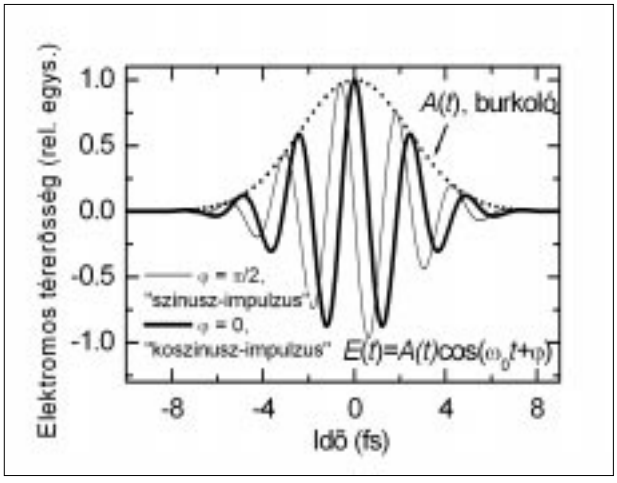
Femtokémiából attofizika?

Mikrobiológia, nanotechnológia, femtokémia, attofizika – az anyag egyre fundamentálisabb tulajdonságait kutató tudományágaknál egyre extrémebb prefixumokkal találkozik az ember. Ráadásul az utóbbi kettőnek etimológiailag már a göröghöz sincs semmi köze – a „femto" és az „atto" svéd számnevekből ered (egyáltalán nem meglepő módon: 15 és 18). Hogy mi fán terem a (kísérleti) attofizika, arról a legtöbben csak az utóbbi években értesülhettek – addig ugyanis ez a tudomány csak pár merész elméleti fizikus fejében létezett. Viszont ahhoz, hogy megértsük, hogy ez a terület hogyan robbant be a köztudatba, ahhoz először a femtokémiáról kell pár szót ejteni, aminek a fejlődését – és a tudományterületet is kitüntető 1999-es kémiai Nobel-díjat – az ultrarövid impulzusú lézerek tették lehetővé.

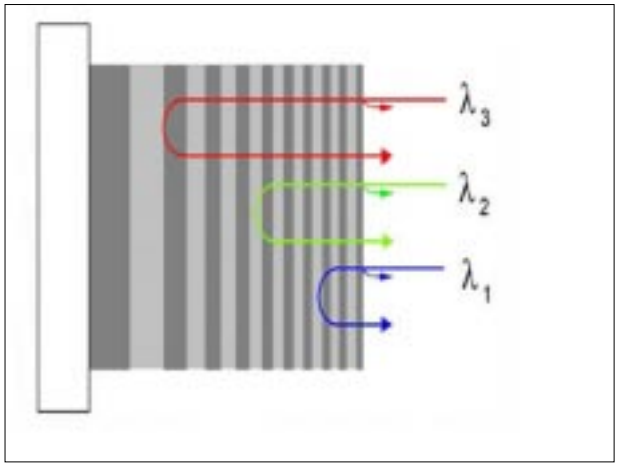
Az alapprobléma a következő: a természet bármilyen ultragyors folyamatának időben feloldott vizsgálatához egy annál rövidebb, kontrollálhatóan előállítható esemény kell (analógia: egy vonalzóval is olyan tárgyak mérhetők csak le, melyek dimenzióinál a vonalzó fokbeosztása finomabb). Ilyen eszköz van ugyan, de csak egy: ultrarövid lézerimpulzusok. A kilencvenes évek éppen ezért lett a femtokémia évtizede: sok ultragyors kémiai folyamat 100 femotszekundumnál kisebb időskálán játszódik le. Ezeket kiválóan lehetett az akkoriban gombamód elszaporodó, egyszerűen kezelhető lézerekkel gerjeszteni („pumpálni"), majd az adott kémiai rendszer állapotát egy, a pumpáló nyalábból leválasztott, ahhoz képest femtoszekundumos pontossággal késletetett impulzussal letapogatni („próbálni"). A rendszernek a késleltetés függvényében mért valamely tulajdonságából (pl. fluoreszcenciaspektrumából) rajzolódik ki a folyamat femtoszekundumos pontosságú lefutása. Innen származik ennek a fundamentális vizsgálati metódusnak az elnevezése: pumpa-próba-spektroszkópia[1]. A pumpa- és a próbanyaláb közötti késleltetést femtoszekundumos pontossággal kell kontrollálni, amihez tükrök mikrométeres pontosságú pozicionálása szükséges, de ez nem jelent problémát. Az így vizsgálható folyamatok elképesztő gyorsaságához csak még egy adalék: az elektronikai eszközök ennél öt nagyságrenddel lassabb folyamatokat tudnak csak feloldani…

