

MITŐL LÉZER A LÉZER?

Horváth Zoltán György

a fizikai tudomány kandidátusa,
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet
horvath.zoltan@mta.wigner.hu

A fény elektromágneses hullám. Az átlagembernek az elektromosságról a megdörzsölt ebonitrúd szikrái meg a villanyáram, a mágnességről az iránytű és a piros-kék rudacskák, a hullámról pedig kellemes nyári vagy wellness-émlékek, esetleg a szinuszfüggvényhez kapcsolható kellemetlen benyomások jutnak eszébe. Az elektromosság, mágnesség és még hullám is együtt, egyetlen mondatban, már kicsit soknak tűnik. Nagyon meglepő, hogy egy elektromos töltéspár (dipólus), aminek az elektromos hatása már kis távolságokon is alig érzékelhető, egy parányi periodikus mozgásra valami olyant (például fényt) bocsát ki, valami olyan „szakad le” róla, ami hihetetlen sebességgel száguldhat a végtelenbe. Vigasztalásul egy idézetet tudok ajánlani *Richard P. Feynman Mai fizika* című könyvéből: „Az igazi (elektromágneses) hullámokat valójában nem tudom jól megközelíteni képszerű ábrázolással, így Önök se nyugtalankodjanak tehát, ha nem boldogulnak egykönnyen a képalkotással – mások is ugyanilyen nehézségekkel küzdenek” (Feynman, 1971). Hihetünk neki, hisz ezzel a szerény képzelőerővel is kaphatott fizikai Nobel-díjat. Szinte biztos, hogy a modern fizika által tanulmányozott világ (főleg a mikrovilág és a sugárzások világa) nem olyan, mint a ... (itt a három ponttal a mindig sántító hasonlatokra utalok). Ezt

a világot nehéz elképzelni, majdnem lehetetlen „érteni”. Elég, ha „csak” szorgos kutatómunkával megismerjük tulajdonságait, megtudjuk, hogy „milyen”, hogyan viselkedik, s ezt a tudást használva építettük/építjük fel az aktuális századok technikáját. Ez történt a fényvel, a lézerekkel is.

(Mindenkítő előre elnézést kérve, félve írom le: az idegen szavakat, a nyelvtani szabályokat, a történelmi dátumokat, a neveket, a KRESZ-t és a jogszabályokat szinte soha nem kell „érteni”. Elég tudni és – lehetőleg – sikeresen használni. Miért pont a szigorú alapokra logikusan építkező matematika, fizika és kémia lenne az a kivétel, amit még érteni is kell? Nem lehetne először ezeknek a mindennapi élethez szükséges törvényeit is „csak” megtanulni és használni, legalább alapfokon? Az értés és az azzal járó kivételesen jó érzés legtöbbször csak a szakmájukat imádó profik kiváltsága.)

A fényt ünnepeljük 2015-ben, a fény nemzetközi évében. Az ünnepelt egy speciális változata a lézerfény, s az ezt keltő fényforrások, a lézerek. Lényegében a semmiből születtek, a kutatói elmék zsenialitásának és kitartó szorgalmának eredményei. Viszonylag rövid idő alatt az alig érthető tudományos furcsaságból olyan hétköznapi használati eszközöké váltak, amelyek nélkül ma nem olyan

lenne a minket körülvevő világ, amilyenek napjainkban tapasztalhatjuk.

Mitől lézer a lézer? Majd' ötven évvel ezelőtt, amikor a lézerekkel foglalkozni kezdtem, még határozottan tudtam a választ. Mára elbizonytalanodtam. Nagyon. Emiatt a cikk pontosabb címe, és tartalma inkább az lehetne, hogy a lézerek 1960-as megalkotása után több mint egy fél évszázaddal – ami alatt rengeteget fejlődött a lézerfizika és -technika – miért nem tudjuk már pontosan definiálni, hogy mitől is lézer a lézer?

Érdekelhet-e valakit egy ilyen kérdés 2015-ben? Remélem, hogy igen, hiszen lézeres előadások sokaságát találjuk az ünnepi programokban, s az általános iskoláktól az egyetemekig tanárok százai oktatják a lézerfizika alapjait. Nagyon hasznos lenne, ha az általános érdeklődőkön túlmenően legalább azok, akik a lézer témájában megszólalnak – szakítva az 1963 előttről(!) származó, változatlan formában másolt tankönyvek mára teljesen elavult tematikájával – definiálni tudnák előadásuk tárgyát. Átéreznék, hogy a ma lézerei nem feltétlenül csak olyanok lehetnek, mint az ötven évvel ezelőttiek.

A hatvanas években a hivatalos meghatározás kb. így szólt: a lézer monokromatikus (egyszínű), koherens (igazi szinuszhullám tulajdonságú, azaz interferenciára képes), kis divergenciájú (közel párhuzamos, nyalábszerű) fényt kibocsátó forrás.¹ A 2015-ös Google-keresés eredményei és a *Wikipedia*-beli meghatározások is hasonlóak. Kár, hogy ez már a lézerek születésekor, 1960-ban sem volt teljesen igaz. A fenti meghatározásból a legfontosabb: a lézer fényforrás (kéretik megjegyezni)!

