

Fotoelektrik Olayı

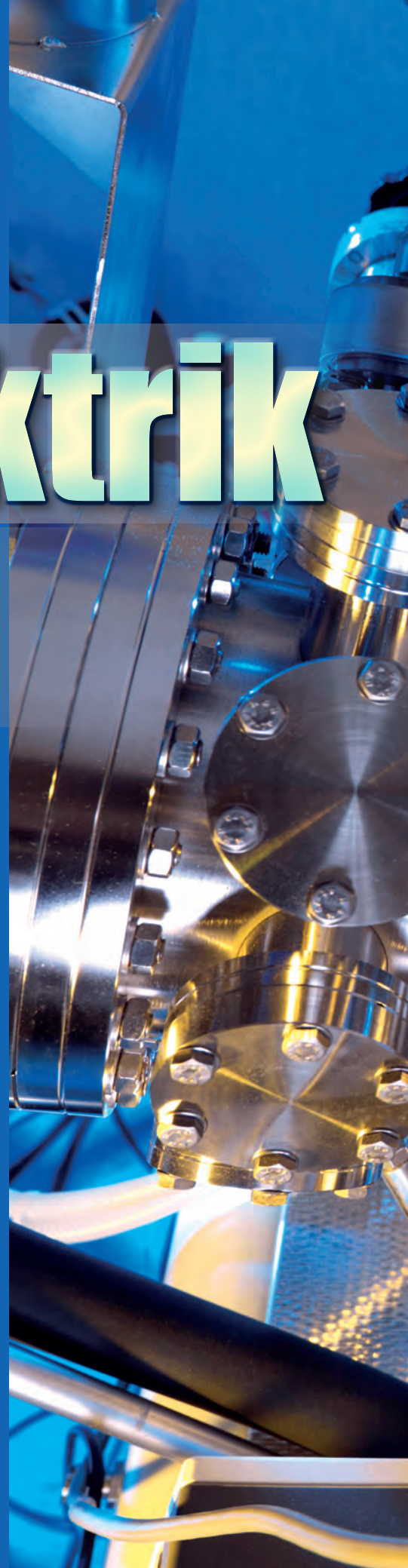
Yakından İzlemek

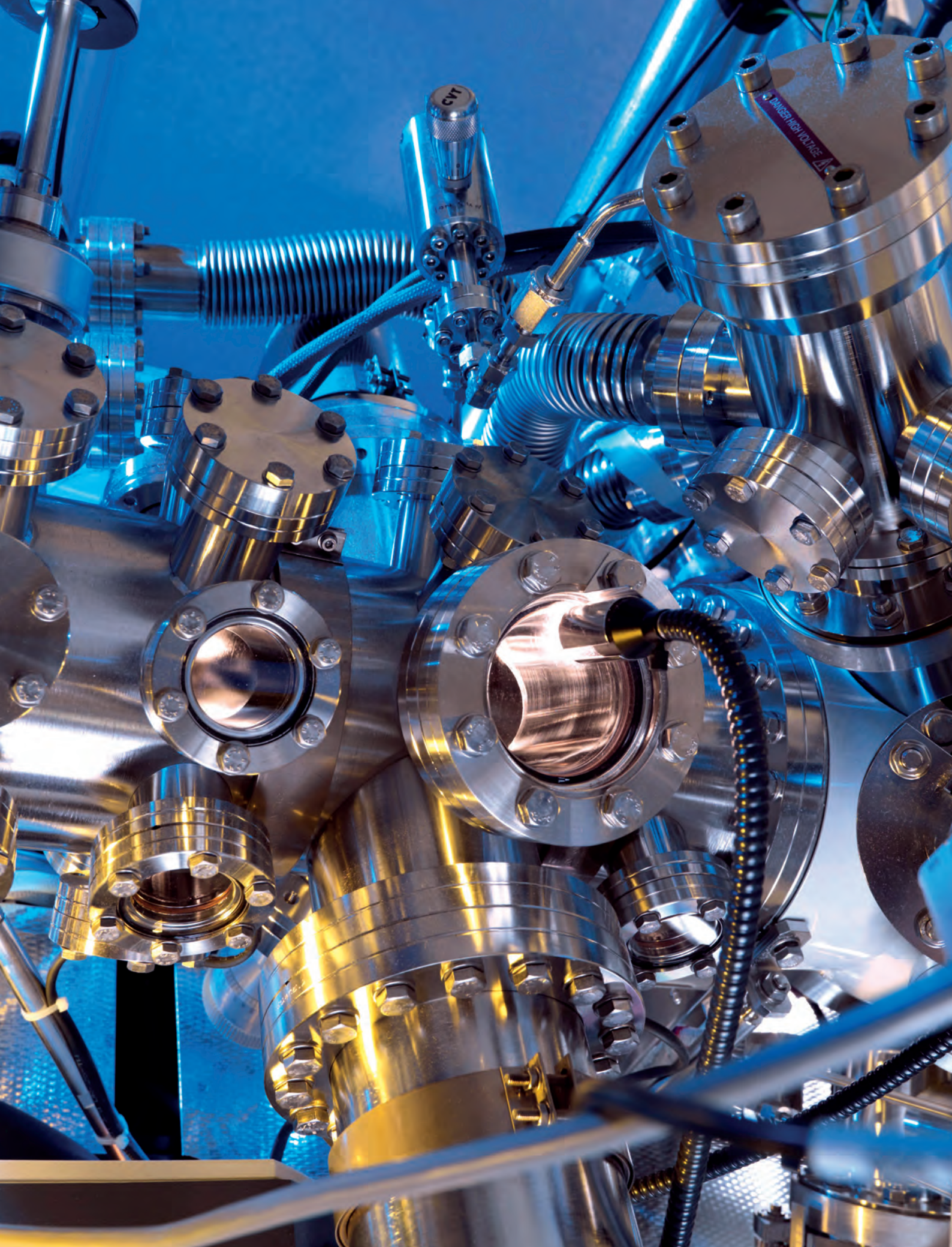
Dr. Tuncay Baydemir [TÜBİTAK Bilim ve Teknik Dergisi

