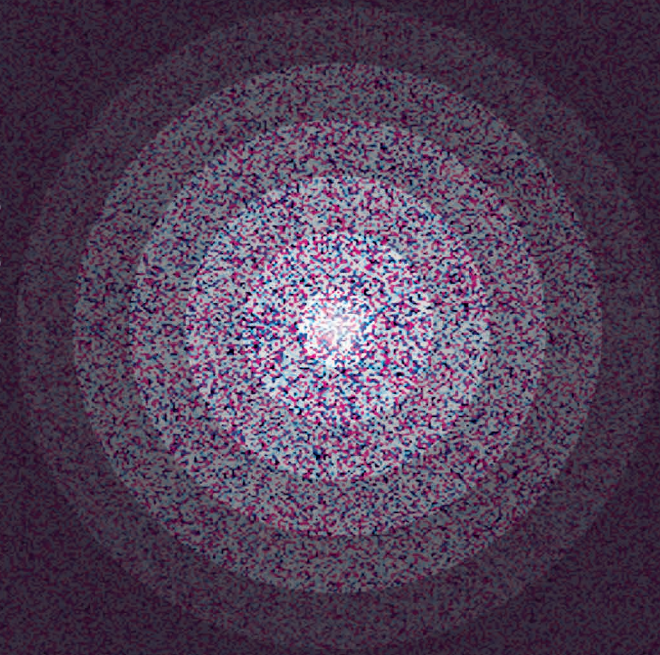


Attosecond Laser & Science



すべての物質の光応答は
アト秒領域での電子の運動によって決まる

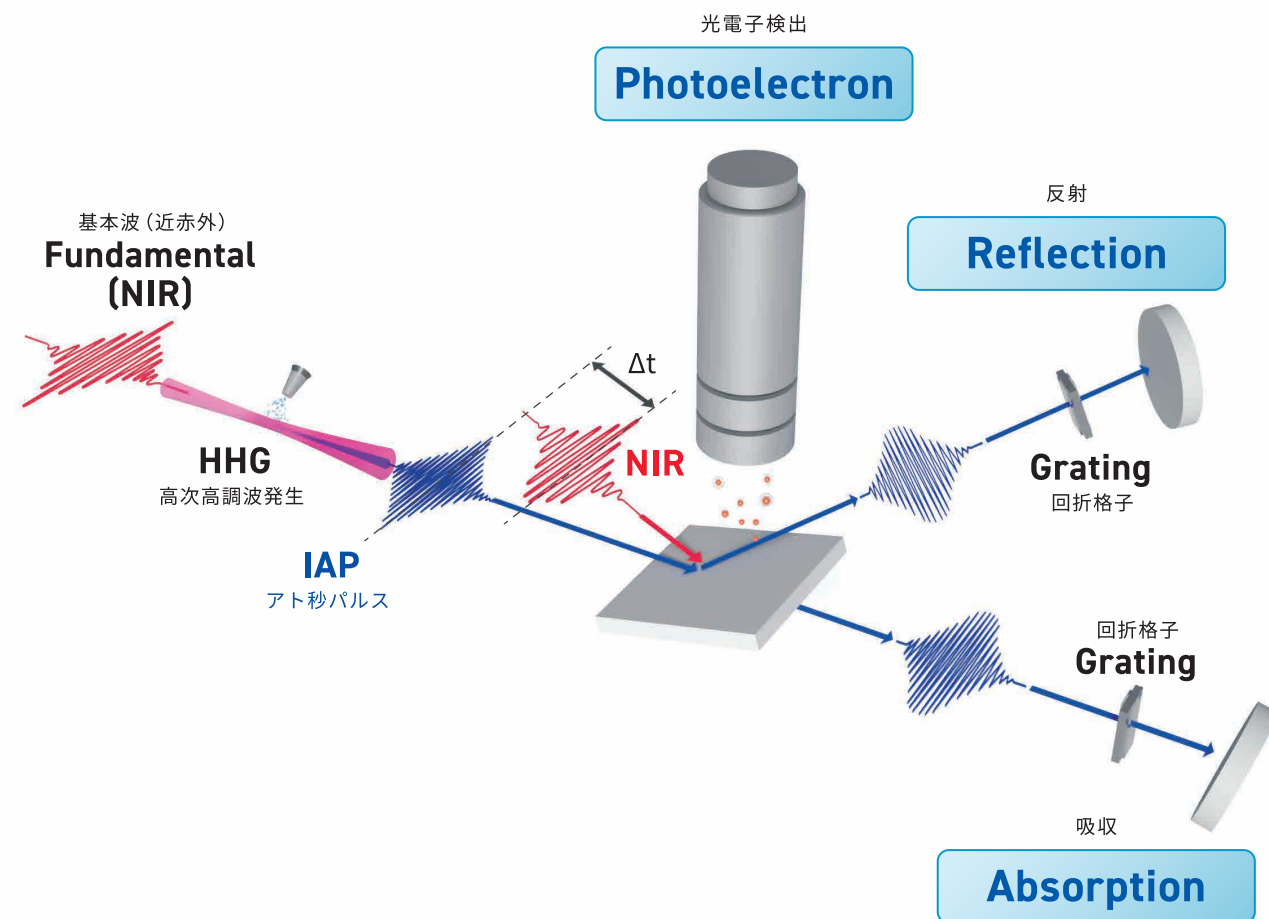
1ミリ秒(ms)	10^{-3} s
1マイクロ秒(μ s)	10^{-6} s
1ナノ秒(ns)	10^{-9} s
1ピコ秒(ps)	10^{-12} s
1フェムト秒(fs)	10^{-15} s
1アト秒(as)	10^{-18} s



