



展 TENBO 望

電子ビームとレーザーの衝突による X 線の生成



羽島 良一

Hajima Ryoichi

(日本原子力研究開発機構)



照沼 信浩

Terunuma Nobuhiro

(高エネルギー加速器研究機構)

1 はじめに

高エネルギーに加速した電子ビームから X 線を作り出し利用する放射光施設として、蓄積リング型 X 線光源や X 線自由電子レーザー (XFEL) が建設され供用されている。一方で、これらの光源を補完する新型放射光源の研究開発が進められている。光速近くまで加速した電子ビームとレーザービームの衝突による X 線、 γ 線の発生 (レーザー・コンプトン散乱) に基づく光源もその 1 つである。

静止した試料に X 線を照射すると、試料中の原子を構成する電子によって X 線が散乱される。このとき、散乱された X 線のエネルギーが入射 X 線のエネルギーよりも小さな値となる現象は、コンプトン散乱として知られており、X 線 (光) が粒子の性質を持っていることを示す例としても有名である。光速近くまで加速した電子によって光子 (レーザー) が散乱されるとき、散乱光子は電子のエネルギーの一部を受け

取って、高いエネルギーの光子に変わる。このような現象を逆コンプトン散乱 (Inverse Compton Scattering), 又は、レーザー・コンプトン散乱 (Laser Compton Scattering : LCS) と呼ぶ (図 1 参照)。

LCS で発生する光子のエネルギーは、電子エネルギー、レーザー光子エネルギー (レーザー波長)、衝突角度、散乱角度で決まる。したがって、コリメータで特定の散乱角度を持った光子のみを切り出せば、エネルギーの揃った (単色の) 光子ビームが利用できる。正面衝突の場合、電子ビームの進行方向に散乱される光

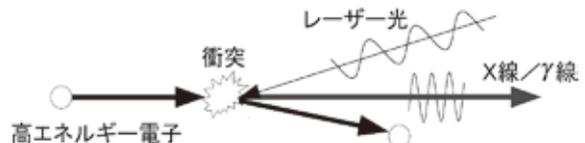


図 1 レーザー・コンプトン散乱の原理

左から光速近くまで加速した高エネルギーの電子が飛来し、右から来たレーザーと衝突するとレーザーは反対方向に散乱され、電子からエネルギーを得て X 線又は γ 線となる

子のエネルギーは、 $4\gamma^2 h\nu$ となる。 γ は電子の相対論因子、 $h\nu$ はレーザー光子のエネルギーである。波長 $1\mu\text{m}$ のレーザーを用いるとき、 25 MeV の電子では 12 keV のX線が、 250 MeV の電子では 1.2 MeV の γ 線が得られる(本稿では 1 MeV 以上のX線を γ 線と呼ぶことにする)。

このように、LCSでは電子ビームのエネルギーやレーザーの波長を選ぶことで、発生するX線や γ 線のエネルギーを自由に変えることができ、また、電子ビームの輝度と電流を大きくし、レーザービームの強度を上げることで、発生するX線、 γ 線の輝度と強度を増大することができる。LCSに基づく光源は、散乱光子ビームのエネルギーが数 keV から 100 keV のX線領域では大型放射光施設に匹敵する小型光源として、また、エネルギーが 1 MeV 以上の γ 線領域では唯一のエネルギー可変光源となり得る。

2 エネルギー回収型リニアックにおけるLCS-X線の発生

LCSにおける電子とレーザーの散乱断面積は非常に小さく、このため、LCS光源の実用化には、電子ビームとレーザービームを高密度かつ高繰り返しで衝突させる技術が必要となる。これまでのLCS光源では、リニアック(線形加速器)や蓄積リング加速器の電子ビームが用いられてきた。リニアックは電子ビームを微小サイズに収束させることができるが、パルス運転しかできず電子ビームとレーザービームの衝突実績は 1 MHz ほどにとどまっている。蓄積リングは連続運転(100 MHz 以上)が可能であるが、リニアックに比べて個々の電子パルスが時間方向に長く、衝突密度を高めることに限界がある。

