

Attosaniye Bilimi ve Gelecekteki Eğilimler

Dilan ALP^{1*}

ÖZET: Elektronik bilgi işleme, manyetik bilgi depolama alanlarının nihai boyut ve hız sınırları nedir ve bu sınırlara nasıl yaklaşabiliriz soruları ile mikroskobik düzeyde elektron hareketinin anlaşılması ve kontrolü üzerinde yapılan birçok bilimsel çalışma, attosaniye biliminin doğmasına ve ilerlemesine neden olmuştur. Son yıllardaki ultra-hız lazer teknolojisinin ilerlemesi, enerji ve yükün sadece atomlarla değil, aynı zamanda daha karmaşık katı ve moleküler sistemlerde de nasıl taşındığını anlamak için madde ile yoğun alan arasındaki etkileşme süreci anahtar rol görevi görür. Derleme olarak hazırlanan bu çalışmada, elektronların atomik ölçekli hareketini gerçek zamanlı olarak gözleme ve kontrol etme olanağı sağlayan temel kavramlar ve deneysel araçlar, deneysel gözlenebilirliğin mikroskobik değişkenlerle birleştirilmesi için kritik rol oynayan teorik modeller ve bunun beklenen teknolojik etkileri ele alınmıştır. Bu amaçla, atom ve moleküler fiziği ile yoğun-madde fiziğinde nano ve attosaniye teknolojisinin rolü araştırılarak, attosaniyelik atımların birkaç önemli ve son güncel uygulama alanları hakkında yerel literatüre kaynak niteliğinde bilgi sunacaktır.

Anahtar kelimeler: Attosaniye bilimi, attosaat, güçlü lazer alanı, multifoton süreçler, ultra-hız lazer teknolojisi, ultra-kısa lazer atımları.

Attosecond Science and Future Trends

ABSTRACT: What are the final size and velocity limits of electronic data processing and magnetic information storage areas, and how can we approach these boundaries questions and the understanding and control of microscopic electron motion along with many scientific studies have led to the birth and progress of Attosecond Science. The progress of ultrafast laser technology in recent years, the interaction process between the matter and the intense field play a key role in understanding how energy and charge are carried in atoms as well as in more complex solid and molecular systems. This review study will focus on the basic concepts and experimental tools that allow to observe and control the atomic scale motion of electrons in real time, understand the theoretical models that are critical for combining experimental observability with microscopic variables, and the expected technological effects. For this purpose, the role of nano and attosecond technologies in atomic and molecular physics, and condensed matter physics will be investigated and local literature sources will be presented about several important and recent current application areas of attosecond pulses.

Keywords: Attosecond science, attoclock, strong laser field, multiphoton processes, ultra-fast laser technology, ultra-short laser pulses.

¹ Dilan ALP (Orcid ID: 0000-0001-7385-2659), Şırnak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Enerji Sistemleri Mühendisliği Bölümü, Şırnak, Türkiye

*Sorumlu yazar/Corresponding Author: Dilan Alp, dalp@sirnak.edu.tr

Geliş tarihi / Received: 09.08.2018
Kabul tarihi / Accepted: 19.10.2018

GİRİŞ

İnsanoğlunun ateşi kontrol edebildiği tarihten bu yana ışık, geniş mesafelerde bilgi transferi için bir sinyal aracı olarak kullanıldı ve bu sebeple optik haberleşme ihtiyaçları, kısa ve ultra kısa darbeleri lazerlerin evrimini önemli ölçüde harekete geçirdi. Atom, moleküler ve optik fizik alanları ile ilgilenen bilim insanları, bu alanın hızlı gelişimine büyük katkılar sağlamıştır. Almanya'daki Max Planck Biyofizik Kimya Enstitüsü Müdürü Manfred Eigen, 1967 Nobel kimya ödülünü 'ölçülemez hızlı reaksiyonlar' üzerine yaptığı bir çalışma ile aldı. Kimya alanındaki 1999 Nobel ödülünün sahibi Ahmed Zewail ise zaman çizelgelerindeki reaksiyonları, Eigen'den milyar kat daha kısa sürede analiz etti (Zewail, 1994) ve daha sonra bu başlık hakkında atıfta bulunarak; eğer attosaniye teknikleri gerçek olursa, 'ölçülemezliğin yeniden tanımlanması gerekecek' dedi ve bu cümleler, Ağustos 2001 Nature dergisinde Yudhijit Bhattacharjee' nin "Ölçülemez Ölçümler" başlıklı makalesinde yayınlandı (Hentschel ve ark., 2001; Bhattacharjee, 2001). Darbe süresinde pikosaniye sınırı aşıldıktan sonra ultra-hız dinamiği farkındalık kazandı ve birkaç hafta sonra ilk izole attosaniye atımlar gözlendi (Bhattacharjee, 2001). Bu önemli buluştan sonra araştırmacılar, atomların güçlü lazer alanındaki etkileri üzerine bir dizi çalışmalar yürüttü. Atom ve güçlü alan etkileşmesinde yürütülen son bilimsel çalışmalarda, kısa atımların üretilmesi ve şiddetlerinin de 10^{19} W/cm^2 mertebesine ulaşması sağlandı. Bu atımların kısa olması nedeniyle atomların, iyonlaşmadan önce yüksek şiddetlerde var olabilecekleri üzerine çalışmalar yürütülmüş ve multifoton etkileri için genellikle optik elektrik alanların atomik alanlarla karşılaştırılabilir büyüklükte olduğu ve odaklanmış lazer demetlerine ihtiyaç duyulduğu saptanmıştır (Burnett ve ark., 1993).

Lazer atımlarının oluşması için geçen süre 10^{-9} nanosaniye şeklinde ölçülmesi ve "mode-

locked" lazer sisteminin keşfinin ardından bu süre 10^{-12} pikosaniye şeklinde ölçüldü (De Maria ve ark., 1966). Daha sonra Fork ve ark. dye-lazer sistemi kullanarak (Fork ve ark., 1987), femtosaniye (10^{-15} saniye) zaman aralığında üretilmiş ultra kısa lazer atımlarının, prizma üzerinden kırınım olayını gözlemledi. Böylece ultra-hız elektron dinamiği hakkında birçok deneysel ve teorik çalışmalar eş zamanlı üreilmeye başladı. Ayna-dispesiyon kontrollü Ti-safir lazer sistemleri kullanılarak, 700-800 nm dalgaboyuna sahip yaklaşık 10 femtosaniye civarında atımlar üretildi ve bu atımların enerjileri nano-joule olarak ölçüldü (Moulton, 1986). Bu başarılı çalışmalar ışığında, öncü deneylere ilham olan Anne L'Huillier ve ark. (Li ve ark., 1989; L'Huillier ve Li, 1990; L'Huillier ve ark., 1991; L'Huillier ve ark., 1992; L'Huillier ve Lompré, 1992) ve Rhodes ve ark. eserlerinde (McPherson, 1987), güçlü ultra-kısa lazer darbelerinden, yüksek harmonik üretim (HHG) yöntemleriyle harmonik radyasyon jenerasyonunu VIS/IR spektral aralıktan daha büyük dalga boyları XUV' ye doğru genişletmenin fizibilitesini ve üretilen atımların femtosaniye süresinde basit kuramsal ve deneysel çalışmalarıyla göstermiştir. Yine aynı yıllarda Krausz ve ark., yüksek mertebeden harmonik üretimi ve iyonlaşma süreçlerinde üretilen spektrumların özelliklerini anlamaya çalıştı (Schnnrer ve ark., 1998; Schnnrer ve ark., 1999). Bu durum, hem kısa atım teknolojisinin gelişmesine neden olurken, hem de atom fiziği açısından atom ile yoğun alan etkileşme sürecinin temelleri atılmış oldu (Kulander ve ark., 1992; DiMauro ve ark., 1995; Salieres ve ark., 1999). Özetle, attosaniye bilimi, 1990'lı yılların başında konu olan yoğun ultra kısa-atım araştırmaları sonucunda ortaya çıkmıştır.