Persze eddig ez még csak egyes vegyészeket tett boldoggá.[2] A fizikusok azonban semmivel sem kevésbé boldogságra törekvő lények, ezért hát elkezdtek azon gondolkodni, hogyan is lehetne az őket érdeklő, a belső héjakon lejátszódó, szub-femtoszekundumos atomfizikai folyamatokat feloldani. Hát persze, hogy nem mással, mint lézerekkel! Viszont a rövid impulzusok szempontjából csúcstechnológiát jelentő titán-zafír lézerekkel van egy nagy baj: infravörösek. Az ilyen lézer hullámhosszához tartozó optikai ciklushossz 2.7 fs, ami az impulzus hosszát is limitálja. Ebből tehát nem lehet közvetlenül attoszekundumos impulzust faragni. Van azonban egy egyszerű (-nek tűnő) megoldás: a Fourier-szintézis.



Nem mindegy, szinusz-e vagy koszinusz...

Ha ugyanis ilyen intenzív femtoszekundumos lézerimpulzusok nemesgázatomokkal hatnak kölcsön, akkor a lézerfrekvencia (amihez kb. 1,5 eV fotonenergia tartozik) nagyon magasrendű felharmonikusai állíthatók elő, tipikusan akár a századik harmonikus rendig is, vagyis egészen a lágy röntgentartományig. Nemperturbatív folyamatról lévén szó, a kilencvenes évek elején elvégzett kísérletek tanúsága szerint a felharmonikusok intenzitása, és kvantummechanikai számítások szerint a fázisuk is bizonyos spektrális tartományban állandó. Innen persze már csak egy lépés attoszekundumos impulzusvonulatok szintetizálása: jó sok felharmonikust azonos fázissal összeadva jó rövid impulzusokból álló vonulatokat kapunk (ki lehet otthon próbálni)[3]. Az 1991-es magyar ötletet – amely Farkas Győző nevéhez fűződik – azonban nem követhették tettek: nem volt elég rövid impulzusú, elég intenzív lézer a megvalósításhoz.



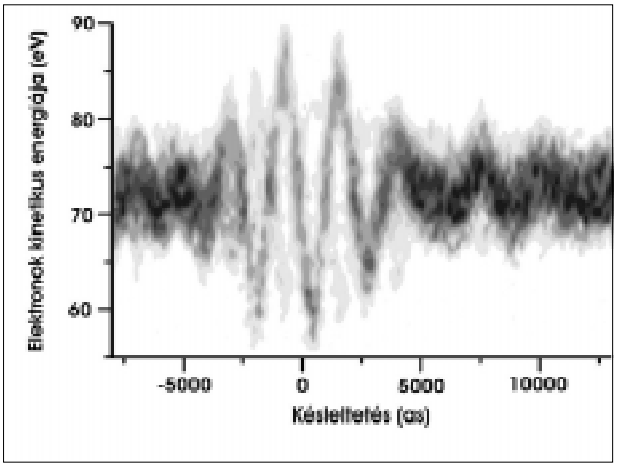
„Made in Hungary" – a csörpölt tükör. A széles spektrumú, rövid impulzus különböző monokromatikus komponensei a dielektrikum-rétegstruktúra különböző mélységeiből verődnek vissza. A tükör (negatív) diszperziója a rétegvastagságok optimalizálásával így majdnem tetszőlegesen szabályozható, $\ddot{e}_3 > \ddot{e}_2 > \ddot{e}_1$.

