

CSRによるCompton散乱について

ビームダイナミクスWG
2010年9月28日(火)
3号館5階会議室

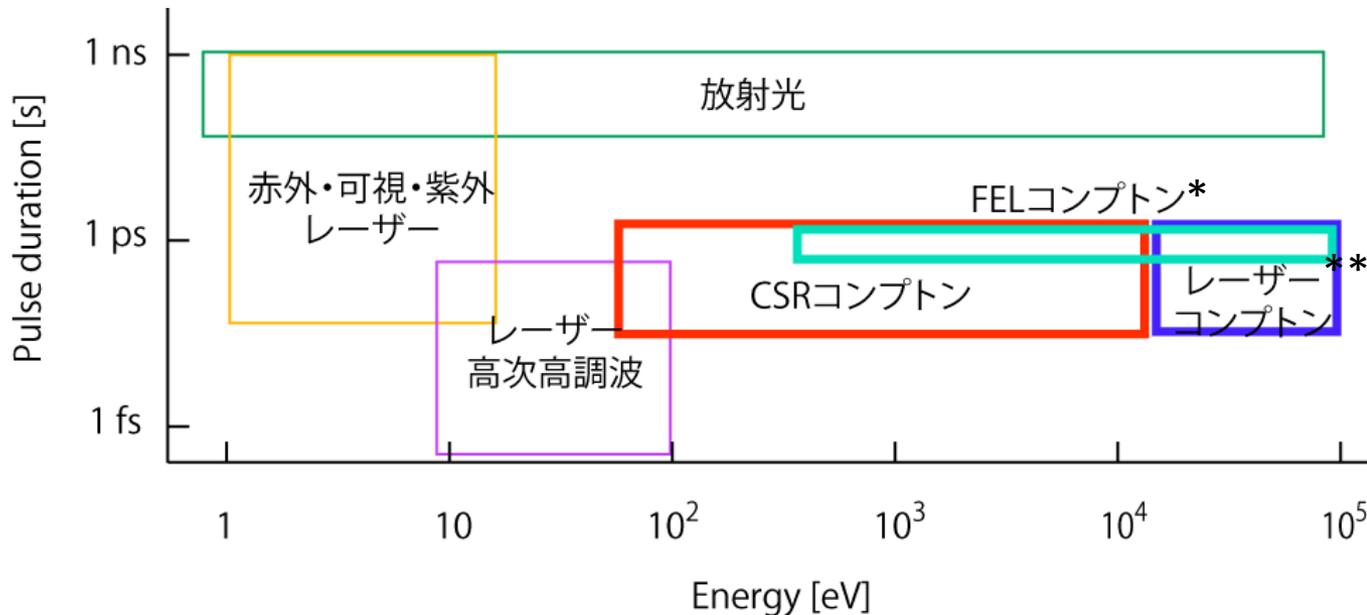
加速器研究施設 第7研究系
島田 美帆

CSR inverse Compton scattering

CSRを使ったCompton散乱を提案しました。

$$\text{正面衝突の場合 } E_X = 4\gamma^2 E_L$$

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



図：逆コンプトン散乱の波長範囲・パルス長の比較(レーザー、FELおよびCSR)

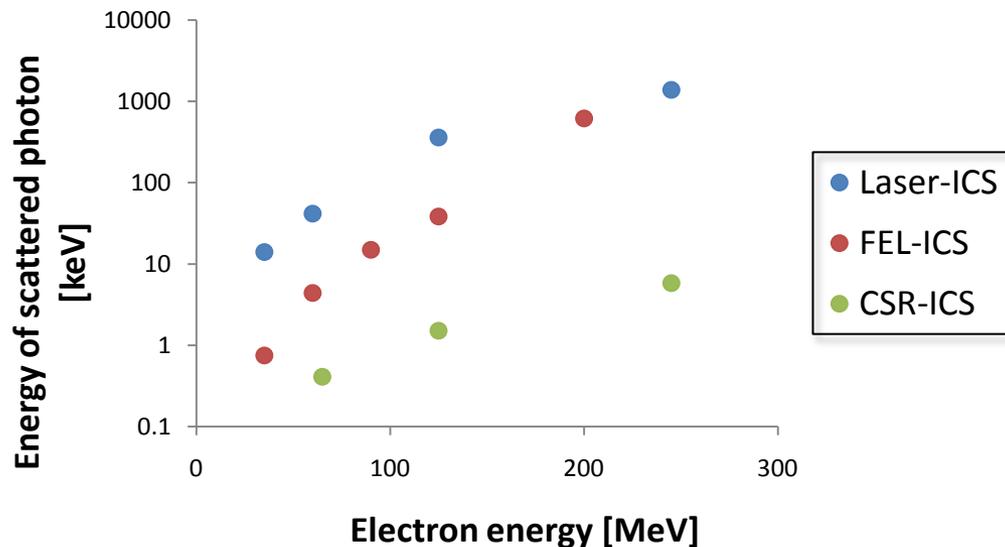
*FELコンプトンでは軟X線領域で使用する波長が数10 μ m(～数100fs)となる。

