

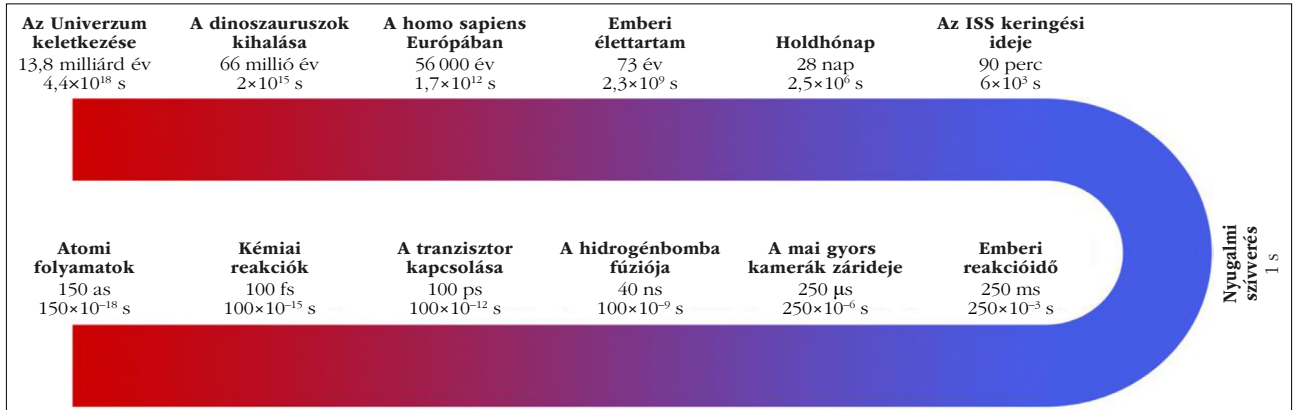
KRAUSZ FERENC, AZ ATTOFIZIKA ÚTTÖRŐJE

Dombi Péter^{1,2}, Varjú Katalin^{2,3}¹ HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest,² ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet, ³Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

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 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 Ujjlenyomat Kutatóközpont ügyvezetője.

A 2023. évi fizikai Nobel-díjat az elektronok atomokban, molekulákban és szilárd anyagokban történő mozgásának attoszekundumos spektroszkópiával történő tanulmányozásáért ítélték 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.

Ismert, hogy az atomok és molekulák világában lejátszódó folyamatok annál gyorsabbak, minél közelebb kerülünk az anyagok elemi építőköveihez, minél kisebb rendszereket vizsgálunk. A mikroelektronikai eszközök, integrált áramkörök legjobb esetben is néhány száz pikoszekundumos kapcsolási sebességgel bírnak. Egyes, fény által indukált kémiai reakciók femtoszekundumos időskálán zajlanak le. Az ehhez kapcsolódó mérés technikát az 1999-es kémiai Nobel-díjjal ismerték



1. ábra. A természet időskáláinak szemléltetése



Dombi Péter, az MTA doktora 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 fényanyag-kölcsönhatások.



Varjú Katalin PhD, az ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet tudományos igazgatója, a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének docense. Kutatási területe az attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai.

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: 2,2 attoszekundum úgy aránylik 1 másodperchez, mint 1 másodperc a világegyetem korához.

Felmerül a kérdés, hogy milyen eszközzel lehet az ilyen gyors folyamatokat vizsgálni. A lézertechnológia rohamos fejlődésének köszönhetően az 1980-as évekre festéklézerekkel akár 6 femtoszekundumos lézerimpulzusok is elérhetővé váltak, melyek aztán a femtokémiai kutatásokat is lehetővé tették. Az 1980-as években azonban még senki sem tudta, hogy femtoszekundumos lézerekkel – kihasználva a nagyon intenzív lézertereket – attoszekundumos impulzusokat is elő lehet állítani.

