

2005 augusztusában elhangzott előadása és megjelenés alatt álló cikke alapján (az ő engedélyével) bemutatjuk a kritikus időszakra vonatkozó mágneses adatokat [6].

Mint az 5. ábrán jól látható, a mért mágneses tér erőssége a várakozásoknak megfelelően jelentősen (mintegy 3–4-es faktossal) megnőtt a lökeshullámon való áthaladás után. Érdekes a középső mező is, amely az áthaladás előtt mutat ugyan „szektorátmeneteket”, vagyis a mágneses tér irányának átfordulásait, de a lökeshullám után eltelt néhány napot követően legalább két hónapig a mágneses tér iránya lényegében változatlan marad. Külön érdekesség, hogy bár a Voyager-1 szonda az ekliptika síkjától 34 fokos északi szélességen halad kifelé, a mágneses tér iránya ebben a két hónapos időintervallumban a déli féltekére jellemző mágneses polaritást mutat.

Az energikus töltött részecskékre és a mágneses térre vonatkozó mérési adatok alapján tehát ma minden kutató egyetért abban, hogy 2004. december 16-án a Voyager-1 szonda kilépett a szuperszonikus napszélbuborékból. A mérési eredmények értelmezésének egyéb kérdéseiben viszont távolról sincs ilyen összhang. Nem világos, miért terjedtek ki ilyen hosszú időszakra a lökeshullámot megelőző intenzitásváltozások. Az anizotrópiaadatok ellentmondani látszanak a lökeshullám közelítőleg gömb-szimmetriájának. A lökeshullámon felgyorsult részecskék energiája túl kicsinek látszik ahhoz képest, amit a belső helioszférában végzett mérések alapján vártunk. A lökeshullámon túl mért anizotrópia túl kicsinek látszik ahhoz képest, ami az elméletileg számolt napszélsebesség alapján következne. Ezek mellett további kérdések izgatják a kutatókat, és valószínűleg még évek mérési adatai és elméleti erőfeszítései kellene a konszenzus eléréséhez és a helioszféra külső tartományának jobb megértéséhez.

Mi várható a továbbiakban?

A Voyager-1 és Voyager-2 űrszonda évente mintegy 3 CsE-et megtéve halad kifelé a Naprendszerből. Radioaktív bomláson alapuló energiaellátásuk valószínűleg legalább 2020-ig biztosítani tudja, hogy adatokat továbbítsanak a Földre, még ha az adatmennyiség egyes mérő-

műszerek végleges kikapcsolása vagy ritkább bekapcsolása miatt csökken is. A helioszféra köpenyének becsült vastagsága alapján kétséges, hogy a Voyager-1 ez idő alatt kijut-e a szubszonikus napszélből a csillagközi gázt tartalmazó külső köpenybe vagy hüvelybe. Az viszont biztosra vehető, hogy a Voyager-1 további igen értékes és részben váratlan adatokat fog hozzánk továbbítani a szubszonikus tartomány részecskefluxusairól és mágneses tereiről. A KFKI RMKI Kozmikus Fizikai Főosztályának kutatói elsősorban a belső helioszférában korábban végzett mágneses és részecskeeloszlásokra vonatkozó mérések tanulságai alapján igyekeznek megérteni az új környezetben lezajló folyamatokat.

2005 júniusa óta a Voyager-2 szonda által mért intenzitások is hasonló változékonyságot mutatnak, mint amilyeneket a Voyager-1 szonda 2002 júliusától, jóval nagyobb heliocentrikus távolságokban mért. Ez arra utal, hogy néhány éven belül a Voyager-2 is átlépheti a lökeshullámot (könnyen lehet, hogy többször is, a lökeshullám mozgásától függően). A Voyager-2 áthaladása azért is nagyon érdekes lesz, mert ennek a szondának a plazmadetektora kiválóan működik, így a napszélre vonatkozó adatokat közvetlenül is tudjuk majd mérni, nem kell az energikus részecskék anizotrópiája alapján tett bizonytalan becslésekre hagyatkoznunk. Várható, hogy a két szonda mérési eredményeinek együttes elemzése elvezet helioszféránk, és ezzel együtt a csillagok környezetében kialakuló analóg asztroszférák jobb megértéséhez.