Teorik olarak atomun, güçlü lazer alanına maruz kalması kuantum mekaniksel bir sistemin problemi. Dış salınım alanının yokluğunda elektronun sadece bilinen bazı limit halleri için Schrödinger dalga denklemi analitik olarak

çözümlenir (Volkov fonksiyonları). Kuantum mekanik sistemlerde kullanılan standart yöntemler ile tedirginme kuramı göz önüne alındığında daha zor bir sisteme dönüşür. Buna rağmen güçlü alanda uygulanabilirlik koşulu, tedirginmesiz çözümlerde ve zayıf tedirginme çözümlerde dikkate alınır. Bu durumu açıklamak için

$$E[V/cm] = 27.4\sqrt{I[W/cm^2]}, \quad (1)$$

yukarıda verilen denklem kullanılır. Burada, E elektrik alan ve I yoğunluk olarak tanımlanır. Bu yoğunluk $10^{19} W/cm^2$ mertebesinde olduğu için lazer alanı zayıf bir tedirginme olarak algılanmamalıdır.

Lazer alanı ile atom etkileşmelerinde görülen bir diğer durum da fotonun alanı tarafından son seviyelere uyarılma sonucunda gerçekleşen soğurma ve yayma olayıdır. Bu etki, salınım alanında uyarılan fotonların enerjilerinde ac Stark yarılmalarına sebep olur. Foton dalga boyunun uzun olması nedeniyle taban enerji seviyelerinde ac Stark yarılmaları küçük olur ve sürekli enerji seviyelerinin güçlü alanlar tarafından yarılmaları taban enerji seviyelerine göre daha belirgindir. Serbest elektronlar, salınan elektromanyetik alanda hızlanırken, salınma hareketinden kaynaklanan ortalama kinetik enerjileri güçlü lazer alan fiziğinde Ponderomotive Enerji;

$$U_p = \frac{m_e}{2} \langle v^2 \rangle = \frac{m_e}{2} \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi/\omega} v^2 dt = \frac{e^2 E_0^2}{4m_e \omega^2} \quad (2)$$

olarak tanımlanır (Kulander ve ark., 1992).

Elektrik alan yoğunluğuna bağlı bir eşitlik yazılırsa,

$$I = \epsilon_0 c \langle |E(t)|^2 \rangle = \epsilon_0 c \frac{E_0}{2} \quad (3)$$

dir. Eşitlik 2' nin, Eşitlik 3' e oranı frekansın karesi ω^2 ile ters orantılıdır. Bu yoğunluk

W/cm^2 biriminde ve dalga boyu da μm boyutunda ise,

$$U_p = 9.33 \times 10^{-14} I \lambda^2 \quad (4)$$

olarak elde edilir (Salieres ve ark., 1999). Elektronların ponderomotive enerji değerlerinin elde edilmesi (Eşitlik 4), alanda salınan elektronlarla ilişkilidir. Eğer elektronun ilk hızı iyonlaşmadan sonraki hızından küçükse, alan tarafından çekirdeğe doğru dönerken elektron hızlanır, bu sırada elektronların enerjileri ve açısal dağılımları değişir. Fotonların yüksek enerji seviyelerine uyarılmasına izin veren bu basit anlayış, güçlü alanda multifoton süreçleri olarak tanımlanır (L'Huillier ve Lompré, 1992).

Attosaniye ($1 as = 10^{-18} s$) araştırma alanı, ultra kısa-atım ışığının (hassas ultraviyole veya XUV ışığı) femtosaniye süresi ile ilk başarılı jenerasyonu doğdu ve oluşan bu atımların zamana bağlı ilişkisi incelendi (Chirila ve ark., 2002; Ciappina ve ark., 2017). Ancak atom ile etkileşen alanda var olan dinamikler, attosaniye zaman ölçeğinde nasıl yer alıyor sorusu, bu güncel araştırma alanını anlamamıza ve hakkında araştırma yapma olanağı sunmaktadır. Özet olarak Attosaniye, atomik ölçekte elektron hareketi için tipik zaman ölçeğidir. Bütün araştırmalar sırasında bilim insanları, attosaniyelik (femtosaniyenin binde biri) atımlara sahip lazerleri geliştirdi ve bu süreçleri takip ve kontrol etmesini sağlayan ultra kısa lazer teknolojisini "attosaniye metodoloji" olarak adlandırdı (Ciappina ve ark., 2017).

Günümüzde elektron hareketini gözlemek ve kontrol etmek için attosaniye optik atımların üretimi, hızlı ilerleyen araştırma alanlarından biri haline gelmiştir. Bu lazerlerle, hızlı ilerleyen kimyasal tepkimelerin hücresel boyutta izlenmesi ve incelenmesi, hastalığa neden olan moleküllerin yapısını çözümlenmesi gibi birçok uygulamalı ve teorik bilim alanlarına ışık tutması, bu alana multidisipliner nitelik kazandırmıştır.

Lazer teknolojisinin dört genel yönü olan ileri teknoloji projeksiyonu -daha enerjik atımlar, daha yüksek ortalama güç, daha uzun dalga boyu sürücüleri ve daha iyi kontrol- attosaniye teknolojisindeki araştırmaların sürekliliğine neden olacaktır. Son yıllarda hızla gelişen bu araştırma alanı için en güncel ilgi alanı ise nano-fotonikler olmuştur. Attosaniye ve nano-fotonik araştırmaları birbirinden büyük ölçüde bağımsız olarak gelişmesine rağmen hızla büyüyen bu alanların karşılıklı olarak birbirlerinin gelişimine fayda sağlamaktadır. Salınım alanının ölçümü ve kontrolü petahertz frekanslarındaki ışık, doğrusal olmayan nano ölçekteki ışık-madde etkileşmesi ile değerli bilgiler sağlamaktadır. Tersine, en kısa atımları sentezleyerek yüksek harmonik üretimi gibi doğrusal olmayan optik biliminin içinde var olan nanoskopik hacimlerde sınırlamak da mümkündür. Nanofotonik ve attosaniye tekniklerinin kombinasyonu, nanometrelik -attosaniye skalasında- optik alanların manipüle edilmesine olanak tanımaktadır. Attosaniye teknolojisi, yakın gelecekteki optiksel sinyal süreçlerini anlamamızda ve uygulanmasında büyük vaatler sunmaktadır. Derleme olarak hazırlanan bu makalede, attosaniye spektrum teknikleri ile var olan teknolojideki son gelişmeler ve gelecekteki eğilimler tanımlanarak, attosaniye bilimi hakkında farkındalık oluşturması amaçlanmaktadır.

