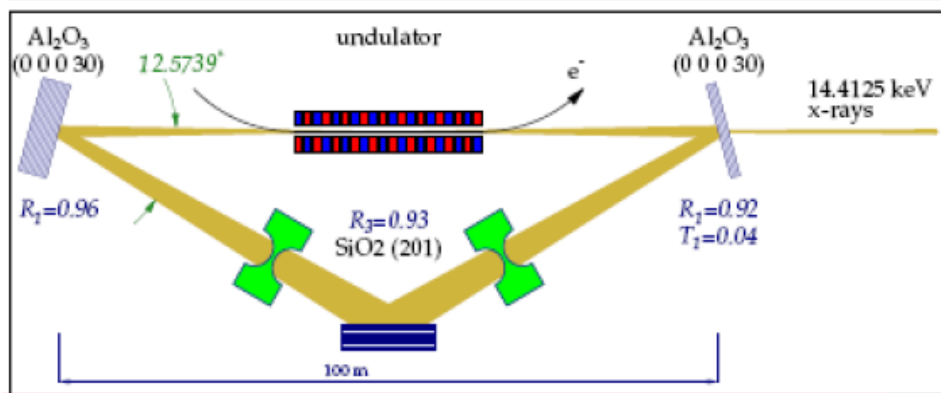
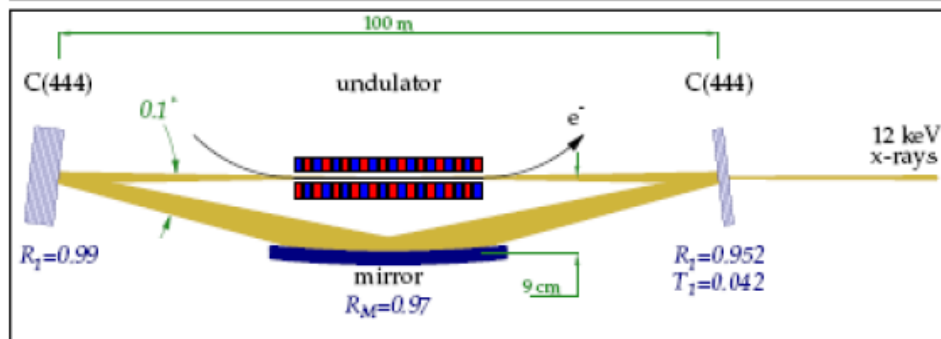
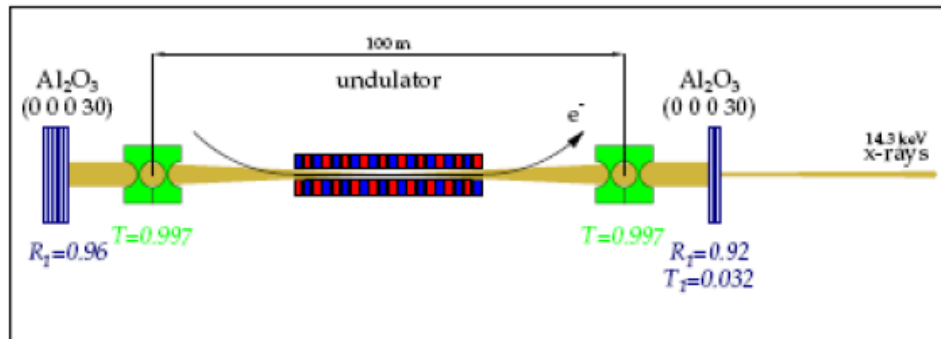
共振器型XFELの検討

羽島良一

2008.3.12

ERLビームダイナミクスWG

K-J. Kim らによる提案



K-J. Kim, Y. Shvyd'ko, S. Reich,
ERL 07 & Frontiers in FEL 07

共振器型のXFEL

— ERLで可能になる

空間、時間コヒーレンスを備えた
“X線レーザー”

