

AZ ATTOSZEKUNDUMOS TUDOMÁNY SZÜLETÉSE – A 2023-AS FIZIKAI NOBEL-DÍJ*

THE BIRTH OF ATTOSECOND SCIENCE: THE 2023 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Varjú Katalin¹, Dombi Péter², Szabó Gábor³

¹PhD, tudományos igazgató, ELI ALPS, ELI-HU Nkft., Szeged
docens, Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged
katalin.varju@eli-alps.hu

²az MTA doktora, osztályvezető, ELI ALPS, ELI-HU Nkft., Szeged
kutatóprofesszor, Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
dombi.peter@eli-alps.hu

³az MTA rendes tagja, ügyvezető, ELI ALPS, ELI-HU Nkft., Szeged
egyetemi tanár, Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged
gabor.szabo@eli-alps.hu

ÖSSZEFOGLALÁS

A 2023-as fizikai Nobel-díjat elektronok atomokban, molekulákban és szilárd anyagokban történő mozgásának attoszekundumos spektroszkópiával való tanulmányozásáért ítelték oda. A díjazottak, Krausz Ferenc, Anne L'Huillier és Pierre Agostini kísérleteikkel olyan fényfelvillanásokat (ún. attoszekundumos fényimpulzusokat) hoztak létre, amelyek elég rövidnek bizonyultak ahhoz, hogy pillanatfelvételeket készítsenek az elektronok rendkívül gyors mozgásáról. Ezáltal a mikroszkopikus világnak olyan folyamatait figyelhetjük meg, ahol fizikai és kémiai reakciók mennek végbe, kötések alakulnak ki, anyagok elemi tulajdonságai változnak meg. A folyamatok megértésével lehetőséget kapunk rá, hogy ezeket majd befolyásolni, irányítani tudjuk.

ABSTRACT

The 2023 Nobel Prize in Physics was awarded for the study of the movement of electrons in atoms, molecules, and solids using attosecond spectroscopy. The laureates, Ferenc Krausz, Anne L'Huillier, and Pierre Agostini, have experimentally created flashes of light (so-called attosecond light pulses) that are short enough to provide snapshots of the extremely fast motion of electrons. In this way, we can observe processes in the microscopic world where physical and chemical reactions take place, bonds are formed, and the elementary properties of materials are changed. Understanding these processes will enable us to influence and control them.

* Ez a tanulmány a *Fizikai Szemle* 2023. novemberi számában megjelent, a szerzők által jegyzett cikk alapján készült (Dombi–Varjú, 2023), illetve jelen cikkünkben megismételtünk néhány gondolatot a *Magyar Tudomány* 2023. decemberi számában közölt cikkünkéből is (Varjú et al., 2023).

Kulcsszavak: attoszekundumos tudomány, fizikai Nobel-díj 2023, ultrarövid impulzusú lézerek, elektrondinamika

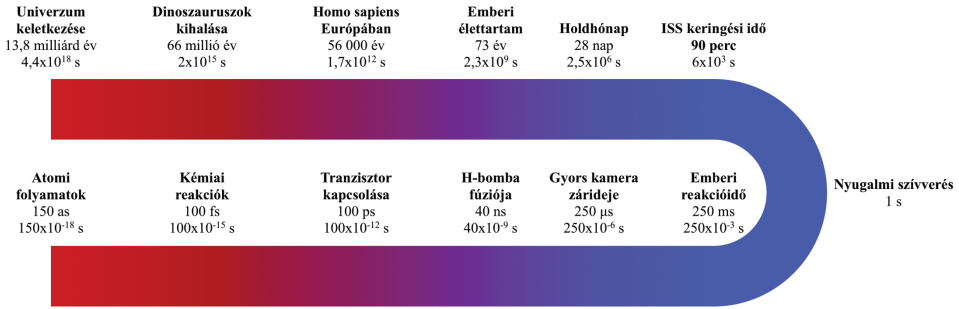
Keywords: attosecond science, Nobel Prize in Physics 2023, ultrashort pulsed lasers, electron dynamics

A 2023. évi fizikai Nobel-díjat elektronok atomokban, molekulákban és szilárd anyagokban történő mozgásának attoszekundumos spektroszkópiával való tanulmányozásáért ítelték oda. A díjazottak, Krausz Ferenc, Anne L’Huillier és Pierre Agostini kísérleteikkel olyan fényfelvillanásokat (ún. attoszekundumos fényimpulzusokat) hoztak létre, amelyek elég rövidnek bizonyultak ahhoz, hogy pillanatszerűen készítsenek az elektronok rendkívül gyors mozgásáról. Ezáltal a mikroszkopikus világnak olyan folyamatait figyelhetjük meg, amelyekben fizikai és kémiai reakciók mennek végbe, kötések alakulnak ki, anyagok elemi tulajdonságai változnak meg. A folyamatok megértésével lehetőséget kapunk rá, hogy ezeket majd befolyásolni, irányítani tudjuk.

