

クラブ衝突によるレーザーコンプトン散乱のルミノシティ増大

LUMINOSITY INCREASE IN LASER-COMPTON SCATTERING

BY CRAB CROSSING METHOD

小柴裕也^{#, A)}, 高橋孝^{A)}, 太田昇吾^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 坂上和之^{B)}, 東口武史^{C)}, 浦川順治^{D)}
Yuya Koshiba^{#, A)}, Takashi Takahashi^{A)}, Shogo Ota^{A)}, Masakazu Washio^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{B)},
Takeshi Higashiguchi^{C)}, Junji Urakawa^{D)}

^{A)} Research Institute of Science and Engineering, Waseda University

^{B)} Waseda Institute of Advanced Study, Waseda University

^{C)} Utsunomiya University

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

Abstract

Laser-Compton scattering(LCS) X-ray source is expected to be a compact and powerful X-ray source with features including high brightness, high directivity, energy tunability, and quasi-monochromaticity. The intensity is determined by the product of cross section and luminosity. Therefore, large luminosity is required for an intense X-ray source. It is known that the luminosity is dependent on colliding angle, and a smaller colliding angle is better for the luminosity. However, head-on collision is difficult especially with an optical enhancement cavity. A method to overcome this difficulty is the crab crossing. In collider experiments, crab crossing is already used to increase the number of particle reactions. In our case, we will tilt the electron beam to the half of collision angle using an rf-deflector. In this conference, we will mainly report about the expected results of crab crossing LCS.

1. はじめに

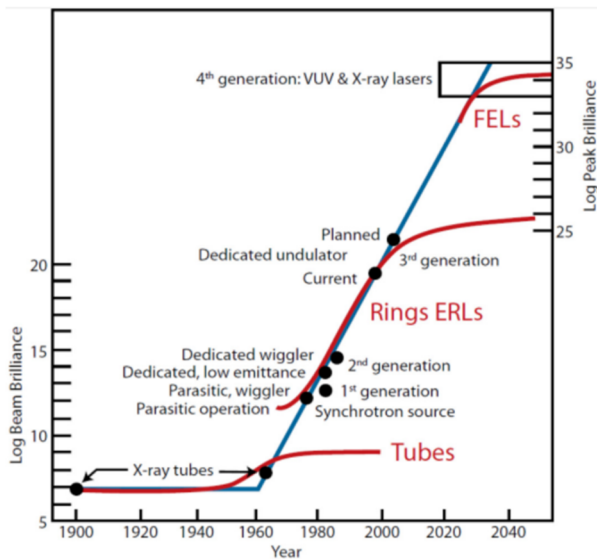


Figure 1: Development of X-ray brilliance [1].

X線はその存在がレントゲンによって1895年に発見されてから1世紀以上にわたって医療応用、生物科学、材料科学など多岐に渡る分野で応用されてきた。今日、線源として一般的なものはX線管と放射光施設である。X線管はそのコンパクトさと利便性から最も広く使われる装置であり、レントゲン撮影にも使われているものである。一方で SPring-8 に代表される放射光施設では高輝度な

[#] advanced-yuya@asagi.waseda.jp

X線を利用することができ、その典型的な輝度は偏向電磁石からの放射光で 10^{15} 程度である。しかしながら GeV オーダーのビームエネルギーが必要であり、加速器が大型になってしまうため、誰もが手軽に利用できる線源とは言い難い。Figure 1 に X 線源の発展を示す[1]。今日最も高輝度な X 線源は X 線自由電子レーザー (XFEL) であり、1 Å を切る波長において発振したことは記憶に新しい。また 100fs を切るような短パルス性も得られている[2]。レーザーコンプトン X 線源は第 2 世代の放射光に匹敵するが、線形加速器ベースであるため放射光施設よりもはるかに小型でコストダウンが可能である。

2. レーザーコンプトン散乱とクラブ衝突

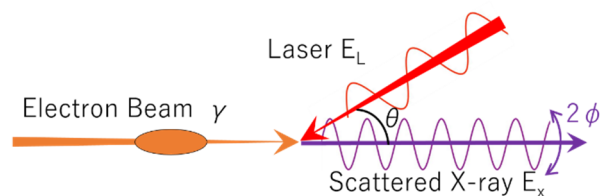


Figure 2: Schema of laser-Compton scattering.

