

レーザーコンプトンによるフェムト秒 X 線発生

酒井 文雄*・遠藤 彰***・萬 雅史***

Femtosecond X-Ray Generation through Laser-Compton Scattering

Fumio SAKAI*, Akira ENDO*** and Masafumi YOROZU***

Femtosecond X-ray generation through laser-Compton scattering, which is an interaction between relativistic electron beam and a femtosecond laser beam, is described. The interaction between both beams is in 90 degree configuration in order to generate femtosecond X-ray pulses. Characteristics of X-rays and an experiment system, and applications are described.

Key words: laser-Compton scattering, femtosecond X-ray, photocathode, femtosecond laser

分子中での原子同士の結合や分離は原子の振動周期である 100 fs 程度の時間スケールで起こっていると考えられており、この時間領域での時間分解能で原子の運動の変化を知ることは、さまざまな反応での基礎的な反応過程を知ることが可能となる。現在、フェムト秒レーザーの開発により、化学反応や物理反応に伴うフェムト秒領域の物質の変化が研究されるようになってきた。しかし、フェムト秒レーザーは赤外から可視領域の長い波長ももつため、より直接原子の挙動を観測するために原子の内殻の電子を励起できる X 線領域のフェムト秒光源への期待がある。フェムト秒 X 線源としては、金属でのプラズマによる特性 X 線が利用されつつある¹⁾。また、シンクロトロンで周回する電子線をフェムト秒レーザーによってフェムト秒で電子線を切り出して X 線を発生する方式がローレンスバークレイ国立研究所 (LBNL) で行われている²⁾。このように、フェムト秒 X 線への期待が膨らむなか、さらに高輝度のフェムト秒 X 線の発生を目指して、X 線 FEL (free electron laser) や ERL (energy recovery linac) が提案され、開発が行われてきている。

フェムト秒の X 線の発生は、相対論的速度まで加速した電子線パルスによるフェムト秒レーザーパルスの散乱により初めて LBNL で行われた³⁾。コンプトン散乱による X 線は準単色性、波長の可変性、高指向性、短パルス性等のす

ぐれた特徴がある。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衝突している時間で決まるから、衝突の時間をフェムト秒領域にする必要がある。発生する X 線は電子の進行方向に進むから、電子線とレーザーを正面から衝突させた場合には、レーザーのパルス幅とは関係なく、ほぼ電子のパルス幅に等しくなる。しかし、電子線は空間電荷効果のために、 10^{10} 個もの電子線を 10 数 MeV のエネルギー領域でフェムト秒に圧縮することは困難であるため、図 1 に示されるように 90 度で衝突する方式がとられる。この場合には、X 線のパルス幅は、レーザーのパルス幅、電子線およびレーザーの衝突点でのビーム径によってほぼ決まるから、短パルス化のためには、電子線およびレーザーを限界まで収束できるための高品質化が重要な技術となる。また、実用的には、これらの短パルスを確実に 90 度で衝突させるためには電子線とレーザーの高度同期技術も重要となる。ここでは、筆者らが進めてきた電子線およびレーザーの高輝度化技術、同期技術^{4,5)} について紹介するとともに、発生 X 線の特性について理論および実験に基づいて簡単に述べる。

1. レーザーコンプトンによる X 線発生

1.1 発生 X 線の特徴

レーザーコンプトンによる X 線発生は、電子とフォトンによる弾性散乱とみることができるので、電子線とフォト

*フェムト秒テクノロジー研究機構 (〒300-2635 つくば市東光台 5-5) E-mail: fsakai@festa.or.jp

**現): ギガフォトン(株) (〒100-0004 東京都千代田区大手町 2-6-1)

***住友重機械工業(株)技術開発センター (〒188-8585 西東京市谷戸町 2-1-1)

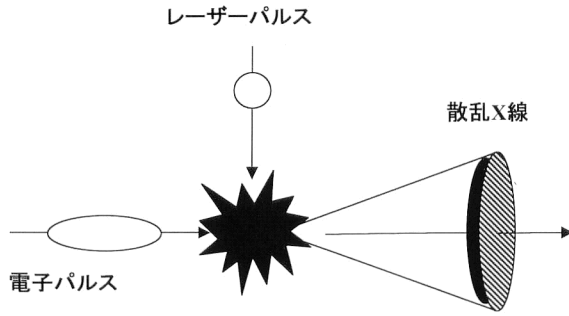


図1 レーザーコンプトンによる X 線発生.