Nemsokára azonban egy újabb hungarikum jelent meg a tudománytörténet porondján – Szipőcs Róbert és Krausz Ferenc jóvoltából –, amelyre közel évtizedes lézerfejlesztési munka épült, így végül lehetővé vált attoszekundumos röntgenimpulzusok előállítása. A találmányt magyarul hivatalosan fáziskorrigáló tükörnek hívják, de mindenki csak becsületes nevén csörpölt tükörnek nevezi (chirped mirror), ami éppen működési elvére utal a madárcsicsergés egy fajtájának angol elnevezéséből: időben változó késleltetéssel veri vissza a ráérkező különböző optikai frekvenciákat (1. ábra). Ilyen tükrök segítségével aztán végre elő lehetett állítani olyan, relatív intenzív, (még mindig közeli infravörös) öt femtoszekundumos lézerimpulzusokat, amelyek nemesgázatomokkal kölcsönhatva nemcsak hogy attoszekundumos lágy röntgen impulzusvonula-

tokat, hanem akár izolált, 250 attoszekundumos egyesimpulzusokat is képesek produkálni, irdatlan spektrális sávszélességük jóvoltából.

Azonban az, hogy a keltő lézerimpulzus elég rövid, önmagában még nem elég. Az attoszekundumos impulzusok reprodukálható előállításának van még egy fontos előfeltétele, amiről eddig nem esett szó: a keltő infravörös impulzusok ún. abszolút fázisának kontrollja. Miután a legrövidebb lézerimpulzusok hossza az optikai ciklusával összemérhető, ezért az ilyenek által előidézett magasabb rendű folyamatoknál, így az „attoszekundum-keltésnél" sem mindegy, hogy milyen az elektromos térnek az impulzus burkolója alatti tényleges lefutása (2. ábra). Ez a kérdés a kilencvenes évek hőskorának femtovegyészeit még egyáltalán nem érdekelte, megelégedtek az impulzus (a 2. ábrán pl. gaussi) burkolójának formálásával, amihez ma már mindenféle rafinált technika létezik[4]. A hordozóhullám rögzítése a burkoló alatt (amit fázisstabilizálásnak is neveznek) viszont egyáltalán nem triviális feladat, az utóbbi években azonban ez is sikerült, így megnyílt az út a kísérleti attofizika, vagyis pl. belső héjak dinamikájának a vizsgálata előtt. Csak egy példa a 2002-es Nature-ből: Auger-elektronok segítségével sikerült kripton egy M-héj vakanciájának élettartamát közvetlenül megmérni, ami 7.9 (+1.0/-0.9) femtoszekundumnak adódott. Egy másik látványos eredménye ezeknek a kutatásoknak az a mérés, amellyel egy (látható/közeli infravörös tartománybeli) femtoszekundumos fényimpulzus elektromos terének lefutását tették attoszekundumos pontossággal láthatóvá azáltal, hogy a térerősséget – szintén nemesgázatomokkal való kölcsönhatás által és egy pumpa-próba-jellegű módszert alkalmazva – közvetlenül elektronspektrumokba (a 3. ábrán, az y-tengely menti metszetek) transzformálták, amelyek maximumai aztán pontosan kirajzolták az elektromos tér lefutását.

Ha valaki pedig nem érné be az attoszekundumokkal: fázisstabilizált lézerimpulzusok segítségével optikai spektrumvonalak helyét is az eddigi csúcstechnológiánál kb. három nagyságrenddel pontosabban és két nagyságrenddel olcsóbb eszközparkkal lehet mérni, akár 10^{-15}-es pontossággal! Ennek megértéséhez rakjunk egymás után sok, a 2. ábrán látható fázisstabilizált impulzust pár tucat MHz-es ismétlési frekvenciával (a lézerből ilyenek jönnek ki). A frekvenciatartományban egy ilyen impulzusvonulat képe egy ún. frekvenciafésűnek felel meg, melynek burkolója az impulzus burkolójának Fourier-transzformáltja, a fésűfogak pedig az ismétlési frekvenciával megegyező távolságra vannak egymástól. Ha mind az ismétlési frekvenciát (amit nem nehéz), mind a frekvenciafésű nulla-offszetjét stabilizálja az ember, akkor egy hiperpontos frekvencia-vonalzót lehet előállítani. A frekvenciafésű nulla-offszetje viszont éppen az impulzusvonulatbeli abszolút fázisevolúcióval van egyszerű kapcsolatban, vagyis egy fázisstabilizált lézer frekvenciafésűje is stabil. Ennek egyik fésűfogát aztán már össze lehet lebegtetni a mérendő spektrumvonallal, és a lebegési frekvenciából valamint a fésűfog ismert pozíciójából meg lehet határozni a mérendő frekvenciát.



