

THz-ICSによる軟X線発生

第2回コンパクトERLサイエンスワークショップ

2012年7月30日(月)

小林ホール

高エネルギー加速器研究機構

島田 美帆

Outline

1. THzのCSRを用いた逆コンプトン散乱とは
 - コヒーレント放射光(CSR)、逆コンプトン散乱(ICS)とは
 - CSRなどを用いたICSの実証例
2. Magic mirrorを用いた短パルス白色光(長波長～軟X線)の生成
 - Magic mirrorとは
 - Compact ERLで期待されるスペック
3. Optical cavityを用いた準単色・短パルス軟X線の生成
 - レーザーコンプトン散乱との違い
 - Compact ERLで期待されるスペック
4. まとめ

Coherent Synchrotron Radiation (CSR)とは

Total radiation power : $P(k)$

$$P(k) = \underbrace{Np(k)}_{\text{Incoherent}} + \underbrace{F(k)N(N-1)p(k)}_{\text{Coherent}}$$

$$F(k) = \left| \int \rho(z) e^{ikz} dz \right|^2$$

$P(k)$: Total radiation power

N : Number of electron

$p(k)$: Radiation power per an electron

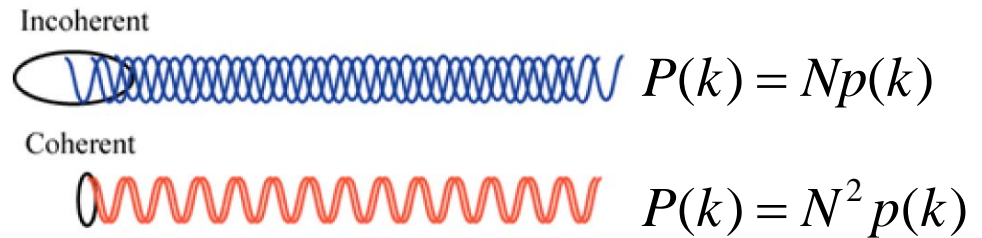
$\rho(z)$: Longitudinal electron density distribution

$F(k)$: Form factor

Gaussian beam with bunch length σ_z

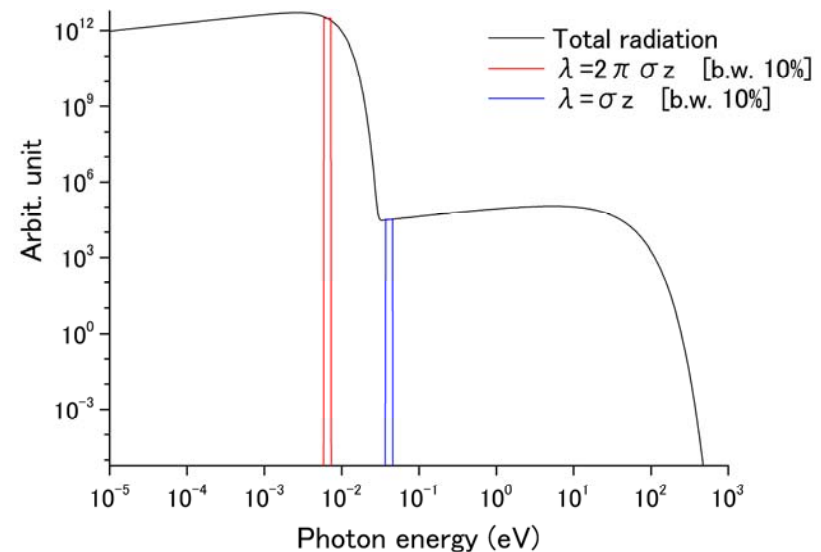
$$\rho(z) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

$$P(\lambda) \approx \exp\left[-\sigma_z^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\right]$$



バンチ長よりも長い波長の放射光強度は N^2 に比例して大きくなる。

通常の電子バンチには $N \sim 10^9 - 10^{11}$ の電子があるので、桁違いの強度に!!



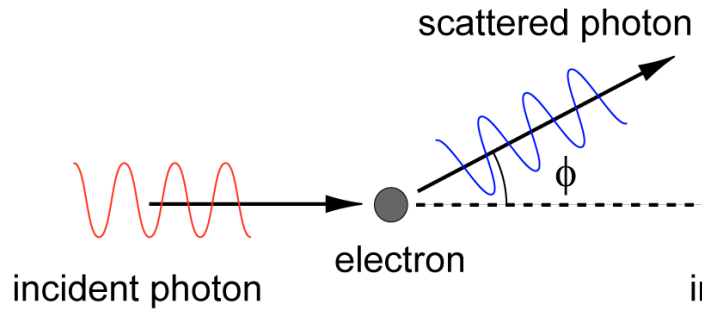
逆Compton散乱とは

Compton Scattering

電子と散乱した後、長い波長の光となる。

$$E_x = \frac{E_i}{(1 - \cos \phi)(E_i / mc^2) + 1}$$

(a)

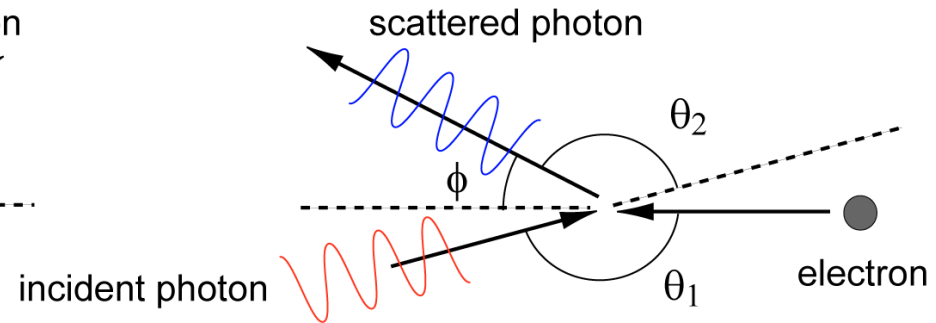


Inverse Compton Scattering (ICS)

