

# LÉZERES KUTATÁSOK A BME TTK FIZIKAI INTÉZETÉBEN

Barócsi Attila<sup>1</sup>, Bokor Nándor<sup>2</sup>, Bordács Sándor<sup>2</sup>, Erdei Gábor<sup>1</sup>, Gádoros Patrik<sup>1</sup>, Holló Csaba<sup>1</sup>, Koppa Pál<sup>1</sup>, Kornis János<sup>2</sup>, Lenk Sándor<sup>1</sup>, Maák Pál<sup>1</sup>, Papp Zsolt<sup>2</sup>, Sarkadi Tamás<sup>1</sup>, Simon Ferenc<sup>2,\*</sup>

BME Fizikai Intézet, <sup>1</sup>Atomfizika Tanszék, <sup>2</sup>Fizika Tanszék, Budapest

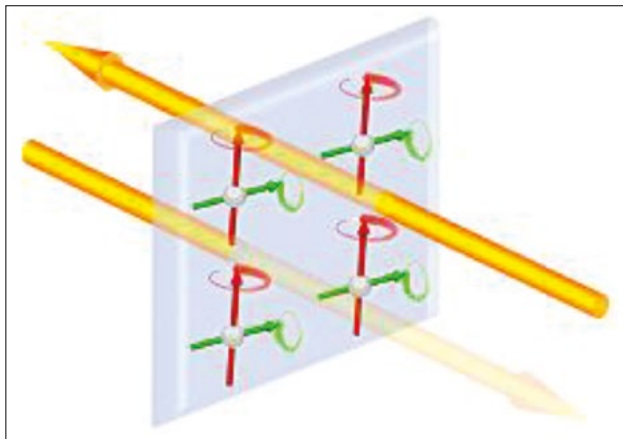
\*E-mail: simon.ferenc@ttk.bme.hu

## Bevezetés

A BME Fizikai Intézete évtizedek óta aktív kutatásokat végez a lézerek fejlesztése és alkalmazása területén. Az egyik fontosabb mérföldkőként ez a tudományos műhely volt Krausz Ferenc Nobel-díjas fizikus első munkahelye 1985-től, ahol megismerkedett a lézerek fejlesztésével Bakos József csoportjában az akkori Kísérleti Fizika Tanszéken – amely mára a Fizika Tanszékkel egybeolvadt. Az intézet jelenlegi három tanszéke közül kettő foglalkozik lézeres kutatással és fejlesztéssel.

## Magnetooptikai kutatócsoport

A *Bordács Sándor*, *Kézmárki István* és *Szaller Dávid* részvételével működő *Magnetooptikai Spektroszkópia Kutatócsoport* különleges mágneses anyagok vizsgálatát végzi ultragyors lézerek segítségével előállított THz-es sugárzás felhasználásával. A módszer lényege, hogy az



1. ábra. Az irányfüggő kettőtörés jelenségét szemléltető ábra. A két különböző irányban haladó fényre a transzmisszió nagysága eltérő, ezáltal optikai egyenirányítás hozható létre. *Forrás:* [1]

