



2015年8月21日
国立大学法人電気通信大学
国立研究開発法人理化学研究所
公益財団法人高輝度光科学研究センター
国立大学法人東京大学
国立大学法人大阪大学
国立大学法人京都大学

世界最短波長の原子準位レーザーを実現

-金属銅箔から理想的なX線レーザー光が発生-

[概要]

電気通信大学（学長：福田 喬）、理化学研究所（理事長：松本 紘）、高輝度光科学研究センター（理事長：土肥 義治）、東京大学（総長：五神 真）、大阪大学（総長：西尾 章治郎）、京都大学（総長：山極 壽一）の研究チームは、世界最先端のX線自由電子レーザー^{※1}施設「SACLA^{※2}」の技術を利用して、通常の電気配線などに使われるような銅箔が、理想的なX線レーザー光を生成することを世界で初めて見出しました。このレーザーは、硬X線領域で初めて実現された、世界最短波長の原子準位レーザー^{※3}です。

レーザーの発生方式には、大きく分けて、原子や分子にエネルギー準位差を使う方法（原子・分子準位レーザー）と、真空中の自由電子を使う方法（自由電子レーザー）の二通りがあります。前者の方式は、可視～近赤外域で多く用いられますが、X線を含む短波長領域への応用は困難でした。一方、後者は、原理的に波長の制約がなく、最近の技術開発によって、SACLAをはじめとするX線自由電子レーザー（XFEL）が実現し、大きな成果を挙げています。しかし、原子準位レーザーは絶対波長の決定や物質との強い共鳴などの光特性をもつため、依然として短波長領域での実現が強く期待されていました。

X線領域の原子準位レーザーを実現するためには、原子を取り巻く電子のうち、最も原子核に近い電子^{※4}を効率的に取り除く必要があります。研究チームは、X線自由電子レーザー施設「SACLA」の「2段集光光学システム」を使って、この特異な状態をつくり出すことに成功しました。（図1参照）さらに、この媒質に、「SACLA」で作った別の弱いX線をほぼ同時に入射することにより、フーリエ限界^{※5}と呼ばれる理想的な原子準位レーザーの発振に成功しました。この原子準位レーザーのもつ波長1.5オングストローム^{※6}は、従来の1/10以下という極めて小さい値であり、世界で初めて硬X線領域の原子準位レーザーを実現しました。この過程には、光で原子を制御することが可能な強い誘導放出という現象を使います。これにより、自然界が決める原子内のエネルギーの流れのルールすら変更可能であることを、X線の領域で初めて観測しました。

本研究では、小さな材料にX線自由電子レーザーを照射するだけで、さまざまな原子からさまざまな波長をもつきれいなX線レーザーを発振させる技術を実現しました。機能性の高いX線レーザーを使った応用研究が進展すると期待されます。

本研究の成果は英国のNature の2015年8月27日付オンライン版で発表されます。

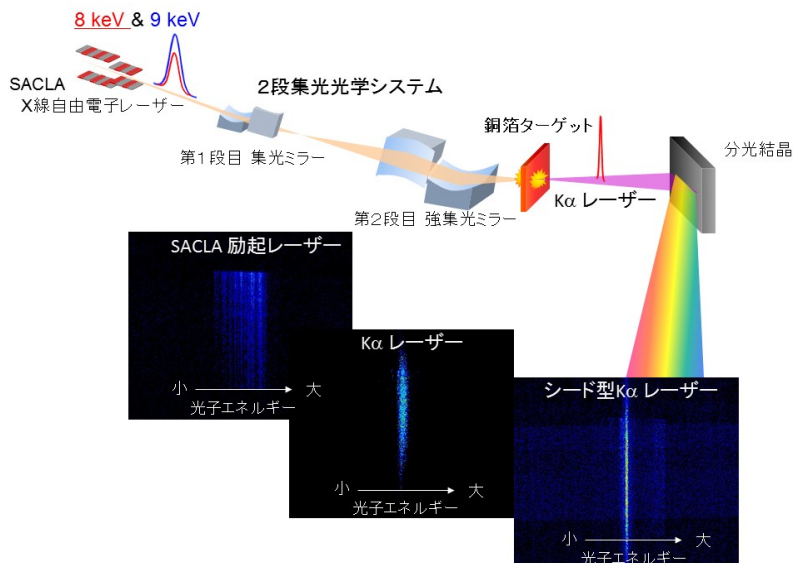


図1 K α レーザーの原理

XFELであるSACLAの2色発振（左上部、8キロエレクトロンボルト^{※7}（keV）と9keVの2つの光）と2段集光光学システム（上中央部）を使い、銅箔に照射することで波長が銅のK α 線に決まった鋭いスペクトルピークを持つレーザーが発生（下部スペクトル図で、幅の狭いX線が観測されている。）

