

AZ ULTRAGYORS NANOOPTIKÁTÓL A FEMTOSZEKUNDUMOS ANYAGTUDOMÁNYIG

Dombi Péter^{1,2}

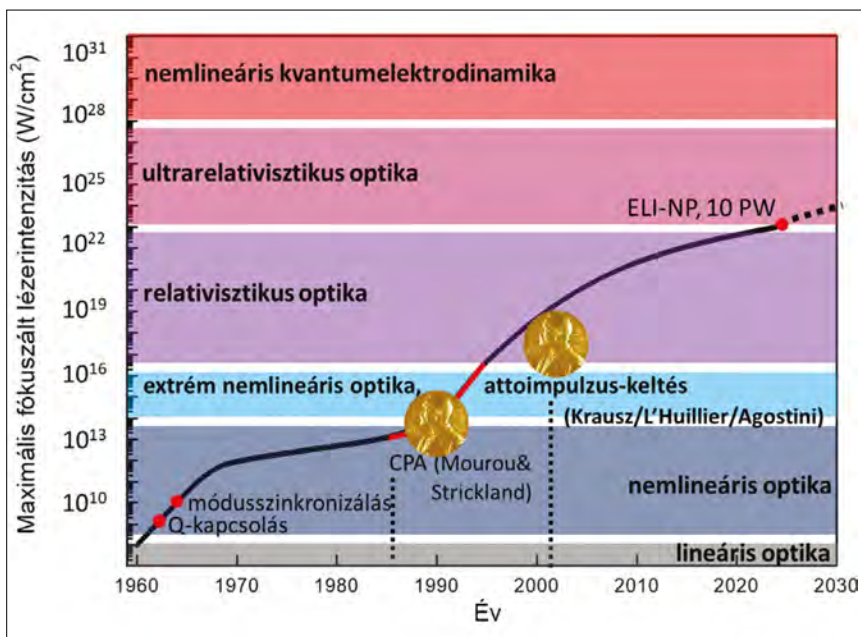
¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

²ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet, Szeged

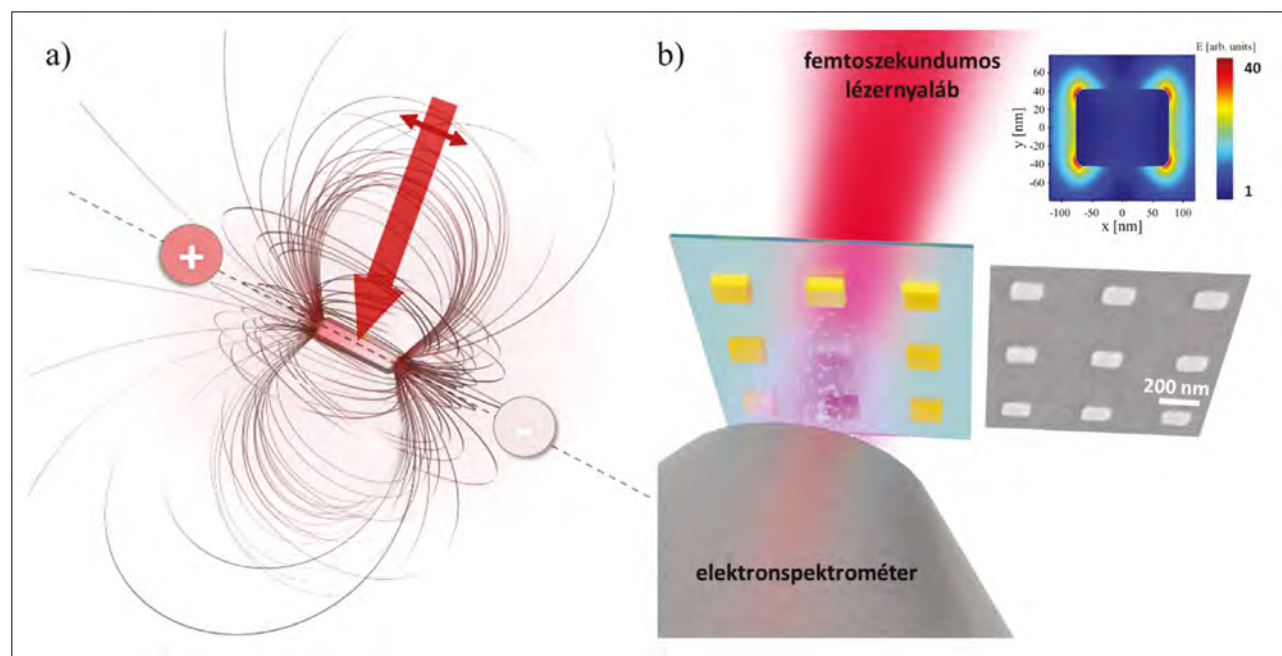
E-mail: dombi.peter@wigner.hun-ren.hu

Az első lézert 1960-ban építették meg az USA-ban, és azóta töretlen a fejlődés ezen a területen, nemcsak az alkalmazások terén, hanem a lézeres fizikai alapkutatásokban is. Az 1. ábra az impulzusüzemű lézerek technológiájának a fejlődését mutatja be: ahogy egyre nagyobb fényintenzitás vált elérhetővé újabb erősítési és impulzuskompressziós módszereknek köszönhetően, úgy váltak újabb és újabb fény-anyag kölcsönhatási tartományok kísérletileg is hozzáférhetővé. Ennek köszönhetően az ELI lézerei is a határok áttörését szolgálják; például a bukaresti ELI 10 PW-os csúcshintenzitású lézerevel a jövőben ultrarelativisztikus optikai folyamatok is vizsgálhatóvá válnak (1. ábra).

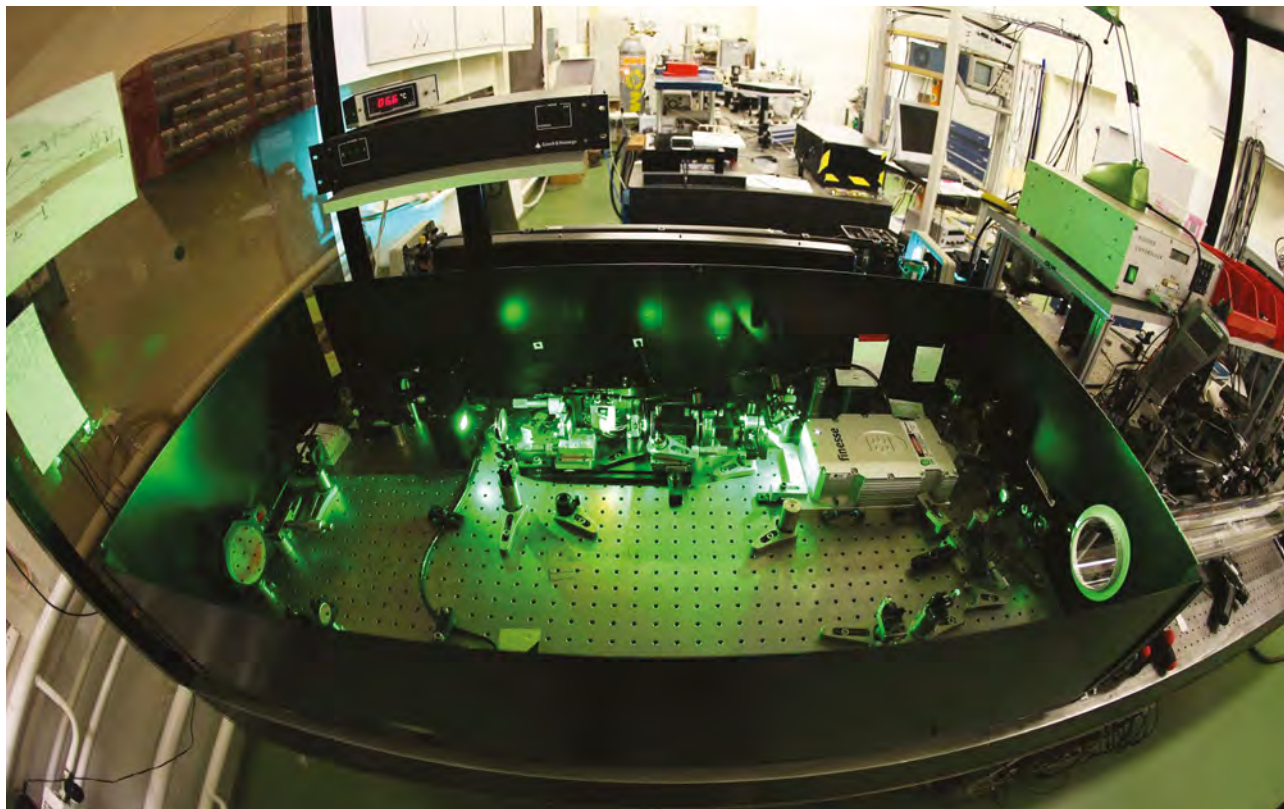
Viszont térjünk vissza az alacsonyabb intenzitásúhoz, amikor a lézert fény még nem kelt plazma halmazállapotot az anyagból, és