発振波長がバンチ長と同程度のときゲインが下がるため、サブピコ秒の軟X線発生は困難。

**背面から照射すれば、レーザーコンプトン散乱でも数keVのX線が可能。しかしサブピコ秒は困難。

X線源としての逆コンプトン散乱の比較

| | Laser-ICS | FEL-ICS | CSR-ICS |
|-------------|-----------|-----------|-------------|
| 設備 | レーザー必須 | アンジュレータ必須 | ミラー・共振器のみ |
| 同期 | 困難 | 容易 | 容易 |
| 集光(波長に依存) | 容易 | 容易 | 困難 |
| 帯域 | 数% | 10%? | 10%?~白色 |
| バンチ圧縮 | 困難 | 困難 | 容易 |
| サブピコ秒のX線パルス | 可能(横から照射) | 困難 | 容易 |
| バンチ圧縮の必要性 | なし | なし | X線の波長によって必要 |



左図: 電子のエネルギーとX線のエネルギーの関係

- Laser-ICS Ti:Saレーザー(800nm)
- FEL-ICS 国内のFELの発振波長と電子のエネルギーを参考。
- CSR-ICS バンチ圧縮した場合 (バンチ長100fs, CSR波長 $30\mu\text{m} \times 2\pi$)

Coherent Synchrotron Radiation

KEK-PreprintのCSRの計算に大きな誤りがありました。

全体の放射量 $P(k)$

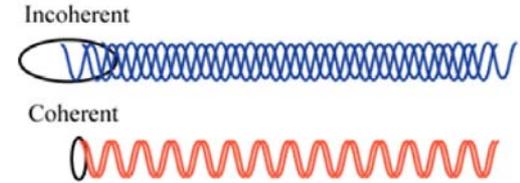
Case 1
(PRSTAB)

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

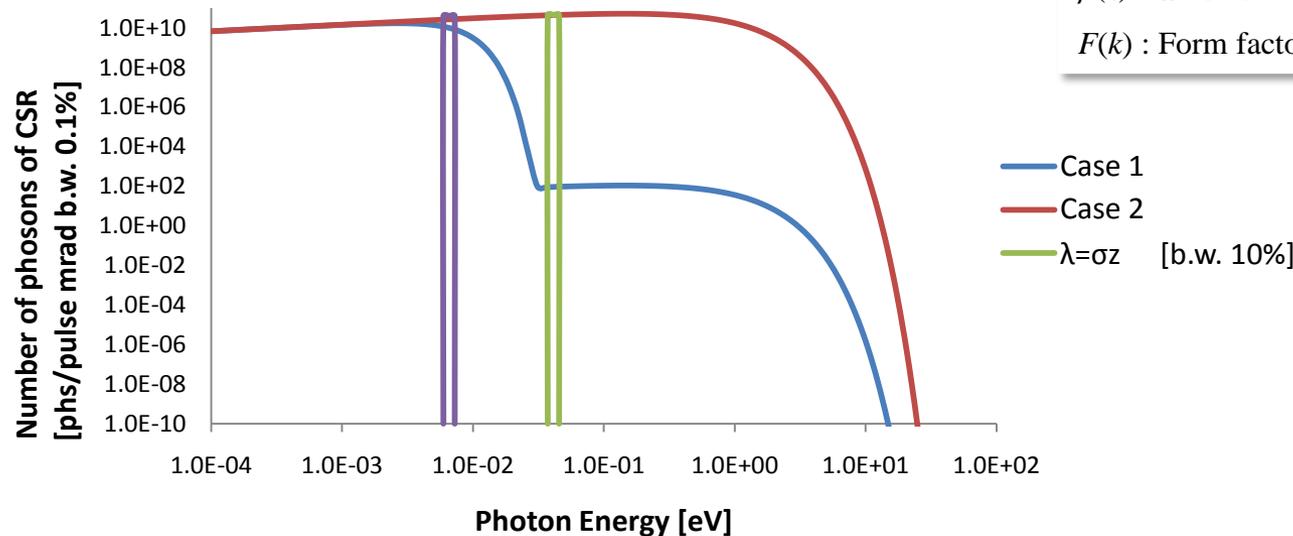
$$F(k) = \left| \int \rho(z) e^{ikz} dz \right|^2$$

