



# 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

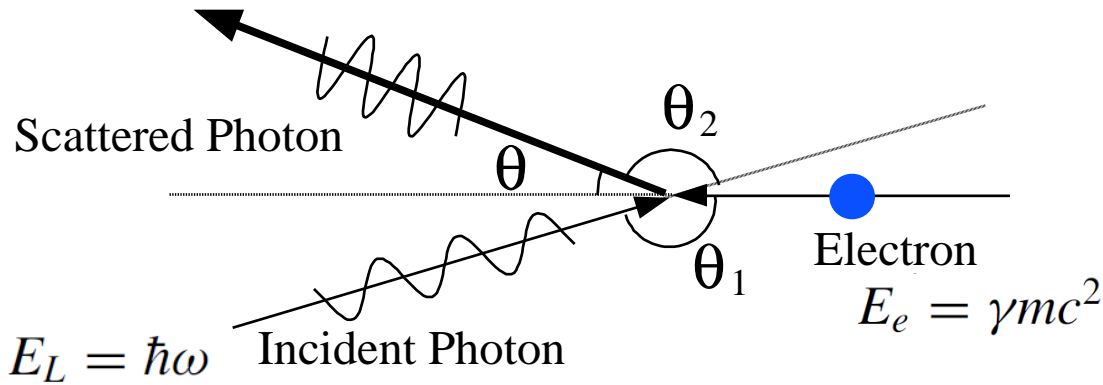
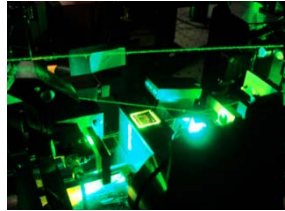
羽島 良一、藤原 守

2016.8.10

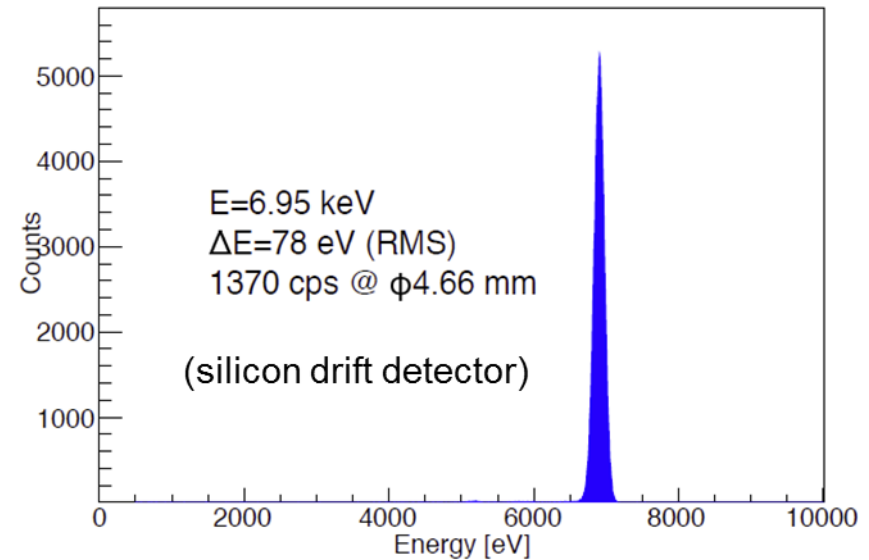
第13回日本加速器学会年会  
幕張メッセ

(\* 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

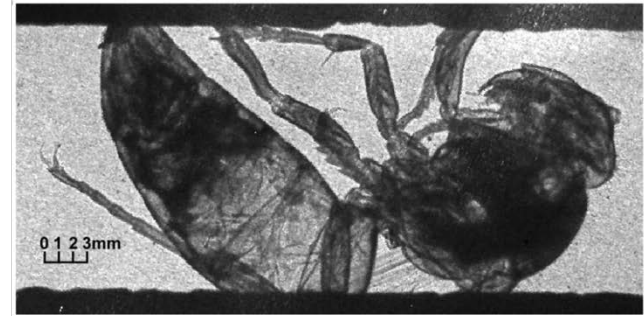


コンパクトERLにおける LCS-X線発生

# 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

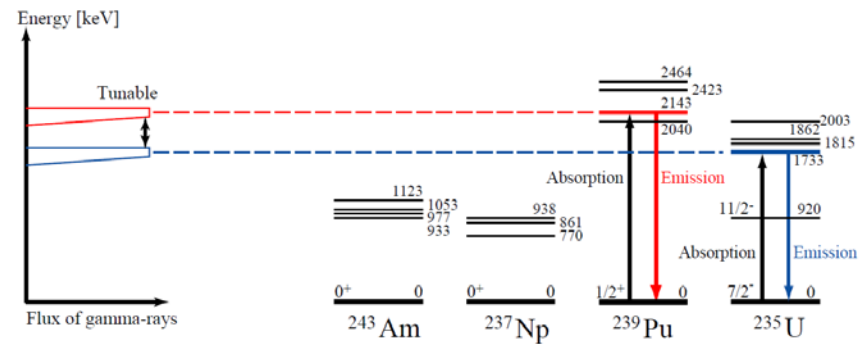


An X-ray image of a hornet taken with LCS-produced X-ray.  
Detector: HyPix-3000 from RIGAKU. Detector was apart from the sample by approx. 2.5 m.

