



展 TENBO 望

世界最短波長原子準位レーザー Cu $K\alpha$ レーザーの実現の意味

米田 仁紀

Yoneda Hitoki

(電気通信大学レーザー新世代研究センター)



1 はじめに

2009年にアメリカのスタンフォード大学 SLAC 研究所¹⁾で、2011年には日本の播磨の SPring-8²⁾で、X線自由電子レーザー XFEL が相次いで発振した。直線加速器で作られた質の高い電子ビームを、アンジュレーターと呼ばれる周期磁場中を通し、空間コヒーレンスの高いX線を発生させたことになる。このXFELによって、10 keV 程度の光子エネルギーで 10 fs のパルス幅で、50 nm 程度まで集光できる³⁾ ことになり、人類は強力なX線場を手に入れた。ここでは、この強力なX線を原子に照射し、世界最短波長の原子準位レーザーを発振させることに成功した⁴⁾ 研究について解説する。

2 X線自由電子レーザー励起原子準位レーザー

XFEL レーザーパルスを原子の内殻電子の準位エネルギーに合わせて照射すると、原子内のもっとも原子核に近いK殻の電子の1つを選択的に励起することができる。いわゆるK殻軌道に空席ができた状態になるが、よく知られているように、この空席は、その後いくつかの方法でL殻電子がK殻に移ることで緩和していく(図1)。この過程は、大きく分けて電子が放出されるもの、X線を出すものに分けられる。今回、XFELによって高密度にこの励起状態を生成させ、この放射X線過程が利得を持つまで上準位密度が増加し、レーザーとして発振することができたのである。具体的には、この上準位密度の緩和速度はCuなどの遷移金属では 1 fs^{-1} を超える。すなわち作った直後からなくなるような

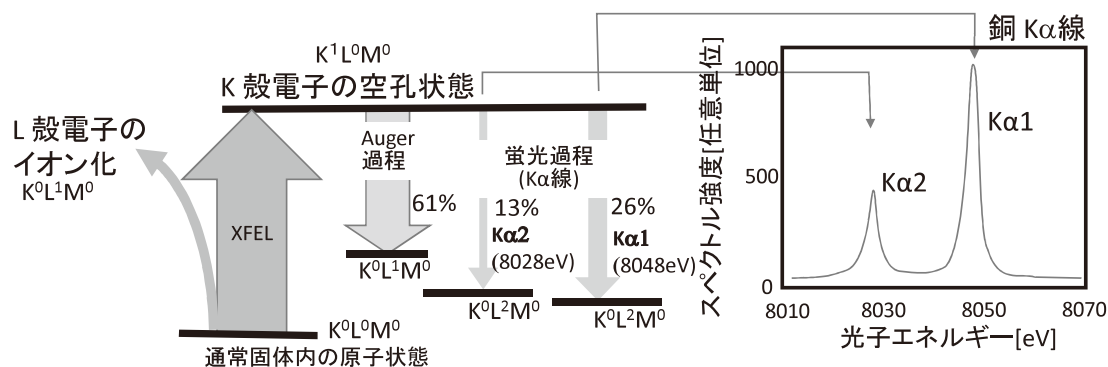


図1 K殻に共鳴なハードX線を物質に照射した場合の緩和過程

もので、その減衰速度を上回る励起速度が必要になる。この強度は 10^{19} W/cm² 以上でこの強度が XFEL と高精度の X 線光学で達成できたので、この研究が実現できた。

3 レーザーであるということ、レーザーが強く発生するということ

媒質内でレーザーが発生するのは、強い誘導放出が起きているということであり、そこにある原子、分子などがそろってある一定の光を出すようになることを意味する。よく光 (X 線) の増幅がレーザー動作では強調されるが、放射する原子分子も制御される状態になる。前述の内殻電子が空席状態である状態からの X 線は、これまで特性 X 線と言われ、物質固有のものとして元素同定に使われたり、ほぼ単色の X 線を出す手段として用いられてきた。しかし、この過程は通常ではあまり効率的な放射源とはなっていない。例えば、銅の $K\alpha 1$ 線といわれる発光への分岐比はおよそ 26% であり、60% 近くが Auger 過程と呼ばれる電子放出過程になっている。また、放射も通常 of 自然放出過程であるので、あらゆる方向に光が出てしまう。だが、いったんレーザーが強く発振すると、自然放出過程と誘導放出過程では後者のほうが大きくなり、やがてほぼ全発光がレーザーとなって出てくる。ハード X 線でこれができるようになったわけである。今までバラバラで出ていた特性 X 線が、光波としてそろった状態になり、それだけでなく、いわゆる上準位にたまったエネルギーが、選択的にこのレーザー光になる過程に引き込まれていくので、様々な分岐比を無視した集中が起きる。実験ではシードといわれるわずかに弱い種となる光を励起する光と同時に入れることで、選択的に発振するレーザー波長を決めることができるが、図 2 に表されているように、本来 13% しか分岐比がない $K\alpha 2$ 線についても単独に近い状態で発振させることができるようになったのである。

さらに、この実験で発振しているスペクトル線幅を見ると、1.7 eV と通常の上準位の寿命で決まる自然幅よりも狭くなってきていることがわかった。これにより、疑似的に長い時間発光するようになってだけでなく、同じ上準位を持ち 1 fs 以下で通常遷移すると考えられる Auger 過程についても、制御