相対論的な運動をする電子と散乱した後、短い波長の光となる。

$$E_x = \frac{4\gamma^4 E_i}{1 + (\gamma\phi)^2 + 4\gamma E_i / mc^2}$$

(b)



散乱光の光子数 : N_x

$$N_x = \sigma_T \frac{N_e N_p}{A}$$

入射光の光子数 : N_p
 電子数 : N_e
 散乱断面積 : σ_T
 衝突面積 : A

$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} \left(\frac{e^2}{mc^2} \right)^2 = \frac{8\pi}{3} r_0^2$$

CSRによる逆コンプトン散乱(ICS)

Compact ERLでは、レーザー逆コンプトン散乱による硬X線や γ 線の利用が検討されている。

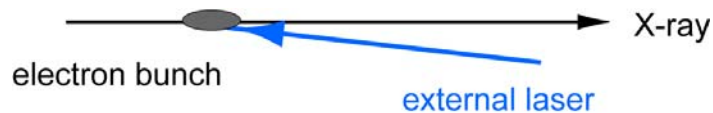
Photon energy due to inverse Compton scattering

$$E_X = 4\gamma^2 E_L \quad \text{Head-on collision}$$

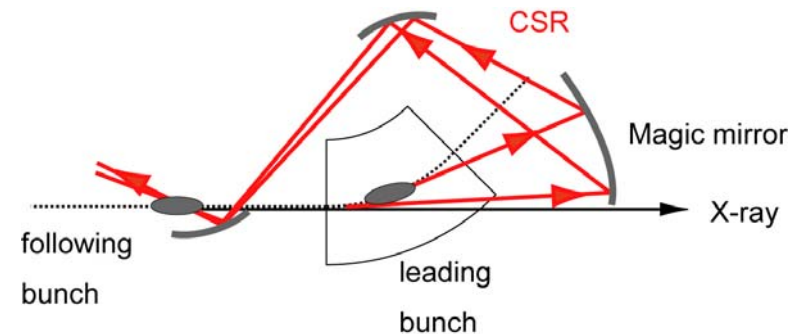
E_X : Energy of scattered photon E_L : Energy of laser γ : Lorentz factor