Fény jön ki belőle, tehát kevés olyan trükköt tud, amit egy jó zseblámpával, a Nap vagy egy lecsapó villám fényével ne lehetne megcsinálni. Nem megy át a falon (csak ha átégeti), nem áll meg a levegőben (csak néha úgy látszik), nem kanyarodik be a sarkon (csak ha nagyon bonyolult anyagból van a sarok) stb. Mégis sokkal többre képesek a lézerek, mint természetes fényforrásaink, legalábbis sok mindent egyszerűbb velük megcsinálni, mint azokkal, amiket a természet vagy a lézerek előtti emberiség megalkotott.

Milyenek a „nemlézerek”?

Színesek (nem monokromatikusak, emiatt nem is lehetnek koherensek), és szinte minden irányban sugárzó (nem nyalábszerűen emittáló) fényforrások, azaz a hatvanas évek definíciója alapján: nagyon „nemlézerek”. Ilyen a természet. Illetlenség a poént már egy cikk elején lelőni, de: mai korszerű csúcslézereink nem kis része szintén „színes”, vagyis széles spektrumban, szinte nagyon is „fehéren” sugároz, és nem feltétlenül csak nyalábszerű fényt emittál! Ennek ismeretében talán még érdekesebb lehet a címben felvetett kérdés.

A természetes fényt, a napfényt, esetleg gyertyafényt többé-kevésbé bonyolultan utánozni próbáló mesterséges fényforrásainkban valamilyen módon (melegítés, kémiai trükkök, gázkisülés stb.) gerjesztett állapotba juttatott egyedi atomok, molekulák – kis túlzással – kényük-kedvük szerinti időpillanatokban össze-vissza irányokban bocsátanak ki különböző frekvenciákkal rezgő valamit. Az egyszerűség kedvéért, és hogy tudjuk, miről beszélünk, a dolgokat valamilyen névvel szoktuk ellátni. Esetünkben ezt a „valamit” elektromágneses hullámnak nevezzük. (Elnevezés, nem magyarázat, lásd: alma, Nap, víz stb.)

¹ Az angol laser betűszó feloldása: light amplification with stimulated emission of radiation (fényerősítés sugárzás stimulált kibocsátásával).

Az iskolában, ahogy az optika terítékre kerül, lerajzolunk egy (legfeljebb két) szép szinuszhullámot: ez a fény (is). A baj csak az, hogy az általunk látott fény-valóság nem egy-két, hanem rengeteg össze-vissza hullámból áll. Ez a kaotikus valami az, amit látunk, megszoktunk, szeretünk, természetesnek érzünk. Ha egyetlen, matematikailag korrekten leírható hullámot szeretnénk kiválasztani a természetes fényből, és arról minél többet megtudni, nagyon gyenge monokromatikus sugárzás marad. Olyan forrás kellene tehát, amelyik igazi szinuszosan rezgő fényt emittál, kizárólag azt, és ha lehet, nagyon sokat. Ez a cél már régen, a spektroszkópia (színképelemzés) kialakulásakor megfogalmazódott. Sok évtizednek kellett eltelnie, és sok Nobel-díjas ötletnek kellett egymásra épülnie, amíg először 1960-ban a lézerekkel sikerült ezt a rég vágyott célt egészen jól megközelíteni. (A lézerek rövid története például Horváth Zoltán György 2010-es cikkében olvasható.)

Hogyan csináljunk (tudományosan) „szép” fényt?

A szinuszos oszcilláció létrehozásának szokásos módja egy „visszacsatolt erősítő” készítése. Szinte mindenki emlékszik rá, mi történik, ha egy ünnepségen a hangszóró zaja kissé túlzottan magasra csavart hangerő esetén visszajut a mikrofonba. Fűlsiketítő sípolást hallunk. Éppen ez a keresett, szép szinuszos oszcillátor (rezgéseltető) hang, amit a hangmérnökök (be)gerjedésnek hívnak. Ötven év távlatából visszanezve, úgy tűnik, hogy a közismert, klasszikus lézerek fényfrekvencián működő oszcillátorok.

Mi is kell a szép szinuszhoz?

Az előbb leírtakhoz hasonlóan: egy fényerősítő és annak végéről a kijövő, kissé erősített

fényt sokszor, újra és újra vissza kell vezetni az erősítőbe, hogy tovább erősödjön. Ha mindent jól csinálunk, a rendszer „begerjed”, s működni kezd a fényoszillátor. A klasszikus lézerek története és fejlődése arról szól, hogy hogyan is kell ezt a folyamatot megvalósítani és szüntelenül tökéletesíteni.

Az alapprobléma „csak” az, hogy fényerősítő nem létezik! Pontosabban: termikus egyensúlyban lévő anyagokban – természetes környezetünkben lényegében semmiben – fényerősítést nem lehet létrehozni. Megszokott világunkban a fény mindig csökken, ha áthalad valamin. A levegőben, az ablaküvegen vagy egy fényvezetőben kevésbé gyengül, a falon pedig már semmi nem megy át. Mindig csökken. Fényerősítés nincs! Ez a hétköznapi tapasztalat. A jelenségnek mély fizikai okai vannak, s magyarázata valahol ott keresendő, hogy az anyagok természetesen töreksenek arra, hogy minél alacsonyabb energiaállapotba kerüljenek (például a Földön általában lefelé esik minden, nem felfelé). Ezen az apróságon kellett változtatni.

