

# FÉNYUTASOK

## Kvantumelektronika-szakkör – „lézerbarlang”-építés a gimnázium pincéjében

Kilián Balázsne Raics Katalin – Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma, Pécs

Sánta Imre – PTE TTK Fizika Intézet

Knoch Júlia, Kovács Bence Tamás, Lovász Boglárka, Mester Ádám, Póla Márton,

Szabó Dániel, Weisz Pál, Wensofszy Balázs – tanulók, Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma, Pécs

Magyarországon új lendületet kapott a lézerfizika a szegedi ELI szuperlézer építésével. Városunkban, a Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézetében is komoly fejlesztőmunka folyik: az ELI egyetlen Magyarországon összeállított részegysége készül, a terahertzes másodlagos fényforrás és spektrométer.

A pécsi Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziumában két évvel ezelőtt egy osztálynyi 11. évfolyamos diákkal lézeres akadálypálya építését céloztuk meg fizika-szakkörön – a filmekben látható biztonsági rendszerekhez hasonló – , a fizika előadóban. Hosszú hónapokon keresztül, délutánonként dolgoztunk a projekten. Eleinte lézerpointerekkel, saját kezűleg vágott fürdőszobaturkókkal, sötétítő függönyökkel, füstölővel próbálkoztunk. A lézerlabirintus kialakításához végül megkaptuk az iskola pincéjét, amely tökéletesen sötét (optikai kísérletekhez kiváló), ráadásul igazán vadregényes helyszín.

A PTE Fizikai Intézet lézeres tükröket és pozícionálható tükrötartókat kölcsönzött nekünk, és egy füstgépet is vettünk. Innentől kezdve felgyorsultak az események. Közel 40 diák több héten át tartó, szorgalmas munkájának köszönhetően az iskola pincéjében kiépítettünk egy ideiglenes akadálypályát. A diákok a gyakorlatban ismerték meg a lézerfény tulajdonságait és a lézerbiztonsági előírásokat. Megtanultak lencséből teleszkópot építeni, hogy a lézernyaláb párhuzamos legyen. Elsajátították az együttműkö-

dést, hiszen ha az egyik nyaláb elmozdult, nem jutott fény a másik tükörhöz, amit csak közösen tudtak orvosolni. Kitartást tanultak, mert nap mint nap újra be kellett állítaniuk a nyalábutakat. A labirintus kiépítése során fejlődött kreativitásuk. Megtanultak takarékoskodni és költségtervet készíteni, hiszen a lézermutatókban levő elemek hamar lemerültek, ezért akkumulátorokat és töltőket vásároltunk. Felelősséget tanultak: szemük védelme érdekében a lézerbiztonsági előírások betartásában szigorúak voltunk (az építkezés során, még szemüvegben is nagyon kellett figyelniük egymásra). Fénydetektorokat is építettünk, amelyek sípoló hanggal jelezték a nyaláb megszakítását. A diákok a pincét csontvázakkal és borzalmas, ijesztő zenével öltöztették fel, hogy kelően maradandó élményt nyújtson a látogatás.

Az elkészült ügyességi akadálypályán már a 2015-ös Lajos napon (a gimnázium diáknapja) több száz diáktársuk ment végig. Évről évre fejlesztettük a pincét: világítás, vészvilágítás és érintésvédelemmel ellátott konnektorok, újabb fényforrások, optikai és elektronikai játékok kerültek bele. Az iskolában mindig akadt legalább egy osztálynyi lelkes és kitartó diák, akik folyamatosan részt vettek az akadálypálya kiépítésének hosszadalmas munkálataiban.

A projektet újragondoltuk a PTE Fizikai Intézet munkatársával, *Sánta Imrével* és az iskola vezetőségével: célul egy véglegesen kiépített lézerbarlang – az optika alapelenségeit bemutató interaktív installációkkal, számítógép-vezérelte lézeres kép- és hangeffektusokkal, valamint elektronikusan vezérelhető lézerbiztonsági megoldásokkal – berendezését tűztük