波長の長いテラヘルツ領域のCSRを当てれば、軟X線ができるのでは？

laser- ICS



CSR - ICS

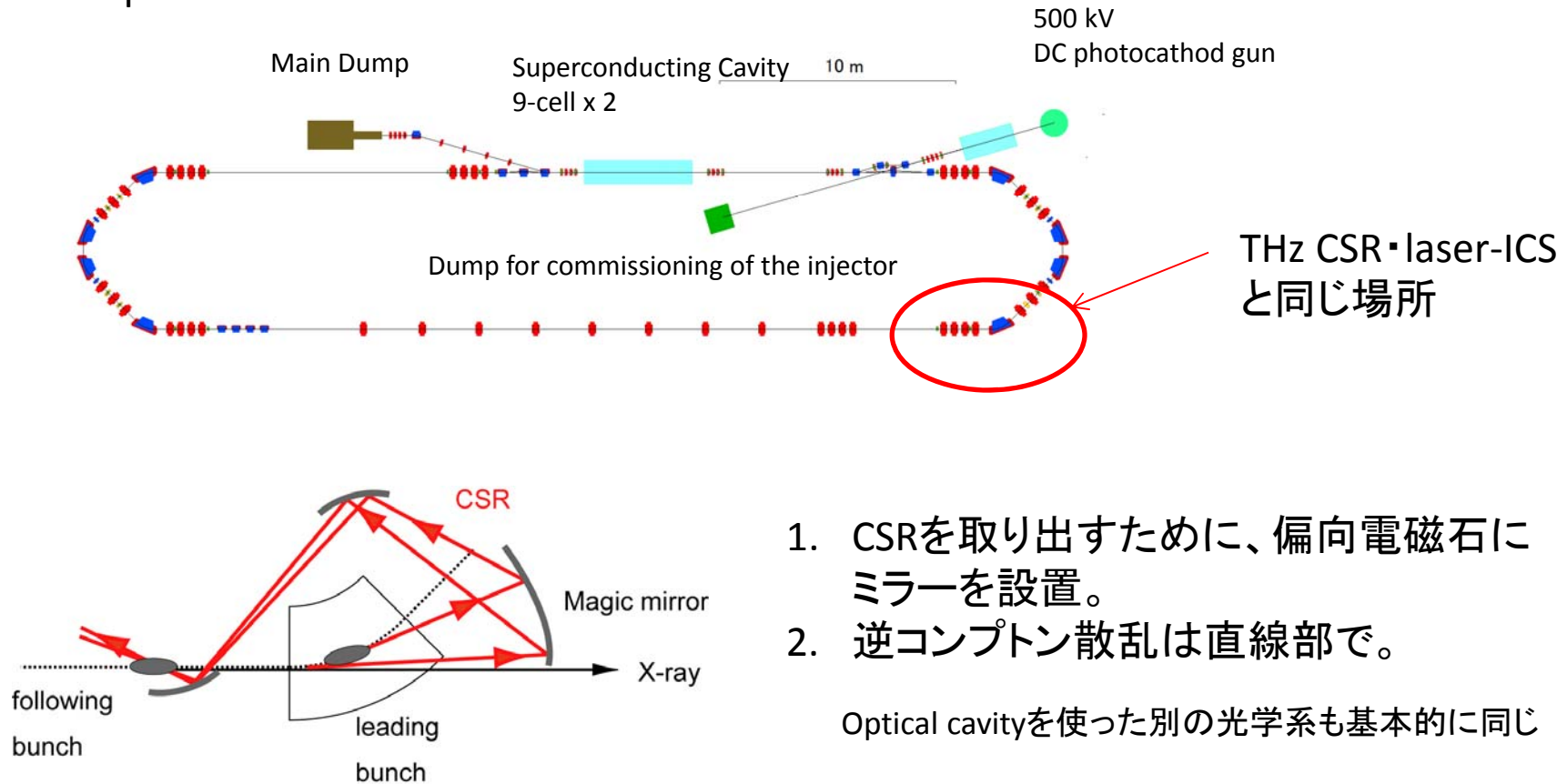


ミラーを用いて、後続の電子バンチに当てる。

M. Shimada and R. Hajima, PRSTAB **13**, 100701,(2010)

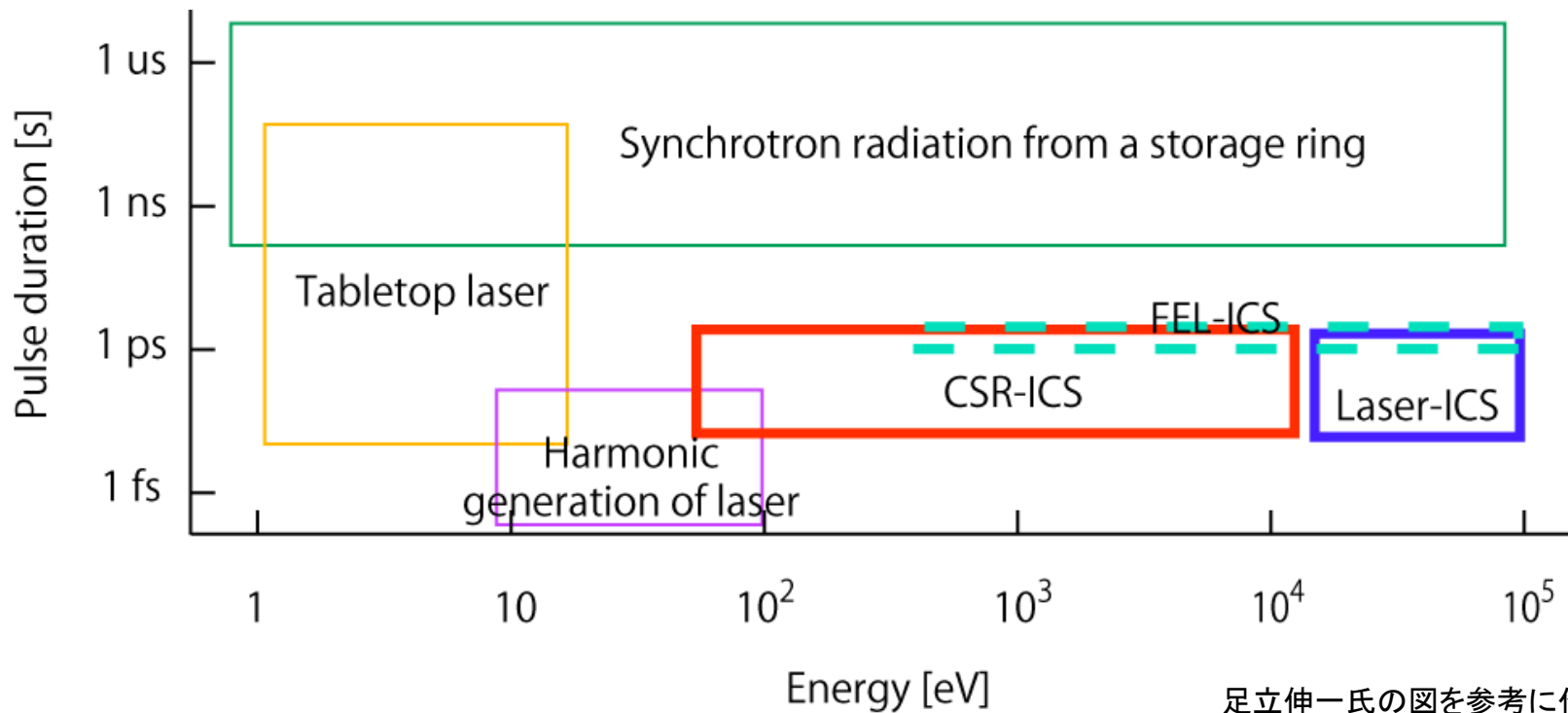
cERLのどこでやるのか？

Compact ERL



Compact ERLのCSR-ICS

X-ray expected by the inverse Compton scattering of cERL



cERLでは、ピコ秒～サブピコ秒のパルス長の軟X線が期待

Comparison CSR-ICS with conventional ICS

	Laser-ICS	FEL-ICS	CSR-ICS
Equipment*	External laser	Undulator	Only mirror
Synchronization	Difficult	Easy	Easy
Spot size of laser (depends on wavelength)	Smaller	Smaller	Larger
Bandwidth	Narrow	Narrow	Relatively narrow ~ white light
Electron energy*	Lower	Lower	Higher
Bunch compression	Difficult	Difficult	Easy
Emittance	Larger	Larger	Smaller

CSRやCDRを使った逆Compton散乱の実測例

似た手法はすでに提案・実証済みです。

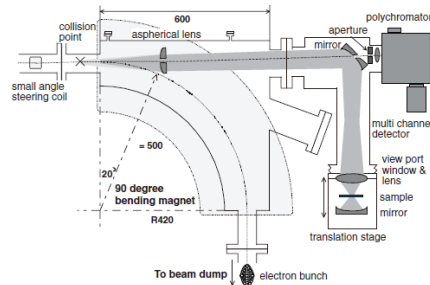


Fig. 1. A schematic view of the THz-wave spectrophotometry with the compact S-band linac at AIST.

