

レーザーコンプトン散乱のクラブ衝突化

INTRODUCING CRAB CROSSING TO LASER-COMPTON SCATTERING

小柴裕也^{#,A)}, 太田昇吾^{A)}, 森田遼介^{A)}, 坂上和之^{A)}, 鷲尾方一^{A)}, 東口武史^{B)}, 浦川順治^{C)}

Yuya Koshiba^{#,A)}, Shogo Ota^{A)}, Ryosuke Morita^{A)}, Kazuyuki Sakaue^{A)}, Masakazu Washio^{A)},

Takeshi Higashiguchi^{B)}, Junji Urakawa^{C)}

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

^{B)} Utsunomiya University

^{C)} KEK

Abstract

Laser-Compton Scattering (LCS) has been expected as a compact and powerful X-ray source. Optical enhancement cavity is essential for a powerful source. In order to bring close to head-on collision, which is advantageous for producing intense X-ray, we are going to demonstrate crab crossing of laser photons and electrons. Requirements for the electron beam and laser are studied in this research. The preparation for crab crossing LCS experiment is reported in this paper.

1. はじめに

現在実験室サイズの X 線源としては X 線管が最も一般的であり、より高輝度な X 線利用のためには SPring-8 に代表されるような大型放射光施設に向く必要がある。このような背景から小型高輝度 X 線源が求められている。その候補として原子準位レーザー、高次高調波発生 (HHG)、レーザー生成プラズマ (LPP) などがある。加速器からの電子ビームを用いたものとしてはレーザーコンプトン散乱 (LCS) が期待されている。レーザーコンプトン散乱ではレーザー光子が高エネルギー電子によって散乱された結果、X 線および γ 線領域の光子ビームを得ることが可能である。レーザーコンプトン散乱の概念図を Fig. 1 に示す。

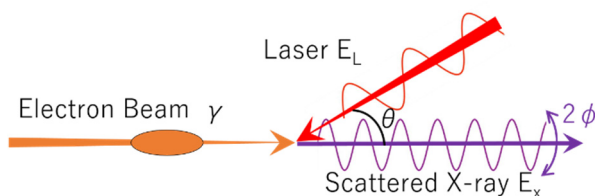


Figure 1: Schema of laser-Compton scattering.

散乱光は電子ビーム軸上において得られ、 $1/\gamma$ の広がりを持つ。軸上の散乱光をコリメートすることにより準単色 (0.1% ~ 数%) な X 線光源とすることができる。散乱 X 線のエネルギーは次式で表せる。

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

γ は電子ビームのエネルギーに相当するローレンツ因子であり、 β は光速との比である。この式からレーザー光子が最大 $4\gamma^2$ 倍 ($\theta = 0$ の時) に散乱されることがわかる。1eV の近赤外光が散乱される場合を考えると、25MeV (γ が約 50) の電子ビームを用いて 10keV の硬 X 線が得られることになる。また Eq. (1)からは電子ビームの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。その他にもレーザーの偏光が踏襲されることや微小光源性といった利点を有する。レーザーコンプ

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

トン散乱過程はあたかもレーザーがアンジュレーターのように振る舞うと理解できることから、”optical undulator”とも表現される。Figure 2 に永久磁石のアンジュレーターとの対比を示す。

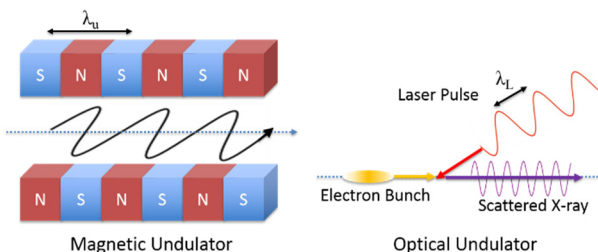


Figure 2: Comparison of undulator radiation and LCS.

2. クラブ衝突によるルミノシティ増大

レーザーコンプトン散乱で得られる散乱光の強度はルミノシティと呼ばれるパラメータで決定される。一度の衝突におけるルミノシティを高めるためには、衝突点における電子、光子、双方の密度を高めることが重要となるが、衝突角も大きく影響する。Figure 3 にルミノシティの、衝突角に対する依存性を示す。

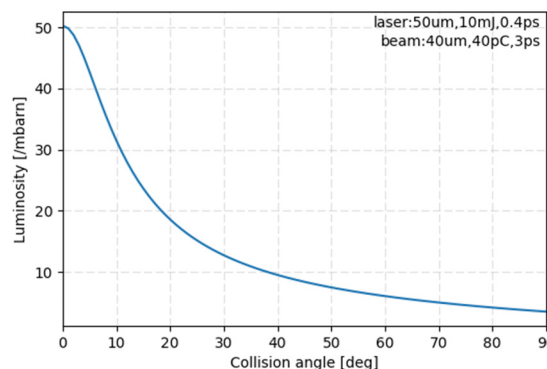


Figure 3: Luminosity dependence on collision angle.