1. ábra. A lézernyalábok fókuszált intenzitásának aktuális rekordértékei az év függvényében. Látható, hogy a Nobel-díjjal kitüntetett attoszekundumos kutatások nem az elérhető legnagyobb intenzitásúknál folynak. Ebben a cikkben is az extrém nemlineáris optika, a nemlineáris optika és a lineáris optikai folyamatok érdekes új jelenségeit mutatjuk majd be



2. ábra. (a) Lokalizált felületi plazmonok keltésének mechanizmusa fém nanorészecskén. (b) Kísérleti elrendezés nanoemitterekről kilépő fotoelektronok vizsgálatára



3. ábra. Saját építésű hosszú rezonátoros titán-zafírlézer, mely 90 fs-os, 250 nJ-os impulzusokat biztosít (Csillebérc, 2010 körül)

megmarad a minták eredeti anyagszerkezete! Ebben az intenzitástartományban különösen érdekes az a kölcsönhatás, amikor a rövid impulzusú lézernyaláb egy fém nanorészecskével hat kölcsön.

Adott hullámhossz mellett megfelelő méretű fém nanorészecskét használva a lézertér elektromos tere töltéssűrűség-oszcillációt hoz létre, ezt lokalizált felületi plazmának nevezzük. Rezonáns esetben ez erős töltésszeparációhoz és így nagy térerősséghez vezet, ahogyan azt a 2a. ábra mutatja. A nanorészecske végeinél kialakuló elektromos tér a lézertér amplitúdómaximumának akár ötven-százszorosát is elérheti, vagyis ezzel a módszerrel kis lézerekkel is erős elektromos tereket tudunk létrehozni. További érdekességként pedig a tér nanométeres méretskálán lokalizált lesz, jóval az adott hullámhosszhoz tartozó diffrakciós korlát alatt.

Az ilyen plazmontérben a kölcsönhatások érdekes, új arcukat mutatják a kutatóknak. Egy nagy visszhangot

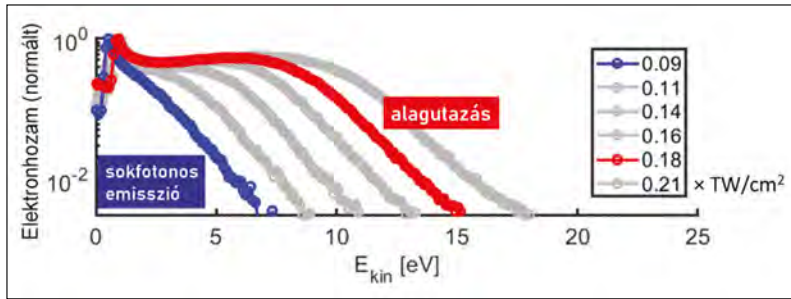
kiváltó publikációban például elsőként mutattuk meg a nanorészecskékről történő erőstér-fotoelektronemissziót [1]. A kísérletet a Wigner Fizikai Kutatóközpontban megépített első hazai hosszú rezonátoros femtoszekundumos lézertérrel végeztük el, a 3. ábra ennek a lézertérnek a 2010 körüli állapotát mutatja be az első ilyen kísérletek elvégzésének idejében.