Az atomok és molekulák világában lejátszódó folyamatok annál gyorsabbak, minél közelebb kerülünk az anyagok elemi építőköveihez, minél kisebb (tömegű) részecskéket vizsgálunk. A mikroelektronikai eszközök, integrált áramkörök legjobb esetben is néhány száz pikoszekundumos¹ kapcsolási sebességgel bírnak. Ezzel szemben, a fény által indukált bizonyos kémiai reakciók femtoszekundumos időskálán zajlanak le. Az 1980-as évek végére a lézertechnológia rohamos fejlődésének köszönhetően már elérhetőek voltak femtoszekundumos lézerimpulzusok. Ezek segítségével valós időben megfigyelhetővé vált az atommagok mozgása molekulákban és szilárdtestekben. Az ehhez kapcsolódó mérés technikát, a pumpapróba elrendezésen alapuló femtokémiai eljárás kidolgozását az 1999-es kémiai Nobel-díjjal ismerték el (Ahmed Zewail). Az atomi elektronok – kis tömegüknek köszönhetően még ennél is ezerszer gyorsabban mozognak, így jutunk el az attoszekundumos skálához. Például az alapállapotú hidrogénatom Bohr-modelljében az elektronhoz rendelhető pályaidő 150 attoszekundum. Az *1. ábra* azt is jól illusztrálja, hogy milyen elképesztően rövid időtartamokról van szó.

Az elektronok mozgásának vizsgálatához szükséges attoszekundumos impulzusok előállítása, detektálása és kontrollálása nem egyszerű. A lézerekkel előállítható impulzusok hosszának természetes határa van a néhány femtoszekundumos tartományban, mégis ezen lézerimpulzusok biztosították a lehetőséget a rövidebb időtartomány meghódításához: kihasználva a nagyon rövid, intenzív lézertereket, attoszekundumos impulzusokat lehet előállítani.

¹ A piko (rövidítve p) előtag az alapegység 10^{-12} -szeresét jelenti, a femto (f) a 10^{-15} -szorosát, míg az atto (a) a 10^{-18} -szorosát.



1. ábra. A természet időskáláinak bemutatása

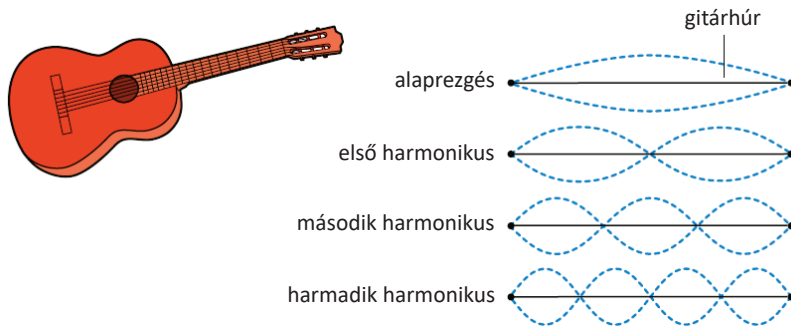
(A szerzők munkája, akik ezúton mondanak köszönetet a Wigner Fizikai Kutatóközpont munkatársainak, Bánhegyi Baláznak és Rácz Péternek az ábra elkészítésében nyújtott közreműködésükért.)