Irodalom

1. KIRÁLY PÉTER: *Szoláris, helioszférikus és kozmikus részecskesugárzás* – Fizikai Szemle 51/8 (2001) 238
2. W.I. AXFORD, S.T. SUESS: *The Heliosphere* – Web dokumentum, URL: web.mit.edu/space/www/helio.review/axford.suess.html
3. P. KIRÁLY: *The way out of the Bubble: implications of recent Voyager-1 data* – Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, Pune, India (2005); közlésre elfogadva.
4. S.M. KRIMIGIS ÉS MÁSONK: *Voyager 1 exited the solar wind at a distance of ~85 AU from the Sun* – Nature 426 (2003) 45
5. F.B. McDONALD ÉS MÁSONK: *Enhancements of energetic particles near the heliospheric termination shock* – Nature 426 (2003) 48
6. N.F. NESS ÉS MÁSONK: *Studies of the termination shock and heliospheric beat at >92 AU; Voyager 1 magnetic field measurements* – Proceedings of the 29th International Cosmic Ray Conference, Pune, India (2005); közlésre elfogadva.

OPTIKAI FREKVENCIAMETROLÓGIA, AVAGY MIRE JÓK A FREKVENCIAFÉSŰK?

Dombi Péter
MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet

Amikor a Nobel-díj kihirdetést követő órákban a kísérleti munkájáért díjazott *Theodor Hänsch* német tudósnak szegeztek azt az újságírói kérdést, hogy miért is nyerhette el ezt a kitüntetést, tömören és szerényen (és mellel teljesen helytállóan is) úgy fogalmazott: „Nagyon pontos méréseket végeztem...” Ő *John Hall* amerikai fizikussal megosztva kapta a díj felét a „lézeralapú precíziós spektroszkópiában” elért eredményekért, az „optikai frekven-

ciafésű-technikát is beleértve”. Sokan esetleg már arról is értesültek, hogy a frekvenciafésűk a femtoszekundumos fényimpulzusokat kibocsátó lézerekre épülnek. Talán nem árt a következőkben ezekre az összefüggésekre pontosabban is rávilágítani annak kapcsán, hogy mik is ezek a különleges nevű eszközök, nem megfelelően a szép számban rendelkezésre álló érdekes alkalmazásokról és magyar vonatkozásokról sem.

Femtosekundos lézerek

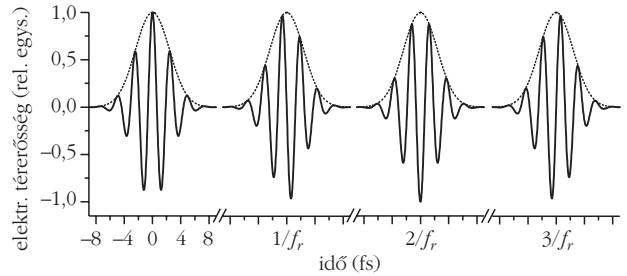
Mindenki látott már szivárványt vagy egy egyszerű üvegprizmán való áthaladáskor spektrális komponenseire bomló napfényt. A mindennapi lézerekről viszont legtöbbször a monokromatikusság jut eszünkbe: a vonalkódeolvasók és lézeres kulcstartók vörösétől kezdve a lézershow-k zöld színéig sokféle tiszta színű lézerfényvel találkozhatunk mindennapjainkban is. Az utóbbi évek lézerfejlesztései viszont lehetővé tették azt is, hogy bizonyos laboratóriumi lézerek a Nap sugárzásához hasonló, közel fehér (vagyis nagyon széles színskálát magában foglaló) sugárzást bocsássanak ki. Ismert, hogy a különböző hullámhosszak különböző foton energiáknak felelnek meg, tehát az ilyen lézerek fényét úgy is tekinthetjük, mint amit nagyon nagy (foton)energia-határozatlanság jellemez. Ezek után az sem meglepő, hogy az ilyen lézerek nem folytonos, hanem nagyon rövid ideig tartó, femtosekundos fényfelvillanásokra, lézerimpulzusokra korlátozódó sugárzást adnak.

