

レーザーコンプトン光源における短パルス X 線の発生 ULTRASHORT PULSE GENERATION AT COMPTON SOURCES

羽島良一^{*A),B)}、宮島司^{B)}、松葉俊哉^{C)}

Ryoichi Hajima^{*A),B)}, Tsukasa Miyajima^{B)}, Shunya Matsuba^{C)}

^{A)}National Institutes of Quantum and Radiological Science and Technology (QST)

^{B)}High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)}Hiroshima University

Abstract

Generation of femtosecond X-ray pulses from laser Compton scattering (LCS) is possible with an electron bunch of femtosecond duration or laser pulse of femtosecond duration. In this paper, we discuss alternative approach for femtosecond LCS pulses by using an electron bunch having head-tail oscillation in a transverse plane.

1. はじめに

レーザーと高エネルギー電子の衝突散乱による光子ビーム (X 線、ガンマ線) の発生は、レーザーコンプトン散乱 (Laser Compton Scattering; LCS) として知られている。近年のレーザー、電子加速器の技術進歩に従って、LCS 光源の開発と利用が進んでいる [1]。X 線領域における LCS の利用では、LCS の発光点が電子ビームのサイズで決まる微小サイズとなることを使った生体の屈折イメージング [2]、準単色性を生かした高精細な生体 CT [3]、フェムト秒 X 線による物質のダイナミクスの解析などが提案され、一部が実証されている。

エネルギー回収型リニアック (Energy Recover Linac; ERL) とレーザー蓄積装置を組み合わせた LCS 実験が、コンパクト ERL (cERL) を使って、KEK、JAEA の共同チームにより実施され、2014 年 3 月に LCS ビームの生成に成功した [4]。cERL では、エネルギー 7 keV の X 線を発生し、単色性、安定性といった LCS-X 線の利用に必要な条件を検証し、さらに、イメージング、X 線蛍光散乱による元素分析の実証実験まで行った。これらの実験を通して、エネルギー可変、準単色、微小光源サイズといった LCS-X 線の特長が確認され、本格的な LCS-X 線の利用に向けた大きな進展が得られた。

ところで、LCS で発生する X 線パルスの時間幅は、電子とレーザーパルスの時間幅と衝突点における交差角で決まる。cERL の実験では、電子ビームとレーザービームを正面衝突に近い 18 度の角度で交差させたため、発生した LCS-X 線は、電子ビームのパルス長に近い 2 ps(rms) であったと考えられる。

X 線を使った高速現象の時分割測定は、蓄積リングからのシンクロトロン放射光、アンジュレータ放射光を使ってピコ秒領域の実験が行われている。LCS-X 線でフェムト秒領域の超短パルス X 線を発生できれば、このような実験をフェムト秒領域まで拡大できる。フェムト秒 X 線の発生方法として、これまでに、電子バンチをフェムト秒まで圧縮した後にレーザーと正面衝突させる、あるいは、フェムト秒のレーザー

パルスを 90 度で電子ビームと衝突させる [5] といった方法が提案されている。

本論文では、LCS によるフェムト秒 X 線パルスの発生について、従来から知られている方法に加えて、LCS 発生点において電子バンチを進行方向に傾ける方法が利用できることを提案し、得られる X 線パルスの長さを評価する。

2. LCS パルスの時間幅

Figure 1 は、LCS の代表的な構成である正面衝突と 90 度衝突による X 線の発生を示したものである。

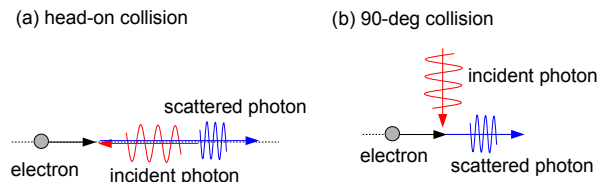


Figure 1: 二通りのレーザーコンプトン散乱. (a) 正面衝突, (b)90 度衝突.

