

NOBEL-DÍJ AZ ATTOFIZIKÁÉRT

NOBEL PRIZE FOR ATTOSECOND 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

A 2023-as fizikai Nobel-díjat az elektronok atomokban, molekulákban és szilárd anyagokban történő mozgásának attoszekundumos spektroszkópiával való tanulmányozásáért ítelték oda. Az idei 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.

Az ma már közhelynek tekinthető, hogy egy adott kor tudományos fejlettségének szintje lemérhető azon, hogy milyen mérettartományon képes kísérletezni. Az talán kevésbé nyilvánvaló, de végigtekintve a tudománytörténeten világos, hogy a tudományos fejlettség annak alapján is megítélhető, hogy milyen gyors folyamatokat vagyunk képesek tanulmányozni. Fizikai világunk megértéséhez tehát olyan eljárásokra van szükség, amelyek pillanatfelvételeket tudnak készíteni az adott folyamatról. Ilyen volt a 20. század második felében kifejlesztett nagy sebességű fényképezés vagy stroboszkóp technika, amely lehetővé tette például egy kolibri repülésének vizsgálatát. A stroboszkóp módszer által kínált, mintegy egymilliomod másodperces felbontás a makroszkopikus világban elegendő volt. A kvantummechanika kifejlesztésével részletes számításokat lehetett végezni az atomok mozgásáról a molekulán belül. Azonban ennek kísérleti vizsgálatához még további egymilliárdszoros ugrásra van szükség, azaz a femtoszekundumos tartományra. Ez az ugrás a 20. század utolsó évtizedében sikerült, amelyet legjobban talán Ahmed Zewailnak a kémiai reakciók átmeneti állapotainak femtoszekundumos spektroszkópiával történő tanulmányozásáért odaítélt 1999-es kémiai Nobel-díja fémjelez. Az atomok mozgása már vizsgálható, de a teljes képhez szükség lenne az elektronok mozgásának megértésére is. Csakhogy az elektronok

kis tömegük miatt az atomoknál is ezerszer gyorsabban mozognak, így a 2000-es évek fordulójára készen állt a színpad az attoszekundumos technika színrelépéséhez.

A lézerek, 1960-as felfedezésük óta, kulcsszerepet játszottak az időbeli feloldás javulásában, miután az elérhető legrövidebb impulzushossz folyamatosan csökkent. Femtoszekundumos festéklézerek már a hetvenes évek óta a kutatók rendelkezésére álltak, a nyolcvanas években olyan fontos fejlesztések történtek, amelyek lehetővé tették igen rövid, nagy energiájú, a korábbiaknál nagyságrendekkel nagyobb csúcsteljesítményű lézerimpulzusok előállítását. Az egyik ilyen fejlesztés a 2018-ban Nobel-díjjal elismert fázismodulált impulzuserősítés (chirped pulse amplification, CPA) elve volt. Másrésről pedig, a titánionokkal adalékolt zafirkristály (szokásos jelöléssel: Ti:zafír) mint lézeryanyag 1988-as felfedezése hatalmas lökést adott a többfokozatú lézerezősítők fejlesztésének.

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 a fáziskorrigáló lézertükör is (chirped mirror, csörpölt tükör), melyet Krausz Ferenc és Szipőcs Róbert jegyeznek feltalálóként. Az első ilyen tükröket 1993-ban Ferencz Kárpát állította elő a Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetben. Ez a technológia is hozzájárult ahhoz, hogy Krausz Ferenc a bécsi intézetet a lézerfizika vezető kutatóhelyévé fejlessze, de ezek az eredmények az attofizikában is nagyon hasznosnak bizonyultak.

Ahhoz, hogy az attoszekundumos impulzusok előállításával kapcsolatos alapvető problémát megérthessük, egy kis kitérőt célszerű tenni. A fény elektromágneses hullám, amely mint minden hullám, egymást követő hullámhegyek és hullámvölgyek vonulatából áll. Ha egy ilyen hullámvonulatból impulzust akarunk előállítani, akkor valamilyen módszerrel kivágunk, mondjuk, tíz egymást követő hullámhegyet. Az elérhető legrövidebb impulzushossz nyilván egy hullámhegy időtartama. A rossz hír az, hogy a lézerek jellemzően a látható fény tartományában működnek, ebből következően ez a minimális időtartam néhány femtoszekundum. Lézerekkel tehát nem lehet közvetlenül attoszekundumos impulzusokat előállítani. A továbblépéshez az ötletet egy akusztikus analógia alapján érthetjük meg. Ha egy hegedűt úgy szólaltatunk meg, hogy a vonót nagyon erősen rányomjuk a húrokra, torz hang lesz az eredmény, mert a túl erős gerjesztés hatására megjelennek felhangok, azaz az alaphangot jelentő frekvencia többszörösei (ezeket szokás a zenében oktávoknak nevezni). A lézerek felfedezése után kiderült, hogy az erős lézertény képes bizonyos anyagokat – jellemzően kristályokat – olyan viselkedésre készíteni, hogy megjelenik az alapfény oktávja. A következő évtizedekben sikerült ezt a technológiát úgy továbbfejlesztetni, hogy a frekvencia-többszörözés – jellemzően második vagy harmadik harmonikus keltése – a gya-