Az attoszekundumos tudomány kialakulásához két fontos lézerfizikai fejlesztésre volt szükség, amit aztán a rövid impulzusokkal keltett nemlineáris kölcsönhatás követett az attotudományhoz vezető úton. Femtoszekundumos lézerek már a hetvenes évek óta a kutatók rendelkezésére állnak, azonban a nyolcvanas években két olyan fontos fejlesztés is történt, amely lehetővé tette a jelentős impulzusrövidítést és az impulzusenergia növelését. Ezek aztán a korábbiaknál nagyságrendekkel nagyobb lézerimpulzus-csúcsteljesítményhez vezettek. Az egyik ilyen fejlesztés a 2018-ban Nobel-díjjal elismert fázismodulált impulzuserősítés (*chirped pulse amplification*, CPA) elve volt. Rövid lézerimpulzusok többzerszeres időbeli nyújtásával, majd az impulzusok lézerezősítő utáni összenyomásával napjainkban akár petawattos (PW) csúcsteljesítményű lézerimpulzusok is elérhetők. Másrészt pedig egy új lézerek, a titánionokkal adalékolt zafír (szokásos jelöléssel: Ti:zafír) 1988-as felfedezése hatalmas lökést adott a nagy intenzitású, többfokozatú lézerezősítők fejlesztésének. Ez a lézerek minden korábbinál rövidebb, jól erősíthető femtoszekundumos impulzusok előállítását teszi lehetővé.

Krausz Ferenc már az 1990-es évek legelején, a Bécsi Műszaki Egyetemen folytatott kutatásai során felismerte a Ti:zafír-technológiában rejlő hatalmas potenciált. Számos lézerfizikai fejlesztést valósított meg annak érdekében, hogy ezek a lézerek minél rövidebb impulzusokat biztosítsanak. Ebben az időszakban született meg, jelentős budapesti hozzájárulással a korszakalkotó találmány, a fáziskorrigáló lézertükör is (*chirped mirror*, csörpölt tükör), amelyet Krausz Ferenc és Szipőcs Róbert jegyeznek feltalálóként. Ez a technológia is hozzájárult ahhoz, hogy Krausz Ferenc a bécsi intézetet a lézerfizika vezető kutatóhelyévé fejlessze.

Az attoszekundumos impulzusok előállításának kulcsa, hogy a lézerimpulzusok kedvező tulajdonságait egy nagyobb frekvenciájú (rövidebb periódusidejű) tartományba konvertáljuk az intenzív lézertér és anyag nemlineáris kölcsönhatása révén.

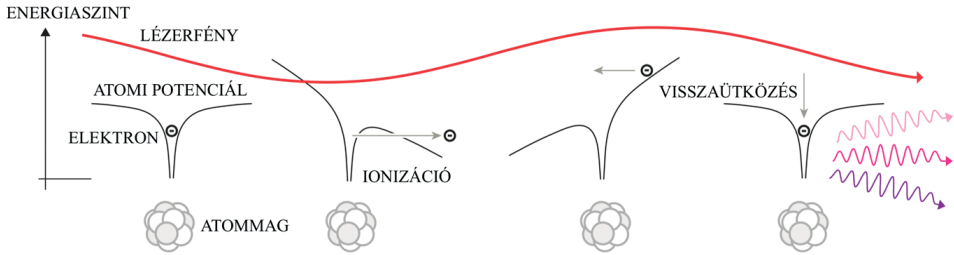
Anne L’Huillier és munkatársai az 1980-as években a párizsi CEA-Saclay intézetben azt vizsgálták, hogy intenzív infravörös lézerpulzusok nemesgázokkal való kölcsönhatása eredményeként az áthaladó fényben megjelennek igen magas rendű felharmonikusok, akár a századik rendig. Ahhoz, hogy nagyon rövid impulzust hozzunk létre, nagy sávszélességű (különböző frekvenciájú) fényhullámokat kell összeadnunk. Minél rövidebb impulzust szeretnénk, annál nagyobb sávszélességű sugárzásra van szükség. L’Huillier felfedezte, hogy az általuk vizsgált magasrendű harmonikusok keltése (*high harmonic generation*, HHG) során egy igen széles platónak nevezett tartományban közel azonos erősségű komponensek keltődnek. Ilyen nagy sávszélességű sugárzás – megfelelő fázisviszonyok esetén – igen rövid impulzusok létrehozását teheti lehetővé. A harmonikusok keltését egy hangtani példával illusztráljuk: egy gitárhúr megpengetésekor annak rezgéseiben is megjelennek a harmonikusok, amelyek félhullámhossza a gitárhúr hosszának egész számmal való osztásaként áll elő, a 2. ábrán bemutatott módon.