アト秒科学の誕生 The birth of Attosecond Science

レーザーによる原子の光イオン化の観測から全てが始まった。レーザーの短パルス化と高強度化に伴い様々な新奇な現象が観測され、実験と理論が絡み合い、トンネルイオン化のメカニズムが、そして、トンネル電子が再衝突することによって高次高調波が発生することが明らかとなった。そして、高次高調波が時間領域においてアト秒光パルスとなることが示された。今、このアト秒パルスを活用して、極めて短いアト秒の時間領域で起こる現象を対象とした基礎、応用研究が展開されている。

It all began with the observation of photoionization of atoms by lasers. With the shortening of laser pulses and the increase in their intensity, a variety of novel phenomena were observed. Experiment and theory became intertwined, clarifying the mechanism of tunneling ionization and showing that high-order harmonics are generated when a tunneling electron recollides. It was then demonstrated that these high-order harmonics in the time domain form attosecond light pulses. By making use of these attosecond pulses, fundamental and applied research is now being developed to investigate phenomena occurring in the extremely short attosecond time domain.



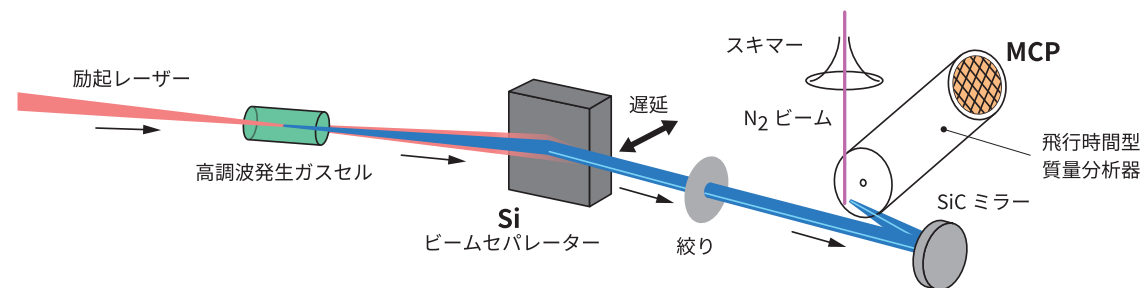
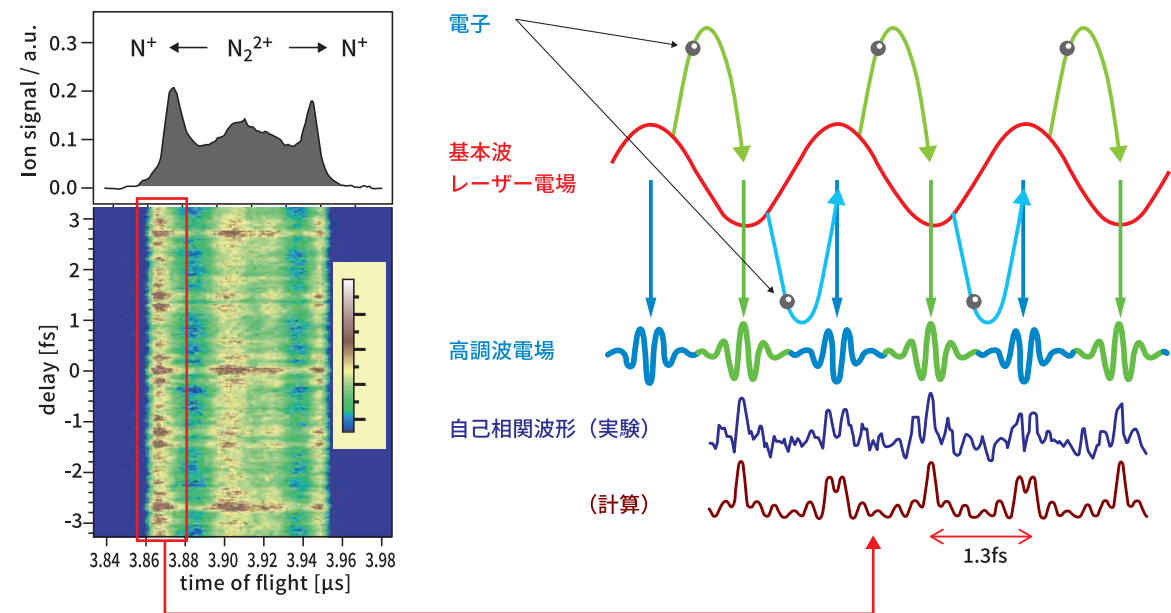
電子を光で制御する Controlling electrons by light

