

KRAUSZ FERENC – MAGYAR NOBEL-DÍJ AZ EXTRÉM NEMLINEÁRIS OPTIKÁÉRT

Dombi Péter^{1,2}

¹ HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest,

² ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet, Szeged

Az emberiség történelmében a lézer egy viszonylag „fiatal” találmány. Az életünket forradalmian átalakító újítások közül eltölpül a maga 63 évével a villanykörte, a napelem, a rádió vagy a belsőégésű motor mellett. Viszont közel egyidős az atomerőművel vagy a félvezető tranzisztorral. Az első lézert 1960-ban építették meg, és a Nobel-bizottság már 1964-ben Nobel-díjjal ismerte el a lézerek működési elvének kidolgozását. Érdekesség, hogy az első működő lézert megépítő Theodore Maiman viszont sohasem kapott Nobel-díjat.

1964-ig az optika szó mindössze egyszer jelent meg a Nobel-díjak rövid, egymondatos indoklásában, azután azonban a lézerfizika fejlődése töretlen, és a lézerek új optikai tudományterületek kialakulását is lehetővé tették. Kimondottan lézerfejlesztési eredményekért legutóbb Gérard Mourou és Donna Strickland kapta meg a legmagasabb tudományos elismerést egy újfajta lézertény-erősítési elv ért, amely azóta is meghatározó szerepet játszik femtoszekundumos lézerrendszerekben. Az ilyen lézertényerősítők elengedhetetlenek például újfajta látáskorrekciós műtétek elvégzésénél is.

A legtöbb, lézerekhez kapcsolódó fizikai (és kémiai) Nobel-díjat azonban a lézerek valamely konkrét kutatási területen történő alkalmazásáért ítélik oda – ahogyan ez 2023-ban is történt. Egy néhány perces gyorslemez eredményeként megállapíthatjuk azt, hogy a lézerek 13–14 Nobel-díjas felfedezéshez, találmányhoz vagy kutatási módszerhez kapcsolódnak szorosan. Ezen a téren nagyon hosszú a lista, elég csak az optikai szálakra, a lézercsipeszre, a frekvenciafésűkre, a femtokémiai kutatásokra vagy a csapdázott atomokkal kapcsolatos Nobel-díjakra gondolni. Kulcsszerepet játszanak a lézerek a gravitációs hullámok detektálásában vagy akár a holográfiában is. Ez utóbbiért Gábor Dénes sohasem kapott volna Nobel-díjat a lézerek nélkül, melyek az egyetlen hatékony eszközt jelentik optikai hologramok előállításának. Ebbe az egyre erősebb sorozatba illeszkedik Krausz Ferenc 2023-as kitüntetésével is.



Dombi Péter az MTA doktora, az MTA Lézerfizikai Bizottságának elnöke. 2005-ben szerzett PhD-fokozatot a bécsi Műszaki Egyetemen Krausz Ferenc témavezetése mellett. Jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont kutatóprofesszora és a szegedi ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet osztályvezetője. Kutatási területei a lézerfizika, a nanooptika és az ultragyors fény-anyag kölcsönhatások.

Ebben a cikkben a díjazott munkásságát az eddig megjelent cikkekhez képest más perspektívából fogom bemutatni. A korábbi írások inkább a Nobel-bizottság által kiadott közlemény fordítására és annak ábraanyagára szorítottak. Itt viszont a Nobel-díjas kutatásokat a nemlineáris optika, illetve az extrém nemlineáris optika nézőpontjából fogom tárgyalni, és részletesen is bemutatom azt a módszertani áttörést hozó kísérletet, amelylyel Krausz Ferenc 2001-ben be tudta bizonyítani attoszekundumos impulzusok keltését.