ンのエネルギーと運動量の保存から、発生する X 線のエネルギーの角度分布を求めることができ、以下の式のように表せる。

$$E_x = \frac{1 - \beta \cos \theta}{1 - \beta \cos \phi} E_L \quad (1)$$

(β : 電子速度と光速の比, θ : 電子とレーザー衝突角度, ϕ : 発生 X 線と電子との角度, E_L : レーザーフォトンのエネルギー)

これから、電子線のエネルギーや衝突角度等を変えることにより、容易に X 線のエネルギーを変えることができる(波長可変性)。また、電子線の進行方向に散乱される X 線のエネルギーには角度分布があることから、アイリス等である角度部分を切り出すことにより単色の X 線を取り出すことができる(準単色性)。実際には、電子線やレーザー光はエネルギーの分散や角度分布をもつので、エネルギー分布はある程度の広がりをもつ(数%程度)。また、このとき発生 X 線は電子の進行方向に集中し、角度 $1/\gamma$ (γ : 電子のローレンツ因子) のコーン上に放射する分布を示す(指向性)。

得られる X 線の全フォトン数は、トムソン散乱での断面積 (σ_T) とルミノシティ (L) とよばれる電子線とレーザーパルスの巨視的な性質を表すパラメーターとの積で表すことができ、簡単に以下のように表せる。

$$N_x = L \sigma_T = \frac{N_e N_L}{S} \sigma_T \quad (2)$$

(N_e : 電子数, N_L : レーザーフォトン数, S はレーザー光と電子線パルスの幾何学的重なる面積)

この式から明らかなように、フォトン数を増加するためには、電子線とレーザー光の衝突領域での密度を上げる必要がある。

また、90 度衝突のとき、X 線のパルス幅 (σ_x) は、電子線のパルス幅に比べてレーザーのパルス幅、電子線およびレーザー光のビーム径が十分小さいときには以下の式のようにになる。

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_{pl}^2 + \frac{\sigma_{pw}^2}{c^2} + \frac{\sigma_{ew}^2}{c^2}} \quad (3)$$

(σ_{pl} : レーザーのパルス幅, σ_{pw} : レーザーのビーム径, σ_{ew} : 電子線のビーム径, c : 光速)

ここでも明らかなように、フェムト秒の X 線を得るためには、電子およびレーザー光をフェムト秒に相当する長さまで空間的に収束する必要がある。

1.2 装置

図2にシステム全体の概略図を示す。電子源としてはフォトカソード高周波 (RF) 電子銃を採用した。この電子銃では、レーザーで金属カソードを照射し、放出した電子を RF による 100 MV/m の高電界でガン出口までに相対論領域まで電子を加速する。この場合、照射するレーザーにより電子放出のタイミング (衝突レーザーとの同期)、パルス幅や電荷量を制御することができ、かつ、高い電界で加速するために電子自身の空間電荷効果による電子ビーム自身の性能劣化を極力抑えることができる (電子線の高品質化)。電子銃を出た電子は直線加速器で必要なエネルギーまで加速し、収束電磁石で衝突点にて収束される。

使用するレーザーは、電子銃照射用 Nd:YAG と電子線との衝突用 Ti:Sapphire の2台である。結晶の違いはあるが、発振器はともに半導体過飽和吸収ミラー (SESAM) による受動モードロックレーザーである。電子線加速に使用される 2856 MHz の RF を 24 分周した 119 MHz を基準信号として、ピエゾおよびピコモーターにより共振器長を調整するフィードバック機能によりフェムト秒領域の時間ジッターが達成されている。

電子銃照射用 Nd:YAG は、発振器の信号をポッケルセルにより切り出して、再生増幅器、マルチパスアンプで増幅した後、波長変換結晶で 4 倍波 (266 nm) に変換し、カソード面に照射する。カソード面への照射パルスエネルギーは約 100 μ J であった。

衝突用 Ti:sapphire は、パルスストレッチャーでパルス幅を広げ、同様にしてエネルギーを上げた後、最終段で

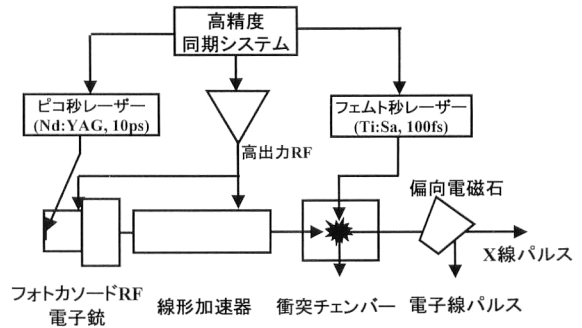


図2 フェムト秒 X 線発生システム.

