

2005年2月2日  
独立行政法人 理化学研究所

## 世界最強の軟 X 線レーザーで非線形光学現象の観測に成功

### - X 線領域での新たな光学の幕開け -

#### ◇ポイント◇

- 世界ではじめて X 線領域で 2 光子イオン化という非線形光学現象の観測に成功。
- X 線光学の分野に革新的な計測・解析技術や新しい粒子操作技術等へ期待。

独立行政法人理化学研究所（野依良治理事長）は、世界最高強度の軟 X 線レーザービームを使って非線形光学現象の観測に初めて成功しました。中央研究所緑川レーザー物理工学研究室の緑川克美主任研究員らの研究グループによる研究成果です。

緑川主任らは、高次高調波という可視レーザー光を軟 X 線レーザー光に変換する方法を独自の方法で改良し、約 2 年前に従来法より 100 倍以上の強度の軟 X 線レーザー光を得るのに成功しました。今回は、この世界最高強度の軟 X 線レーザー（波長 29.6 ナノメートル）をヘリウムガスに照射して、世界ではじめて X 線領域で 2 光子イオン化という非線形光学現象の観測に成功しました。非線形光学現象は、光強度が非常に強くなると初めて起こる現象で、通常、原子や分子は、一度に一つの光子しか吸収できないのに対して、一度に多数個の光子を吸収し、1 光子の場合とは全く異なる現象が現れます。

レーザーの発明後間もなく 1961 年に第 2 高調波の発生と 2 光子吸収の観測に端を発して、非線形光学という当時では全く新しい光学分野が急速に開拓され、レーザー光の応用が画期的に広がりました。レーザーの出現による非線形光学の発展がそうであったように、X 線領域での非線形現象の発現もまた、X 線光学の分野に革新的な計測・解析技術や新しい粒子操作技術等をもたらし、ナノテクノロジーやバイオテクノロジーあるいは IT テクノロジーの発展を支える基盤技術となるものと期待されます。

本研究成果は、米国の科学雑誌『Physical Review Letters』のオンライン版（2 月 4 日）に発表されます。

### 1. 背景

レーザー開発に携わる研究者の大きな夢の一つが、その波長\*1 を X 線領域にまで拡張することです。X 線領域のレーザーが実現されれば、ナノメートル以下の精度で様々な物質の加工が可能になるばかりでなく、生体物質の 3 次元構造解析等にも大きな力を発揮するものと期待されています。特に、非線形光学効果が起こせるようになると、その応用は飛躍的に広がるものと考えられています。

図 1 に示すように 1960 年のルビーレーザーの発振以来、幾つかの技術開発によりレーザー出力は飛躍的に増大し、物質との相互作用において様々な新しい現象を生み出してきました。そのなかでも、もっと重要なのが非線形光学現象です。非線形光学現象は、光強度が非常に強くなると初めて起こる現象で、通常、原子や分子は、一度に一つの光子しか吸収できないのに対して、一度に多数個の光子を吸収し、

1 光子の場合とは全く異なる現象が現れます。これによって、レーザーの応用が画期的に広がりました。

しかし、X線領域では、この非線形現象を起こすのに必要なレーザーパワーは、可視光のレーザーに比べるとはるかに大きくなるため、従来のX線源や放射光のような光源では、非線形現象を観測することは不可能でした。

## 2. 研究手法と成果

強力なX線レーザービームを発生させる一つの方法に、高次高調波があります。高調波発生とは、レーザー光を気体や結晶等に照射すると、元のレーザー光の整数倍の周波数（整数分の一の波長）をもつレーザー光が放出される現象です。しかし、通常のレーザーを用いても、せいぜい数倍の周波数（波長で数分の一）の光しか発生できません。高強度フェムト秒レーザーを原子や分子気体中に集光して得られる高次高調波では100次以上への変換が可能のため、テーブルトップサイズの軟X線レーザー光源として盛んに研究されており、その波長域は、生体物質を生きたままの状態を観測できる、いわゆる“水の窓”といわれる2~4 nmにまで達しています。理研では、独自の発生法を工夫し、ほぼ完ぺきなビーム形状を維持したまま、この高調波強度を従来法に比べて100倍以上にすることに成功しました。図2に示すように、この軟X線レーザービームの瞬間的強度は、シンクロトロン放射光の1億倍にも達します。

今回は、この世界最高強度の強力なX線レーザー光をヘリウムガスに照射して、世界ではじめて軟X線領域で2光子イオン化という非線形光学現象の観測に成功しました。図3が、その結果で、軟X線レーザー強度に対してイオン化の信号が2乗の割合で増加しています。

## 3. 今後の展開

高次高調波に加えて自由電子レーザー、プラズマ軟X線レーザー等のX線領域における高輝度光源の急速な進展は、非線形光学の新しい扉を開くものと期待されています。今回の成果は、正しくその幕開けを告げるものです。今後は、2光子イオン化以外の様々な非線形光学効果の観測を進めるとともに、波長をさらに短くし、この高強度を生きた細胞の観測等に有効な波長4ナノメートルで実現したいと考えています。