N. Sei et al, APEX **1**, 087003,(2008)

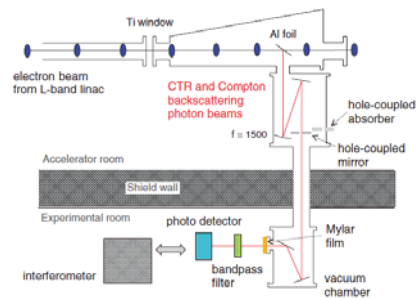


Fig. 1. Schematic layout of the experimental setup at KURRI-LINAC.

N. Sei and T. Takahashi, APEX **3**, 052401,(2010)

- 目的はreal timeのTHz Spectroscopy。
- ICSで測定の容易な可視光に変換。
- 光量は非常に小さい。

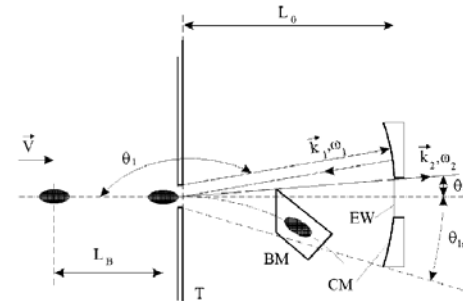


FIG. 1. Scheme for Thomson scattering of CDR from a circular aperture. T, conducting target; BM, bending magnet; CM, concave mirror; EW, exit window.

A. P. Porylitsyn et al, PRE **60**, 2272,(1999)

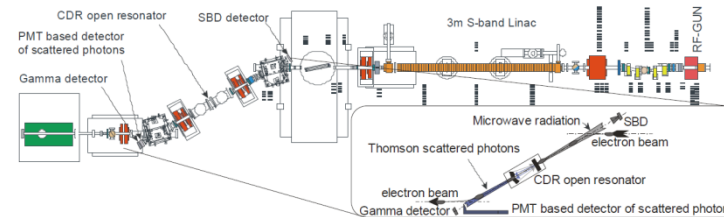


Fig. 1: LUCX schematic layout and general experimental setup.

A. Aryshev et al, IPAC'10, 196,(2010)

- Coherent Diffraction RadiationによるICS
- コンパクトなX線光源として提案。

Outline

1. THzのCSRを用いた逆コンプトン散乱とは
 - コヒーレント放射光(CSR)、逆コンプトン散乱(ICS)とは
 - CSRなどを用いたICSの実証例
2. Magic mirrorを用いた短パルス白色光(長波長～軟X線)の生成
 - Magic mirrorとは
 - Compact ERLで期待されるスペック
3. Optical cavityを用いた準単色・短パルス軟X線の生成
 - レーザーコンプトン散乱との違い
 - Compact ERLで期待されるスペック
4. まとめ

Magic mirror

軌道に沿った放射光を一点に集める特殊な形状のミラー

R. Lopez-Delgado and H. Szwarc, Opt. Commun., **19**, 286,(1976)

国内では、

Spring-8のBL43B2

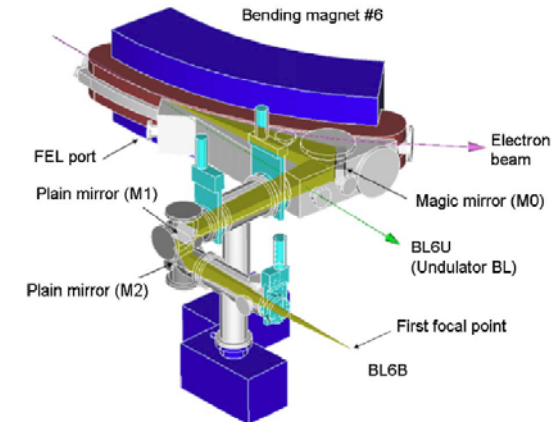
UVSORのBL6B

に設置

広い取り込み角度で放射光を集めることが可能

UVSOR, BL6Bのmagic mirrorの

取り込み角度は $215[H] \times 80[V] \text{ mrad}^2$



S. Kimura et al, Infrared Phys. & Tech **49**, 147,(2006)

仮定

真空チャンバーによるカットオフの影響を小さいと仮定すると、
集光サイズは電子バンチのサイズと同じにすることが可能。

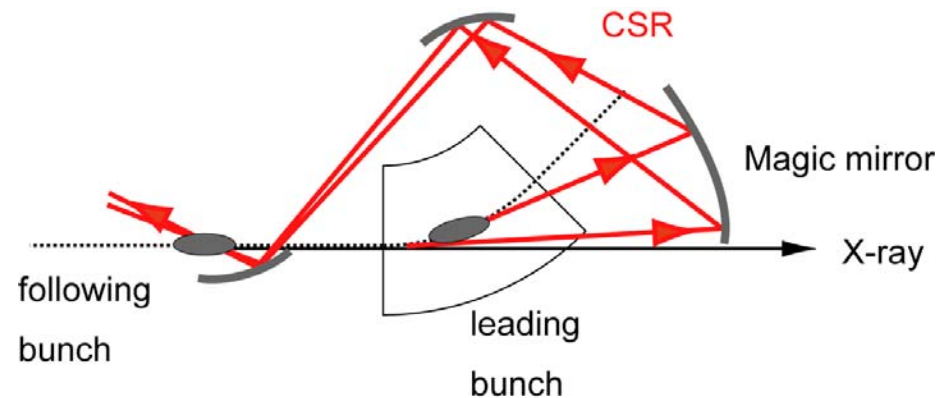
取り込み角度はできる限り広いほうがいいか？

電子バンチの長い飛行距離

- 長い距離に渡って小さく集光することは困難になる。
- ビームサイズがCSRの波長を超えると、CSRの強度が減る。

というジレンマがある。 11/22

Magic mirrorを使った逆コンプトン散乱



1. 集光サイズはビームサイズを同じとする。
2. ビームサイズは分散関数、電子の飛行距離を考慮に入れて算出。
3. ビームサイズがCSRの波長を超えないことを確認。