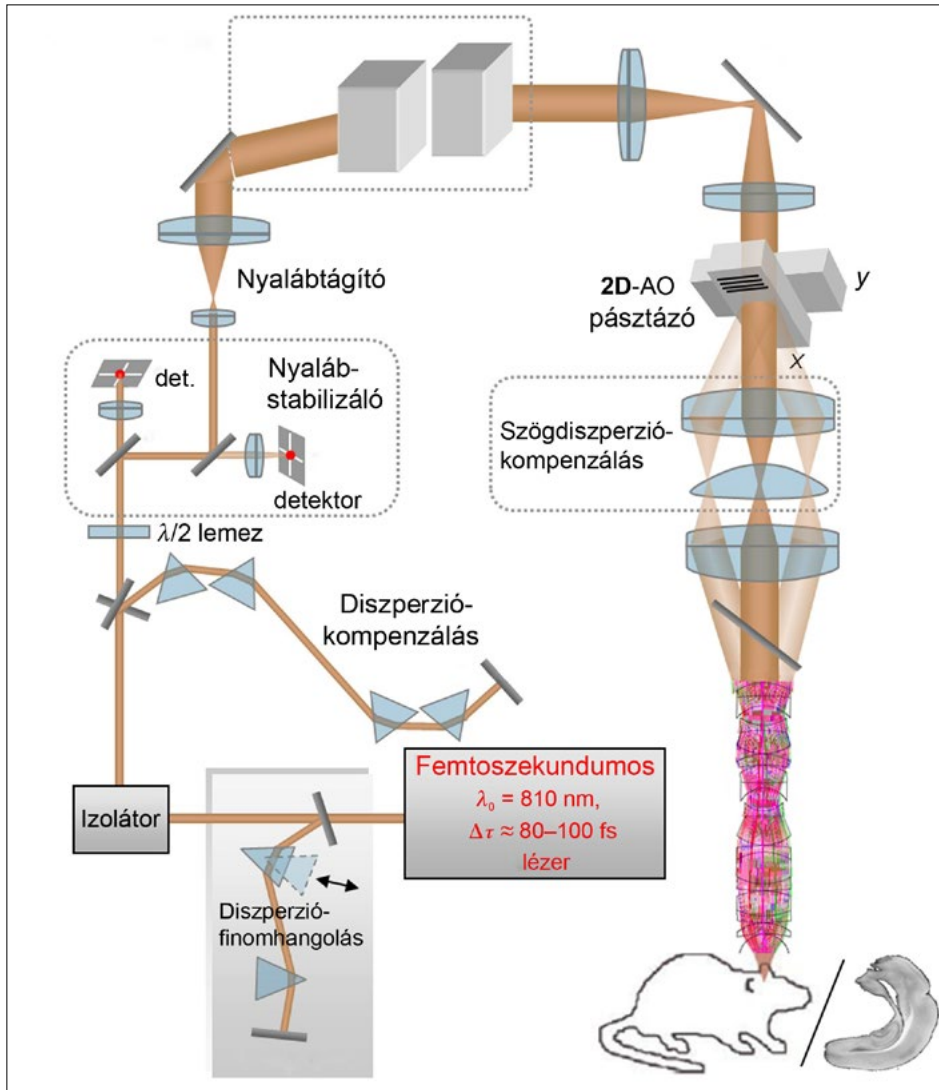
ultragyors, femtoszekundumos lézerimpulzusok egy félvezetőben töltéshordozókat keltenek, melyek a kibocsátó antenna két elektródájára kapcsolt feszültség terében gyorsulnak, és a 100 GHz – 7 THz tartományban elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Más intenzitás-mérésen alapuló spektroszkópai módszerekkel szemben a THz-es spektroszkópia előnye, hogy egy másik antenna segítségével közvetlenül a fény elektromos terének időbeli változását detektálja. A vizsgált anyagok köre kiterjed a multiferroikus kristályokra, a magneto-elektromos anyagokra és olyan különleges anyagokra, melyekben mágneses örvények (ún. skyrmionok) jelennek meg. A multiferroikus anyagokban a szokásos ferro-elektromos (ahol a mikroszkopikus elektromos dipólusmomentumok rendeződnek) és ferromágneses (ahol a mágneses dipólusmomentumok rendeződnek) jelenségek szimultán, és egymáshoz csatolódva jelennek meg. Ennek a magneto-elektromos csatolódásnak az egyik megnyilvánulása az ún. irányfüggő kettőtörés.

A hagyományos lineáris kettőtörésnél az anyag főirányában polarizált fény törésmutatója eltérő, míg ennél a jelenségnél a törésmutató (és az abszorpciók együttható) a fény terjedési irányának megfordítására változik meg [2]. Az irányfüggő kettőtörésnek a jövőbeni szilárdtest-alapú optoelektronikai eszközökben várható jelentős alkalmazása, ami a hagyományos elektronikai eszközöket forradalmasíthatja.

## Ultragyors lézeres kutatócsoport

*Maák Pál* és *Barócsi Attila* az ultragyors lézerek fejlesztésében és alkalmazásában aktív. A Femtonics Kft.-vel együttműködve ún. kétfotonos mikroszkópiát fejlesztettek idegtudományi kutatásokhoz. A kétfoton-mikroszkópia egy fejlett képalkotási technika, amely lehetővé teszi a biológiai szövetek mélyén történő nem invazív vizsgálatot. A módszer lényege, hogy a biológiai

*Barócsi Attila*, PhD, egyetemi docens, tanszékvezető-helyettes. Kutatási témái a kvantumoptika, a fluoreszcencia és alkalmazott optika. *Bokor Nándor*, PhD, egyetemi docens. Érdeklődési területei a holográfia, a kvantumoptikai és az optikai népszerűsítő oktatása. *Bordács Sándor*, PhD, egyetemi docens. A BME magneto-optikai csoportjának vezetője, érdeklődése az új anyagok nemlineáris optikai tulajdonságainak vizsgálata. *Erdei Gábor*, PhD, egyetemi docens. Kutatási témái a kvantumoptika, a fotonika, és az alkalmazott optika. *Gádoros Patrik*, tudományos segédmunkatárs. Kutatási témája a lézerindukált letörési spektroszkópia. *Holló Csaba*, PhD-hallgató. Disszertációjának témája az alkalmazott kvantumoptika és új eszközök fejlesztése. *Koppa Pál*, az MTA doktora, egyetemi tanár, tanszékvezető. Gábor Dénes-díjas, kutatási témái a kvantumoptika, a fotonika és az alkalmazott optika. *Kornis János*, PhD, egyetemi docens. Kutatási témái a holográfia, illetve a szálak és szabadterű kvantumkulcs-megosztásos optikai rendszerek fejlesztése. *Lenk Sándor*, PhD, egyetemi docens. Kutatási témája a biológiai és félvezető rendszerek fluorimetriája. Az ELFT Budó Ágoston-díjának 2020-as díjazottja. *Maák Pál*, PhD, egyetemi docens. Érdeklődési területe az ultragyors lézerek alkalmazása, a kétfoton mikroszkópia fejlesztése biológiai rendszerek vizsgálata számára. Az ELFT Budó Ágoston-díjának 2017-es díjazottja. *Papp Zsolt*, PhD, egyetemi adjunktus. Kutatási témái a holográfia, illetve a szálak és szabadterű kvantumkulcs-megosztásos optikai rendszerek fejlesztése. *Sarkadi Tamás*, PhD, egyetemi docens. Kutatási témái a kvantumoptika és az alkalmazott optika. *Simon Ferenc*, az MTA doktora, egyetemi tanár. Érdeklődési területe a kombinált optikai-mágneses rezonancia spektroszkópai módszerek fejlesztése.