Fényerősítés eléréséhez a fénykeltéssel kapcsolatos fizika szinte minden addig ismert trükkjét bevetették, hogy sikerüljön a gyakorlatban is megvalósítani a kívánt természetellenes – populációinverzióknak (a természetes energiaállapot fordítottjának, néha negatív hőmérsékletűnek) nevezett – állapotot. Évekig tartó nagyon gondos válogatás után, igen extrém feltételek mellett, néhány speciális anyag fényemisszióra képes komponensén már lehetett fényerősítést detektálni. (Itt és a továbbiakban kissé szabadon értelmezzük az „fény” fogalmát, beleértve az infravörös és ibolyántúli elektromágneses tartományt is.) Sajnos a mért erősítés nagyon kicsi, a kimutathatóság alsó határán mozgó mértékű volt.

A fényerősítők „tudták a fizikát,” és ún. *indukált emisszióval* (részletek pl. Csillag – Kroó, 1987) olyan erősített fényt hoztak létre, amely fázisban (rezgési állapotban) és irányban is csatlakozott a környezet elektromágneses teréhez, azaz a sok független forrás fénye valóban egységes szinuszhullámmá, koherens (szépen együtt rezgő) fénytérré állt össze.

Az indukált emisszió a fényfizika egyik csodája. Eredetileg egy apró korrekció volt az egyenletekben, amelyet Einsteinnek be kellett illesztenie, látszólag csak azért, hogy a matematikai leírás tökéletesen egyezzen a precízen kimért valósággal. Ez a korábban szinte megfigyelhetetlen járulékként lett a lézerfizika kiindulópontja. Olyan jelenséget kell elképzelni, ahogyan egy színházi előadás végén a kezdeti kaotikus tapsból (spontán emisszió) lassan kialakul a tökéletesen szinkronizált (indukált emissziós) vastaps. A fényt (tapsot) emittáló független egyedek (emberek) szívesen csatlakoznak a többiek ritmusához, ha azt érzékelik (hallják). A színházban a hallott hang szinkronizálja az egyedek kezét, lézereknél a többi emittáló forrás fénytere készíti az egyedeket a hasonló ritmusú (koherens) fényemisszióra.

Emlékeztetek az előző bekezdésre: egy kis korrekcióról van szó, amely rádióhullámoknál még akár jelentős értékű is lehet, de valószínűsége a fény esetén (a hullámhossz függvényében nagyon erősen csökken) reménytelenül kicsinek tűnt, bár *Rudolf Ladenburg* már 1928-ban látni vélte indukált emissziót. Szinte senki nem bízott benne, hogy a fényerősítés „használható mértékű” is lehet.

Jánosy Lajos akadémikus, a KFKI korábbi – az első hazai lézerek megépítéséről döntő, és azokat pályázatok nélkül három hónap alatt(!) megépíttető – igazgatója rezignáltan „büszkélkedett” azzal, hogy csak ő maga leg-

alább tíz-tizenöt évvel vetette vissza a lézerek felfedezését. Még Angliában dolgozott, amikor egy kollégája előállt az ötlettel, hogy valami nagyon furcsa készüléket lehetne építeni az akkoriban éledező fényerősítőkre alapozva. (Az 1940-es évek legvégén vagyunk, amikor *Valentin Fabrikant* javaslata, *Willis Lamb* és *Robert Retherford* fényerősítés-mérései már ismertek voltak). Jánosy az akkor rendelkezésre álló adatokból rövid számolás után kimutatta, hogy legalább 30 km(!) hosszú egyenes gázkiszülési csövet kellene építeni ahhoz, hogy jól detektálható koherens fény jelenjen meg a cső végén. Ez gyakorlatilag kivitelezhetetlen. Lebeszélte kollégáját a folytatásról. Joggal. Valószínűleg sok más professzor is így vélekedett szerzte a világon. Fényerősítők tehát már 1960 előtt is voltak, de egy apró ötlet még hiányzott!

A (nyugati) tudománytörténet a lézerek szempontjából legfontosabb lépésnek *Arthur Schawlow* és *Charles Townes* 1958-as cikkének megjelenését tartja. A Nobel-díj-bizottság körültekintőbb volt, s később nyomatékka vette figyelembe *Nyikolaj Baszov* és *Alekszandr Prohorov* szinte teljesen hasonló következtetéseket felmutató, ugyanakkor publikált mikrohullámú és „optikai mézeres” eredményeit. Ekkor jelentek meg először a ma lézerezonátoroknak nevezett megoldások. (Pontosabban a nyitott rezonátorok. Zárt rezonátorokat a rádiótechnikában mikrohullámok keltésére, például a mézerekben már régóta használtak, de ezek a sokkal rövidebb hullámhosszú fény esetén – akkor még(!) – használhatatlanoknak tűntek.)

Emlékezzünk: fény frekvenciáján működő rezgéskeltőt úgy kell csinálni, hogy a fényerősítőből kilépő fényt visszavezetjük újra és újra az erősítőbe. A célszerűen hosszúkás fényerősítő két végére teszünk két tükröt, és

kész! Ma már hihetetlenül egyszerűnek tűnik ez a több Nobel-díjat érő ötlet. A fényerősítőt két tükör (rezonátor) közé kell tenni. Nagyjából így kellett az 1960-as évek elején lézereket készíteni.