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

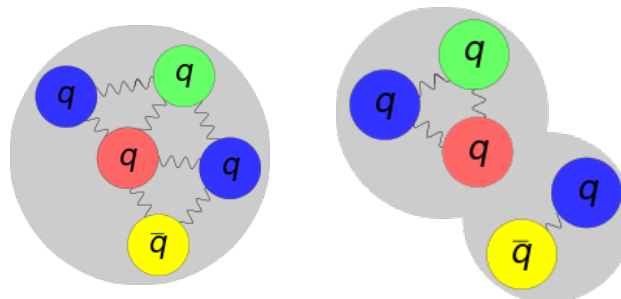
MeV

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

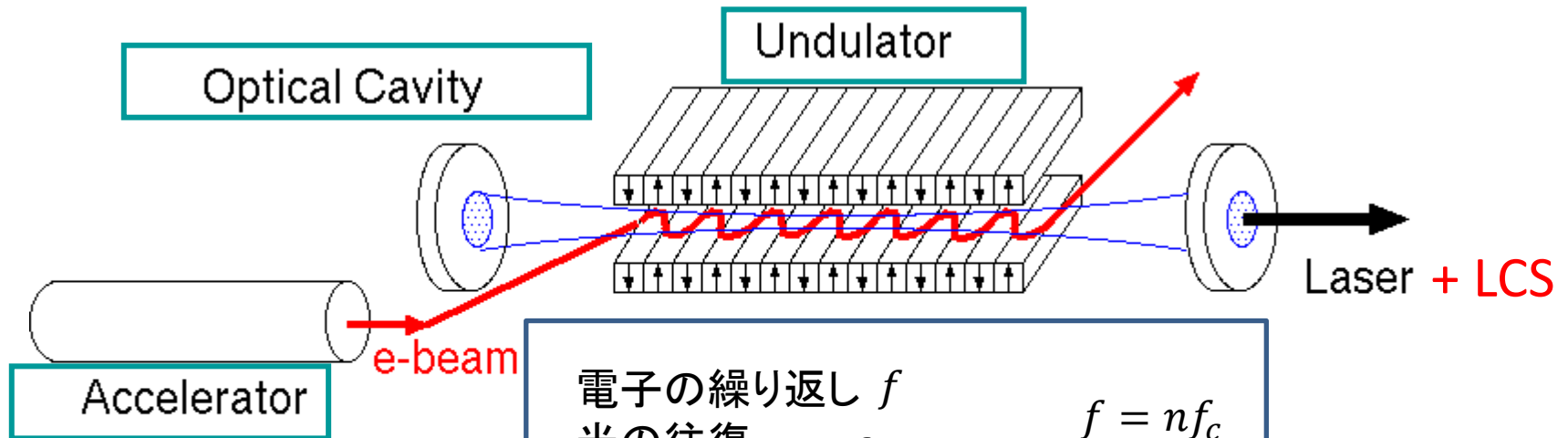


GeV

ハドロン物理  
 $\gamma$ - $\gamma$ コライダ

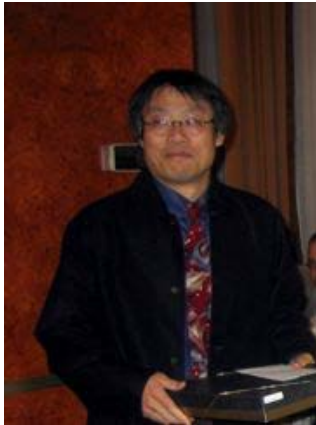


# 共振器型FELによるLCS



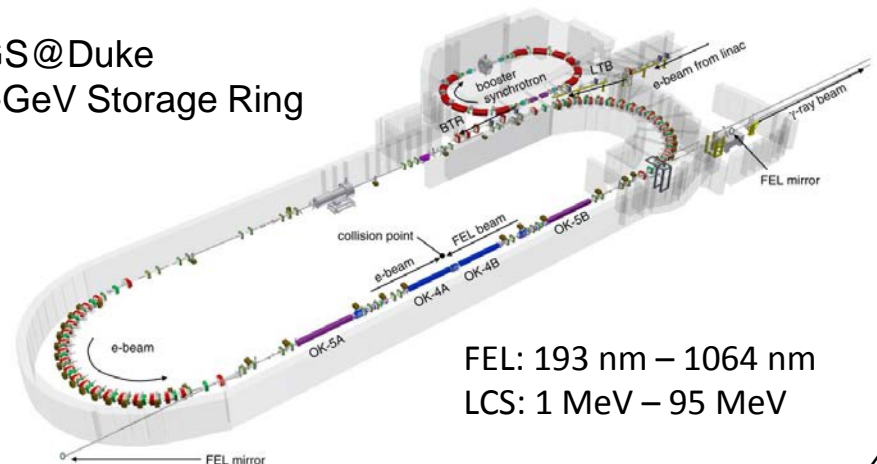
電子の繰り返し  $f$   
 光の往復  $f_c$   $f = n f_c$

