



共振器型X線自由電子レーザーにおける コンプトン散乱ガンマ線の発生

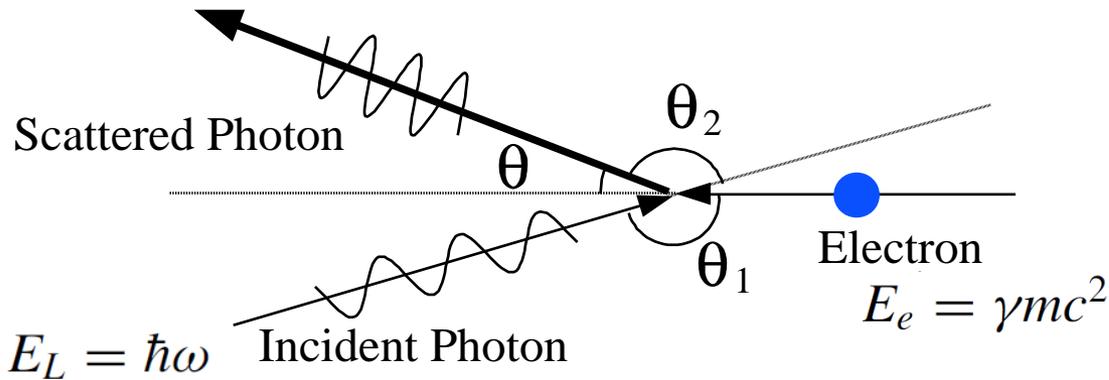
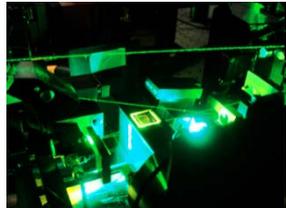
羽島 良一、藤原 守

2016.8.10

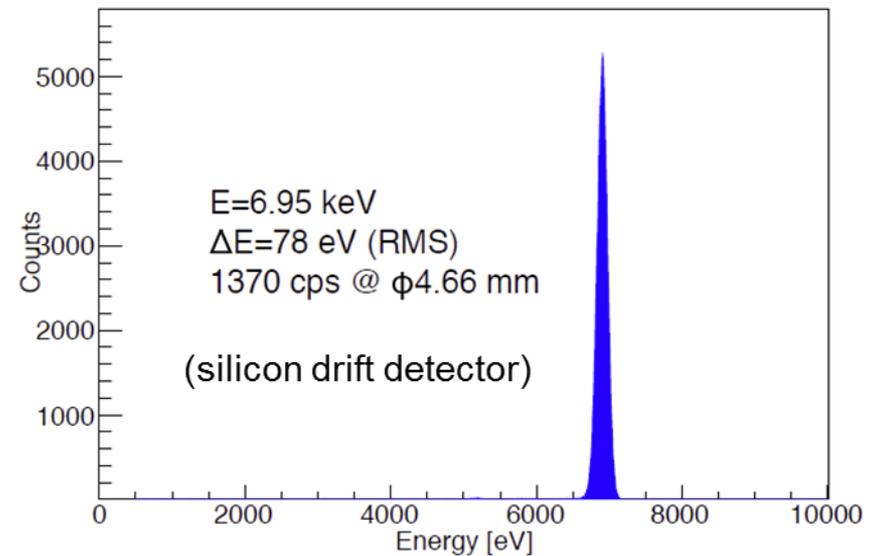
第13回日本加速器学会年会
幕張メッセ

(* R. Hajima and M. Fujiwara,
Phys. Rev. Accel. Beams 19, 020702 (2016)

レーザーコンプトン散乱 Laser Compton Scattering (LCS)



- ✓ 点光源からのコーン状ビーム
- ✓ エネルギー可変 (keV~GeV)
- ✓ 偏光 (直線、円)
- ✓ コリメータで単色化

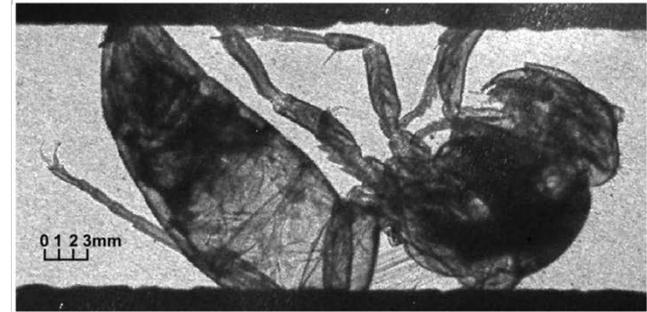


コンパクトERLにおける LCS-X線発生

LCS の利用 (X線、ガンマ線)

keV

イメージング
XRFによる元素分析

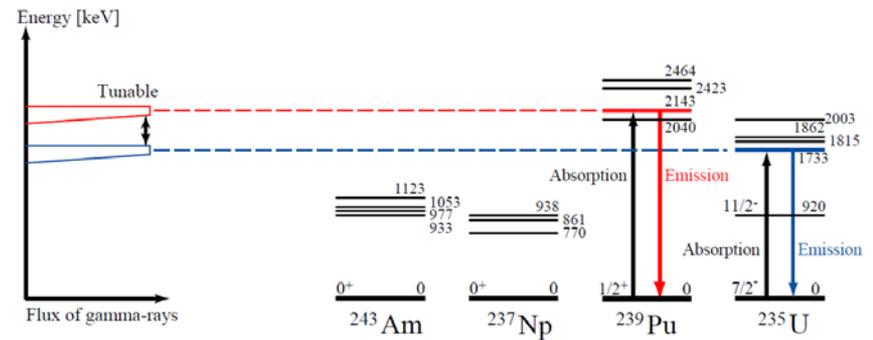


An X-ray image of a hornet taken with LCS-produced X-ray.
Detector: HyPix-3000 from RIGAKU. Detector was apart from the sample by approx. 2.5 m.

