



Pálfalvi László

■ PTE Fizikai Intézet, Kísérleti Fizika Tanszék

# Hé, elektron, most röpül a kismadár!

## A 2023-as fizikai Nobel-díj kapcsán

A 2023-as fizikai Nobel-díjat megosztva ítelték oda Krausz Ferencnek, Pierre Agostininek és Anne L’Huillier-nek „kísérleti módszereikért, melyek az anyagban jelen levő elektronok dinamikájának vizsgálatában alkalmazható attosekundumos fényimpulzusokat generálnak”.

**A** három tudós azokért a kísérleteiért nyerte el az elismerést, amelyek új eszközöket adtak az emberiség kezébe az atomokat és a molekulákat felépítő elektronok vizsgálatára. Kimutatták, hogy létre lehet hozni olyan extrém rövid ideig tartó fényimpulzusokat, amelyek segítségével vizsgálhatóvá válnak az elektronok mozgását és energiaváltozásait meghatározó gyors folyamatok [1].

### A femto-éra

Amikor mozgó objektumokat fotózunk, ügyelnünk kell az expozíciós idő helyes megválasztására, különben a kép elmosódottá válik. A hétköznapi fotózás során a mikroszekundumos ( $1 \text{ ms} = 10^{-6} \text{ s}$ ) nagyságrendű expozíciós idő még a nagy sebességű tárgyak esetén is elegendően rövid ahhoz, hogy a képminőség megfelelő legyen.

A tudományos célú „fotózkodás” fókuszában nem makroszkopikus tárgyak megörökítése, hanem az (élő vagy élettelen) anyagban a mikroszekundumnál jóval rövidebb időskálán lezajló folyamatok megismerése áll, ami mikroszkopikus részek mozgásának monitorozásával lehetséges. Erre a feladatra a legalkalmasabb eszközök az impulzuslézerek, vagyis azok a berendezések, melyek az elektromágneses energiát nem folytonos üzemmódban, hanem jól behatárolható adagokban, hullámcsomag formájában szolgáltatják. A folyamatosan bővülő alkalmazási lehetőségek az impulzuslézerekre épülő mérési technikák folyamatos tökéletesítését, az impulzusjellemzők testre szabását, optimalizálását követelték meg. Az egyik ilyen kulcsparaméter az impulzushossz, vagyis az az időtartam, ami alatt az impulzus áthalad egy a terjedésére merőlegesen elhelyezett valódi



Pierre Agostini



Anne L’Huillier



Krausz Ferenc

Pierre Agostini francia kísérleti fizikus. Tunéziában született, 1968-ban szerzett PhD-fokozatot Franciaországban, az Ohioi Állami Egyetem (Columbus, Egyesült Államok) professzora. Anne L’Huillier francia–svéd fizikus. 1986-ban doktorált Párizsban, a Lundi Egyetem (Svédország) atomfizika-professzora. Krausz Ferenc a BME Villamosmérnöki Karán és az ELTE fizikus szakán szerzett diplomát. A Bécsei Műszaki Egyetemen doktorált 1991-ben. 2003-tól a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézet igazgatója, 2004 óta a müncheni Lajos–Miksa Egyetem Kísérleti Fizika Tanszékét is vezeti. Az MTA külső tagja, 2019 óta a budapesti Molekuláris Ujjlenyomat Kutatóközpont ügyvezetője [2].

vagy elképzelt felületen. A korpuszkuláris anyag minél alacsonyabb szerveződési szintű egységét kívánjuk mozgás közben nyomon követni, annál rövidebb impulzushosszú forrásra van szükségünk.

A rövid impulzusok előállítására a standardizált, ún. móduszsinkronizációs technika [3] a 80-as évekre elérhetővé tette a 100 femtoszekundum ( $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$ ) nagyságrendű impulzushosszú, kellően nagy impulzusenergiájú lézerforrásokat. Ezek kitűnően vizsgálták az ezen és a valamivel hosszabb időskálán lejátszódó biológiai és kémiai folyamatok tanulmányozása során.