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



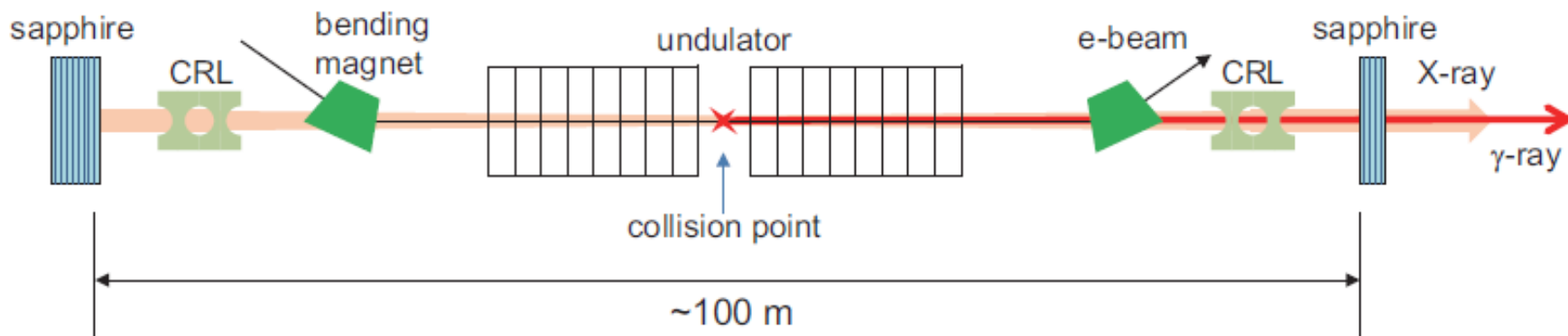
2004 FEL prize  
 Hiroyuki Hama and Vladimir Litvinenko

HIGS@Duke  
 1.2-GeV Storage Ring



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

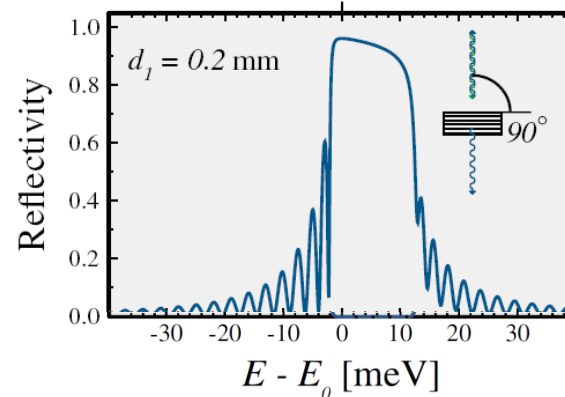
# XFEL $\gamma$ = XFEL Oscillator による LCS



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。

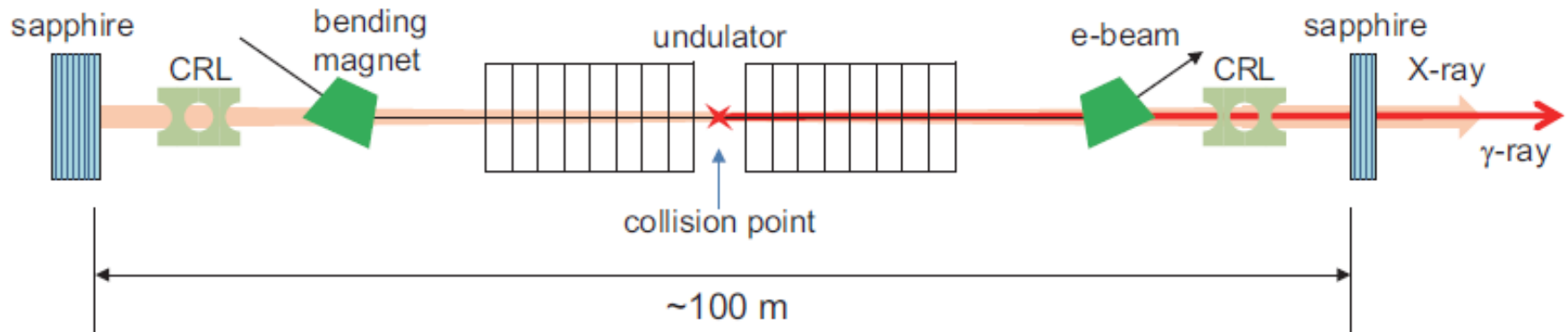
K-J. Kim ら ERL-2007 WS  
PRL 100, 244802 (2008)

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>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

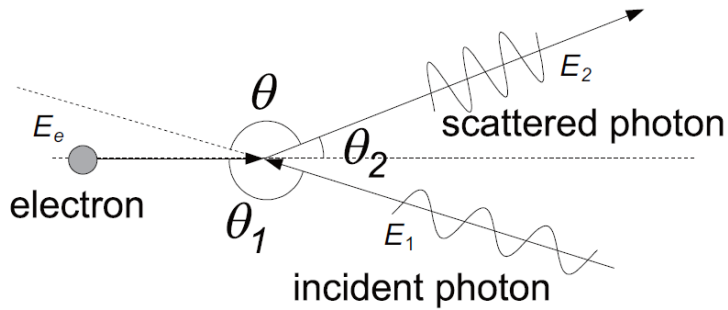
# 7-GeV XFEL0- $\gamma$ パラメータ



$E_e$ (GeV)	$Q$ (pC)	$\sigma_E$ (MeV)	$\varepsilon_n$ (mm-mrad)	$\tau_e$ (ps)
7	40	1.4	0.082	2
$f$ (MHz)	$K$	$\lambda_u$ (cm)	$N_u$	$Z_R$ (m)
3	1.414	1.88	3000	10
$\lambda$ (Å)	gain (%)	loss (%)	out couple (%)	$N_X$
1.0	50	17	4	$2.0 \times 10^{10}$

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:

