

ホロー原子固体による X線制御素子の実現

電気通信大学 レーザー新世代研究センター 教授

米田 仁紀

(お問い合わせ先) E-MAIL : yoneda@ils.uec.ac.jp



研究の背景

2009年に米国でX線自由電子レーザー（以下、XFEL）が発振し、その新しい光を使った新しい物質状態の研究が始まりました。私たちは、XFELによって内殻電子が選択的に励起された固体を使って新しいX線能動光学ができると考え、極端紫外自由電子レーザーを使った実験や詳細物理モデルの構築などの準備を行ってきました。2011年に、日本でXFEL-SACLAが発振すると同時に、具体的な素子の原理の実証実験に着手しました。

研究の成果

この研究での成果は以下の4点です。

- ①可飽和吸収を初めて達成：SACLAでは $10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ というこれまでに比べ桁数高いX線レーザー場を実現しました。このレーザーの波長をK殻電子の励起エネルギー程度に調整し、同時に透過スペクトルを測定しました。その結果、エネルギーが高く透過力の強い硬X線領域で、物質が光を吸収できなくなり透明化するという「可飽和吸収現象」を初めて観測しました。XFEL照射によって、未照射状態より1桁高い透過率に変化させることができました（図1）。変化時間は0.4fsと見積もられ、超高速な「X線スイッチ」が実現できたこととなります。
- ②光学導波路を物質内に生成：可飽和吸収の透過X線波面が変化していることから、固体内のXFELが照射された領域だけX線の屈折率が変わり、硬X線でも「導波」できることがわかりました。

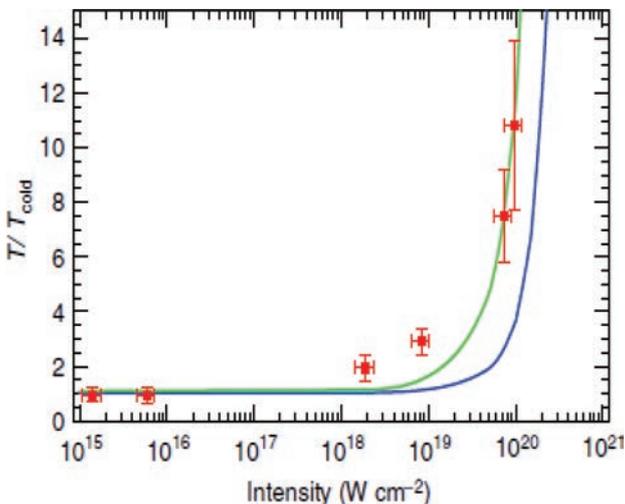


図1 硬X線領域で初めて観測された可飽和吸収現象。入射強度を増加させると、理論モデルで予測される $5 \times 10^{19}\text{W}/\text{cm}^2$ を超えると大幅な透過率変化が可能なが分かった。赤点：実験データ、緑線および青線はそれぞれ、X線が照射した後K殻にいた穴が埋まる時間を0.5fs、2fsとした場合の計算値。

- ③世界最短波長の原子準位レーザーを実現：ターゲット原子のK殻電子が励起する波長にXFELを合わせ、高強度で照射すると、K殻電子が1つだけ励起し、そこにできた空孔にL殻電子が脱励起する「緩和」が起こります。このうち、放射を伴う1s-2p(K α 線)の放射遷移に対して、レーザーを発振させることに成功しました。原子内の軌道電子のエネルギー差を利用して発振させるレーザーのことを原子準位レーザーといいます。
- ④誘導放出過程を使って最内殻電子準位間遷移の分岐比や制御を実現：2色化したXFELで電子を励起させるとともに、シード光を入射させて条件を最適化することで、わずか13%の分岐比しかないK α 2遷移でレーザー発振ができることがわかりました。これによって、最内殻の電子準位でも、十分強い共鳴光があれば準位間の遷移を制御できることが、初めて明らかになりました。

今後の展望

以上のように、硬X線領域で初めて、可飽和吸収や光導波路、原子準位レーザー（利得）、原子遷移制御が可能になり、当初提案していたすべての能動光学素子の実現に成功しました。このような素子を組み合わせることによって、近い将来、硬X線レーザーでも新しい硬X線フォトニクスが実現できると考えています。

関連する科研費

2013-2015年度 基盤研究 (A) 「超高強度X線場を用いたホロー原子固体状態の研究」

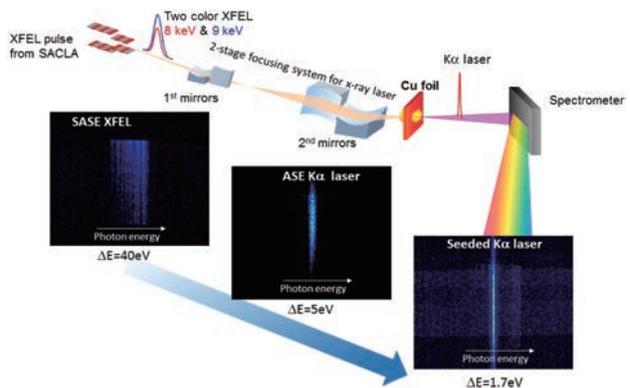


図2 XFEL励起X線レーザーのSACLA集光システム、計測系の概念図。同時に分光器で得られたスペクトルを表示してある。通常XFELがSASEモードと呼ばれる動作モードで発振しているが、その時のスペクトルは40eV程度の幅でランダムにピーク位置が変わる状態であった。CuのK α レーザーが実現し、そのバンド幅が5eVまで短縮された。ここにさらにシード化を行うことで、1.7eVの線幅の光を発生できることがわかった。