És ezen a ponton rögtön meg is kell emlékeznünk a legutóbbi fizikai Nobel-díj egy magyar vonatkozásáról: az ilyen ultragyors szilárdtestlézerek fejlesztésében egy 1994-es újítás is kulcsszerepet játszott: az MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetében találták fel azokat az – attól fogva világszerte, így a Nobel-díjas kutatásokhoz igénybe vett lézerekben is felhasznált – speciális, fáziskorrigáló (angolul chirped, s magyarul is néha „csörpölt”) tükröket, melyek azután lehetővé tették 10 fs-nál is rövidebb, mindössze 1–2 optikai ciklusból¹ álló lézerimpulzusok előállítását. Az ilyen tükrökre épülő lézereket joggal tekinthetjük tehát a Nobel-díjas mérésekhez felhasznált műszerek előfutárainak.

Frekvenciafésűk és ultrapontos mérések

Tovább árnyalja a helyzetet, hogy ezek a femtosekundos, úgynevezett módusszinkronizált lézerek a fényimpulzusokat periodikusan, több tucat MHz-es ismétlési frekvenciával adják. Egy ilyen tipikus impulzusvonulatot ábrázol az 1. ábra. Az elektromágneses tér ilyen lefutásának frekvenciatartománybeli képe (vagyis a lézer spektruma) egy frekvenciafésű: a széles burkoló alatt – amely a vonulatbeli impulzusok extrém rövidsége miatt felöllelheti akár a teljes látható tartományt is – diszkrét, egyenközű fésűfogak jelennek meg az impulzusok periodikus ismétlődése miatt. A fésűfogak távolsága pedig fix és éppen az f_r ismétlési frekvenciával egyenlő. Így tehát akár egy pontos frekvenciareferencia is keletkezhetne, ha a struktúrát egyedül f_r határozná meg, hiszen ez a paraméter a lézerrezonátor hosszának függvénye, amit bevett módszerekkel stabilizálni lehet. Van viszont még egy paraméter, mégpedig a teljes frekvenciafésű ofszetje (2. ábra, f_{ceo}), amely nagyon érzékenyen reagálhat bármely, lézerrezonátorbeli termikus vagy mechanikai fluktuációra, vagy akár a femtosekundos lézert pumpáló másik, általában folytonos lézer teljesítményzajára. Az ebből

¹ Optikai ciklusnak nevezik a λ_0/c időt, az elektromágneses hullám periódusidejét.

