

# STUDY ON CSR IN STORAGE RING AND ERL

Miho Shimada

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)  
1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801

## Abstract

A fine dip structure can be made in the long electron bunch by the technique so called “laser bunch slicing”. At the UVSOR-II storage ring, the oscillation of the dip structure related to the betatron tune was observed in some low alpha optics. It indicated the existence of the transverse-longitudinal coupling effect, which had been theoretically predicted.

Additionally, an inverse Compton scattering of coherent synchrotron radiation is proposed as a soft X-ray source of 200 MeV class energy recovery linac (ERL). The light source has a sub pico-seconds short pulse with high repetition rate of 1.3 GHz.

## 蓄積リングおよび ERL におけるコヒーレントシンクロトロン放射光に関する研究

### 1. はじめに

エネルギー回収型線形加速器や自由電子 X 線レーザーではサブピコ秒短い電子バンチの安定な運転が求められており、短バンチ特有のビームダイナミクスの解明が重要な課題となっている。そこで、短バンチの運転が困難である蓄積リングにおいて、そのビームダイナミクスの研究を行うために、レーザーバンチスライスという手法でディップ構造を作り、その変化の観測を試みた。また、短い電子バンチが放射する大強度のコヒーレントシンクロトロン放射光を X 線・ $\gamma$ 線光源に応用する方法を提案した。

### 2. コヒーレント放射光 (CSR)

相対論的なエネルギーの電子は、軌道が曲げられると光を放射する。放射光の波長が電子のバンチ長よりも十分長いときは位相が揃うため、電子数の 2 乗に比例する放射光強度となる<sup>[1]</sup>。これをコヒーレントシンクロトロン放射光 (CSR) と呼び、大強度のテラヘルツ光源として注目を集めている。CSR のスペクトル  $P(\lambda)$  は以下のような式で表すことができる<sup>[2]</sup>。

$$P(\lambda)d\lambda = [N + F(\lambda)N(N-1)]p(\lambda)d\lambda \quad (1)$$

ここで、 $\lambda$ 、 $N$  および  $p(\lambda)$  は波長、バンチあたりの電子数および電子一つあたりの放射光強度である。 $F(\lambda)$  はフォームファクターと呼ばれる量であり、進行方向（縦方向）の電子密度分布のフーリエ変換の 2 乗で定義される。式(1)の右辺 2 項目が 1 項目に比べて十分大きい場合は、放射光のスペクトルは電子バンチの密度分布を反映することがわかる。この特徴から、バンチ長計測などに用いられることが多い。

### 3. Longitudinal-transverse coupling の観測

#### 3.1 レーザーバンチスライス

レーザーバンチスライスとは、短パルスのレーザーを電子バンチと相互作用させることによって、レーザーが当たった部分だけを切り取る手法である<sup>[3]</sup>。レーザーと電子が重なり合うだけでは相互作用は起こることがなく、レーザーの波長に共振波長を合わせたアンジュレータが必要となる。図 1 に UVSOR のバンチスライスシステムの模式図を示す<sup>[4]</sup>。

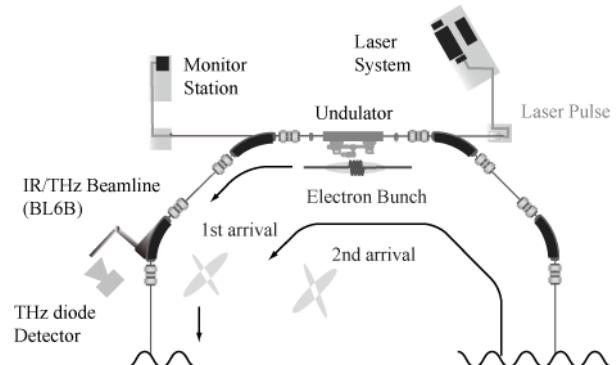


図 1 : UVSOR-II のバンチスライスシステムの模式図

UVSOR のバンチスライスシステムでは、パルス長がサブピコ秒のチタンサファイアレーザーを用いた。アンジュレータの中で電子バンチの一部と重なり合うと、エネルギーのやり取りが発生し、エネルギー広がりが増大する。そのような状態で偏向電磁石を通過すると、エネルギーの増加した電子は遅れ、減少した電子は前に進むため、レーザーと重なった部分の電子密度が小さくなる。つまり、縦方向にディップが形成される。式(1)の 2 項目は密度分布を反映することから、ディップの長さ付近の波長の放