Attosaniye Spektroskopik Teknikler

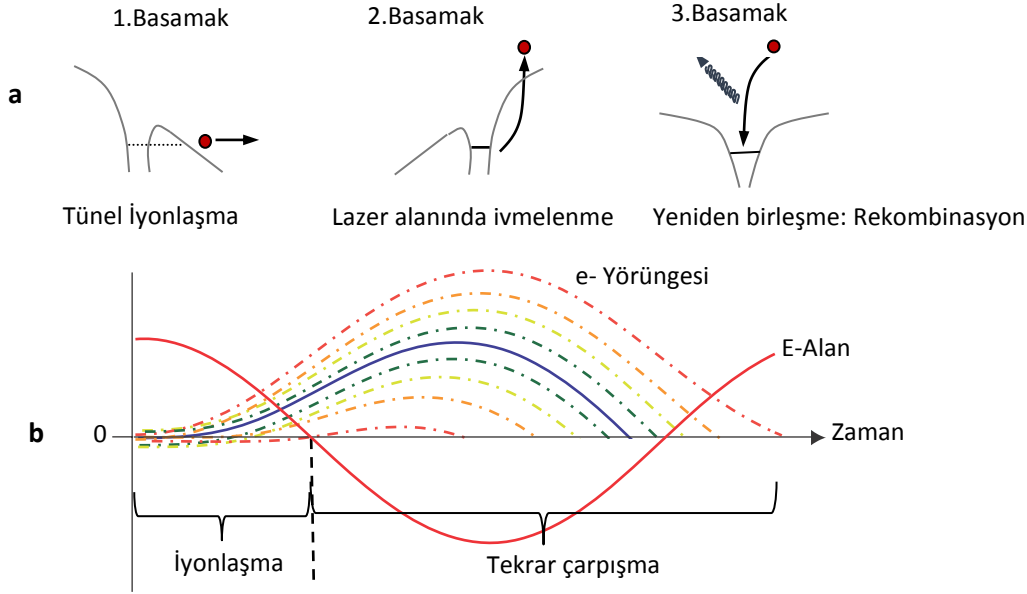
Attosaniye bilimini anlamak için yapılan her teorik ve deneysel çalışmanın odağında güçlü lazer alanı ile madde etkileşmesi vardır. Bu etkileşme ile gerçekleşen süreçler doğrusal olmayan (non-linear) etkiler ile değerlendirilir (Chirila ve ark., 2002; Joachain ve ark., 2003;

Alp, 2017). Lazer ışığının ilk bilimsel uygulamalarından biri olan doğrusal olmayan etkiler, lazerin keşfinden önce ışık şiddetinin ve dolayısıyla buna karşılık gelen **E** optik elektrik alanının, madde içinde var olan elektrik alanlar yanında zayıf olduğu kabul edilir. Böylece, ışığın bir atom üzerindeki etkisinin, optik elektrik alan ile orantılı olduğu kabul edilmiş olur. **K** dielektrik sabitidir ve maddenin kutuplanmasıdır. Eşitlik 5' de **E** elektrik alan kuvvet serisi şeklinde ifade edilerek çok daha genel bir denklem yazılır:

$$P = K_1E + K_2E^2 + K_3E^3. \quad (5)$$

Güçlü alan genellikle $10^{13} - 10^{15} \text{ Wcm}^{-2}$ düzeyinde lazer atım yoğunlukları anlamına gelir. Bu yoğunluklar elektrik alanına karşılık gelen, atom içindeki alanlara göre nispeten daha şiddetli olan ultra kısa atımlı lazer alanlarını temsil eder. Sonuç olarak lazer alanı, foton enerjisi iyonlaşma potansiyelinin yalnızca küçük bir bölümüne sahip olsa bile atomları iyonlaşma seviyesine getirebilir (Gallmann ve ark., 2012).

Yoğun lazer alanında iyonlaşma sürecini tanımlamak için çok basit ve kullanışlı bir yöntem olan yarı klasik model kullanılır. “Üç Basamak Model” olarak tanımlanan bu modelde, lazer alanındaki elektronun hareketi klasik şekilde hesaplanırken atomik davranışlar, kuantum mekaniksel sistemlerle açıklanır. Bu model, güçlü alan olgusu için yapılan hesaplamalarda kuantum ve klasik görüşü birleştirici bir model niteliği taşımaktadır. Şekil 1' de tanımlanan klasik yaklaşım, harmonik üretim sürecini kontrol edebilmek amacıyla, lazer alanındaki serbest elektronların hareketini kontrol etmenin gerekliliğini göstermektedir.



Şekil 1. a) HHG yarı-klasik üç basamak modeli. **b)** Dış lazer alanında serbest elektronun klasik yörüngesidir. Mavi olarak tanımlanan çizgi, elektronun tekrar çarpışma enerjisini (kesinti bölgesi) temsil eder (Gallmann ve ark., 2012).

Birinci basamak sürecinde elektron, tünel iyonlaşma süreci ile iyonlaşır. Elektrik alan zayıf olduğu durumda elektron, tünel boyunca atomun bağlı potansiyelinden kaçar. Lazer elektrik alanı, fotonun Coulomb potansiyeline karşı $e\mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{r}$ şeklinde etkin bir potansiyel üretir:

$$V(r, t) = \frac{-e^2}{4\pi\epsilon_0 r} + e\mathbf{E}(t) \cdot \mathbf{r}. \quad (6)$$

İkinci basamakta ise, elektrik alandaki kuvveti atomdan uzaktaki elektronu hızlandırır. Elektrik alan değiştiğinde, zıt yönde bir kuvvet oluşur ve elektron büyük olasılıkla atom yakınına tekrar döner. İyonlaşma sürecinden sonra, sadece doğrusal olarak kutuplanmış lazer alanı ile etkileşme davranışı gösterir. Elektronun

bu davranışını anlamak için başlangıçta serbest elektronun klasik olarak yazılan lazer alanı $E(t) = E_0 \cos(\omega t)$ kullanılarak hızı,

$$\mathcal{G}(t) = \int_0^t -\frac{e}{n} E(t) dt + \mathcal{G}_0 \quad (7)$$

şeklinde yazılır. Elektronun bu durumdaki sürüklenme hızı ϑ_0 dır ve ortalama kinetik enerjisi ponderomotive enerji olarak tanımlanır. Bu ortalama enerjide yüksek harmonik üretime (HHG) büyük katkısı vardır.