結晶を使った共振器

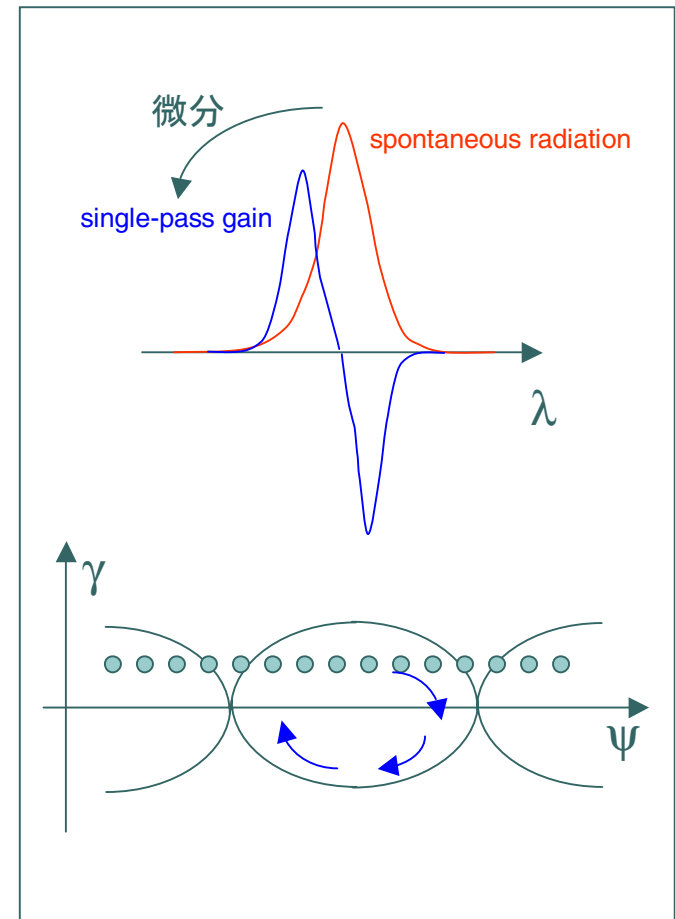
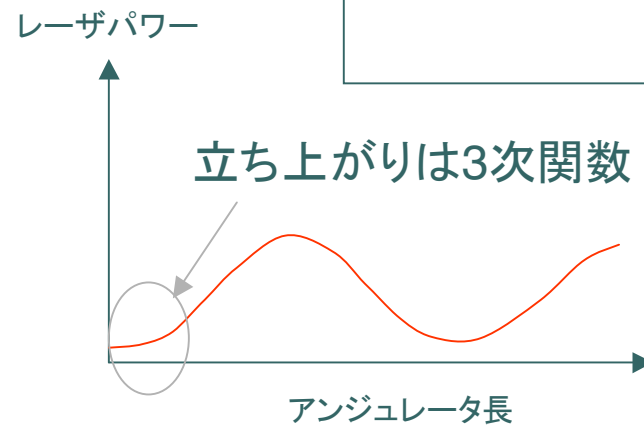
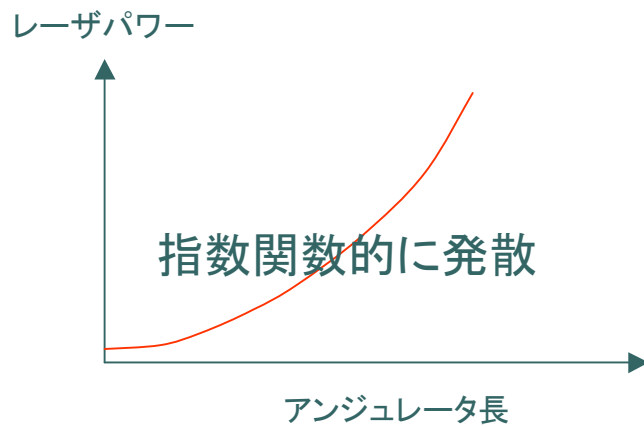
— 周回損失 ~10% も可能