Kezdjük tehát az alapokkal! A Maxwell-egyenletekből nem mágneses, szabad töltéshordozóktól mentes, izotrop közegben néhány lépésben el tudunk jutni a következő, polarizációs forrástaggal rendelkező hullám-egyenlethez:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

ahol \mathbf{P} jelöli a polarizációs vektort, \mathbf{E} a térerősségvektor, ϵ_0 a dielektromos állandó és c a fénysebesség. Fennáll továbbá a $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$ összefüggés is, ahol χ a szuszceptibilitás, ami a legáltalánosabb esetben tenzormennyiség. A fentiekből látjuk tehát, hogy a közegben terjedő fény elektromos tere polarizációt indukál, amely az elektromágneses tér forrását is jelenti egyben. Ha az indukált polarizáció lineárisan függ az elektromos tértől, akkor a fény közegbeli terjedése esetén a lineáris optika tartományában vagyunk. Ezzel a hatással megmagyarázható számos jól ismert optikai alapjelenség, például a közegek törésmutatója vagy a kettős törés.

Felléphetnek azonban magasabb rendű hatások is, amikor már az indukált polarizáció nemlineáris viszonyban van az elektromos térrel. Ekkor a következő összefüggés érvényes:

$$\mathbf{P} = \sum_i \mathbf{P}^{(i)} = \underbrace{\epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E}}_{\text{lin. tag}} + \underbrace{\epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} + \dots}_{\text{nemlineáris tagok}} \quad (2)$$

Az „unalmas”, a törésmutatóért felelős lineáris $\chi^{(1)}$ szuszceptibilitással itt ne foglalkozunk, hanem nézzük a polarizáció nemlineáris tagjait! A $\chi^{(2)}$ másodrendű szuszceptibilitás felelős számos érdekes nemlineáris optikai jelenségért, mint például a másodharmonikus-keltésért: egy megfelelő kristályban a vörös lézertényt kék vagy ultraibolya fénné tudjuk átalakítani. Ugyanígy $\chi^{(2)}$ -hatás például a Pockels-effektus is: egy külső statikus elektromos térrel meg tudjuk változtatni egy kristály

törésmutatóját. A harmadrendű nemlineáris szuszceptibilitás, $\chi^{(3)}$ is fontos egy lézertalorban dolgozó kutató számára; a közeg törésmutatójának lézertenzitástól való függése köthető hozzá, olyan következményekkel, mint például egy intenzív lézernyaláb önfokuszálása. Azonban általános szabály, hogy minél magasabb rendű folyamatról van szó, annál kisebb hatásokkal következik az be.

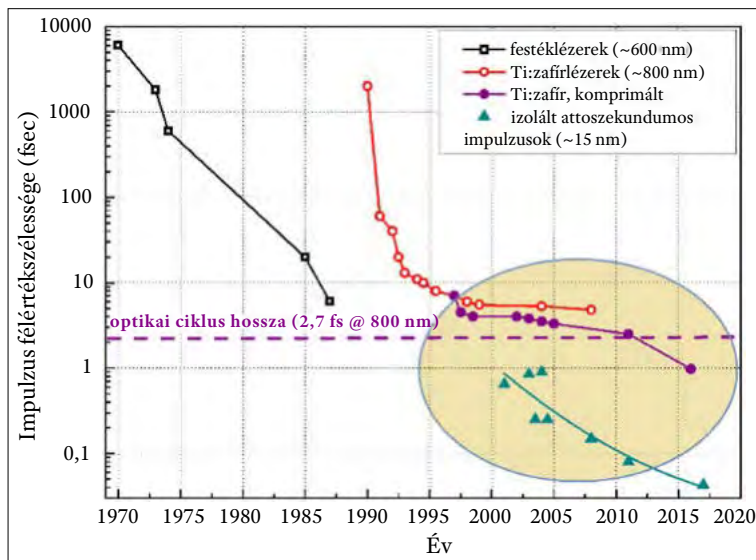
A harmadrendű felharmonikusok keltése például lényegesen kisebb hatékonyságú a másodharmonikus-keltéshez képest.