Case 2
(KEK-Preprint)

$$P(k) = N^2 p(k)$$

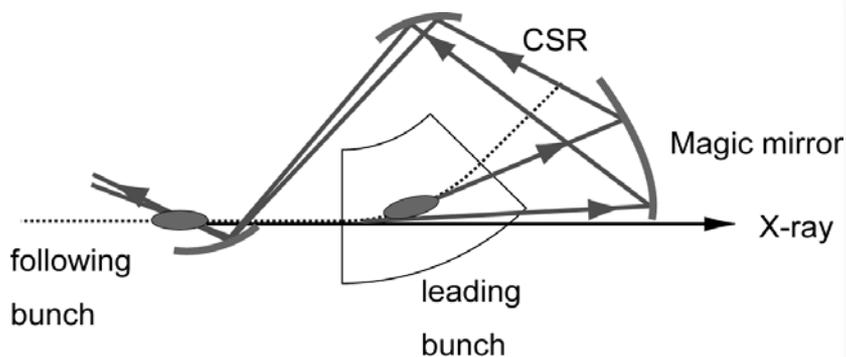


$P(k)$: 全体の放射量 N : 電子数
 $p(k)$: 電子ひとつあたりの放射量
 $\rho(z)$: 縦方向の電子密度分布
 $F(k)$: Form factor



CSRの計算をKEK-preprintではCase 2から帯域10%(黄緑のグラフ)、PRSTABではCase 1から帯域10%(紫のグラフ)を抜き出して計算。光子数はほとんど変わらなかったが、集光サイズに大きな影響があった。

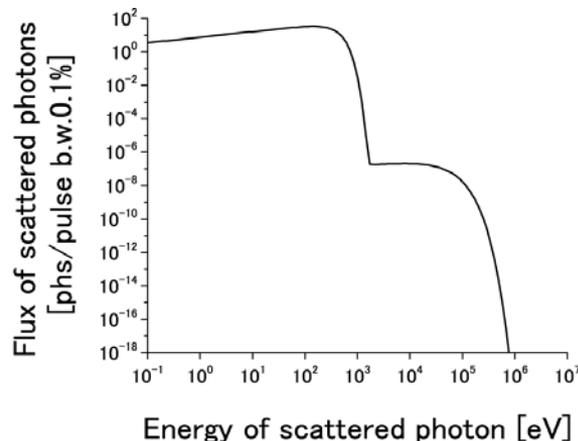
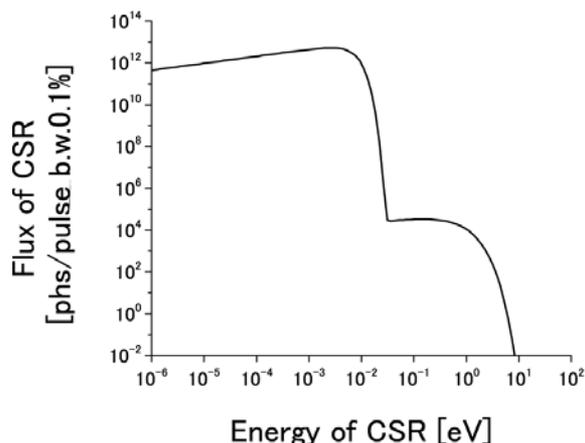
Optics : 1 Magic mirror



マジックミラーの取り込み角度
300 mrad [H] x 50 mrad [V]

横方向の電子のサイズ
100 μm [H] x 50 μm [V]
(分散による水平方向のビームサイズの広がりも考慮)
集光サイズは電子と同じと仮定！(カットオフ無視)

例 : 電荷量 77pC/bunch, 電子のエネルギー 60MeV, バンチ長 100 fs



左: CSRのスペクトル
右: X線のスペクトル
帯域が広いことがわかる
(白色)

X線のパルス当たりの光子数

: 2×10^5 phs/pulse

X線のフラックス

: 2×10^{14} phs/sec (1.3 GHz)