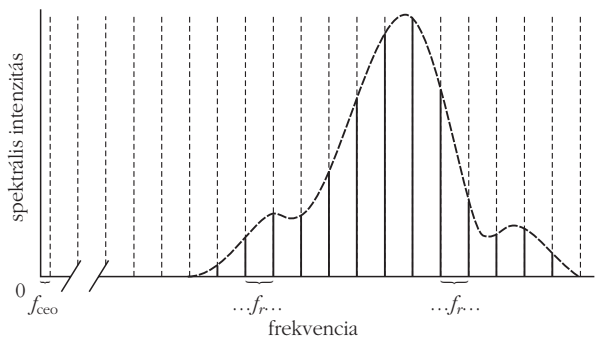


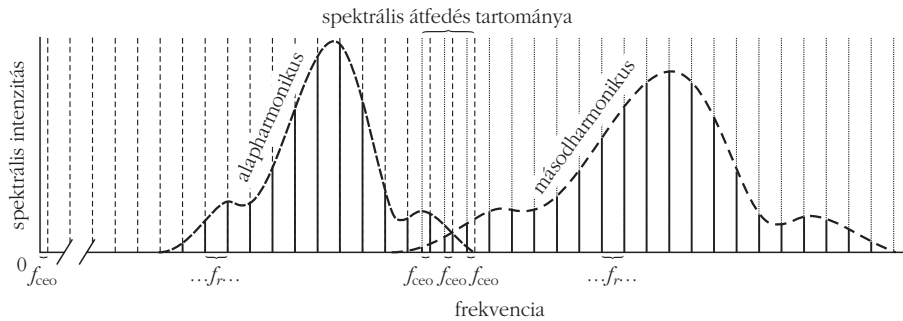
1. ábra. Egy femtosekundos lézer által kibocsátott, 4 fs-os lézerimpulzusokból álló impulzusvonulat. Az impulzusok változatlan gaussi burkolója mellett az elektromos tér többféle lefutása is megvalósulhat.

származó fluktuáció, vagyis a frekvenciafésűnek a fix spektrális burkoló alatt történő fel-alá vándorlása (2. ábra) mind ez idáig nemigen zavarta az ilyen lézerek felhasználóit, hiszen egy ilyen zaj mellett a lézerimpulzusok időtartománybeli képe meglehetősen változatlan marad (pontosabban szólva az ismétlési frekvenciát és az impulzusok időbeli burkolójának lefutását ez nem befolyásolja). Hiperpontos spektroszkópiára, frekvenciamérésre viszont nyilvánvalóan alkalmatlan egy ilyen zajos, fel-alá mozgó frekvenciafésű. Az eddigieket tehát matematikai alakba öntve: az n -edik fésűfog pozícióját az $f_n = n f_r + f_{ceo}$ egyenlettel lehet leírni, ahol n egy nagy természetes szám, és a fentiek alapján f_{ceo} jelentős zajjal terhelt is lehet. Az f_{ceo} ofszet stabilizálását viszont megnehezíti az a tény, hogy nem lehet közvetlenül mérni: a 0 frekvencia közelében nincs jel (2. ábra).

A Nobel-díjasokat viszont nem tántorította vissza ez a tény, és nem adták fel azt, hogy valaha egy ilyen, spektrális tartománybeli vonalzó segítségével frekvenciát, hullámhosszat mérhessenek. A lézertechnológia fejlődése azonban csak 4–5 éve tette lehetővé azt a lépést, ami – az erre épülő alkalmazásokkal együtt – mostanra már Nobel-díjat is ért. Az alapötlet a következő volt: az optikában már a lézerek fél évszázada történt megjelenése óta ismert a frekvenciaékszerzés: megfelelő nemlineáris kristályokban például 800 nm-es vörös fényből 400 nm-es kék fényt lehet előállítani. Ha a frekvenciafésűnkön hajtjuk ezt végre, akkor a spektrális tartományban egy másodharmonikus frekvenciafésű-másolat jelenik meg (3. ábra), $2(n f_r + f_{ceo})$ -nál elhelyezkedő fésűfogakkal. Ha ezen felül az eredeti fésű oktáv szélességű, akkor a másodharmonikus fésű alacsony frekvenciás vége átfed az eredeti nagyfrekvenc-

2. ábra. Femtosekundos lézerimpulzus-vonulat spektrális tartománybeli képe: a frekvenciafésű. (Mióután a spektrális burkoló itt a szemléletesség kedvéért már nem gaussi, ezért ez az 1. ábrán levőtől egy kissé különböző impulzusvonulat frekvenciatartománybeli képe.)