Fotoelektrik olay ya da fotoemisyon, maddenin fotonları soğurması sonucunda elektron kaybetmesine denir ve en hızlı gerçekleşen olaylardan biridir.

Peki, bu süreci gerçek zamanlı olarak izlemek mümkün mü?

X-Işını Fotoelektron Spektrometresi (XPS). Malzemenin yüzey kimyasını araştırmak için kullanılan bu cihazla oldukça fazla bilgiye ulaşmak mümkün.





ışığın doğası bilim insanlarının yüzyıllar boyunca anlamaya çalıştığı ve bu nedenle de en çok ilgilendiği konulardandır. Çok eski zamanlardan beri insanoğlu ışığı ve ışığın maddeyle olan etkileşimini anlamaya çalışıyor. Önceden, görmenin gözden yayılan ışık sayesinde gerçekleştiği düşünülüyordu. Yapılan bilimsel çalışmalar, ışığın ışınlar olarak tanımlanmasına,

parçacıklardan oluştuğunun benimsenmesine, bunu takip eden süreçte de dalgalar olarak tanımlanmasına ve nihayetinde hem parçacık hem de dalga olarak ikili bir tabiata sahip olduğunun kabul edilmesine kadar çok uzun bir yol katetti. Işığın doğası ve madde ile olan etkileşimi hakkında bilinenler bugün de değişmeye ve gelişmeye devam ediyor.



Albert Einstein (1879-1955)

Teorik fizik alanındaki çalışmaları ve özellikle de keşfettiği fotoelektrik etki yasası için 1921 Nobel Fizik Ödülü'nü kazandı.

Ne var ki, 1921 yılında kriterleri sağlayan bir aday olmadığına karar veren ödül komitesi, o yıla ait ödülü bir sonraki yıl verdi. Bu nedenle Einstein, 1921 Nobel Fizik Ödülü'nü aslen 1922'de aldı.

