

2026 年 9 月 30 日

報道機関 各位

国立大学法人東北大学
兵庫県公立大学法人兵庫県立大学

極端紫外（EUV）放射光の後方コンプトン散乱による 高エネルギーガンマ線ビーム生成を世界初観測

【発表のポイント】

- 極端紫外（EUV）^{（注1）}領域の放射光を電子加速器へ再入射する高エネルギーのガンマ線ビームを得る新光源を世界に先駆けて開発することに成功しました。
- 今後、世界中で建設が進む放射光施設において応用が見込まれます。

【概要】

GeV エネルギー領域の高偏極ガンマ線ビームを生成する手法には、コンプトン散乱の他、ダイヤモンドの薄板に電子ビームを通過させてコヒーレント制動放射を起こす方法もあり、主にアメリカやドイツでハドロン光生成実験に供されています。

東北大学先端量子ビーム科学研究センターの村松憲仁特任教授（現：中国科学院近代物理研究所教授）らの研究グループは、極端紫外（EUV）領域の放射光を多層膜ミラー^{（注2）}で反転反射して電子加速器（放射光を発生する電子蓄積リング^{（注3）}）へ再入射する画期的な方法を実現し、この極端紫外光と電子の後方コンプトン散乱（図1）によって高エネルギーガンマ線ビームを生成する新光源の開発に成功しました。本研究では兵庫県立大学高度産業科学技術研究所が運用する放射光施設ニュースバルにおける実証実験で、この手法によるガンマ線ビームの生成を世界で初めて観測しました（図2）。今後世界中で建設が進む第4世代の放射光施設^{（注4）}で電子加速器のエネルギーに迫る高エネルギーガンマ線ビームを生成する道筋を開拓しました。開発した新光源は、素粒子クォークで構成された基本粒子ハドロン^{（注5）}の研究など、基礎科学の発展に貢献します。

本研究成果は、2026年9月11日に物理学分野の専門誌 Progress of Theoretical and Experimental Physicsに掲載されました。

【詳細な説明】

研究の背景

私たちが住む物質世界を極限まで細かく分解していくと、クォークという素粒子に行き当たります。しかし、このクォークは単体では存在できず、数個が集まって陽子や中性子等の粒子を構成します。このようにクォークが集まってできた基本粒子（ハドロン）の成り立ちを研究するには、波長がその大きさ程度（約 10^{-15}m ）となる非常に高いエネルギーの量子ビーム^{（注6）}が必要となります。そのような量子ビームを標的物質に照射して散乱後の反応生成物を測定すると、顕微鏡のようにミクロの世界が見えてきます。我々の研究グループでは、高エネルギーの量子ビームの中でもガンマ線（X線よりもエネルギーの高い光）に焦点を当て、より高エネルギーのガンマ線ビームを効率的に得る方法を研究・開発してきました。

高エネルギーガンマ線を得る一つの方法は、図1に示すレーザー後方コンプトン散乱と呼ばれる手法です。ミクロの世界では、我々が見ている光も波ではなく個別に分かれた粒子（光子）と捉えることができ、ビリヤードのように電子と散乱します。この散乱では、出力の高い（光子数の多い）レーザー光を大型加速器施設で得られる高エネルギーの電子と正面衝突させることで、電子のエネルギーを後方散乱される光子へ受け渡します。こうすることで、赤外～可視～紫外の範囲にあるレーザー光を100万倍～10億倍程度にエネルギー増幅させたガンマ線ビームに変換することができます。しかしながら、得られる最大エネルギーは加速器を周回する電子と入射する光のエネルギーに依存し、世界最高エネルギーの放射光施設であるスプリング8の場合でも、その40%程度以下のエネルギー範囲でしか増幅することができません。

研究グループでは、レーザー光よりもエネルギーの高い放射光を高エネルギー電子と正面衝突させて、運動学的にエネルギーの増幅効率を最大で60～90%にまで引き上げるユニークな後方コンプトン散乱法を着想し開発してきました。この開発は、東北大学先端量子ビーム科学研究センターの村松憲仁特任教授（現：中国科学院近代物理研究所教授）、宮部学助教、岡部雅大学術研究員、清水肇名誉教授、時安敦史助教、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所の神田一浩教授、宮本修治名誉教授、原田哲男教授、高輝度光科学研究センターの伊達伸主幹研究員、大阪大学核物理研究センターの大熊春夫特任教授、鈴木伸介協同研究員らの共同研究として行われました。近年は加速器技術が発展し、高エネルギー電子を蓄積する加速器リングにアンジュレータ^{（注7）}と呼ばれる挿入光源を設置して極端紫外（EUV）～X線領域の放射光を生成することができるようになっています。また、EUVリソグラフィなど極端紫外領域の光を制御する光学デバイスの技術も大いに進展し、多層膜ミラーを使って反射することができるようになっています。本研究では、これ