Son basamak sürecinde elektron atoma yakın olduğu zaman, taban enerji seviyeye doğru yeniden birleşme için kesin bir olasılık taşır. Yakalanan elektron kendi enerjisini foton olarak salar. Elektron ve iyon tekrar birleşmesiyle, elektron fazla olan enerjisini yayar ve lazer

alanında elektron, yüksek harmonik fotonlar yayar. Bu enerji,

$$\hbar\omega_n = E_{kin} + I_p \quad (8)$$

denklemleri tanımlanır. Eşitlik 8' de, E_{kin} lazer alanında, elektronun elde edilen kinetik enerjisi ve I_p iyonlaşma potansiyelidir.

$$E_{max} = \frac{3U_p + I_p}{\omega} \quad (9)$$

Yarı klasik yaklaşım ile yazılan Eşitlik 9, Kulander ve ark. (Krause ve ark., 1992; Kulander ve ark., 1993) ve Corkum (Corkum, 1993) tarafından, deneysel ve kuramsal olarak üretilmiştir. Bu modelde elektronlar, lazer alanı ve atomik potansiyel (Reiss, 1980; Van Linden, 1988) tarafından oluşturulan engelde, tünel boyunca ilerleyerek geçer ve sıfır sürüklenme hızı ile sürekli seviyelerde gözlenir. Dolayısıyla, bu alandaki salınımlar klasik bir davranış sergiler ve sadece çekirdeğe dönen elektronlar nötr durumda yeniden birleşerek harmonik salınım yapabilir. Elektronlar çekirdeğe döndüğü durumda, alandaki serbest elektronlar tarafından maksimum kinetik enerjiye sahip olacağı gösterilmiştir. Böylece, salınan elektronlar maksimumu kinetik enerjisi $3.17U_p$ değerine sahip olur. Bu yaklaşımla üretilen karakteristik spektrumun gözlenebilir en temel özelliğindeki düzlüğün sonundaki maksimum enerji, bu bağıntı ile tanımlanır. Bir önceki kısımda da tanımladığımız U_p ponderomotive enerji, yani lazer alanındaki serbest elektron tarafından elde edilen kinetik enerji ve I_p ifadesi de iyonlaşma potansiyelidir. Şekil 2. (a)' da belirtilen harmonik spektrumun kesinti noktasında, yüksek mertebeden harmonik üretim meydana gelir. Yüksek mertebeden harmonik üretiminde, spektrumda elde edilen düzlük bölgelerde attosaniye 'atım trenleri' oluşurken, düzlüklerin sonunda oluşan ani şiddet azalmasındaki kesinti noktası için 'tek attosaniye atımlar' üretilir.

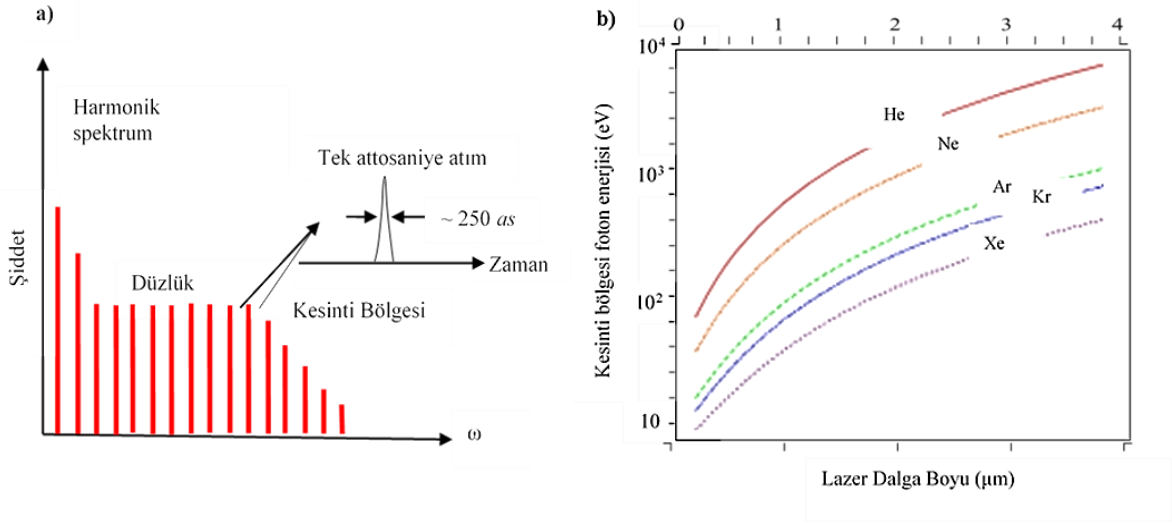
Attosaniye bilimi, günümüzde daha temel sorular sormaya başladı. Kısa bir süre önce dikkat çeken bir soru da elektronu bir atomdan çıkarmak ne kadar sürüyor? Son zamanlarda ultra-hız dinamiklerini inceleyen bilim toplulukları tarafından elektronun tünelleme zamanının, örtülü bir biçimde deterministik olduğu kabul edilir ve aslında çoğu kez anlık veya hayali olduğu düşünülür. Bu nedenle, atom ve moleküllerdeki değerlik elektron dinamikleri için en iyi görüntüleme tekniklerinde var olan iyonlaşma süreci deterministik bir zaman üzerine kurulmuştur (Smirnova ve ark., 2009; Goulielmakis ve ark., 2010; Wirth ve ark., 2011; Shafir ve ark., 2012; Lein, 2012). Bu durum çeşitli iyonlaşma teknikleri ile; Eşik Üzeri İyonlaşma (ATI), Multifoton iyonlaşma (MPI) ve Yüksek Harmonik Üretim (HHG) süreçleri için karakteristik özelliklere sahip spektrumlar ile tanımlanır.

Güçlü alan rejimini tanımlayan yoğunluk aralığının üst sınırı, genellikle lazer-madde etkileşiminde rölativistik etkilerin başlangıcıyla tanımlanır. Rölativistik rejim için oldukça enerjik attosaniyelik atımların oluşumu öngörülmesine rağmen (Pukhov ve ark., 2002; Mikhailova ve ark., 2005; Naumova ve ark., 20014) makalemizdeki teoriyi rölativistik olmayan davranışlarla sınırlıyoruz.