2. ábra. Felhangok egy gitárhúron. Az ábra az első három, alacsony rendű felhanghoz kapcsolódó állóhullámot mutatja be
(The Royal Swedish Academy of Sciences, nobelprize.org nyomán)

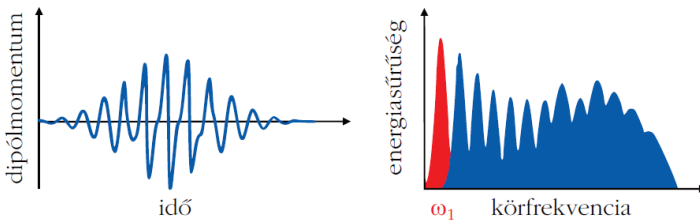
Ugyanez történik a lézerpulzust alkotó fényhullámokkal is, ha azok nemesgáz-atomokkal hatnak kölcsön. Ilyen esetben viszont nemcsak a 3. ábrán bemutatott, alacsony rendű felharmonikusok keletkeznek, hanem akár a 100. rend környékén található, nm-es hullámhosszhoz közeli fényhullámok is. Ez már az ultraibolyán is túli spektrális tartomány, amit a szakirodalomban extrém ultraibolya (XUV) tartománynak is neveznek.

A magasrendű felharmonikusok keltését az atomok intenzív lézertérbeli ionizációja teszi lehetővé, lásd 3. ábra. A fókuszált lézernyaláb által biztosított külső elektromos tér olyan mértékben torzítja az atomi potenciált, hogy a leggyengébben kötött elektron alagutazással kiléphet az atomból. Az oszcilláló tér miatt lehetőség van arra, hogy a kiszakított elektron gyorsulás után visszatérve az ionnal rekombinálódjon, és a mozgása során gyűjtött többletenergiát fény formájában, egy magasharmonikus foton kisugárzásával adja le.



3. ábra. A magasrendű optikai felharmonikuseltés fizikai folyamata, amelynek során az infravörös lézerfény XUV-tartománybeli sugárzássá alakul át a nemesgázatomokkal való kölcsönhatás során (The Royal Swedish Academy of Sciences, nobelprize.org nyomán)

Az XUV-sugárzás keltése tehát végeredményben annak köszönhető, hogy a lézerimpulzus által ionizált elektront a lézerfény rezgésre kényszeríti, és az intenzív kényszererő miatt ez az oszcilláció nem tökéletesen harmonikus (4. ábra), így a keltett sugárzásban megjelennek a felharmonikus komponensek, akár a gitárhúr rezgésinél.



4. ábra. ω_1 körfrekvenciájú lézerfény magasrendű felharmonikusainak kialakulása.

Bal oldalon a felharmonikus frekvenciákat is tartalmazó, nem szinuszosan változó dipólmomentum. Jobb oldalon a 12 spektrális komponensből álló felharmonikus spektrum jellemző részei: (1) gyorsan csökkenő intenzitású, alacsony rendű harmonikusok, (2) állandó erősségű plató és (3) a spektrum végét jelző levágás (Varjú Katalin szerkesztése)

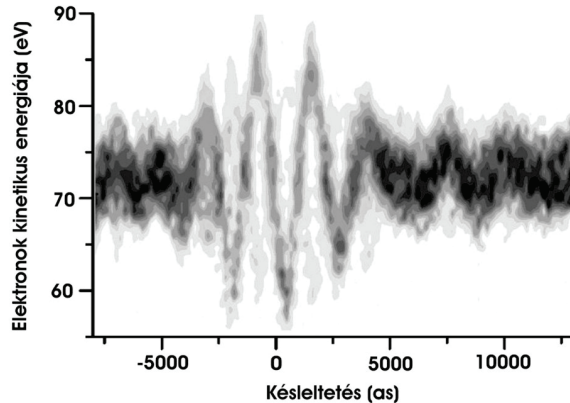
Ezen magas felharmonikus keltési eredményeket látva, Farkas Győző és Tóth Csaba, a budapesti Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet munkatársai 1992-es cikkükben elsőként fogalmazták meg azt az állítást, hogy a felharmonikus sugárzás időbeli lefutása potenciálisan egy attoszekundumos impulzusokból álló vonulatot eredményez. Ez az állítás abban az időben még nem volt igazolható, hiszen a sugárzás fázisviszonyait nem ismerték, és a sugárzás időbeli karakterizálásához nem állt rendelkezésre mérési eljárás. További tíz évet kellett várni, hogy a sugárzás időbeli alakját mérni, az attoszekundumos impulzusok létezését igazolni lehessen.