Természetesen ha a két tükör mindent visszaver, akkor csak remélhetjük, hogy a rezonátoron belül működik a folyamat. Ha látni, használni is szeretnénk ezt a különleges fényt, praktikus, ha legalább az egyik tükröt nem 100%-osra készítjük (vagy más trükkökkel lopjuk ki a belső sugárzást). Emlékezzünk csak: a Jánossy-féle erősítő 30 km hosszú lett volna. Ha a két tükör közé egy 1 m hosszú fényerősítőt teszünk, és 30 000-szer oda-viszsa veretjük a fényt, máris megvan a kívánt hosszúság. A két tükör megsokszorozza a fényutat, más szavakkal: emberi méretű (példánkban: méteres) dobozkába csomagoltuk a 30 km-t. Ez már akkora méret, amekkora jól használható eszközök, lézerek megépítéséhez vezetett. A csoda megtörtént, 1960-ban „megszületett” a lézer.

Milyen lett az első működő lézerek (optikai frekvencián működő oszcillátorok) fénye?

A sok érdekes tulajdonságból itt most csak két közismert elemet emelek ki:

A lézer fénye monokromatikus, azaz egyszínű. Természetes, hiszen örültünk, hogy a fényerősítéshez szükséges bonyolult folyamatot egy-egy anyag egyetlen átmenetén (hullámhosszán) létre tudtuk hozni. Más színhez más emissziós vonal, sőt sokszor más anyag is kellett. Először szinte minden színhez egy-két konkrét lézernév tartozott (piros = He-Ne, rubin; zöld, esetleg kék = argon-ion stb., pedig már akkor sem csak ezek léteztek).

A lézerfény nyalábszerű, vonalszerű, azaz közel párhuzamos „sugárban” terjed. Természetes, hiszen a praktikus okokból (hogy minél

hosszabb legyen) vonalszerűre, csőszerűre készített fényerősítőt két, egymásra merőlegesre állított tükör közé tettük. Csak az a fény tud sokszorosan erősödni, ami éppen a két tükröre merőleges irányban indult el, a többi elveszik. Két párhuzamos tükröre pedig csak egy azokat összekötő vonal, egy nyaláb lehet merőleges. A kilépő lézerfény tehát a tükrök miatt automatikusan vált vonalszerűvé! A párhuzamos nyalábban terjedő fény viszont eredetileg nem célja volt a lézerfejlesztésnek, hanem „csak” egy célszerű kompromisszum eredménye. Örültünk, hogy legalább egyetlen vonal mentén sikerült a feladatot megoldani. (Emlékezzünk: természetes fényforrásaink általában pontforrások, azaz minden irányban, gömbszerűen sugároznak.)

Tényleg olyan fényről álmodtak a lézerfizika úttörői, amilyent 1960-ban létrehozhat? Ma már biztosan tudjuk, hogy csak részben. Remélték – és elérték – a szép szinuszhullámokat produkáló, viszonylag intenzív fényforrást, de az 1950-es évek közepéig csak a tudományos-fantasztikus irodalom szerzői reménykedtek a nyalábszerűségben, a „halálsugárban”. Sok korai lézeres „találmány”, sőt Schawlow és Townes 1958-as szabadalma is egyértelműen bizonyítja, hogy nem vártak intenzív fénynyalábot, sőt Thodore Harold Maiman híres első rubinlézérének leírásában (Maiman, 1960) sem találunk a vörös lézersugárra utalást! Ilyen „apróságot” pedig nem szokás kifelejteni egy *Nature*-cikkből. Volt ugyan két ezüsttükre az első készüléknek, a nagyon rövid rubinrúd véglapjaira párolva, de azok sok apró gyakorlati tényező miatt valószínűleg nem a későbbi tankönyvek szerint elvárható módon működtek rezonátorként. Egyre többen véljük azt, hogy a világ első lézere nem is volt „igazi” lézer. Mai szóhasználattal erősített spontán sugárzóinak – ASE-nek – nevez-

nénk (lásd alább). Megnyugtató: a másodiktól kezdve már tényleg zömmel klasszikus lézerek születtek a hatvanas évek legelején.

Vegyük észre, hogy a nyalábszerűség csak egy kényszer eredménye volt! A várt kis fényerősítést legyőzni képes praktikus kényszer. Ez a két tükör mégis csodát művelt, hiszen részben javította a fény egyszínűségét, részben megajándékozott minket a lézersugárral mint fogalommal és egy szinte minden optikai feladat megoldásánál nagyon praktikus térbeli fényeloszlással. A kis erősítésű anyagokban létrehozott, fényfrekvencián működő oszcillátor (visszacsatolt erősítő) tekinthető tehát a klasszikus lézernek, ami monokromatikus és vonalszerű fényt állít elő.

Mi van akkor, ha nagy a fényerősítés?

Akkor szigorúan véve se monokromatikusnak, se nyalábszerűnek nem kell lennie a ... minek is? Annak a valaminek, amire viszont tökéletesen illik a *laser* (fényerősítés indukált emisszióval) betűszó eredeti, szó szerinti jelentése. Ezt a zavart próbáljuk oldani (bonyolítani) a továbbiakban.