A. Kosuge et al., Proc. IPAC-2015, TUPWA066

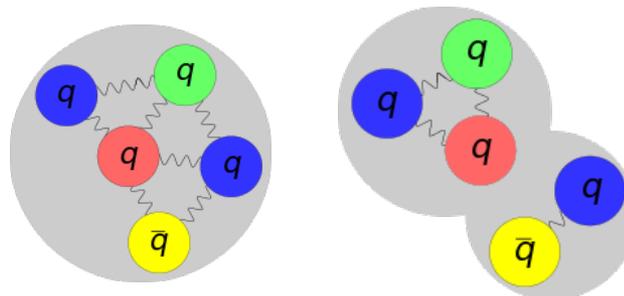
MeV

光核反応 (γ, γ') (γ, n)
核物質の非破壊検知・分析
偏極ガンマ線・陽電子生成

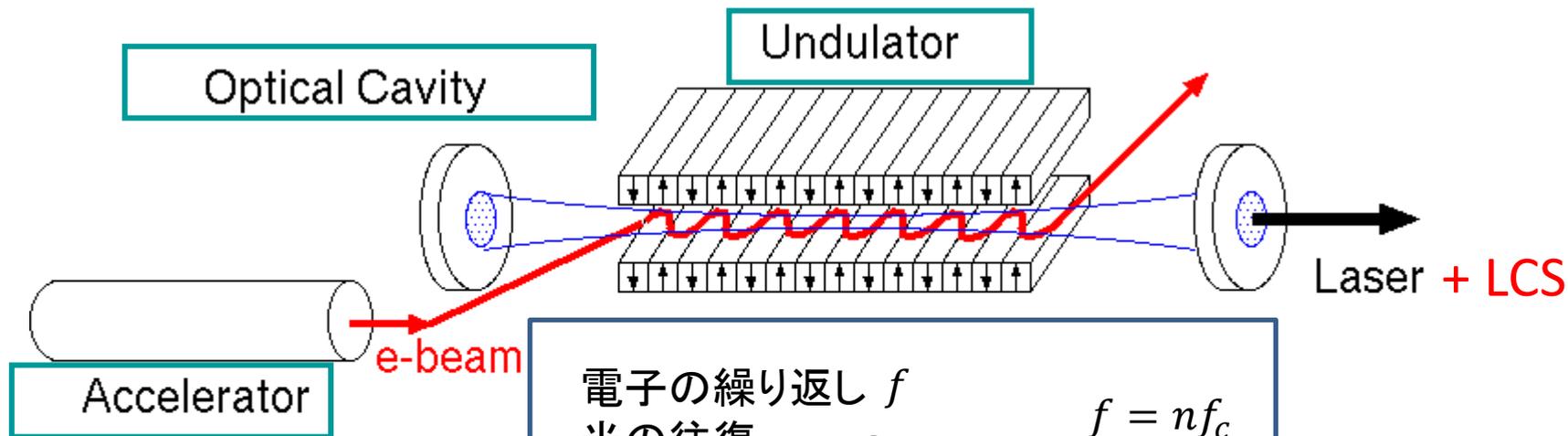


GeV

ハドロン物理
 γ - γ コライダ



共振器型FELによるLCS



電子の繰り返し f
 光の往復 f_c

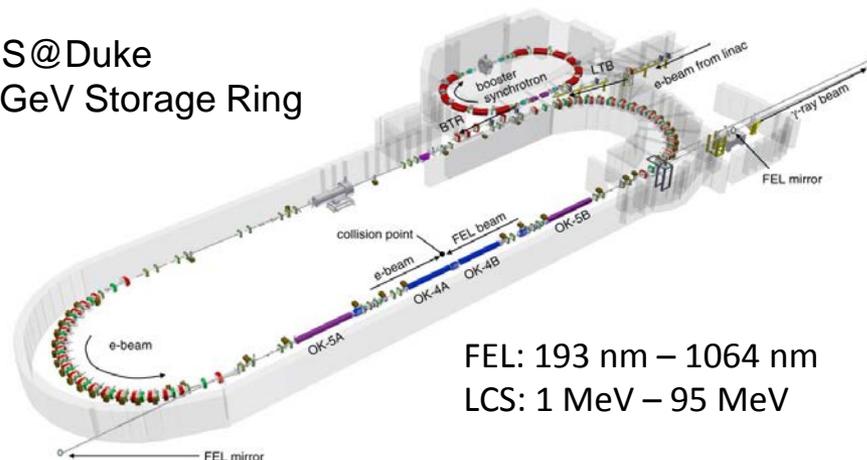
$$f = n f_c$$

- ✓ $n \geq 2$ では、「必ず」衝突
- ✓ Intra-cavity power を利用



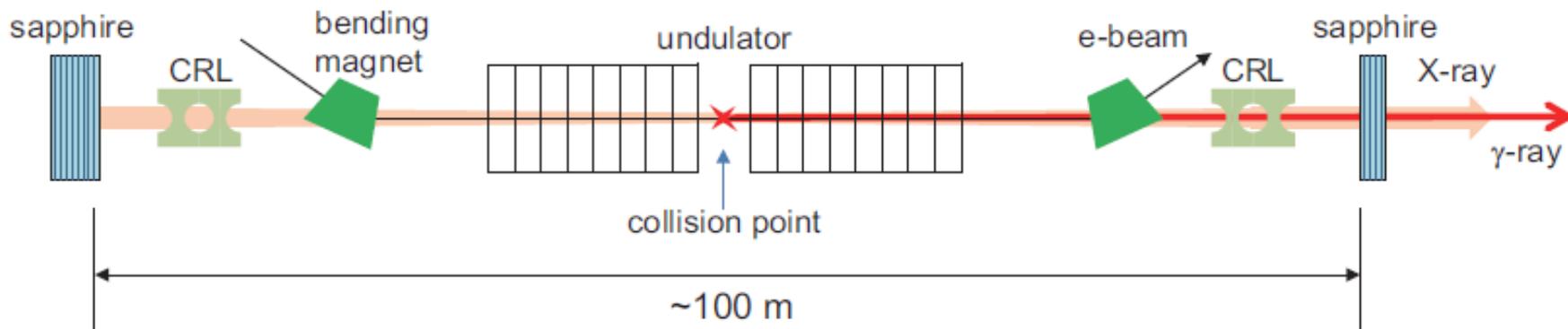
2004 FEL prize
Hiroyuki Hama and Vladimir Litvinenko

