

X-RAY GENERATION BASED ON LASER COMPTON SCATTERING BY LASER-ACCELERATED ELECTRON BEAM

Kenji Tanaka^{#,2)}, Satoshi Ishii²⁾, Ryunosuke Kuroda¹⁾, Hiroyuki Toyokawa¹⁾, Eisuke Miura¹⁾

¹⁾ National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

1-1-1 Umezono, Tsukuba, Ibaraki, 305-8568

²⁾ Tokyo University of Science

2641 Yamazaki, Noda, Chiba, 275-8510

Abstract

X-ray generation based on laser Compton scattering using a laser-accelerated quasi-monoenergetic electron beam with a narrow energy spread is reported. X-rays are produced by the collision of a femtosecond laser pulse (800 nm, 140 mJ, 100 fs) with a quasi-monoenergetic electron beam containing 30 pC in the monoenergetic peak with an energy of 50 MeV produced by focusing an intense laser pulse (700mJ, 40 fs) on a helium gas jet. A well-collimated X-ray beam with a divergence angle of 7 mrad is obtained. The maximum photon energy and the yield of the X-ray beam are estimated to be 60 keV and 2×10^7 photons/pulse.

1. はじめに

高強度レーザーパルスとプラズマの相互作用を利用した電子加速であるレーザー電子加速では、電子の粗密波であるプラズマ波の作り出す電場によって電子を加速する^[1]。プラズマ波の作り出す電場は 100 GV/m に達し、この電場は現在の高周波加速器の加速電場の 1000 倍にも相当する。高い加速電場を利用して電子加速器の小型化が可能である。また、レーザー加速では、加速電場を作り出すプラズマ波の波長が 10 μm 程度であるので、パルス幅がフェムト秒の超短電子線パルスを発生することも出来る。このようなレーザー加速の利点、特徴を生かして、小型の超短パルス X 線源を実現できる。現在、レーザー加速電子線を用いた超短パルス X 線源の開発が進められている^[2,3,4,5]。

フェムト秒 X 線パルスを発生する手法の一つが、高エネルギー電子線とフェムト秒レーザーの相互作用によるレーザーコンプトン散乱である。これまでも、高周波加速器からの電子線パルスを用いたレーザーコンプトン散乱によるフェムト秒 X 線パルス発生の研究が進められてきた^[6,7]。レーザーコンプトン散乱では、発生する X 線のパルス幅は、電子線パルスとレーザーパルスの相互作用時間で決まる。高周波加速器からのピコ秒電子線を用いてフェムト秒 X 線パルスを発生するには、電子線パルスとレーザーパルスの相互作用時間を短くするため、電子線とレーザーを直交して相互作用させる 90 度散乱の配置を取る必要がある。90 度散乱の場合、レーザーパルスは電子線パルスの一部の電子としか相互作用できないので、高い X 線収量を得ることは難しい。

レーザー加速で得られるフェムト秒電子線パルスを用いれば、電子線パルスとレーザーパルスの正面衝突の 180 度散乱の配置を取ることが出来る。理想的には、レーザーパルスは電子線パルスの全ての電子と相互作用でき、X 線収量を 90 度散乱に比べて

飛躍的に高くできる。また、電子線のエネルギー、レーザーの波長が同じ場合でも、発生光子のエネルギーを高くすることが出来、X 線の高エネルギー化においても有利である。

既に、レーザー加速電子線を用いたレーザーコンプトン散乱 X 線発生が報告されている^[3]。しかし、発生 X 線のエネルギーは 1 keV 程度、X 線収量も 10^4 photons/pulse 程度にとどまっている。エネルギー分布がマックスウェル状分布している電子線を用いているためである。エネルギーが揃っており、電荷量が高く、発散角が小さな準単色電子線を用いれば、より高エネルギーで、より高い収量の X 線パルスを発生することが可能である。

我々は、レーザー加速による準単色電子線発生に成功し^[8]、その電荷量の増強、発生の安定化に成功している^[9, 10, 11]。本稿では、レーザー加速で得られる準単色電子線を用いた、レーザーコンプトン散乱 X 線発生について報告する。