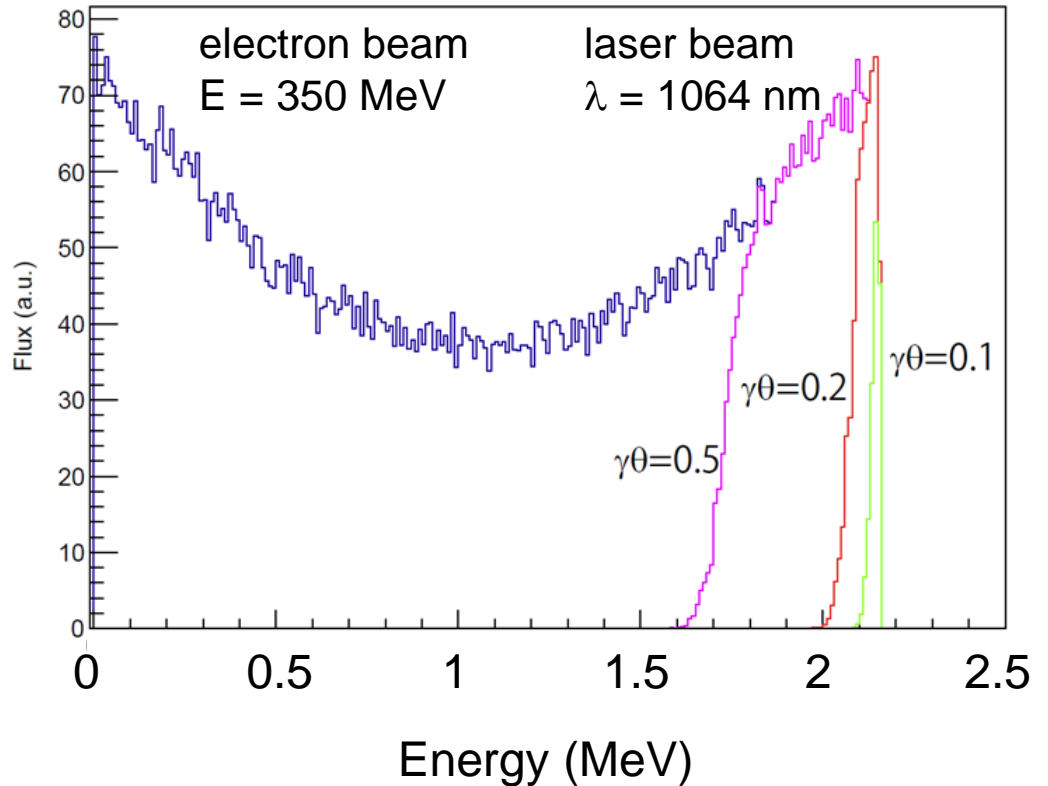
レーザー光子 = 1.6 keV  $\ll$   $mc^2$

Thomson散乱近似

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

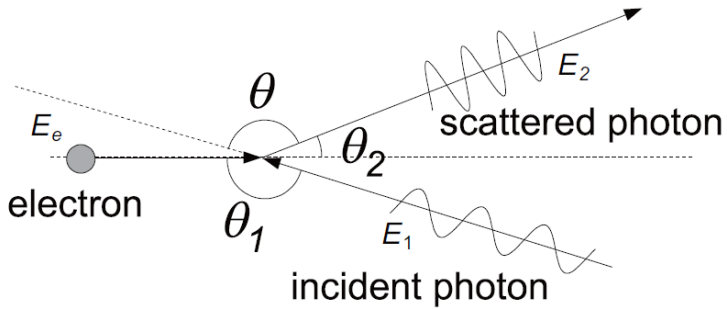
コリメータで散乱角 ( $\theta$ ) を制限する

→ 準単色ガンマ線



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

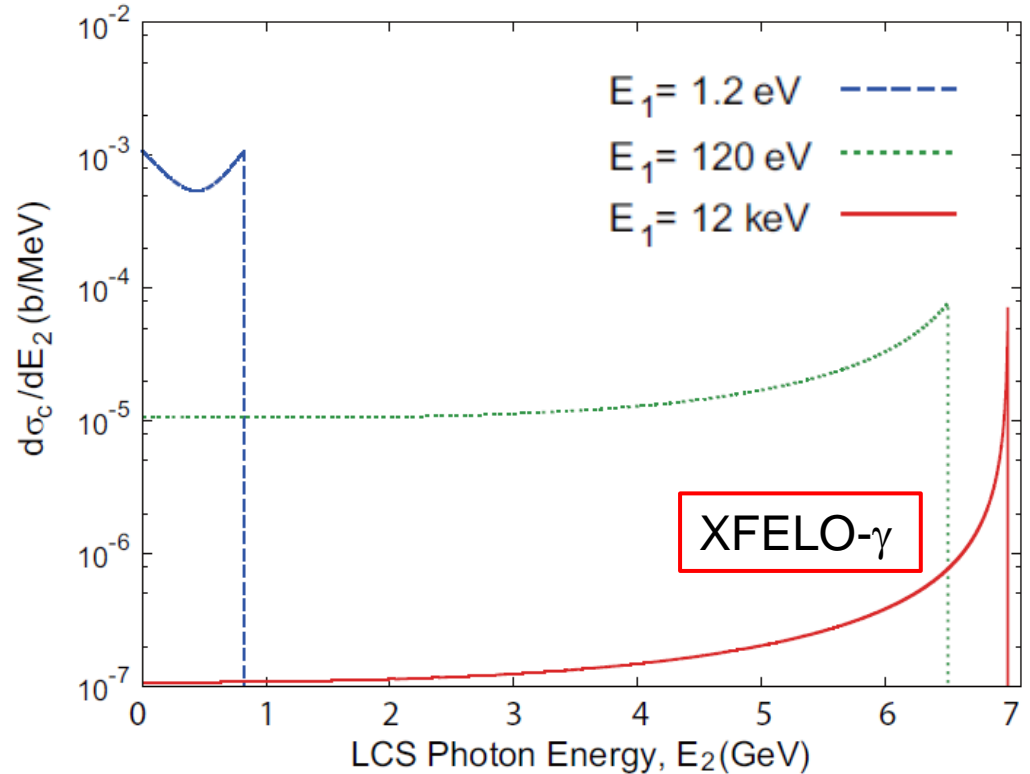
# Compton 散乱スペクトル(電子 7GeV)