2. ábra. Az akusztooptikai pásztázó kétfoton-mikroszkóp felépítése

szövetek a közeli infravörös tartományban átlátszóbbak, mint láthatóban. Ezáltal a közeli infravörös fotonok bejuthatnak például az agyfelület felszínébe (akár 1 mm mélységig); majd ott a nagy impulzusenergia miatt nemlineáris effektusok révén látható tartományban történik fénykibocsátás ún. kétfoton-abszorpciós fluoreszcencia révén. Ennek az eljárásnak számos előnye van az egyfoton-mikroszkópiával szemben, beleértve a mélyebb szövetpenetrációt és a csökkentett fotokárosodást, illetve a nagyobb optikai felbontást és kontrasztot, mivel a gerjesztés csak a fókuszpontban történik, így minimális a nem kívánatos fotokémiai hatás a minta többi részén.

Ez a technika különösen hasznos az élő szövetek, például agyszövetek *in vivo* vizsgálatában, ahol lehetőség nyílik a sejtek dinamikus folyamatainak nagy felbontású megfigyelésére anélkül, hogy károsítanánk az élő szervezetet. A kétfoton-mikroszkópia alkalmazása forradalmasította a neurobiológiai kutatásokat és más biológiai tudományágakat, mivel lehetővé teszi a sejtek és szubcelluláris struktúrák háromdimenziós képalkotását élő rendszerekben. A kétfoton-mikrosz-

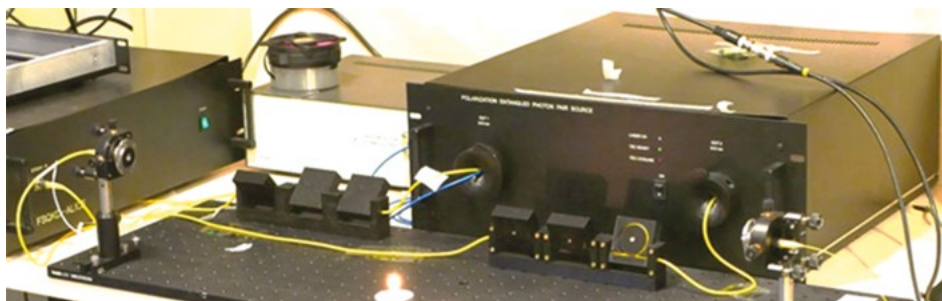
kóp egyik kritikus eleme a lézernyaláb igen gyors és torzításmentes pásztázását lehetővé tevő pásztázó (szkennelő) rendszer. Ezt lehetséges elvben optikai elemek mechanikai mozgásával is elérni, azonban a csoport ún. akusztooptikai pásztázót fejlesztett és szabadalmaztatott erre a célra [3]. Az akusztooptikai pásztázók lényege, hogy piezokristályok segítségével egy hanghullámot hoznak létre a kristályban, ahol a hanghullám csomópontjainak megfelelő periodikus törésmutató-eloszlás jön létre, és ez a fényt optikai rácsként elhajlítja, ezáltal a fény elektronikus úton történő pásztázása lehetővé válik.

## Kvantumoptika és fotonika kutatócsoport

Holló Csaba, Erdei Gábor, Barócsi Attila, Sarkadi Tamás és Koppa Pál részvételével kvantumoptikai kutató-

tások kezdődtek meg néhány éve a HunQuTech pályázat és a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium program keretében. Az optikai kvantuminformációs rendszerek alapvető eszközei a kvantum tartományban működő fényforrások és az egyfoton-detektálásra alkalmas eszközök. A kutatás célja a források és detektorrendszerek fejlesztése és alkalmazása a kvantumkommunikáció és -érzékelés területén. A csoport kifejlesztett egy moduláris, robusztus, hordozható, üvegszalba csatolt összefonódott fotonokat keltő fotonpárforrást, amely a szabadtéri kommunikációban használatos 810 nm-es hullámhosszon működik, és alkalmas kvantum titkosítási protokollok megvalósítására [4, 5]. A forrás jelenleg a BME VIK Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszékén üzemel egy szabadtéri kvantumkommunikációs kísérlet részeként. A csoport emellett aktívan részt vesz a regionális és európai szintű optikai szál kvantumhálózat kialakításában, többek között a telekommunikációs hullámhossz-tartományban működő fotonpárforrás fejlesztésével is.