[詳細な説明]

1. 背景

レーザーの発生方式には、大きく分けて、原子や分子内の電子準位などのエネルギー差を使う方法（原子・分子準位レーザー）と、真空中の自由電子を使う方法（自由電子レーザー）の二通りがあります。多くの場合前者の方式が用いられますが、X線を含む短波長領域への応用は困難でした。X線領域の原子準位レーザーを実現するためには、原子を取り巻く電子のうち、最も原子核に近い電子を効率的に取り除く必要があるからです。一方で、X線自由電子レーザー(XFEL)の誕生により、1平方センチメートルあたり 10^{19} ワットを超すX線強度を達成できるようになりました。それを使って、固体内部の原子の最も深い準位の電子（もっとも原子核に近い電子）だけをイオン化させて取り除き“空席を作った状態”にすることができます。この空席状態はエネルギー的に不安定な状態なので、同じ原子内の外側の電子が移動してきて空席を埋めますが、その時、エネルギー差に相当する光(K α 線^{※8})か電子(オージェ電子^{※9})を放出します。本研究では、この光を出す過程を利用して、X線領域の原子準位レーザーを発振させることに成功しました。(図2)

このレーザーを実現するためには、光を出す上の準位の数と下の準位の数において上が多いようにしなくてはなりません（負温度）。通常は、下準位の密度が圧倒的に多く、レーザーの特徴である“増幅^{※10}”現象は起きません。特に、今回のように原子の中の深い準位の場合は、空席が埋まる速度が非常に速く、1フェムト秒（ 10^{-15} 秒）後には空席がなくなってしまいます。したがって光を増幅できるほど空席を作るためには、桁違いに強い励起強度で電子をたたき出す必要があります。詳細には、励起強度は波長の4乗に反比例するので、波長を10分の1に短縮したレーザーを発振させるためには、10,000倍高い励起が必要になるといえます。

本研究では、世界最高性能を誇るX線自由電子レーザー「SACLA」でこの特異な状態を実現し、従来達成された原子準位レーザーの波長を一気に1/10程度まで短くして、1.5オングストローム（Å）

という固体中の原子間隔（格子定数）以下の波長で発振させることに成功しました。

2. 研究手法と成果

本研究では「SACLA」からの X 線を 2 段集光という方法で 100 ナノメートル^{※11}程度に集光し、1 平方センチメートル当たり 10^{19} ワット (W) というこれまでの SPring-8 などの X 線よりも 10 桁以上強い強度の X 線を生成しました。この X 線を、20 ミクロン（1 ミクロンは 0.001 ミリメートル）という薄い銅箔に照射し、銅箔が発光する X 線（ $K\alpha$ 線）の特性を計測しました。入射強度が、1 平方センチメートル当たり 2×10^{19} ワット (W) を超えたところから、指数関数的に $K\alpha$ 線の強度が増大することを観測しました（図 3）。さらに、この増幅が起きている場所に SACLA からの 2 本目の X 線を入射し発光スペクトルを計測したところ、1.7 eV という狭いスペクトル幅において選択的に X 線の強度が増大していることがわかりました。これらによって、世界で初めて、硬 X 線領域の原子準位レーザーの発振が確認されました。

3. 今後の展望

今回の研究では、原子から理想的な X 線レーザーを発生させることに成功しました。このスペクトルを詳しく調べることによって、原子準位レーザーの特異な振る舞いの解明が進むと期待されます。さらに、今後、さまざまな原子を使って、波長が正確に決まった X 線レーザーを発振させることができます。このレーザーの媒質のサイズは、たった 50 ナノメートル (nm) 直径で 10 ミクロン (μm) の長さしか必要としません。さまざまな材料が、X 線レーザーとして利用可能になると期待されます。将来は、これまでみつかった可飽和吸収体や光導波路効果などを併用して、集積化されたデバイスから所望する X 線を取り出せる時代が来ると考えています。