我が国でも、高次高調波が発見された1980年代末から、多くの研究者がこの分野の発展に寄与してきた。2004年、渡部（東京大学物性研究所）らは、自己相関法により950 asの孤立アト秒パルスの計測に成功した。また、緑川（理化学研究所）らは、2002年にそれまでの高次高調波の強度を2桁以上増強する技術を開発し、アト秒領域での様々な非線形現象の観測を進め、2006年には、電場干渉自己相関測定によって、高次高調波の発生原理を実証した。緑川らの電場干渉自己相関測定に基づく一連の実験は、アト秒パルスだけを使ったポンプ・プローブ実験のさががけである。

Since the late 1980s when high-order harmonics were discovered, many researchers in Japan have also contributed to the development of this research field. In 2004, Watanabe and his colleagues at the Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo, succeeded in measuring an isolated attosecond pulse of 950 as using the autocorrelation method. In 2002, Midorikawa and his colleagues at RIKEN developed a technique that enhanced the intensity of high-order harmonics by more than two orders of magnitude to observe a variety of nonlinear phenomena in the attosecond domain. In 2006, they demonstrated the mechanism of the generation of high-order harmonics by electric-field interferometric autocorrelation measurements. A series of experiments based on Midorikawa's electric-field interferometric autocorrelation measurements marked the beginning of pump-probe experiments conducted using attosecond pulses only.

アト秒パルス波形の計測

Measurement of wave form of attosecond laser pulses



アト秒相関計測によってアト秒パルスの電場干渉自己相関波形を
世界で初めて計測

アト秒科学とノーベル賞 Attosecond science and Nobel Prize

2001年、Agostiniのグループは、高強度フェムト秒パルスがArガスに集光することによって、高次高調波を発生させ、2波長2光子干渉法を用いて、一つ一つのアト秒パルスの時間幅が250 asのパルス列が生成することを確認した。そして、同じ2001年、Krauszのグループは、数サイクルの高強度フェムト秒パルスを用いてKrガスに集光することによって、単一アト秒のパルスを発生させ、光電子ストリーキングという方法によって、そのパルス幅が650 asであることを確認した。ATIから始まった一連の仕事の流れは、2001年になってようやくアト秒パルスを発生させること、そして、それがアト秒パルスであることを実証するという一つのゴールに到達した。そして、原子から電子が放出する際に、どの軌道から電子が放出されるかによって、わずかなアト秒領域の差が存在することが明らかにされるなど、今まで、「一瞬で起こる」と思われていた瞬間を、アト秒の精度で実際に確認することができるようになった。このアト秒パルスの生成のおかげで、人類は物質の中で電子が、あるいは電荷分布がどのように変化していくかを実時間で観測することができるようになった。Agostini、Krausz、L'Huillierの三氏は、実験と計測の立場から、このアト秒科学の黎明期に大きな貢献をしたことが評価され、2023年ノーベル物理学賞を受賞した。