A fejlesztéshez szükséges a források karakterizálása, melyhez a csoport sok esetben saját mérőberendezéseket



3. ábra. A csoport által fejlesztett polarizációban összefonódott fotonpárforrás működés közben a BME Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszékén

is készít. Az összefonódás tényének megállapításához, illetve mértékének jellemzéséhez polarizációsállapot-tomográfiát használnak. A hagyományos tomográfia alkalmazása mellett a csoportban egy saját fejlesztésű kétfotonos polarizációsállapot-tomográf is készül. A források fotonstatisztikájának vizsgálatához Hanbury-Brown-Twiss-féle (HBT) intenzitásinterferométert is építettek. A HBT-interferométer kulcsfontosságú eszköz a kvantumoptikában, amely a fényforrásból érkező foton-beütésszámok autokorrelációját méri, ezáltal képes annak megállapításra, hogy egy forrás valódi egyfotonforrásként viselkedik-e, illetve fotonpárforrások esetén tekinthető-e előrejelzett egyfotonforrásnak. A fényforrások spektrális tulajdonságainak vizsgálatához alacsony fotonszám mérésre alkalmas, az optikai szálak bemenet-

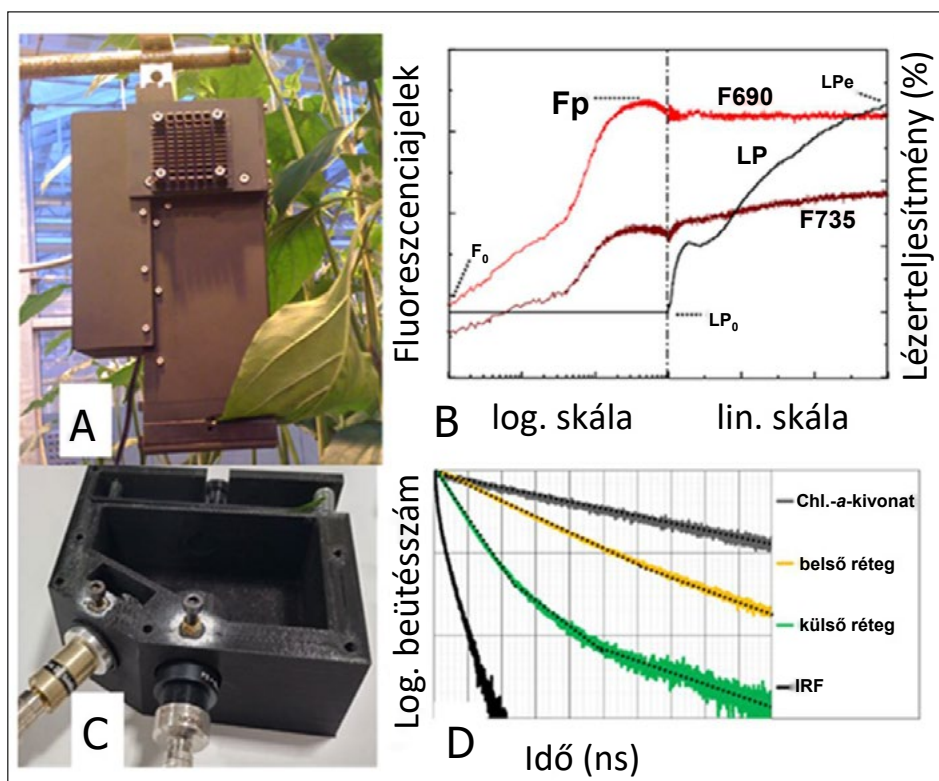
tel kompatibilis spektrométert is fejlesztenek.