正面衝突の場合、散乱 X 線のパルス長は電子バンチの長さと同じになり、レーザーパルスの時間幅、横方向サイズなどには依存しない。電子バンチを圧縮することで、バンチ長に応じた短パルス X 線を生成できる。

90 度衝突の場合には、レーザーと電子の交差における重なり時間が散乱 X 線のパルス長を決めるので、レーザーパルス、電子バンチのサイズの関数として散乱 X 線のパルス長が与えられる [5]。

$$\sigma_T = \frac{\sigma_z \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_w^2 + \sigma_L^2}}{c \sqrt{\sigma_z^2 + \sigma_e^2 + \sigma_w^2 + \sigma_L^2}} \quad (1)$$

ここで、 σ_T は LCS パルスの時間幅、 σ_e は電子ビームのスポットサイズ、 σ_w はレーザーのスポットサイズ、 σ_z は電子バンチの長さ、 σ_L はレーザーパルスの長さである。論文 [5] では、3 ps の電子バンチと 170 fs の

*hajima.ryoichi@qst.go.jp

レーザーを90度で衝突させ、300 fsのX線パルスを生成する例が示されている。

3. 偏向空洞を用いた短パルスX線生成の提案

アンジュレータ放射において、電子バンチ長よりも短い時間幅のX線パルスを発生する手法として、偏向空洞（クラブ空洞）の利用が提案されている。偏向空洞は、位相に応じた横方向のキックを電子バンチに与える装置であり、位相をうまく選んでやることで、電子バンチの先頭（ヘッド）、中央（センター）、後方（テイル）に異なる横方向運動量を与えることができる。偏向空洞は電子バンチ長の測定診断[6][7]や衝突加速器におけるクラブ衝突[8]を目的として、幅広い電子エネルギー領域で利用されている。偏向空洞で横方向のキックを受けた電子バンチをアンジュレータに入射すると、バンチの各部が異なる位相でベータatron振動を起こすことになり、アンジュレータ放射の出射方向もバンチの部位ごとに異なることになる。放射光のビーム光路上にコリメータを挿入することで、バンチ内の一部からの放射光のみを切り出すことができ、これによって、バンチ長よりも短いX線パルスを利用できるというアイデアである[9]。

われわれは、これと同様に、LCS-X線の発生においても、偏向空洞を用いてX線を短パルス化することができることに注目した。Figure 2に示すように、偏向空洞にて電子バンチに横方向運動量（バンチ部位ごとに異なる）を与え、レーザー衝突点でバンチが進行方向に傾いた状態を作り出すことで、電子バンチの一部のスライスのみをレーザーと相互作用させることができる。この結果、電子バンチ全体の長さよりも短いパルスのX線を発生できる。リニアックやERLの場合、偏向空洞を低エネルギー部に置くことも可能であり、この場合は偏向空洞を小さくし、投入すべきRF電力を小さくできる利点もある。

偏向空洞をERL入射器の低エネルギー部に設置する場合は、われわれグループが過去に開発したビーム診断用の空洞の設計[6]が参考になる。また、加速後の高いエネルギー（20 MeV以上）で超伝導の偏向空洞[10]を利用することも考えられる。超伝導偏向空洞ではスポーク型超伝導空洞[11]の設計・製作技術を転用できると考えている。

4. X線パルス長の評価

偏向空洞を用いてLCS-X線を短パルス化する時、パルスをどこまで短くできるかは、偏向空洞によるキックの大きさ、偏向空洞からLCS発生点までの電子ビーム輸送条件、電子ビームエミッタンス、衝突点におけるレーザーの横方向の広がりなどで決まる。

偏向空洞のキックの向きを y 方向とし、バンチ中央がキックを受けない位相を選ぶ（ゼロクロス）。偏向空洞を通過した電子は、バンチスライスごとに異なるキック（ y 方向）を受けるので、 (y, y') の位相空間では、バンチスライスが y' 方向にオフセットすることになる（Fig. 3参照）。ここで、 ζ はバンチの進行方向の局所座標とすると、ゼロクロスの位相では偏