Ahhoz, hogy az attoszekundumos tudomány kialakulhasson, két fontos lézerfizikai fejlesztésre volt szükség, amelyet utóbb a rövid impulzusokkal keltett nemlineáris kölcsönhatás követett az „atto”-tudományhoz vezető úton. Femtoszekundumos lézerek már a hetvenes évek óta a kutatók rendelkezésére álltak, azonban a nyolcvanas években két olyan fontos fejlesztés is történt, amely lehetővé tette a jelentős impulzusrövidítést és az impulzusenergia növelését. Ezek azután a korábbiaknál nagyságrendekkel nagyobb lézerimpulzuscsúcsteljesítményhez vezettek. Az egyik ilyen fejlesztés a 2018-ban Nobel-díjjal elismert fázismodulált impulzuserősítés (*chirped pulse amplification*, CPA) elve volt. Rövid lézerimpulzusok több ezerszeres időbeli nyújtásával, majd az impulzusok lézerezősítő utáni összenyomásával napjainkban akár petawattos csúcsteljesítményű lézerimpulzusok is elérhetők. Másrészt pedig egy új lézereközeg, a titánionokkal adalékolt zafír (szokásos jelöléssel: Ti:zafír) 1988-as felfedezése hatalmas lökést adott a nagy intenzitású, többfokozatú lézerezősítők fejlesztésének. Ez a lézereközeg minden

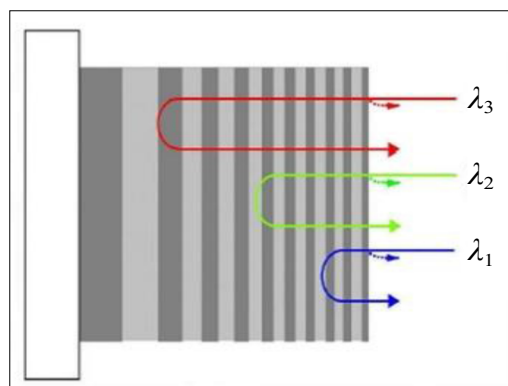
korábbiánál rövidebb, jól erősíthető femtoszekundumos impulzusok előállítását teszi lehetővé.

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 2. ábrán bemutatott fáziskorrigáló lézertükrök 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.

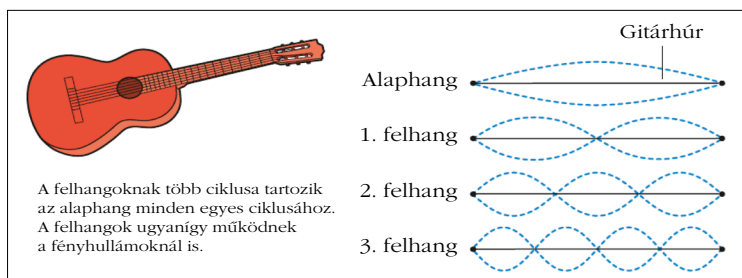
A csörpölt tükör technológiája abból a felismerésből fakad, hogy az ultrarövid lézerimpulzusok spektruma kezelhetetlenül szélessé válik. Egy 4 femtoszekundumos impulzus spektruma lefedheti akár a teljes látható tartományt, a kéktől a vörösig terjedő spektrális komponenseket egyaránt tartalmazhat. Ezeknek a terjedési sebessége pedig annyira különbözik, hogy a lézerimpulzus bármilyen közegen (akár a levegőn) történő áthaladása során időben szétszűszik. Ezt a káros hatást kompenzálja a csörpölt tükör (2. ábra), amely az átlátszó (normális diszperziójú) közegek diszperzióját kompenzálja: a lézerimpulzus vörös spektrális komponenseit késlelteti a kékekhez képest. Ez a technológia is hozzájárult ahhoz, hogy Krausz Ferenc a bécsi intézetet a lézerfizika vezető kutatóhelyévé fejlessze.

Azonban az is világossá vált, hogy a femtoszekundumos lézerimpulzusok időtartama nem csökkenthető minden határon túl. A fényhullám oszcillációs periódusánál, az ún. optikai ciklusnál lényegesen rövidebb lézerimpulzusok nem állíthatók elő – éppen a fent már említett extrém optikai sáv szélesség miatt. A Ti:zafír technológiánál mérvadó 800 nm-es központi hullámhossznál az optikai ciklus hossza 2,66 femtoszekundum, ennél rövidebb impulzusok nemigen állíthatók elő. Ahhoz, hogy femtoszekundumos impulzusok helyett attoszekundumosak álljanak rendelkezésünkre, a látható tartományban működő lézerek fényét sokkal magasabb frekvenciájú, sokkal alacsonyabb hullámhosszú sugárzássá kell konvertálni.