この計算においては Table 1 のパラメータを使用しているが、正面衝突の場合にルミノシティが最大値をとり、

衝突角とともに急激に低下するという様相は共通である。

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 μm	50 μm
Duration	3 ps(rms)	0.43 ps(rms)

よって LCS ではなるべく正面衝突に近い角度で行うことが望ましい。「正面衝突に近い角度」と表現したのは、正面衝突が理想的ではあるが現実的には困難を伴うからである。電子ビーム、レーザー、双方の高輝度化が必要と上述したが、レーザーの高輝度化のためには光蓄積共振器が使われる[1]。特に LCS では電子ビームを高輝度化するとバックグラウンドノイズも増えてしまうので、レーザーを高輝度化することが重要である。Figure 4 に最も単純な、ミラー2枚で構成される光蓄積共振器を用いた LCS の概念図を示す。

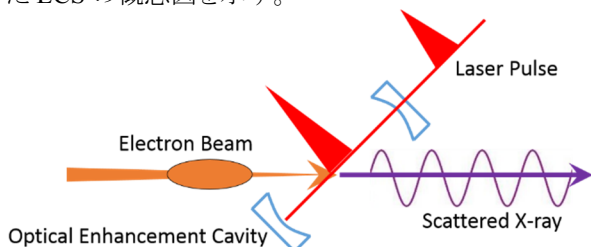


Figure 4: LCS with optical enhancement cavity.

Figure 4 を見ればわかるように電子ビームとレーザーを正面衝突させようとすると共振器ミラーが邪魔になってしまう。小型の円形加速器を用いて正面衝突を実現している例もあるが[2]、この場合散乱光は共振器ミラーを透過しなければならない。その結果散乱光のプロファイルが乱れる、ミラーに悪影響を及ぼす、などといったことが懸念される[3]。そこで本研究ではクラブ衝突と呼ばれるスキームを試みる。クラブ衝突のイメージ図を Fig. 5 に示す。

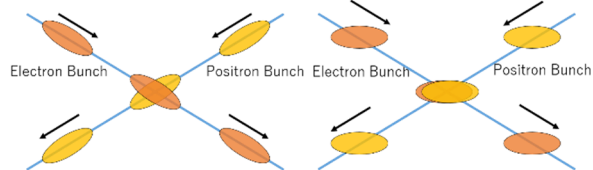


Figure 5: Schema of crab crossing.

クラブ衝突はコライダーで培われた技術のため、図では電子と陽電子バンチの衝突を描いている。クラブ衝突させることで衝突角に開きがあっても、衝突点において擬似的な正面衝突が再現できることから、ルミノシティ損失を最小限に留めることが可能である。本研究では電子ビームとレーザーの衝突のため、電子ビームのみを rf-deflector (高周波偏向空洞) によって傾ける。レーザーパルスを傾けることができれば、より正面衝突に近付くが、強度が落ちてしまうことや将来的に光蓄積共振器内での衝突を視野に入れると現実的ではないと考える。クラブ衝突 LCS の概念図を Fig. 6 に示す。

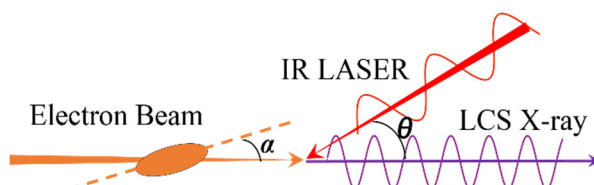


Figure 6: Schema of crab crossing LCS.

電子ビームの傾き角が衝突角の半分の時にルミノシティが最大になることが予想される[4]。その時の利得、すなわちクラブ衝突しない時とした時の比率は次式で表される。

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

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 の数値を用いて計算したものを Fig. 7 に示す。図中の「Crab Ratio」が利得に相当する。

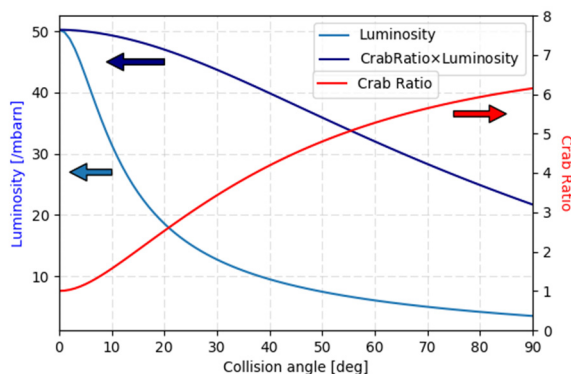


Figure 7: Crab ratio as a function of collision angle.