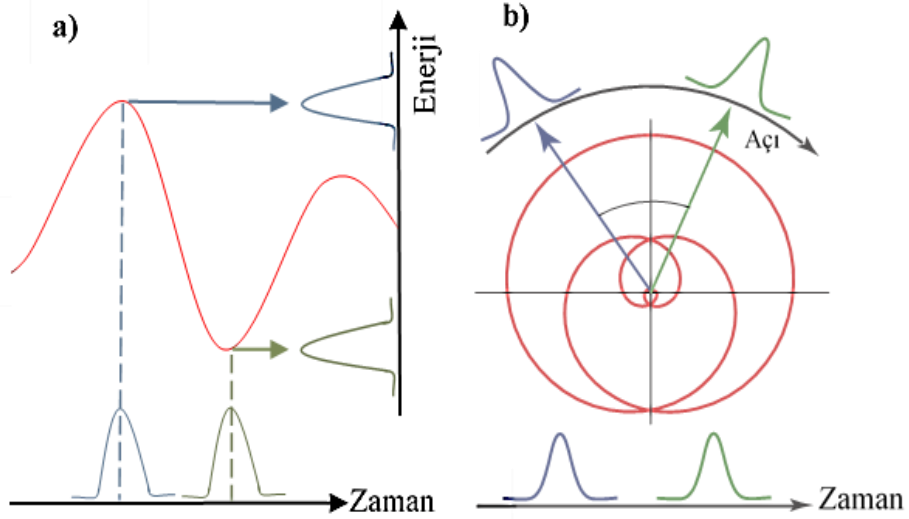
Attosaniye spektroskopik teknikleri tanıttıktan sonra, bir sonraki kısımda, en güncel konularla ilgili son gelişmeler hakkında bilgi sunulacaktır.

Attoclock (Attosaat)

Bir önceki kısımda adı geçen, "Yarı Klasik Üç Basamak Model'de, atom ve güçlü alan etkileşmesi ile gerçekleşen iyonlaşma süreçlerinin bir sonucu olarak Attoclock tekniği, attosaniye zamansal çözünürlüğü elde etmek için yoğun ve yaklaşık olarak dairesel polarize lazer atımlarını görüntülenmesi için kullanılan bir ölçüm tekniğidir (Şekil 3 (b)).



Şekil 2. Yüksek harmonik spektrum (Becker ve ark., 1996) b) Lazer dalga boyunun bir fonksiyonu olarak hesaplanan maksimum foton enerjisi (Chang, 2011).

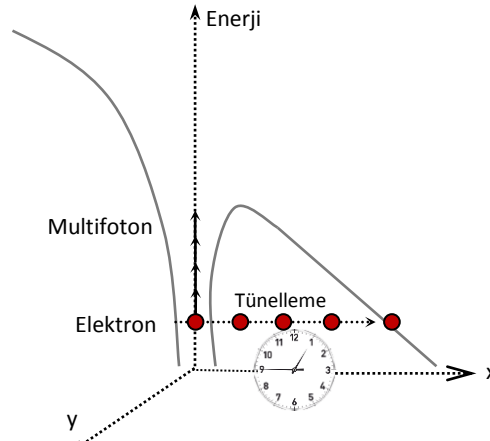


Şekil 3. Attosaniye spektroskopik teknik. a) Attosaniye çizgi kamerası. b) Attoclock, yani yaklaşık dairesel kutuplanmış bir lazer alanı ile etkileşim yoluyla, son momentum dağılımında farklı açılarla eşlenmesi (Galmann ve ark., 2012).

Attoclock, güçlü alan ve ultra-hız biliminin paradigmalarından biri olan lazer kaynaklı tünelleme süreci için son derece hassas bir tekniktir. Elektronun tünelleme sürecinde, dalga paketinden klasik olarak hareketli bir parçacığa geçişi yoğun tartışmaların konusu olmayı sürdürmektedir. Tünel çıkışında elektronun ilk dalga boyu yayılımıyla ilgili soru ve cevaplar gelecekteki çalışmalara da kaynak niteliğindedir. Ayrıca attoclock ölçümlerinin, genel olarak zaman ölçüm tekniklerinde önemli etkileri olacak yeni bir anlayışa işaret ettiği görüşümdedir. Bu durum, attosaniye zaman çözümü ile yeni ölçüm tekniklerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. "Attoclock", attosaniye atımlarına açıkça ihtiyaç duymadan attosaniye zaman aralıklarını ölçmeyi sağlayan nispeten basit bir tekniktir. Kısaca, attoclock, güçlü alan rejiminde iyonlaşma sürelerini kodlayan, zarif bir yaklaşım olarak nitelendirilebilir. Son yıllarda elektron tünel dinamiğini araştırmak ve güçlü alanda tek ve çift iyonizasyona uğrayan elektronun kinematiğini incelemek için kullanılmış olan bu teknikte, iki çevrimli rejimde dairesel polarize olan yoğun lazer alanının tam zamanlamasında kullanılır (Eckle ve ark., 2008). Dairesel polarize atıma

yakın elektrik alan vektörü, iyonlaşma anı polarizasyon düzlemindeki momentum vektörünün son açısına eşlenerek, foto-iyonlaştırılmış elektronları (veya iyonları) radyal uzamsal yönde saptırmak için kullanılır. Bir saatin dakika koluna benzer. Bu "attoclock" için iki optik döngü rejiminde ultra hızlı bir Ti-Safir lazer kullanmak, saatin dakika kolunun, yaklaşık 2.4 fs ' lik bir elektrik alanının 360° lik bir dönüşünde ilerlediği anlamına gelmektedir.

Attoclock tekniği tarafından sunulan mükemmel zamansal lokalizasyon doğruluğu, kuantum mekaniğinin bir başka temel yönünü inceleme imkanını açtı: Parçacıkların bariyer yoluyla tünellenerek klasik yasak bölgeleri geçme kabiliyetini ortaya koydu. Şekil 4'de atomik Coulomb potansiyeli güçlü lazer alanı ile büküldüğünü ve bağlı bir elektronun klasik yasak bölge boyunca tünellenerek serbest hale geldiğini göstermektedir. Kısaca şimdiye kadar elektronun tünelleme dinamiği ve kinematiği hakkında yeterince bilgi sahibiyiz, bilmediğimiz şey ise elektronun tünelleme sürecinin ne kadarlık bir zaman ölçeğinde gelişmesiydi. Bu teknik ile, atom, molekül ve hatta katılarda bile hızlı hareket eden elektronların görüntülerini yakalama yeteneğini ortaya koymuştur.



Şekil 4. Attosaniye sürede gerçekleşen tünelleme olayı (Landsman ve ark., 2014).