筆者らは、エネルギー回収型リニ

アック(ERL)とレーザー蓄積装置を用いることで、LCS光源実用化の鍵となる電子ビームとレーザービームの高密度かつ高繰り返し衝突が可能となることに注目し、これに必要な技術開発を進めてきた。図2にERLとレーザー蓄積装置を組み合わせたLCS光源の概念図を示す。

ERLは超伝導加速器により加速した電子ビームを光の発生に利用した後に電子ビームを減速することで、電子ビームのエネルギーを再利用する装置である。エネルギーの再利用によって、高繰り返しで電子ビームを効率的に加速することができる。さらに、電子入射器に光陰極電子銃を用いることで高輝度高品質の電子ビームを生成することができ、LCS発生点において、電子ビームを微小スポットサイズに収束することができる。電子ビームの高繰り返し加速には、国際リニアコライダーなど将来の先端加速器に向けて研究開発が行われている超伝導加速器技術を利用する。

レーザー蓄積装置は、高反射率の鏡からなる光共振器であり、電子ビームラインと交差するように設置される。レーザー発振器で作られるレーザーパルス列を光共振器に導入すること

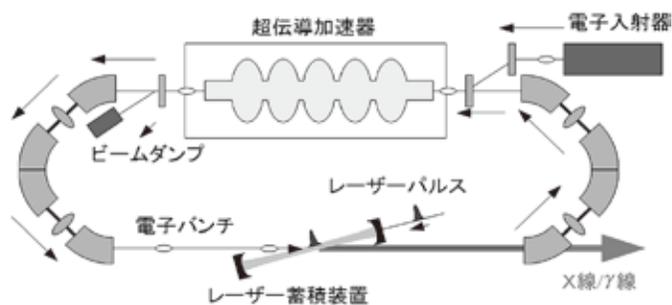


図2 エネルギー回収型リニアックとレーザー蓄積装置を用いたレーザー・コンプトン散乱X線/γ線源の原理
電子入射器で発生した電子ビームは、超伝導加速器で加速された後、レーザー・コンプトンX線/γ線発生に用いられる。さらにその後、電子ビームは再び超伝導加速器へ導かれる。このときに、電子が減速されるタイミングで超伝導加速器へ電子を入射することで、電子のエネルギーを回収し後続電子の加速に再利用することができる。減速された電子ビームは、ビームダンプへ捨てられる

で、レーザーパルスを重ね合わせてレーザー強度を高めることができる。

ERLを用いたLCS-X線・ γ 線源に必要な技術の開発と実証を行うため、筆者らは、KEK（高エネルギー加速器研究機構）つくばキャンパスに建設されたコンパクトERL¹⁾にて、LCS-X線の発生実験を進めている。2014年12月までにLCS実験のための装置の組み立てと設置を完了し、2015年2月から4月までの実験において、最小30 μm の微小サイズで電子ビームとレーザービームを162.5 MHzの高繰り返しで衝突させLCSによるX線ビームの発生実験を試みたところ、エネルギー6.9 keVの準単色X線ビームの発生に成功した（図3参照）^{2,3)}。発生点から16.6 m離れた実験室の検出器（直径4.66 mm）に入射したX線の強度は最大で毎秒1,200個であり、LCS発生点（衝突のrmsサイズ30 μm ）での強度に換算すると毎秒 4.3×10^7 個となる。シリコンドリフト検出器で測定した図3のスペクトルは、検出器の分解能（ ^{55}Fe からの5.9 keV X線で153 eV）を含んでいる。