Az attoszekundumos impulzusok létének igazolásához a mérés technikában a 2001-es év hozta el az áttörést. Krausz Ferencnek és Pierre Agostininek két különböző kísérleti módszerrel, egymástól függetlenül sikerült bizonyítani, hogy a felharmonikuseltetés (a megfelelő spektrális szűrés után) attoszekundumos impulzusokat eredményez. Pierre Agostiniék egy spektrális tartományban alkalmazott interferometrikus módszerrel bizonyították 250 attoszekundumos impulzusokból álló XUV-impulzusvonalat létét. Krausz Ferencék pedig egy időtartománybeli módszerrel karakterizálták az izolált 650 attoszekundumos impulzusokat. Érdekes módon, mindkét karakterizálási eljárásban a mérendő XUV-sugárzás és a hozzá képest késleltethető, azt keltő lézerimpulzus együttese által ionizált elektronok eloszlását vizsgálták – egymástól gyökeresen eltérő módszerekkel. Ezek a karakterizálási módszerek a mai napig alkalmazásban vannak. Nem csupán igazolták az attoszekundumos impulzusok létét, de megalapozták magát az attoszekundumos tudományt. Ezen eredményeknek köszönhetően 2001-ben megszületett egy új kutatási terület. Krausz, L’Huillier és Agostini munkája egy folyamatosan növekedő tudományos közösséget inspirált egyre rövidebb impulzusok keltésére, újabb mérési eljárások fejlesztésére és elektronfolyamatok vizsgálatára.

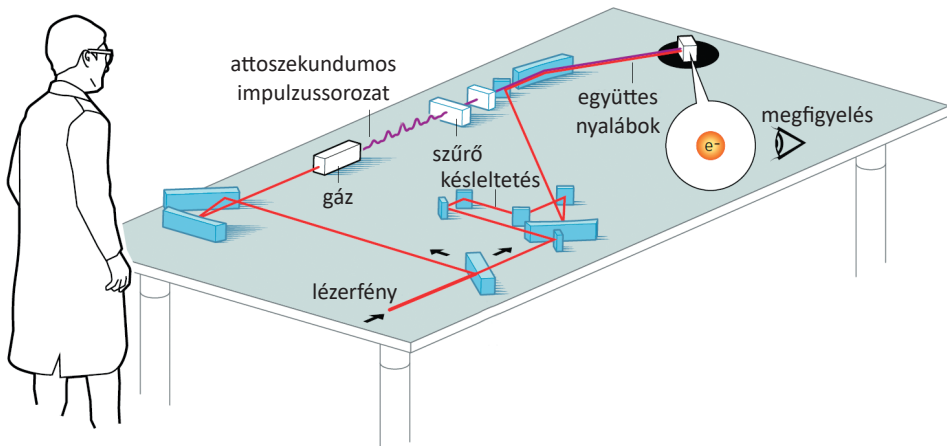
Néhány évvel később Krausz Ferenc, akkor már a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben 80 attoszekundumos impulzusokat állított elő, amelyre még a *Guinness Rekordok Könyve* is felfigyelt, és oklevéllel jutalmazott. Azóta pedig a világrekord Svájcba vándorolt, és 2017 óta 43 attoszekundum a valaha előállított legrövidebb fényimpulzus hossza. Az impulzusok rövidségénél azonban sokkal fontosabb az, hogy milyen új fizikai mérés technikát tesznek lehetővé az attoszekundumos fényforrások. Attoszekundumos gyorsaságú változás például a látható fény elektromos terének a változása, hiszen például a 700 nm-es vörös fény oszcillációs periódusa 2,33 femtoszekundum, vagyis a fényhullám attoszekundumos időskálán változik. Attoszekundumos módszerekkel Krausz Ferencék 2004-ben tették először közvetlenül láthatóvá a fényhullámot. Az 5. ábra egy infravörös lézerimpulzus elektromos terének attoszekundumos pontossággal mért oszcillációját mutatja meg. A lézerimpulzus elektromos terét közvetlenül az elektronok kinetikus energiájának változásával tudták megjeleníteni.