Electron Beam 200 MeV, 77 pC

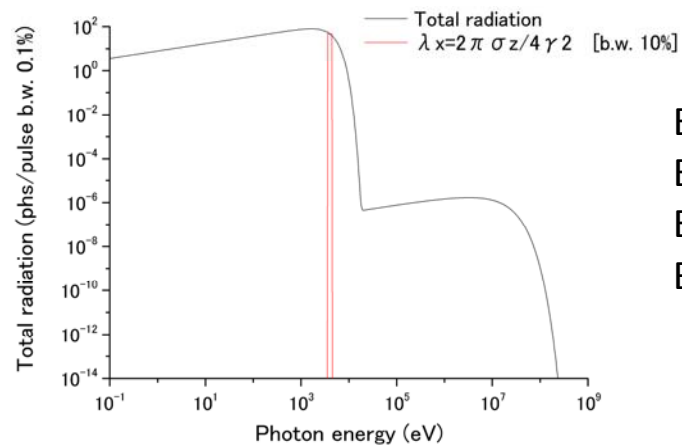
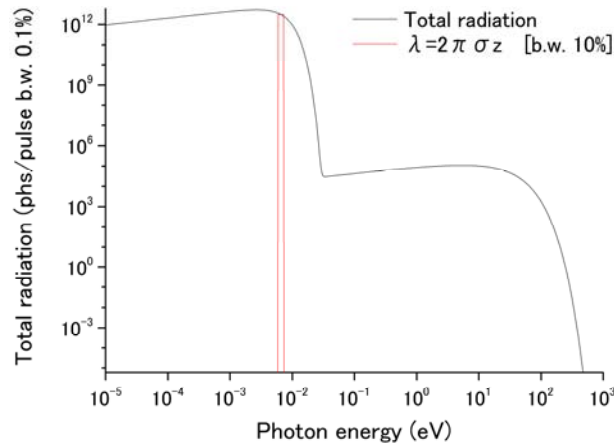
Acceptance angle of magic mirror

300 mrad [H] x 20 mrad [V]

Transverse electron beam size

70 μm [H] x 30 μm [V]

Magic mirror scheme for white light source



Example :

Electron charge : 77pC/bunch

Electron energy : 200 MeV,

Bunch length : 100 fs

CSR (190 μ m)	: 3×10^{14} phs/pulse 10%BW , 4×10^{23} phs/s 10%BW	(1.3 GHz)
X-rays (4 keV)	: 5×10^3 phs/pulse 10%BW , 6×10^{12} phs/s 10%BW	(1.3 GHz)
散乱光全体	: 4×10^5 phs/pulse , 5×10^{14} phs/s	(1.3 GHz)
Pulse duration	: 100 fs	

いくつかの問題点

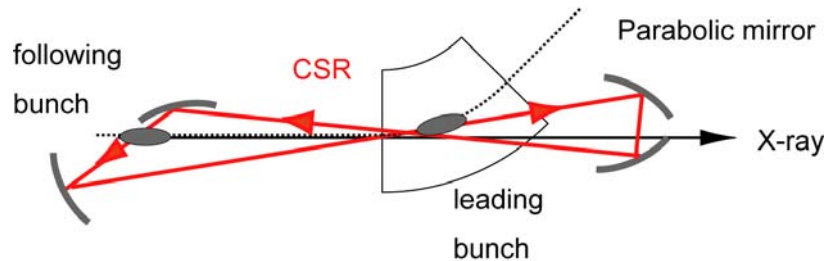
- 白色光を分光すると、パルス長が伸びる。
- 電子のジッターがパルス長以上の場合、衝突のタイミングが合わない。
- カットオフがない、という仮定が妥当性。

Outline

1. THzのCSRを用いた逆コンプトン散乱とは
 - コヒーレント放射光(CSR)、逆コンプトン散乱(ICS)とは
 - CSRなどを用いたICSの実証例
2. Magic mirrorを用いた短パルス白色光(長波長～軟X線)の生成
 - Magic mirrorとは
 - Compact ERLで期待されるスペック
3. Optical cavityを用いた準単色・短パルス軟X線の生成
 - レーザーコンプトン散乱との違い
 - Compact ERLで期待されるスペック
4. まとめ

Optics 2 : Optical Cavity scheme for narrow bandwidth

CSR - ICS

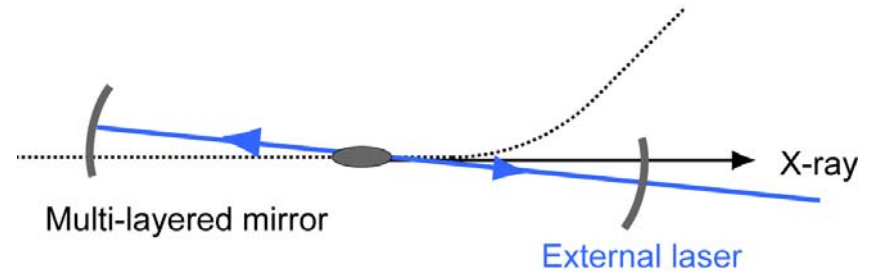


- Incoherent stacking** because the fluctuation of longitudinal position (a few hundreds um) is larger than wavelength of CSR.
- Electron bunch emits CSR **inside a cavity**.
- Four mirrors** is necessary for two focus points. One is for collection of CSR and another is collision point.