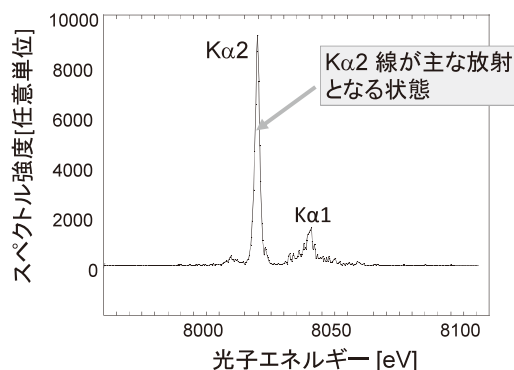


図 2 純 $K\alpha 2$ 線の発振スペクトルの一例

した状態で発光させることが期待できるようになった。このように、コヒーレンスに優れた X 線レーザーができたことで、これまで人類があまり触れることができない原子の深い準位の電子軌道における、原子制御の新しい可能性を見出せたことになる。

4 さらに新しい X 線のレーザーへ

図 3 に、シードをかけずに発振させた $K\alpha$ レーザーのスペクトルの詳細な形を示す。このようにスペクトル制御をかけない場合、利得のあるスペクトルの情報が得られるが、図のように $K\alpha 1$ 線のスペクトルは励起強度が上がるにつれ徐々に赤方シフトした成分が増加してきて、最終的には $K\alpha 2$ 線的位置まで広がっていくことがわかった。もし、この幅の広いスペクトル範囲ですべての波長で位相を制御したコヒーレントな光を出せれば、スペクトル幅の逆数で決まる時間幅まで短パルス化したレーザーを発振することができる。裾野の幅で 25 eV 程度あり、これに対応する最短パルス幅はおよそ 80 アト秒にもなる。利得は観測されているので、あとは位相制御だけであれば、硬 X 線の領域においてもアト秒までの短縮化がさらに一段と進むであろう。

この赤方シフトの理由について、1つの可能性として 3d 電子軌道での空孔密度の増加があることがわかってきた。M. Deutsch らによると、通常の固体の $K\alpha$ 線でも赤方シフト成分があり、これは 3d 電子の空席に依存しているという結論が出ている⁵⁾。よく知られているように、3d 電子は Cu などの原子で最外殻の電子軌道であり、それが最内殻の電子遷移の準位エネルギーに影響する。言い換えれば、わずかな作用 (3d 電子の状態を変化させる) だけで、

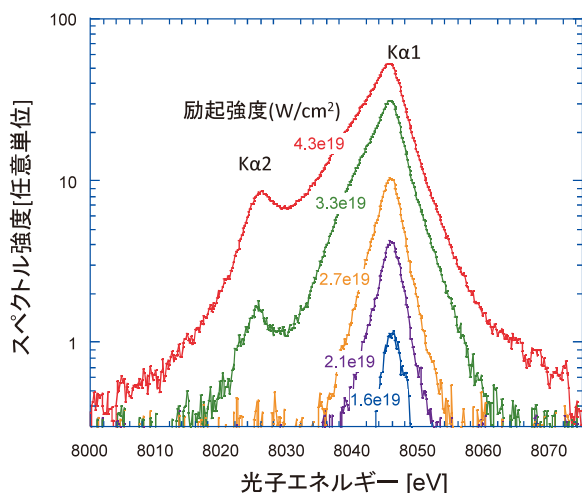


図3 $K\alpha 1$ 線のスペクトル形状の励起依存性

8 keV ものハード X 線のスペクトルを制御できることを意味しており、新たなハード X 線制御の可能性が出てきたといえるであろう。

この話をある会議で友人にしたところ、「じゃあ、Auger も加減速できるじゃないか」というコメントをもらった。レーザーのことだけ考えるかぎりでは放射を出さない Auger 過程は敵でしかなかったが、確かに、反位相の強い X 線レーザーを照射すれば、放射が消えて Auger 過程を 100% に近く制御することも可能になる。特に高い原子番号の原子では、

Auger 過程の分岐比が落ちてくるので、より有効かもしれない。そうなれば、内殻電子の挙動を人工的に制御できると言ってよくなるだろう。

では、この研究の次なるステップは何か。レーザーの分野では、強い光が出てくれば、次は非線形光学だと考えられている。実際のところ、XFEL が発振し、2 光子吸収過程⁶⁾、2 次高調波発生⁷⁾、可飽和吸収過程⁸⁾といった現象が観測されている。しかし、物質透過に優れたハード X 線は応用範囲が非常に広いので、ハード X 線自体を自由に制御できる方法の開発が重要になってくる。前述したとおり、ある種のスペクトルはわずかなエネルギーで制御できそうである。これらを駆使した新しいフォトンクス研究を立ち上げることを考えている。

参考文献

- 1) Emma, P., *et al.*, *Nature Photon.*, **4**, 641–647 (2010)
- 2) Ishikawa T., *et al.*, *Nature Photon.*, **6**, 520 (2012)
- 3) Mimura, H., *et al.*, *Nature Commun.*, **5**, 3539 (2014)
- 4) Yoneda, H., *et al.*, *Nature*, 14894 (2015)
- 5) M., Deutsch, *et al.*, *Phys.Rev. A* 51, 283 (1995)
- 6) Tamasaku, *et al.*, *Nature Photon.*, **8**, 313 (2014)
- 7) Shwartz, *et al.*, *PRL*, **112**, 163901 (2014)
- 9) Yoneda, *et al.*, *Nature Commun.*, **5**, 5080 (2014)