

逆コンプトン散乱による高輝度軟X線発生

上山 大輔^{1,A)}、丑田 公規^{D)}、浦川 順治^{B)}、柏木 茂^{C)}、黒田 隆之助^{A)}
長澤 章雄^{A)}、濱 義昌^{A)}、早野 仁司^{B)}、樋爪 健太郎^{A)}、鷲尾 方一^{A)}

A) 早稲田大学理工学総合研究センター

〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1

B) 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0081 茨城県つくば市大穂1-1

C) 大阪大学産業科学研究所量子ビーム発生科学研究分野

〒567-0047 大阪府美穂ヶ丘8-1

D) 理化学研究所

〒351-0198 埼玉県和光市広沢2-1

概要

早稲田大学理工学総合研究センターでは現在、フォトカソードRF-gunシステムを用いたテーブルトップサイズの高輝度軟X線発生装置の開発を行っている。これは生体観測用の軟X線顕微鏡への応用を目指すものであり、波長1047nm、パルス幅約10ps(FWHM)のIRレーザーとエネルギー約4MeV、パルス長約10ps(FWHM)の電子ビームとを衝突させることで、約200~450eVの軟X線を発生させることができる。今回はレーザーの増幅、衝突のタイミング測定を行った後実際に衝突実験を行った。本研究会では、それらの結果について報告する。

1. はじめに

現在高輝度短パルスX線は物理、化学のみならず医療、産業等様々な分野で求められている。その発生方法についても多くの研究が行われており、中でも逆コンプトン散乱によるX線発生方法は、高輝度、短パルス性、エネルギー可変性などの有用な特徴を兼ね備えたものとして注目されている^{[1], [2], [3]}。この発生方法は今まではレーザーや電子ビームの性能という点で実現が困難であったが近年の電子ビームの高品質化、レーザー制御技術の発展により実現が可能なものとなってきた。現在早稲田大学ではRF-gunシステムを用いたテーブルトップサイズの高輝度軟X線発生装置の構築と生体観測用の軟X線顕微鏡へと応用を目指して研究を進めている。

2. 逆コンプトン散乱

逆コンプトン散乱とは、低エネルギーの光子に高エネルギーの電子が衝突し光子がエネルギーを受け取るためX線となって散乱される現象である(図1)。実験室系での散乱X線のエネルギーは図1より次式で与えられる。

$$E_x = \frac{(1 + \beta \cos \phi) E_e E_l}{\{1 + \beta \cos(\phi + \theta)\} E_e + (1 - \beta \cos \phi) E_l}$$

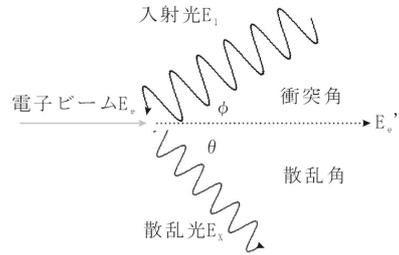


図1. 逆コンプトン散乱概念図

ここで β は電子ビームと光の速度比である。上式からわかるように衝突角 ϕ 、電子ビームエネルギー、レーザー光子のエネルギーを変えることで散乱X線のエネルギーを変化させることが出来る。また、散乱されるX線はエネルギーによって散乱角が異なるため小さな角度だけを切り出せば非常に単色性の良いX線が得られる。図2に、電子ビームのエネルギーが5MeV、レーザー波長1047nmの時の、得られるX線のエネルギーについて、衝突角 0° 、 20° 、 60° 、 90° の各計算結果を示す。

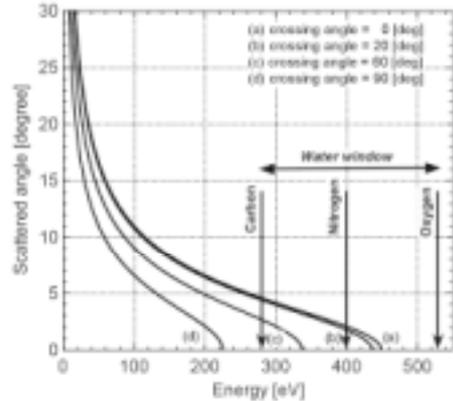


図2. X線のエネルギーの角度依存性(EB5MeV)

今回の実験では実際には電子ビームのエネルギー約4.2MeV、レーザー光の波長1047nmであり、上式を用いて散乱X線の最大エネルギーを計算すると 20° 衝突の場合には約308eVと計算できる。この付

¹ E-mail: uedai@suou.waseda.jp

近のエネルギーは水にはほとんど吸収されない「水の窓」と呼ばれるエネルギー領域である。またこの波長領域には生体内に多く含まれる窒素、炭素、酸素などのK殻吸収端が存在し、この領域のX線を生体に照射し、吸収率の差によるコントラストを取れば試料を脱水することなく細胞が生きた状態で窒素、炭素、酸素などの分布を観察することが出来る。このことは光学・電子顕微鏡にはない特徴である^[4]。