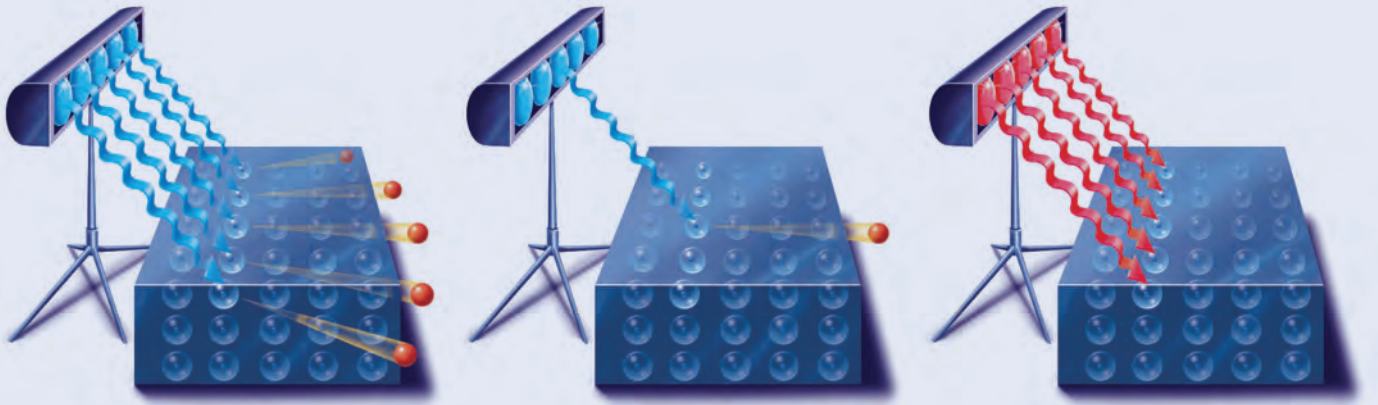
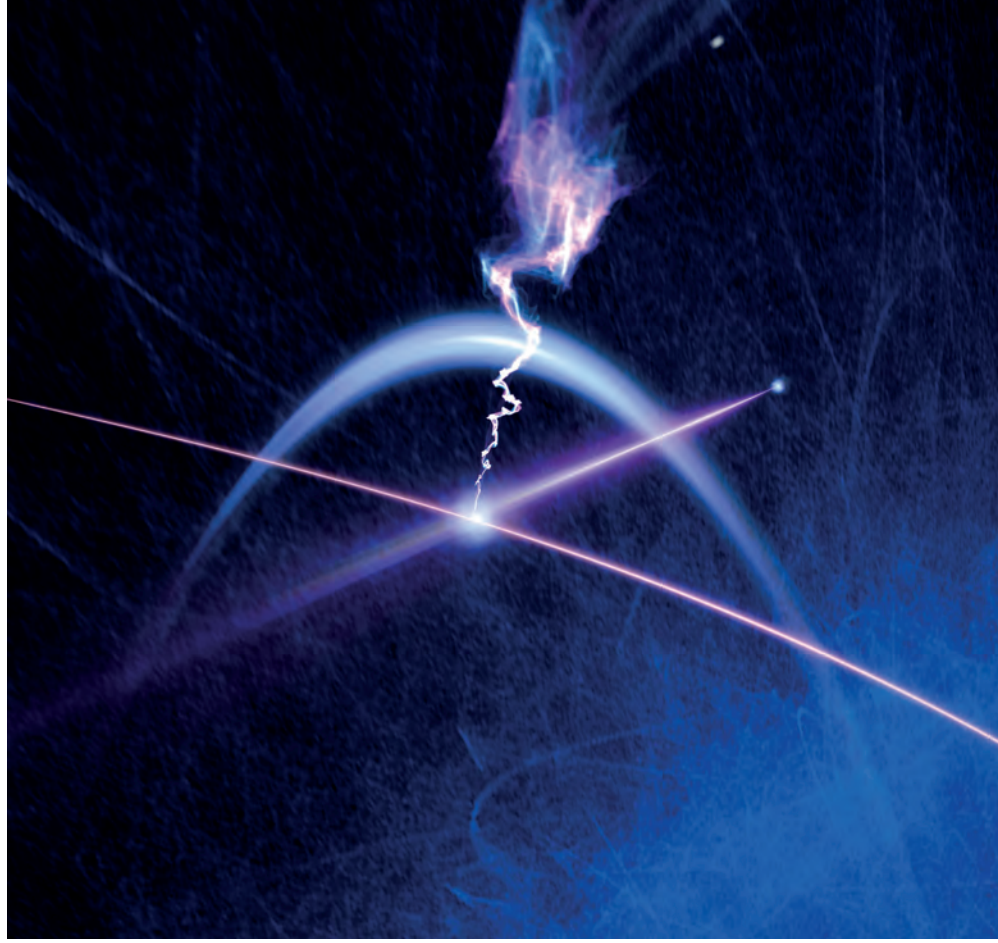
Fotoelektrik Olay

Eğer bir metal yüzeye görünür tayfta ya da morötesi ışık gönderilirse metal yüzeydeki elektronların serbest kalması sağlanabilir. Fotoelektrik olay denilen bu süreçte serbest kalan fotoelektronların neden olduğu elektrik akımı ölçülebilir.