Az attoszekundumos fényforrások legjelentősebb felhasználási területe az, hogy lehetővé teszik atomok, molekulák vagy szilárdtestek elektronjai ultragyors folyamatainak vizsgálatát. Az attoszekundumos mérés technika az elmúlt húsz évben lehetővé tette olyan kérdések megválaszolását is, amelyekre korábban nem létezett kísérleti vizsgálati módszer. 1905-ben Albert Einstein publikálta a fényelektromos hatás első magyarázatát, de akkoriban lehetetlen volt meghatározni a hatás szempontjából releváns időskálákat. A kutatók sokáig azt feltételezték, hogy a hatás azonnali. A Krausz-csoport egy úttörő kísérletben

azt találta, hogy amikor a neonatomot az attoszekundumos impulzusok ionizálják, időbeli késés figyelhető meg a különböző kezdeti szintről kilépő elektronok között. Az ilyen fotoemissziós késések az elektronfelhő kollektív dinamikájának jelei.



5. ábra. Ultrarövid, infravörös lézerpulzus elektromos tere, attoszekundumos pontossággal megmérve (Dombi Péter szerkesztése)

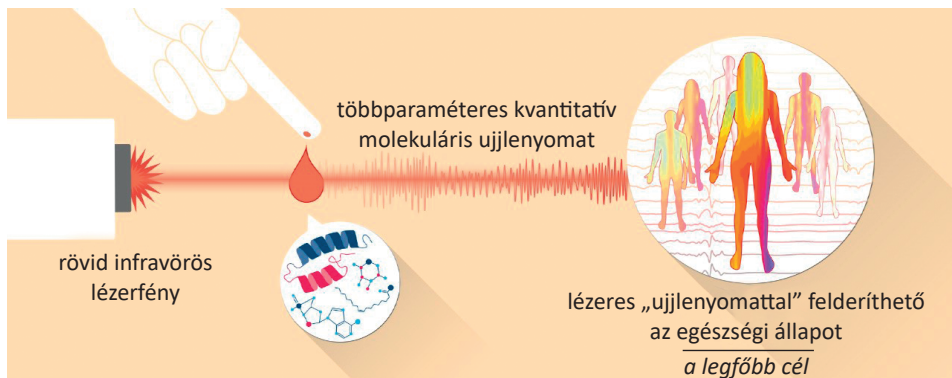


6. ábra. Egy attoszekundumos kísérlet sematikus illusztrációja.

A femtoszekundumos lézernyaláb megosztásával a nyaláb egy része attoszekundumos impulzusorozatot kelt, amely a nyaláb másik részével változó késleltetés után egyesül. A lézer és az attoszekundumos impulzusok együttesen fókuszálódnak a vizsgált céltárgyra, amelyből elektronokat ionizálnak. A késleltetés függvényében vizsgálva a keltett elektronok spektrumát a céltárgyban lejátszódó gyors folyamatokról kapunk információt (The Royal Swedish Academy of Sciences, nobelprize.org nyomán)

Az attoszekundumos kutatások lehetővé teszik, hogy különböző anyagok elektronjainak tulajdonságait, ezek mozgásait vizsgáljuk, többnyire a 6. ábrán látható pumpapróba elrendezéséhez hasonló módon. A pumpaként használt impulzus egy változást indít be a vizsgált anyagban, amelynek eredményét a próbaimpulzus a késleltetésnek megfelelő pillanatokban teszteli. A kísérletekben a kiszabadult elektronok vagy ionok mozgását (sebességét, irányát) tudjuk megfigyelni, ezekből a megfigyelésekből lehet következtetni arra, hogy az első impulzus hatására milyen folyamat indult be, milyen lépéseken keresztül milyen gyorsan zajlott le, a folyamat során milyen módon hatottak egymásra a vizsgált anyagunk elemi összetevői. Ezek a kísérletek az anyag felépítésének egy újfajta megértését teszik lehetővé.

Krausz Ferenc 2019-ben Budapesten megalapította a Molekuláris Ujjlenyomat Kutatóközpontot, amelynek célja vérminták elemzésével szív- és érrendszeri, valamint rákbetegségek korai stádiumban történő diagnosztizálása. A vizsgálatához egy általuk fejlesztett speciális lézert és az attoszekundumos technológiából kialakult új módszert használnak (térfeloldott spektroszkópia, *field-resolved spectroscopy*). A hagyományos spektroszkópai módszerektől eltérően nem a spektrális tartományban mérik a folyadékminták válaszjelét, hanem ultrarövid lézermimpulzusokkal gerjesztik azokat, és a gerjesztő impulzus elhaladása után a komplex molekuláris rendszer által kisugárzott infravörös fénycsillágot mérik meg közvetlenül az időtartományban, amit mesterséges intelligencia segítségével elemeznek. Módszerüket egy széles körű egészségmegőrzési program alappillérenek, a széles populáció egészségi állapotának monitorozására terjesztették elő (7. ábra).