Szintén fontos előrelépést tettünk 2017-ben, amikor fotoelektron-spektrumok elemzésével elsőként demonstráltunk nem destruktív mérési módszert plazmonikus nanorészecskék térnövekményének kísérleti úton történő meghatározására [2]. Időközben lehetőségünk nyílt elektronspektroszkópiai eszközeink továbbfejlesztésére is: az eredetileg használt ellentéres és repülési idő-spektrómétereink helyett a legújabb eredményeinket már jellemzően egy hemiszférikus elektronspektrométer használatával nyerjük (4. ábra). Ez a kutatási irány újabb budapesti felfedezéseket tett lehetővé az elmúlt években – például fotoelektronok nem adiabatikus alagutazásával kapcsolatban [3]. Szépen megmutatkozott a lézertér kettős, részecske-hullám természete az újrászóródó elektronok vizsgálatokor [4]. Az erőstér-nanooptikai folyamatok vizsgálata egy olyan új kutatási irányt alapozott meg a 2010-es években, amelyet 2020-ban egy kiemelkedően hivatkozott összefoglaló cikkben tekintettünk át [5].

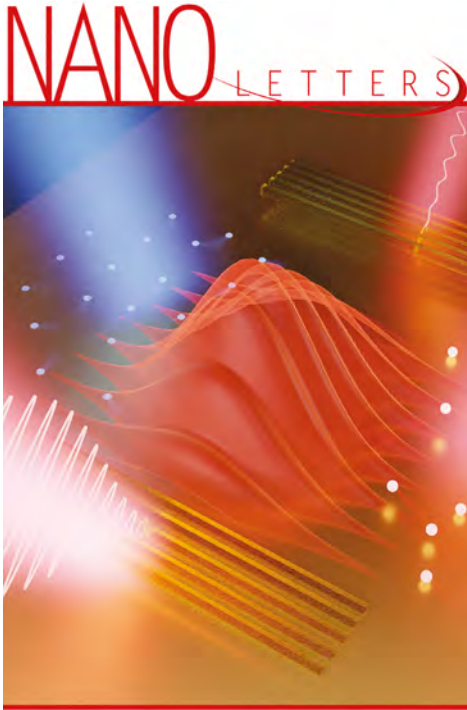
A legkorszerűbb femtoszekundumos lézerek azonban új kísérleti kutatási irányok nyitását is lehetővé tették, pl.



Dombi Péter, az MTA doktora, az MTA Lézerfizikai Bizottságának elnöke. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Lendület-csoportvezetője, a szegedi ELI-ALPS lézerközpont osztályvezetője. Kutatási területei a lézerfizika, a nanooptika és az ultragyors fényanyag kölcsönhatási folyamatok vizsgálata.



4. ábra. Tipikus fotoelektron-spektrumok alacsony lézerezési intenzitásoknál, ahol a sokfotonos emissziós mechanizmus dominál (kék görbe) és magasabb lézerezési intenzitásoknál, ahol az elektronok többsége alagutazással lép ki a felületről (vörös görbe)



5. ábra. A Wigner FK plazmonos pumpa-próba kísérletének illusztrációja a *Nano Letters* folyóiratban [7]

a forró elektronokkal kapcsolatban. A forró elektronok olyan elektronok, amelyek pl. fény hatására történő gerjesztés során rövid időre a Fermi-Dirac-eloszlástól eltérő eloszlást vesznek fel anélkül, hogy (a fotoelektronokkal ellentétben) kilépnének a fémből. Az ilyen elektronok jól használhatók pl. napelemek hatásfokának a növelésére vagy akár fotokatalitikus folyamatokban is.

Femtosekunderumos lézereinkkel és teljesen új, általunk kifejlesztett kísérleti elrendezésekkel sikerült a forró elektronok lokalizációjáról és azok dinamikájáról (5. ábra) is információt nyernünk [6, 7]. Ennek keretében egy hangolható lézerekkel külön tudtuk vizsgálni fémekben a sávon belüli és a sáv-sáv átmenetek dinamikáját is. A pumpanyaláb hullámhossza vagy 480 nm volt (sáv-sáv átmeneteket keltve), vagy 800 nm (sávon belüli átmeneteket indukálva). Az elektrondinamikát mindkét esetben 800 nm-es próbanyalábbal szondáztuk, közel 40 fs-os időfelbontással. A kísérleti eredmények jól illeszkedtek

az elektrongáz háromhőmérséklet-mo-
delljén alapuló leíráshoz is, azonban még
fontosabb, hogy a fémfelületen végig-
haladó optikai hullámcsomagnak olyan
mély (40 %-os) modulációját észleltük,
amely egyértelműen egy ultragyors na-
nooptikai tranzisztor működését jelezte
ebben a kísérleti konfigurációban [7].