レーザーコンプトン散乱はレーザーパルスに加速器からの相対論的エネルギーをもつ電子ビームを衝突させることにより、散乱光として X 線あるいはガンマ線を得る手法である。Figure 2 に概要図を示す。散乱光子エネルギーは電子ビームのエネルギーに相当するローレンツ因子 γ を用いて

$$E_X^{\text{MAX}} \approx 2\gamma^2(1 + \beta \cos \theta) E_L \quad (1)$$

と表され、MeV クラスのビームでも X 線領域の散乱光を得られることが特徴である。そのため大型の円形加速器でなく線形加速器で十分なためダウンサイジングが可能である。散乱光はビーム軸上を中心に、 $1/\gamma$ rad の範囲にコーン状に得られるため指向性を持つ。また(1)式からビームエネルギーや衝突角を調整することでエネルギー可変であることがわかる。散乱光をビーム軸上でコリメートすることで準単色光 (0.1%~数%) が得られ、レーザーの偏光特性が踏襲されるため偏光制御可能という特色も兼ね備えている。

散乱光子数は散乱断面積とルミノシティの積で表される。

$$N = \sigma L \quad (2)$$

レーザー波長とビームエネルギーによって散乱断面積は決まってしまうため、高強度な X 線源のためにはルミノシティを最大化することが重要である。そのためには衝突点における電子密度、光子密度を増大させるとともに衝突角を小さくすることが必要になる。我々が予定しているビームパラメータ、レーザーパラメータを Table 1 に示し、それらを基に計算されるルミノシティを Fig. 3 に示す。

Table 1: Parameters of Electron Beam and Laser Pulse

	Electron Beam	Laser Pulse
Energy	4.2 MeV	1.2 eV(1030 nm)
Intensity	40 pC	10 mJ
Transverse Size	40 μ m	50 μ m
Duration	3 ps(rms)	0.43 ps(rms)

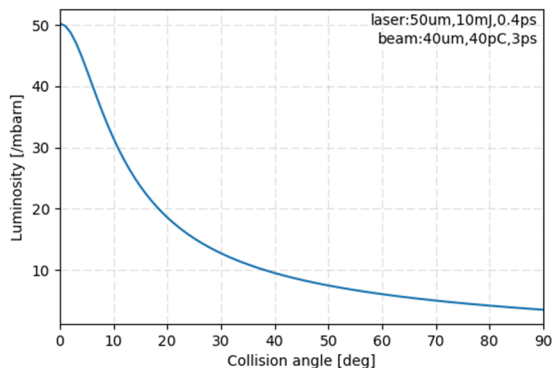


Figure 3: Luminosity dependence on collision angle.

Figure 3 からわかる通り衝突角が 0 度の正面衝突が理想であり、角度がつくにつれルミノシティを損してしまう。しかしながら実用的な光源とするために衝突用レーザーとして光蓄積外部共振器を用いる場合、共振器ミラーと電子ビームの干渉を避けるため有限交差角衝突を余儀なくされる。Figure 4 に KEK-ATF 内にある LUCX[3] の衝突点の写真を示す。LUCX では 7.5 度の衝突角を持つ。

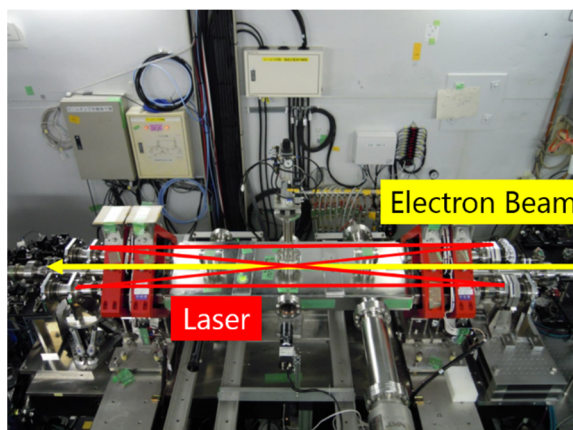


Figure 4: Collision point in LUCX.

このルミノシティ損失を補正する方法として本研究ではレーザーコンプトン散乱にクラブ衝突を導入する。クラブ衝突のイメージ図を Fig. 5 に示す。

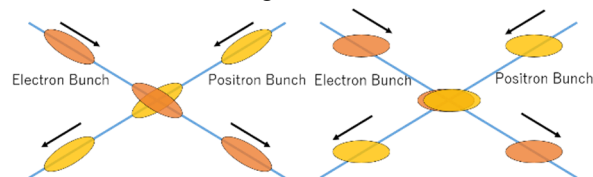


Figure 5: Schema of crab crossing.