3 LCS-X線によるイメージング

現在、広く利用されているX線源には、X線管（医療用レントゲン装置、実験室X線回折装置など）と蓄積リング型X線光源（シンクロトロン放射光リング）がある。X線管は小型で使いやすい装置であるが、輝度が低いという欠点がある。放射光源加速器は、X線管に比べて10桁以上高い輝度を有しているが、大型の施設であり利用申請とその承認を経ないと利用ができない点で簡便性、機動性が十分にあるとは言えない。X線は、物質科学、生命科学を中心とした先端科学研究に欠かせない基盤ツールであり、高輝度X線を身近に使えるようにしたいという、研究者の要求は年々高まりつつある。小型で高輝度X線を発生できるLCS-X

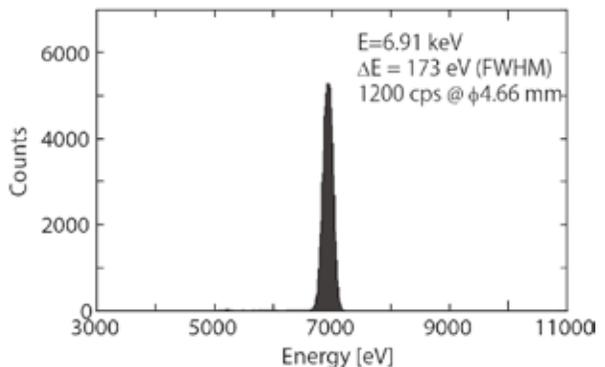


図3 レーザー・コンプトン散乱で発生したX線のエネルギースペクトル
中心エネルギー 6.9 keV

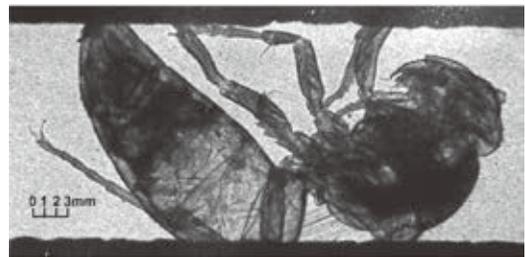


図4 レーザー・コンプトン散乱で発生したX線（6.9 keV）で撮影したスズメバチの透過画像

線光源は、このような要求に対する1つの回答となり得る。

筆者らは、LCSで発生したX線を使ったイメージング実験として、スズメバチのX線透過撮像を行った（図4参照）。実験では2次元X線カメラとして（株）リガク製、HyPix-3000を使用している。図4に示すように、スズメバチの薄い翅（ハネ）を支える翅脈が見えるほか、体内の構造が良好なコントラストで観察できた。X線のエネルギーが揃っているため、画像の濃淡が観察試料の密度と一対一で対応していることから、試料組織を詳しく解析することができる。図4の透過画像では、試料とカメラを2.5 m離すことで試料のエッジが強調される効果（X線の屈折効果）が現れている。LCS発生点の光源サイズが30 μm と微小であることが、明瞭な屈折イメージングの取得に役立っている。

LCSを使えば、周長数 100 m という放射光施設を用いることなく、潜在的には周長数 10 m の実験施設でこのように鮮明な画像が得られることになり、大きな病院に MRI 装置が導入されているように、ダウンサイズした高輝度 X 線によるコンパクトな高精細診断装置が大学・病院などへ導入できる可能性が開かれる。筆者らは今後、電子ビームと蓄積レーザーそれぞれの改善を進め、LCS-X 線の強度を上げることで、より鮮明なイメージングを実現していく計画である。

4 エネルギー可変 γ 線ビームによる核物質の非破壊測定と検知

原子力の平和利用のために、核不拡散、核セキュリティへの取組みが国際的に行われているが、これらの取組みを支える重要な技術の 1 つが、核物質の非破壊測定・検知である。

筆者らは、LCS- γ 線による核種の非破壊測定・検知システムを提案し、原子炉使用済燃料中や、東京電力(株)福島第一原子力発電所の熔融燃料に含まれる核物質の測定、貨物中に隠ぺいされた核物質の検知などへの応用を目指している⁴⁾。このような核物質の非破壊分析と検知は、原子核共鳴蛍光散乱 (Nuclear Resonance