射光が  $N^2$  で大きくなることが分かる。通常、電子バンチあたりの電子数は  $10^9\text{-}10^{11}$  個であるため、わずかなディップでも、強い CSR が放出される。本研究では、レーザーバンチスライスによってディップを形成し、そのディップの様子を CSR を用いて計測をした。

## 2.2 周回毎の CSR の観測

モーメンタム・コンパクションファクター、 $\alpha$  が大きいオプティクスでは、ディップ構造が短い時間で埋もれてしまう。そこで、長時間ディップ構造を維持するために、低  $\alpha$  のオプティクスでバンチスライスの実験を試みた<sup>[5]</sup>。そのオプティクスの主要なパラメータを表 1 に示す。 $\alpha$  の値をできる限り小さくするように試みており、バンチスライスの実験が安定して実行可能なオプティクスは表 1 のようになり、 $\alpha$  が通常の運転に比べて  $1/5\sim1/7$  となった。ベータトロンチューン  $v_\beta$  は半整数に近い 3.53 と整数の  $1/3$  に近い 3.63 の 2 つを用意した。

周回毎の CSR を検出するには、UVSOR の周回周波数よりも速い応答速度のテラヘルツ領域の検出器が必要である。そこで、本実験では、時間応答が ns 以下である狭帯域のテラヘルツダイオード検出器を用いた。また、スペクトル情報を得るために、帯域が  $3.7\text{-}5.7\text{cm}^{-1}$ ,  $7.6\text{-}11\text{cm}^{-1}$ ,  $11\text{-}16.6\text{cm}^{-1}$  の 3 台を用意した。低  $\alpha$  オプティクスの測定結果を図 2 に載せる。 $7.6\text{-}11\text{cm}^{-1}$  の帯域では、通常のオプティクスで大きい信号が観測されたのは 1 つだけであったのに対し低  $\alpha$  オプティクスでは 3 番目まで大きな信号が見えた。その信号の強度は一様に減衰するのではなく、 $v_\beta=3.53$  の場合、最初と 3 番目の応答が 2 番目に比べて大きいことが分かる。また、波長の長い  $3.7\text{-}5.7\text{cm}^{-1}$  の帯域では、3 番目と 5 番目の応答が大きく、2 周毎に大きな信号が見えることがわかった。また、 $v_\beta=3.68$  の場合、最初と 4 番目に大きな信号が観測された。ベータトロンチューン  $v_\beta=3.53$  および 3.68 がそれぞれ半整数、整数の  $1/3$  に近いことが原因であると考えられる。

表 1 : 低  $\alpha$  オプティクスの主要なパラメータ

	Normal	Low alpha (1/2)	Low Alpha (1/3)
$\alpha$	0.028	0.00615	0.00471
$v_\beta$	3.75	3.53	3.68
$\varepsilon_x [\mu\text{m-mrad}]$	15.6	140	180

そこで、線形ビームダイナミクスのみを取り入れたシミュレーションを行った。その縦方向の位相空間と電荷密度分布の計算結果を図 3 に示す。このシミュレーションから想定される CSR の応答は図 2

の結果とよく一致し、CSR の信号の振動は  $v_\beta$  に起因することが分かった。これは、水平方向の振動が縦方向に現れた現象であると解釈できる。このカップリングは理論的には予測されていたが<sup>[6]</sup>、直接測定できたことは初めてである。

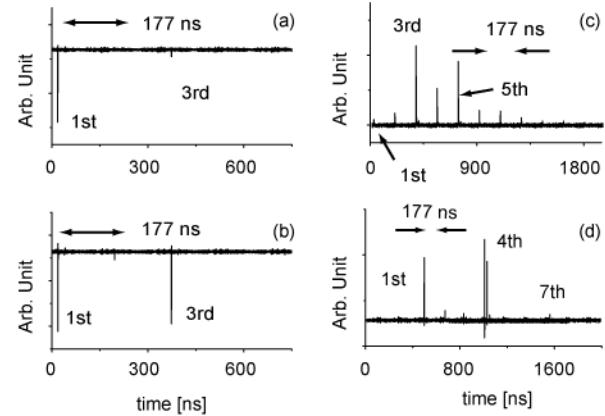


図 2 : テラヘルツダイオード検出器で測定した CSR。(a)-(c): 低  $\alpha$  オプティクス、 $v_\beta=3.53$  の結果。帯域(a)  $11\text{-}16.6\text{ cm}^{-1}$ , (b):  $7.3\text{-}11\text{ cm}^{-1}$ , (c)  $3.7\text{-}5.7\text{ cm}^{-1}$ 。(d): 低  $\alpha$  オプティクス、 $v_\beta=3.68$  の結果。帯域  $7.3\text{-}11\text{ cm}^{-1}$ 。

