



超高精度ミラーを用いた 極限集光X線自由電子レーザーの実現

工学研究科 附属精密工学研究センター

助教 山田 純平

 Researchmap https://researchmap.jp/J_Y190325


研究の概要

ナノレベルの形状精度と原子レベルの表面粗さで作り込まれた鏡（ミラー）は「理想的なX線レンズ」として機能する。独自のX線ミラー光学系を発案・実証し、X線の波長領域にて波動光学的に回折限界を達成する高精度ミラーを作製することで、X線自由電子レーザー（XFEL）における7ナノメートル（nm）集光径と 10^{22} W/cm^2 のピーク強度を実現した。これはX線領域として世界最高強度を、XFELの集光径として最小サイズを示すものである。また応用実験として、固体密度金属Cr（クロム）の高度電離状態を計測し、電子が全て剥ぎ取られた「裸の原子殻」状態の生成が示された。

研究の背景と結果

X線は、レントゲンによる発見以来、様々な分析技術に利用され、DNAの二重螺旋構造を明らかにするなど、医学・生物学・材料科学などの多くの分野において不可欠な役割を果たしている。近年発振に成功したX線自由電子レーザー（XFEL）は「夢の光」と呼ばれる高輝度・高コヒーレンスなX線レーザー光である。XFELを用いた実験および計測では、XFELを微小サイズまで集光することでピーク強度を高める必要がある。日本のXFEL光源であるSACLAではこれまでに、1 μm~50 nmまでのマイクロ/サブマイクロ集光および 10^{20} W/cm^2 のピーク強度が実現され、タンパク質構造解析や超高速ポンプ・プローブ計測などの様々な計測に利用されてきた。

XFEL光をさらに小さな10 nm以下のサイズ（sub-10 nm）まで集光することができれば、可視光を含むレーザーの最高強度に匹敵する超高光子密度がX線領域で生成可能となり、その実現と応用が長らく期待されてきた。しかしながら、XFELのsub-10 nm集光システムの実現は、光学設計・光学素子の作製・集光ビームの計測評価、のいずれもが困難な課題であった。これらの課題に対して、独自に開発してきたX線結像ミラー光学系をXFEL集光に初めて適用し、さらにX線そのものを利用したAt-wavelength波面補正技術、および集光XFELの高精度計測法を開発することで、 $7 \times 7 \text{ nm}$ 集光と 10^{22} W/cm^2 集光強度を達成した。XFELの集光径およびピーク強度において世界最高性能を示すものである。応用研究も既に進んでおり、一例として固体密度金属Cr（クロム）試料から原子線スペクトルであるライマン（Ly）線の観察に成功した。これは電子が1つしか残存していない強烈に励起された水素様金属元素が生成されたことを示している。さらに、高強度焦点での原子線スペクトルの振る舞いから、全ての電子が励起された完全電離状態の生成を示した。恒星内部の電離状態の解明に関する宇宙物理学および原子物理学といった分野への応用や、未踏のX線非線形光学現象の実現、結晶化を必要としないタンパク質の単分子構造解析への展開が期待されている。

研究の意義と将来展望

得られた結果より、開発した7 nm集光・ 10^{22} W/cm^2 強度のXFELを用いれば、恒星内部の電離状態を地上に再現できること、X線励起によって電子温度1億K以上へ加熱できること、が示唆された。宇宙から降り注ぐX線スペクトルとの比較検証や熱核融合反応の初期状態探索が行える可能性があり、今後、宇宙物理学や原子物理学、高強度場科学といった分野への応用が期待される。また、今回実現されたXFEL

集光強度は、未踏のX線非線形光学現象の実現や、結晶化を必要としないタンパク質の単分子構造解析が可能になる光子密度に相当する。特に、可視光レーザーが辿ってきた歴史を鑑みると、新たに探索可能となるX線非線形光学は、既存の限界を超える計測技術や光学技術を創出しえる。

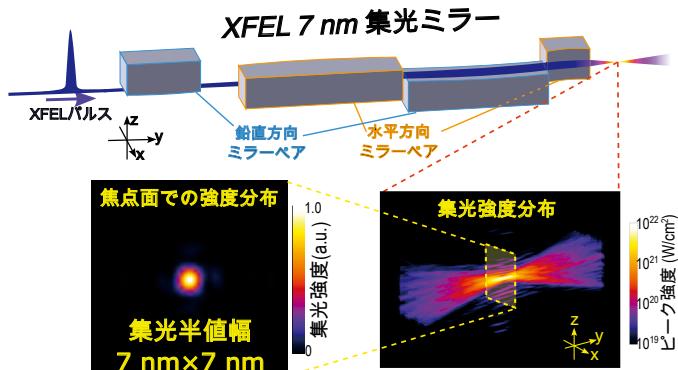


図1. X線自由電子レーザーの7 nm集光システム

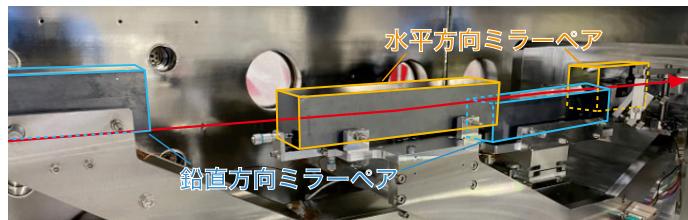


図2. 真空チャンバ内の7 nm集光ミラー

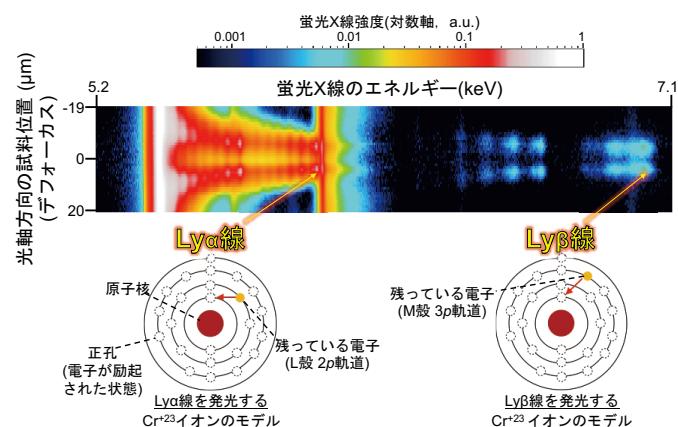


図3. 固体Cr試料からの原子線スペクトルおよびLy線の観察結果

特許

論文

Yamada, Junpei; Yabashi, Makina; Yamauchi, Kazuto et al. Extreme focusing of hard X-ray free-electron laser pulses enables 7 nm focus width and $10^{22} \text{ W cm}^{-2}$ intensity. *Nature Photonics*. 2024, 18, 685-690. doi: 10.1038/s41566-024-01411-4

参考URL

<http://www-up.prec.eng.osaka-u.ac.jp/>
https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2024/20240315_2

キーワード

X線ミラー、X線自由電子レーザー、X線集光