クラブ衝突はコライダー実験において既に実績のある衝突方式であり、Fig. 5 のように両ビームに傾きを与えつつ衝突させることでルミノシティを高め、素粒子反応の頻度を上げることができる。レーザーコンプトン散乱においてはレーザーパルスを傾けることは容易ではないため、RF-Deflector によって電子ビームのみを傾けることを計画している。Figure 6 にクラブ衝突レーザーコンプトン散乱の概要を示す。

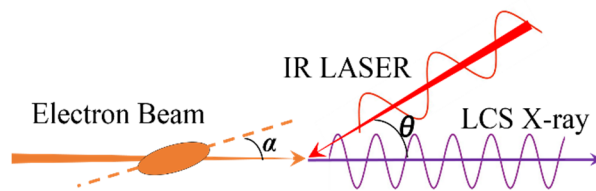


Figure 6: Schema of crab crossing LCS.

電子ビームの傾き角は RF-Deflector によって制御が可能であり、我々のシステムでは最大 80 度まで傾けることが可能である。傾き角を衝突角の半分には制御してやれば最もルミノシティを高められることがわかっており、そのときの増大率であるクラブ比は

$$G = \sqrt{\frac{(\sigma_x^2 + \sigma_x'^2) \cos^2 \frac{\theta}{2} + (\sigma_z^2 + \sigma_z'^2) \sin^2 \frac{\theta}{2}}{\sigma_x^2 + \sigma_x'^2 \cos^2 \frac{\theta}{2} + \sigma_z^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}}} \quad (3)$$

と書ける[4]。ここでプライムなしは電子ビームのサイズを表し、プライム付きはレーザーのサイズを表す。添字の x は横方向、z は縦方向を表す。Table 1 のパラメータを基に式(3)を視覚化すると Fig. 7 のようになる。

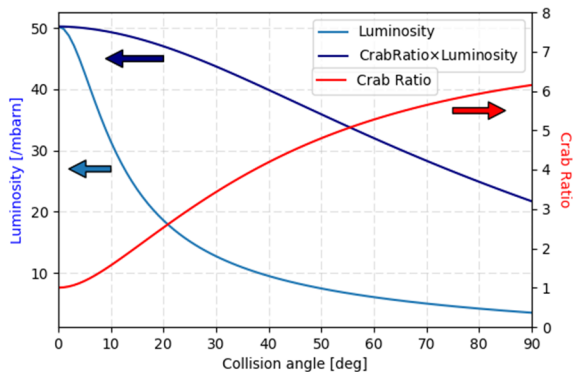


Figure 7: Crab ratio as a function of colliding angle.

赤線がクラブ衝突による増大率を表しており、衝突角が大きいきほクラブ衝突の効果が見取れる。我々が実証実験として予定している 45 度衝突のときには、クラブ衝突をすることによって 4 倍以上のルミノシティが得られることがわかる。青線を比較するとクラブ衝突によってルミノシティ損失が補正されていると表現できる。レーザーのパルス幅を横軸にとり、式(3)を見てみると Fig. 8 のようになる。

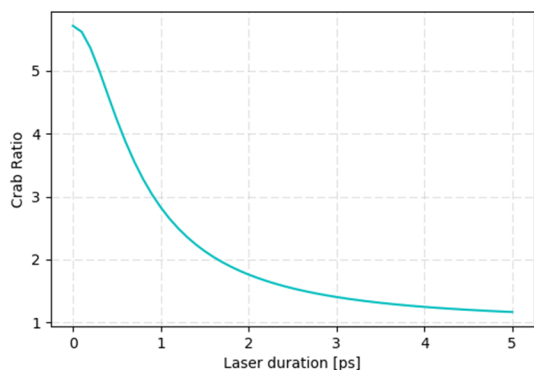


Figure 8: Crab ratio as a function of laser duration.

Figure 8 から衝突用レーザーはパルス時間幅の短いものが望ましいことがわかる。特にフェムト秒パルスではクラブ衝突の恩恵が大きい。そのため衝突用レーザーとしては Yb ファイバー発振器、ファイバーアンプ、パルスストレッチャー、Yb:YAG thin-disk 再生増幅器、パルスコンプレッサーからなるレーザーシステムを構築している。衝突用レーザーシステムの詳細については本年会の太田氏の報告があるので参照してもらいたい[5]。