ゲインが損失を上回れば発振

SASEとの違い

FELにおける電磁場の時間発展を解析すると、
2つの固有モードが導かれる。

- 発散する固有モード = SASE
- 振動する固有モード = 共振器



FELゲインの計算

エミッタンス、エネルギー広がりを含めて、
解析的に見積もることができる。

発振波長

$$\lambda = \lambda_u \frac{1+a^2}{2\gamma^2}$$

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

FEL パラメータ

$$\rho^3 = \frac{1}{16\pi} a^2 \lambda_u^2 (JJ)^2 \gamma^{-3} \frac{I_p}{I_A} \frac{1}{A_{eff}}$$

$$I_A = \frac{mc^3}{e} \approx 17\text{kA}$$

実効的なビーム断面積

$$A_{eff} = \frac{\pi w^2}{2} \left(1 + \frac{4\sigma_r^2}{w^2} \right)^2$$

Colson's dimensionless current

$$j_0 = 2(4\pi N_u \rho)^3$$

電子ビームサイズの制限

$$\sigma_r < \frac{w}{2}$$

single-pass gain

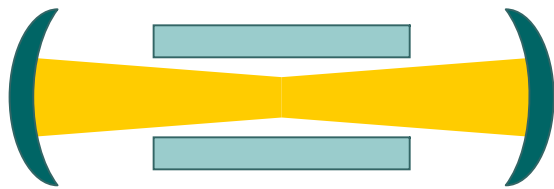
$$G_0 = \frac{0.135 j_0}{1 + 1.7(4\sigma_E N_u)^2} \longrightarrow$$

エネルギー広がり制限 $\sigma_E < \frac{1}{4N_u}$

エミッタンスの条件

SASE-FEL (high-gain regime) の光ビームプロファイル = 電子ビームがガイド

共振器FEL (low-gain regime) の光ビームプロファイル = 共振器の固有モード



ビームウェスト、レーリー長 $\pi w_0^2 = \lambda Z_R$

アンジュレータ端におけるスポットサイズ $w^2 = w_0^2 \left[1 + \left(\frac{L_u / 2}{Z_R} \right)^2 \right]$

アンジュレータ全長にわたる平均 $\left\langle \frac{w^2}{4} \right\rangle = \frac{\lambda}{4\pi} \left(Z_R + \frac{L_u^2}{12Z_R} \right)$

電子ビームも同様に、

ビームサイズ、ベータ関数

$$\sigma_r^2 = \frac{\beta \varepsilon_n}{\gamma}$$

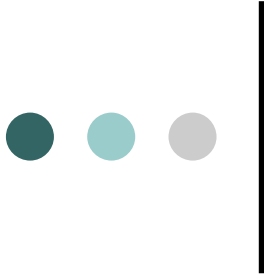
アンジュレータ端

$$\sigma_r^2 = \frac{\beta^* \varepsilon_n}{\gamma} \left[1 + \left(\frac{L_u / 2}{\beta^*} \right)^2 \right]$$

平均

$$\langle \sigma_r^2 \rangle = \frac{\varepsilon_n}{\gamma} \left[\beta^* + \frac{L_u^2}{12\beta^*} \right]$$

$$\frac{\varepsilon_n}{\gamma} < \frac{\lambda}{4\pi}$$



K-J. Kim's examples

Frontiers in FEL Physics and Related Topics,
Sep. 8-14, 2007, Elba Island, Italy

Examples of Steady-State Calculation

Electrons are not focused but matched to the optical mode determined by cavity configuration (see later)