電子  $\gamma_e = E_e/mc^2,$

レーザー  $\epsilon_1 = E_1/mc^2$

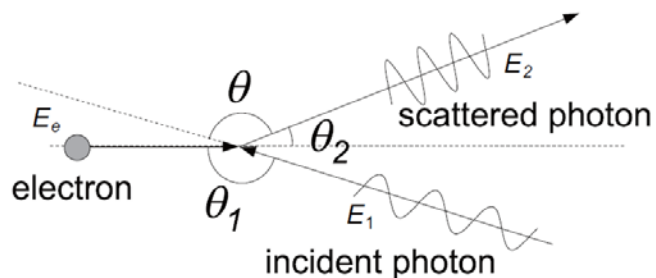
散乱光子  $\epsilon_2 = E_2/mc^2$



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



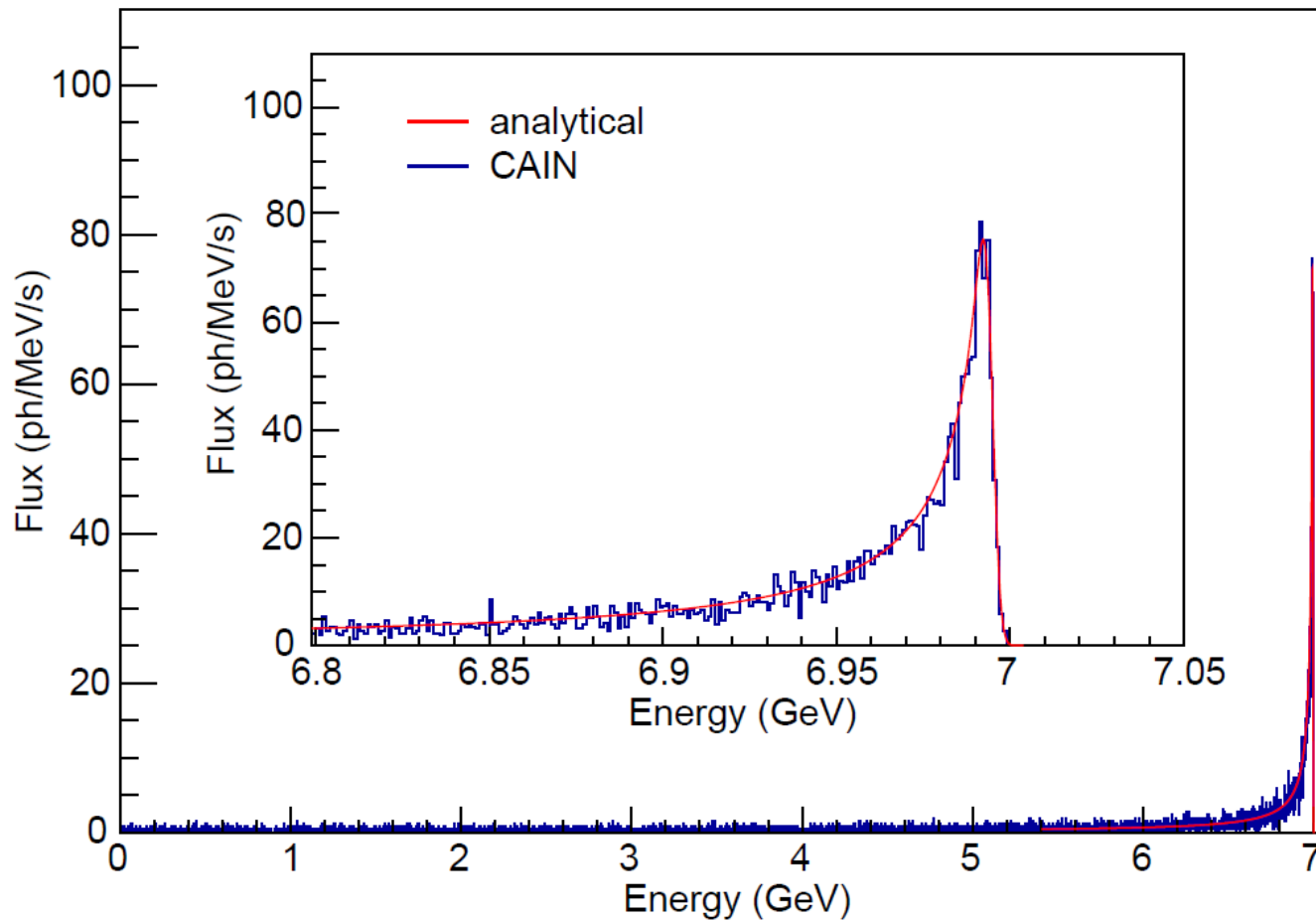
# XFEL- $\gamma$ のスペクトル(理想値からの広がり)



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- $\gamma$ 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 $\gamma$ 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)