A Wigner Fizikai Kutatóközpontban
behatóan vizsgáltuk továbbá dielektri-
kumok tranziens fémesedését is [8, 9].
Kellően rövid lézerezési impulzus hatására
ugyanis tiszta dielektrikumközegekben

is tudunk áramot keltetni, melyet a nyaláb fókuszoltja
közeliében megfelelően elhelyezett elektródákkal mérni
is tudunk. Ez az áramkeltési mechanizmus mindössze tíz
éve ismert, és a kutatócsoportunk elsőként tudta ezt gya-
korlati célokra (pl. lézernyalábok 3D fázisszkenelésére)
használni [9].

Szót kell még ejteni a szegedi ELI lézereközpont új ku-
tatási irányiról is [10]. A nemrég beüzemelt NanoESCA
berendezéssel például kiválóan vizsgálható különböző
szilárdtestek sáv szerkezeti dinamikája – természetesen
szintén femtoszekunderumos gerjesztés hatására. A be-
rendezéshez a világ minden tájáról érkeznek kísérleti
felhasználók, és az első eredményeket egy érdekes két-
dimenziós anyagban (hexagonális bór-nitrid nanohálón) a
közelmúltban publikáltuk [10].

Ezekről a kutatásokról mindig friss áttekintést adunk
a www.femtolab.hu honlapon, így akik a természet leg-
gyorsabb folyamatai kapcsán kíváncsiak az újdonsá-
gokra, érdemes meglátogatniuk ezt a weblapot [11]. Az
oldalon több ismeretterjesztő előadás felvétele is megta-
lálható, átfogva a lézerezés, optikai, nanofotonikai, fény-
anyag kölcsönhatási témaköröket, így ezek az anyagok a
középszintű fizikaoktatásban is felhasználhatók. A kuta-
tócsoport tagjai pedig örömmel vállalkoznak gimnáziumi
és egyetemi bemutató előadások tartására is a modern
optika legkülönbözőbb témaköreiben.

Irodalom

1. P. Dombi, A. Hörl, P. Rácz, I. Marton, A. Trügler, J. R. Krenn, U. Hohenester (2013): *Nano Lett.*, 13, 674.
2. P. Rácz, Z. Pápa, I. Márton, J. Budai, P. Wrobel, T. Stefaniuk, C. Prietl, J. R. Krenn and P. Dombi (2017): *Nano Lett.*, 17, 1181.
3. B. Lovász, P. Sándor, G. Z. Kiss, B. Bánhegyi, P. Rácz, Z. Pápa, J. Budai, C. Prietl, J. Krenn, P. Dombi (2022): *Nano Lett.*, 22, 2303.
4. B. Bánhegyi, G. Zs. Kiss, Zs. Pápa, P. Sándor, L. Tóth, L. Péter, P. Rácz, P. Dombi (2024): *Phys. Rev. Lett.*, 133, 033801.
5. P. Dombi, Z. Pápa, J. Vogelsang, S. V. Yalunin, M. Sivis, G. Herink, S. Schäfer, P. Groß, C. Ropers, C. Lienau (2020): *Rev. Mod. Phys.*, 92, 025003.
6. J. Budai, Z. Pápa, P. Petrik, P. Dombi (2022): *Nature Comm.*, 13, 6695.
7. P. Sándor, B. Lovász, J. Budai, Z. Pápa, P. Dombi (2024): *Nano Lett.*, 26, 8024–8029.
8. V. Hanus, et al. (2021): *Optica*, 8, 570.
9. V. Hanus, et al. (2023): *Nature Comm.*, 14, 5068.
10. G. Halasi, et al. (2024): *npj 2D Mat. Appl.*, 8, 48.
11. www.femtolab.hu