HIGS@Duke
1.2-GeV Storage Ring



FEL: 193 nm – 1064 nm
LCS: 1 MeV – 95 MeV

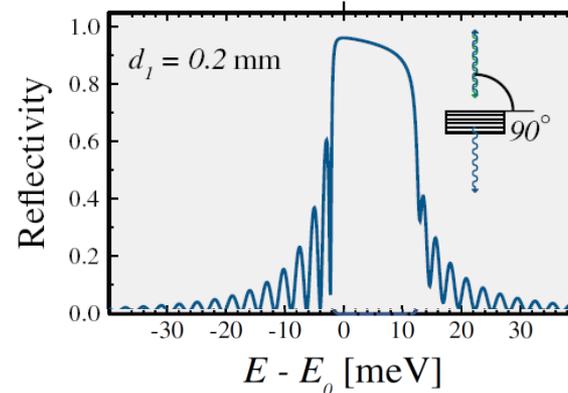
XFEL O- γ = XFEL Oscillator による LCS



完全結晶によるX線のBragg反射を利用。
時間・空間コヒーレンスをもったX線“レーザー”
次世代放射光源として提案され研究が進んでいる。

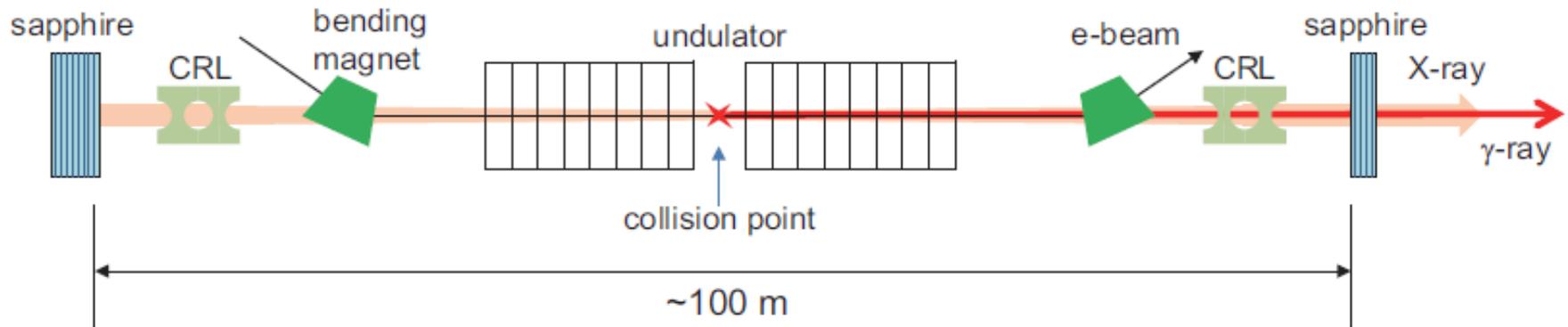
K-J. Kim ら ERL-2007 WS
PRL 100, 244802 (2008)

Al_2O_3 によるBragg反射 (14.3keV)



IR/UV FEL と同様に Compton 散乱が起こる
→ GeV エネルギーのガンマ線ビームが発生

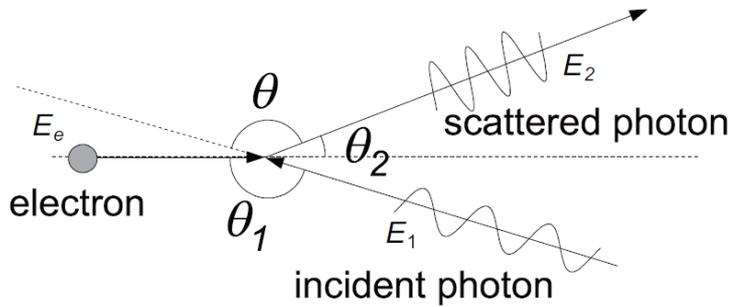
7-GeV XFEL0- γ パラメータ



E_e (GeV)	Q (pC)	σ_E (MeV)	ε_n (mm-mrad)	τ_e (ps)
7	40	1.4	0.082	2
f (MHz)	K	λ_u (cm)	N_u	Z_R (m)
3	1.414	1.88	3000	10
λ (Å)	gain (%)	loss (%)	out couple (%)	N_X
1.0	50	17	4	2.0×10^{10}

3 MHz 運転 → 100 m の共振器中に X 線パルスが2個
→ 共振器の中央で Compton 散乱

LCSスペクトルの計算例 (350 MeV電子, 1 μm レーザ)



電子の静止系:

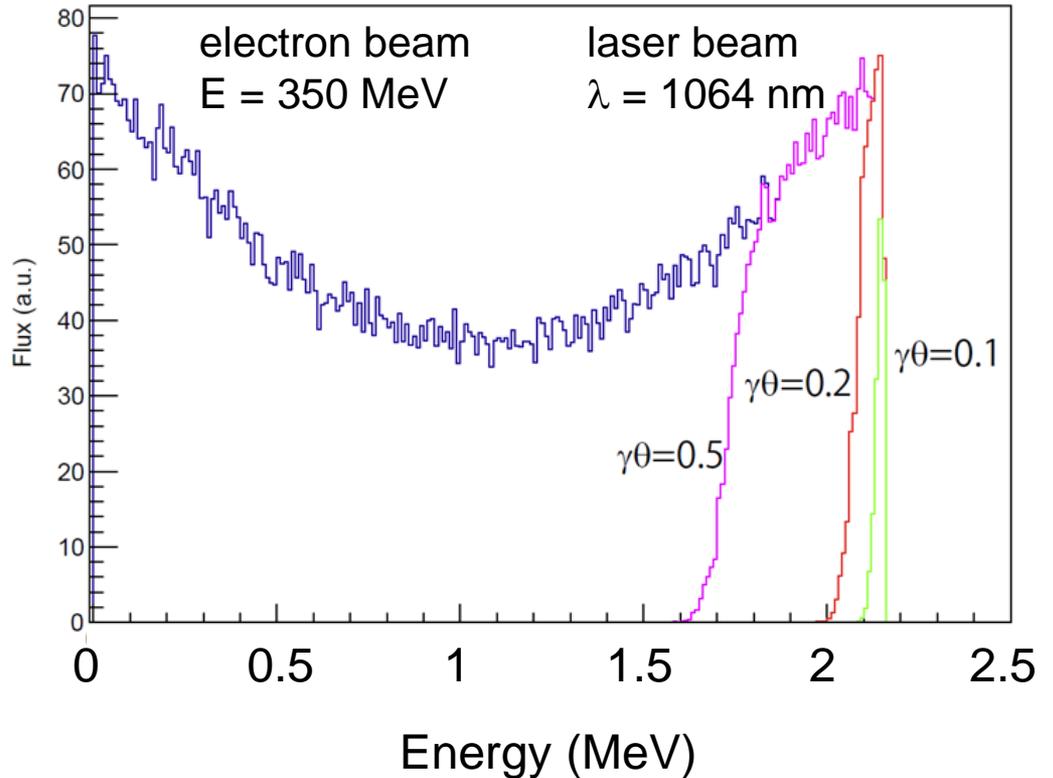
レーザー光子 = 1.6 keV $\ll mc^2$

Thomson散乱近似

$$E_\gamma \approx \frac{4\gamma^2 E_L}{1 + (\gamma\theta)^2}$$

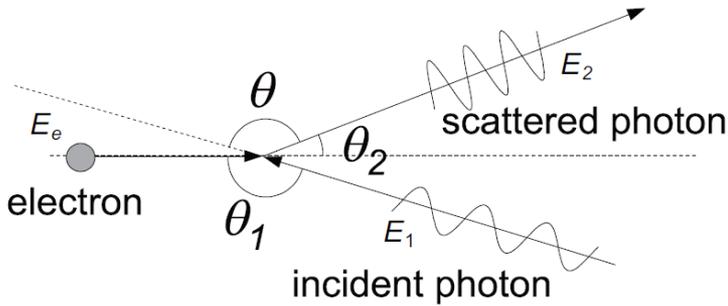
コリメータで散乱角 (θ) を制限する

→ 準単色ガンマ線



7-GeV XFELO では、レーザー光子 (静止系) = 330 MeV $\gg mc^2$

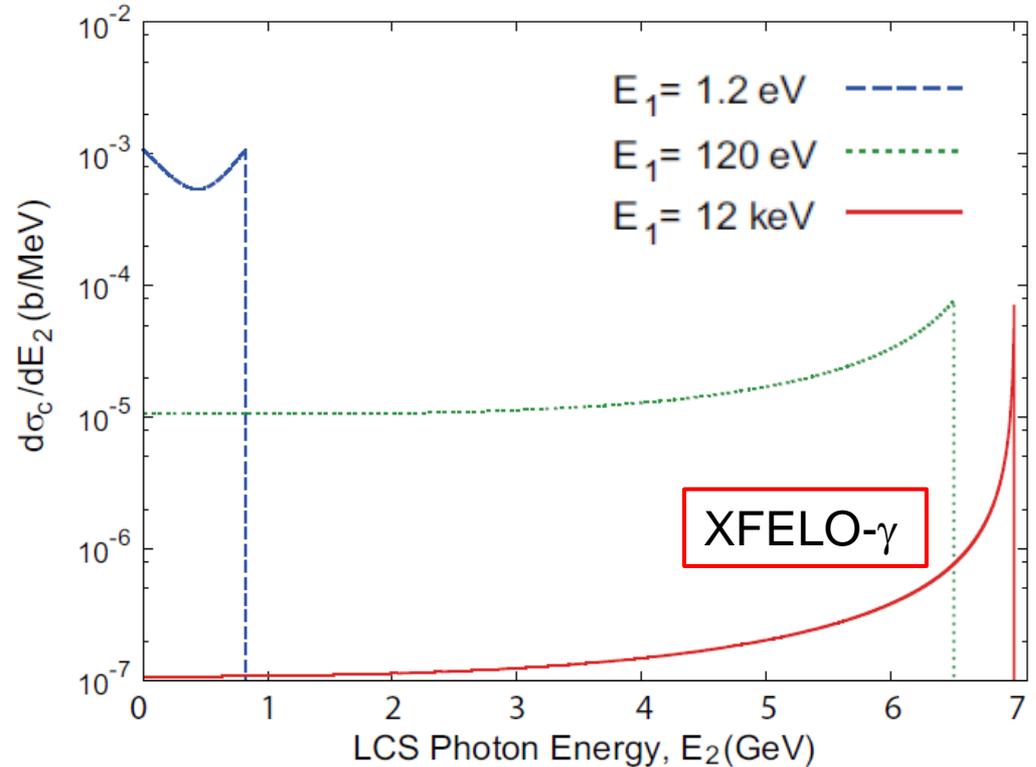
Compton 散乱スペクトル(電子 7GeV)



電子 $\gamma_e = E_e/mc^2,$

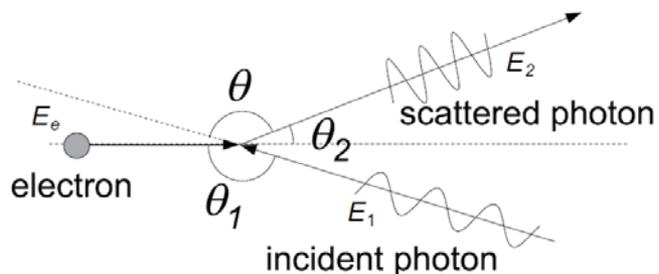
レーザー $\epsilon_1 = E_1/mc^2$

散乱光子 $\epsilon_2 = E_2/mc^2$



$$\frac{d\sigma_c}{d\epsilon_2} = \frac{\pi r_0^2}{2} \frac{1}{\gamma_e^2 \epsilon_1} \left[\frac{1}{4\gamma_e^2 \epsilon_1^2} \left(\frac{\epsilon_2}{\gamma_e - \epsilon_2} \right)^2 - \frac{1}{\gamma_e \epsilon_1} \left(\frac{\epsilon_2}{\gamma_e - \epsilon_2} \right) + \frac{\gamma_e - \epsilon_2}{\gamma_e} + \frac{\gamma_e}{\gamma_e - \epsilon_2} \right]$$