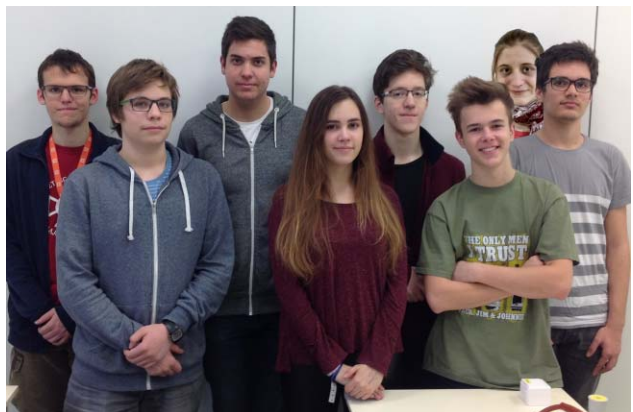


*Kilián Balázsne Raics Katalin* (1984) biológia és fizika-környezettan tanár. A PTE ÁOK Biofizikai Intézetében három éven keresztül kutatott és oktatott. Kutatási témája az ultragyors fehérjedinamika lézerspektroszkópiai monitorozása volt. Három éve a pécsi Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziumában fizikát és biológiát tanít. Az innovatív gondolkodást elősegítő tehetséggondozásban, a fizika tantárgy népszerűsítésében elért eredményeiért 2017-ben a BME Pro Progressio díját vehette át.



*Sánta Imre* (1953) nyugalmazott, habilitált egyetemi docens, lézerfizikus. 7 évig a szegedi JATE, 33 évig a Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézetének munkatársa volt. 10 évig vezette a pécsi lézeralkalmazási innovációs központot. Fő kutatási területei a femtoszekundumos lézerspektroszkópia, a röntgenlézer, valamint a kvantumtitkosítás. Több tankönyvet írt, lézerekről szóló, 10 részes filmsorozat szerzője, a pécsi Csodák Palotája egyik alkotója.

Az első sorban balról: Póla Márton, Lovász Boglárka és Mester Ádám, hátul balról: Weisz Pál, Szabó Dániel, Kovács Bence Tamás, Knoch Júlia és Wensofszy Balázs.





1. ábra. Lézerlabirintus<sup>1</sup> (a fotót Szabó Zsolt 11.D osztályos tanuló készítette).

ki. A barlang tehát optikai, hangtani és elektronikai kísérletek színtere lesz.

2016 őszén „Kvantumelektronika” névvel szakkört hirdettünk, amelynek feladatköre a lézeres barlang kiépítése tudományos szempontból komoly alappal, ismeretbővítéssel, mérnöki és kutatói attitűdök kialakításával. A szakkört ketten vezetjük, Sánta Imre és jómagam. Kis kutatócsoportunk feladata és tevékenysége messze túlmutat a középiskolás tananyagon.

Az Emberi Erőforrások Minisztériuma által indított Útravaló Ösztöndíjprogram, Út a tudományhoz alprogram (támogatás kódszáma: UT-2016-0041) 2017. évi pályázatán az iskola e szakkör támogatására 750 000 forintot nyert. Június végére ezen összeget felhasználva rendeztük be a barlangot úgy, hogy az év bármelyik napján üzembe tudjuk helyezni az optikai, illetve elektronikai installációkat.

A lézerlabirintus mellett több más kísérleti elrendezés is helyet kapott és kap a barlangban, ezek a fizika órán tanultakat hivatottak elmélyíteni, illetve túlmutatnak rajtuk. A továbbiakban szakkörös diákjaink mutatják be, magyarázzák el az egyes kísérleteket.

## Lézerlabirintus

Weisz Pál, 11.C

*Mi ez?* – Lézer akadálypálya: a játék célja úgy eljutni a pince egyik végéből a másikba, hogy közben egyik fénysugár útját se szakítsuk meg (1. ábra). A lézert – természetesen – a falra szerelt precíziós tükrökkel sok helyen eltérítettük, hogy minél nehezebb legyen végrehajtani a feladatot. A fénysugarakat füstgép segítségével tesszük láthatóvá. Az általunk használt vörös és zöld színű nyalábokat a mennyezetre rögzített portmentesen záródó dobozból indítjuk, és a pálya végéről visszavezetjük a dobozba. Itt egy saját tervezésű és építésű érzékelő áramkör figyel, hogy a fénysugár megszakadt-e valahol. A doboztól UTP kábelből ké-

szített kommunikációs csatorna fut a fal mellett található – szintén saját készítésű – vezérlőpultig, amellyel az egész berendezés működése irányítható.

*Miért van erre szükség?* – Ez egy biztonsági rendszer. Ezek a lézerek nem kimondottan nagy teljesítményűek, 5 mW-osak. Tehát például egy papírlapot nem gyújtanak fel. Viszont, ha közvetlenül belenézünk, maradandó károsodás érné szemünket. Ennek oka, hogy szemünk a párhuzamos fénysugarakat a retinára fókuszálja, ahol a teljesítménysűrűség – egy-egy felületre jutó teljesítmény – nagyobb, így már képes lenne roncsolni a szöveteket. Ennek elkerülésére készült a biztonsági áramkör, amely kikapcsolja a fényforrást, ha valamilyen tárgy akadályozza a sugármenetet. Az ember fejének bármelyik része előbb ér a fény útjába, mint a szeme, így a közvetlen belenézés előtt már ki van kapcsolva a fénysugár. De ha mégsem (beállítás közben), akkor ott van rajta a védőszemüveg.