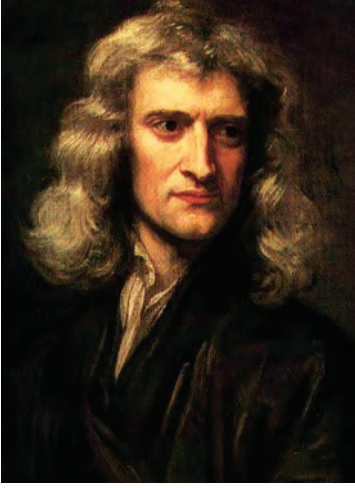
Albert Einstein, 1905'te fotoelektrik etkinin bir açıklamasını yaptı. Işığın küçük enerji paketlerinden, başka bir ifadeyle fotonlardan, oluştuğunu öne sürdü. Foton, enerjisinin belirli bir eşik değerinin üzerinde olması durumunda, metal yüzeyden elektron koparabilir. Bu eşik değerinin büyüklüğü metal yüzeyin türüne göre değişkenlik gösterir. Metal yüzeyi oluşturan atomlardan elektron kopa-

rılabilmesi için iş fonksiyonu (elektronu atomdan koparmak için gereken enerji) denilen asgari enerjinin elektrona aktarılması gerekir. Fotonun enerjisi, iş fonksiyonuna eş ya da daha büyük bir değerde olduğunda atomdan elektron koparılabilir. Bu işlem sonucunda oluşan fotoelektro- nun kinetik enerjisinin alabileceği en yüksek değer ise foton enerjisinden iş fonksiyonu çıkarılarak bulunabilir.

MÖ beşinci ve üçüncü yüzyıllar arasında Demokritos, Epikür, Platon ve Aristo görmenin nasıl gerçekleştiği konusunda teoriler ortaya koydular. Öklid, ışığın doğası hakkında geometrik unsurlara dayalı *Optics* başlıklı bir kitap yazdı. Görme konusunda gerçeği tam olarak yansıtmayan çoğu eski teori zamanla yerini daha bilimsel teorilere bıraktı. Öyle ki İbn-i Heysem'in çalışmaları onuncu ve on birinci yüzyıllara damga vurmuş ve bu çalışmalar optik biliminin gelişmesine öncülük etmiştir. İbn-i Heysem 1027 yılında tamamlanan ve daha sonra Latinceye de çevrilen ünlü eseri *Kitab el-Menazır* (Optik Kitabı) ile bu alanda önde gelen bilim insanları arasında yer aldı. Optik biliminin atası olarak kabul edilen İbn-i Heysem, eseriyle, Newton'un *Opticks* kitabının yayımlanmasına kadar bilim dünyasında bu alanda söz sahibi oldu.



Fotoelektrik olayın gerçekleşmesi için ışık ışınları içindeki fotonların enerjisinin yeteri kadar yüksek olması gerekir (solda). Önemli olan ışık ışınlarının taşıdığı toplam enerji miktarı değil, tek tek fotonların enerjisidir. Yeterli enerjiye sahip olması durumunda tek bir foton bile yüzeyden elektron koparabilir (ortada). Ancak fotonların enerjisi yeterli seviyede değilse gönderilen ışınların taşıdığı toplam enerji ne kadar yüksek olursa olsun yüzeyden elektron kopmaz (sağda).



Isaac Newton (1643-1727)

İngiliz fizikçi, matematikçi, astronom, mucit, felsefeci ve kimyacıdır.