3. 散乱光子数の見積もり

モンテカルロコード CAIN によって散乱光子数を見積もった。Figure 9 に計算結果を示す。

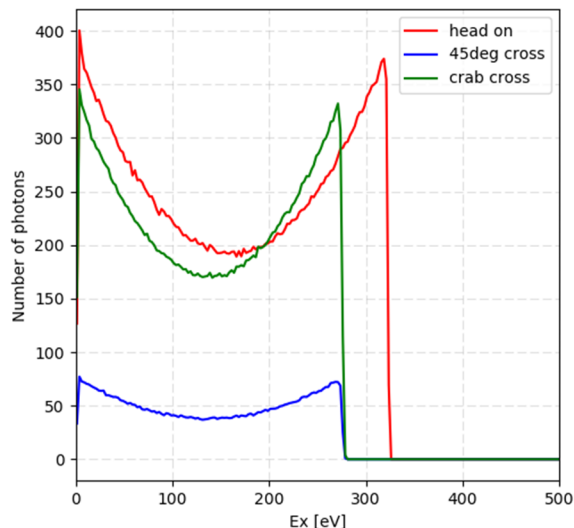


Figure 9: Calculated spectra by CAIN.

赤線が理想的な正面衝突、青線が通常の 45 度衝突、緑線が 45 度衝突にクラブ衝突を採用したときのスペクトルである。クラブ衝突によって明らかに散乱光子数が増えていることがわかる。散乱光子数の値を Table 2 に示す。

Table 2: Calculated Number of Scattered Photon

衝突条件	散乱光子数
正面衝突	32900
衝突角 45 度	5573
衝突角 45 度+クラブ衝突	24940

クラブ衝突なしでは正面衝突時の 17%しかなかった散乱光子数が、クラブ衝突することで 76%にまで補正される。またクラブ衝突によって最大散乱光子エネルギーであるコンプトンエッジが変化しないことも見て取れる。

4. セットアップ

想定しているセットアップを Fig. 10 に示す。

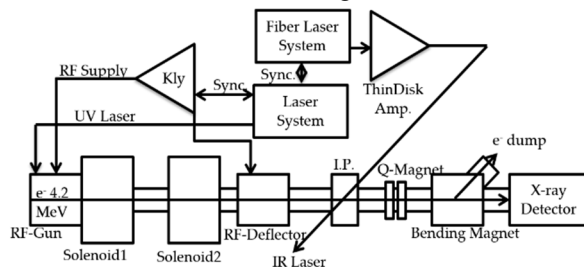


Figure 10: Experimental setup.

CsTe をフォトカソードとする常伝導の RF 電子銃によって 4.2MeV、4ps の電子バンチを生成し、ルミノシティを高めるためにソレノイド電磁石によって収束する。RF-Deflector によって傾きを与え、45 度方向から衝突用レーザーをガイドする。衝突後の電子ビームはバックグラウンドを抑制するために四重極電磁石で発散を抑えながら

偏向電磁石によって散乱 X 線と分け、散乱 X 線は MCP によって検出する。既にクラブ衝突 LCS のための電子ビームは供給できる状態なので、電子ビームのみを輸送したときのバックグラウンドが充分小さいことを確認している。

5. まとめと今後

LCS にクラブ衝突を導入することで、有限交差角衝突時のルミノシティ損失を補正することを考えている。我々のシステムでは衝突角が 45 度の時に、4 倍以上のルミノシティ増大を見込んでおり、正面衝突時との比較で 17% から 76%まで補正できる見通しである。現在衝突用レーザーシステムを構築中であり、特に thin-disk 再生増幅器の試験を進めている。今年中にレーザーシステムを完成させる予定であり、その後タイミング同期を最適化しクラブ衝突 LCS の原理実証を行う計画である。

参考文献

- [1] G. Shen and Y. Wang, “High-pressure Apparatus Integrated with Synchrotron Radiation”, *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, Vol. 78, pp. 745-777, 2014.
- [2] E. J. Jaeschke, S. Khan, J. R. Schneider, and J. B. Hastings, “*Synchrotron Light Sources and Free-Electron Lasers*”, Switzerland: Springer International Publishing, 2016.
- [3] K. Sakaue *et al.*, “LASER-COMPTON SCATTERING X-RAY SOURCE BASED ON NORMAL CONDUCTING LINAC AND OPTICAL ENHANCEMENT CAVITY”, in *Proc. IPAC'15*, Richmond, Virginia, USA, Aug. 2015, paper TUPJE011, pp. 1635-1637.
- [4] A. Variola *et al.*, “Luminosity optimization schemes in Compton experiments based on Fabry-Perot optical resonators”, *Phys. Rev. ST Accel. Beams*, vol. 14, p. 031001, 2011.
- [5] S. Ota *et al.*, “Development of laser system for crab crossing laser Compton scattering”, *proc. of this conference*, 2017.