## Fluorimetria kutatócsoport

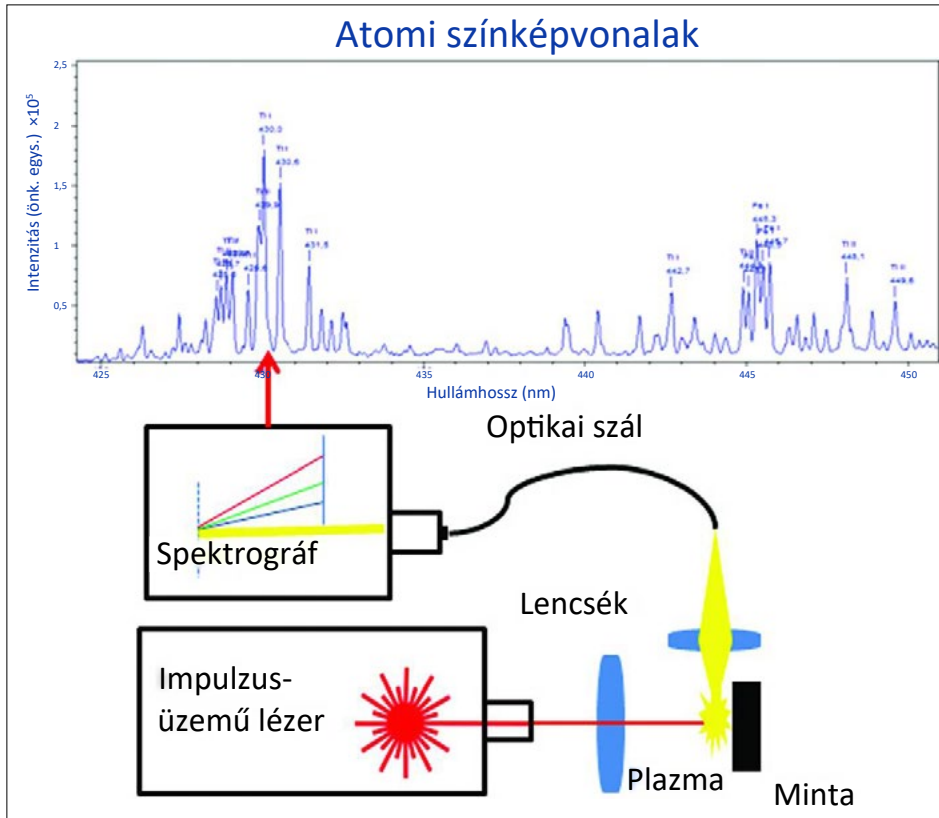
A BME Atomfizika Tanszékén évtizedek óta foglalkozunk növényi fluoreszcenciajel vizsgálatával, amely kutatásokat jelenleg *Barócsi Attila*, *Kocsányi László* és

*Lenk Sándor* vezetik. A módszer azon alapul, hogy a fotoszintézis során elnyelt fényenergia egy részét a klorofill-*a* molekulák fluoreszcens fény formájában visszasugározzák. A klorofilok fluoreszcensfény-kibocsátása így a fotoszintetikus működés egyik komplementer folyamata. Úgyesen megválasztott gerjesztési és detektálási eljárások segítségével a fluoreszcenciajelből a fotoszintetikus folyamatok hatásfokára adhatunk becslést.

Az első ilyen készülék kifejlesztését a Fekete-erdőben zajló erdőpusztulás okainak helyszíni kivizsgálása motiválta az 1990-es évek elején. A Karlsruhei Egyetem Botanika 2 Intézetével közösen egy 633 nm-es, 5 mW-os He-Ne lézerrel gerjesztő, optikai szűrőkkel bontó, valamint Si detektorok segítségével detektáló mérőberendezést alkottunk. Később a hordozható eszköze-



4. ábra. (A) Saját fejlesztésű üvegházi, szenzorszerű mérőműszer. (B) Példa egy speciális, a fluoreszcenciajelre visszacsatolt mérési eljárásra. (C) Növényi minták mérésére megvalósított mérőfej a fluoreszcencia-élettartam mérő berendezésben. (D) Kelkáposztalevelek fluoreszcenciaélettartam-mérési eredményei, összevetve a készülék-válaszidővel (IRF) és egy acetonnal oldott klorofillkivonattal



5. ábra. A LIBS-vizsgálat elvi elrendezése és az általa szolgáltatott spektrum

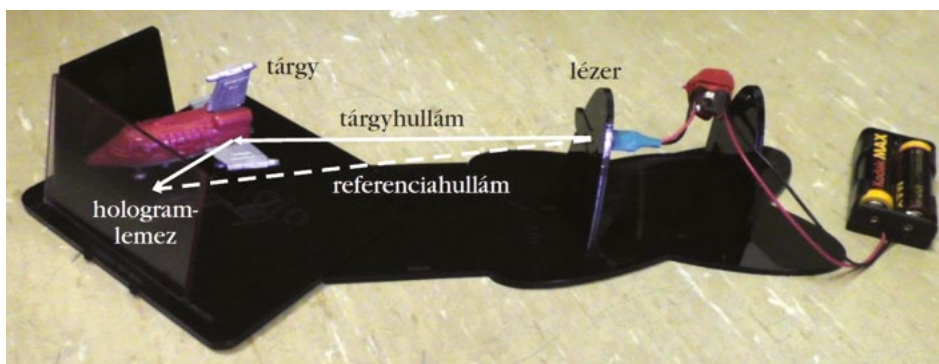
inket miniaturizáltuk (pl. lézerdiodák, optikai szálak és beágyazott számítógép alkalmazásával): a felgyorsított és intelligens kommunikációval ellátott megoldásokkal terepen hordozható vagy üvegházakban autonóm módon működő készülékeket hoztunk létre. A mérési módszertanban egyre összetettebb megvilágítási és detektálási megoldásokat használunk, és a fotoszintetikus működésre a különböző intenzitású gerjesztésekre adott fluoreszcencia-válaszjel időbeli változásának időfelbontásából következtetünk [6, 7]. A megvalósított készülékek robusztusságát igazolja, hogy szerte a világban több helyszínen bevetettük őket: legutóbb 2023 nyarán Brazíliában egy eukaliptusz-ültetvény monitorozására használtuk.