2. 実験条件

図 1 に実験配置図を示す。波長 800 nm, エネルギー 700 mJ, パルス幅 40 fs の高強度レーザーパルスを集光距離 720 nm の軸外し放物面鏡を用いてヘリウムガスジェットに集光照射し、レーザー加速によって電子線を発生する。この電子線発生に用いるレーザーパルスを以下では、メインパルスと呼ぶ。このメインパルスの集光径は半値全幅で 13 μm 、集光強度は 4.7×10^{18} W/cm² であった。ガスジェットは、直径 1.6 mm の円形開口の超音速ノズルから噴出される。ノズル開口の 1 mm 上にメインパルスを集光した。

レーザーコンプトン散乱を起こす波長 800 nm, エネルギー 140 mJ, パルス幅 100 fs の高強度レーザーパルス (以下では、コライディングパルスと呼ぶ)

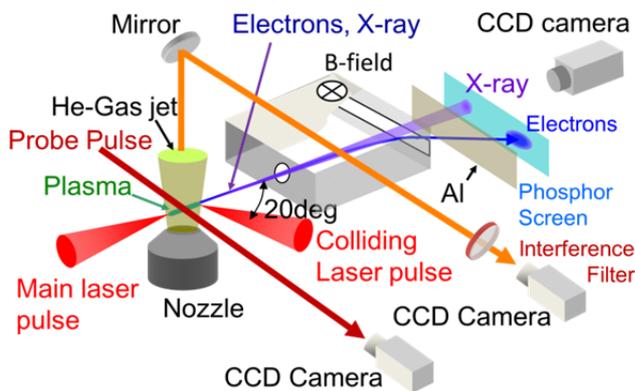


図 1: 実験配置

を、焦点距離 300 mm の軸外し放物面鏡を用いて、メインパルスのガスジェットからの出口付近に集光した。コライディングパルスの集光径は半値全幅で $9 \mu\text{m}$ であった。メインパルス伝搬方向に対するコライディングパルスの入射角度は 20° であった。

レーザーコンプトン散乱で発生する X 線は電子線と同軸に放射される。電子線を磁場 (磁場強度 0.27 T) で曲げて空間的に分離し、 $115 \mu\text{m}$ のアルミニウムフィルタを通して蛍光板 (三菱化学 DRZ-HIGH) に電子線と X 線を同時に入射し、その蛍光像を CCD カメラで観測した。エネルギー分解された電子像と X 線像を同時にシングルショットで観測することが出来る。35 MeV 以上のエネルギーを持つ電子を観測することができ、また本検出系の感度は調べられているので^[12]、電荷量を見積もることができる。詳細は後で示すが、検出される X 線のエネルギー範囲は 10 keV 以上である。

レーザー加速電子線とフェムト秒レーザーパルスの同期衝突を行うために、波長 800 nm、パルス幅 60 fs のプローブレーザーパルスをメインパルスの伝搬方向の 90 度方向から入射して、時間分解シャドウグラフ像を観測した。また、ガスジェット上方から波長 800 nm の干渉フィルタを通して、トムソン散乱光像を観測した。

3. 準単色電子線の特性

X 線発生に先立って、準単色電子線の特性とその発生条件を調べた。この時には、磁場強度 0.72 T を持つ電子エネルギー spektrometer を用いた。図 2 に、メインパルスのエネルギー 700 mJ、プラズマの電子密度が $1.7 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ の際に得られた、(a)準単色電子線のエネルギー分解された電子像、(b)エネルギー spektrometer を示す。図 2(a)に見られるスポット状の電子像は、指向性の高い、エネルギーの揃った準単色電子線の発生を示している。ピークエネルギー 59 MeV、単色ピーク内の電荷量 86 pC の準単色電子線が得られた。また、ビーム発散角は 10 mrad 程度であった。