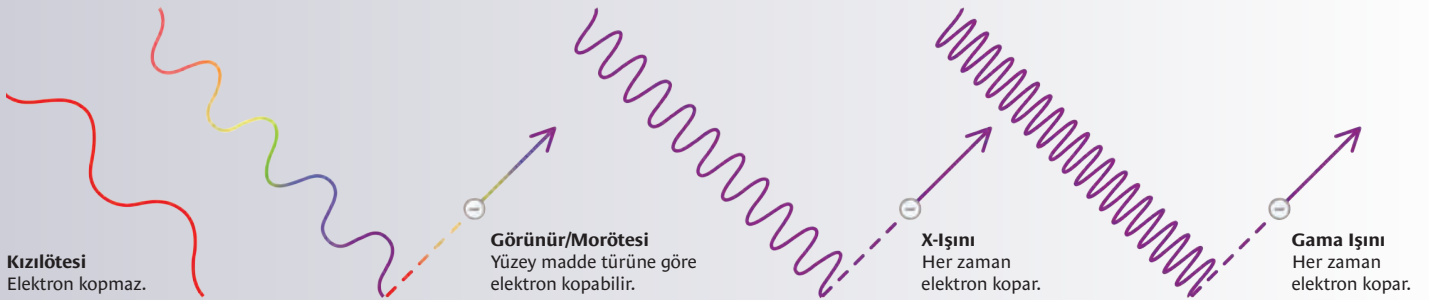
Tarihteki en önemli bilim insanlarından biri olduğu düşünülür. Bilim devrimi ve bilimsel metod onun adıyla anılır.

Işık hakkında yapılan araştırmalar modern bilime öncülük etti ve onu şekillendirdi. On yedinci yüzyılın ikinci yarısında ünlü bilim insanı Isaac Newton optik alanına çok büyük katkılarda bulundu. Newton ışığın küçük parçacıklardan oluştuğunu öne sürdü ve görme, kırılma ve yansıma olaylarını bu teoriye dayanarak açıkladı. Newton'un teorisi yaygın bir şekilde kabul görmesine rağmen bazı bilim insanlarıncı kabul edilmedi. Hollandalı matematikçi, fizikçi ve astronom Christian Huygens ışığın dalga şeklindeki hareketi ile yansıma ve kırılmayı açıkladıktan sonra yaptığı çalışmaları 1690'da *Işığın Bilimsel İncelemesi* başlıklı eserinde yayımladı. Francesco Grimaldi ışığın kırınımını deneysel yollarla inceleyerek ışığın dalga şeklindeki hareketini destekleyen sonuçlara ulaştı. Ancak bilim insanları tüm bu gelişmelere rağmen yüz yıldan daha

uzun bir süre Newton'un parçacık teorisine bağlı kaldılar.

İtalyan matematikçi ve fizikçi Thomas Young, 1802 yılında ışığın dalga şeklindeki hareketini çift yarıklık deneyi ile oldukça açık bir şekilde gösterdi. Işık ışınlarının oluşturduğu girişim desenleri, ışığın dalga hareketini destekler nitelikteydi. Daha sonra, Augustin Fresnel ve Jean Foucault yaptıkları çalışmalarla ışığın dalga teorisine katkılar sağladılar. Işığın dalga yapısının doğası ise belirsizliğini bir süre daha korumaya devam etti. Bu teoriye en büyük katkıyı ise, 1873 yılında ışığın yüksek frekanslı elektromanyetik dalga olduğunu açıklayan James Clerk Maxwell yaptı. 1887 yılında Heinrich Hertz, Maxwell'in teorisinin deneysel ispatını gerçekleştirdi. İlginç bir şekilde Hertz fotoelektrik olayı da keşfetti, ne var ki bu olay ışığın dalga teorisine açıklanamıyordu. Işık

Foton enerjisi belli bir eşik değerden düşük olduğu durumda fotoelektrik olay gözlenmez. Yüzeye ulaşan fotonun frekansının ve dolayısıyla enerjisinin yeterince büyük olması gerekir.