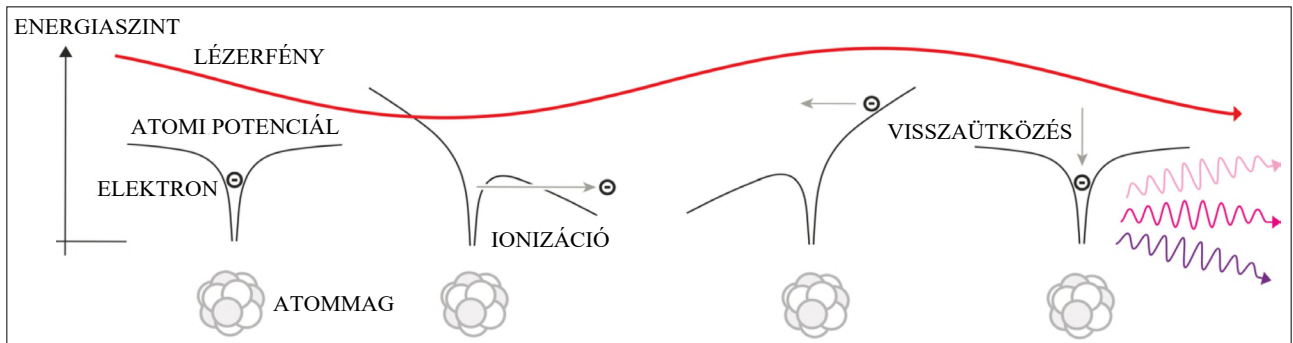
Ehhez jött kapóra Anne L’Huillier-nek és munkatársainak az az 1988-as felfedezése, amely szerint intenzív femtoszekundumos impulzusok nemesgázatomokkal



2. ábra. „Made in Hungary” – a csörpölt tükör. A széles spektrumú rövid lézerimpulzus különböző spektrális komponensei a dielektrikum-rétegstuktúra különböző mélységeiből verődnek vissza. A tükör (negatív) diszperziója a rétegvastagságok optimalizálásával így majdnem tetszőlegesen szabályozható, $\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$



3. ábra. Felhangok egy gitárhúron. Az ábra az első három alacsonyrendű felhanghoz kapcsolódó állóhullámot mutatja be



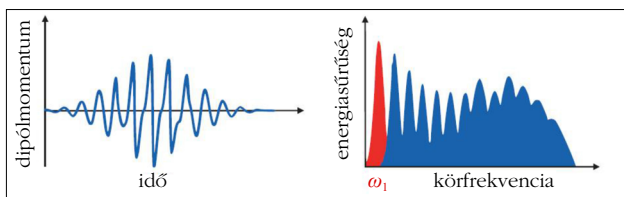
4. ábra. A magasrendű optikai felharmonikuseltés folyamata, melynek során az infravörös lézerefény XUV tartománybeli sugárzássá alakul át nemesgázatomokkal való kölcsönhatás során

kölcsönhatva nagyon magasrendű felharmonikusokat kelthetnek, akár a századik rend körüli tartományig. A folyamat teljesen analóg pl. az akusztikával. Egy gitárhúr rezgéseinél is megjelennek a felhangok, a 3. ábrán bemutatott módon.

Ugyanez történik a fényhullámokkal is, ha azok nemesgázatomokkal hatnak kölcsön. Ilyen esetben viszont nemcsak a 3. ábrán bemutatott, alacsonyrendű felharmonikusok keletkeznek, hanem akár a 100. rend környékén található, 8 nm-es hullámhossz közeli fényhullámok. Ez már az ultraibolyán is túli spektrális tartomány, a szakirodalomban ezt a lágy röntgen és ultraibolya közötti sugárzást az 1980-as évektől extrém ultraibolya (XUV) tartománynak is nevezik.

A magasrendű felharmonikusok keltését az atomok intenzív lézertérbeli ionizációja teszi lehetővé, amit a 4. ábrán mutatunk be. A fókuszált lézernyaláb által biztosított külső elektromos tér olyan mértékben torzítja az atomi potenciált, hogy a leggyengébben kötött elektron alagutazással kilép az atomból. Az oszcilláló tér miatt azonban az elektron visszatér, az ionnal rekombinálódik, és a mozgása során gyűjtött pluszenergiát magasharmonikus fotonok kisugárzásával adja le.