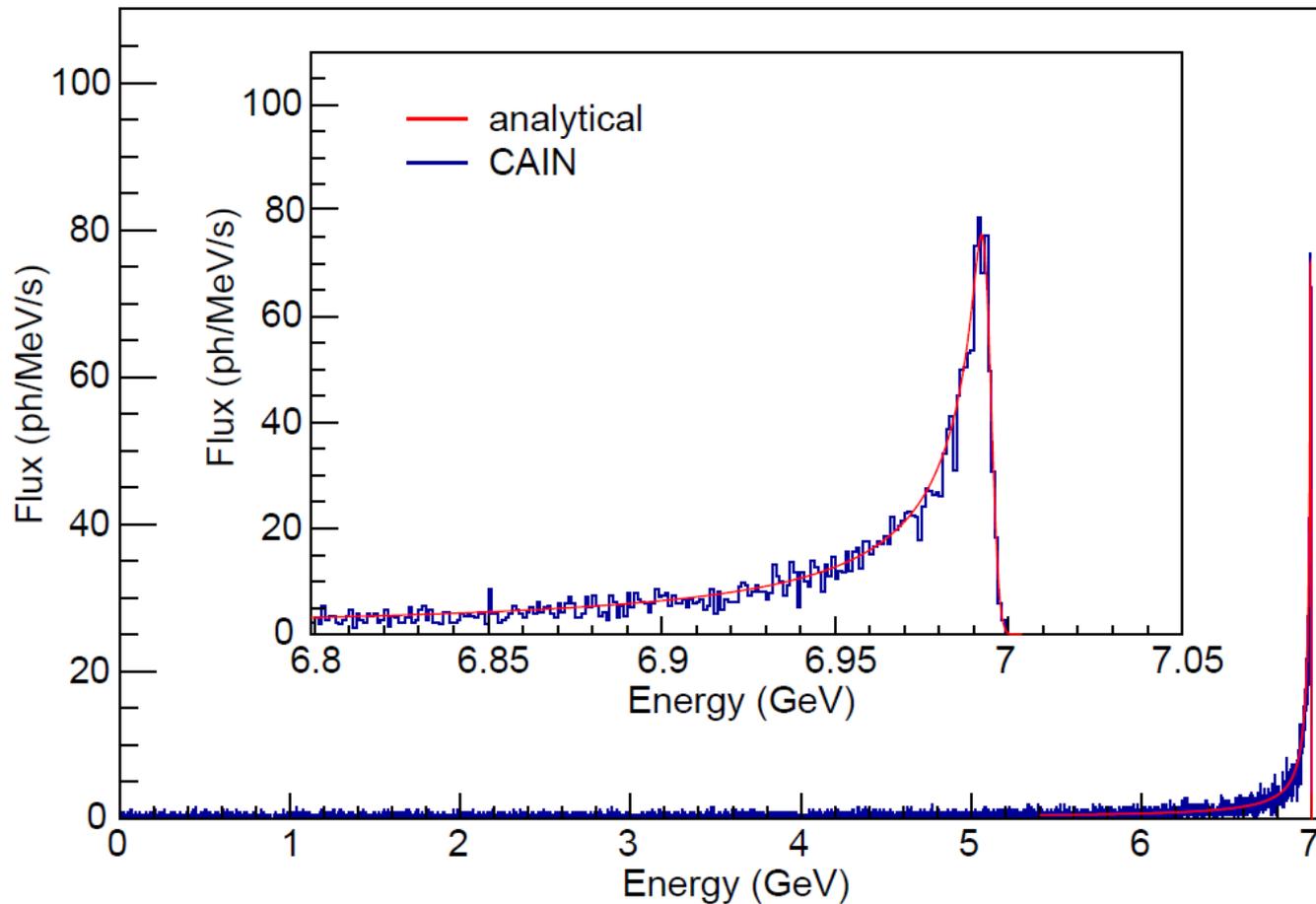
XFEL- γ のスペクトル(理想値からの広がり)



電子ビームエミッタンス、エネルギー広がり。
レーザー回折、帯域による影響は？

エネルギー広がり の要因	関係式	7 GeV XFEL- γ エネルギー広がり
電子とレーザーの発散	$\Delta\epsilon_2^{max} \simeq -\frac{\phi^2}{16\epsilon_1}$ for $\gamma_e\epsilon_1 \gg 1$	$\sim \mu\text{eV}$
レーザーの エネルギー広がり	$\frac{d\epsilon_2^{max}}{d\epsilon_1} = \frac{4\gamma_e^2}{(1+4\gamma_e\epsilon_1)^2}$	4.5 eV
電子の エネルギー広がり	$\frac{d\epsilon_2^{max}}{d\gamma_e} \approx 1$ for $\gamma_e\epsilon_1 \gg 1$.	1.8 MeV
高強度場効果	$A = \frac{e}{2\pi mc^2} E_0 \lambda$	negligible

XFEL γ のスペクトルの計算結果



電子のエネルギー広がりを考慮した解析式
モンテカルロ計算 (CAIN)