$$P_{CAV} = \frac{P_{in}}{1 - R^n}$$

P_{cav} : Power in a cavity, P_{in} : Input power, R: Reflectance, T: Transmittance, n: Number of mirrors

ICS by an external laser



- Coherent stacking**
- External laser is injected from **outside a cavity**. It passes through a multilayered mirror with low transmittance.
- Two mirrors** are enough for single focus point.

$$P_{CAV} = TF^2 P_{in} / \pi^2$$

E.R.Crosson et al, Rev. Sci. Instrum. **70**, p.4 (1999)

$$Finesse: F = \pi \sqrt{R^n} / 1 - R^n$$

In both cases, pulse power is stacked by **1000 times** with reflectivity of mirrors 99.97% .

Wavelength of CSR for pulse stacking in an optical cavity

Total radiation power : $P(k)$

$$P(k) = \underbrace{Np(k)}_{\text{Incoherent}} + \underbrace{F(k)N(N-1)p(k)}_{\text{Coherent}}$$

$$F(k) = \left| \int \rho(z) e^{ikz} dz \right|^2$$

$P(k)$: Total radiation power

N : Number of electron

$p(k)$: Radiation power per an electron

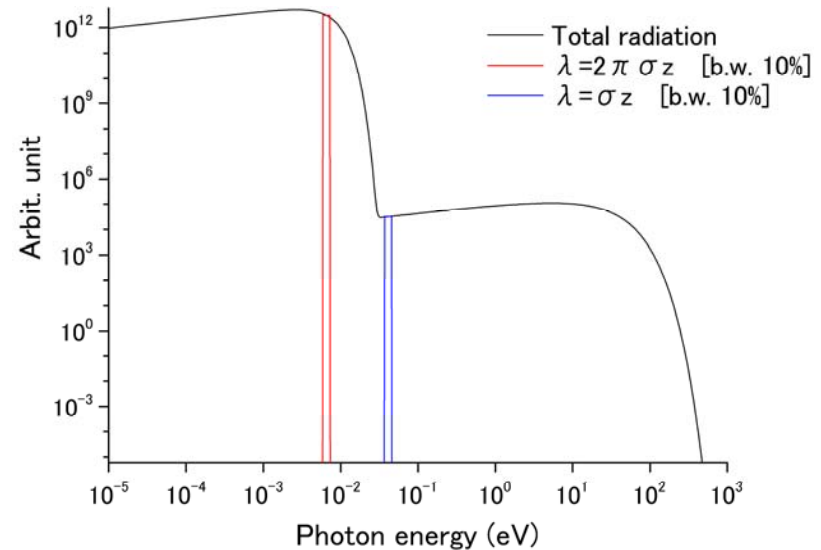
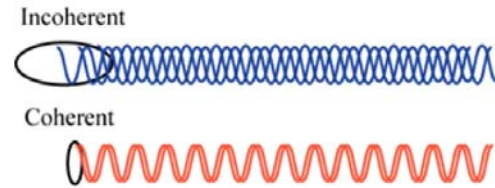
$\rho(z)$: Longitudinal electron density distribution

$F(k)$: Form factor

Gaussian beam with bunch length σ_z

$$\rho(z) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_z} \exp\left[-\frac{z^2}{2\sigma_z^2}\right]$$

$$P(\lambda) \approx \exp\left[-\sigma_z^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\right]$$



Wavelength of CSR stacked in an optical cavity is chose as follows,

$$\lambda \equiv 2\pi\sigma_z$$

Mode matching

Acceptance angle is limited for Mode matching

$$\sigma_x^{CSR} \sigma_{x'}^{CSR} \leq \frac{\lambda}{4\pi}$$

λ : wavelength of CSR

σ_x^{CSR} : Horizontal spread of CSR source

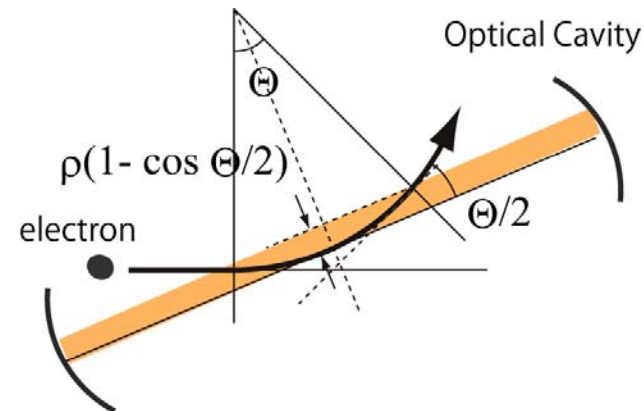
$\sigma_{x'}^{CSR}$: Horizontal divergence of CSR source

$$\Delta\theta_c = \left(\frac{3\lambda}{2\pi\rho} \right)^{1/3} = \frac{1}{\gamma} \left(\frac{2\lambda}{\lambda_c} \right)^{1/3}$$

$\Delta\theta_c$: divergence of CSR

$$\sigma_x^{CSR} = \sqrt{\sigma_x^2 + \left[\rho \left(1 - \cos \frac{\Theta}{2} \right) \right]^2}$$

$$\sigma_{x'}^{CSR} = \sqrt{\sigma_{x'}^2 + \Delta\theta_c^2 + \left(\frac{\Theta}{2} \right)^2}$$