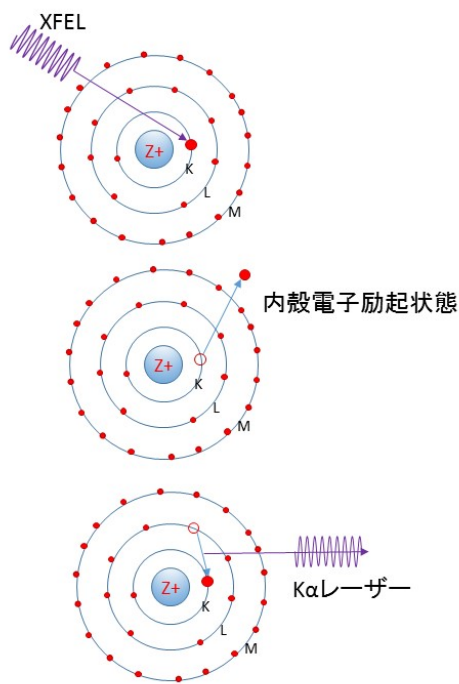


図 2 原子準位レーザーの原理

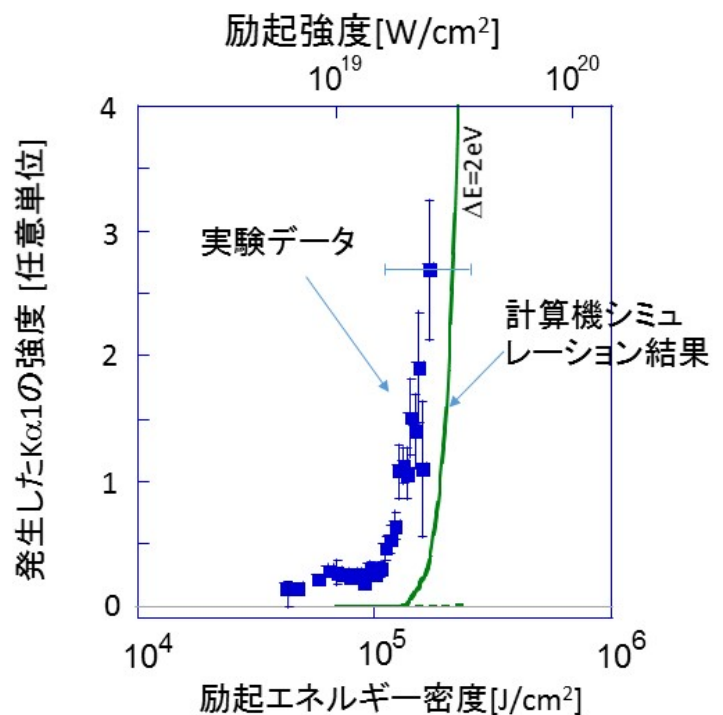


図 3 観測された増幅現象

<報道担当・問い合わせ先>

(問い合わせ先)

国立大学法人電気通信大学 レーザー新世代研究センター
センター長 米田 仁紀 (よねだ ひとき)

国立研究開発法人理化学研究所 放射光科学総合研究センター
XFEL 研究開発部門 ビームライン研究開発グループ
グループディレクター 矢橋 牧名 (やばし まきな)

公益財団法人高輝度光科学研究センター
XFEL 利用研究推進室 先端光源利用研究グループ
実験技術開発チーム
研究員 犬伏 雄一 (いぬぶし ゆういち)

国立大学法人東京大学大学院工学系研究科
准教授 三村 秀和 (みむら ひでかず)

国立大学法人大阪大学大学院工学研究科
教授 山内 和人 (やまうち かずと)

国立大学法人京都大学大学院理学研究科
助教 北村 光 (きたむら ひかる)

(報道担当)

国立大学法人電気通信大学 総務課広報係

国立研究開発法人理化学研究所 広報室 報道担当

公益財団法人高輝度光科学研究センター

利用推進部 普及啓発課

国立大学法人東京大学

大学院工学系研究科 広報室

国立大学法人大阪大学 工学研究科

総務課 評価・広報係

国立大学法人京都大学

企画・情報部広報課

<用語解説>

※1 X線自由電子レーザー (XFEL : X-ray Free-Electron Laser)

X線領域で発振する自由電子レーザー (Free-Electron Laser)であり、可干渉性、短いパルス幅、高いピーク輝度を持つ。自由電子レーザーは、物質中で発光する通常のレーザーと異なり、物質からはぎ取られた自由な電子を加速器の中で光速近くに加速し、周期的な磁場の中で運動させることにより、レーザー発振を行う。

※2 SACLA (SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsEr)

理化学研究所と高輝度光科学研究センターが共同で建設した日本で初めてのXFEL施設。科学技術基本計画における5つの国家基幹技術の1つとして位置付けられ、2006年度から5年間の計画で整備を進めた。2011年3月に施設が完成し、SPring-8 Angstrom Compact free electron LAsErの頭文字を取ってSACLAと命名された。諸外国で稼働中あるいは建設中のXFEL施設と比べて数分の一というコンパクトな施設の規模にも関わらず、0.1ナノメートル以下という世界最短波長のレーザーの発振能力を有する。