らの新しい技術を融合して全く新しい高エネルギーガンマ線光源を創出する試みを、ハドロン物理や加速器科学、放射光利用物性研究など、様々な分野の研究者が結集して進めたものとなっています。

今回の取り組み

本研究は、播磨公園科学都市にある 1 ギガ電子ボルト^(注8)の電子蓄積リング ニュースバルにおいて行われました。ニュースバルは、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所によって運営されている共用放射光施設です。本研究に関わる装置は、図 3 に示す通り、92 電子ボルトの極端紫外 (EUV) 放射光が得られるアンジュレータを持つビームライン BL07A に設置して進められました。このビームラインの下流には、EUV 放射光を 70% 弱の反射率で反転させられるモリブデンとシリコンの多層膜ミラーが真空中に設置してあり、反射方向を精密回転モーターでリモート制御できるようになっています。これにより EUV 放射光を元の電子蓄積リングへ再入射して、周回している高エネルギー電子と正面衝突させます。そうすると、一部の EUV 放射光と電子が後方コンプトン散乱を起こし、最大で 600 万倍にエネルギー増幅されたガンマ線ビームがビームライン下流方向へ生成されることとなります。

生成されたガンマ線ビームは、ガンマ線領域の光子のエネルギーを個々に測定できる電磁カロリメータと呼ばれる装置を使って検出します (図 4)。検出された事象に対するエネルギー分布を描いたものが図 2 です。実は、後方コンプトン散乱が起こっていなくても、真空引きしてある加速器内部に極わずかに残る残留ガス中を高エネルギー電子が通過する際に出てくる制動放射光というガンマ線が背景事象として現れます。しかしながら、そのようなガンマ線のエネルギー分布は高エネルギーになるほど急激に減る形状をしており、後方コンプトン散乱によるガンマ線の信号分布と全く異なります。それ故、我々の実験では EUV 放射光を電子蓄積リングへ再入射した場合としなかった場合の 2 通りでデータを収集し、後者の場合のガンマ線エネルギー分布を背景事象として前者の分布から差し引く操作を行いました。その結果、図 2 に見られるように、コンプトン端と呼ばれる最大エネルギーで極大値を示して連続的に分布する特徴的な信号形状を観測することに成功しました。

観測に成功した後方コンプトン散乱によるガンマ線ビームは、生成レートが 1.4 キロ・ヘルツと評価され、EUV 放射光強度や後方コンプトン散乱が起こる確率から計算される予想値を凡そ再現できています。ハドロンの性質を研究する実験で実用化するにはビーム強度がまだ低いのですが、最初の第一歩としては世界初の大きな成功を収めました。今後建設が主流となる第 4 世代の放射光施設では、加速器を周回する高エネルギー電子の拡がりや格段に抑えられて、後方コンプトン散乱で正面衝突する光子と電子の数を劇的に増や

すことが可能となります。上記のような実用化へ向けた課題は徐々に解決されていくものと考えています。

今後の展開

本研究は、EUV 放射光を多層膜ミラーで反転反射して元の電子蓄積リングにおいて後方コンプトン散乱させるという独創的な手法が特徴であり、新手法によるガンマ線ビームの生成を世界で初めて観測した快挙となります。この手法を用いれば、光子のエネルギー増幅率が飛躍的に改善し、使用する放射光施設の電子エネルギーを有効に利用することができます。よって、従来のレーザー後方コンプトン散乱では得られなかった高エネルギー領域のガンマ線ビームを得る道筋が開き、質量の大きい新奇な構造を持つハドロンの研究も進めることが可能となります。また、周回電子のエネルギーが比較的低かった放射光施設においても、高エネルギーガンマ線ビームを用いた基礎物理実験を行うことができるようになり、我々の手法が今後ますます各地で利用拡大されることが望めます。EUV 放射光の発生から後方コンプトン散乱によるガンマ線ビーム生成までを一貫して一つのビームラインで進められるため、比較的安価に新光源を利用できるようになることも今後の進展においてメリットとなります。これらの意味で、本研究の成果は新光源の創出という大きな意義を持ちます。