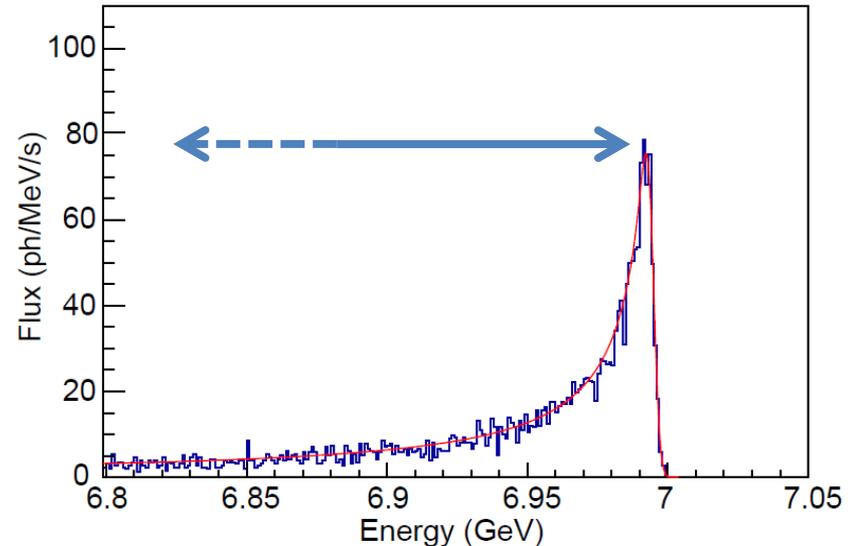
良い一致

XFEL- γ のエネルギー可変性

ガンマ線エネルギー \approx 電子エネルギー

FEL 波長 = 固定

→ 電子エネルギーとアンジュレータ
ギャップを同時に変える



7-GeV XFEL の設計例

$K=1.414$ (7 GeV) \rightarrow $K=0.930$ (5.93 GeV) の時、FEL Gain が 0.7 倍に

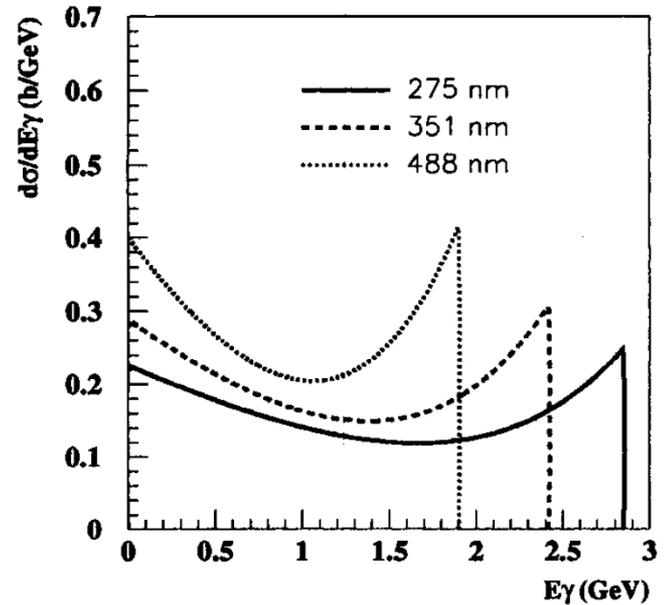
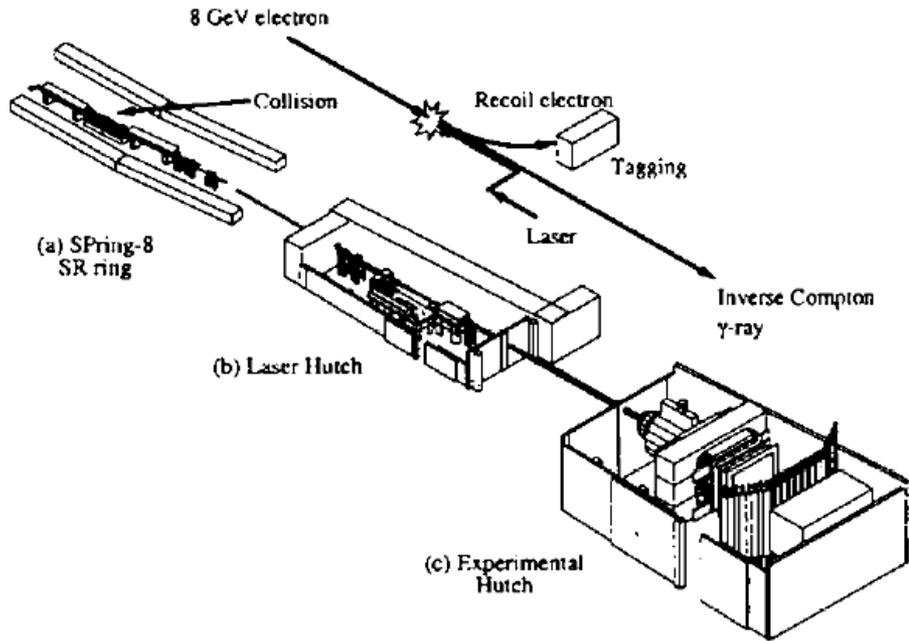
エネルギーの可変範囲は、FEL gain の余裕度による。

これまでの XFEL (~ 10 keV) の設計例 \rightarrow 電子エネルギー = 3.5 – 10 GeV

3.5-10 GeV の範囲で「設計エネルギー」を選択

\rightarrow 設計エネルギーから一定の範囲で可変

SPring-8 の GeV LCS (LEPS)

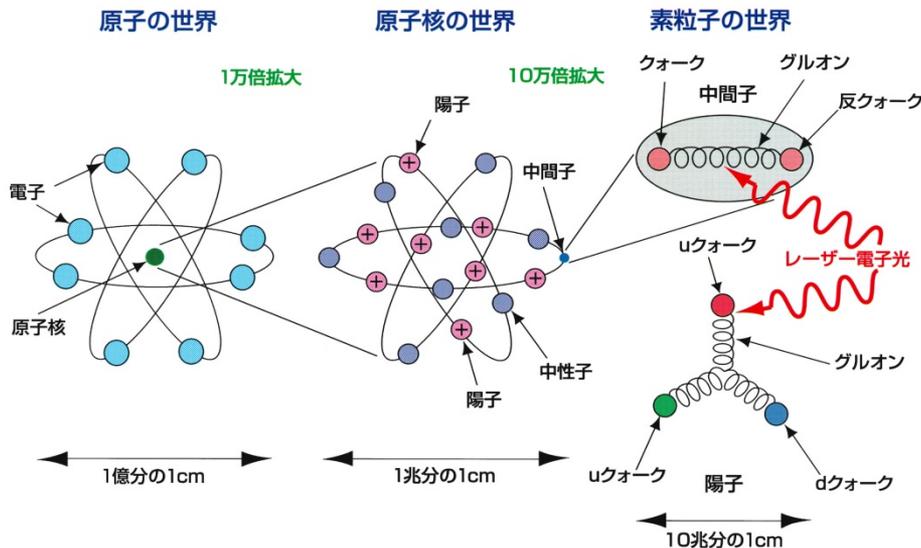


$\sim 10^6$ ph/s/(1.5-3.0 GeV)