A lézerimpulzus nem más, mint egy térben és időben lokalizált hullámcsomag, amit sok folytonos, monokromatikus (egyszínű) hullám szuperpozíciójával (összegzésével) kapunk. Az impulzus időbeli alakját és hosszát az határozza meg, hogy milyen monokromatikus összetevőkből áll (spektrális összetétel), és azok egymáshoz képest milyen fázisban vannak. Móduszsinkronizációkor az összegzés az egyes spektrális összetevők közti fázisok legkedvezőbb összehangolásával, szinkronizálásával valósul meg, ezáltal az elvileg legrövidebb impulzushosszt eredményezve. Az elérhető minimális impulzushosszt a spekt-

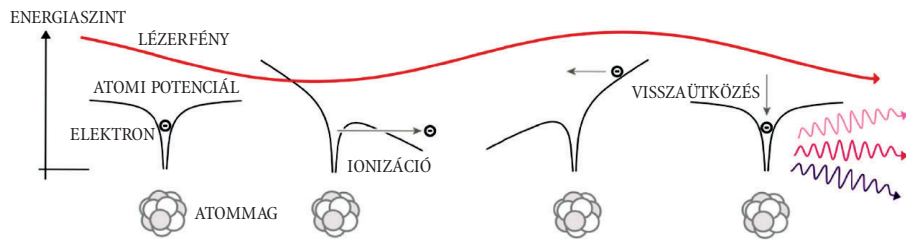


rális sáv szélessége – azaz a legnagyobb és legkisebb frekvenciájú komponensek közötti frekvenciakülönbség – határozza meg, azzal fordítottan arányos. Az impulzushossz 100 femtoszekundumos nagyságrend alá való csökkentésének fő korlátja a lézerezonátor elemeiben fellépő anyagi diszperzió elkerülhetetlen jelenléte volt. Ez annyit jelent, hogy a különböző spektrális komponensek anyagbeli terjedési sebessége különböző. Ez pedig az egyes összetevők közt fázistolást eredményez, ami óhatatlanul az impulzushossz jelentős időbeli kiszélesedéséhez vezet. A probléma orvoslására a 90-es évek elején magyar találmány formájában megszületett a megoldás. A dielektrikumrétegekből álló tükrök kompenzálják a diszperzió fázistoló hatását, mert a különböző frekvenciájú összetevők különböző mélységekből verődnek vissza. Az első fáziskompensáló (ún. csörpölt) tükröket Krausz Ferenc és Szipőcs Róbert feltalálók tervei alapján Ferenc Kárpát készítette az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetében [4]. Alkalmazásukkal a rövid impulzusok keltésére jól bevált ~750 nm-es központi hullámhosszú titán-zafír lézerezellel 4 femtoszekundumos impulzust sikerült kelteni. Ilyen fényimpulzusokkal lehetővé vált a leggyorsabb kémiai folyamatok nyomon követése. Az atomon belüli elektronmozgás nyomon követéséhez viszont már túl hosszú a femtoszekundumos időtartam. Gondoljunk csak arra, hogy a hidrogénatom alapállapotú Bohr-pályájához tartozó periódusidő 162 attoszekundum ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ).

## Az attoszekundumos tartomány meghódítása

A kiforrott femtoszekundumos technikákkal elért 4 femtoszekundumos érték, ha belegondolunk, alig nagyobb a 750 nm-es központi hullámhossznak megfelelő 2,5 femtoszekundumos rezgési periódusnál. Ez világosan mutatja, hogy ha további nagyságrendbeli csökkenést kívánunk elérni az impulzushosszakban, akkor a látható fénynél kisebb hullámhosszú tartományban kell dolgoznunk. Az impulzuskeltés alapelveit tekintve pedig merőben más módszer szükséges, a femtoszekundumos technikák csődöt mondanak.

A nemesgázatomok nagy intenzitású femtoszekundumos lézerimpulzusokkal történő besugárzásakor a lézernyalábhhoz hasonló tulajdonságú extrém ultraibolya (XUV) és (lágy) röntgensugár megjelenését észlelte Anne L’Huillier (1988) [5]. A sugárzás spekt-



1. ábra. A magas rendű felharmonikus keltésének folyamata femtoszekundumos impulzusok nemesgázatomokkal való kölcsönhatás során [2]

ruma diszkrét vonalakból, a lézerfrekvencia magas, páratlan rendű felharmonikusából állt, ezért magas rendű felharmonikus sugárzásnak nevezték el. A sugárzás eredetét Paul Corkum magyarázta meg [3,6].