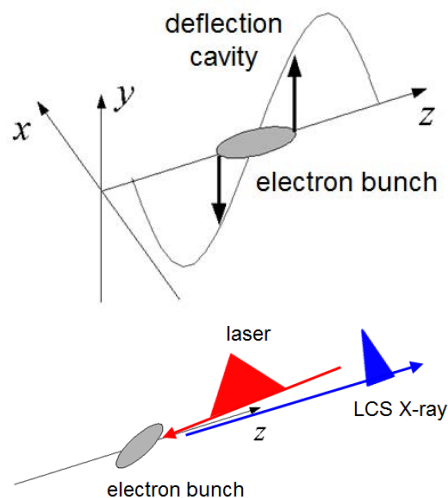


Figure 2: 偏向空洞を用いて LCS-X 線の短パルス化。

向空洞のキック力は位相に対して線形であると近似できるので、バンチスライスが受ける位相空間での変位は $\Delta y' = k\zeta$ と表せる。

LCS 発生点においてレーザーが y 方向に w の幅を持つ場合、レーザーと電子バンチと重なる領域を偏向空洞位置での位相空間 (y_0, y'_0) に書き加えたのが Fig. 3 である。レーザーは $y'_0 = uy_0 \pm vw$ の領域と重なる。ここで、係数 u, v は偏向空洞から LCS 発生点までの転送行列の y 方向成分で書き表すことができ、 $u = -R_{33}/R_{34}, v = 1/R_{34}$ である。

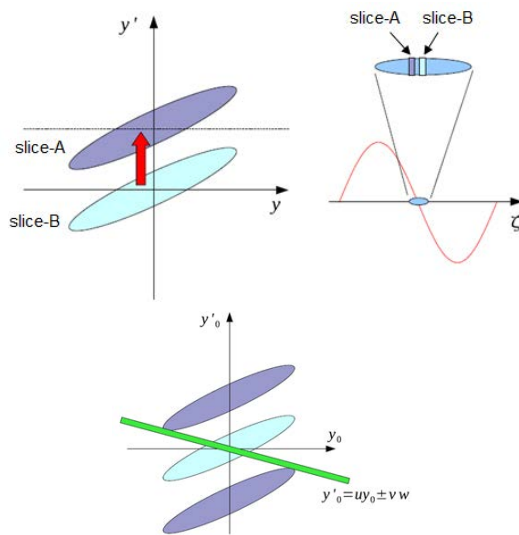


Figure 3: 偏向空洞のキックによってバンチスライスが位相区間で変位を受ける様子。直線は LCS 衝突点におけるレーザーが占める位相空間を偏向空洞位置にバックトラックしたもの。

LCS-X線のパルス長が最短となる条件は、偏向空洞位置での位相空間において、LCS 発生点でのレ

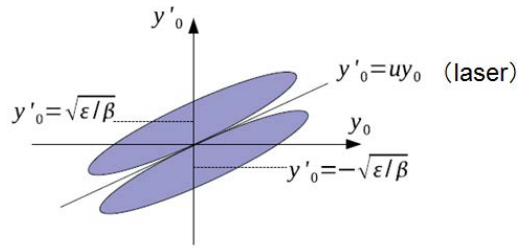


Figure 4: LCS-X 線のパルス長が最短となる時の偏向空洞位置での位相空間. LCS 発生点でのレーザーに対応する直線がバンチ楕円と平行になる条件.