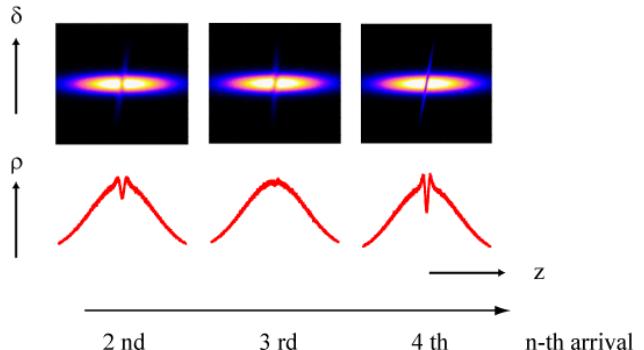


図 3 : フラグメントとディップが周回毎の推移する例。(上) : 縦方向の位相空間。(下) : 縦方向の電荷密度分布。

## 3. CSR を用いた逆コンプトン散乱

### 3.1 CSR を用いた逆コンプトン散乱

現在 KEK サイトに建設中の 200MeV クラスのコンパクト ERL では、将来光源のための試験機としてだけでなく、レーザー逆コンプトン散乱による硬 X 線・ $\gamma$  線利用や短い電子バンチによるテラヘルツ領域の CSR の利用が検討されている<sup>[7-8]</sup>。本稿では、KEK-PF に利用者の多い軟 X 線光源として、テラヘルツ領域の CSR を用いた逆コンプトン散乱につい

て提案した<sup>[9]</sup>。

光が物質中の電子と衝突して、より長い波長の光となって散乱される現象のことをコンプトン散乱と呼び、光の粒子（光子）と電子の間にエネルギーの受け渡しがある。電子が相対論的な運動をしていた場合には、ローレンツ収縮によって、より短い波長の光が散乱する。これを逆コンプトン散乱（Inverse Compton scattering; ICS）と呼ぶ。光子が十分に相対論的な電子と正面衝突した場合は、散乱光のエネルギー $E_x$ は入射光のエネルギー $E_i$ を用いて次のように表すことができる。

$$E_x \approx 4\gamma^2 E_i \quad (2)$$

ここで、 $\gamma$ はローレンツファクターである。散乱光の光子数 $N_x$ は次のシンプルな式で見積もることができる。

$$N_x \approx \sigma_T N_p N_e / A \quad (3)$$

ここで、 $\sigma_T$ 、 $N_p$ 、 $N_e$ および $A$ はそれぞれトムソン散乱面積、光子数、電子数および衝突面積である。

CSR は電子の前方に放射されるため、自身の電子バンチと衝突させることは困難である。そこで、ミラーなどで CSR を誘導し、後続の電子バンチに衝突させる。2 つの光学系について図 4 に模式図を示す。マジックミラーは広い取り込み角度で集めた放射光を一点に集める形状を持つミラーであり<sup>[10]</sup>、ここではすべての波長を集め、電子バンチを同じスポットサイズまで集光すると仮定した。光共振器では、CSR を蓄積して逆コンプトン散乱に利用する。この場合、高反射率ミラーの帯域によって制限が加わる。そのため、ハーフサイクルである CSR はフーリエ限界によってパルス長が伸びてしまう。衝突面積はこのパルス長の変化および砂時計効果を考慮して求めた。また、反射率 99.97%<sup>[11]</sup>でパルスの蓄積率がおよそ 1000 倍になると仮定した<sup>[12]</sup>。蓄積される CSR の波長は rms バンチ長の  $2\pi$ 倍とし、CSR の取り込み角度は光共振器のモードマッチングを考慮して決定した。

### 3.2 期待される光子数

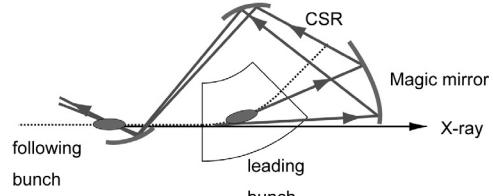
マジックミラーの光学系では、白色光の散乱光が期待され、散乱光のスペクトルは CSR のスペクトルと似通った形状になる。コンパクト ERL に取り込み角度 300mrad のマジックミラーを導入した場合について検討した。電子エネルギー 200MeV、バンチあたりの電荷量 77pC、バンチ長が 100fs の場合、スペクトル全体で、 $4 \times 10^5$  phs./pulse および  $5 \times 10^{14}$  phs./s の散乱光が期待できる。