Első lépésben a nagy intenzitású lézerimpulzusban az elektromos mező oszcillációs csúcserőteke környékén elegendően erőse válik ahhoz, hogy az atom legkülső, leggyengébben kötött elektronja által érzett statikus Coulomb-teret rövid időre (a rezgési félperiódus töredékére) olyan mértékig deformálja, hogy az elektron jelentős valószínűséggel képes legyen alagút effektus segítségével atomi kötött állapotából kiszabadulni (1. ábra). Az atom kötelékéből kiszabaduló elektron-hullámcsomag időtartama a lézerfény félperiódusának töredéke lehet, hiszen a lézertér csökkenésével a potenciálgát nagyon gyorsan áthatolhatatlanná válik. Ez 1 femtoszekundum körüli félperiódus esetén néhány száz attoszekundum időtartamot jelent.

A kiszabadított elektron-hullámcsomagot a nagy térerősségű lézertér először eltávolítja az atomtörzstől. A lineárisan polarizált lézerimpulzus fél rezgési periódussal később az elektron mozgásirányát megfordítja, majd a teljes rezgési periódus befejezése előtt visszatéríti az atomtörzshöz (1. ábra). A visszatérő elektron a lézertérben történő rezgés során szerzett többletenergiát egy foton kibocsátásával leadja. A gerjesztő impulzus tipikus paramétereit ( $10^{15} \text{ W/cm}^2$ -es csúcshintenzitás, 750 nm-es központi hullámhossz) esetén ez 10 nm-nél rövidebb hullámhosszú lágy röntgensugár emisszióját jelenti, a fotonemisszió időtartama a maximális fotonenergia közelében 100 attoszekundum nagyságrendű időtartamú.

Ez a folyamat a beeső lézerfény egyetlen rezgési periódusa alatt játszódik le. A folyamat minden rezgési félperiódusban újraindul mindaddig, amíg az oszcilláló elektromos mező kellő térerősséggel bír. Ha a keltő lézerimpulzus sok rezgési ciklusból áll, akkor a fenti mikroszkopikus

folyamat periodikus ismétlődésének közvetlen következménye, hogy a kibocsátott sugárzás emissziós spektruma diszkrét, a megjelenő vonalak a beeső lézerfény magas felharmonikusainak felelnek meg. Ez pedig 100 attoszekundum nagyságrendű hosszúságú impulzusok vonulatát eredményezi, ahogy azt Farkas Győző és Tóth Csaba, az MTA KFKI Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetének munkatársai nem sokkal L’Huillier-ék kísérletei után megjavították. Az, hogy az emisszió nem egyetlen impulzusból, hanem gyors egymásutánban (körülbelül 1 femtoszekundumonként) egymást követő, 100 attoszekundum nagyságrendű hosszúságú impulzusok vonulatából áll, jelentős problémát jelent az alkalmazások (pl. spektroszkópia) szempontjából. Ezért kihívássá vált az attoszekundumos impulzusok spektrális szűréssel történő izolálása.

Krausz Ferencnek és Pierre Agostininek, egymástól függetlenül, különböző módszerrel sikerült bebizonyítani, hogy a felharmonikusok keltés (a megfelelő spektrális szűrés után) attoszekundumos impulzusokat eredményez (2001). Az XUV tartománybeli attoszekundumos impulzusvonalat (250 as) létét Pierre Agostiniek igazolták egy spektrális tartományban alkalmazott interferometriai módszerrel. Izolált attoszekundumos impulzusokat (650 as) pedig Krausz Ferencéknek sikerült karakterizálniuk a Bécsi Műszaki Egyetemen. Sokáig a szintén Krausz Ferenc által a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben előállított 80 attoszekundumos impulzusokat tartották számon világrekordként, melyek a Guinness Rekordok Könyvébe is bevésték a világ leggyorsabb „fényképezőgépe” néven.