また、発生するX線の光子数はクライン-仁科の公式から求めた実験室での散乱断面積 σ とルミノシティ L から次のように求められる。

$$N = \sigma \times L$$

本X線発生システムで生成される光子数を見積もると、表1のようなパラメータで衝突させた時、およそ 10^3 個のオーダーである。

3. 実験セットアップ

図3に早稲田大学理工総研喜久井町キャンパス第2研究棟地下2階に構築しているX線発生装置の概略図を示す。ビームラインは、RF-gun、エミッタ補正用のソレノイド電磁石、電子ビーム集束用の4極電磁石、エネルギー測定及び散乱X線-電子ビーム分離用の偏向電磁石、ビーム診断装置（ビームポジションモニター、ビームプロファイルモニター、ファラデーカップ）などで構成されている。また、レーザーシステムを同加速器室に、高周波源のクライストロンを別室に設置した。

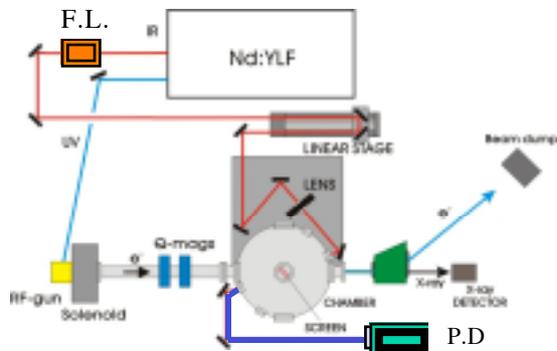


図3. 早稲田大学X線発生システム

本加速器システムは、まず主発振器からの基準信号2856MHzをもとに、クライストロン励起用RF(2856MHz)、レーザー用基準信号(119MHz)、ビーム繰り返し信号(MAX25Hz)などが作り出され、クライストロンなどのRF系やレーザー系へと送られる。RF電子銃については、クライストロンで発生される、ピークパワーが最大10MWの高周波がRF-gun空洞に送られ、それが空洞内に蓄積され高電界を誘起する。一方、レーザー系からは基準RFに同期したピコ秒UV光をRF-gun内部のカソードに照射し光電効果によりパルス的に電子を発生させる。カソードから発生した電子は高電界により高エネルギーに加速され、ソレノイド電磁石によりエミッタ補正を受けながら電子ビームとして取り出される。

本研究のレーザーシステムは全固体ピコ秒Nd:YLF

レーザーシステム（住友重機械工業製PULRIZE V）を用いている。このSeed発振器部、再生増幅部、高調波発生部から構成されている。発振器部では波長2856MHzの基準信号に同期した119MHzで受動モードロック発振させる。これを再生増幅部で増幅し、ポッケルスセルにより最大25Hzで切り出すことが出来る。高調波発生部において、非線形結晶(BBO)を2段用いることにより、4倍高調波(262nm)を発生させ、カソード照射用UV光とする。一方基本波はプリズムを用いて衝突実験用のIR光として取り出している。このように、UV光とIR光は1つのSeedパルスから作られているため、電子ビームとIR光は高い精度で同期を取ることが出来る。

表1：レーザーと電子ビームのパラメータ

IRレーザー	波長	1047nm
	強度	4.2mJ
電子ビーム	パルス幅(FWHM)	10ps
	ビームサイズ(rms)	80 _m
	エネルギー	4.2MeV
	電荷量	0.25nC
	バンチ長(FWHM)	10ps
		250 _m (σ_x)
		ビームサイズ(rms) 150 _m (σ_y)

さらに、衝突のルミノシティを上げるためにフラッシュランプによるレーザーアンプシステムを構築した。これはNd:YLFロッド、励起用フラッシュランプ、冷却装置などから構成されており、まず基準信号2856MHzに同期した信号がフラッシュランプ電源へ送られ、フラッシュランプにより結晶が光励起される。励起された結晶中をIR光が通過することでパルスあたりのエネルギーが増幅される。またIR光とフラッシュランプの同期を取るためにパルスジェネレーターで信号のタイミングを遅らせ、IR光とのタイミングを調整した。図4に増幅後のフラッシュランプ電源の電圧とレーザーのパルスエネルギーの関係を示す。