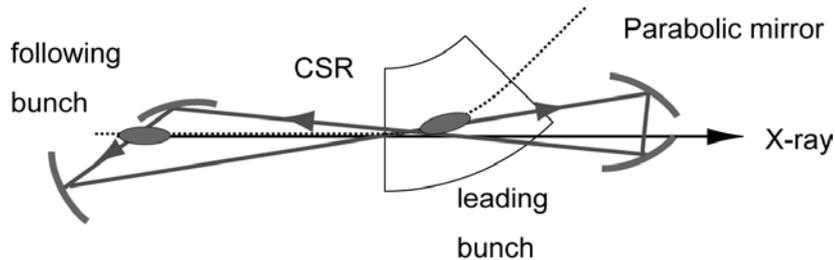
X線のパルス長

: 100 fs (分光すると伸びる可能性もある。)

Optics 2 : Optical Cavity

特定の波長で蓄積する

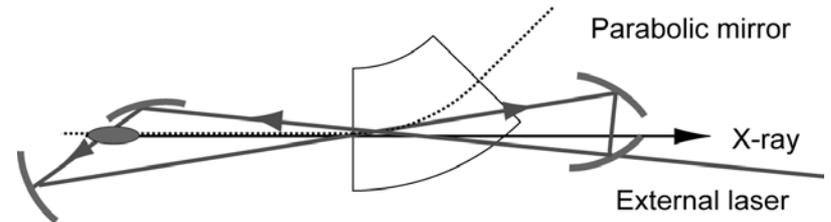
CSRの場合



- 電子に波長より長いジッターがあるため、インコヒーレントに蓄積。
- 発光点がキャビティの内部にある。

$$P_{CAV}(\lambda) = \lim_{l \rightarrow \infty} \sum_{m=0}^l r^{mn} P(\lambda) = \frac{P(\lambda)}{1 - r^n(\lambda)}$$

外部レーザーの場合



- 原理的にコヒーレントに蓄積
- 外部レーザーは透過率の低いミラーを通す。

$$U_{cav} = \frac{t^2 U_{inc}}{(1 - r^2)^2}$$

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

共に反射率99.98%では1000倍程度の蓄積が見込まれる。

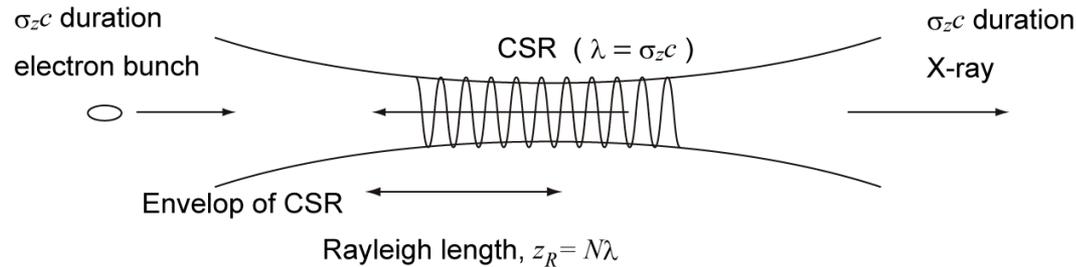
- ✓ アライメントの精度は数10umあれば良さそうなので、外部レーザーよりも容易か？
- ✓ モードマッチングを取るためにMagic mirrorよりも取り込み角度が小さい。
- ✓ 数10um～数100umの範囲では光学結晶と真空層を積み重ねたHRミラーを使用予定。(最近開発されたもの。M.Tecimer et al, PRSTAB **13**, 030703,(2010))

衝突面積の最適化1

ミラーの帯域 $\Delta\lambda/\lambda$ の場合、CSRのパルス長は $1/(\Delta\lambda/\lambda)$ 倍に伸びる。CSRのサイクル数 N_λ

$$N_\lambda = \frac{1}{\Delta\lambda / \lambda}$$

Gaussian Beam



集光面積 w_0 とレイリー長 z_R の関係

$$w_0 = \lambda z_R$$

十分に小さい集光面積で衝突するCSRのサイクル数

$$N_\lambda^{effect} = z_R / \lambda$$

レイリー長だけ離れると衝突面積が増大するため、

集光面積を小さくすると、小さな面積で衝突するCSRのサイクル数が減る。

衝突面積の最適化 2

Undulator model

X線の光子数 N_x $N_x \approx \pi\alpha K^2 N_e N_u$ 電子数 N_e とUndulatorの周期数 N_u に比例

ICSに置き換え[K.J.Kim NIM(1994)]