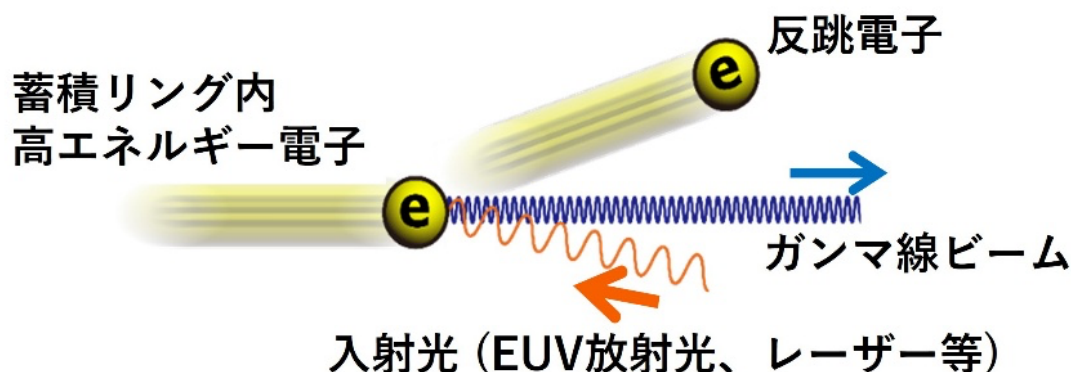


図 1. 後方コンプトン散乱の概念図。電子と正面衝突する入射光（光子）がエネルギー増幅されて後方（図右側）へ散乱される。

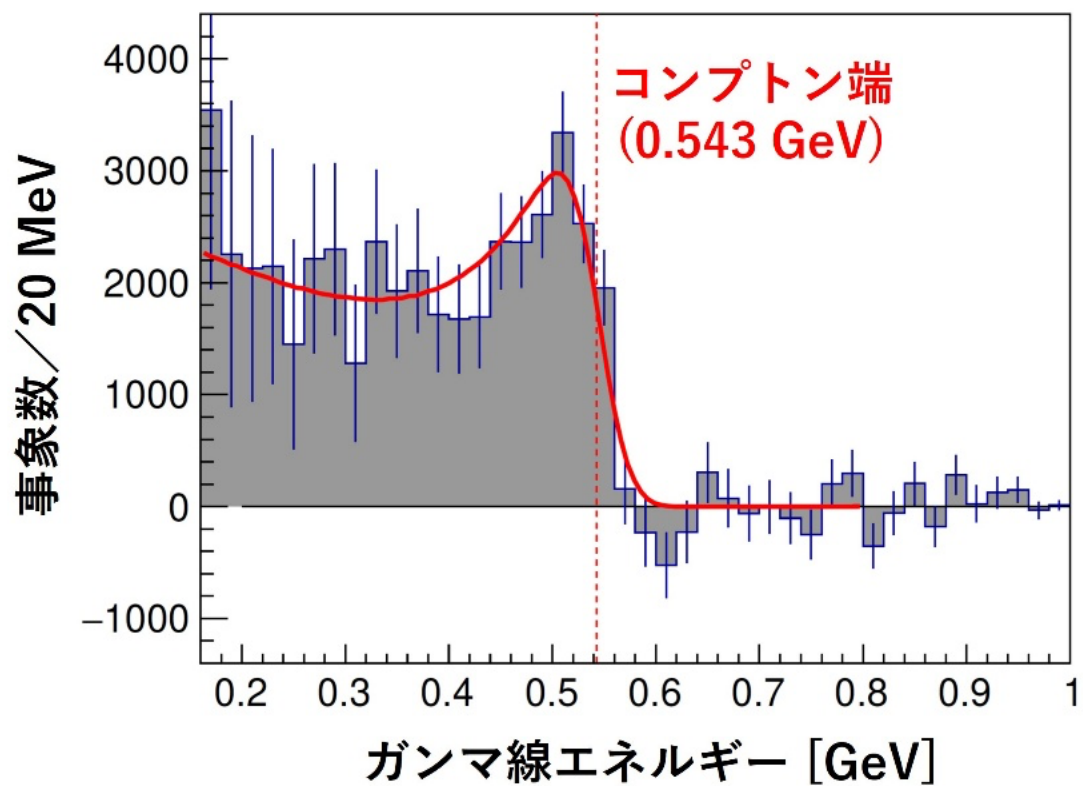


図 2. EUV 放射光の後方コンプトン散乱で生成されたガンマ線ビームのエネルギー分布。背景事象を差し引いた後の分布を示す。赤い実線は、理論計算による分布を重ね書きしたもの。