$\rightarrow 7 \times 10^2$ ph/MeV/s

T. Nakano et al., Nucl. Phys. A684, 71c (2001)
M. Fujiwara, Prog. Part. Nucl. Phys. 50, 487 (2003)

江尻宏泰、SPring-8 利用者情報(2004)

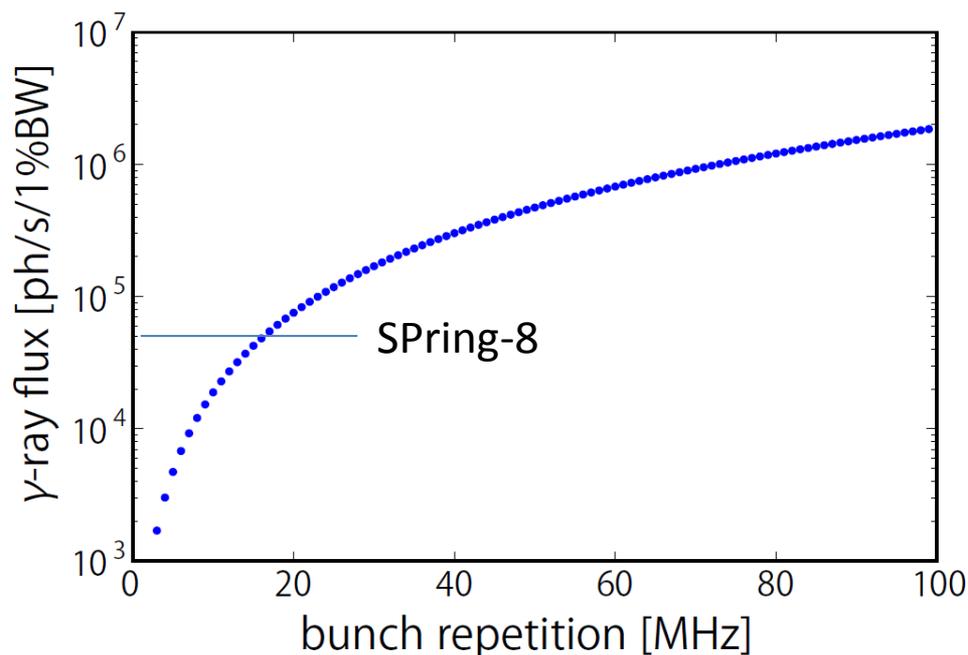
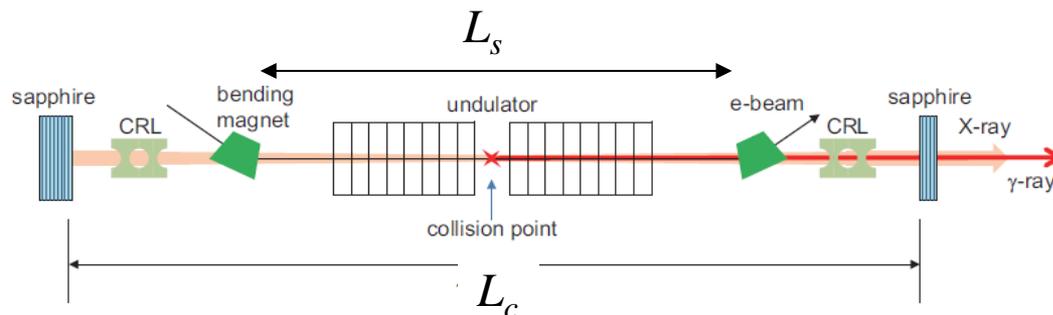