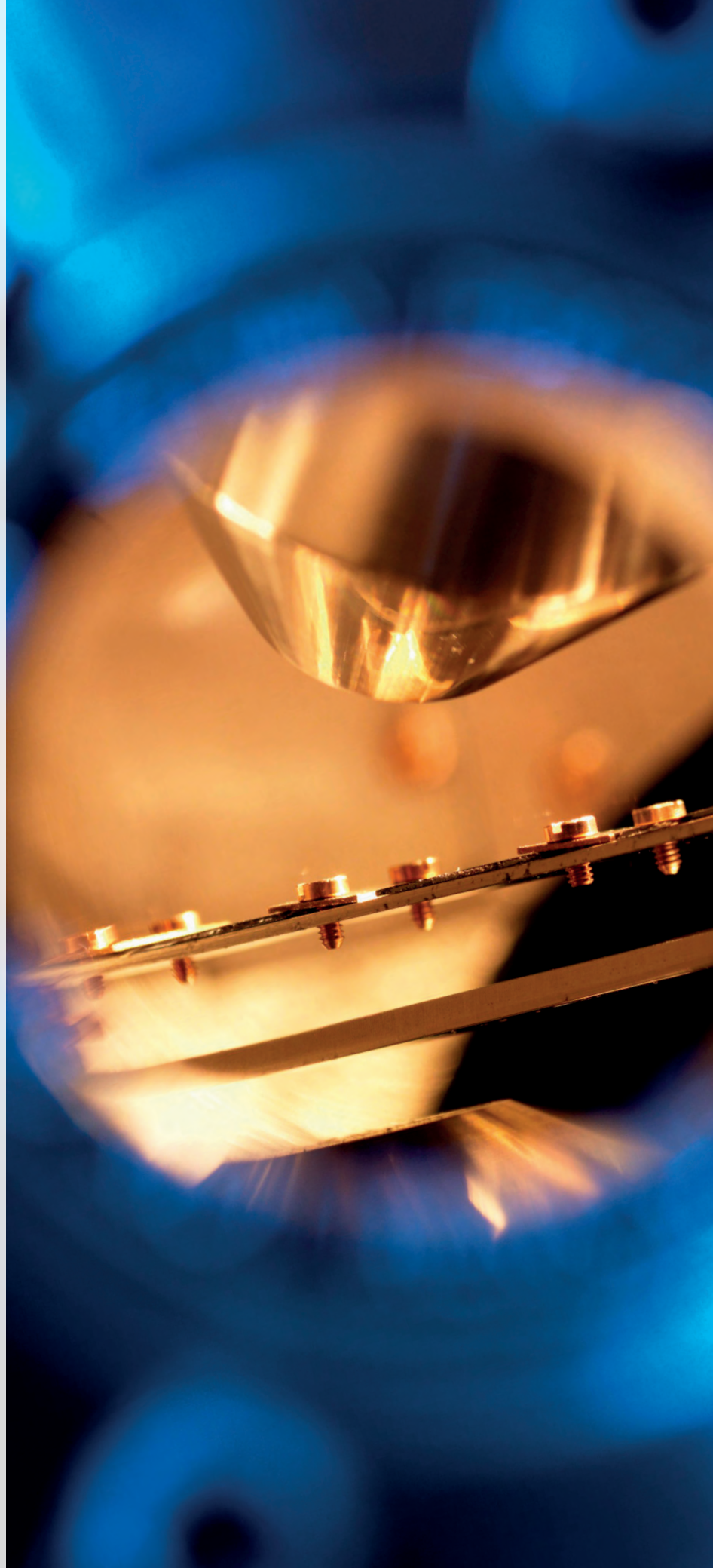


dalga şeklindeki hareketinin ispatlanması da ışığın karmaşık yapısını açıklamaya yeterli olmadı. Daha pek çok bilim insanı ve araştırmamanın sağladığı tüm gelişmeler, ışığın (farklı dalga boylarındaki elektromanyetik radyasyonun) hem dalga gibi hem de parçacık gibi davrandığını açıklamak için tarihsel bir süreç oluşturdu.

Albert Einstein 1905 yılında yayınladığı makalesiyle ışığın sadece dalga hareketi yapmadığını, aynı zamanda parçacık olarak da davranabildiğini gösterdi. Max Planck'ın daha önceleri kara cisimler üzerine yaptığı çalışmaların Einstein'ın araştırmalarına temel oluşturduğunu söylemek çok da yanlış olmaz. Einstein, ışığın foton denilen enerji paketlerinden oluştuğunu öne sürerek fotoelektrik olayı açıkladı. Bu açıklama o kadar önemliydi ki kuantum mekaniğinin de gelişmesine yol açtı. Fotonun enerjisi ancak belirli bir eşik değerini geçtiğinde metal yüzeyden elektron kopabiliyordu.