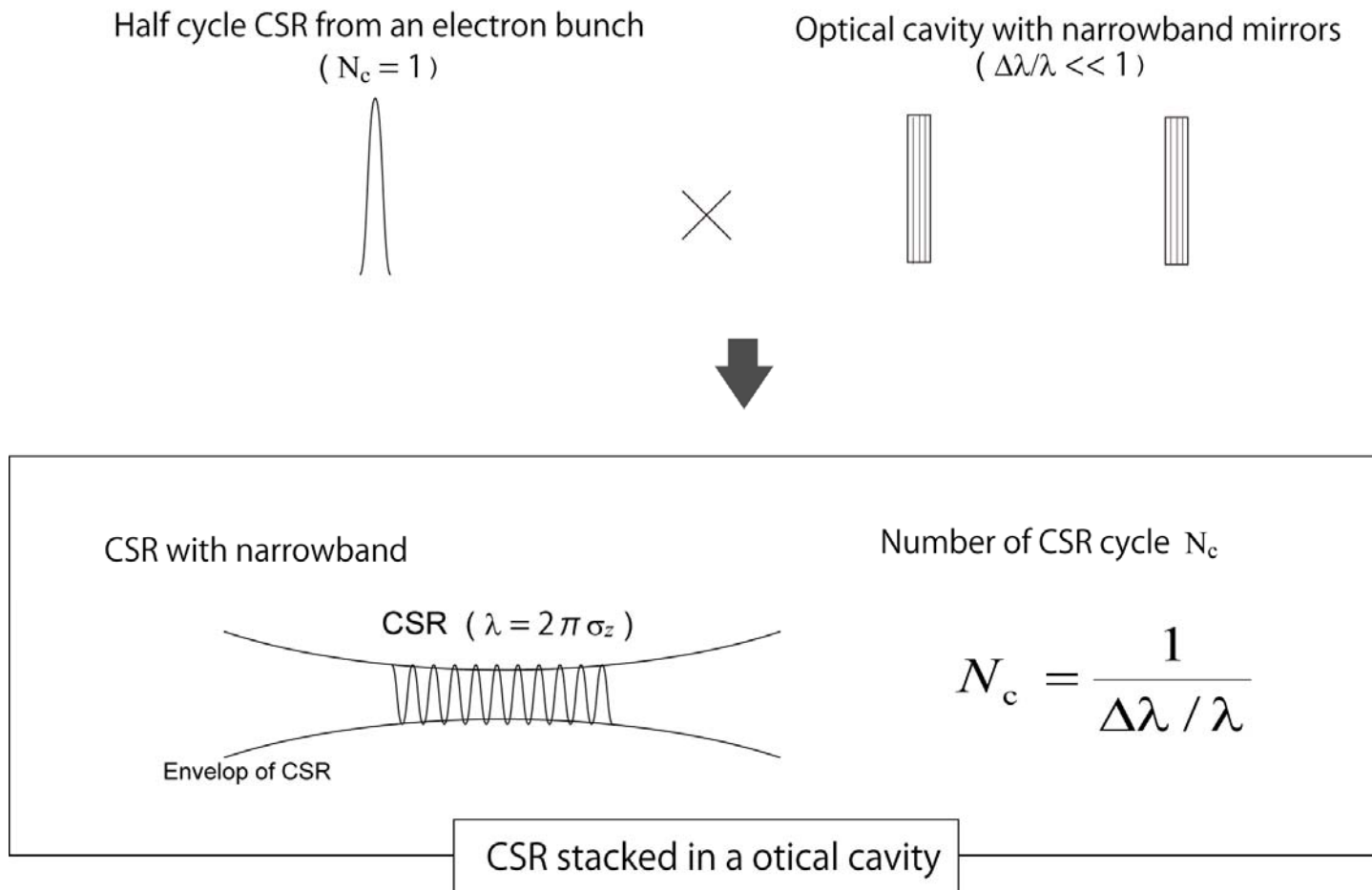


Acceptance angle Θ is determined to satisfy the mode matching.

Optimization of collision area : 1

- **Half cycle of CSR is destroyed** by an narrow band mirror.

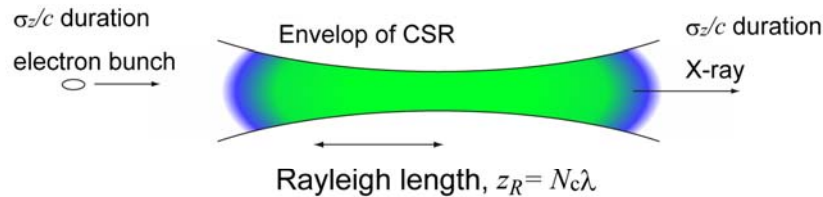
In the case of bandwidth $\Delta\lambda/\lambda$, pulse duration of CSR is lengthened by a factor $1/(\Delta\lambda/\lambda)$.



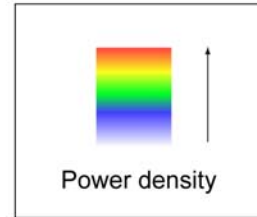
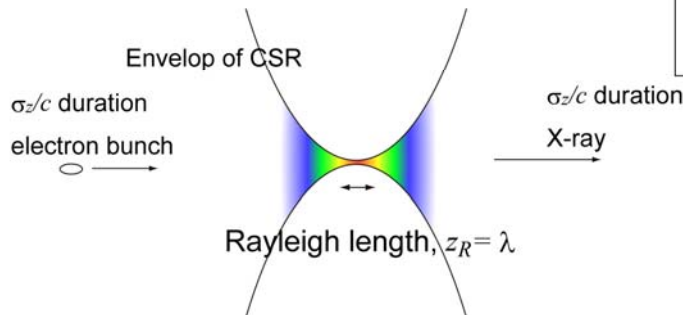
Optimization of collision area : 2

- CSR in optical cavity is assumed to be **Gaussian beam**.
- **Hour glass effect** is considered at the collision.