ザーに対応する直線がバンチ楕円と平行になることである。この条件が満たされる場合を Fig. 4 に示した。簡単のため、レーザーパルスの幅 (w) は無視している。偏向空洞位置での位相空間においてレーザーパルスを示す直線は $y'_0 = u y_0$ 、 $u = -R_{33}/R_{34}$ である。LCS-X 線のパルス長 ($\Delta\zeta$) は、レーザーパルスの横方向広がりが小さい極限、 $|w/R_{34}| \ll \sqrt{\epsilon/\beta}$ にて、

$$\Delta\zeta = \frac{d}{k} = \frac{1}{k} \left(\sqrt{\epsilon/\beta} + \frac{w}{|R_{34}|} \right) \quad (2)$$

となる。

5. シミュレーションによる確認

前節で示した LCS-X 線パルス長を最短にする条件、および、その時の X 線パルス長が正しいことを確認するため、単純な体系を仮定して粒子トラッキングのシミュレーションを行った。Figure 5 に示すように、偏向空洞、3 台の四極磁石、ドリフトスペース、LCS 発生点を仮定する。



Figure 5: シミュレーションのための体系：偏向空洞の下流に 3 台の四極磁石を配置し、LCS 発生点に電子ビームを導く。

偏向空洞から LCS 発生点までの転送行列 (y 方向) は、

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_{33} & R_{34} \\ R_{43} & R_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \\ = \begin{pmatrix} -0.779 & -0.705 \\ -1.02 & -0.360 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_0 \\ y'_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

とした。また、電子ビームエネルギーを 10 MeV、規格化エミッタンス $\epsilon_n = 1\text{mm-mrad}$ 、バンチ長 3 ps (rms)、偏向空洞位置での $\beta_y = 1\text{m}$ とした。偏向空洞を 2.6 GHz、振幅 600 kV に選んだ。

以上の条件で elegant[12] による粒子トラッキングを行った。LCS 発生点でレーザーの横方向広がりに

等しい仮想的なアパーチャを置いてアパーチャを通過した電子のバンチ長を評価することで LCS-X 線のパルス長を求めた。

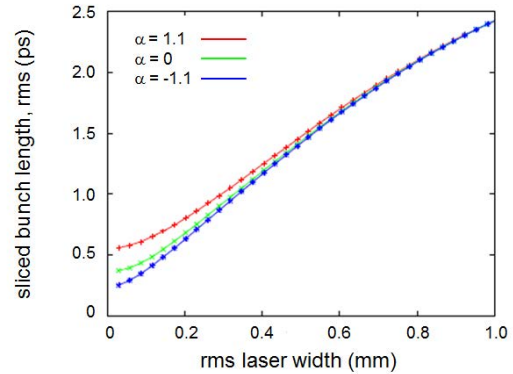


Figure 6: 粒子トラッキングによる LCS-X 線パルス長の確認。偏向空洞位置で $\alpha_y = -1.1, 0, 1.1$ とした時の、LCS 発生点におけるレーザーの横方向広がり と LCS-X 線パルス長の関係。

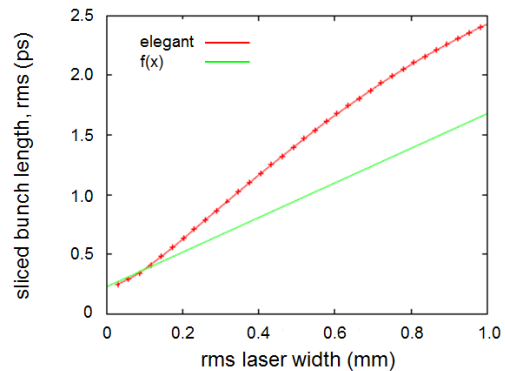


Figure 7: 粒子トラッキングによる LCS-X 線パルス長と解析式 (2) で計算される X 線パルス長をプロットした。

Figure 6 に偏向空洞位置で $\alpha_y = -1.1, 0, 1.1$ とした時の LCS-X 線のパルス長を LCS 発生点におけるレーザーの横方向広がりに対してプロットした。前節の解析式からは、 $\alpha_y = -R_{33}/R_{34} = -1.1$ の時に LCS-X 線のパルス長が最短になることが示されるが、これは、粒子トラッキングの結果と一致する。

Figure 7 では、elegant の計算結果と、前節で示した最短パルス長を与える式 (2) の結果を合わせてプロットした。ここでは、偏向空洞位置で $\alpha_y = -1.1$ に選んでいる。レーザーの横方向広がりが小さい極限で、粒子トラッキングと解析式が一致する様子が確認できる。