Peki, fotoelektrik olay sırasında bir elektronun kopması ne kadar hızlı gerçekleşiyor? Bunu tam olarak anlamak için oldukça özel analiz cihazlarına ihtiyaç duyuluyor.

Son on yıllık süreçte fotoemisyon dinamiklerinin daha iyi anlaşılması için yapılan araştırmalar konunun canlı kalmasını sağladı. Fotoemisyon dinamikleri ve elektronların fırlatılma süresi ile ilgili bilgileri daha net tanımlamak üzere ışıık atımları kontrollü bir şekilde araştırılan yüzeylere gönderiliyor. Böylece ışığın gönderildiği yüzeydeki atomların elektronik yapısı ve fotonun soğurulma süreci ile ilgili önemli bilgilere ulaşmak hedefleniyor.



Fotonun madde yüzeyine çarpması sonrasında atomdan elektronun koparılması şeklinde gerçekleşen fotoelektrik olay oldukça hızlı bir süreç. Ossiander ve arkadaşları *Nature* dergisinde yayınladıkları makalede bu sürecin nasıl gerçekleştiğine ilişkin elde ettikleri bilgileri sundu. Işık sayesinde yüzeyden elektron kopmasının ne kadar hızlı geliştiğini detaylı bir şekilde anlamak için attosaniye (10^{-18} saniye, 0,000000000000000001 saniye) düzeyinde gözlem yapabilmek gerekiyor.

İncelenen maddenin yüzeyi, attosaniye sürelerince elektromanyetik spektrumun yüksek enerjili UV bölgesi frekansına sahip ışık dalgasına maruz bırakılıyor ve fotonların soğurulması ile elektronlar koparılıyor. Bu elektronlar ikinci bir ışık demeti ile hızlandırılarak elektronların son enerjisi ölçülüyor.

İyonlaştırıcı fotonların madde yüzeyine ulaşması ve fotoelektronun koparılması vakum ortamına girmesine kadar gerçekleşen olayların zaman çizelgesinin tayin edilmesi bu araştırmaların tarihi boyunca karşılaşılan en büyük zorluklardan biriydi. Ossiander ve arkadaşları fotonun soğurulması ve elektronun koparılması arasında geçen süreyi ölçmek için yeni bir yöntem geliştirdiler. Bunun için fotoiyonlaşma zaman bilgileri bilinen atomları malzeme yüzeyine tutturup referans değeri olarak kullandılar. Böylece analiz edilmesi amaçlanan yüzeyde gerçekleşen fotoemiyonların sürecinin de attosaniye düzeyinde izlenebilmesi mümkün oldu.

Çalışmada fotoelektrik olay analizleri birbirini tamamlayıcı ve oldukça karmaşık yapıdaki iki cihazla

izlendi. Bunlardan birincisi attosaniye ışın kamerası, bir diğeri ise RABITT interferometresi. Bu iki cihaz yardımıyla elektron saçılımının gerçekleşmesi sürecinin zaman cetveli attosaniye kesinliğinde çıkarılabildi.

Tungsten yüzey üzerindeki fotoemiyonu attosaniye kamerası ile inceleyen araştırmacılar, ilk aşamada iyot moleküllerini tungsten yüzey üzerinde biriktirdi. Daha sonra yüzeye attosaniye süreli yüksek enerjili UV ışını göndererek tungsten yüzeyde ve iyot moleküllerinde gerçekleşen fotoemiyonlar arasındaki nispi gecikmeyi ölçtüler. İkinci aşamada ise aynı ışık atımı iyot içeren moleküller ve helyumdan oluşan gaz karışımına gönderilerek ölçümler yapıldı. Helyum atomları için, modeller sayesinde hesaplanabilen değerler kullanılarak, tungsten yüzeydeki fotoemiyon gecikmesi ifade edilebildi. Bu yöntem sayesinde hedeflenen pek çok madde üzerinde fotoemiyon ölçümleri gerçekleştirilebilecek.