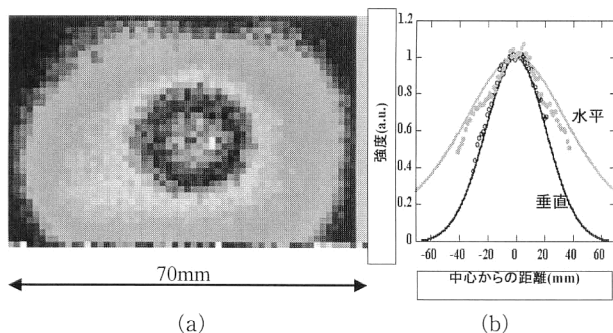


図3 発生 X 線の空間プロファイル。(a) 発生点から 2 m 下流での 2D 空間プロファイル。(b) 断面での強度分布、●：実験データ、直線：計算値。

パルス圧縮を行い、パルス幅 100 fs、エネルギー 100 mJ の出力が得られた。

1.3 実験結果

衝突点での電子およびレーザー光の標準的なパラメータの値は、電子線はエネルギー 14 MeV、ビーム径 100 μm 、パルス幅 3 ps、電荷 1 nC/pulse、レーザーはビーム径 20 μm 、パルス幅 100 fs、出力 100 mJ/pulse であった。検出器で観測された光子数から、検出器の効率、立体角、理論的に予想される X 線の角度分布を考慮すると、衝突点での全発生光子数(全波長領域での積算)は、最大で 3×10^4 photons/pulse と見積もられた。また、このときの最大の X 線エネルギー(式(1)で $\phi=0$)は、式(1)より 2.3 keV と見積もられた。検出器で得られた X 線光子数のショットごとのゆらぎは 25% (rms) であり、これの原因としては、主に電子およびレーザー出力の強度変動、電子線とレーザーの時間ジッターによるものであると見積もられており、今後のさらなる安定化が必要とされる。また、発生 X 線のパルス幅は、電子線およびレーザーのパラメータを個々に測定した結果、式(3)から 400 fs と見積もられた。

同様に衝突点から 2 m の位置での二次元分布を図 3 に示す。ここでは、MCP (micro-channel plate)、蛍光板、最小 10 ns のゲート付き ICCD (image intensifier CCD) カメラを用いてイメージを得た。レーザーは図 3 においては衝突面に垂直に直線偏光した状態で電子と衝突を行っている。ここでは示していないが、偏光を衝突面に水平にした場合には、楕円分布の長軸が垂直になり、偏光による影響と考えられている。また、これらの結果は偏光を考慮した理論計算の結果ともほぼ一致している。

2. 期待される応用

X 線の発生にはフェムト秒レーザーを用いることから、その光を用いたポンプ・プローブ法によるフェムト秒領域での光誘起反応のダイナミクスの研究の光源として大きく

期待される。とくに、レーザーコンプトンによる X 線は、フェムト秒という短パルス性だけでなく、レーザープラズマ X 線と比較して波長の可変性が特徴であり、単色による時分割測定だけではなく、XAFS (X-ray absorption fine structure) による構造解析や蛋白質のラウエ法等の多波長を利用したフェムト秒での時分割測定を行うことも可能であると考えられる。

また、短パルス性による時分割測定だけではなく、波長可変性を利用して、従来シンクロトロンでしかできなかった蛋白質の構造解析での位相決定法としての MAD (多波長異常分散) 法が可能な実験室規模の装置としての適用も検討されてきている⁹⁾。そのほかにも、準単色性、波長の可変性、指向性を必要とする高度医療診断装置としての適用の可能性もあり、病院への設置が期待される。

レーザーコンプトン法により、最大エネルギー 2.3 keV で 400 fs の超短パルス X 線の発生に成功した。現在、X 線の短波長化、高出力化を目指して、電子線の高エネルギー化、衝突レーザーの高出力化を行っている。装置を整備した後は、発生 X 線の利用へと展開していく予定である。

本研究開発は、NEDO (New Energy and Industrial Development Organization) の委託を受けてフェムト秒テクノロジー研究機構で実施したものである。研究開発をサポートしていただいた方、理論・実験面でさまざまな有益な助言をいただいた方、そして実験にデータを提供していただいた共同研究者の方々に感謝いたします。

文 献

- 1) C. Rose-Petruck, R. Jimenez, T. Guo, A. Cavalleri, C. W. Siders, F. Raksi, J. A. Squier, B. C. Walker, K. R. Wilson and C. P. J. Barty: "Picosecond-milliangstrom lattice dynamics measured by ultrafast X-ray diffraction," *Nature*, **398** (1999) 310-312.
- 2) R. W. Schoenlein, S. Chattopadhyay, H. H. W. Chang, T. E. Glover, P. A. Heimann, C. V. Shank, A. A. Zholents and M. S. Zolotarev: "Generation of femtosecond pulses of synchrotron radiation," *Science*, **287** (2000) 2237-2240.
- 3) R. W. Schoenlein, W. P. Leemans, A. H. Chin, P. Volfbeyn, T. E. Glover, P. Balling, M. Zolotarev, K.-J. Kim, S. Chattopadhyay and C. V. Shank: "Femtosecond X-ray pulses at 0.4 Å generated by 90° Thomson scattering," *Science*, **274** (1996) 236-238.
- 4) 遠藤 彰: "レーザーコンプトン法によるフェムト秒高輝度 X 線発生技術", *応用物理*, **71** (2002) 200-203.
- 5) 萬 雅史, 酒井文雄, 遠藤 彰: "レーザーコンプトン散乱を用いた小型フェムト秒高輝度 X 線発生装置", *レーザー研究*, **30** (2002) 518-524.
- 6) F. V. Hartemann, H. A. Baldis, A. K. Kerman, A. Le Foll, N. C. Luhman, Jr. and B. Rupp: "Three-dimensional theory of emittance in Compton scattering and x-ray protein crystallography," *Phys. Rev. E*, **64** (2001) 1-26.

(2002 年 10 月 10 日受理)