Mi is történt az elmúlt több mint ötven évben a lézerfizikában?

A legfontosabb fejlemény, hogy drasztikusan megnőtt a ma használatos lézeranyagokban a fényerősítés. Míg az első, klasszikus piros hélium-neon lézerekben még csak 2–3 százalékot erősödött a fény méterenként, addig például a mai diódalézerekben (például a piros fényű mutatópálcáknál) már több száz százalékot is elérhet milliméterenként. Több milliószoros is lehet a növekedés!

Ez az adottság egy egészen más – a hetköznapokban kevésbé ismert – „lézervilágot” is megteremtett amellet, hogy természetesen a klasszikus lézerek is sokat változtak.

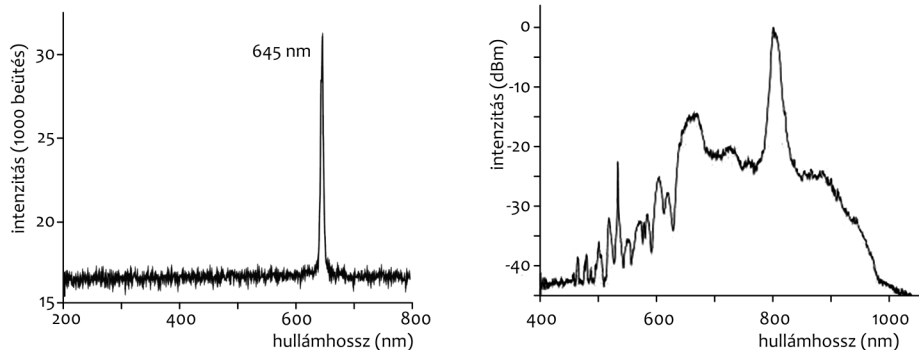
A „hagyományos” lézerek új generációjára leginkább az jellemző, hogy adott teljesítmény mellett a méretük jelentősen csökkent, hatásfokuk növekedett, illetve adott térfogatban sokkal nagyobb intenzitással emittáló, olcsóbb eszközök jelentek meg. Ma már könnyen elérhetőek az egyre keskenyebb (egyszínűbb) lézervonalakat nagyon széles színtartományon hangolni képes felhasználóbarát lézerforrások is.

Az előbbi, többé-kevésbé lézernek tekinthető eszközökön túlmenően sorra publikáltak, publikálják az egészen extrém tulajdonságokkal jellemezhető, lézernek nevezett, indukált emissziót használó fénykeltő eszközöket. A továbbiakban ezekből villantunk fel néhány érdekes példát, amelyek jól jellemzik a korszerű lézerfizika és -technika sokszínűségét, és bonyolítják egyúttal, a *lézer szó/fogalom* használatának definiálhatóságát.

A nagy fényerősítő anyagot használó lézer(?) -nek ma már nem kötelező se egyszínűnek, se vonalszerűnek lennie!

Ahogy az *1. ábrán* is látszik: sok-sok éve már olyan lézereink is vannak, amelyek nem egy keskeny vonalon, hanem nagyon széles spektrumon is sugározhatnak. Természetesen itt a sok szín együttes jelenléte miatt fel sem merülhet a klasszikus értelemben vett koherencia megléte. Egy érdekes megoldás, a fényfésű-technika viszont lehetővé teszi, hogy fázisaikban mégis tökéletesen szinkronizálni tudjuk az adott frekvenciaközökkel keltett széles spektrumú fénykomponenseket.

A széles spektrum a kulcsa többek között az atomok, molekulák elektronjainak mozgását, sőt a molekulák egyes részelemeinek rezgéseit, összeolvadását, vagy épp szétválását, azaz a kémiai alapfolyamatok dinamikáját is „lefotózni” képes ultrarövid fényimpulzusok előállíthatóságának. A Szegeden épülő hazai



1. ábra • A lézerek fényének spektruma (színe). Balra: 1960 körül egy keskeny vonal (egyszínű); Jobbra: az utóbbi ötven évben akár széles spektrumú („fehér”) is lehet, például Ti:zafir lézer az ultrarövid fényimpulzusok keltéséhez.

„szuperlézer” ennek a típusnak – remélhetően – világrekorder változata lehet, szinte elképzelhetetlenül nagy sávzélességgel és ennek megfelelően rövid időtartamú (attoszekundumos) fényimpulzussal. Jobbára csak a szenzációvadász sajtó használja a „szuperlézer” kifejezést. A szakma e projektet a sokkal szerényebb ELI (extrém fény-infrastruktúra) néven emlegeti. Az a kérdés viszont, hogy a nagyon sokszínűnek is csak jókora extrapolációval nevezhető elektromágneses impulzus, amelyet a szegedi rendszer fog kibocsátani, még fénynek tekinthető-e, egynéhány évtized múlva megírandó cikk érdekes témája lehet.

Fura lézerek fura tükrökkel

A klasszikus (nem a *laser* szóból levezethető) lézer tehát két, egymásra merőleges tükrök közé helyezett fényerősítőből áll, ami a populációinverzió állapotában lévő (negatív hőmérsékletű) anyagokban indukált emisszióval produkálja a leginkább tudományos szempontból speciálisan szép tulajdonságokkal bíró fénynyalábot.