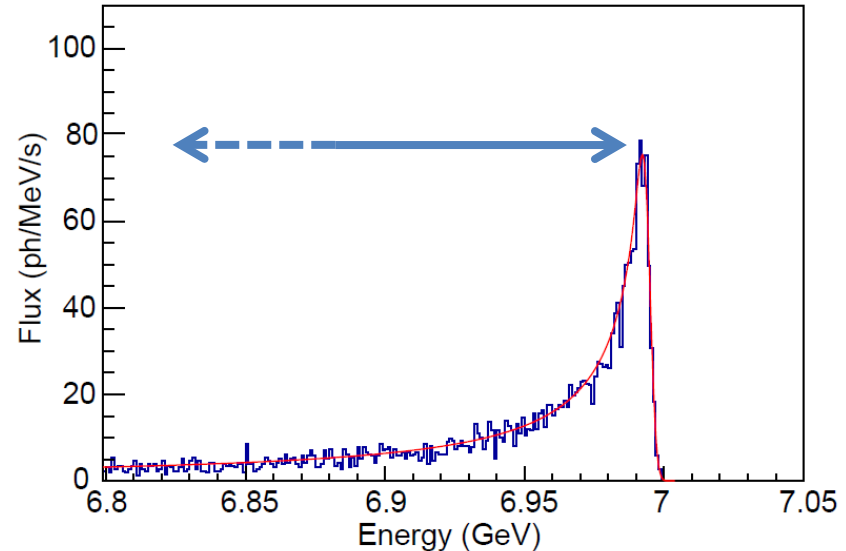
良い一致

# XFEL- $\gamma$ 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

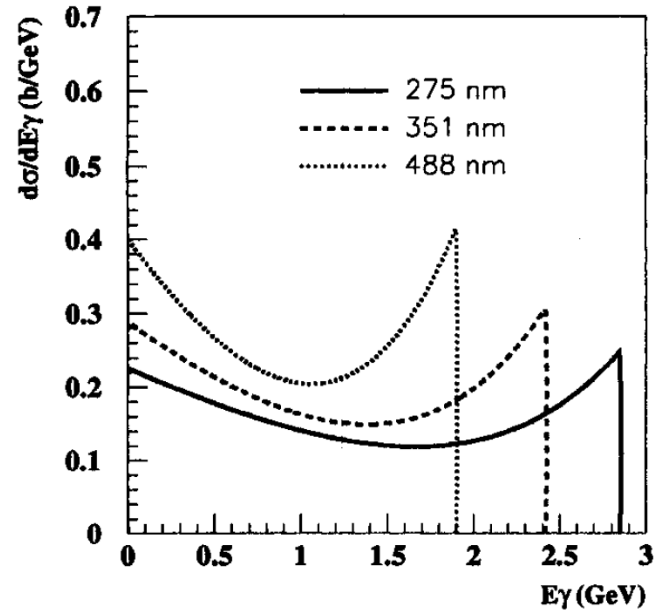
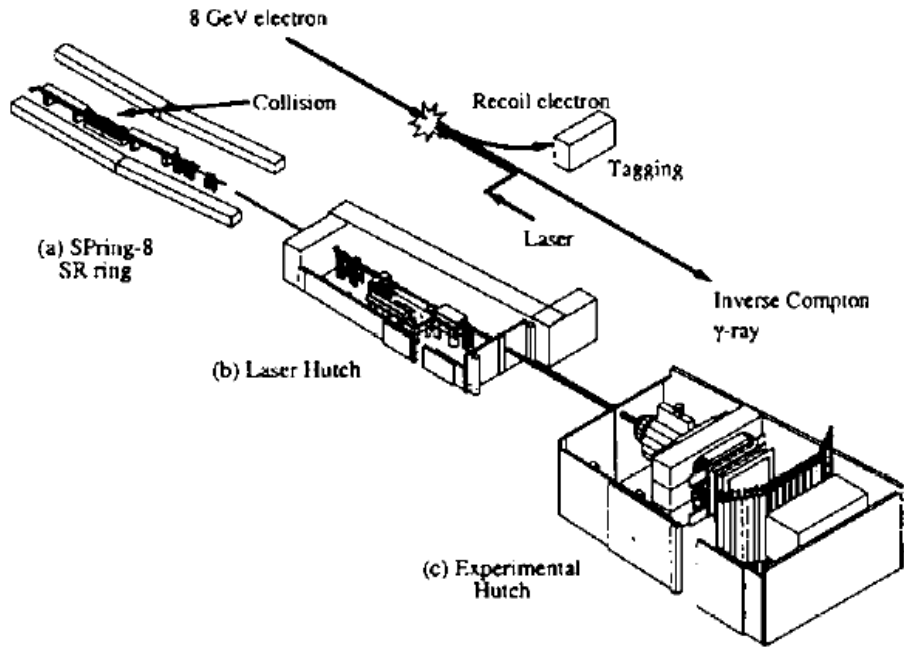
エネルギーの可変範囲は、FEL gain の余裕度による。

これまでの XFEL ( $\sim 10$  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)