Az XUV-sugárzás keltése tehát végeredményben annak köszönhető, hogy az intenzív femtoszekundumos lézerpulzus által ionizált elektron és az atomtörzs együttese a lézerefény elektromos terében oszcilláló elektromos dipólusként viselkedik. Az intenzív kényszererő miatt az oszcilláció nem tökéletesen harmonikus (5. ábra), így a keltett dipólsugárzásban megjelennek a felharmonikus komponensek, akár a gitárhúr rezgéseinél.



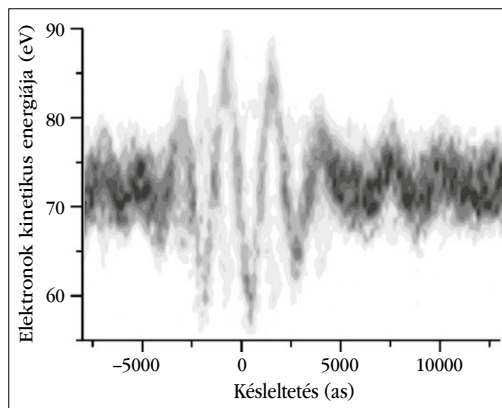
5. ábra. Az ω_1 körfrekvenciájú lézerefény magasrendű felharmonikusainak kialakulása. Bal oldalon a felharmonikus frekvenciákat is tartalmazó, nem szinuszosan változó dipólusmomentum. Jobb oldalon a 12 spektrális komponensből álló felharmonikus-spektrum jellemző részei: gyorsan csökkenő intenzitású, alacsony rendű harmonikusok, állandó erősségű plató és a spektrum végét jelző levágás

A korai felharmonikuseltési 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 sugárzást időben felbontva attoszekundumos impulzusokból álló vonulatot kell észlelnünk. Az állítás bizonyításához nem voltak adottak a kísérleti feltételek, közel 10 év volt szükséges az előrejelzés bizonyításához.

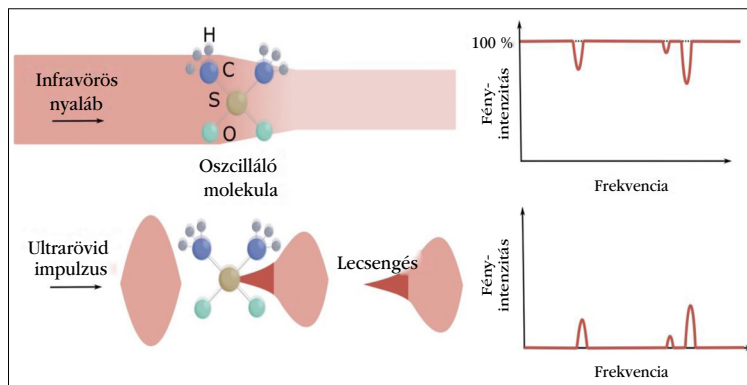
A 2001-es év hozta el azt az áttörést, amikor Krausz Ferencnek és Pierre Agostininek két különböző kísérleti módszerrel, egymástól függetlenül sikerült bizonyítani, hogy a felharmonikuseltés (a megfelelő spektrális szűrés után) attoszekundumos impulzusokat eredményez. Pierre Agostiniek egy spektrális tartományban alkalmazott interferometriai módszerrel bizonyították 250 attoszekundumos impulzusokból álló XUV impulzusvonulat létét. Krausz Ferencék pedig egy időtartománybeli módszerrel karakterizálták az izolált 650 attoszekundumos impulzusokat. Néhány évvel később Krausz Ferenc akkor már a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben 80 attoszekundumos impulzusokat állított elő, amire 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 rövidegénél 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. A 6. ábra egy infravörös lézerpulzus elektromos terének attoszekundumos pontosságú oszcillációját mutatja meg. A lézerpulzus elektromos terének pillanatnyi vektorpotenciálját közvetlenül az elektronok kinetikus energiájába tudták transzformálni nemesgázatomok ionizálásának segítségével.