A hétköznapi gyakorlat persze ennél sokkal bonyolultabb. Említettük, hogy az első

–lézernek tekintett – „rubinlézer” valószínűleg nem nyalábszerűen sugárzott. A nagyon hamar megjelenő félvezetőlézerek is olyan fénytér-eloszlást produkáltak, amelyet csak erős túlzással lehetett nyalábnak titulálni. A helyzet sok évtized alatt is csak annyit változott, hogy a nagy nehézségek árán elliptikus kúp-pá szépített fénytérből a modern optika eszközeivel már nem probléma egy mutatópálcháoz illő kellően párhuzamos nyalábot, vagy DVD-író-olvasó fókuszpontot varázsolni.

Már a 60-as évek második felében kifejlesztették azokat a nagy erősítésű – akkor még csak folyadékként, oldatban használatos – festéklézereket, amelyeknek a „színe” (hullámhossza) különleges rezonátorokban akkoriban szokatlanul széles tartományon hangolható volt. Itt érdemes megemlíteni azt a kiemelkedő munkát, amelyet szegedi kollégáink e színes lézertípus és gerjesztő forrásainak fejlesztésében értek, s ami megalapozhatta az ELI projekt Tisza menti telepítését.

Néhány próbálkozást nem számítva (haladóhullámok, hántolótükrök, ringlézerek stb.), a 70-es évek elején a festéklézerekben szakított először a lézerfizika a klasszikus, kéttükrös

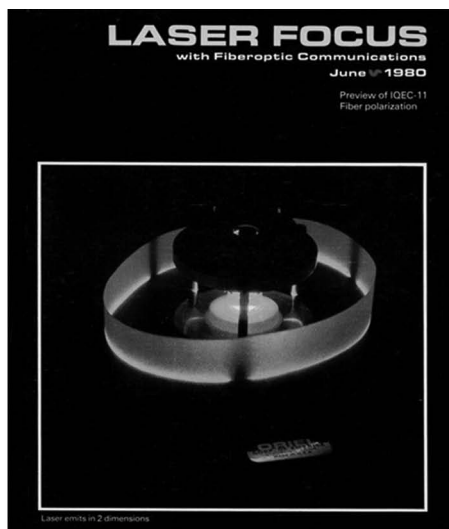
rezonátorok gyakorlatával. A két, viszonylag nagyon reflektáló tükör helyett a fény hullámhosszával összemérhető távolságban lévő milliónyi, kicsit reflektáló (esetleg nem erősítő, abszorbeáló) rétegek sokaságával értek el a külső rezonátorhoz hasonló hatást. A megoldást elosztott visszacsatolásnak (DFB) nevezik, s ma is elterjedten használatos számos nagy erősítéssű anyagban (például félvezető-lézerek), és már nem csak folyadék formában.

Alapjaiban szakított a klasszikus, kötelezően vonalszerű lézertény felfogásával és gyakorlatával az első, nem nyalábszerűen, hanem egy teljes síkban egyidejűleg sugárzó ún. hullólézer megjelenése. A síklézert először a szerzőnek az infravörös tartományban a világhírű Lebegyev Intézetben sikerült megépítenie (Horváth et al., 1980), látható változatban pedig Szegeden, *Bor Zolt, Rácz Béla és Szabó Gábor* kollégákkal együtt (2. ábra). A szokásos két tükör közé helyezett vonalszerű lézertanyag helyett itt egy vékony, lapos ko-

rong volt a fény forrása, amit egy koncentrikus hengertükör közepébe helyeztünk. A síkban sugárzó lézer fénye a korábban megszokott vonallézer lézerpöttye helyett egy csodás teljes kört rajzolt a laboratórium falára (Bor et al., 1980).

Ezek után nagyon hamar megjelentek a gömb alakú lézertanyagot és gömbtükröket használó háromdimenziós, a tér minden irányában sugárzó lézerek is.

A nyolcvanas évek elején tehát már nem csak vonalszerű egydimenziós (1D), hanem 2D-s sík- és 3D-s gömblézerek is léteztek, csak hogy ezeknek akkor a hétköznapi gyakorlatban nem volt nagy jelentőségük (Horváth, 2012). A felhasználók a lézer nyalábszerű terjedésének előnyeit élvezték, s jogosan ragaszkodtak a bevált lézerforrásokhoz. Csaknem harminc évnek kellett eltelnie, hogy a síklézerek ma már miniatűr, akár a fény hullámhosszával is összemérhető méretekben, „mikrodizsk” lézerekként a modern lézerfizika



2. ábra • A lézerekből kibocsátott fény térbeli eloszlása. Balra: 1960 körül vonalszerű; jobbra: az utóbbi 50 évben akár sík vagy gömb is lehet (a síklézer a szerző, Bor Zolt, Rácz Béla és Szabó Gábor munkájaként a *Laser Focus* címlapján. KFKI–JATE)

fókuszába kerüljenek. Felhasználásukra leginkább a tervezés alatt álló, az elektronok helyett a kevésbé zavarérzékeny és gyorsabb, fényt alkalmazó számítógépek nyomtatható paneljein számíthatunk.

A rezonátorok reflektáló elemeinek célszerű finomításaival, módosításaival, szokatlan új lézertípusok születtek.