Bu durumu Keldysh tünelleme zamanı olarak ölçülmektedir. $\gamma = \frac{\omega_0 \sqrt{2I_p}}{E_0} = \sqrt{\frac{I_p}{2U_p}}$ Keldysh parametresi olarak tanımlanır, burada I_p iyonlaşma potansiyeli, U_p pendormative enerji $U_p = \frac{E_0^2}{4\omega_0^2}$, E_0 lazer elektrik alanını ve ω_0 ise lazer taşıyıcı frekansıdır (Keldysh, 1965), ve tünelleme zamanı (T_t):

$$\gamma = \omega_0 T_t \quad (10)$$

şeklinde hesaplanır (Gallmann ve ark., 2012). Örneğin 800 nm de He atomunun tünellenme süresi attosaniye cinsinden;

$$\gamma = 1 \text{ için } 4 \times 10^{14} \frac{W}{cm^2} \text{ yoğunlukta } T_t \\ = 430 \text{ as}$$

$$\gamma = 0.55 \text{ için } 1.6 \times 10^{15} \frac{W}{cm^2} \text{ yoğunlukta } T_t \\ = 215 \text{ as}$$

gibi hesaplanır. Kısaca 735 nm dalgaboyuna sahip bir ışığın da 1° açıyla polarize olma süresi 7 as ($7 \times 10^{-18} s$) olarak hesaplanır. Adyabatik tünelleme bölgesinde $\gamma \ll 1$ tanımlanırken, multifoton rejiminde ise $\gamma \gg 1$ şeklinde tanımlanır (Ciappina ve ark., 2017). Bu bölgelerde, güçlü lazer alanı atomun bağlanma potansiyelini bükerek nüfuz edici bir potansiyel bariyer oluşturur. Bu potansiyel bariyeri boyunca tünellenen elektron daha sonra ana iyonun uzaktaki güçlü lazer alanı ile etkileşime girerek yönetilir. (Corkum,1993; Schafer ve ark., 1993; Lewenstein ve ark., 2009).

Atto ve Nano-Fizik

Son zamanlarda en güncel iki araştırma konusu olan attosaniye ve nano-skala fiziği birlikte gelişmeye başlamıştır. Attosaniye fiziği, femtosaniye zaman skalasındaki sürede, ultra-kısa lazer atımların, atomlar, moleküller ya da katılarla etkileşime girdiğinde meydana gelen fenomenleri ele alır. Diğer taraftan nanoteknoloji ise, nanometrik incelikteki katılar, metaller ve dielektrikler gibi mezoskopik sistemlerin manipülasyonunu ve mühendisliğini

içerir. Nano-mühendislik geniş ve köklü bir araştırma geçmişi olmasına rağmen yoğun lazer fiziğiyle birleşmesi nispeten yeni bir olgudur (Vampa ve ark., 2017). Ultra kısa güçlü lazer atımların dinamiği yakın zamanda çok ilgi görmesi ile femtosaniye elektronuğu ve nükleer dinamikler için attosaniye anlayışımızı ilerletti. Bu yeni olgu, metalik ve dielektriksel nanoyapıların kısa ve yoğun lazer atımları ile etkileşimlerini inceleyen geniş kapsamlı birçok teorik ve deneysel çalışmaya kaynaklık etmiştir. İlginç bir şekilde, fenomen haline gelen, plasmonik güçlendirilmiş alanlar tarafından indüklenen güçlü alan etkileşim süreçleri bilim insanları arasında popülerliğini korumaktadır. Kim ve ark.'nın tartışmalı çalışması konu ile ilgili diğer çalışmalara da kaynak niteliği taşımaktadır (Kim ve ark., 2012). Örneğin, güçlü ultra hızlı lazer alanlarıyla etkileşen kümeler, uzun yük lokalizasyonu ve çok hızlı dinamiklerin yüksek derecede var olduğu nanoplasma oluşumuna yol açtığı (Shao ve ark., 1996; Ditmire, Smith ve ark., 1997; Ditmire, Tisch ve ark., 1997; Tisch ve ark., 1997) ve benzer şekilde yoğun lazerlerin mikron ölçekli sıvı damlacıklar gibi nano parçacıklarla etkileşimleri sıcak plazma oluşumuna neden olduğu bilinmektedir (Symes ve ark., 2004; Sumeruk ve ark., 2007). Ayrıca, grafen benzeri yapılarda kolektif elektron dinamiği (Yakovlev ve ark., 2015), hidrokarbon moleküllerinde proton göçü (Kübel ve ark., 2016), proteinlerde yük göçü ve biyo-moleküller süreçler gibi daha büyük moleküllerde bağlı ve serbest yüklerin uyarılma ve iyonlaşma süreçlerine yönelik çalışmalar da bu kategoriye dahil edilebilir (Belshaw ve ark., 2012; Calegari ve ark., 2016).

Atto-nanofizikteki biyolojik uygulamalara örnek bilimsel çalışmalar arasında, canlı hücrelerin çözümlerindeki DNA-protein etkileşimlerini açıklanması (Altucci ve ark., 2012), aromatik amino asitlerle peptidler arasındaki kovalent bağlantının (Leo ve ark., 2013) ve protein-protein etkileşimlerini

karakterize eden canlı hücrelerin araştırılması (Itri ve ark., 2016) gibi birçok uygulama alanı mevcuttur.

Işık-nanoyapı etkileşiminin anahtar bir özelliği de elektrik alanını farklı seviyelerdeki büyüklüklerini artırmak ve dalga boyu ölçeğinde yerel olarak sınırlandırmaktır (Stockman ve ark., 2007). Bu süreçlerin bir sonucu olarak, güçlü alanda iyonlaşmanın tüm standart teorik araçları (genellikle sıkça kullanılan klasik modelden yarı-klasik modele kadar) tekrar test edilmek zorundadır. Bu nedenle, HHG ve ATI gibi güçlü alan fiziğindeki en önemli ve temel süreçlerin dinamiği, nano ölçeğe dayanan güçlü alan ultra-hız olgusu için nasıl gerçekleştiği önem arz etmektedir.

SONUÇ

Derleme olarak hazırlanan bu çalışma hem deneysel hem de teorik bir yaklaşım ile, attofiziği alanındaki son gelişmeler ve diğer bilim dalları ile olan ilişkileri geniş bir bakış açısı ile değerlendirmiştir. Attosaniye atımlar, atomlar, moleküller, nano yapılar ve katılardaki çok hızlı elektronik süreçlerin incelenmesi için benzersiz bir araçtır. Bu anlamda, nanofotonik ve attosaniye tekniklerinin kombinasyonu, nanometre-attosaniye skalasında optik alanların manipülasyonu için yapılan en güncel çalışma alanları ile farkındalık oluşturması amaçlanmıştır. Ülkemizde Atto-Fizik alanında yerli bilimsel çalışmaların yokluğu nedeni ile özgün bir kaynak araştırması niteliği taşımaktadır.

Güçlü lazer alanları ve atomik sistemlerin etkileşmesi ile elde edilen spektroskopik teknikler yardımıyla üretilen yüksek enerji son yıllarda ilgi çeken araştırma konuları arasındadır. Bu yöntemle attosaniye sürecinde oluşan ultra kısa atımların oluşması ile yüksek enerjili lazerler elde edilmiştir. Attosaniyelik atımlar genel olarak mikrokozmosda bilinen en hızlı işlemlerin anlık görüntüsünü çekmeye izin vermektedir. Şimdiye kadar sadece tahmin

edilen süreçleri gerçek zamanlı olarak çözme izni verildi ve fiziksel kökenlerine ilişkin henüz tam olarak anlaşılamayan ultra hızlı mekanizmaların keşfedilmesini kolaylaştırdı. Böylece mikroskopik yapılarda ultra-hızlı ilerleyen dinamikler, daha önce hiç elde edilemediği ölçüde insan kontrolüne tabi olmuştur.