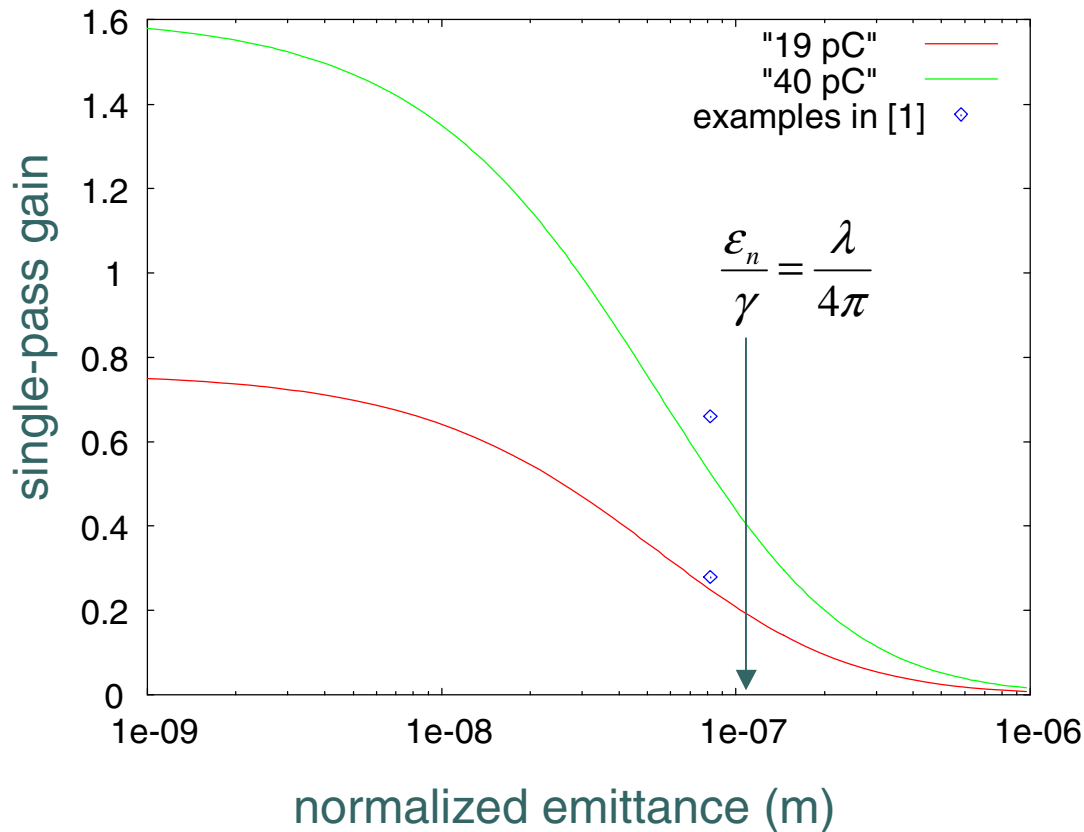
$$\sigma_{\tau}=2 \text{ ps}, \sigma_{\gamma}=1.37, \varepsilon_{x\eta}=0.82 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

$$Z_R=\beta^*=10\sim 12 \text{ m}$$

$\lambda(\text{\AA})$	E(GeV)	Q (pC)	K	$\lambda_U(\text{cm})$	N_U	G_0 (%)	R_T (%)	P_{sat} (MW)
1	7	19	1.414	1.88	3000	28	90	19
1	7	40	1.414	1.88	3000	66	83	21
0.84	7.55	19	1.414	1.88	3000	28	90	20
0.84	10	19	2	2.2	2800	45	83	18

解析式によるゲインの計算

$$\lambda = 1 \text{ \AA}$$



$E = 7 \text{ GeV}$
 $q = 19/40 \text{ pC}$
 $\sigma_t = 2 \text{ ps}$
 $\sigma_E = 1e-4$
 $a = 1, \lambda_u = 1.88 \text{ cm}, N_u = 3000$
 $\beta^* = Z_R = 10 \text{ m}$

$I_p = 3.8/7.6 \text{ A}$
 $L_u = 56 \text{ m}$

FEL oscillator

$19 \text{ pC}, \epsilon_n = 0.1 \text{ mm-mrad}$
 $\rightarrow \text{gain} \sim 20 \%$