Nagy fényerősítés esetén viszont még egy merész lépést is megtehetünk:

Mi történik, ha nincsenek tükrök, reflektáló elemek a „lézerekben”?

Ekkor már nem illene a lézer elnevezést használni. Mégis sokan megteszik. A körültekintőbbek megkülönböztető jelzők melléillesztésével finomítják, orvosolják a problémát.

Ha valaki ma, 2015-ben megkérne egy lézerfizikában járatos kutatót, hogy készítsen „fényerősítőt, indukált emisszióval” (ami a *laser* betűszó pontos jelentése), az valószínűleg venne például egy csepp Rhodamin 6G oldatot, azt néhány nanoszekundumos zöld fényvel gerjeszteni, s az ekkor keletkező közel monokromatikus, minden irányban sugárzó intenzív sárga fény tökéletesen teljesítené a kívánalmakat. Eszébe nem jutna tükröket használni!

A korrekt szakma a tükrök nélküli, de lézerekhez hasonló fényforrásokat erősített spon-tán sugárzóknak (ASE) nevezi. Ez a bonyolult elnevezés pontosan leírja, miről is van szó: nagy erősítésű anyagokban bizonyos kritikus erősítés/méret felett automatikusan elindul a laser betűszóra tökéletesen illő fényerősítés, indukált emisszióval. A kibocsátott fényt a benne természetesen keletkező spontán fény-sugárzás indítja, s tartja fenn mindaddig, amíg az erősítés értéke lehetővé teszi. Pontosan úgy, mint a klasszikus lézerekben, csak hogy itt már nincs szükség sokszoros fényátfutásra.

Bármelyik egyetlen, tetszőleges irányban haladó fény is hihetetlen mértékben fel tud erősödni, így minden irányban láthatunk – általában csak – kicsit monokromatikus, kicsit koherens, de nagyon nem nyalábszerű sugárzást. Apró trükkökkel, ha szükséges, természetesen lehet ezt is nyalábosítani.

A nyolcvanas években megjelentek a javított ASE-források, az ún. *random lézerek*. Maradva a Rhodamin csepp előbbi példájánál, ha abba sok apró, a fényt jól szóró részecskét is belekeverünk, sokkal „szebb” és jobb hatásfokú lehet az ASE. (Figyelem: korábban mindig optikailag tökéletes minőségű lézeraktív anyagokat használtunk!) Itt a mat-títás, a sokszoros fényszórás miatt megnöve-li az egyedi fényutakat, így az erősítést, és homogenizálja a fényeloszlást. Majdnem kész a „lézerlámpa”, ami egyszínű, de minden irányban jól sugároz, nem úgy, mint lézereink irányított fénye.

Az egyszerűen kivitelezhető, jópofa játszadózson kívül van-e értelme az ASE-nek, ennek az „elrontott” lézerek? Bizony, nagyon is sok! Ezekből csak kettőt említek:

Nagyon mikroméretéknél: az ASE spektruma erősen függ a környezettől, például annak mérettulajdonságaitól is. A patológusok a mikroszkopikus metszetek szerkezeti jellemzőiből sokszor „ránézésre” meg tudják különböztetni a rákos és egészséges szöveteket. Ha a mintákat lézeraktív festékkel átítatják, s azokban ASE-t generálnak, a spektrumvo-nalak szerkezetének automatikus elemzése is „megtanítható” egy készüléknek, ami így alkalmas lehet bizonyos előválogatási, elődiagnosztikai feladatok ellátására.

A makrovilágban: a kozmikus térben sem kizárt, hogy „természetes” lézerforrásokat találhatunk, akár a bolygók légkörében, a csillagokban, sőt a csillagközi térben is, bár-

miben, ahol nincs termikus egyensúly. Ez ugyanis a fényerősítés egyik fontos alapkövetelménye. Nagy szerencse, hogy nem kell félnünk természetes kozmikus („igazi”) lézertámadástól, mivel kicsi a valószínűsége, hogy például a Tejút két végén jó merőlegesre jusztált lézertüköröt találunk. Ha ott, az űrben (és általában a természetben) valami lézerszerű történhet, az bizonyosan csak tükrök nélküli ASE-folyamat lehet. Mégiscsak jobb lenne, ha a kozmoszból egy esetlegesen kialakuló s gigantikus intenzitásúra felerősödött fénysugár nem koncentrált lézernyalábként, hanem csak szelídebb ASE-ként találná teli-be bolygónkat.

Összefoglalás

Kijelentem, hogy a fentiek (és természetesen az alábbiak is) – mivel a kérdésben semmiféle nemzetközi szabályrendszer, egyetértés, „koherencia” nincs – kizárólag a szerző sok évtizedes lézerfizikai tapasztalatából leszűrt, egyéni álláspontját tükrözik. Bárki a továbbiakban is nyugodtan azt nevez lézernek, amit csak akar, vagy amit a publikációkat, híreket közlő tudományos, vagy éppen bulvárlapok aktuális szerkesztői az adott pillanatban éppen megengednek.

Láttuk, hogy drasztikusan eltérő tulajdonságokat mutatnak a kis és a nagy erősítésű aktív anyagokból készülő indukált emissziós fényforrások. Nagyban befolyásolja az emitált fény tulajdonságait, hogy a fényerősítőt visszacsatolt (tükrös), vagy visszacsatolás nélküli formában használjuk. A rezonátor elrontása, elhagyása természetesen csak nagy fényerősítés mellett valósítható meg.