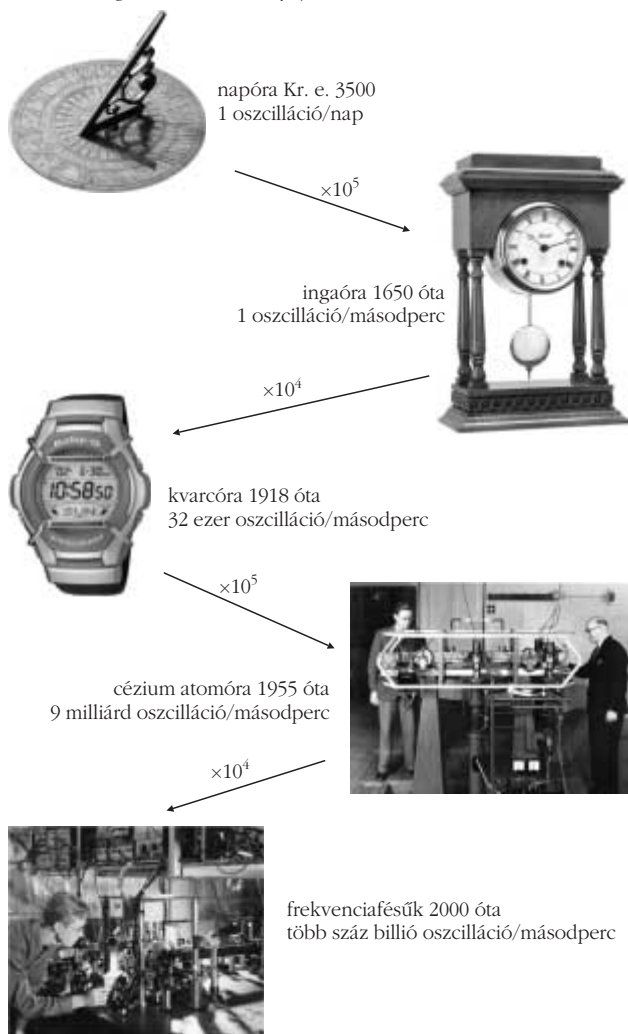




3. ábra. Módszer a frekvenciafésű ofszetjének stabilizálására (a további magyarázatot lásd a szövegben).

ciás végével, és az átfedési tartományban a két fésűből származó fogak közti lebegési frekvencia éppen az eredeti fésű ofszetjével lesz egyenlő, mint azt egyszerűen ellenőrizni is tudjuk a $2(nf_r + f_{ceo}) - (2nf_r + f_{ceo}) = f_{ceo}$ egyenletből. Miután ez a frekvencia 0 és f_r között van, ezért ez elektronikus eszközökkel feldolgozható, és a lézéroszcillátorba vissza lehet csatolni egy olyan hibajellet, mellyel az oszcillátor ezen utolsó, kontrollálatlan paramétere is szabályozhatóvá válik.

4. ábra. Az időmérés fejlődése. Minél gyakrabban bekövetkező, periodikusan ismétlődő eseményeket választunk az időmérés alapjául, annál pontosabb óránk lesz. A nyílakon szereplő számok az eszközök közti hozzávetőleges frekvenciaarányt jelzik.



Ha pedig ilyen módon adott már egy fix frekvenciafésű, akkor ultrapontos méréseket sem nehéz már végezni: csak annyit kellene tudni, hogy mely két fésűfog között van a mérendő spektrumvonal (ez a körülbelüli érték klasszikus spektroszkópiai módszerekkel könnyedén meghatározható), majd a két szomszédos fésűfoghoz viszonyított lebegési frekvencia (amely né-

hány MHz-es, a rádiófrekvenciás tartományba eső, vagyis nagyon pontosan mérhető jel) meghatározásával már igen nagy pontossággal is meg lehet állapítani a mérendő spektrumvonal helyét. Egy ilyen fix, referenciavonalakat adó fényforrást talán indokoltabb is lenne (a bevettebb) a frekvenciafésű helyett inkább frekvenciavonalzónak nevezni: ahogy egy hagyományos vonalzóval pontos távolságok mérhetők, úgy ezzel az eszközzel tiszta színek, vagyis: hullámhosszak, frekvenciák. Ezen az alapon azután el is végeztek néhány nagyon pontos mérést, egy csapdázott higanyion egy optikai elektronátmenetének frekvenciáját például $1064721609899143 (\pm 10)$ Hz-nek mérték, vagyis a bizonytalanság mindössze 10^{-14} -es mértékű. Persze optikai spektrumvonalak egzakt helyét 4-5 évvel ezelőttig is meg tudták állapítani, csak hogy ennél több nagyságrenddel pontatlanabban és több tucatszor drágább eszközparkkal. A Nobel-díjjal jutalmazott munka azonban a világszerte létező 4-5 nagy, nemzeti szabványügyi laboratórium után egyetemi kutatócsoportok számára is lehetővé tette az optikai tartománybeli ultrapontos frekvenciamérést.