(問い合わせ先)

独立行政法人理化学研究所

中央研究所 緑川レーザー物理工学研究室

主任研究員 緑川 克美

Tel : 048-467-9492 / Fax : 048-462-4682

(報道担当)

独立行政法人理化学研究所 広報室

Tel : 048-467-9272 / Fax : 048-462-4715

Mail : koho@riken.jp

## <補足説明>

※1 電磁波の呼称とその波長および光子エネルギーの範囲。今回、観測に成功したのは、波長 29.6nm (42 eV) である。

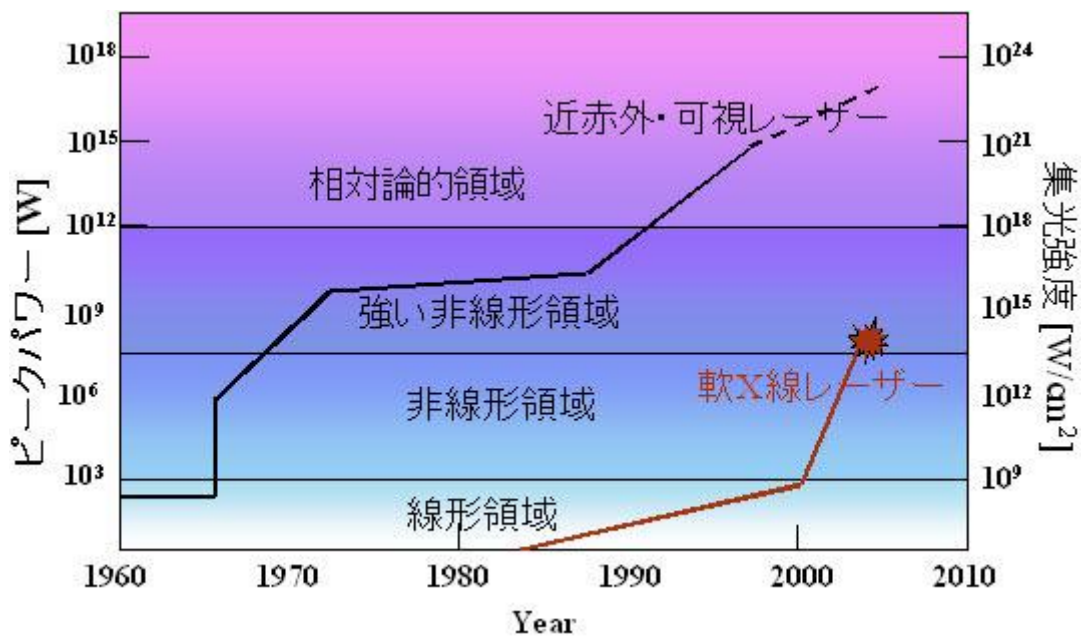
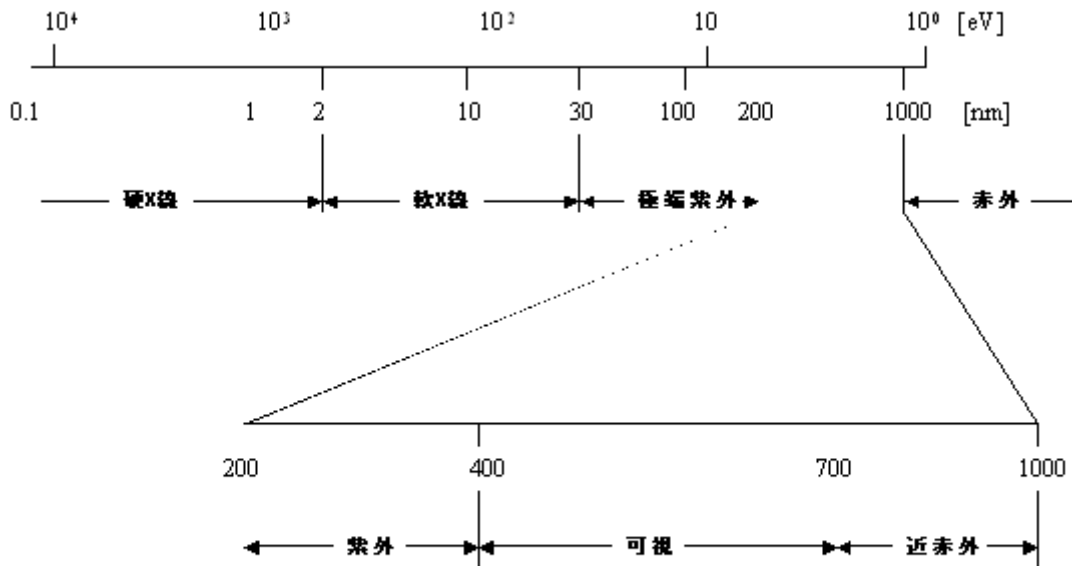