Az utóbbi években az érdeklődésünk a fluoreszcencia-élettartamok (azaz a gerjesztett állapotból az

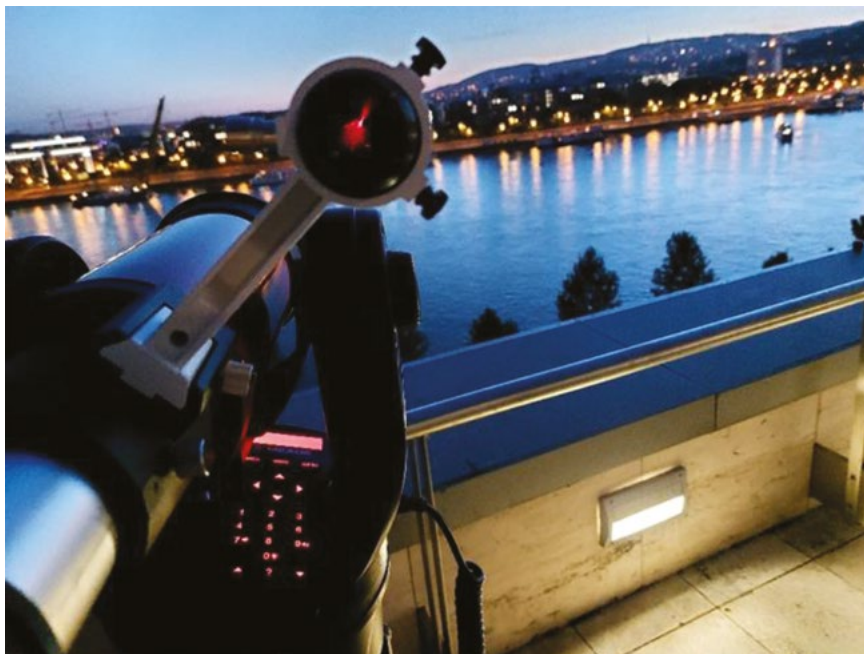
sára is alkalmazni kezdtük. Ezen kutatásainkhoz több, egyedileg optimalizált mérőfejet fejlesztettünk ki.

## LIBS-kutatócsoport

A lézerindukált letörési spektroszkópia (laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) egy népszerű és sokat kutatott anyagvizsgálati módszer, mely vizsgálatok a BME Atomfizika Tanszékén *Gádos Patrik* és *Kocsányi László* vezetésével zajlanak. A LIBS-vizsgálatoknál egy nagy energiájú, rövid (ns, vagy rövidebb) lézerimpulzust sugároznak a minta anyagára, ami általában részben elpárolog, majd plazmává alakul [9]. Ezen plazma az ultrarövid, a látható és az infravörös tartományokban jól érzékelhetően sugároz, és ez a szélessávú színeképvizsgálat a spektroszkópia hagyományos elvén működő, de annak modern eszközeivel, pl. képerősített kamerával (intensified charge-coupled device, ICCD) ellátott Echelle-spektrográffal detektálható. Az emissziós színeképből megállapítható a plazma elemi összetétele, a plazma hőmérséklete és sűrűsége. Keskenyebb



6. ábra. Transzmissziós hologram felvételéhez készült elrendezés. Átvéve: [12]



7. ábra. Szabadtéri (free-space) jelátviteli kísérlet a Duna két partja között. (Közös optikai tengely beállítás: az adóoldali keresőtávcsőben látszik a vevőoldali távcső optikájáról visszavert jelölő lézert fénye)

spektrális tartományok analizésére alkalmasak a modern, száloptikás spektrométerek is.

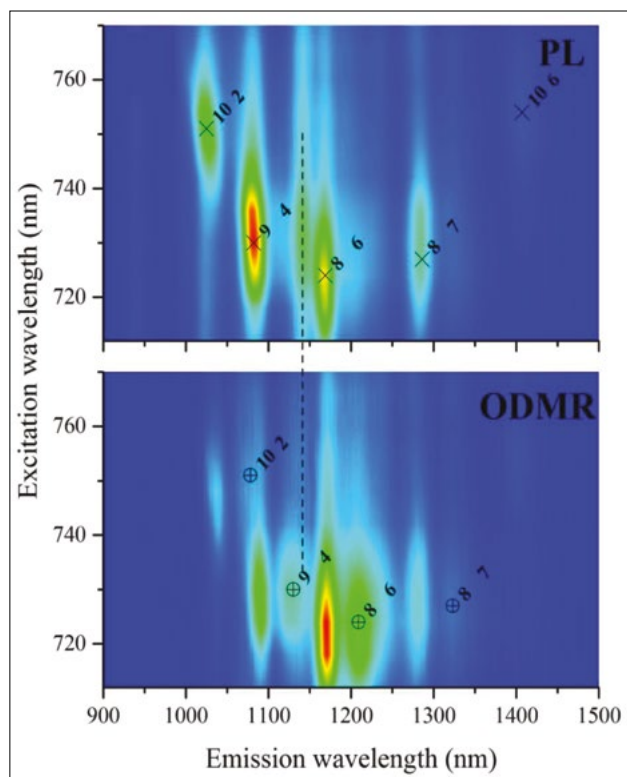
A LIBS technika számtalan gyakorlati előnnyel rendelkezik. Ezek közül kiemelendő a gyorsasága – a vizs-