45 度衝突では 4 倍以上のルミノシティ増大を見込むことができる。クラブ衝突による利得を大きくするためにはレーザーのパルス幅が特に重要になってくる。本研究のためのレーザーシステムについては次節にて詳しく述べる。Fig. 8 に散乱光子数の計算結果を載せる。

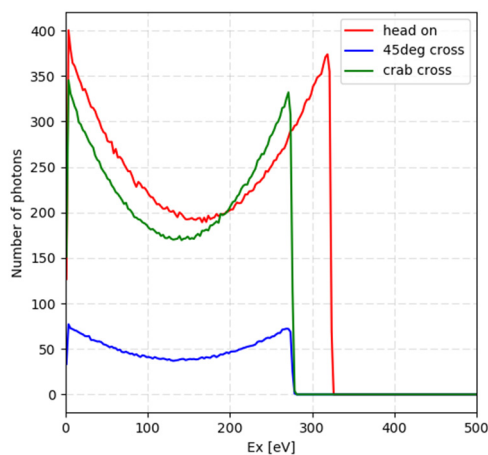


Figure 8: Number of scattered photons.

クラブ衝突を行うことで理想的な正面衝突に近い光子数

を得られていることがわかる。

3. 衝突用レーザーシステム

上述したようにクラブ衝突 LCS では特に短パルス性が求められる。45 度衝突時のパルス幅と利得の関係を Fig. 9 に示す。

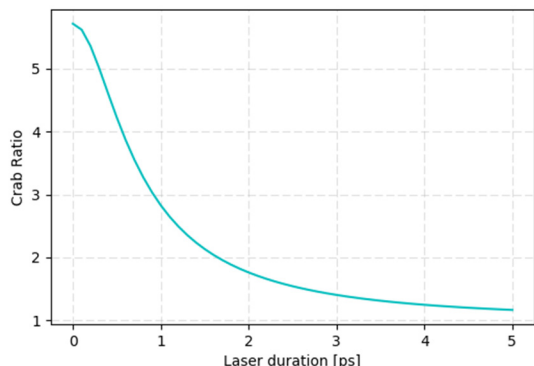


Figure 9: Pulse duration and enhancement ratio.

またルミノシティはレーザーのパルスエネルギーに比例するので、本研究で求められるのは高強度短パルスなレーザーパルスである。そのためのレーザーシステムとして Yb:YAG Thin-disk 再生増幅器を構築した。まずレーザーシステムの全景をブロック図で Fig. 10 に示す。

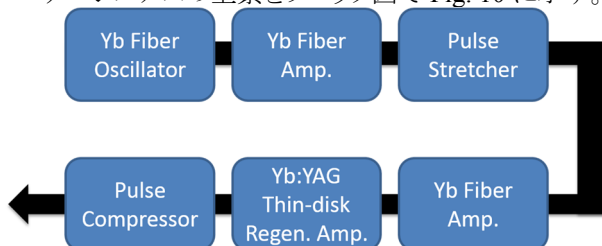


Figure 10: Schematic of laser system.

チャープパルス増幅 (CPA) を利用したシステムとなっている。発振器は Yb ファイバーを利得媒質とするモードロックファイバーレーザー (中心波長 1030nm) である。ストレッチャーやプリアンプを経て、メインアンプとして Thin-disk 再生増幅器を用いている。Thin-disk 媒質はその形状から熱消散性に優れているため、従来のロッド媒質に比べ優れた品質のビームを生成可能にする。Figure 11 に再生増幅部の光学系を示す。

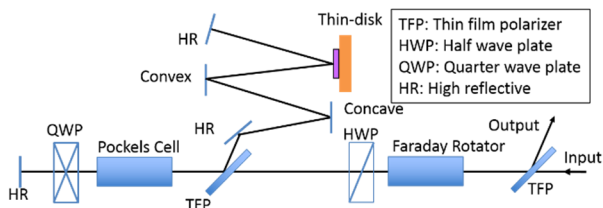


Figure 11: Schema of regenerative amplifier.