6. 偏向空洞を使う以外の方法

電子バンチを進行方向に傾けてレーザーと衝突させることでバンチよりも短いパルス長を持った X 線

の発生は、これまで述べてきた偏向空洞を使う方法以外でも可能である。

コンパクト ERL の LCS-X 光源 [4] のように、加速した電子が偏向磁石を含む周回軌道を通った後に LCS 発生点に導かれる場合は、以下の方法が利用できる。電子バンチ主加速器でオフレスト加速し、LCS 発生点で運動量分散関数 (η) をゼロにしない (分散を閉じない) 設定の周回軌道を通す方法である。偏向空洞を用いる手法と同様に、電子はバンチ内の進行方向の局所座標に応じて、異なる振幅と位相でベータトロン振動を行う。分散関数の大きさ、ベータトロン振動の位相をうまく選んでやれば、LCS 発生点にて電子バンチが進行方向に傾いた状態を作り出し、短パルス X 線を発生できる。

cERL における実験のように、LCS 発生点においてレーザー蓄積装置 (enhancement cavity) を使うなど、電子とレーザーが有限角度で衝突する場合は、電子とレーザーが交差する平面と電子バンチが傾く平面が直交しないと X 線パルスを効果的に短くできないので注意が必要である。

7. まとめ

レーザーコンプトン散乱は、エネルギー可変かつ準単色の高エネルギー光子ビーム (X 線、ガンマ線) を発生できることから、国内外で広く研究されている。しかしながら、LCS の短パルス性を利用した研究は、これまで多くなされていない。われわれの提案は、LCS 発生点の構成を変えずに、電子加速器に手を加えることでフェムト秒領域の短パルス X 線を発生するものである。

本稿では、その原理提案を示したのみであるが、今後、発生する X 線のフラックスや単色性などについて詳細な検討を行い複数の手法を比較することで、短パルス LCS-X 線の利用につながることを期待する。

本研究の一部は文部科学省委託事業 光・量子融合連携研究開発プログラム「小型加速器による小型高輝度 X 線源とイメージング基盤研究開発」による成果である。

参考文献

- [1] G.A. Krafft and G. Priebe, Rev. Accl. Sci. Tech. **03**, 147 (2010).
- [2] H. Ikeura-Sekiguchi *et al.*, Appl. Phys. Lett. **92**, 131107 (2008).
- [3] K. Achterhold, M. Bech, S. Schleede, G. Potdevin, R. Ruth, R. Loewen, F. Pfeiffer, Sci. Rep. **3**, 1313 (2013).
- [4] 永井良治他, 日本加速器学会第 12 回年次大会論文集, p.1328 (2015); 赤木智哉他, 日本加速器学会第 12 回年次大会論文集, p.1331 (2015).
- [5] K.-J. Kim, S. Chattopadhyay, C.V. Shank, Nucl. Instr. Meth. A **341**, 351-354 (1994).
- [6] S. Matsuba *et al.*, 日本加速器学会第 7 回年次大会論文集, p.996 (2010).
- [7] R. Akre *et al.*, Proc. PAC-2001, p.2353 (2001).
- [8] T. Abe *et al.*, Proc. PAC-2007, pp.27 (2007).

- [9] M. Katoh, JJAP, **38**, L547 (1999); A. Zholents *et al.*, Nucl. Instr. Meth. A **425**, 385 (1999); S. Sakanaka, JJAP, **43**, 6457 (2004).
- [10] S.U. De Silva and J.R. Delayen, Phys. Rev. ST Accel. Beams **16**, 012004 (2013).
- [11] M. Sawamura *et al.*, Proc. IPAC-2016, p. 1835 (2016).
- [12] M. Borland, "elegant: A Flexible SDDS-Compliant Code for Accelerator Simulation," Advanced Photon Source LS-287, September 2000.