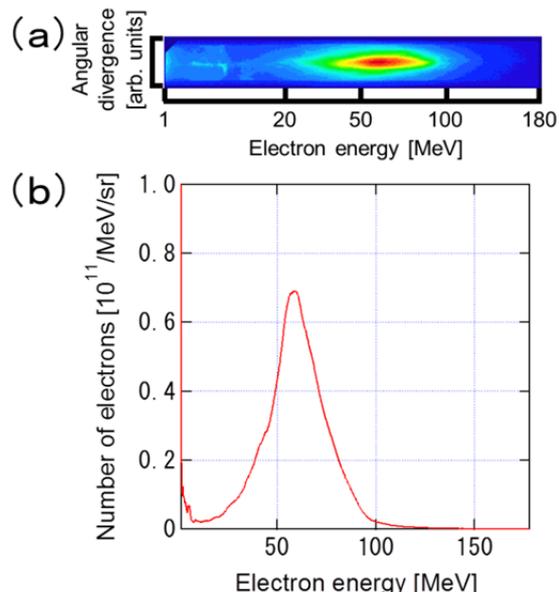


図 2: 準単色電子線の(a)エネルギー分解された電子像、(b)エネルギー spektrometer

また、準単色電子線発生時の安定性を調べた。ピークエネルギー、電荷量のバラつきはやや大きいものの、ピークエネルギーが 50~100 MeV、単色ピークの電荷量が数 10 pC の準単色電子線が 90%程度の頻度で得られることも確認している。

4. レーザー加速電子線とフェムト秒レーザーパルスの同期衝突

レーザー加速では、電子線パルスはメインパルスと同軸に放射され、また時間的にもメインパルスに同期している。レーザー加速電子線とコライディングパルスの同期衝突を実現することは、メインパルスとコライディングパルスの同期衝突を実現することと等価である。以下の方法を用いて、メインパルスとコライディングパルスの同期衝突を実現した。

図 3 にメインパルスに対するプローブパルスの遅延時間を変化させて観測したシャドウグラフ像を示す。メインパルスに対するプローブパルスの遅延時間は各々、(a)-1.33 ps、(b)-0.67 ps、(c)-0 ps である。図 3 において、メインパルスは右から左に、コライディングパルスは左から右に伝搬している。プローブパルスの遅延時間を変化させると、矢印で示した各々のイオン化フロント、つまりレーザーパルスの先頭が接近している様子が観測されている。図 3(c)では、両パルスの先頭が重なり、同期衝突していることがわかる。このシャドウグラフ像を用いて、コライディングパルスの光路長、上下方向の焦点位置の調整を行った。

水平面上での衝突位置の調整には、図 4 に示すト

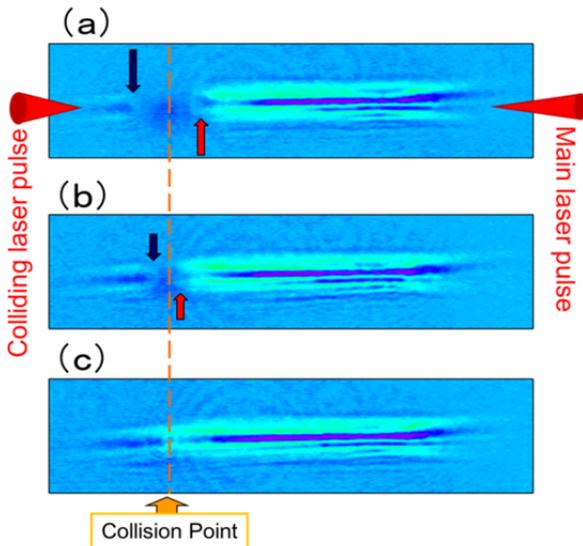


図3: プローブパルスの遅延時間を変化させて観測されたシャドウグラフ像。遅延時間は各々、(a)-1.33 ps、(b)-0.67 ps、(c)-0 ps。

トムソン散乱光像を用いた。図4において破線はノズル開口位置を示している。図4において、メインパルスは上から下に伝搬し、コライディングパルスは右下から左上に伝搬している。両パルスの同期衝突が起こった時に、矢印で示したような特異的に明るい発光が観測されている。この発光点が、両パルスの衝突点と考えることができる。このトムソン散乱光像を用いて、電子線がプラズマから放出される位置であるガスジェット端近傍に、両パルスの衝突点位置を調整した。