Attoclock gibi iyonlaşma süreçleri üzerinde yapılan hemen hemen tüm araştırma sonuçları, tünelleme süresinin olası yoğunluk dağılımının güçlü alan iyonlaşma sonrasında, attosaniye elektron dinamiklerinin yeniden yapılandırılmasında bilime önemli kazanımlar sunmaktadır.

Atomlardaki, moleküldeki ve hatta katılardaki elektron hareketlerini attosaniyelik zaman ölçeğinde gerçekleştirmesi, ultra hızlı fiziksel süreçlerin araştırılması ve gelişmesine neden olmuş ve böylece saniyede on milyarlarca yüksek güçte atım üretme yeteneğine sahip yeni nesil lazerler üretilmiştir. Attosaniyelik zaman diliminde üretilen bu lazer atımları, elektron hareketinin görüntüsünü yakalamasına imkân sağlamakta ve bu durum, atomik fotoğrafçılık alanının gelişmesi gibi birçok uygulama alanlarının gelişmesine de olanak sunmaktadır.

KAYNAKLAR

- Alp D, 2017. Super Intensity Laser Field Interacted with atomic System in Multiphoton Process: Non-dipole and non-relativistic effects, *Int. Journal Pure and Applied Science*, 3(2):1-9.
- Altucci C, Nebbioso A, Benedetti R, Esposito R, Carafa V, Conte M, Micciarelli M, Altucci L, Velotta R, 2012. Nonlinear protein-nucleic acid crosslinking induced by femtosecond uv laser pulses in living cells, *Laser Phys. Lett.*, 9, 234.

- Becker W, Lohr A, Kleber MA, 1996. Unified theory of high-harmonic generation: Application to polarization properties of the harmonic, *Phys. Rev. A.*, 56, 645.
- Belshaw L, Calegari F, Duffy MJ, Trabattoni A, Poletto L, Nisoli M, Greenwood JB, 2012. Observation of ultrafast charge migration in an amino acid, *J. Phys. Chem. Lett.*, 3, 3751–4.
- Bhattacharjee Y, 2001. Measuring the immeasurable, *Nature*, 412:474-476.
- Burnett K, Reed VC, Knight PL, 1993. Atoms in ultra-intense laser fields, *Journal Physics B.*, 26, 571.
- Calegari F, Trabattoni A, Palacio A, Ayuso D, Castrovilli MC, Greenwood JB, Decleva P, Martín F, Nisoli M, 2016. Charge migration induced by attosecond pulses in bio-relevant molecules, *J. Phys. B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 49, 142001.
- Chang Z, 2011. *Fundamentals of Attosecond Optics*, CRC Press. Vol. 1., USA, 519s.
- Chirila CC, Kylstra NJ, Potvliege RM, 2002. Nondipole effects in photon emission by laser-driven ions, *Phys. Rev. A.*, 66: 063411.
- Ciappina MF, Pérez-Hernández JA, Landsman AS, Okell WA, Zherebtsov S, Förg B, Schötz J, Seiffert L, Fennel T, Shaaran T, Zimmermann T, Chacón A, Guichard R, Zaïr A, Tisch JW, Marangos JP, Witting T, Braun A, Maier SA, Roso L, Krüger M, Hommelhoff P, Kling MF, Krausz F, Lewenstein M., 2017. Attosecond physics at the nanoscale, *Report on Prog. Phys.*, 80, 054401 (50pp).
- Corkum PB, 1993. Plasma perspective on strong-field multiphoton ionization, *Phys. Rev. Letter*, 71, 13.
- De Maria AJ, Stester DA, Heynau H, 1996. Self mode-locking of lasers with saturable absorbers. *App. Phys. Lett.*, 8, 174.
- DiMauro LF, Agostini P, 1995. Ionization dynamics in strong laser fields. In *Advances in Atomic, Opt. Phys.*, 35, 79.
- Ditmire T, Smith RA, Tisch JW, Hutchinson MHR, 1997. High intensity laser absorption by gases of atomic clusters, *Phys. Rev. Lett.*, 78, 3121.
- Ditmire T, Tisch JW, Springate E, Mason MB, Hay N, Smith RA, Marangos J, Hutchinson MHR. 1997. Highenergy ions produced in explosions of superheated atomic clusters, *Nature*, 386, 54.
- Eckle P, Smolarski M, Schlup P, Biegert J, Staudte S, Schöffler M, Müller HG, Dorner R, Keller U, 2008. Attosecond angular streaking, *Nature Phys.*, 4, 565–70.
- Fork RL, Cruz CH, Becker PC, Shank CH, 1987. Compression of optical pulses to six femtoseconds by using cubic phase compression, *Opt. Lett.*, 12, 433.
- Gallmann L, Cirelli C, Keller U, 2012. Attosecond science: Recent Highlight and Future Trends, *Ann. Rev. of Phys. Chem.*, 63, 447-469.
- Goulielmakis E, Loh ZH, Wirth A, Santra R, Rohringer N, Yakovlev VS, Zherebtsov S, Pfeifer T, Azzeer AM, Kling MF, Leone SR, Krausz F, 2010. Real-time observation of valence electron motion, *Nature*, 466, 739–743.
- Hentschel M, Keinberger R, Spielman Ch, Reider GA, Milosevic N, Brabec T, Corkum P, Heinzmann U, Drescher, Krausz F, 2001. Attosecond metrology, *Nature*, 414, 509.