7. ábra. Krausz Ferenc rövid impulzusokra épülő molekuláris ujjlenyomat módszere széles populáció egészségi állapotának monitorozására alkalmazható (Attoworld, URL3 nyomán)

Ez az írás az attoszekundumos tudomány születéséről, a Nobel-díjjal jutalmazott felfedezések háttéréről szól. Az attoszekundumos tudomány jelenleg az alap kutatási fázisban van. Az új felfedezések nem most azonnal hatnak ki az életünkre,

most még nem lesz tőle olcsóbb a kenyér. De a kidolgozott kísérleti módszereket, mérés technikákat, az értelmezéshez használt szimulációs modelleket fokozatosan egyre gyakorlatibb problémák megoldására alkalmazzák. A tudományterület, amely ezekből a felfedezésekből született, igen széles spektrumú: ami az atomfizika többfoton-folyamatainak meglehetősen szűkre fókuszált területeként indult, mára a molekuláris fizika, a fizikai kémia, a kondenzáltanyag-fizika és az alkalmazott területek, például az anyagtudomány, gyógyszerészet, elektronika vagy akár orvos-biológiai vizsgálatok területén is alkalmazható. A modern alkalmazások legelső példája a széles sávú optika, az ultragyors lézerforrások és a precíziós femtoszekundumos–attoszekundumos térfeloldó technológiák kombinálásával kifejlesztett, Krausz Ferenc által irányított molekuláris ujjlenyomat eljárás, amely képes kimutatni a biofluidok molekuláris összetételének változásait. Ez új, *in vitro* diagnosztikai analitikai technikaként ígéretes a betegségek korai stádiumban való felismerésében.

A svéd Alfred Nobel által több mint egy évszázaddal ezelőtt alapított kitüntetés a tudományos eredmények elismerésének csúcsát jelenti. A Nobel-díj évről évre kiemeli a tudomány legragyogóbb elméi közül néhányat. Amikor a díjazottak személyét nyilvánosságra hozzák, az többnyire ünneplést hoz, mint az ez alkalommal a magyar tudósok körében, de alkalmanként értetlenséget és vitát is szülhet arról, hogy a bizottság kit választ, és kit hagy ki a díjazottak köréből. Az elmúlt évtizedekben a tudományos kutatás egyre szélesebb együttműködések keretében folyik, így egyre nagyobb kihívást jelent, hogy a Nobel-bizottság megfeleljen az alapító által megfogalmazott, 1895-ös kitételnek, hogy díjanként legfeljebb három személyt tüntethetnek ki.

Az attoszekundumos tudomány megalapozásáért most három kutatót díjaztak, ami a tudományos közösségben nagy örömet, ugyanakkor értetlenséget is kiváltott, hiszen a díjazottak közül hiányzik Paul Corkum kanadai fizikus, aki szintén az attoszekundumos tudomány egyik megalapozójának számít. Fontos szerepe volt a magas harmonikus keltése klasszikus és kvantumos elméletének kidolgozásában, vitathatatlan a hozzájárulása a Krausz-csoport által alkalmazott attoszekundumos sávkamera módszer kidolgozásához, és számos további mérés-technikai és tudományos módszert is fejlesztett. Ha nem lenne a hármas szabály, minden bizonnyal ő is a díjazottak között lenne.

Egy ilyen írás végén elvárható, hogy említés essék a jövőről. Ez esetünkben azért is kézenfekvő, mert ebben Magyarországra központi szerep vár, hiszen Szegeden épült meg az ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet. Az intézet kutatási profiljában az egyik fókuszterület az attoszekundumos fizika, erre utal az intézet nevében az ALPS – Attosecond Light Pulse Source (attoszekundumos fényimpulzusforrás) – betűszó első betűje. Az intézmény célja kifejezetten az, hogy az attoszekundumos tudomány elterjedését szolgálja azzal, hogy kísérleti lehetőséget kínál érdeklődő kutatóknak a világ bármely tájáról. Számunkra az, hogy a tudományterület vezető

kutatói – akik közül ketten, Krausz Ferenc és Anne L’Huillier komoly szerepet játszottak az intézet létrejöttében, és akikkel jelenleg is kapcsolatban állunk – Nobel-díjat kaptak, azt az üzenetet hordozza, hogy az attoszekundumos tudomány az emberiség számára jelentős felfedezésnek minősül.