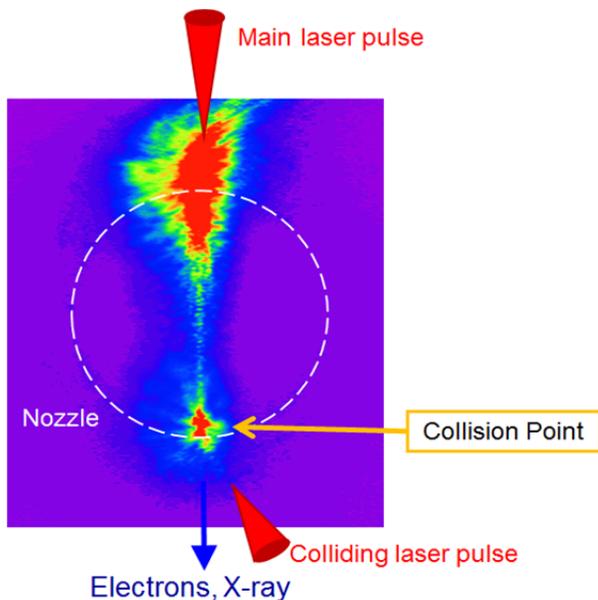


図4: メインパルスとコライディングパルスの同期衝突が実現された際に観測されたトムソン散乱光像

5. X線発生

図5に、X線が発生した時に観測された(a)蛍光像と、(b)強度分布を示す。図5(a)に示した蛍光像は1ショットで観測されている。図5(a)において、左に観測されているのがエネルギー分解された電子像であり、メインパルスの光軸付近に観測されているスポット状の像がX線像である。

エネルギー分解された電子像の信号は飽和しているが、発生した準単色電子線のピークエネルギーは50 MeV程度、単色ピーク内の電荷量は30 pC以上と見積もられた。

X線像のサイズから、水平方向、垂直方向のビーム発散角(半値全幅)は、各々7 mrad、5 mradと見積もられた。レーザーコンプトン散乱で得られるX線ビームは指向性を持ち、おおよその発散角は、 $\sim 1/\gamma$ で与えられる。ここで、 γ は電子エネルギーのローレンツ因子である。図5より同時に観測された準単色電子線のピークエネルギーは50 MeV程度、つまり $\gamma \sim 100$ より、X線ビームの発散角は10 mrad程度と予想される。観測されたX線ビームの発散角はこの値に近く、図5に見られるスポット状の像がレーザーコンプトン散乱によって発生したX線像であることを裏付けている。X線の最高エネルギーは、準単色電子線のピークエネルギーとコライディングパルスの波長、衝突角度から60 keV程度と見積もられた。