Következő lépésként becsüljük meg, hogy mi az a térerősség, aminél a nemlineáris hatások észlelhetővé válnak! A hidrogénatom első Bohr-sugarának megfelelő távolságban az atomon belüli térerősség $\sim 5 \times 10^{11}$ V/m. Tegyük fel, hogy ennél három nagyságrenddel alacsonyabb térerősségnél $\sim 10^8$ V/m-nél már észlelhetőek ilyen effektusok – ez a laboratóriumi észlelésekkel is jól egybeesik. Ahhoz, hogy a lézerimpulzus maximális térerőssége 10^8 V/m legyen, a fókuszfoltban $1,3 \times 10^9$ W/cm²-es csúcsintenzitást kell elérnünk az $I = (c\epsilon_0/2)E^2$ összefüggés alapján. Láthatjuk, hogy ezt a fényintenzitást akár egy 10 W-os folytonos lézernyaláb 1 μm^2 -es felületre történő fókusztásával már el tudjuk érni. Viszont mindenképpen a lézerek jól irányított fénye szükséges ahhoz, hogy esélyünk legyen a fókuszfoltban ilyen intenzitás, illetve térerősség elérésére. Nem véletlen az, hogy az optikai másodharmonikus-keltést is lézerekkel észlelték először Peter Franken és munkatársai, mégpedig a lézerek 1960-as megjelenése után alig egy évvel [1]. Az észlelt hatás annyira meglepő volt, hogy a folyóirat szerkesztője a másodharmonikus-keltést bizonyító foltot törölte a cikk fő ábrájából, mérési műtermékek gondolván azt. A nemlineáris optikai jelenségek fontossága miatt azonban ez a munka véleményem szerint szintén Nobel-díjat ért volna.

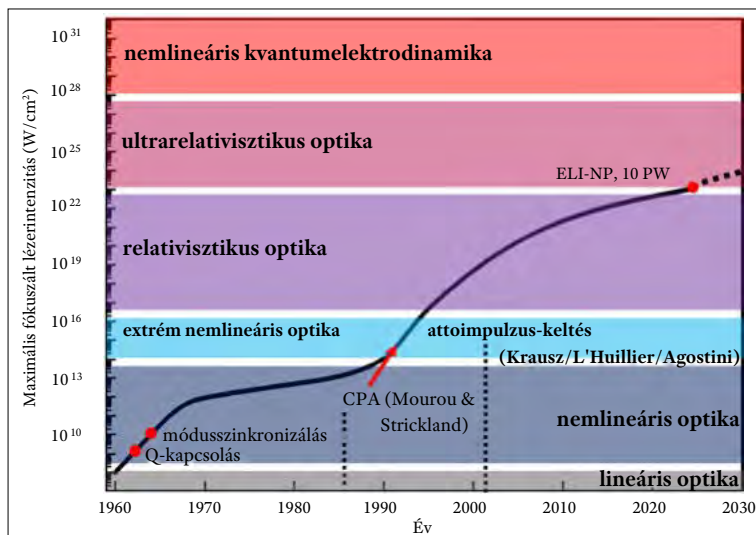
A nemlineáris optika azóta is fontos szerepet játszik számos alkalmazásban leginkább azért, hogy lehetővé teszi az eredetileg eltérő színű lézertény hatékony előállítását, és a nyalábon belül a fény Poekels-hatásra építő kapcsolását. Azonban, ahogyan azt a fenti numerikus példából is láthatjuk, a klasszikus nemlineáris optikában a külső lézertér még mindig csak az atomon belüli térerősség perturbációjának tekinthető, ezért ezt a fény-anyag kölcsönhatási tartományt perturbatív nemlineáris optikának is szokták nevezni.

Krausz Ferenc Nobel-díjában ennél magasabb lézertenzitások játszanak szerepet:

ezeknél a kölcsönhatásoknál a közeg megvilágító lézertere már nem tekinthető az atomi terek perturbációjának, hanem azzal összemérhető. Ilyen intenzív fényt a lézerek fejlődésének köszönhetően már az 1970-es évektől kezdve elő lehet állítani. Magasabb lézertenzitást kétféleképpen lehet elérni: a lézerimpulzusok optikai erősítésével, vagy azoknak időbeli összenyomásával. Az egyre



1. ábra. A legrövidebb impulzusokat biztosító lézerek impulzushosszának változása logaritmikus skálán, kiegészítve az izolált attosekundumos impulzusok hosszával. Az 1990-es éveket a titán-zafírlézertechnológia robbanásszerű fejlődése határozta meg. A bekarikázott tartományban megvalósított fejlesztések jelentős része Krausz Ferenc nevéhez kötődik mind a lézertechnológia, mind az attosekundumos impulzusok előállításában. Az ábrán jelöltem a 800 nm-es lézertény optikai ciklusának (az oszcilláció periódusidejének) hosszát is, hiszen az ennél rövidebb lézertimpulzusok spektruma szinte kezelhetetlenül szélessé válik, a teljes látható tartományt lefedti



