

光パルスが発生可能なスペクトル領域は極端紫外域にとどまっています。これは、チタンサファイアレーザーの波長で決まっているもので、この手法のまま極端紫外を超え軟 X 線領域に拡張することは困難です。近年、高調波発生用のドライブレザーの波長を長くすれば軟 X 線高調波が発生するとの認識が急速に広まり、10 年の停滞を打破する、軟 X 線アト秒パルス発生、並びに、軟 X 線超高速分光への道を切り開くことが最先端の研究となっています。

2010 年板谷研究室に特任研究員として、また 2011 年 1 月に助教として着任以降、軟 X 線アト秒パルス発生と軟 X 線超高速分光という目標を見据えて、次世代の赤外光源開発に着手してきました。2012 年に波長が 1600 nm の赤外光源の開発が成功裏に終わり [2]、この次世代赤外光源を用いて高次高調波発生実験を行いました。これまで軟 X 線高調波発生実験は世界に数例ありますが、アト秒パルス発生に必要な数サイクル赤外光パルスで高調波発生実験をおこない、単一パルス発生を示唆した実験例はありません。開発した赤外光源は軟 X 線単一アト秒パルス発生に必要な条件を備えており、実際に、単一アト秒パルス発生を示唆する結果を軟 X 線領域(200–325 eV)において得ることができました[1]。この軟 X 線パルスのスペクトルは、水の窓領域(284 – 540 eV)と呼ばれる、イメージング等の生物応用上重要な領域をカバーすることに成功しました。水の窓領域とは、炭素原子の吸収が存在し、かつ水の吸収の少ない、生きたままの生体の可視化に有用なスペクトル領域を指します。水の窓領域における単一アト秒パルスの示唆する実験は世界で初めてであり、これらの一連のレーザー開発と応用実験を評価していただき、今回の受賞につながったと考えております。今回の研究成果の意義は、図 1 に示した最短光パルスの変遷において、極端紫外域に停滞を余儀なくされていたアト秒パルスを軟 X 線領域に拡大し、光のパルス幅をさらに圧縮する可能性を示したことです。図 2 は高強度レーザー並びに高調波光源と近年進展が著しい X 線自由電子レーザー(XFEL)の典型的なスペクトル領域と時間幅の変遷を表しています。現在までに高強度レーザーはその時間的なコヒーレンスのよさから、技術の進歩と共に、フーリエ限界線近くの時間分解能を有するようになって来ていることがわかります。他方、XFEL は、keV 以上のスペクトル領域を主なターゲットとしており、この中において、今回の結果は、極端紫外域の高調波レーザーと XFEL のスペクトルのギャップを埋めるための第一歩でありました。今回の実験により、軟 X 線アト秒パルス発生が示唆されましたが、これから、軟 X 線アト秒パルスの計測を行い、XFEL では成し遂げられない、軟 X 線領域でのアト秒パルス発生を実証していきたいと考えております。また、より将来的な計画として、軟 X 線アト秒パルス発生と計測だけに留まらず、軟 X 線高調波を用いた超高速分光を打ち立ていきたいと考えております。赤外光源により、XFEL に比べて、比較的小規模な実験系から、アト秒の時間分解能を有する軟 X 線パルス光源を発生させることが可能になり、光子エネルギーが 284 eV の炭素吸収端や 540 eV の酸素吸収端での超高速分光が、実験室レベルで可能となる道筋がつかまりました。将来計画として、赤外光源のアップグレードとフォトンフラックスの向上、軟 X 線アト秒パルスの時間幅計測、超高速軟 X 線吸収分光への応用を目指して研究に従事していきたいと考えております。

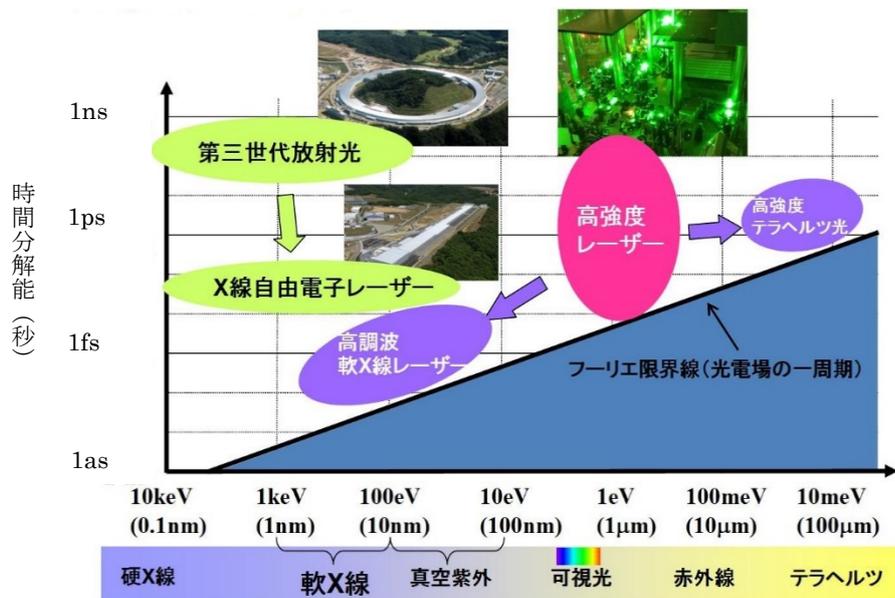


図 2 : レーザーを用いた高調波光源と XFEL

最後に、研究室主催の板谷先生ならびに板谷研究室のメンバーなしではこれらの研究を行うことはできなかったのは火を見るよりも明らかであり、この場を借りて深く感謝申し上げます。また著者名におられます、元物性研副所長、現理科大の渡部俊太郎教授には、今回の実験に関することはもちろんのこと、マックスプランク量子光学研究所から物性研に移る際、並びに移った後の有形無形のご支援について大変感謝しております。

引用文献

- [1] N. Ishii, K. Kaneshima, K. Kitano, T. Kanai, S. Watanabe, and J. Itatani, “Carrier-envelope phase-dependent high harmonic generation in the water window using few-cycle infrared pulses,” *Nature communications* **5**, 3331 (2014).
- [2] N. Ishii, K. Kaneshima, K. Kitano, T. Kanai, S. Watanabe, and J. Itatani, “Sub-two-cycle, carrier-envelope phase-stable, intense optical pulses at 1.6 μm from a BiB_3O_6 optical parametric chirped-pulse amplifier,” *Opt. Lett.* **37**, 4182 (2012).