X線収量は以下のようにして見積もった。文献^[12]に報告したように、本実験で用いたDRZ蛍光板と

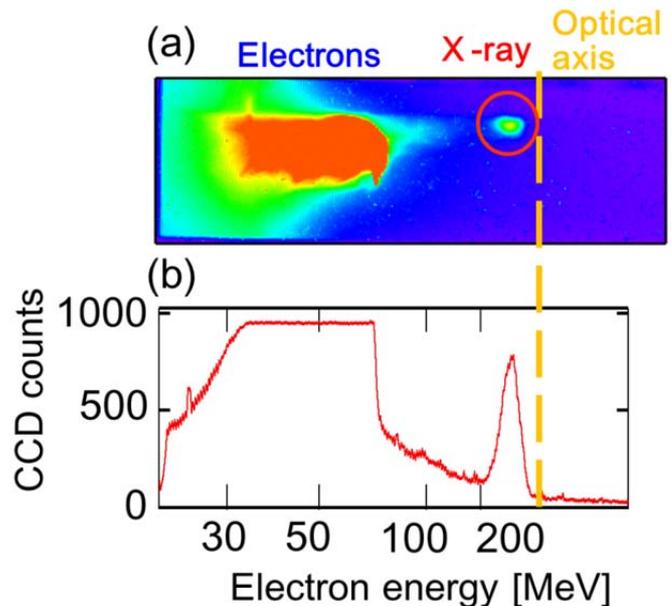


図5: レーザーコンプトン散乱X線が発生した際に観測された(a)蛍光像と、(b)強度分布。メインパルスの光軸付近に高い指向性を持つX線ビームの発生が見られる。

CCD カメラを用いた検出系の電子線に対する感度は調べられており、電子のエネルギーが数 MeV を超える領域では感度が一定であることがわかっている。一方、本実験で用いた DRZ 蛍光板と同じタイプの $Gd_2O_3:S:Tb$ を用いた蛍光板 (Kodak Lanex) では、X 線と電子線に対する内部効率 (蛍光層への蓄積エネルギーから可視光への変換効率) が同程度であることが調べられている^[13]。DRZ 蛍光板の $Gd_2O_3:S:Tb$ を含む蛍光層への電子線、X 線の各々の蓄積エネルギーがわかれば、本実験で用いた検出系の X 線に対する感度を推定することができる。電磁カスケードモンテカルロ計算コード EGS5^[14]を用いて、DRZ 蛍光板における電子線、X 線に対する蛍光層の蓄積エネルギーを計算した。その結果を図 6 に示す。図 6 の計算では、実験と同様前面にアルミニウムフィルタ (115 μm) があるとして計算している。図 6 において実線は X 線、破線は電子に対する蓄積エネルギーを示す。60 keV 近傍の X 線に対する蓄積エネルギーは、50 MeV 近傍の電子に対する蓄積エネルギーの 1/10 程度であることがわかった。このことから検出系の X 線に対する感度が、電子線に対する感度の 1/10 程度と考えられる。これらを基にして、X 線光子数は 2×10^7 photons/pulse と見積もられた。

図 6 の結果は、本検出系は数 10 keV 近傍の X 線に対して感度が高いことを示しており、図 5 に示した X 線像が光子エネルギー数 10 keV 近傍のものであることも裏付けている。

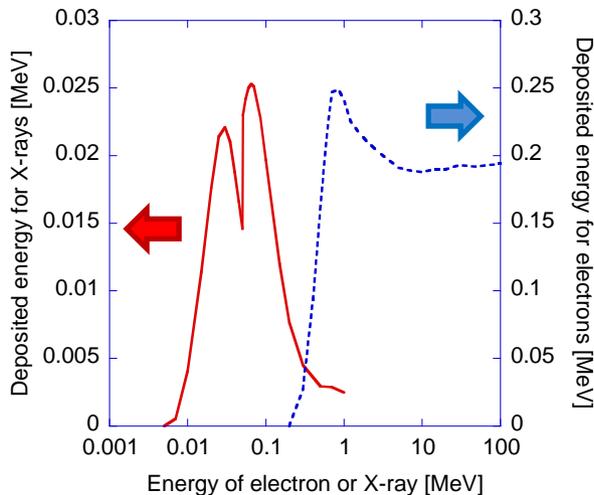


図 6: EGS5 を用いて計算した DRZ 蛍光板の蛍光層へのエネルギー蓄積量のエネルギー依存性 (実線: X 線、破線: 電子)

6 まとめ

レーザー加速準単色電子線を用いたレーザーコンプトン散乱による X 線発生を、電子線と X 線の同時計測により実証した。ピークエネルギー 50 MeV、

電荷量 30 pC の準単色電子線を用いて、発散角 7 mrad 程度の指向性の高い X 線ビームが得られた。この X 線の最高エネルギーは 60 keV 程度、X 線収量は 2×10^7 photons/pulse と見積もられた。

参考文献

- [1] T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett., **43** 267 (1979).
- [2] A. Rousse et al., Phys. Rev. Lett., **93** 135005 (2004).
- [3] H. Schworer et al., Phys. Rev. Lett., **96** 014802 (2006).
- [4] H. P. Schlenvoigt et al., Nature Phys., **4** 130 (2008).
- [5] M. Fuchs et al., Nature Phys., **5** 826 (2009)
- [6] R. W. Schoenlein et al., Science, **274** 236(1996)
- [7] M. Yoroazu et al., Appl. Phys. B, **74**, 327(2002)
- [8] E. Miura et al., Appl. Phys. Lett., **86** 251501 (2005).
- [9] S. Masuda and E. Miura, Appl. Phys. Express, **1** 086002 (2008).
- [10] S. Masuda and E. Miura, Phys. Plasmas, **16** 093105 (2009).
- [11] E. Miura and S. Masuda, Appl. Phys. Express, **2** 126003 (2009).
- [12] S. Masuda et al., Rev. Sci. Instrum., **79** 083301 (2008).
- [13] Y. Glinec et al., Rev. Sci Instrum., **77** 103301 (2006).
- [14] <http://rcwww.kek.jp/research/egs/egs5.html>.