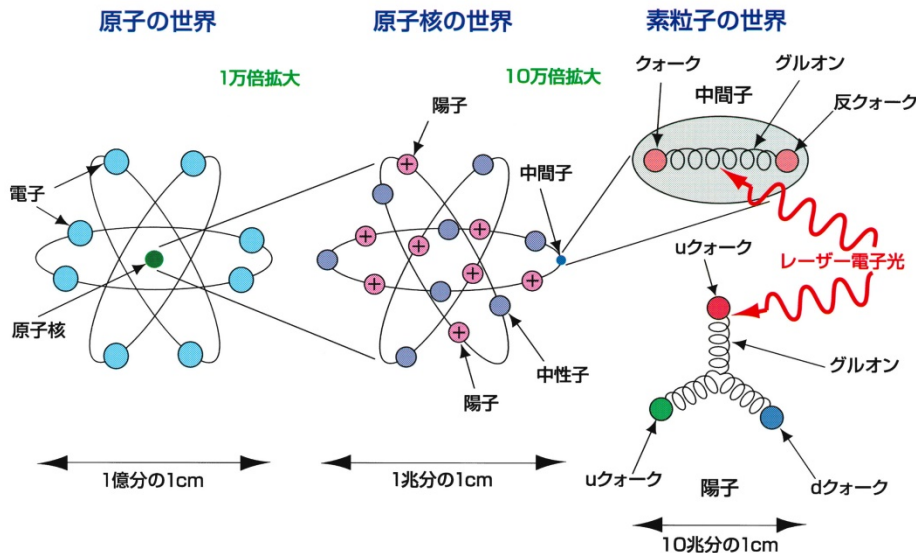


$\sim 10^6$  ph/s/(1.5-3.0 GeV)

$\rightarrow 7 \times 10^2$  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)

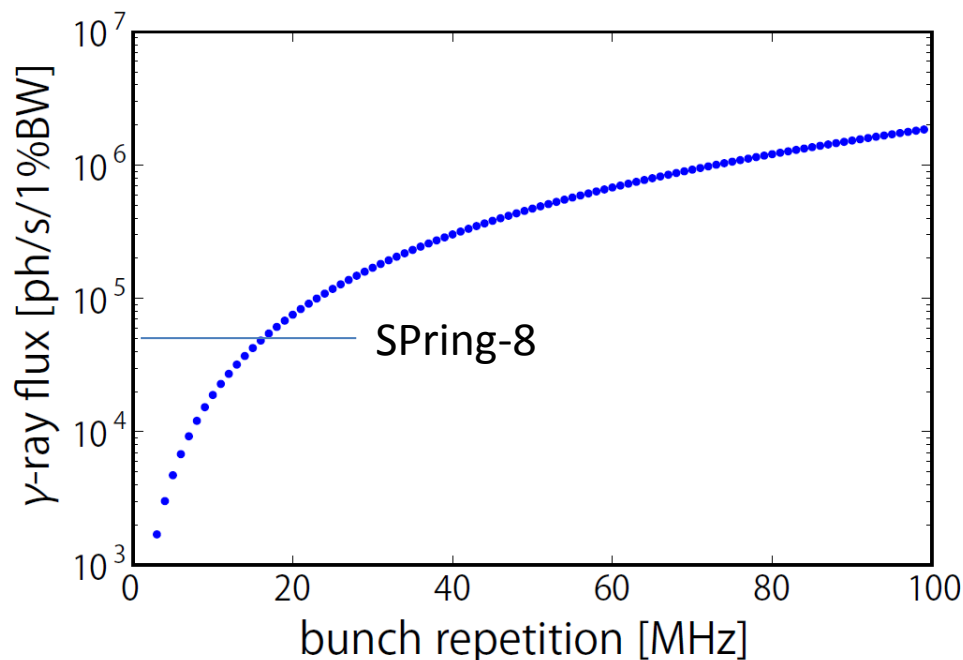
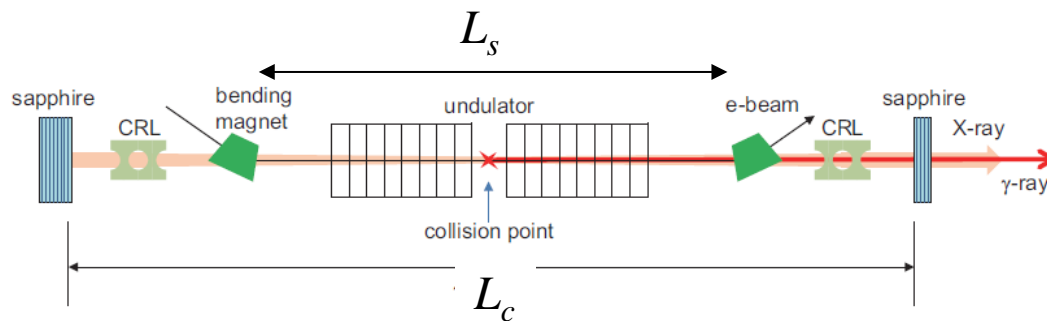