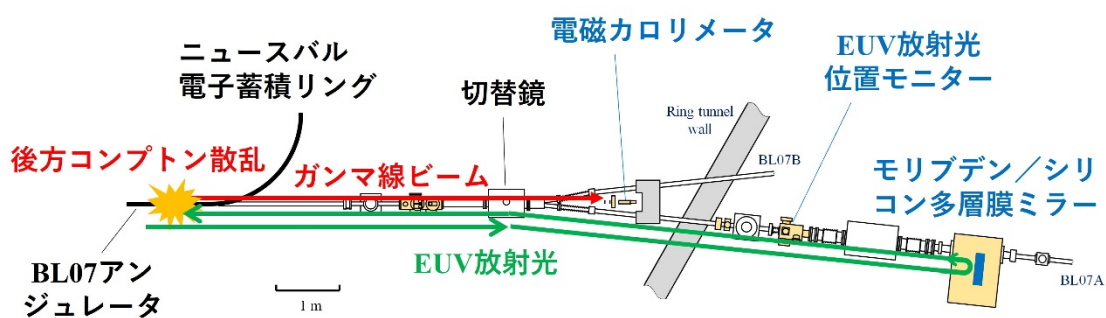


図 3. ニュースバルのビームライン BL07A における本研究のセットアップ。整備した装置の他、EUV 放射光およびガンマ線ビームの流れを示す。

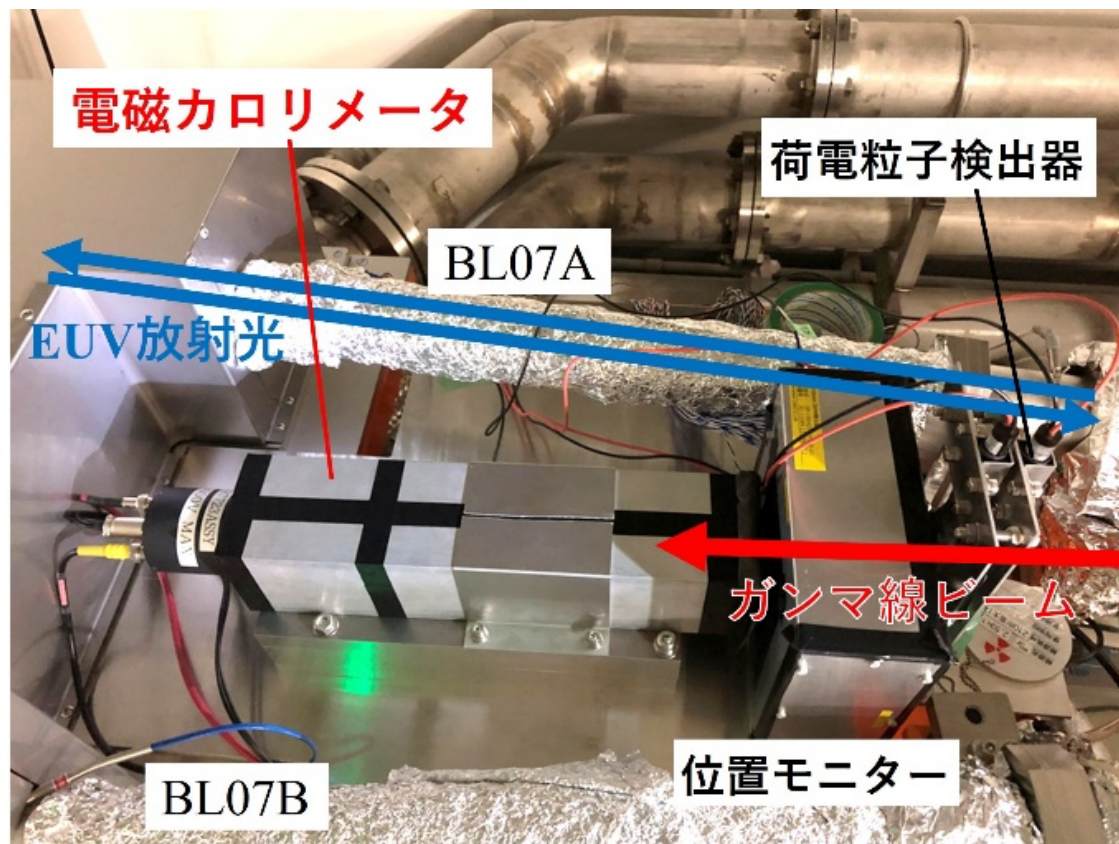


図 4. ガンマ線ビームを測定する検出器群の様子。

【謝辞】

本研究は、日本学術振興会科学研究費助成事業（JP24241035, JP24654056, JP18H05325 / JP20K20344, JP22H01225 / JP23K22496, JP22K18707）等から助成を受けて推進しました。