gálat után gyakorlatilag azonnal eredményt ad –, valamint rugalmassága és könnyű alkalmazhatósága – nem igényel különösebb mintaelőkészítést, sem jól szabályozott, laboratóriumi körülményeket, és bármilyen elemet képes kimutatni. A szükséges berendezések viszonylag egyszerűen kezelhetők és kedvező áron beszerezhetők. A gyorsaság és technikai egyszerűség vonzóvá teszik ipari és in situ terepi alkalmazások számára is. További előny, hogy a LIBS-vizsgálat jól kombinálható más lézeres technikákkal, kiemelten a lézeres tisztítással, az anyagmegmunkálással és a Raman-spektroszkópiával.

## Holográfia és kvantumkulcsmegosztás

Bokor Nándor, Kornis János és Papp Zsolt a holográfia alkalmazási lehetőségeit vizsgálja, többek között anyagok és szerkezetek deformációinak és hibáinak kimutatására. A hagyományosan fotolemezre rögzített holográfia mellett a csoport az ún. digitális holográfia alkalmazásait és fejlesztését is vizsgálja. A csoport a holográfia tudománynépszerűsítő jelleggel történő bemutatásában is igen aktív, szerepet vállaltak többek között a BME-n 2021-ben megrendezett Gábor Dénes Nap lebonyolításában, ami Gábor Dénes Nobel-díjának 50. évfordulóját ünnepelte meg, és ahol az érdeklődő látogatók saját hologramot készíthettek. A munka egyik fő eleme, hogy a diákokhoz hogyan lehet a hologramkészítést közel hozni, egyben olcsó és könnyen kezelhető diódlézereket alkalmazni erre a célra – szemben a hagyományos nagy koherenciahosszúságú gázlézerek alkalmazásával.

A csoport szerepet vállal az ún. kvantumkulcsmegosztáshoz szükséges optikai szálak és szabadterű optikai



8. ábra. Fotolumineszcencia (PL) és optikailag detektált mágneses rezonancia (ODMR) alapján felvett térképek egyfalu szén nanocsöveken. Ezek a gerjesztési hullámhossz hangolható lézeres állításával és a kibocsátott fény analizálásával készülnek. Forrás: [11]

megoldások tervezésében és kivitelezésében a BME Vilamosmérnöki és Informatikai Karával közösen a Kvantuminformatika Nemzeti Labor keretében [10]. A kvantumkulcsmegosztás (quantum key distribution, QKD) egy biztonsági technológia, amely kvantummechanikai elveket használ a titkos kulcsok biztonságos megosztására két fél között. A QKD legfontosabb jellemzője, hogy a kvantummechanika törvényei alapján bármilyen lehallgatási kísérletet észlelni lehet, így garantálva a kulcsok biztonságát. A QKD során kvantumállapotok – általában fotonok – használatosak az információ kódolására. Ezek a kvantumbitek vagy qubitek lehetnek különböző polarizációjú fotonok. Az egyik legalapvetőbb, az ún. BB84 protokoll négy különböző polarizációt használ a qubitek kódolására, és a kvantumállapotok véletlenszerű elosztásával biztosítja a kulcsok biztonságát. Az adó és a vevő a kulcs generálása során különböző polarizációkat használnak, majd nyilvánosan összehasonlítják a mérési bázisokat anélkül, hogy felfednék a tényleges mérési eredményeket. A módszer egyik fontos eleme az ún. kvantumcsatorna, ahol is a lehető legkisebb veszteséggel (lényegében veszteség nélkül) kell az optikai fotonokat továbbítani, és ezek kvantumállapotát detektálni. Ez a csatorna lehet optikai szál vagy szabadterű optika.

## Mágnesesrezonancia- és spintronikai kutatócsoport

Az új, nanoszerkezetű anyagok és a fény egyedi kölcsönhatását vizsgálja a *Simon Ferenc* vezette kutatócsoport. A szilárdtestbeli ponthibák (mint pl. a nitrogén-vakancia centrum a gyémántban) egyedi molekuláris fotolumineszcencia-tulajdonságot mutatnak, míg az egyfalú szén nanocsövek, bár makromolekulák, mégis erősen lokalizált optikai gerjesztéseket, ún. excitonokat (egy elektron-lyuk pár erősen kötött állapota) mutatnak. Ezeknek a rendszereknek a megértése fontos a kvantuminformáció tárolása, valamint az anyagok optoelektronikai és fotovoltaiikus eszközökben való felhasználása szempontjából. Egy példát említve, egy eszközbe injektált elektron-lyuk pár csak akkor tud fény kibocsátásával rekombinálódni (azaz LED-ként működni) amennyiben a kialakuló kétrészecske-hullámfüggvény a szinglett állapotba kerül. Az egyfalú szén nanocsövekre jellemző, hogy az átmérőjük (pontosabban a szénatomok pontos geometriai elhelyezkedése) határozza meg a kvantumbezártság jelenségén keresztül az optikai átmeneteik energiájának pontos értékét. A kvázi-egydimenziós szerkezetük nagyon éles, molekulaszerű optikai átmeneteket eredményez. Ennek az a következménye, hogy a szén nanocsövek fotolumineszcencia tulajdonságainak vizsgálatához hullámhossz-szelektív besugárzás és a kibocsátott fény hasonlóan hullámhossz-felbontott vizsgálata szükséges. Ezt hagyományosan optikai ráccsal monokromatizált hőmérsékleti sugárzós fényforrásokkal érik el, azonban a csoport egy egyedi lézrendszer fejlesztett, ami