K値とCSRの光子数 N と集光面積 w_0 の関係

$$K^2 \propto N / w_0$$

集光面積 w_0 とレイリー長 z_R の関係

$$w_0 = \lambda z_R$$

十分に小さい集光面積で衝突するCSRのサイクル数

$$N_\lambda^{effect} = z_R / \lambda$$

Undulatorの周期数 N_u と有効なCSRのサイクル数 N_λ^{effect} の関係

$$N_u = N_\lambda^{effect}$$

ICS model

電子数 N_e CSRの光子数 N_r に比例・衝突面積 w_0 に反比例

$$N_x \propto N N_e / w_0$$

X線光子数 N_x は N_λ^{effect} に依らない。(ただし $N_\lambda^{effect} < N_\lambda$)

必要以上に小さく絞って衝突するより、大きな衝突面積で多くのCSRのサイクルと衝突させた方がX線の質が良かったため、 $N_\lambda^{effect} = N_\lambda$ とし、 $w_0 = N_\lambda \lambda^2$ とした。

最適な衝突面積 $w_0 = N_\lambda \lambda^2$

200 MeV ERLにおけるX線光源

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} |

- X線光子数
 - パルス当たりのX線光子数は 10^{4-5} phs/pulse程度。
 - フラックスは 10^{13-14} phs/s程度。
- X線エネルギー範囲
 - 0.04-4 keVの範囲のX線が得られる。
 - 245 MeV, バンチ長100 fsでは6keV程度のX線が見込まれる。
 - トラッキングの結果では、200MeV以上で50fs以下のバンチ長が見込まれるため、10keVのX線も可能。
- X線のパルス長は100 fs – 1psとなる。
- 集光サイズは十分大きいいため、電子バンチを小さく集光させる必要がない。

5 GeV-ERLにおける γ 線

TABLE II. Optical cavity scheme in 5-GeV ERL: Horizontal acceptance angles are 12 mrad for $\lambda = 30 \mu\text{m}$ and 9 mrad for $\lambda = 10 \mu\text{m}$ for mode matching. Bandwidth of the on-axis γ ray is considered to be $\Delta\lambda_\gamma/\lambda_\gamma \sim \Delta\lambda/\lambda \sim 0.1$ (10%). Pulse duration of the γ ray is the same as σ_z/c .

| Electron charge [nC] | σ_z/c [fs] | Spot size [$\mu\text{m} \times \mu\text{m}$] | CSR energy [mJ] | K | γ -ray energy [MeV] | N_γ [phs/pulse] | N_γ [phs/s] |
|----------------------|-------------------|--|-----------------|------|----------------------------|------------------------|----------------------|
| 1 | 30 | 100 \times 100 | 80 | 0.56 | 8 | 3×10^8 | 3×10^{16} |
| 0.5 | 10 | 30 \times 30 | 65 | 0.87 | 25 | 4×10^8 | 0.7×10^{17} |

- γ 線光子数 (b.w.10%)
 - パルス当たりの γ 線光子数は 10^8 phs/pulse程度。
 - フラックスは 10^{17} phs/s程度。
- 稼働中の一番強い γ 線源はDuke大学, FEL-ICSによる 10^{10} phs/s (10 MeV) [IPAC 2010].
- γ 線利用は？
 - 原子核実験
 - 陽電子生成のための γ 線
 - マンモグラフィ
- ILC陽電子用 γ 線に要求される γ 線数: 10^{12} phs/pulse、10MeV以上と仮定
 - 非常におおざっぱな計算では、10nCで24fsまでバンチ圧縮出来たら可能
 - しかし、インコヒーレント。偏光などは全く考えていない。
 - 上段のスペックはSASE-XFEL(SCSS)とほぼ同じ。CSR-ICSではエミッタンスやエネルギー広がりが一桁以上大きくても問題ないため、さらにバンチ当たりの電荷量を増やすことも可能か？

まとめと今後

- CSRによる逆コンプトン散乱を提案した。
 - 2つのオプティクスを提案
 - Magic mirror : 100fsの白色光が可能。一番実験が容易。
 - Optical cavity : 帯域10%程度、1000倍の蓄積を目標。
 - ERLにおけるスペック (Optical cavity)
 - cERLでは0.04-4keVの軟X線生成が可能。パルス長は100 fs-1ps。
 - パルス当たりの光子数 10^{4-5} phs/pulse, Flux 10^{13-14} phs/s程度
 - 5 GeV ERLでは10MeV付近の γ 線が生成可能。
 - パルス当たりの光子数 10^8 phs/pulse, Flux 10^{17} phs/s程度
 - 今後はCSRをさらに強くすることも検討
 - できれば、CSRを種光として発振させたい。
 - Low levelのジッターを小さくしてもらい、電子のジッターを波長以下になるのが理想。(現状:0.1%のジッターで電子400 fsのジッター)
-