*Hogyan működik?* – Amikor valami miatt megszakad a lézersugár, az érzékelő fotodióda áramvezetési képessége megváltozik és egy RS flipflopnak nevezett logikai tárolót töröl. (Ez a digitális áramköri elem két állapot „megjegyzésére” képes, attól függően, hogy a legutolsó művelet beállítás vagy törlés volt, a kimeneten logikai 1 vagy 0 érték jelenik meg, tehát bekapcsolja-e a lézert vagy sem). Ennek hatására a lézer kikapcsol, és a vezérlőpanelen található piros színű LED kigyullad. A berendezés újbóli működéséhez először az akadályt kell eltávolítani, majd a vezérlőpanelen újra kell indítani a lézert. A gombot megnyomva a lézer bekapcsol, a szakadást jelző piros LED elalszik és egy zöld színű LED jelzi a „memória” beállítását. Két irányítóegység található a vezérlőpulton, amelyekkel a két különböző színű lézert egymástól függetlenül lehet vezérelni. A vezérlőpulton egy tesztüzemkapcsoló is található, amelyet zárva a lézer akkor sem alszik ki, ha akadály kerül az útjába, a visszajelző zöld LED folyamatosan világít, a piros LED pedig itt is a fénysugár megszakadását jelzi. E funkciónak a nyaláb pontos beállításakor van szerepe. A rendszer működés vagy beállítás közbeni bármilyen rendellenességénél a vészkapcsolóval egy mozdulattal lekapcsolható.

## A fény is lehet szétszóró

Fényinterferencia – Szabó Dániel, 10.E

Három, különböző színű lézert, vöröset (635 nm, 8 mW), kéket (445 nm, 10 mW) és zöldet (532 nm, 15 mW) helyeztünk egymás mellé. A lézerek elé egy motor által forgatott katedrálüveget raktunk. Ezeket egy műanyag dobozba tettük és a mennyezetre erősítettük, hogy közletről, közvetlenül ne lehessen belenézni. Egy sok eres (UTP) kábel segítségével az irányítópultról működtetjük a ki- és bekapcsolást, valamint innen kapja az áramot is. Amikor a lézerek fénye megtörik a katedrálüvegen, akkor jól látható, hol oltják ki és hol erősítik egymást az átfedő hullámok

<sup>1</sup> Ez az írás szerepel a *Fizikai Szemle* <http://fizikaiszemle.hu> honlapján ingyen elérhető cikkek között. Ajánljuk, hogy a színes fényképeket ott tekintse meg a tisztelt olvasó (szerkesztő megjegyzése).



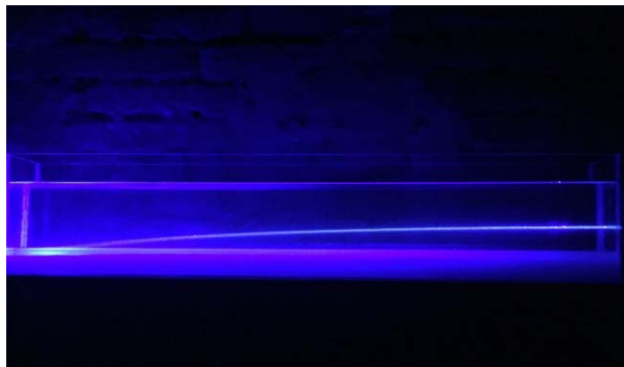
2. ábra. Felül a forgó katedrálüveg, mögötte a lézerekkel, alul a három színben játszó elhajlási mintázat (Szabó Zsolt fényképei).

(2. ábra). Látványos háromszínű mintázatot látunk a falon, ami az üveg forgása miatt folyamatosan mozog, változik. Az interferencia-csíkok ugyanúgy a fény hullámtermészetét igazolják, mint amikor egy hajszálát világítottunk meg egy kis teljesítményű (<1 mW) lézermutatóval, és az elhajlás jelenségét (kétoldalt gyengülő sötét-világos csíkok) jól láthattuk a falon.