A frekvenciafésűk további alkalmazásai a kozmológiában és az időmérésben

A módszert felhasználva megtörtént az első jelentős alkalmazás is, amelynek során Theodor Hänsch csoportja azt vizsgálta meg, hogy valóban állandók-e a fizikai állandók. Már eddig is létezett ugyanis pár olyan egzotikus kozmológiai elmélet, amely feltételezte, hogy a konstansok lassan ugyan, de időben változhatnak – ezeket a teóriákat kellett hát valamiképpen tesztelni. Vannak olyan spektrumvonalak (pl. a hidrogénspektroszkópiában), amelyek egyszerű kapcsolatban állnak fizikai állandókkal (pl. az elektron töltésével és a Planck-állandóval). A spektrumvonal helyének precíz meghatározásával tehát tulajdonképpen ezek a konstansok is extrém pontosan mérhetők. Nincs is más teendő, mint a frekvenciafésűk segítségével néhány évenként kimérni ezen vonalak helyét. Aggodalomra azonban mindeddig semmi ok: a négyéves időközzel megismételt méréspárban úgy találták, hogy az észlelt elmozdulás még a nagyon alacsony mérési hibahatáron is belül van, tehát a konstansok jelenleg állandóknak tűnnek...

Persze azon túl, hogy egzotikus elméletekhez szolgáltatnak adalékot, a közeljövőben sokkal hétköznapibb alkalmazásokhoz is hozzájárulhatnak az ilyen lézerek.

Egy ilyen tipikus terület pedig az időmérés. Minden óra két részből áll ugyanis: egyrészt egy pontosan ismert frekvenciával periodikusan ismétlődő eseményből (pl. a napóránál a Föld tengely körüli forgásából, a kvarcóránál egy kvarckristály oszcillációból), másrészt egy számlálóból, amely ezeket a periodikusan bekövetkező eseményeket számlálja. Belátható, hogy minél nagyobb frekvenciával ismétlődő eseményeket választunk az óra alapjául, annál pontosabban tudunk időt mérni: egy cézium-atomóra (ahol egy mikrohullámú atomi átmenet frekvenciáját számlálják) tízmilliárdszor pontosabbá tehető, mint például egy ingaóra. A látható fény frekvenciája azonban még a már ötven éve a csúcstechnológiát jelentő atomórákban felhasznált frekvenciáknál is legalább negyvenezereszer nagyobb, ezen az alapon tehát több nagyságrenddel pontosabb óra is építhető, ráadásul lényegesen kompaktabb eszközökkel. Ez a jövőben akár az atomórákat is túlszárnyaló, optikai tartománybeli frekvenciára épülő másodperc-definíciót tehet lehetővé, s potenciális gyakorlati alkalmazásokat sem nehéz találni: például ezen az alapon a globális helymeghatározást (GPS-t) is tovább lehetne fejleszteni, ahol a térbeli pontosság növelése éppen az időmérés pontosabbá tételével érhető el.