## Lássuk, mindez mi mindenre használható!

Az attoszekundumos impulzusok ablakot nyitottak az elektronok világára. Segítségükkel választ kaphatunk számos, eddig megválaszolatlan kérdésre, például az ato-



mon, molekulán belüli elektronmozgás tanulmányozására. Megtudhatjuk például, hogy milyen gyorsan mozognak az elektronok a molekulákban vagy a legkisebb mikroelektronikai szerkezetekben, vagy hogy mennyi idő alatt váltanak pályát atomon belül. A fotoeffektus időbeli lefutásáról is lehet információt szerezni, amire eddig semmiféle mód nem volt. Krauszék kísérletileg megmutatták, hogy neonatomok attoszekundumos impulzusokkal történő ionizációja során a 2p elektron 21 attoszekundummal később hagyja el a neonatomot, mint a 2s elektron. Kísérletileg demonstrálták azt is, hogyan mozognak a hátramaradt elektronok (pontosabban a megüresedett hely), miután egy elektron kilődött egy kriptonatomból.

Az ultragyors elektrondinamika egyszerű rendszereken szerzett eredményes, konkluzív tapasztalatai kijelölték az utat a

komplexitás felé, karnyújtásnyira kerülve az elektronikai, gyógyszeripari fejlesztésekhez, biomedikális alkalmazásokhoz. Kiemelendő a Krausz Ferenc által 2019-ben Budapesten megalapított Molekuláris Ujlenyomat Kutatóközpont, melynek fő küldetése olyan, attoszekundumos mérés technikán alapuló újkeletű módszerek forradalmasítása, melyek emberi vérmintából alkalmasak bizonyos betegségek korai stádiumban való felismerésére. Különösen biztató eredmények mutatkoznak a rák, a szív-és érrendszeri megbetegedések, illetve az anyagcserezavarok terén.

A szegedi ELI-ALPS Kutatóintézet elnevezésében az ALPS rövidítés Attosecond Laser Pulse Source-t (attoszekundumos lézerpulzus-forrást) jelent, így nem kell hosszasan esetelni a Nobel-díj témájához és a Krausz Ferenchez való erős kötődést. A három alappillérből álló ELI infrastruk-

túra hazai, szegedi egysége hivatott az attoszekundumos fényimpulzusok előállításával és alkalmazásával kapcsolatos kutatásokat kiszolgálni nemzetközi szinten.

E cikk témájával kapcsolatban jóval több részletet megismerhetnek a *Fizikai Szemle* 2024. januári számából.

A 2023-as fizikai Nobel-díj birtokosainak ezúton szívből gratulálók! ● ● ●

IRODALOM

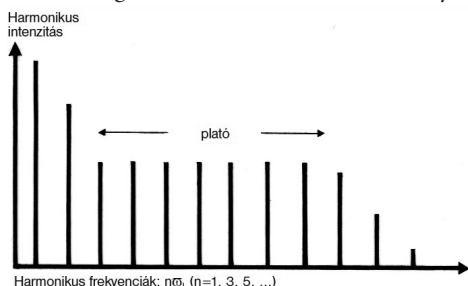
- [1] [https://mta.hu/mta\\_hirei/krausz-ferenc-nobel-dijas-113184](https://mta.hu/mta_hirei/krausz-ferenc-nobel-dijas-113184)
- [2] Dombi P., Varjú K.: Krausz Ferenc, az attofizika úttörője. *Fizikai Szemle* (2023) 11, 390.
- [3] Krausz F.: Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle* (2002) 1, 12.
- [4] R. Szipőcs, K. Ferencz, CH. Spielmann, F Krausz: Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers. *Opt. Lett.* (1994) 19, 201.
- [5] L'Huillier, P. Balcou: High-order harmonic generation in rare gases with a 1-ps 1053-nm laser. *Phys. Rev. Lett.* (1993) 70, 774.
- [6] P. B. Corkum: Plasma perspective on strong field multiphoton ionization. *Phys. Rev. Lett.* (1993) 71, 1994.

## Szubjektív pillanatképek a hőskorból

*Az előző írásban már szereplő Farkas Győző egy közel húszéves interjúban mesélt az attofizika születésének néhány epizódjáról*