(i) Large Rayleigh length, Large spot size



(ii) Small Rayleigh length, small spot size



Beam size $w(z)$ of Gaussian beam

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}, \quad \pi w_0^2 = \lambda z_R$$

小さい $z_R \rightarrow$ 集光サイズが小さい。
しかし、すぐに広がる。

$z_R < \lambda N_c$ では、 N_x は z_R に依存しない。

$$N_x = \sigma_T \frac{N_e}{\pi w_0^2} \left(\frac{z_R}{\lambda} \frac{1}{N_c} N_p \right) = \sigma_T \frac{N_e N_p}{N_c \lambda^2}$$

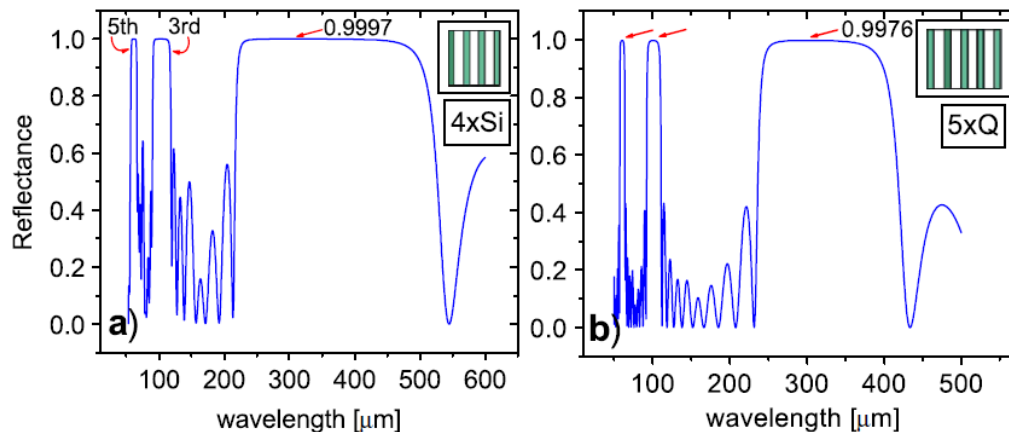
衝突面積が大きく、 z_R が長い方が非線形効果や電子の到着時間の揺らぎの影響が少ないため、(i)を採用。

High reflectivity mirror

In the wavelength range of a few 10 μm \sim a few 100 μm ,

- Reflectivity of metal is lower than 98 %.
- It is difficult to fabricate multilayered mirror with larger than 99% reflectivity by conventional method.

Development of high reflectivity mirror for terahertz region



M.Tecimer et al, PRSTAB **13**,
030703,(2010)

FIG. 2. (Color) In (a) four layers of 23 μm thick Si, and in (b) five layers of 36 μm thick z-cut quartz, each separated by 75 μm vacuum gap, create high reflectivity bands centered at $\lambda_C \sim 300\text{--}320 \mu\text{m}$. The harmonic band centers are located at ~ 100 and $\sim 60 \mu\text{m}$, respectively.

- Stacking up photonic crystal separated by vacuum layer.
- Bandwidth is narrow at the higher order wavelength.
- Wavelength, which depends on thickness of the layers, is controllable without losing the high-reflectivity.

X-ray at 60-200 MeV ERL

TABLE I: Optical cavity scheme in the Compact ERL : Horizontal acceptance angle are 50 mrad for $\lambda = 190 \mu\text{m}$ and 110 mrad for $\lambda = 1900 \mu\text{m}$ for mode matching. Bandwidth of the on-axis X-ray is considered to be $\Delta\lambda_X/\lambda_X \sim \Delta\lambda/\lambda \sim 0.1$ (10%). Pulse duration of the X-ray is same as σ_z/c .

Electron energy [MeV]	Charge [nC]	σ_z/c [ps]	Spot size [mm \times mm]	CSR energy [mJ]	K	X-ray energy [keV]	N_X [phs./pulse]	N_X [phs./s]
60	0.077	0.1	0.3×0.3	0.14	0.013	0.4	1×10^4	2×10^{13}
60	0.5	1	3×3	0.6	0.009	0.04	4×10^4	0.7×10^{13}
200	0.2	0.1	0.3×0.3	1.0	0.034	4	2×10^5	1×10^{14}
200	1	1	3×3	2.5	0.017	0.4	3×10^5	3×10^{13}

- Number of photons of X-ray (b.w.10%)
 - Number of photons per pulse : $\sim 10^{4-5}$ phs/pulse.
 - Flux : $\sim 10^{13-14}$ phs/s.
- Energy range of X-ray
 - From **0.04 to 4 keV**.
 - 10 keV X-ray is possible at electron energy of 200 MeV and bunch length 50 fs, which is accomplished in tracking simulation.
- Pulse duration of X-ray is **100 fs – 1 ps**.
- Electron transverse beam size is much smaller than the focus size of focused CSR.

Summary

- We proposed the inverse Compton scattering of CSR.
 - ERL is a nice platform for both high-intensity CSR source and inverse Compton scattering.
- Two optical schemes
 - Magic mirror : **White light with pulse duration of 100 fs.**
 - Optical cavity : **Narrow bandwidth.** Power amplification by pulse stacking is estimated almost **1000 times.**
- Scattered photon expected in ERL (Optical cavity)
 - Generation of soft X-ray with energy range of **0.04-4keV** is expected at 200 MeV ERL. Pulse duration is from **100 fs to 1 ps.**
 - Number of photon per pulse is **10^{4-5} phs/pulse**, Flux **10^{13-14} phs/s.**