loss < gain で発振

SASE FEL

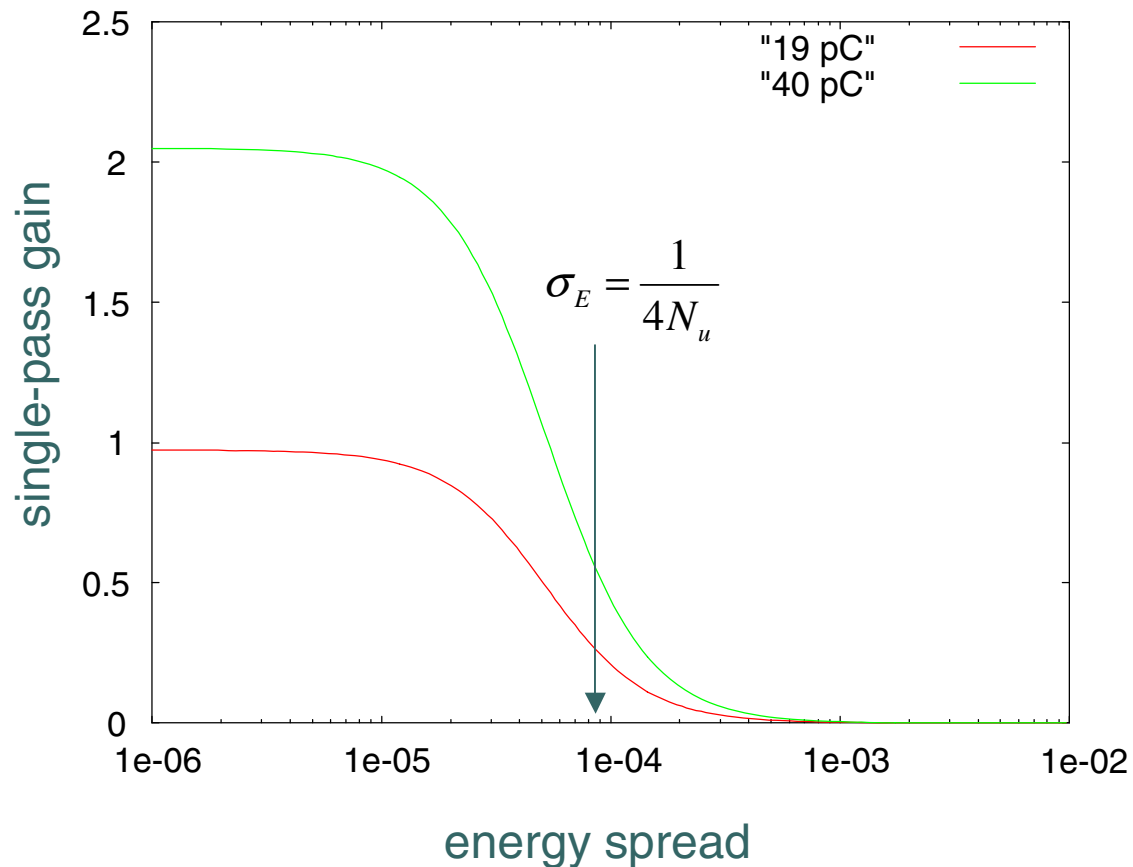
$\rho = 4e-5$

発振しない

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

解析式によるゲインの計算

$$\lambda = 1 \text{ \AA}$$



$$E = 7 \text{ GeV}$$

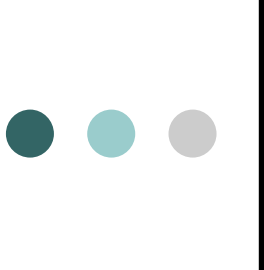
$$q = 19/40 \text{ pC}$$

$$\sigma_t = 2 \text{ ps}$$

$$\varepsilon_n = 1e-7 \text{ m}$$

$$a = 1, \lambda_u = 1.88 \text{ cm}, N_u = 3000$$

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



まとめ

- 共振器型XFELの原理、ゲイン計算式を紹介した。
- SASEとは異なる固有モードで発振する。
- K-J. Kimらの提案パラメータを確認した。
- エミッタンス、エネルギー広がりへの要求は、7-GeV ERLで到達可能な範囲にある。
- 飽和特性、空間、時間モードの発展などは、数値計算が必要。
- ミラーの実現性については、今後、確認したい。