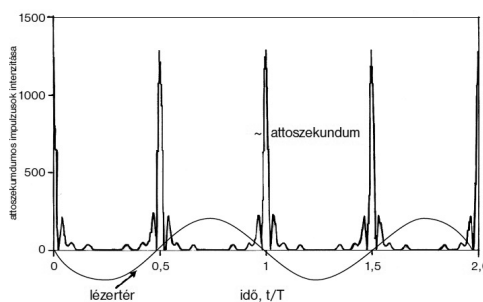
Az ELTE legendás fizikaprofesszora, Neugebauer Tibor még a lézerek kifejlesztése előtt kiszámolta, hogy ha rávilágítunk egy atomra, akkor nemcsak a megvilágító fényel azonos frekvenciájú fény szóródik vissza: ha például piros fényű lézert használunk, nagy fényintenzitás esetén a szórt fény már nemcsak piros, hanem kétszeres frekvenciájú gyenge zöld nyalábot is tartalmaz. A lézerek megjelenése után rögtön kísérleti bizonyítást nyert az effektus. A franciák később megmutatták, hogy atomok esetén páratlan rendű, tehát háromszoros, ötszörös, hétszörös stb. frekvenciájú harmonikusok sora lép fel. Úgy kell elképzelnünk a jelenséget, mint a hangszereknél a felharmonikus hangok megjelenését. Ha a hegedűművész szépen húzza a hegedűjét, akkor a húr „monokromatikus” hangot ad, de ha rángatjuk a húrt, sokféle hang keletkezik. A laikus kezében a fúvós hangszerből rikácsolásszerű hang jön ki, de a hangok nem véletlenszerűek: az alaphang első, második, sokadik felharmonikusai. Ugyanez játszódik le, ha atomokat világítunk meg: a szórt fény a megvilágító fényel azonos és többszörös frekvenciájú fényhullámokból áll. Kis fényintenzitás esetén csak néhány gyenge felharmonikus jelenik meg. Nagy lézerintenzitásnál viszont már sok felharmonikus keletkezik. [...]

Ezek a harmonikus csúcsok az infravöröstől a röntgen-hullámhosszakig terjednek. A lézer alapfrekvenciájának hangolásával ez a fésűszerű spektrum finoman hangolható: a teljes spektrum felhasználható spektroszkópiai alkalmazásokra. Elkezdtém azon gondolkodni, hogy mivel a természetben nem találunk ilyen széles spektrumot, a spektroszkópián kívül mire lehetne felhasználni. A klasszikus hullámtan „Heisenberg-relációjából” az következik, hogy a frekvencia sáv szélességének növekedtével fordított arányban csökken az impul-



A szórt fény magas rendű harmonikusainak diszkrét szerkezetű spektruma

zusok időtartama. A magas harmonikusokat tartalmazó, szokatlanul széles spektrumú nyalábnak tehát szokatlanul rövid időtartamú fényintenzitás-csúcsoknak kell lenniük. A gimnáziumban azt tanítják, ha megütünk egy hangvillát, szép monokromatikus hangot ad. Ha megszűnik még egy hangvillát, amit elhangolunk (ráteszünk egy kis tömeget), és a kettőt egyszerre ütjük meg, a két különböző hang összelebeg, „hullámzó” érzetet kelt. Ha sok ilyen, egymástól azonos rezgéskülönbséggel elhangolt hangvillát szólatatunk meg egyszerre, vakantásszerű hangokat hallunk. Ugyanez igaz a fényhullámokra is: az egymásra telepedő, különböző rezgésszámú fényhullámok amplitúdóját ábrázolva szintén fésűszerű képet kapunk, most azonban – Fourier-szintézis révén – az idő függvényében. A „fogak” időtartama fordítva arányos a sáv szélességgel, és akár attoszekundum rövid is lehet.



A magas rendű harmonikusok Fourier-szintézise révén keletkező attoszekundumos fényimpulzusok sorozata (T a lézerrezgés periódusideje)

1992-ben a Côte d’Azurön, egy nagyon elegáns konferencián említettem ezeket az eredményeimet, de a téma legjobb elméleti fizikus szakértője kikelt ellenük. Eltelt két év, és ugyanő, alapos tanulmányok után, munkatársaival igen lelkes cikkek sorozatában mutatta meg az attoszekundumos impulzusok megvalósíthatóságát és ígéretes voltát. Jó tíz év alatt, rengeteg elméleti munka után, kísérletileg is kimutatták az impulzusokat. Az attofizika nagy tudományterületté nőtte ki magát, a világ minden táján működnek már attofizikai intézetek. Feltétlenül meg kell említenem Krausz Ferenc élenjáró attofizikai tevékenységét, aki nemcsak kimutatta és megmérte, hanem fizikai mérésekben is elsőként alkalmazta az impulzusokat.

*(Természet Világa, 2007. 3).*