Fluorescence : NRF) という γ 線と原子核の反応を利用する。NRF は、原子核が特定のエネルギーの γ 線を吸収することで、一時的にエネルギーを保有した状態 (励起状態) になった後、同じエネルギーの γ 線を放出して元に戻る現象 (これを脱励起と呼ぶ) である。核種には、それぞれ異なる励起エネルギーを有する状態が存在している。測定したい核種の励起エネルギーに等しい γ 線を照射すると、その核種のみで原子核共鳴蛍光散乱が発生する。その場合、散乱 γ 線のエネルギーを計測することにより非破壊であらゆる核種の測定や検知ができる (図 5 参照)。

このような核物質の非破壊検知と測定には、任意のエネルギーの γ 線を大強度で発生できる装置が必要であるが、LCS- γ 線源はこのように目的に最適の装置である。

5 今後の展望

これまで、レーザー・コンプトン散乱に基づく多くの X 線/ γ 線源が開発され利用に供されてきた。しかしながら、発生できる X 線/ γ 線の強度は電子とレーザーの衝突密度と繰り返しで制限され、さらに、輝度、単色性は電子ビームの品質 (角度発散とエネルギー広がり) で制

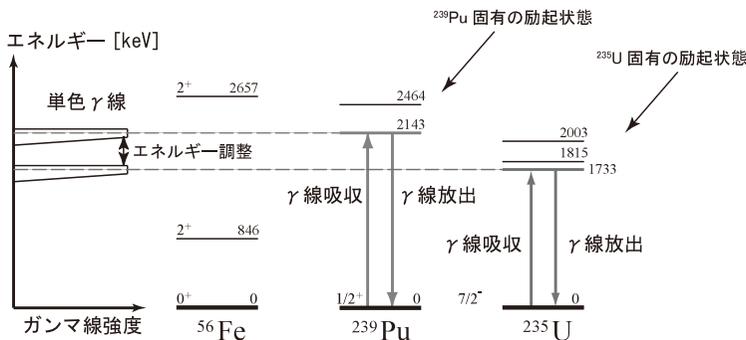


図 5 励起エネルギーと原子核共鳴蛍光散乱の概念図
励起エネルギーに等しい γ 線が照射されると、 γ 線を吸収・放出する原子核共鳴蛍光散乱が起こる。測定対象以外の核種では、励起エネルギーと異なるため核共鳴蛍光散乱は起こらない

限されていた。今回の研究成果は、近年、著しい進化を見せている電子加速器、レーザーの技術を組み合わせることで、レーザー・コンプトン散乱 X 線/ γ 線の性能を大きく高められる可能性を示したものである。

本稿で紹介したコンパクト ERL における実験では、電子ビーム電流は $58 \mu\text{A}$ であったが、今後、電子ビーム電流を段階的に 10 mA まで増やす予定である。 10 mA 運転時の LCS-X 線の発生量を今回の実験結果から計算すると毎秒 10^9 個となる。レーザー蓄積装置の改良も加えることで、更なる X 線光子数の増大も期待できる。これらの技術開発を通してレーザー・コンプトン散乱光源の有用性を示し、将来の LCS-X 線、 γ 線源の実用化につなげたい。

【謝辞】

本研究の一部は文部科学省の「核セキュリティ強化等推進事業」「光・量子融合連携研究開発プログラム」によるものである。

参考文献

- 1) 高井良太, 他, 第 12 回日本加速器学会年会論文集, p.181 (2015)
- 2) 永井良治, 他, 第 12 回日本加速器学会年会論文集, p.1328 (2015)
- 3) 赤木智哉, 他, 第 12 回日本加速器学会年会論文集, p.1331 (2015)
- 4) Hajima, R., *et al.*, *J. Nucl. Sci. Tech.*, **45**, 441 (2008)