- Itri F, Monti DM, Della VB, Vinciguerra R, Chino M, Gesuele F, Lombardi A, Velotta R, Altucci C, Birolo L, Piccoli R, Arciello A, 2016. Femtosecond uv-laser pulses to unveil protein-protein interactions in living cells, *Cellular and Molecular Life Science*, 73, 637.
- Joachain CJ, Kylstra NJ, Potvliege RM, 2003. Atoms in intense, ultrashort laser pulses: non-dipole and relativistic effects, *Journal of Modern Optics*, 50:3-4, 313-329.
- Kim S, Jin J, Kim YJ, Park IY, Kim Y, Kim SW, 2012. Nanostructure-enhanced atomic line emission, *Nature*, 485: E1-3.
- Krause JL, Schafer KJ, Kulander KC, 1992. High-order harmonic generation from atoms and ions in the high intensity regime, *Phys. Rev. Lett.*, 68, 3535.
- Keldysh LV, 1965. Ionization in the field of a strong electromagnetic wave. *Soviet Physics-Journal of Experimental and Theoretical Physics*, 20, 1307-14.
- Kulander KC, Schafer KJ, Krause JL, 1992. Time-dependent studies multiphoton processes, Academic Press, in *Atoms in Intense Laser Fields*, San Diego.
- Kulander KC, Schafer KJ, Krause JL, 1993. Super Intense Laser Atom Physics, (SILAP)III, in *Proceedings of the Workshop*, Plenum, New York, 25s.
- Kübel R, Siemering C, Burger C, Kling NG, Li H, Alnaser AS, Bergues B, Zherebtsov S, Azzeer AM, Ben-Itzhak I, Moshhammer R, de Vivie-Riedle R, Kling MF, 2016. Steering proton migration in hydrocarbons using intense few-cycle laser fields, *Phys. Rev. Lett.*, 116, 19300.
- Landsman AS, Weger M, Maurer J, Boge R, Ludwing A, Heuser S, Cirelli C, Lukas G., Keller U, 2014. Ultrafast resolution of tunneling delay time, *Optica*, 1, 343-349.
- Lein M, 2012. Atomic physics: Electrons get real. *Nature*, 485, 313-314.
- Leo G, Altucci C, Bourgoin-Voillard S, Gravagnuolo AM, Esposito R, Marino, Costello CE, Velotta R, Birolo L, 2013. Ultraviolet laser-induced cross-linking in peptides, *Rap. Com. Mass Spec.*, 27, 1660.
- Lewenstein M, L'Huillier A, 2009. Principles of single atom physics: high-order harmonic generation, above-threshold ionization and non-sequential ionization, *Strong Field Laser Physics*. (Ed.) Brabec, T. New York: Springer, 147-83s.
- L'Huillier A, Li XF, Lompré LA, 1990. Propagation effects in high-order harmonic generation in rare gases, *J. Opt. Soc. Amer. B.*, 7, 527.
- L'Huillier A, Schafer KJ, Kulander KC, 1991. Higher-order harmonic generation in xenon at 1064 nm: The role of phase matching, *Phys. Rev. Lett.*, 66, 2200.
- L'Huillier A, Balcou P, Candel S, Schafer KJ, Kulander KC, 1992. Calculations of HHG processes in Xe at 1064 nm, *Phys. Rev. A.*, 46, 2778.
- L'Huillier A, Lompré LA, Mainfray G, Manus C, 1992. *Atoms in Intense Laser Fields*, (Ed.) Gavril. M., New York: Academic, 139s.
- Li XF, L'Huillier A, Ferray M, Lompré LA, Mainfray G, 1989. Multi harmonic generation in rare gases at high laser intensity, *Phys. Rev. A.*, 39, 575.
- McPherson A, Gibson G, Jara H, Johann U, Luk TS, McIntyre IA, Boyer K, Rhodes CK, 1987. Studies of multiphoton production of vacuum-ultraviolet radiation in the rare gases, *J. Opt. Soc. Am. B.*, 4, 595.

- Mikhailova YM, Platonenko VT, Rykovanov SG, 2005. Generation of an attosecond X-ray pulse in a thin film irradiated by an ultrashort ultrarelativistic laser pulse, *J. Exp. and Th. Phys. Lett.*, 81, 571–74.
- Moulton PF, 1986. Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃, *J. of Opt. Soc. Amer. B.*, 3, 125.
- Naumova N, Sokolov I, Nees J, Maksimchuk A, Yanovsky V, Mourou G, 2004. Attosecond electron bunches, *Phys. Rev. Lett.*, 93, 195003.
- Pukhov A, Meyer-ter-Vehn J, 2002. Laser wake field acceleration: the highly non-linear broken-wave regime. *App. Phys. B.*, 74, 355–6.
- Reiss HR, 1980. Effect of an intense electroma field on a weakly bound system, *Phys. Rev. A.*, 22, 1786.
- Salieres P, L'Huillier A, Antoin P, Lewenstein M, 1999. In *Advances in Atomic, Molecular, and Optical Physics.* edited by Bederson, B. and Walther, H., Academic Press, New York, 41, 83s.
- Schafer KJ, Yang B, DiMauro LF, Kulander KC, 1993. ATI beyond the high harmonic cutoff, *Phys. Rev. Lett.*, 70, 1599.
- Schnrner M, Speilmann Ch, Wobrauschek P, Streltsov C, Burnett NH, Kan C, Ferencz K, Koppitsch R, Cheng Z, Brabec T, Krausz F, 1998. Coherent 0.5-keV x-ray emission from helium driven by a sub-10-fs laser, *Phys. Rev. Lett.*, 80, 3236.
- Schnrner M, Cheng Z, Hentschel M, Tempea G, Kálmán P, Brabec T, Krausz F, 1999. Absorption-limited generation of coherent ultrashort soft-x-ray pulses, *Phys. Rev. Lett.*, 83, 722.
- Shafir D, Soifer H, Bruner BD, Dagan M, Mairesse Y, Patchkovskii S, Ivanov MY, Smirnova O, Dudovich N, 2012. Resolve the time when an electron exits a tunnelling barrier, *Nature*, 485, 343–346.
- Shao YL, Ditmire T, Tisch JWG, Springate E, Marangos JP, Hutchinson MHR, 1996. Multi-keV electron generation in the interaction of intense laser pulses with Xe clusters, *Phys. Rev. Lett.*, 77, 3343.
- Smirnova O, Mairesse Y, Patchkovskii S, Dudovich N, Villeneuve D, Corkum P, Ivanov MY, 2009. High harmonic interferometry of multi-electron dynamics in molecules, *Nature*, 460, 972–977.
- Stockman MI, Kling MF, Kleineberg U, Krausz F, 2007. Attosecond nanoplasmonic-field microscope, *Nature Pho.*, 1, 539–44.
- Sumeruk HA, Kneip S, Symes DR, Churina IV, Belolipetski AV, Donnelly, TD, Ditmire T, 2007. Control of strong-laserfield coupling to electrons in solid targets with wavelengthscale spheres, *Phys. Rev. Lett.*, 98, 045001.
- Symes DR, Comley AJ, Smith RA, 2004. Fast-ion production from short-pulse irradiation of ethanol microdroplets, *Phys. Rev. Lett.*, 93, 145004.
- Tisch JWG, Ditmire T, Fraser DJ, Hay N, Mason MB, Springate, Marangos JP, Hutchinson, MHR, 1997. Investigation of high-harmonic generation from xenon atom clusters, *Jour. Phys. B: Atomic, Molecular and Opt. Phys.*, 30, L709.
- Vampa G, Fattahi H, Vuckovic J, Krausz F, 2017. Attosecond nanophotonics. *Nature Photonics*, 11, 210.

- Van Linden HB, van den Heuvel, Muller HG, 1988. In multiphoton processes, Cambridge Studies in Modern Optics Vol. 8, ed. Smith, S., J., Knight, P., L., Cambridge University Pres., New York.
- Wirth A, Hassan MT, Grguras I, Gagnon J, Moulet, Luu TT, Pabst S, Santra R, Alahmed ZA, Azzeer AM, Yakovlev VS, Pervak V, Krausz F, Goulielmakis E, 2011. Synthesized light transients, Science, 334, 195–200.
- Yakovlev V, Stockman MI, Krausz F, Baum P, 2015. Atomic scale diffractive imaging of sub-cycle electron dynamics in condensed matter, Scientific Reports, 5, 14581.
- Zewail AH, 1994. Femtochemistry: Ultrafast dynamics of the chemical bond, Vol. I, World Scientific, Sigapore 341.