Fotoelektron spektroskopisi basit metal ve yarı iletkenlerden daha karmaşık yapıdaki süperiletkenlere kadar yoğun maddelerdeki iç yapıyı anlamak açısından oldukça önemli bir analiz yöntemi. Çoğu katı madde hakkındaki pek çok bilgiyi spektroskopik analizlere borçluyuz. Ancak hâlihazırda daha yaygın olarak yapılan ölçümlerde baz alınan femtosaniyeden (10^{-15} saniye) daha küçük zaman aralıklarına duyarlı analizler çok daha fazla bilgi sağlayabilir. Örneğin attosaniye (10^{-18} saniye) metrolojisi elektron dalga paketleri oluşumu, elektron transfer ve saçılım süreçlerini daha ayrıntılı inceleyebilmemiz için kullanılabilir.



Marcus Ossiander ve arkadaşlarının yaptığı bu çalışma sayesinde pek çok farklı maddedeki fotoelektron oluşumları daha yakından takip edilebilecek. Fotoelektron oluşum zaman çizelgesini yakından izleyebilmek, atomların elektronik yapılarını daha net izleme potansiyeli taşıyor. Yeni geliştirilen yöntemle, kimyasal tepkimeler hakkında daha detaylı bilgilere de erişmek mümkün olabilecektir. Bu sayede, moleküler elektronik cihazlar için nano boyutlarda anahtarlar üretilebilir ve hatta güneş enerjisi hasadı için oldukça ucuz yeni



Fotoelektron Spektroskopisi

Deneysel bir analiz yöntemi olan fotoelektron spektroskopisi atom ve moleküllerin elektronik yapılarını tayin etmeye yarıyor. Çalışılan örneğe gönderilen fotonlar sayesinde saçılan fotoelektronların kinetik enerji dağılımları ölçülüyor. Böylelikle numunenin bileşimi ve bileşenlerin elektronik konfigürasyonu tayin edilebiliyor.

Radyasyonun şiddetine göre farklı enerjiye sahip fotonlar gönderilerek atom çekirdeğine farklı mesafelerdeki elektronlar üzerinde çalışılabilir. Örneğin X-Işını Fotoelektron Spektroskopisinde 200-2000 eV enerjiye sahip fotonlarla atom çekirdeğine daha yakın, ultraviyole fotoelektron spektroskopisinde ise

10-45 eV enerjiye sahip fotonlarla çekirdekten en uzakta bulunan elektronlar üzerinde çalışılabilir.

Fotoelektron spektroskopisinin temelinde fotoelektrik olay yatıyor. Numune yüzeyine gönderilen foton eğer belirli bir eşik değerinin üzerinde enerjiye sahipse elektronun koparılmasına neden oluyor. Einstein'ın fotoelektrik yasasına göre, fotonun enerjisi elektronu koparmak için gerekli olan enerji ve fotoelektronun sahip olduğu kinetik enerjinin toplamına eşit oluyor.

Fotoelektron spektroskopisi ile katı, sıvı ve gaz numuneler analiz edilebiliyor.

yollar bulunabilir. Örneğin iyot atomlarında gerçekleşen oldukça kısa süreli fotoemiyon gecikme süreleri, yüksek frekanslarda çalışan elektronik cihazlarda çok hızlı anahtarlama uygulamaları için potansiyel taşıyor. Bu araştırma, fotoemiyon dinamiklerini daha yakından tanımamızı sağlamakla kalmıyor, aynı zamanda yeni teknolojilerin hayat bulmasını da mümkün kılıyor. ■

Kaynaklar

Ossiander, M., Riemensberger, J., ve ark., "Absolute timing the photoelectric effect", *Nature*, Cilt 561, s. 374-377, 2018.

Fennel, T., "Timing the action of light on matter", *Nature*, Cilt 561, s. 314-315, 2018.

Zubairy, M.S., ve ark., *Optics in Our Time*, Springer International Publishing, s. 1-24, 2016.

Reinert, F., Hüfner, S., "Photoemission spectroscopy-from early days to recent applications", *New Journal of Physics*, Cilt 7, s. 97, 2005.

Priwer, S., Phillips, C., "The Everything Einstein Book", F+W Publications Inc., 2002.

<http://photonterrace.net/en/photon/history/>

<http://sci.esa.int/education/50380-the-photoelectric-effect/>

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1921/summary/>