2. ábra. Lézertel elérhető maximális fókusztált fényintenzitás (logaritmikus skálán!), valamint az intenzív fény-anyag kölcsönhatások intenzitástartományai és meghatározó folyamatok. A sávok közti távolság azt jelzi, hogy az egyes tartományok közötti átmenet nem ugrásszerű, az például a lézert hullámhosszától is függ. Az ábrán jelöltem a fázismodulált impulzuserősítés (CPA) 1985-ös demonstrálását és a 2001-es „annus mirabilis” is, amikor Krausz Ferenc és Pierre Agostini egymástól függetlenül, két különböző kísérleti módszerrel bizonyította attosekundumos impulzusok létét. A lézertechnológiában szintén fontos módusszinkronizálást és Q-kapcsolást ebben az írásban terjedelmi okok miatt nem mutatom be

rövidebb impulzusok előállításának időrendjét mutatja be az 1. ábra, kiemelve az 1980-as évekig a legrövidebb impulzusokat biztosító festéklézereket és az 1990-es évek forradalmian új technológiáját, a titán-zafírlézereket. Ez utóbbiakat Szipőcs Róbert írása mutatja be részletesen ebben a lapszámban, melyben a lézerekből nyert impulzusok kompressziós módszereit is tárgyalja.

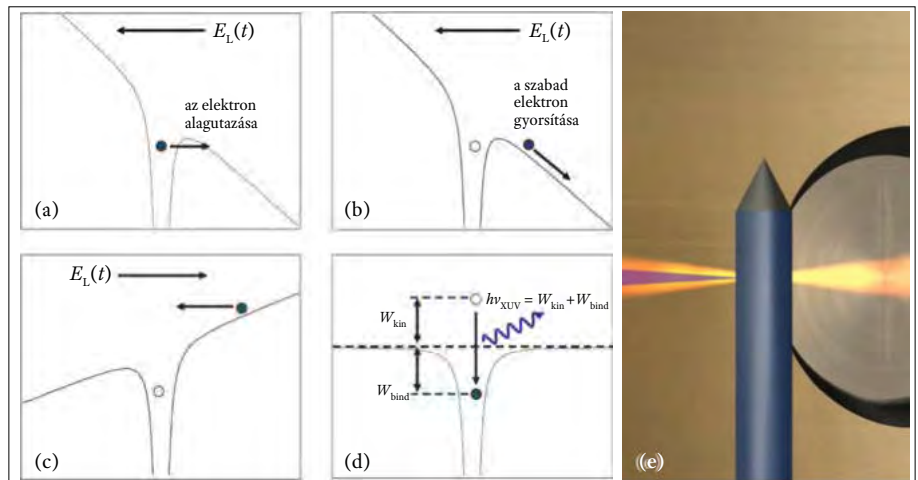
A lézerezősítők és az impulzuskompresszorok fejlődésének köszönhetően az intenzív lézerek 1980-as években megkezdett fejlődése új lendületet kapott. Ezt mutatja be a 2. ábra. Jól látható, hogy a fentiekben a nemlineáris optikai folyamatok észleléséhez becsült 10^9 W/cm²-es intenzitáshoz képest a világ jelenleg legintenzívebb lézérével, a bukaresti ELI-NP lézereközpontban működő 10 PW-os lézerral 14 nagyságrenddel nagyobb intenzitás is elérhető, a fókuszoltban akár 10^{23} W/cm² is. A lézertechnológia ilyen mértékű fejlődését nézve érthetővé válik Gérard Mourou és Donna Strickland Nobel-díja is, hiszen a fejlődés nagy részét az ő 1985-ös találmányuk tette lehetővé, ahogyan azt a 2. ábrán is bemutatom.