In 2001, Agostini's group generated high-order harmonics by focusing intense femtosecond pulses into an Ar gas and, using the two-wavelength two-photon interference method, confirmed that a train of attosecond pulses each of which has a temporal width of 250 as was produced. In the same year, Krausz's group focused few-cycle intense femtosecond pulses into a Kr gas to generate a single attosecond pulse and confirmed that the pulse width was 650 as by a method called photoelectron streaking. The series of studies that began with ATI finally reached in 2001 a milestone of generating attosecond pulses and demonstrating that they are indeed attosecond pulses. Furthermore, it was revealed that when a photoelectron is emitted from an atom, a slight difference in the attosecond domain exists depending on which orbital the electron is ejected from. Thus, moments once thought to occur "instantaneously" could be monitored with attosecond precision. Thanks to the generation of attosecond pulses, humanity has become able to observe in real time how electrons move in matter, or a charge distribution varies in a material. Agostini, Krausz, and L'Huillier were awarded the Nobel Prize in Physics in 2023 for their major contributions to this dawn of attosecond science from the standpoint of experiments and measurements.

写真提供：© Nobel Prize Outreach. Photo: Nanaka Adachi The Nobel Award Ceremony

The Nobel Prize in Physics 2023



Pierre Agostini

III. Niklas Elmehed
©Nobel Prize Outreach



Ferenc Krausz

III. Niklas Elmehed
©Nobel Prize Outreach

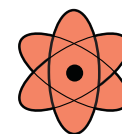
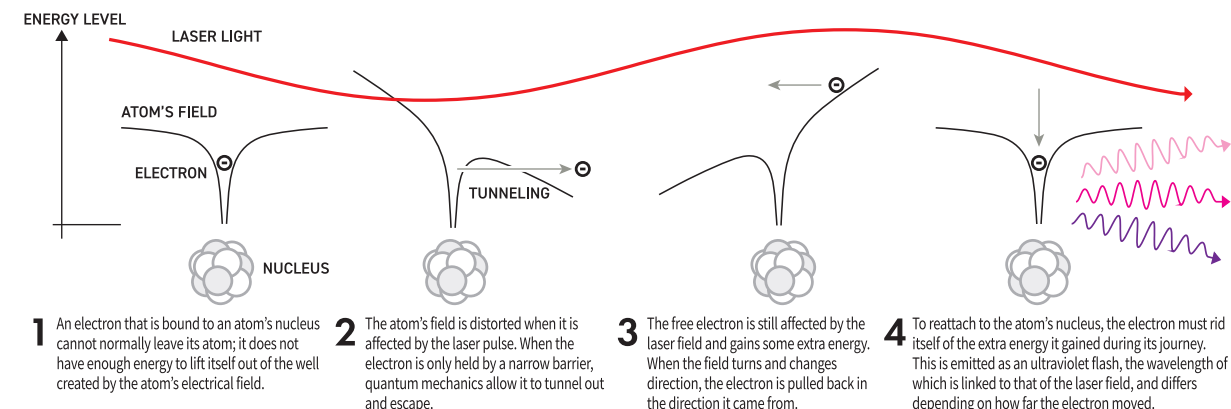


Anne L'Huillier

III. Niklas Elmehed
©Nobel Prize Outreach

Laser light interacts with atoms in a gas

Experiments that created overtones in laser light led to the discovery of the mechanism that causes them. How does it work?



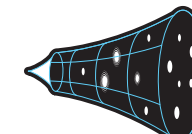
ATTOSECOND

1/1,000,000,000,000,000,000
SECOND



HEARTBEAT

1 SECOND



AGE OF THE UNIVERSE

1,000,000,000,000,000,000
SECONDS

Electrons' movements in atoms and molecules are so rapid that they are measured in attoseconds. An attosecond is to one second as one second is to the age of the universe.

©Johan Jarnestad/The Royal Swedish Academy of Sciences

社会へのインパクト Impact on society

アト秒パルスによる超高速現象の観測は、物質変化に対する我々の根源的な理解を深め、基礎科学の発展に資することとなった。そして、アト秒領域での物質応答を活用した超高速応答が可能となる次世代半導体デバイスの開発など、アト秒科学の電子工学分野への貢献に期待が寄せられている。また、アト秒光源は水の窓領域（水が透明となる 2–4 nm の波長領域）をカバーするため、生体細胞イメージングを通じて生物学、創薬、医療などの分野のイノベーションに貢献するものと期待されている。