# XFEL- $\gamma$ バンチの高繰り返しによるフラックス増大

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

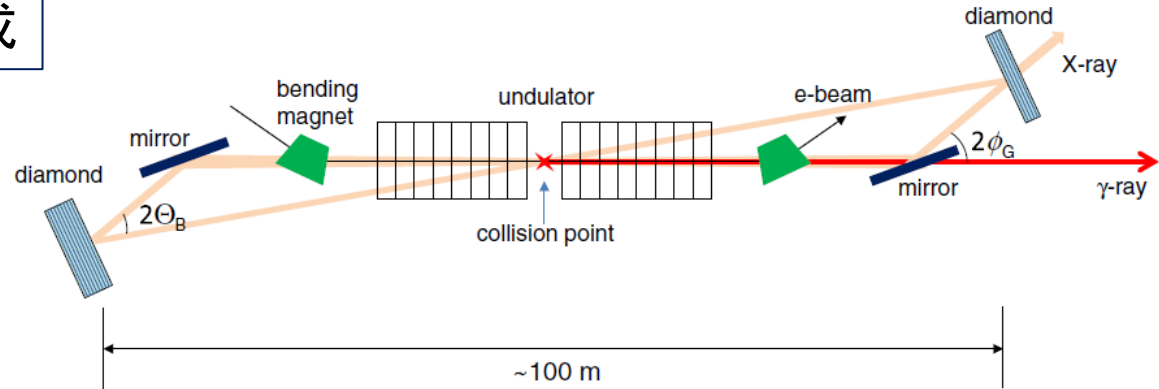


繰り返しの上限は、電子加速器の制限、Bragg ミラーの熱変形

さらに加えて、

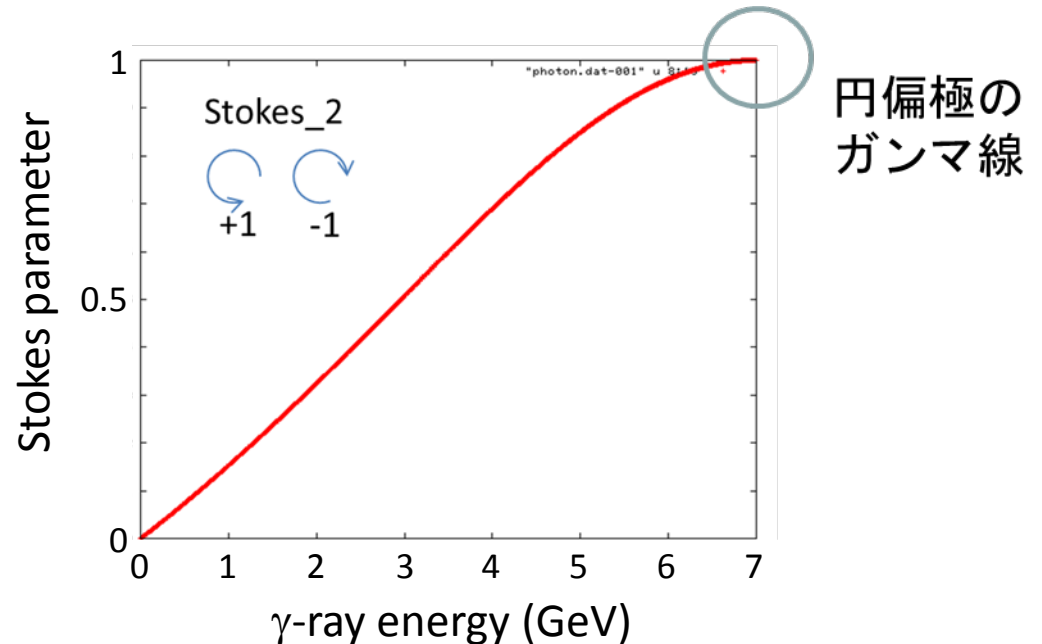
### 4枚ミラー共振器による構成

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

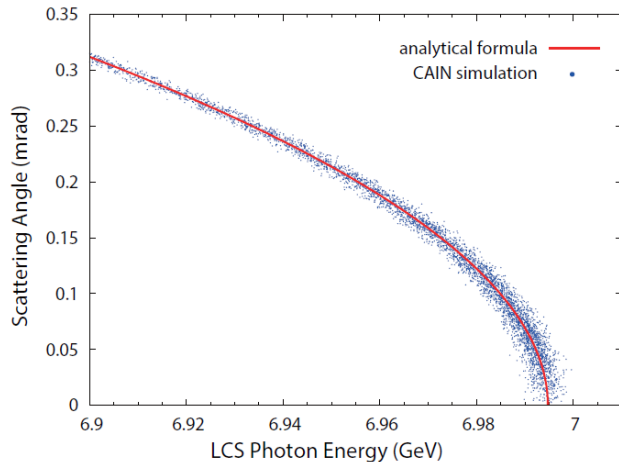
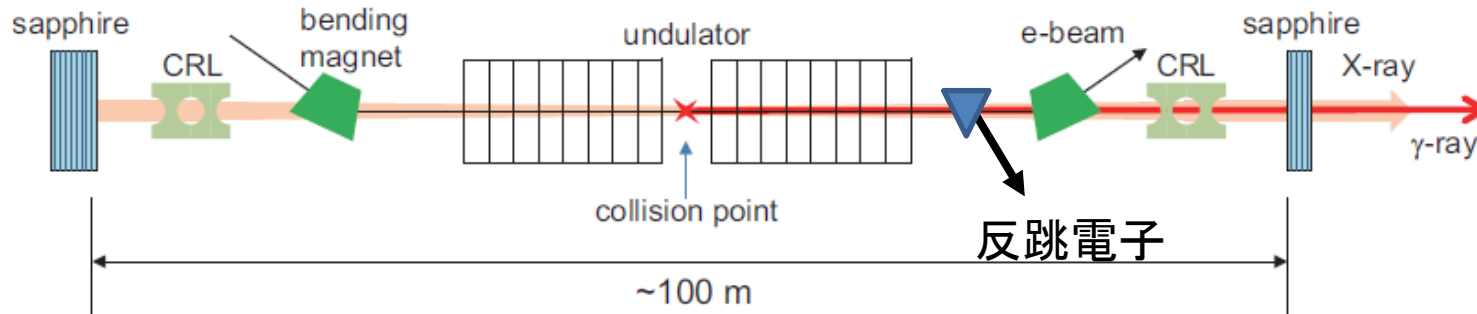
電子のスピンがガンマ線に移行



詳細は

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

# XFELO- $\gamma$ 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  $\sim 1.8$  MeV  
(初期値 + FEL相互作用)

cf LEPS@SPring-8  $\sim 12$  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)  $\sim$   $2 \times 10^4$  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  $\phi$ 、 $\Lambda$ 、 $\Sigma$  粒子の生成
  - XFEL- $\gamma$  で可能になる実験: u- d-quark からの  $J/\psi$  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