Az ábra megmutatja a fény-anyag kölcsönhatás már tárgyalt, *lineáris és nemlineáris optikai* tartományait, majd a részletesen bemutatandó *extrém nemlineáris optikát*. Efölötti intenzitásoknál a lézerefény elektromos tere az elektronokat már *relativisztikus* mozgásra készíti, és ilyen intenzitásoknál a közeget is ionizálja – ez már a lézeres plazmafizika területe. Az *ultrarelativisztikus tartományban* a tér által mozgatott részecskék sebessége nagyon közel kerül a fénysebességhez. Még ennél is magasabb lézerefény-intenzitásoknál, a *nemlineáris kvantumelektrodinamika* tartományában pedig már a vákuum is „közegként” viselkedik a fény számára olyan egzotikus következményekkel, mint például a fény általi elektron-positron párkeltés „a semmiből”. A tartományok közötti határ erősen függ a lézerefény hullámhosszától is. A 10^{16} W/cm² fölötti intenzitásokkal ebben az írásban nem foglalkozom, hiszen az attoszekundumos kutatásokhoz, attoszekundumos impulzusok keltéséhez kb. 10^{15} W/cm²-es fókuszált intenzitású lézerefény is elég.

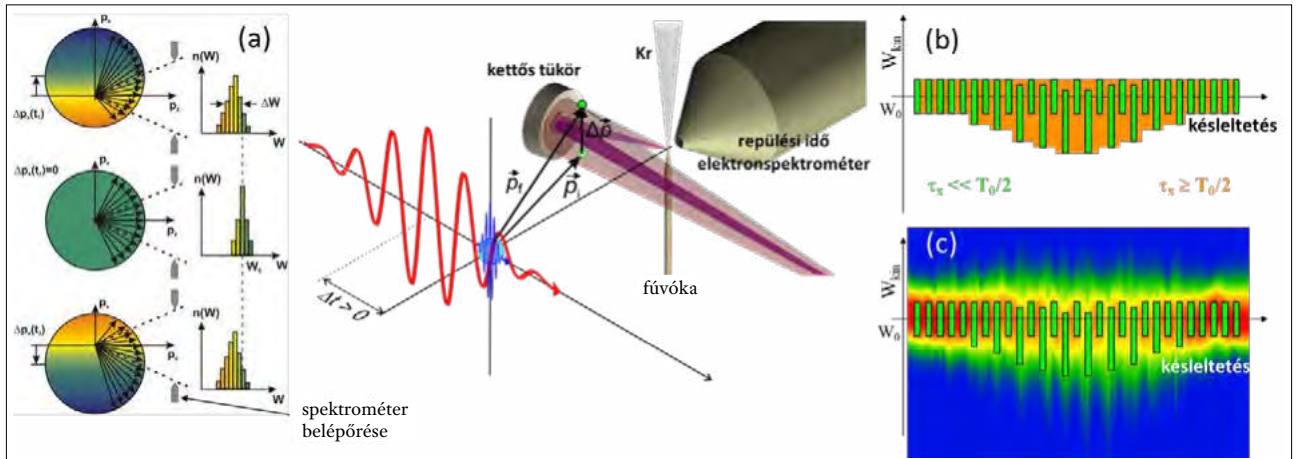
Nézzük meg tehát, hogy mi is az az extrém nemlineáris optika, mik azok a kölcsönhatások, amelyek attoszekundumos impulzusok előállításához kellene. Extrém nemlinearitásnak azt nevezik, amikor a külső lézertér összemérhető az atomi térerősséggel. A fenti, a hidrogénatomhoz kapcsolódó numerikus példából kiindulva

ez 3×10^{16} W/cm² lézerintenzitás esetén érvényes, gyengébben kötött elektronoknál pedig már 10^{15} W/cm²-nél is. Ilyenkor a lézerefény oszcilláló tere olyan mértékben torzítja az atomi potenciált, hogy a leggyengébben kötött elektron alagutazással elhagyja az atomot. Az ionizáció után a megfelelő fázisban kilépő elektron a lézerefény elektromos terében további energiára tesz szert, és lineárisan polarizált fény esetén visszatér ahhoz az ionhoz, ahonnan származik. Ekkor véges valószínűséggel rekombinálódhat is az ionnal, és a lézertérbeli mozgása során felvett többletenergiáját nagyfrekvenciás (ún. extrém ultraibolya, XUV) fény kisugárzásával adja le: az eredeti lézerefrekvenciának akár több századrendű felharmonikusai is megjelenhetnek a lézerefény intenzitásától és hullámhosszától függően. Ezt a folyamatot mutatja be a 3. ábra. Felharmonikusokeltést ezzel a mechanizmussal először Charles Rhodes chicagói laborjában észleltek 1987-ben [2].