Látta már valaki a fény elektromágneses terét a saját két szemével? Ha nem, hát tessék! (A szürkeárnyalatok elektronbeütésszámnak felelnek meg)

A mérföldkő ezekben a mérésekben az volt, hogy a szokásos, rádiófrekvenciás frekvenciastandardok pontosságát (Cs, Rb-atomórák) egy lépésben, egy egyszerű lézeroszcillátor fázisstabilizálása segítségével sikerült az optikai tartományba átvinni. Ezt azelőtt, egészen 2000-ig csak ipari csarnokméretű, fáziskoherens, tucatnyi különböző lézert és mézert tartalmazó láncolatokkal tudták csak megoldani, amelyet csak három-négy nagy nemzet központi szabványügyi létesítménye engedhetett meg magának.

Mielőtt a részecskefizikusok mindezt egy, az új technológiáknak szóló elnéző mosollyal intéznék el, mondván, hogy „szép-szép, de mi ebben az új fizika?", érdemes elmondani, hogy például a finomszerkezeti állandó néhány évenként megismételt, hiperpontos, spektroszkópiai alapú mérésével olyan kozmológiai koncepciókat lehet tesztelni, illetve nekik határt szabni, amelyekből az alapvető fizikai állandók driftjével kapcsolatban is lehet következtetéseket levonni. Persze apokaliptikus rémálmokra semmi ok: eddig a nagyon alacsony mérési hibahatár alatt van az észlelt drift nagysága.

Van még egy nagy előnye az attoszekundumos és a kapcsolódó tudománynak kis hazánk szempontjából is: a technika viszonylagos egyszerűsége miatt (egy attoszekundumos fényforrás mindössze két-három négyzetméteres felületet foglalnak el egy optikai asztalon), a szegedi lézeres know-how-ra valamint a fent említett KFKI-s hagyományokra építve mindössze egy-két bukott parlamenti alelnöki „vigaszdíjat" kellene csak a magyar költségvetésből megtakarítani ahhoz, hogy a világon eddig mindössze néhány helyen kutatott attoszekundumos dinamikát hazai laborokban is vizsgálni lehessen. Akit érdekel hasonló témájú kutatásokba való hosszabb-rövidebb bekapcsolódás (projekt- és diplomamunka vagy akár doktoranduszi szinten), bátran érdeklődjön nálam a **dombi@tuwien.ac.at** -n!

Dombi Péter

A cikkben említett néhány eredmény eredeti közlési helye:

M. Drescher et al., Nature 419, 807 (2002),

E. Goulielmakis et al., Science 305, 1267 (2004),

M. Fischer et al., Phys. Rev. Lett. 92, 230802 (2004).

1 Itt a femtokémia vizsgálati módszereiről nem írhatok hosszabban, viszont szellemes interaktív oktatóanyag található würzburgi kutatócsoport honlapján: **http://www.physik.uni-wuerzburg.de/femto-welt/**.

2 Ez egy enyhe túlzás, ugyanis szilárdtestek elektron-transzport folyamatainak egy része is ilyen időskálán játszódik le, és ezeket is lehet femtoszekundumos fényforrásokkal vizsgálni.

3 A jelenség azért is tanulságos, mert az ún. módusszinkronizált, vagyis a legrövidebb impulzusokat szolgáltatni tudó lézerek működésének is hasonló az alapja. A würzburgi honlapon ez utóbbihoz is van egy jópofa applet: **http://www.physik.uni-wuerzburg.de/femto-welt/pulsframe.html** .

4 Újabb házi feladat: próbálkozzunk a rövid lézerimpulzusból a széles spektrumához tartozó komponensek fázisának állítgatásával kettősimpulzust csinálni a **http://www.physik.uni-wuerzburg.de/femto-welt/formerframe.html címen**.