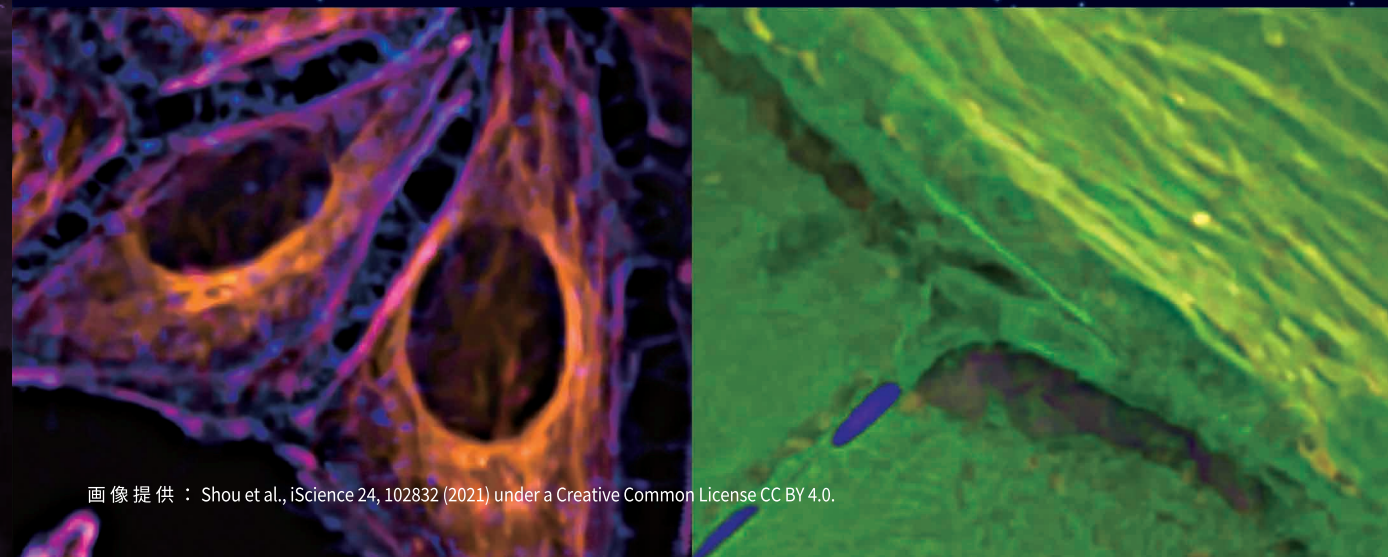
The observation of ultrafast phenomena using attosecond laser pulses has deepened our fundamental understanding of changes in materials in nature and contributed to the advancement of basic sciences. Contributions of attosecond science are also expected in the field of electronics through the development of next-generation semiconductor devices having ultrafast response in the attosecond time domain. In addition, attosecond light sources are expected to contribute to innovation in biology, drug discovery, and medicine through live-cell imaging because they cover the water window region, i.e. the wavelength region of 2–4 nm where water is transparent.

写真提供：東京大学物性研究所

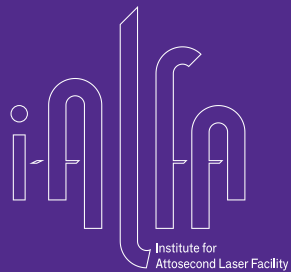
アト秒科学は強光子場科学から生まれた Attosecond science emerged from intense field science

強光子場科学は、原子の光イオン化の研究から興った分野である。レーザー技術の発展とともにレーザー光の短パルス化と高強度化が進むにつれ、超域イオン化や高次高調波の発生など新たな現象が次々と観測された。その新たな観測結果が理論研究の発展を促し、実験と理論が絡み合いながら、新しい研究領域が開拓されてきた。アト秒科学は強光子場科学の展開の結果として生まれ、発展し続けている。

Strong field science is a field that arose from the study of photoionization of atoms. With the development of laser technology, laser pulses became shortened and their intensity increased, and researchers discovered new phenomena one after another such as above-threshold-ionization and high-order harmonics generation using ultrashort intense laser pulses. The observations of the new phenomena stimulated the development of theoretical research, and new research areas have been explored through the interplay between experiment and theory. Frontiers in attosecond science that emerged from intense laser field science still keep expanding.



画像提供：Shou et al., iScience 24, 102832 (2021) under a Creative Common License CC BY 4.0.



東京大学アト秒レーザー科学研究機構
Institute for Attosecond Laser Facility