## A fény egyenesen halad (amikor józan)

Fényelhajlítás – Kovács Bence Tamás, 10.C

A fény általános iskolai tanulmányaink alapján egyenes vonalban terjed. Ám most a fénytörés jelenségének és egy vízzel töltött, hosszú üvegtartály segítségével garantáltan meginog hitünk eme állítás igazságában! Amint a tartályba nézünk, azt láthatjuk, hogy a benne haladó, teljesen átlagos lézersugár pályája nem a megszokott módon viselkedik. A fénysugár ívesen elgörbülve a tartály aljának csapódik (3. ábra), pedig kiindulási pontjában még a tartály alsó lapjával párhuzamosan halad. De nem kell aggódni, nem az oktatási rendszer hibája, és a fizikával sincsen semmi probléma! Eme jelenség magyarázata egyszerű: a tartályban lévő folyadék nem tiszta víz, hanem egy oldat (ebben az esetben cukoroldat), amelynek koncentrációjában gradiens van. (Ez egy igen jól hangzó szó, és azt jelenti, hogy valami a térben helyről-helyre változik, vagyis a tartály felső részében a cukor koncentrációja szinte nulla, az alsó részében pedig nagyon nagy.) Amennyiben ismerjük a fénytörés jelenségét, tudjuk, hogy a fény közeget váltva egy bizonyos szögben – amelyet az adott anyag törésmutatója határoz meg – megtörik (és egy



3. ábra. A fény útja elgörbül.

része visszaverődik). Esetünkben ahogy a cukor koncentrációja folyamatosan nő az oldatban, úgy nő folyamatosan az oldat törésmutatója is. Ez a folyamatos változás eredményezi, hogy a fénysugár ívesen elhajlik a cukoroldatban. Úgyhogy, csak ne ijedjünk meg, hanem élvezzük a fizika nyújtotta csodákat!

## A kevert mindig jobban üt, mint a tiszta

Színösszeadás és színkeverés – Lovász Boglárka, 11.D

Három különböző színű lámpa (kék, zöld és piros) fényét egy lepedőre vetítettük. A lámpákat úgy rögzítettük a falhoz, hogy fényük a lepedőn metszse egymást. Azért kék, zöld és piros színűek, mert ezek az összeadó (additív) színkeverés alapszínei, ilyen színérzékenyséű receptorok (csapocskák) vannak szemünkben, a retinán. Minden szín, amelyet szemünk-

4. ábra. Fényforrások és színes árnyékok.





5. ábra. A szivárványmodell.

kel látunk, e három szín különböző arányú kombinációja. Ha az egyik színt kitakarjuk, akkor a másik kettő összegét kapjuk (például zöld kitakarása esetén piros + kék = lila lesz).

Ha a lepedő elé tesszük kezünket, három különböző színű árnyékot láthatunk: egy türkiz, egy lila és egy sárga színűt (4. ábra). Azért ilyeneket, mert ahol a kezünk véletlenül kitakarja az egyik színt, ott a másik kettő összeadódik. A türkiz színű árnyék a kék és zöld eredménye, a lila szín a kék és piros keveréke, a sárgát pedig a zöld és piros hozza létre. Mindhárom fényforrást (színt) kitakarva az árnyék fekete. Ahol mind a három folt fedésben van, ott fehérnek látjuk a fényt.

6. ábra. Lissajous-görbék előállítás.



## Szivárvány-modell

– Póla Márton, 9.B

„<sup>11</sup>Nézz a szivárványra, s dicsérd alkotóját, káprázatosan szép a pompájában. <sup>12</sup>Átfogja fényével az égboltozatot, a Magasságbeli keze feszítette ki.” (Sirák fia könyve, 43. fejezet)

A kísérleti elrendezés egy fehér fényű lámpából és egy gömb alakú akváriumból áll. A lámpa fényét az akváriumra irányítjuk. Az akvárium – mint egy vízcsepp – a fehér fényt a szivárvány színeire bontja, ami egy kicsit távolabb lévő fehér vászonra vetül (5. ábra). Ha a lámpára lencsét rögzítünk, akkor a szivárványnak csak egy szelete látszik. Ha lencse nélkül világítunk az akváriumra, akkor – bár kicsit halványabban – a szivárvány teljes egészében, kör alakban pompázik.