A lézerek több mint fél évszázados fejlődéstörténetét áttekintve valószínűnek látszik:

- A *lézer* betűszó leginkább a szinte minden irányban, nem túlzottan monokromati-

kus fényt sugárzó *erősített spontán sugárzó* (ASE) rendszerekre illik. Ezekben nincsenek visszacsatoló, reflektáló elemek, s tipikusan a széles spektrumon is nagy fényerősítésre képes anyagokban hozhatóak létre, amelyek – külső beavatkozás nélkül – az erősítési görbéjük maximuma környékén (frekvenciában kissé az alatt) sugároznak. Jellemző példák a „random”, vagy az esetleges „természetes” lézerek. Utóbbiak leginkább azért, mert lehet, hogy a természet produkálhat extrém esetekben fényerősítést, de két tükörből álló rezonátort szinte biztosan nem, így ezek valószínűleg csak ASE-ként létezhetnek.

- A „klasszikus” lézer lényegében egy optikai frekvencián működő oszcillátor, azaz egy visszacsatolt fényerősítő, annak kötelező elemeivel: a fényerősítő anyagot rezonátorba (két visszacsatoló tükör közé) helyezzük. Ez a megoldás kezdetben egy kényszer volt a kis fényerősítés miatt, s nem is pontosan olyan fényt generált, mint amelyet megálmodói vártak, hanem annál sokkal praktikusabbat: nagyon nyálábszerűt. A fényerősítés viszont nagymértékű is lehet, ezért a rezonátor használatának „kényszere” hamar megszűnt, de az elterjedt és rögzült közfelfogás szerinti alapvető és nagyon praktikus lézertulajdonságok, az egyszínűség és nyálábszerűség legegyszerűbben még ma is csak optikai rezonátorokkal valósíthatóak meg. Hiába fejlődött a tudomány és a technika, az emberek ezeket a készülékeket tekintik lézereknek.

Ha előbb sikerült volna erősített spontán sugárzót készíteni, mint az úttörő kutatók által nagyon vágyott rezonátoros „optikai mézert”, akkor a mai lézerfogalmunknak

megfelelő eszközöket biztosan nem így neveznénk. Sajnos a történelem – ezen speciális esetben – utólag már nem nagyon korrigálható. Ennek tudatában több mint ironikus és különösen furcsa, hogy a világ első rubinlézere valószínűleg erősített spontán (ASE) sugárzó volt – azaz előbb készült, mint a klasszikus lézerek –, mégis lézerként vonult be a megmásíthatatlan tudománytörténetbe.

Végezetül megemlítem, hogy hazai kutatók az elmúlt évtizedekben jelentős munkát

végeztek a klasszikus lézerfogalom „lebontásában”, kiterjesztésében. Bízom benne, hogy a Szegeden épülő, s a klasszikus lézerfogalmat sok szempontból túlhaladó csodálatos tudományos eszközzrendszer, az ELI, sok meglepő, világszínvonalú eredménnyel sikeresen folytatja ezt a hagyományt.

Kulcsszavak: lézer, erősített spontán sugárzás (ASE), multidimenziós lézerek, síklézer, gömb-lézer, halólézer

IRODALOM

- Bor Zsolt – Rácz Béla – Szabó Gábor – Horváth Zoltán György (1980): Two-dimensional Halo Laser Performance. *Physics Letters A*. 80, 2–3, 153–155. DOI:10.1016/0375-9601(80)90209-1
- Csillag László – Kroó Norbert (1987): *A lézerek titkai*. (Kozmosz Könyvek) Budapest
- Feynman, Richard P. – Leighton, R. B. – Sands, M. (1970): *Mai fizika* 8. Műszaki, Budapest
- Horváth Zoltán György (2010): 50 éves a lézer. *Természet Világa*. 141, 10–11. • I. rész: <http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2010/tv1010/lezer.html> • II. rész: <http://www.termeszetvilaga.hu/szamok/tv2010/tv1011/lezer.html>
- Horváth Zoltán György (2012): Beyond the Beam: A History of Multidimensional Lasers. *Optics and*

- Photonics News*. 23, 7, July/August, 36–41. DOI: 10.1364/OPN.23.7.000036
- Horváth Zoltán György – Kilpio, A. V. – Malyutin, A. A. – Serdyuchenko, Yu. N. (1980): Picosecond Two-dimensional “HALO” Superradiance and Laser in Rhodamin 6 G. *Optics Communications*. 35, 1, 142–146. DOI:10.1016/0030-4018(80)90378-8
- Maiman, Theodore Harold (1960): Stimulated Optical Radiation in Ruby. *Nature*. 187, 493–494. DOI: 10.1038/187493a0 • <http://laserfest.org/lasers/history/paper-maiman.pdf>
- Schawlow, Arthur L. – Townes, Charles H. (1958): Infrared and Optical Masers. *Phys. Rev.* 112, 1940. DOI: 10.1103/PhysRev.112.1940 • <http://laserfest.net/lasers/paper-optical-maser.pdf> Szabadalmuk (1958): USA 2.929.922