különböző festékanyagokat használó festéklézerből és titán-zafír lézerből áll, ami lehetővé teszi az 550 nm – 800 nm-es tartomány lefedését. A rendszer segítségével fel tudták tárnai a szén nanocsövek triplétt optikai gerjesztéseinek energiaszerkezetét, és első ízben figyelték meg az ezen állapotokból származó fluoreszcencia kibocsátást [11].

## Köszönetnyilvánítás

A BME Fizikai Intézetének munkatársai köszönetet mondanak a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a TKP2021-EGA-02, és TKP2021-NVA-02 projektek, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztériumnak a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium projekt (2022-2.1.1-NL-2022-00004) keretében nyújtott támogatásért.

## Irodalom

1. Kézsmárki I., Nagel U., Bordács S., Fishman R. S., Lee J. H., Hee, Taek Yi, Cheong S-W., Rödöm T.: Optical diode effect at spin-wave excitations of the room-temperature multiferroic BiFeO<sub>3</sub>. *Physical Review Letters* 115:12 (2015) Paper: 127203
2. Bordács S., Kézsmárki I., Szaller D., Demkó L., Kida N., Murakawa H., Onose Y., Shimano R., Rödöm T., Nagel U., Miyahara S., Furukawa N., Tokura Y.: *Nat. Phys.* 8 (2012) 734.
3. Maák P., Barócsi A., Fehér A., Veress M., Mihajlik G., Rózsa B., Koppa P.: Acousto-optic deflector configurations optimized for multiphoton scanning microscopy. *Optics Communications* 530 (2023) Paper: 129213.
4. Holló Cs. T., Sarkadi T., Galambos M., Bíró D., Barócsi A., Koppa P., Erdei G.: Compact, single-mode fiber-coupled, correlated photon pair source based on type-I beta-barium borate crystal. *Optical Engineering* 61:2 (2022) Paper: 025101.
5. Holló Cs. T., Sarkadi T., Galambos M., Barócsi A., Koppa P., Hanyecz V., Erdei G.: Conversion of transverse momentum correlation of photon pairs into polarization entanglement by using wavefront-splitting interference. *Physical Review A* 106 (2022) Paper: 063710.
6. Barócsi A., Lenk S., Kocsányi L., Buschmann C.: Excitation kinetics during induction of chlorophyll a fluorescence. *Photosynthetic* 47:1 (2009) 104–111.
7. Lenk S., Dieleman J. A., Lefebvre V., Heuvelink E., Magan J. J., Palloix A., Van Eeuwijk F. A., Barocsi A.: Phenotyping with fast fluorescence sensors approximates yield component measurements in pepper (*Capsicum annum* L.). *Photosynthetic* 58:SI (2020) 622–637.
8. Illés L., Sági-Kazár M., Steinbach F., Hembrom R., Mihailova G., Georgieva K., Solymosi K., Barócsi A., Solti Á., Lenk S.: Fluorescence lifetime of plant leaves with sub-nanosecond resolution. *Measurement Science & Technology* 35:8 (2024) Paper: 085206.
9. Gáboros P., Vácsi T., Himics L., Holomb R., Bolla R., Veres M., Kocsányi L.: Comparative analysis of lithiated silica glasses by laser-induced breakdown spectroscopy and Raman spectroscopy. *Journal Non-Crystalline Solids*, 553:1 (2021) Paper: 120472.
10. Galambos M., Czermann M., Jánosi G., Kornis J., Papp Zs., Koller I., Holló Cs., Sarkadi T., Erdei G., Barócsi A., Kis Zs., Koppa P., Imre S., Bacsárdi L.: Report on the first Hungarian short range free space QKD link. In: *Proceedings of the 74th International Astronautical Congress (IAC 2023)*, International Astronautical Federation (IAF) (2023) Paper: IAC-23,B2,8-GTS.3,5,x76996
11. Palotas J., Negyedi M., Kollarics S., Bojtor A., Rohringer P., Pichler Th., Simon F.: Incidence of quantum confinement on dark triplet excitons in carbon nanotubes. *ACS Nano* 14 (2020) 11254.
12. Gombkötő B., Bokor N.: Holográfia a tanteremben. *Fizikai Szemle* 2018/2, 56.