ポッケルスセルに $\lambda/4$ 電圧 (我々の場合 3.3kV) をかけている間は S 偏光が保たれるため、共振器に取り込まれ続け、パルスが成長する。タイミングの制御にはデジタル遅延パルス発生器 DG645 を用いている。再生増幅器の設計は ReZonator というソフトウェアを使用した。詳細は本年会の森田氏の報告を参照されたい[5]。以下では再生

増幅器の構築手順を以下に記す。

まずポッケルスセルがない状態で発振確認を行う。共振器ミラーの配置が適切であれば、Disk を励起して発振が確認できるはずである。この状態で Output パワーが最大になるようにミラーの傾り、配置等を調整する。またこの時の光-光変換効率が一つの目安になる。我々の場合 12%以上を確認している。ポッケルスセルを挿入し、同じことを行う。ポッケルスセルのアライメントではレンズクリーナーと PBS を用いて十字架模様 (我々はクロスパターンと呼んでいる) の確認が役にたつ。実際、Output 光が強くと、共振器状態が良い時には綺麗なクロスパターンが見えることを確認している。ポッケルスセルを挿入した状態で 10%の効率を確認できている。このことから、例えば、100mJ でパルス励起した場合、最大で 10mJ のエネルギーを引き出せる、といった目算ができるようになる。再生増幅器における計算は Frantz-Nodvik の式が知られている[6]。ただしこの計算は種々の効率を代入する必要があり、正しく予測することは難しいため、オーダーを見繕う程度の参考にしてている。計算結果の一例を Fig. 12 に示す。

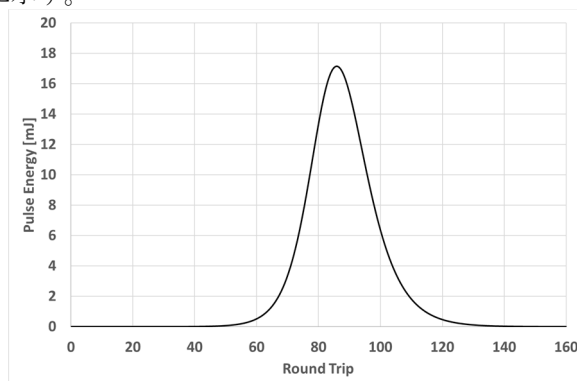


Figure 12: Calculation of pulse build-up.

実験では 92 回の往復で 13mJ という値を得ている。パルスビルドアップの一例を Fig. 13 に示す。

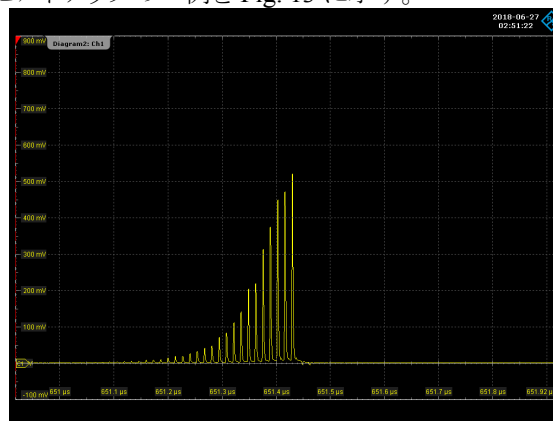


Figure 13: Pulse build-up in regen amplifier.

4. まとめ

クラブ衝突 LCS の実証実験を行うにあたり、Thin-disk 再生増幅器を中核とするレーザーシステムを構築してきた。改善を経て目標であった 10mJ のパルスエネルギーの実現に至っている。本年会の終了後にはいよいよ加速器と組み合わせて X 線生成を行い、最適な傾き角や

レーザーパルス幅の影響を明らかにし、クラブ衝突の原理実証を行なう予定である。

謝辞

This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JP17J04371.

参考文献

- [1] 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.
- [2] E. Ettl *et al.*, "The Munich compact light source: initial performance measures" *Journal of synchrotron radiation*, vol. 23, p. 1137-1142, 2016.
- [3] Y. Hwang *et al.*, "ELECTRON BEAM DIAGNOSIS USING K-EDGE ABSORPTION OF LASER-COMPTON PHOTONS", in *Proc. IPAC'17*, Copenhagen, Denmark, May. 2017, paper MOPAB146, pp. 473-476.
- [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] R. Morita *et al.*, "DEVELOPMENT OF YB-BASED LASER SYSTEM FOR CRAB CROSSING LASER-COMPTON SCATTERING", Nagaoka, Japan, Aug 2018, paper THP109, this conference.
- [6] W. Koechner, "Solid-State Laser Engineering" *Springer*, 6th revised and updated ed., p. 156-188, 2006.