korlatban használt lézertechnológiák részévé vált. (Kevesen gondolnak arra, hogy amikor egy zöld fényű lézermutatót tartanak a kezükben, abban már ezt a jelenséget használják ki: a lézer az infravörös, tehát a szemmel nem látható tartományban működik, a szép zöld fény, az alapprofektencia oktávja.) A frekvenciátöbbszörözés fejlődése önmagában roppant fontos eredményekkel járt, de volt egy nagy probléma: ezek a technikák csak a néhány oktávnyi tartományban működnek, az attoszekundumos impulzusok előállításához harminc-ötven oktávra lenne szükség. A megoldás felé vezető utat egy más irányból elindult kutatás nyitotta meg. A lézerek teljesítményének folyamatos növelése az 1980-as évektől kezdve lehetővé tette a fény-anyag kölcsönhatás tanulmányozását az extrém intenzitások tartományában. Ez már technikai és fizikai szempontból is egy másik világ. A technikai különbség ott kezdődik, hogy céltárgyként nem használhatóak a szokásos optikai anyagok, mert azokat a lézer tüstént roncsolja, céltárgynak nem marad más, mint a vákuumkamrába bevezetett gázsugár.

Az 1980-as évek végétől kezdve az extrém fény-anyag kölcsönhatás tanulmányozására – beleértve a magas felharmonikusok keltését – irányuló kísérletekben élenjáró volt a Paris-Saclay-i kutatóközpont, ahol a másik két díjazott, Anne L’Huillier és Pierre Agostini dolgozott. A kísérleti tapasztalatok meglepő eredményekre vezettek, amelyek megértése alapozta meg az erőstér-fizika fejlődési irányát, ami két évtizeddel később az attofizika megszületéséhez vezetett.

A saclay-i kutatóközpont munkájába már az 1970-es évektől kezdve bekapcsolódott Farkas Győző, a budapesti Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet kutatója. Látva a magas harmonikus keltésének eredményeit, akkori doktoranduszával, Tóth Csabával 1992-ben egy figyelemre méltó dolgozatban elsőként fogalmazták meg az akkor még vitatott állítást, hogy a felharmonikus sugárzás időbeli lefutása attoszekundumos impulzusokból álló vonulatot/sorozatot alkot.

Az egyre fejlődő és elterjedő nagy intenzitású lézereknek köszönhetően a magas harmonikus keltési folyamatának megértésére, modellezésére az 1990-es években több csoport is erőfeszítéseket tett Európában, továbbá az USA-ban és Kanadában is. A kialakított elméletek azt jelezték, hogy a natív, teljes magasharmonikus sugárzás időbeli struktúrája nem mutatja a nagyon rövid attoszekundumos impulzusokat. Az attoszekundumos impulzusok létének igazolására, a mérési technikákra 2001-ig kellett várni, amikor egy évben két különböző eljárással a Krausz-csoport és az Agostini-csoport is sikeresen karakterizálta a magasharmonikus sugárzás időbeli alakját, és az elméletekkel összhangban a spektrálisan megszűrt sugárzásban mutatta ki az attoszekundumos impulzusokat.

Bár a detektálási technika hasonló, a két eljárás elvét tekintve merőben különböző, és az attoszekundumos eszköztárban külön eljárásként honosodtak meg. Pierre Agostiniék attoszekundumos impulzussorozatában az első mérésben 250 attoszekundumos felvillanásokat azonosítottak. 2003-ban technikájuk alkalmazásával L’Huillier akkor már svédországi laborjában, spektrális és diszperzív

szűréssel ez az eredmény 170 attoszekundumra rövidült. Ugyanebben az időben Krausz Ferenc bécsi kutatócsoportjával – az ottani egyedülálló lézerfejlesztéseknek köszönhetően – olyan technikán dolgozott, amely egyetlen attoszekundumos impulzust eredményez. Az impulzus, amelyet először sikerült izolálniuk és megmérniük, 650 attoszekundumig tartott, amit a következő néhány évben végzett fejlesztéseiknek köszönhetően 250 attoszekundumra javítottak. Az ezt követő évtizedben az egyre fejlődő technikáknak köszönhetően az attoszekundumos impulzusok egyre rövidültek. 2008-ban Krausz Ferenc a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben 80 attoszekundumos impulzusokért a Guinness-rekordok könyvébe is bekerült. Azóta a rekord már Svájcba vándorolt, és jelenleg 43 attoszekundum a valaha előállított legrövidebb fényimpulzus hossza.

Ez az írás az attoszekundumos tudomány születéséről, a Nobel-díjjal jutalmazott felfedezések háttéréről szól. 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.

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. Tehát jó úton indultunk el, feladatunk „csupán” az, hogy támogassuk minél több tudományos áttörés elérését.

Az attoszekundumos fizikáról további, mélyebb ismeretek találhatóak az alábbi forrásokban, amelyek hivatkozásokat tartalmaznak a tudományos eredményeket bemutató eredeti közleményekre is.

IRODALOM

- Dombi Péter (2005): Femtokémiából attofizika? *Mafigyelő, a Magyar Fizikushallgatók Egyesületének lapja*, 15, 2, 6–7. <https://mafihe.hu/wp-content/uploads/2013/11/mafigyelo2005maj.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>
- Major Balázs – Körös Pál Csaba – Varjú Katalin (2017): Attoszekundumos impulzusok keltés makroszkopikus optimalizációja. *Fizikai Szemle*, 67, 10, 331–334. <http://fizikaiszemle.hu/szemle/tartalom/31>
- Varjú Katalin (2008): Attoszekundumos impulzusok, *Fizikai Szemle*, 58, 3, 87–92. <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz0803/VarjuK.pdf>

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

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