Krausz Ferenc a Budapesti Műszaki Egyetemen folytatott villamosmérnöki, illetve az Eötvös Loránd Tudományegyetemen elméleti fizikai tanulmányokat. A Bécsi Műszaki Egyetemen 1991-ben doktorált, 1993-ban habilitált, majd ugyanitt professzornak nevezték ki. 2003-ban a garchingi (Németország) Max Planck Kvantumoptikai Intézet igazgatójává nevezték ki, 2004 óta pedig a müncheni Lajos Miksa Egyetem Kísérleti Fizika Tanszékét is vezeti. 2007 óta a Magyar Tudományos Akadémia külső tagja, 2019 óta pedig a budapesti Molekuláris Ujjenyomat Kutatóközpont ügyvezetője.

Anne L’Huillier francia származású kutatónő a párizsi Pierre és Marie Curie Egyetemen szerzett doktori fokozatot. Kutatóként először francia intézetekben helyezkedett el (French Alternative Energies és Atomic Energy Commission (CEA), majd svéd (Chalmers Institute of Technology, Göteborg) és amerikai (University of Southern California, Los Angeles) intézetekben dolgozott. 1995 óta a svédországi Lundi Egyetem professzora, oktat és kutat.

Pierre Agostini Tunéziában született, az Aix-Marseille Egyetemen szerzett doktori fokozatot. A párizsi CEA-intézetben kapott kutatói állást, de dolgozott a Southern California Egyetemen, az amszterdami FOM Intézetben és a Brookhaven Nemzeti Laboratóriumban. 2005 óta az Ohioi Állami Egyetem professzora.

IRODALOM

- Dombi Péter (2005): Femtokémiából attofizika? *Mafigyelő, a Magyar Fizikushallgatók Egyesületének lapja*, 15, 2, 6–7. <https://mafihe.hu/wp-content/uploads/2013/11/mafiyelo2005maj.pdf>
- Dombi Péter – Varjú Katalin (2023): Krausz Ferenc, az attofizika úttörője. *Fizikai Szemle*, 11, 390–393. http://fizikaiszemle.hu/uploads/2023/11/dombip-varjuk_12_33_40_1700220820.6031.pdf
- Farkas Győző (2006): Attoszekundumos időtartamú fényimpulzusok. *Fizikai Szemle*, 56, 12, 408–412. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0612/FarkasGy.pdf>
- Krausz Ferenc (2002): Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle*, 52, 1, 12. <http://fizikaiszemle.hu/old/archivum/fsz0201/krau0201.html>
- Varjú Katalin (2008): Attoszekundumos impulzusok. *Fizikai Szemle*, 58, 3, 87–92. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0803/VarjuK.pdf>
- Varjú Katalin – Dombi Péter – Szabó Gábor (2023): Nobel-díj az attofizikáért. *Magyar Tudomány*, 184, 12, 1502–1506. DOI: 10.1556/2065.184.2023.12.3, https://mersz.hu/hivatkozas/matud202312_f95869/#matud202312_f95869

URL1: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/advanced-information/>

URL2: <https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/popular-physicsprize2023.pdf>

URL3: Attoworld: *Broadband Infrared Diagnostics. Spectral Profiling of Human Physiologies*. <https://www.attoworld.de/bird/our-research.html#e1291>

Az attoszekundumos fizikáról további, mélyebb ismeretek találhatóak az alábbi angol nyelvű cikkekben, amelyek hivatkozásokat tartalmaznak a tudományos eredményeket tartalmazó eredeti közleményekre is.

Agostini, Pierre – DiMauro, Louis F. (2004): The Physics of Attosecond Light Pulses, Reports on Progress in Physics, 67, 1563. DOI: 10.1088/0034-4885/67/6/R01, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0034-4885/67/6/R01>

Corkum, Paul B. – Krausz Ferenc (2007): Attosecond Science. *Nature Physics*, 3, 6, 381–387. DOI: 10.1038/nphys620

Krausz Ferenc (2001): From Femtochemistry to Attophysics. *Physics World*, 1 September 2001. <https://physicsworld.com/a/from-femtochemistry-to-attophysics/>

Krausz Ferenc – Ivanov, Misha (2009): Attosecond Physics. *Reviews of Modern Physics*, 81, 163. DOI: 10.1103/RevModPhys.81, <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft?id=1245a958-9c93-4116-bfdb-f447e8a53c48>