光共振器を使用した場合について、期待される X 線の光子数を表 2 に載せた。電子バンチの電荷量は CSR wake などの非線形効果などを考慮に入れて設定し、繰り返しは電流が 100mA になるように設定した。X 線の波長は 0.04keV から 4keV をカバーする。ミラーの帯域を 10% と仮定した場合、パルス当たりの光子数は  $10^4$ - $10^5$  phs./pulse 10%BW、フラック

スは  $10^{13}$ - $10^{14}$  phs./s 10%BW が見込まれる。

5 GeV クラスの ERL では、10 MeV 前後の  $\gamma$  線を発生することができ、 $10^8$  phs./pulse および  $10^{16}$  phs./s の光子数が期待できる。

(a) Magic Mirror



(b) Optical Cavity

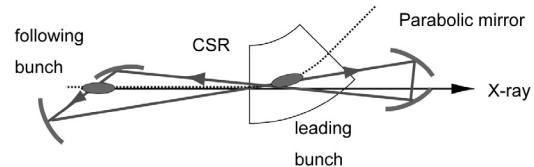


図 4 : CSR-ICS のオプティクスの模式図

(上) : マジックミラーを使用した例。

(下) : 光共振器を使用した例。

## 5. まとめ

レーザーバンチスライスによって電子バンチ上にサブピコ秒のディップ構造を作成し、蓄積リングを周回する間の構造の変化をテラヘルツ領域の CSR を用いて観測することに成功した。その結果、水平方向の振動が縦方向に回り込んでいることが分かった。また、ERL をベースに CSR を利用した X 線・ $\gamma$  線生成の提案を行った。

高エネルギー電子による放射光の発生は、加速器の主要な利用の一つであり、これまでにシンクロトロン放射光源、自由電子レーザーなど多くが研究され、利用に供されてきた。多様なユーザーの要求に広く応えつつ、さらに先端的な光源利用を進めるためには、放射光輝度・コーヒーレンズの向上、波長領域の拡大、装置の小型化などが求められている。加速器、レーザーの技術が進歩するに従って、本稿で示したような新しい方式の放射光発生が可能になりつつある。今後も、加速器ベースの放射光源の性能向上を目指した研究を進めたい。

## 参考文献

- [1] G. L. Carr et al, Nature (London) **420**, 153 (2002)
- [2] J. S. Nodwick and D. S. Saxon, Phys. Rev. **96**, 180 (1954)
- [3] R. W. Schoenlein et al, Science **287**, 2237 (2000)
- [4] M. Shimada et al, Jpn. J. Appl. Phys. **46**, 7939 (2007)
- [5] M. Shimada et al, Phys. Rev. Lett. **103**, (2009) 144802
- [6] For example, Y. Shoji, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **7**, 090703 (2004)

- [7] 坂中章悟、”コンパクト ERL の建設状況”, 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TUPS079, Tsukuba, 2011
- [8] 島田美帆、”ERL 計画の進捗状況”, 第 8 回加速器学会年会プロシーディングス, TULH09, Tsukuba, 2011
- [9] M. Shimada and R. Hajima, Phys. Rev. ST. Accel. Beams, **13**, (2010) 100701
- [10] For example, R. Lopez-Delgado and H. Szwarc, Opt. Commun., **19**, 286 (1976)
- [11] M. Tecimer et al, Phys. Rev. ST Accel. Beams, **13**, 030703
- [12] E. R. Crosson et al, Rev. Sci. Instrum. **70**, 4 (1999)

表 2 : CSR-ICS を用いて 60 – 200 MeV クラスの ERL で期待される軟 X 線。

<i>Electron Energy [MeV]</i>	<i>Electron Charge [nC]</i>	<i>Bunch Length [ps]</i>	<i>X-ray Energy [keV]</i>	<i>Nx [phs./pulse]</i>	<i>Nx [Phs./s]</i>
60	0.077	0.1	0.4	$1 \times 10^4$	$2 \times 10^{13}$
60	0.5	1	0.04	$4 \times 10^4$	$0.7 \times 10^{13}$
200	0.2	0.1	4	$2 \times 10^5$	$1 \times 10^{14}$
200	1	1	0.4	$3 \times 10^5$	$3 \times 10^{13}$