詳細は<http://xfel.riken.jp/>

※3 原子準位レーザー

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ここではいう。

※4 最も深い準位の電子

原子内にはその原子番号の数だけ電子が存在し、原子殻に近い側から $n = 1$ (K殻)、 $n = 2$ (L殻)、 $n = 3$ (M殻)という風に電子が2、8、18個というように内側から空席を作らずに配置されている。この中で最も深い準位とは原子核に最も近い軌道をとる $n = 1$ のK殻の電子のことをいう。(図4参照)

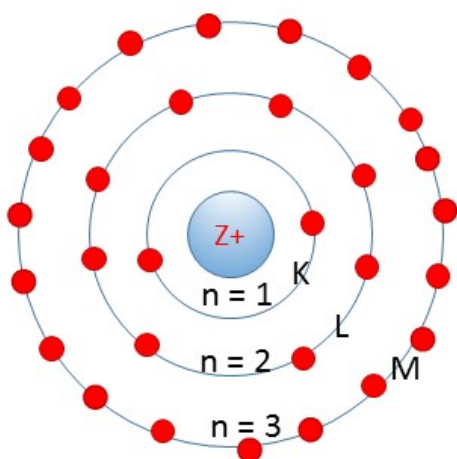


図4 原子内の電子の構造

※5 フーリエ限界

すべての現象で、それにともなう周波数幅と時間幅の間には積が1以上になるという条件が存在する。この研究の場合、観測されたスペクトルの線幅と発光している時間には、ある一定以下にはならないこ

となり、そこまでしかスペクトルを狭窄化（狭く、鋭く）することしかできない。この場合、発生した光は図5 (b)のように1つの波の束として放射され、これが理想的な限界状態となっている。

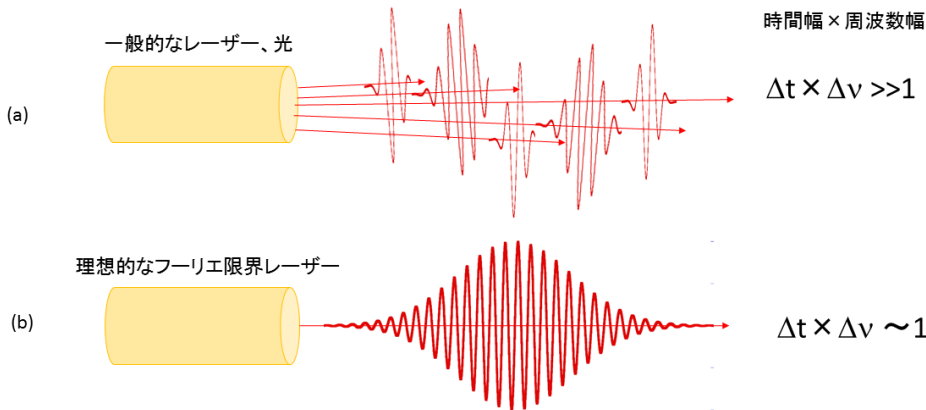


図5 一般の光(a)と理想的なフーリエ限界の光(b)

※6 オングストローム

1メートルの100億分の1。原子の大きさ程度の長さ。

※7 エレクトロンボルト

エネルギーの単位で1エレクトロンボルトは約 1.6×10^{-19} ジュール。キロエレクトロンボルトはその1000倍。

※8 $K\alpha$ 線

図4で $n = 1$ のK殻に空席ができた時、 $n = 2$ のL殻からの電子がその空席に移動して埋め、その際に放出するX線のことを言う。これには、 $K\alpha_1$ 、 $K\alpha_2$ というL殻の電子の種類によりエネルギーのわずかに異なる光を放出し、その強度比は自然界では2:1となっている。

※9 オーグジュ電子

図4で $n = 1$ のK殻に空席が生じた場合、L殻の電子1つがK殻の空席に移動し、エネルギー収支を合わせるために、もう一つのL殻の電子が外部に放出されることで生じる電子のこと。

※10 増幅（光の増幅）

入射した光は、一般の物質では必ず吸収の方が大きく、強度が大きくなって出てくることはありません。これは、ボルツマン則という光を吸収しやすいエネルギーの低い状態の状態数が光を放出できる高いエネルギーの状態より小さいという原理から説明されています。レーザーでは、この状態を反対にさせ、高いエネルギーの状態数を多くし、誘導放出という同じ光のコピーを作る方法で増えて行く現象を作ります。これがレーザーの原理の光の増幅になります。

※11 ナノメートル

1メートルの10億分の1。