A frekvenciafésűkhöz használt lézertípus azonban más, érdekes alapkutatói kérdésekben is hozott már újat: a már jól ismertnek hitt és tudománytörténetileg is jelentős fémfelületi fotoelektron-emisszió egy új arcát sikerült nemrég kísérletileg is kimutatnunk a segítségükkel (részben szintén Theodor Hänsch csoportjával való együttműködésben). Az utóbbi években pedig az attoszekundumos ($1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$) alkalmazások is egyre nagyobb publicitást kaptak: *Farkas Győző* (MTA Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet) 1991-es javaslata alapján néhány éve sikerült 250 attoszekundumos röntgenimpulzusokat

is előállítani *Krausz Ferenc* akkor még bécsi csoportjában (jelenleg: Kvantumoptikai Max Planck Intézet, Garching), aki ezen eredményei kapcsán név szerint is szerepel a Nobel-díjról kiadott hivatalos anyagban. Attoszekundumos impulzusokkal, melyek jelenleg az ember által kontrollálhatóan előállítható legrövidebb elemi események, szintén nagyon pontos méréseket lehet végezni, bár kicsit másképp, mint a frekvenciafésűkkel: a természetben lejátszódó leggyorsabb folyamatok időbeli lefutásáról nyerhetünk információt. Ezt a módszert már fel is használták atomok belső elektronhéjain lezajló atomfizikai folyamatok vizsgálatához. A közeljövőben pedig ilyen kísérletekkel talán választ kaphatunk arra a kérdésre is, hogy miként lehetne elég nagy fényerejű, a lézerekhez hasonló, viszont a röntgentartományban működő fényforrásokat létrehozni, melyekkel az orvosi/biológiai képalkotási eljárásokat lehetne forradalmasítani és a vizsgált személyek és minták sugárterhelését lényegesen csökkenteni. Az attoszekundumos alkalmazásokról azonban a *Fizikai Szemle* 2002. évi 1. számában már megjelent egy kimerítő bevezetés.

A femtoszekundumos lézerek és az azokra épülő kísérletek tehát izgalmasabbnak tűnnek, mint valaha, és biztos vagyok abban, hogy a következő években ilyen fényforrásokkal elért újabb jelentős eredményeknek lehetünk majd szemtanúi.

Irodalom

- TH. UDEM, R. HOLZWARTH, T.W. HÄNSCH: *Optical frequency metrology* – *Nature* 416 (2002) 233
M. FISCHER ET AL.: *New limits on the drift of fundamental constants from laboratory measurements* – *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 230802
A. APOLONSKI, P. DOMBI ET AL.: *Observation of light-phase-sensitive photoemission from a metal* – *Phys. Rev. Lett.* 92 (2004) 073902
KRAUSZ FERENC: *Atomok és elektronok mozgásban* – *Fizikai Szemle* 52 (2002) 12

GÁBOR DÉNES ÉS M. ZEMPLÉN JOLÁN 1961-ES LEVÉLVÁLTÁSA

Bíró Gábor
Gábor Dénes Főiskola

Gábor Dénes levele *Mátrainé Zemplén Jolánnak*, a magyar fizikatörténet úttörő kutatójának hagyatékából került hozzám lánya, *Mátrai Veronika* révén. A magyar nyelven írt szöveg tartalma és stílusa világosan mutatja, hogy Gábor Dénesnek élő kapcsolata volt szülőföldjével csaknem 30 év távollét után is. A levél emberi közelségbe hozza a holográfia Nobel-díjas atyjának személyiségét, műveltségét, a „papír-ember” megelevenedik...

A levélváltás megjelentetését¹ azért is fontosnak tartom, mert a mai olvasó számára is rendkívül érdekes, hogy milyen nagyra értékelte Gábor Dénes M. Zemplén Jolán fizikatörténeti munkásságát.

¹ A levelek helyesírásán nem változtattunk.

IMPERIAL COLLEGE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
(UNIVERSITY OF LONDON)

Dr. M. Zemplén Jolán
A Magyar Tudományos Akadémia címén
BUDAPEST
1961 június 3

Kedves Dr. Zemplén,
Beöthy Ottó barátom, a Magyarok Világszövetsége főtítkára megküldte nekem a maga könyvét, A Magyarországi Fizika Története 1711-ig. Most elolvastam, ha kissé felületesen is, és neki is küldök másolatot ebből a levélből.