図1 レーザーのピークパワーと集光強度の進展。黒線は、近赤外から可視域のレーザーによるもの。赤線が軟X線レーザー。

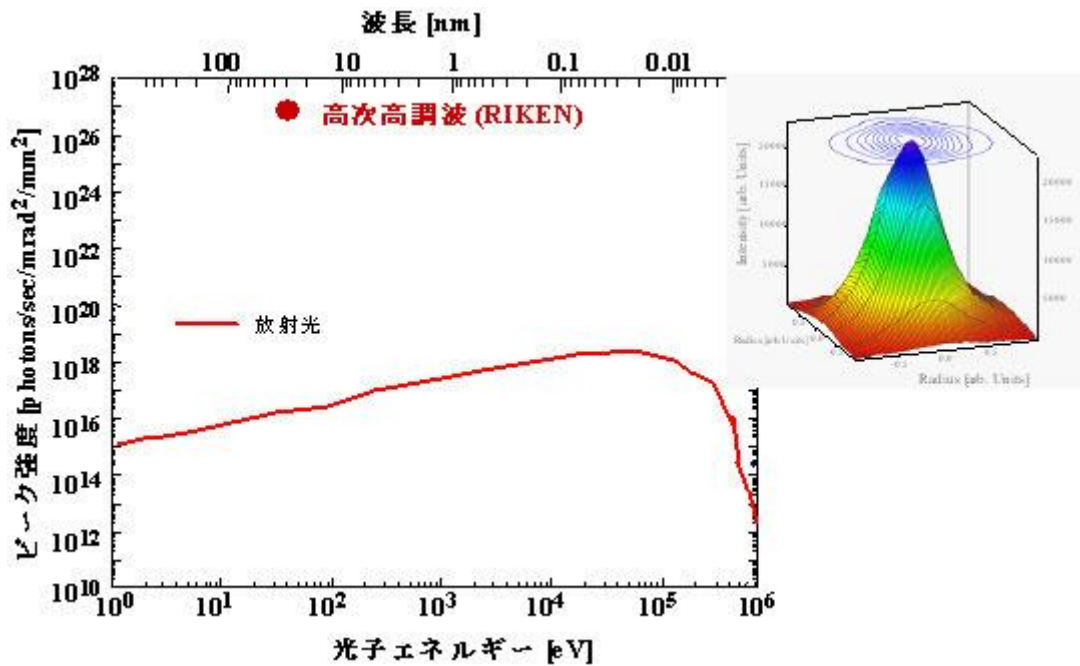


図2 理研が独自に開発した世界最強の軟X線レーザー光源と放射光との強度の比較。挿し絵は本光源から得られたビームの空間形状。空間的にほぼ完ぺきなビームが得られたことが、今回の成果をあげる上では重要な役割を果たしている。

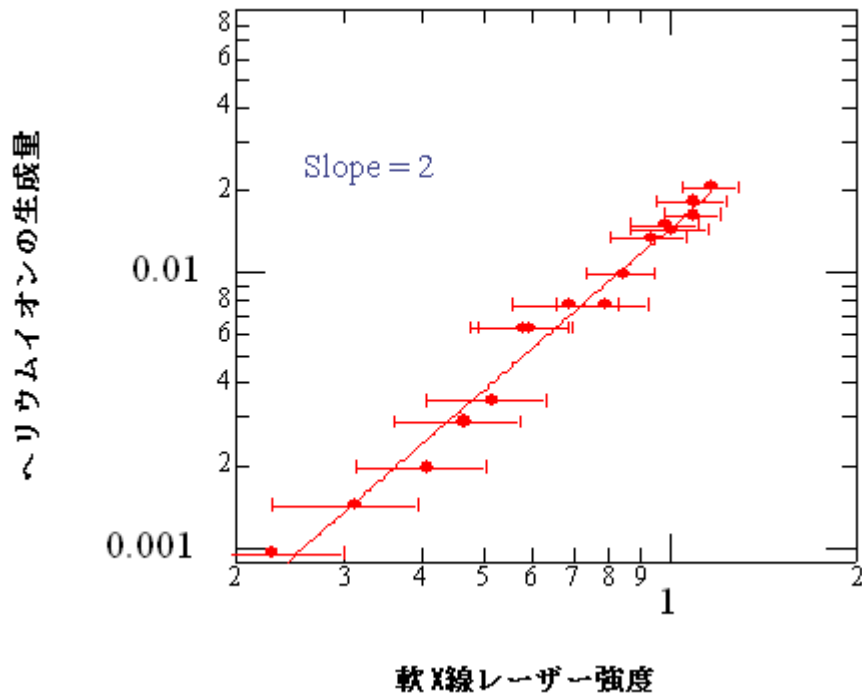


図3 軟X線レーザー強度に対するヘリウムイオンの生成量。グラフの傾きが2であることが、2光子過程であることを示している。