Az alagutazással kilépett elektron mozgása során az ion-elektron rendszer dipólmomentuma erősen nemlineárisan oszcillál, ezért igen magasrendű felharmonikusok is megjelennek. Ezért is hívják az ilyen jelenségek körét extrém nemlineáris optikának. Itt is ugyanúgy lehet nemlineáris polarizációt definiálni, mint a perturbatív nemlineáris optikában, azonban mivel az elektron mozgása erősen nemlineáris, számos új jelenség is észlelhető, mint például a nagyon magasrendű felharmonikusok megjelenése vagy a közel azonos intenzitású felharmonikusokkal rendelkező spektrális tartomány. Erre a *Fizikai Szemle* 2023. novemberi számában megjelent cikkünkben [6] hoztunk példát. Így érthetővé válik az is, hogy miért olyan szembeötlő a különbség a perturbatív nemlineáris optikai és az extrém nemlineáris optikai folyamatok között.



3. ábra. Magas rendű felharmonikusok keltése – az extrém nemlineáris optika alapfolyamata. (a) Az atom leggyengébben kötött elektronja alagutazással kilép az atomból, ha az intenzív lézertér elég nagy mértékben torzítja a potenciált. (b), (c) A szabad elektront az oszcilláló lézertér gyorsítja, melynek során jelentős többletenergiára tesz szert. (d) Az oszcilláló tér miatt az elektron visszatér az ionhoz, amellyel rekombinálódik és a többletenergiáját egy nagyenergiájú, extrém ultraibolya (XUV) tartománybeli foton kisugárzásával adja le. (e) Attoszekundumos impulzusok keltése gázfúvókában. A jobbról érkező lézerezimpulzus lyukat fúr a fémkupakba, az abban lévő nemesgázatomokon keltett XUV sugárzás a lézerezimpulzusénál kisebb divergenciával, a lézerral azonos irányba lép ki az extrém nemlineáris optikai kölcsönhatás után. Az XUV sugárzást a levegő elnyeli, ezért az attoszekundumos kísérleteket vákuumban végzik



4. ábra. (a) Izolált attoszekundumos impulzusok létezésének bizonyítására szolgáló kísérleti elrendezés és a mérés elve. (b) Az elektronspektrumok várt kiszélesedésének a mértéke a lézertér $T_0/2$ félperiódusához képest hosszú (narancssárga) és rövid (zöld) XUV impulzusok esetére az XUV és az infravörös impulzusok közti késleltetés függvényében. (c) A kísérleti eredmények (szinkódolt kinetikusenergia-spektrumok) alátámasztják az utóbbi esetet: az XUV impulzusok lényegesen rövidebbek az infravörös lézertér félperiódusánál. Az eredmények pontos kiértékelése 650 asec-os értéket ad az XUV impulzusok hosszára [4, 5]

Krausz Ferenc már az 1990-es években felismerte azt is, hogy a magas rendű felharmonikusok az időtartományban szükségszerűen attoszekundumos impulzusok formájában jelennek meg – nem utolsósorban Farkas Győző és Tóth Csaba 1992-ben publikált eredményének köszönhetően [3]. Ezután Krausz Ferenc a Bécsi Műszaki Egyetem favoritenstrassei épületének második pinceszintjén lévő laborban jó pár évet szentelt egy olyan kísérleti elrendezés kialakításának, amellyel ez be is bizonyítható. Ugyan a helyszín nem volt teljesen ideális optikai kísérletek elvégzésére a közelben húzódó metróvonal miatt, azonban a kitartás (és a késő éjszakai, metrómentes órákban elvégzett kísérletezés) meghozta a gyümölcsét. Híres 2001-es *Nature*-cikkében a 4. ábrán bemutatott ötlettel igazolta azt, hogy a magas rendű felharmonikusok attoszekundumos impulzusok formáját öltik [4, 5].