【用語説明】

注 1. 極端紫外（EUV）：電磁波（光）の一種で波長が 10～121 nm のものを指す。英語では extreme ultraviolet（EUV）と表示される。近年は半導体製造工程で重要な役割を担っている。これよりエネルギーの高い（波長の短い）光は、順に軟 X 線、硬 X 線、ガンマ線と呼ばれ、逆にエネルギーが低く（波長が長く）なるにつれて真空紫外線、深紫外線、紫外線、可視光線、赤外線、・・・と呼称が変わる。

注 2. 多層膜ミラー：屈折率の違う薄膜を何層も重ねて光の干渉を起こし、特定の波長成分のみ強く反射させる鏡。本研究では、超高精度に研磨したシリコン

基板の上に、モリブデンとシリコンの薄膜(厚さ数 nm) を交互に積層することを 40 回繰り返した構造の多層膜ミラーを製作した。

注 3. 電子蓄積リング：放射光施設では、電子を一定のエネルギーまで加速し、電磁石を並べた円形の加速器内へ補充・蓄積することで、長時間に渡り高エネルギー電子を周回させる。電子の進行方向が曲がる箇所で放射光が発生する。

注 4. 第 4 世代の放射光施設：放射光の輝度を従来の 100 倍以上に引き上げるため、蓄積する電子の空間的・角度的広がりを極めて小さく絞った次世代の放射光用加速器施設。日本では、NanoTerasu や SPring-8-II がこれに相当する。

注 5. ハドロン：現在の冷えた宇宙ではクォークが単独で存在できないため、複数のクォークが集まって成り立っている粒子の総称。一般的には、3 個のクォークが集まった陽子や中性子の仲間と、クォーク・反クォークが結びついた中間子の 2 つに大別される。近年では、4 個以上のクォークが集まったエキゾチック・ハドロンが見つかり、注目を浴びている。

注 6. 量子ビーム：光子（ガンマ線や X 線など）、電子、陽子など、量子力学的性質を持つ粒子が、空間的に絞られた形で同じ方向へ集団的に進む流れのことを言い、加速器等で生成される。

注 7. アンジュレータ：極性を交互に並べた多数の磁石列により電子の軌道を蛇行させ、高輝度な放射光を発生させる装置。放射光施設の電子加速器にある直線部へ挿入設置するため、挿入光源と呼ばれる。設計により極端紫外～軟 X 線～硬 X 線の領域で放射光を得ることができ、詳細なエネルギーの調整は磁石間のギャップ間隔の増減により行われる。

注 8. ギガ電子ボルト：エネルギーを表す単位で、1 電子ボルトは 1 個の電子を 1 ボルトの電圧で加速する際に得られるエネルギー量を表す。ギガは 10^9 倍であることを表す接頭辞である。電子ボルトは eV、ギガ電子ボルトは GeV と記述される。

【参考 URL】

研究グループホームページ

URL <https://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~mura/xcs/>

ニュースバルホームページ

URL <https://www.lasti.u-hyogo.ac.jp/NS/>

【論文情報】

タイトル : First observation of the γ -ray beam production by the backward Compton scattering of reflected synchrotron radiation in the extreme ultraviolet range

著者名 : N. Muramatsu, M. Miyabe, M. Okabe, S. Daté, T. Harada, K. Kanda, S. Miyamoto, H. Ohkuma, H. Shimizu, S. Suzuki, and A. Tokiyasu

*責任著者 : 村松憲仁 東北大学先端量子ビーム科学研究センター教授 (現 : 中国科学院近代物理研究所教授)

掲載誌 : Progress of Theoretical and Experimental Physics

DOI : 10.1093/ptep/ptag139

URL :

<https://academic.oup.com/ptep/article/2026/9/093D02/8735171?searchresult=1>

【問い合わせ先】

(研究に関すること)

東北大学先端量子ビーム科学研究センター

助教 宮部 学 (みやべ まなぶ)

TEL : 022-743-3435

Email : miyabe [at] raris.tohoku.ac.jp

<報道に関すること>

東北大学大学院理学研究科

広報・アウトリーチ支援室

TEL : 022-795-6708

Email : sci-pr [at] mail.sci.tohoku.ac.jp

兵庫県立大学

高度産業科学技術研究所

TEL : 0791-58-0249

Email : mamoru_takaiso [at] ofc.u-hyogo.ac.jp

* [at]を@に置き換えてください。