XFEL- γ バンチの高繰り返しによるフラックス増大

電子ビームの繰り返しの増大 \rightarrow ガンマ線発生数の増大

$$\text{発生数} \propto 2\eta L_c L_s / L_b^2$$

バンチ間隔

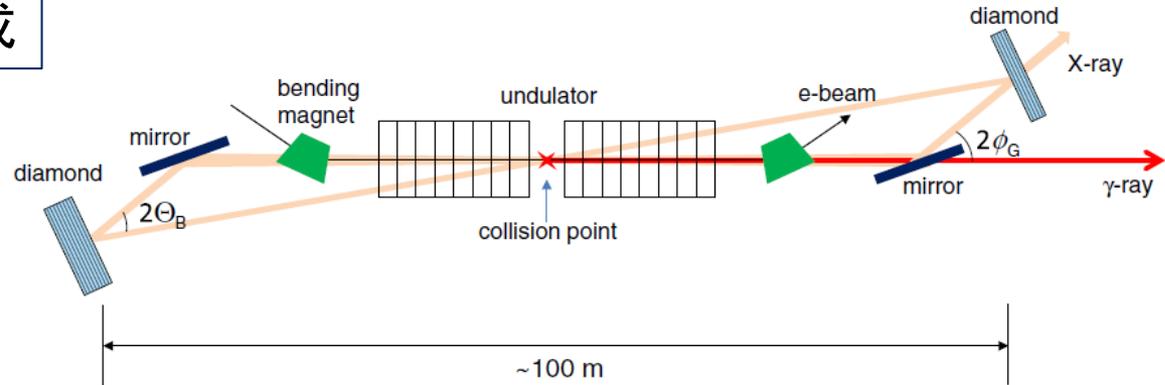


繰り返しの上限は、電子加速器の制限、Bragg ミラーの熱変形

さらに加えて、

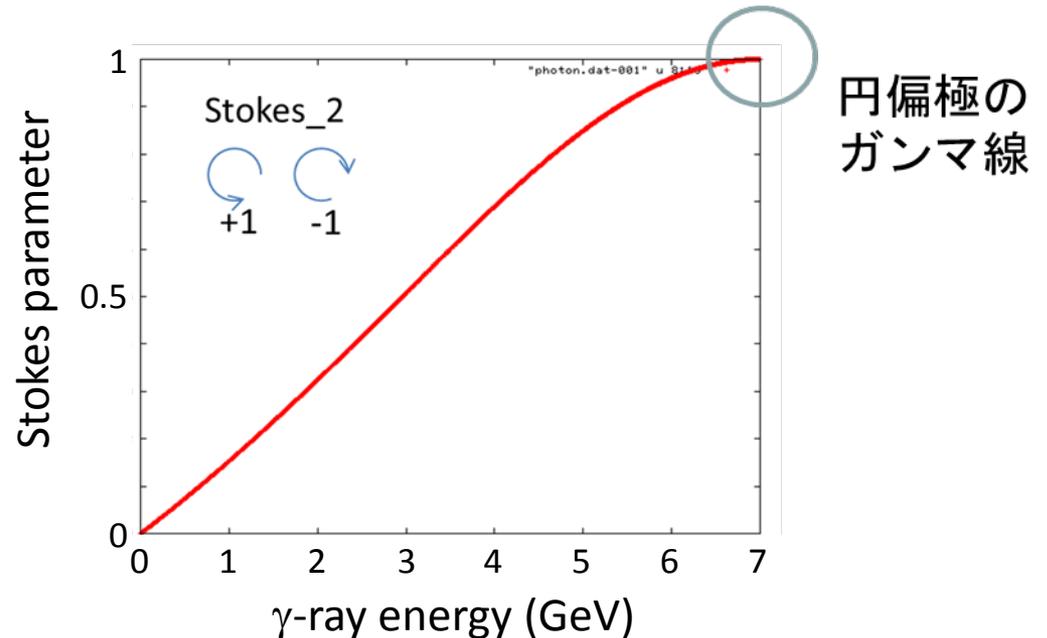
4枚ミラー共振器による構成

衝突点の数の違いを
のぞいて、2枚ミラーと
同様の光源性能



スピン偏極電子による
円偏極ガンマ線発生

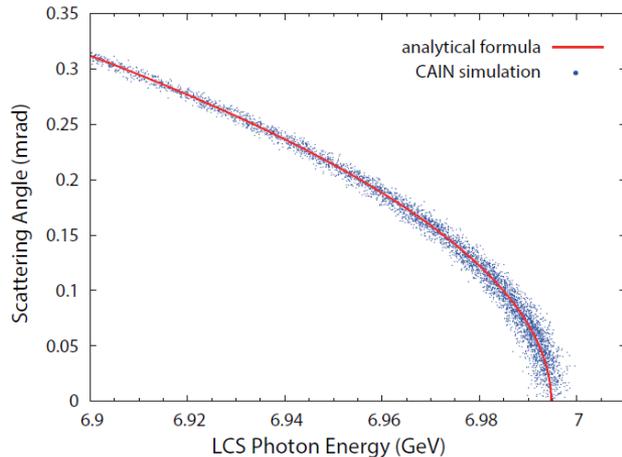
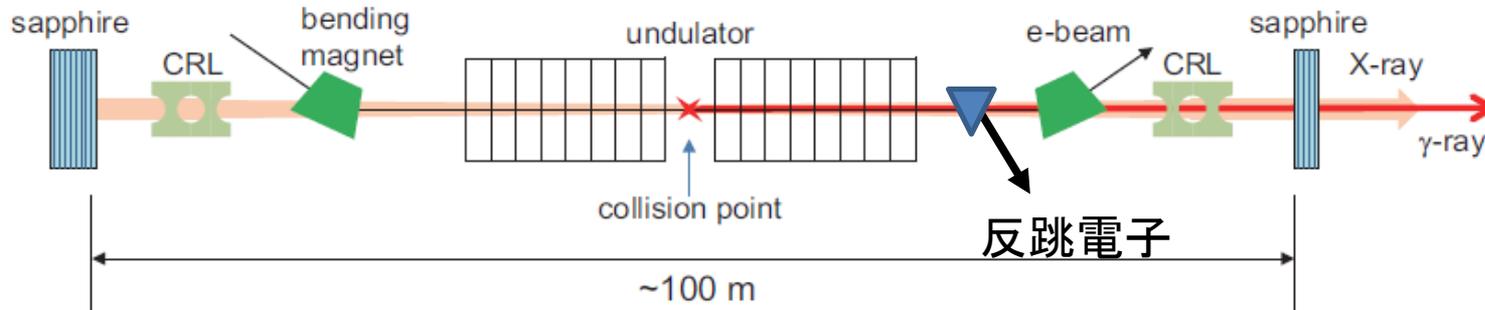
電子のスピンがガンマ線に移行



詳細は

R. Hajima and M. Fujiwara, PR-AB 19, 020702 (2016)

XFELO- γ の光子エネルギーの測定



- コリメータで低エネルギー光子を落とす
- 反跳電子エネルギーの測定 (< 100 MeV)

ガンマ線エネルギーの不定性
衝突点での電子エネルギー広がり ~ 1.8 MeV
(初期値 + FEL相互作用)

cf LEPS@SPring-8 ~ 12 MeV

まとめ

- 共振器型XFELに基づくGeV光子ビームの発生を提案
- Compton 散乱の原理で狭帯域化 (0.1% FWHM)
- LCS スペクトル(ピークエネルギー、帯域)は電子ビームのエネルギー、エネルギー広がりで決まる
- スペクトル密度は 10^2 ph/s/MeV (3MHz) \sim 2×10^4 ph/s/MeV (90 MHz)
- スピン偏極電子を用いれば円偏極ガンマ線
- ハドロン物理研究へ利用
 - SPring-8、JLAB: スレンジネスを持つ ϕ 、 Λ 、 Σ 粒子の生成
 - XFEL- γ で可能になる実験: u- d-quark からの J/ψ 中間子、チャームを持つバリオン生成のダイナミクスなど