Az attoszekundumos fényforrásokat elektronok ultragyors folyamatainak megméréseire is felhasználjuk



6. ábra. Ultrarövid infravörös lézerpulzus elektromos terének vektorpotenciálja attoszekundumos pontossággal megmérve



7. ábra. Hagyományos abszorpciós spektroszkópiai elemzés (*felül*) és Krausz Ferenc rövid impulzusokra épülő új módszere, a térfeloldott spektroszkópia vizsgálati elve (*alul*). Ez utóbbi az ultrarövid lézerpulussal gerjesztett molekula választ mérli bármiféle zavaró háttér nélkül

atomok és molekulák esetén. 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 100 eV-os fotonok (attoszekundumos impulzusok) ionizálják, időbeli késleltetés van a 2s és 2p szintről kilépő elektronok kibocsátása között. Attoszekundumos mérés-technikával azt is meghatározták, hogy a 2p elektron 21 attoszekundummal lassabban hagyja el a neonatomot, mint a 2s elektron. Az ilyen fotoemissziós késések az elektronfelhő kollektív dinamikájának jelei.

A 2017-ben felépült szegedi ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet is az attoszekundumos folyamatok vizsgálatát tűzte ki célul, erre utal az Attosecond Light Pulse Source (attoszekundumos fényimpulzusforrás) elnevezés is. A három (prágai, szegedi és bukaresti) ELI-infrastruktúra közül a szegedi épült kifejezetten azzal a céllal, hogy az attoszekundumos fizika témakörében kínáljon kísérleti lehetőségeket érdeklődő kutatóknak az egész világból, hogy az attoszekundumos mérés-technikához fejlesztett berendezésekkel elektronok ultragyors folyamatait vizsgálhassuk a legkülönbözőbb atomi és molekuláris rendszerekben, illetve újabban pedig már szilárdtestekben, nanorendszerekben és azok felületén is.

Krausz Ferenc 2019-ben Budapesten megalapította a Molekuláris Ujjlenyomat Kutatóközpontot, melynek célja az élvonalbeli femtoszekundumos lézerfejlesztés és az ultragyors mérés-technika új szintre emelése annak érdekében, hogy emberi vérminták elemzésével szív- és érrendszeri, valamint rákbetegségek korai stádiumban diagnosztizálhatók legyenek.

A vérminták elemzéséhez Krausz Ferencék egy forradalmian új módszert használnak, melyet térfel-

dott spektroszkópiának (*field-resolved spectroscopy*) nevezték el. A hagyományos spektroszkópiai módszerektől eltérően nem a spektrális tartományban mérik a folyadékminták válaszjelét, hanem ultrarövid lézerpulzusokkal gerjesztik azokat, és a gerjesztő impulzus elhaladása után a komplex molekuláris rendszer által kisugárzott infravörös fénycsilló mérlik meg az időtartományban, majd ezt a jelet elemzik mesterséges intelligencia segítségével. Az időtartományban mért jel Fourier-transzformáltja a spektroszkópiaival ekvivalens információt ad, azonban háttérmentes mérési lehetőséget biztosít (7. ábra).

Az utóbbi időben nyolc különféle ráktípust vizsgáltak már meg a molekuláris ujjlenyomat módszerével, és a módszer mind a nyolcra valamilyen szinten érzékenynek bizonyult. Ezekkel a felismerésekkel azt a kérdést igyekeznek megválaszolni, hogy a térfeloldott spektroszkópiai módszer alkalmazható-e egy széles körű egészségmegőrzési program alappilléreként, széles populációk egészségi állapotának monitorozására. Így a rendszeres vérvételből és az infravörös fényimpulzusokkal megmért molekuláris ujjlenyomatokból megállapíthatnák azt, hogy kik azok, akiknél egyes megbetegedések korai jelei tapasztalhatók. A meggyőző bizonyítékok megszerzése a következő 6–8 év feladata.

Köszönetnyilvánítás

Köszönjük Rácz Péternek és Bánhegyi Baláznak az 1. és a 7. ábra elkészítését.

Irodalom

1. Krausz Ferenc: Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle* 2002/1
2. Dombi Péter: Femtokémiából attofizika? *Mafigyelő, a Magyar Fizikusok Egyesületének lapja* 2005/2, 6–7.
3. Farkas Győző: Attoszekundumos időtartamú fényimpulzusok. *Fizikai Szemle* 2006/12
4. Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok. *Fizikai Szemle* 2008/3
5. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/advanced-information/>
6. <https://www.nobelprize.org/uploads/2023/10/popular-physics-prize2023.pdf>