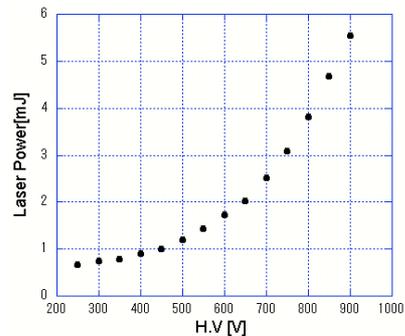


図4. フラッシュランプによるIR光の増幅

またX線の検出にはMCPを用いた。MCPは衝突点から68cm下流に設置した。このMCPの有効面積から、検出有効散乱角は11mrad程度であり、約0.14%

の単色なX線を検出することが出来る。になる。

4. 衝突実験

衝突実験として、今回は衝突角を20度に固定して行った。まずIR光をコンプトンチェンバー内に入射し、チェンバー内の衝突点に光学レンズを用いて集光させ、さらに電子ビームをIR光と衝突するように位置合わせおよび集束を行った。このときの電子ビームおよびIR光のビームサイズは表1のとおりであった。

電子ビームとIR光のタイミング調整については、コンプトンチェンバー横方向からガラスを挿入して電子ビームをチェレンコフ光に変換し、このチェレンコフ光とレンズ上にあけたピンホールを通るIR光をフォトダイオードを用いて観察しながらリニアステージで光路長を調整することによってタイミングを合わせた。このように同一の検出器を用いることにより、時間応答性を考慮せずに幾何学的な距離のみによってタイミング調整を行えるようにした。

5. 結果

今回初めてX線を検出器で観測することに成功した。そのX線のシグナルを下に示す。

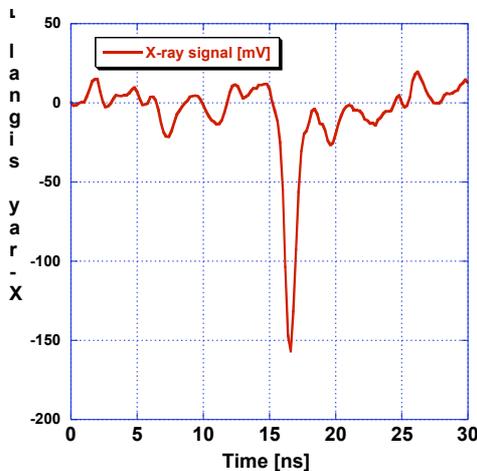


図5. MCPでのX線のシグナル

図5より、X線のシグナルは152mVであり、MCPのゲインが2kVで 5×10^6 、MCP表面の量子効率10%すると、約53個の光子が検出されたことになり、全発生光子数は 4.7×10^3 個と計算される。表1のパラメータからの計算によると、検出される光子数は59個、全発生光子数は 5.2×10^3 個となり、この計算値とほぼ一致する。また、検出したX線のエネルギーは約308eVと計算され、炭素のK殻吸収端をすこし

上回るエネルギーのX線を得られたことになる。

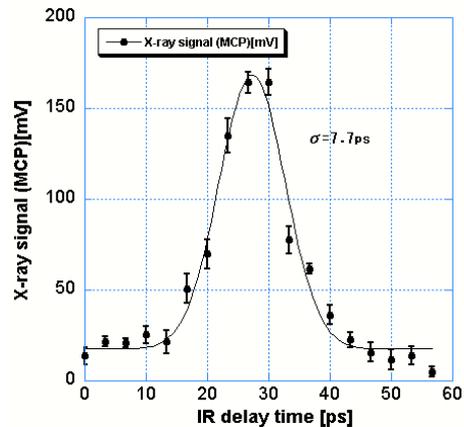


図6. 散乱X線と光路長の関係

図6はリニアステージを操作して光路長を変化させ、電子ビームとIR光のタイミングを調整した時の散乱X線の強度とIRディレイの関係である。

6. まとめと今後の予定

RF-gunを用いた逆コンプトン散乱によるテーブルトップサイズのX線発生システムの構築をし、さらに今回の実験では発生光子数を増やすためにレーザー増幅システムの構築をし、また電子ビームを十分絞り込んだことにより散乱のルミノシティが増え、その結果初めてパルスあたり 4.7×10^3 個の軟X線を検出器で観測することに成功した。今後はより多くの光子を発生させるために電子ビームの電荷量を増やすことと、2passレーザーアンプシステムを構築しIR光の強度を上げていくことを予定している。また窒素のK殻吸収端より高いエネルギーを得るためにIR光の第二高調波（波長523nm）と電子ビームを 60° で衝突させることも検討している。さらに生体観測用のX線顕微鏡へと応用していく為に高感度レジスト材の真空中での露光を行い、原子間力顕微鏡での像を観察して散乱X線の評価を行う予定である。

参考文献

- [1] W. Leemans, et al., Proceeding of the 1995 Particle Accelerator Conference, 1995, p. 174
- [2] M. Yorozu et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40 (2001) pp. 4228-4232 Part1, No.6A, June 2001
- [3] S. Kashiwagi et al., Nuclear Instruments and Methods A 455,p.36-40(2000).
- [4] T. tomie, H. Shimizu, T. Majima, M. Yamada, T. kanayama, H. kondo, M. Yano, M. Ono, Science 252 (1991) 12