A 3e. ábrán bemutatott XUV-keltés után az együtt haladó infravörös lézerimpulzust és az XUV nyálábót egymáshoz képest változtatható késleltetéssel egy második kriptongázjetre fókuszálta. Az XUV fotonok könnyedén ionizálták a kriptonatomokat mintegy 75 eV-os elektronokat keltve, melyeket egy repülésiidő-elektron-spektrométerrel detektált. Azonban az elektronok energiáját a jelenlévő infravörös tér is befolyásolja, mégpedig a kriptonatomok XUV-impulzus általi ionizációjakor meglévő vektorpotenciáljával arányosan. A 4a. ábrán bemutatottak szerint az infravörös tér hatása abban nyilvánul meg, hogy a kilépő elektronok impulzusához valamikora Δp impulzust ad hozzá, ami az eredeti, viszonylag keskeny kinetikusenergia-eloszlást kiszélesíti. Ha az XUV-impulzus hosszú (az infravörös tér 2,7 fs-os optikai ciklusa felénél hosszabb), akkor az elektron kilépésének időpillanata nem elég élesen definiált, így az infravörös tér ionizációkori vektorpotenciálja sem az, következésképpen az elektronspektrumok kiszélesedése akkor is jelen van, amikor az XUV impulzus maximuma a zérus vektorpotenciálú időpillanattal esik egybe. Ha azonban az XUV-impulzus elég rövid, a fotoionizáció élesen je-

lenik meg, és az elektronspektrumok kiszélesedésében periodikus moduláció észlelhető, éppen ahogy a 4c. ábra mutatja. 2001-ben ez az időbontott mérés szolgáltatta a végső bizonyítékot attoszekundumos impulzusok létezésére.

Az így előállított attoszekundumos impulzusokkal számos mérést végeztek a bécsi, majd később a müncheni laborokban elektronok ultragyors dinamikájával, Auger-folyamatokkal, fotoemissziós késleltetésekkel kapcsolatban, melyeknek a részletei túlmutatnak ennek a cikknek a keretein. Ezekkel a kísérletekkel Krausz Ferenc 2001-től kezdve egyre inkább gyakorlatilag kiterjesztette a femtokémiában már ismert pumpa-próba módszereket az attoszekundumos folyamatok vizsgálatára, és számos fontos alapkutatósi felfedezést tett főleg a belső héjakon elhelyezkedő elektronok dinamikájával kapcsolatban. Az attoszekundumos mérés technikának az a nagy ígérete, hogy ha pontosan tudjuk, hogy a fény miként hoz létre kémiai vagy akár biológiailag releváns molekulákban elektronátmeneteket, akkor egy következő lépésben az elektronok dinamikáját vagy akár a szerkezeti dinamikát megfelelően formált fényimpulzusokkal irányítani is tudjuk. Így pedig remélhetőleg lehetővé válik kémiai reakciók vezérlése vagy makromolekulák átalakulásainak irányítása is. A Nobel-bizottság éppen ezt a potenciált ismertte el a 2023-as díj odaítélésével.

Hivatkozások

1. Franken P. A., Hill A. E., Peters C. W., Weinreich G.: *Phys. Rev. Lett.* 7 (1961) 118.
2. McPherson A., Gibson G., Jara H., Johann U., Luk T. S., McIntyre I. A., Boyer K., Rhodes C. K.: *J. Opt. Soc. Am.* B 4 (1987) 595.
3. Farkas Gy., Tóth Cs.: *Phys. Lett. A* 168 (1992) 447.
4. Hentschel M., Kienberger R., Spielmann Ch., Reider G. A., Milosevic N., Brabec T., Corkum P., Heinzmann U., Drescher M., Krausz F.: *Nature* 414 (2001) 509.
5. Krausz F.: Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle* LIII/1 (2002) 12–18.
6. Dombi P., Varjú K.: Krausz Ferenc, az attofizika úttörője – a 2023-as fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle* LXXIII/11 (2023) 390–393.