## Lissajous-görbék

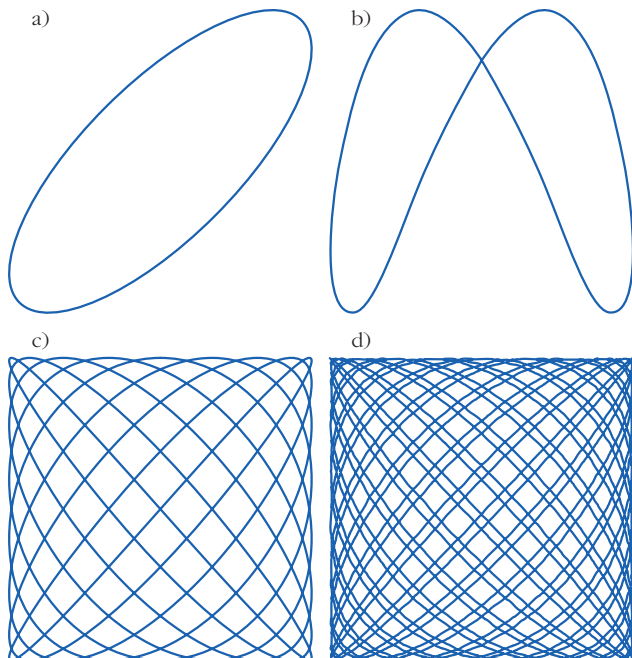
– Knoch Júlia, 12.A

Környezetünkben minden mozog, rezeg. A különböző rezgések hatással vannak egymásra. Ha a rezgések párhuzamosak egymással és azonos frekvenciájúak, akkor erősítik, illetve gyengítik, kioltják egymást; ezt nevezzük interferenciának. Ha viszont a rezgések egymásra merőlegesek, akkor is megfigyelhető egy érdekes jelenség: szuperpozíció speciális, úgynevezett Lissajous-görbéket eredményez. A Lissajous-görbék megjelenése elsősorban a két rezgés frekvenciaarányától függ: ha az arány irracionális, a görbe nem tér vissza önmagába, ha viszont racionális, akkor zárt lesz. Minél kisebb egész számokkal írható fel a két frekvencia aránya, annál egyszerűbb lesz a görbe és annál hamarabb tér vissza önmagába.

A kísérletben a két egymásra merőleges rezgést két egymásra merőlegesen forgó tükör biztosítja, amelyeket szkennermotorok mozgatnak. Ezek egy-egy függvénygenerátorra vannak kötve, így egymástól függetlenül változtathatjuk a tükrök mozgásának frekvenciáját. A két rezgés összeadása úgy történik, hogy az egyik tükröt lézerrel (405 nm-es 15 mW ibolya) világítjuk meg, ami visszaverődve a másik tükőre esik, és onnan is visszaverődik. Innen a lézer fénye egy foszforeszcens ernyőre esik, ami az ibolya fényt elnyeli, és hosszabb hullámhosszú, zöld fényt bocsát ki. E kísérletben láthatjuk a plafonra erősített berendezésből a fejünk felett haladó, eltérített ibolya színű lézerfény útját a levegőben, de a foszforencia – hosszú idejű utánvilágítás – jelenségét is megismerhetjük.

A két egymásra merőleges forgástengelyű eltérítő tükőre egy-egy hanggenerátort kötöttünk. Először kis frekvenciájú szinuszjelekkel mutatjuk be a jelenséget (1–10 Hz). Ezen a nagyságrenden a kivetülő lézerpötty mozgása lassú, a foszforeszcens ernyőn jól követhető a lézerpötty helye, a görbe kirajzolódása (6. ábra).

A következő 80–200 Hz-es tartomány, itt már a lézerpötty mozgása olyan gyors, hogy a kirajzolt görbe összefüggőnek látszik.



7. ábra. Lissajous-görbék a) 1:1, b) 1:2, c) 8:9 frekvenciaarányok és d) hamis hangköz esetén.

Először a kis számok arányára mutatjuk be a jelenséget. Két, egyformán 100 Hz-es jel esetén a kirajzolódó görbe ellipszis (7.a ábra) és két egyforma hangot hallunk. Az egyik frekvenciát növelve, 1:2 aránynál (100 Hz, 200 Hz) a görbe a 7.b ábrához hasonló, és oktávnyi a hangköz. 8:9 (160 Hz, 180 Hz) aránynál már diszsonáns hangköz: nagy szekundot, és az előzőeknél jóval összetettebb görbét (7.c ábra) kapunk. Ha pedig a hangközünk „hamis”, akkor még bonyolultabb görbe az eredmény (7.d ábra).

A diákok a függvénygenerátorokat állítva maguk is kipróbálhatják, hogy pontosan miként változik a görbe. (Itt már levesszük a hangot, ami nagyon idegesítő.)

## Látni a láthatatlant

Vizsgálatok hőkamerával

– Wensofszky Balázs és Mester Ádám, 8.A

„<sup>1</sup>Az ég büszkesége a fényes boltozat, az Úr dicsősége ragyog fenn az égen. <sup>2</sup>A Nap, ha felragyog, ezt hirdeti: „Mily csodálatosak a Magasságbeli művei!” <sup>3</sup>Déli magasáról perzseli a földet, ki tudja ilyenkor hevét elviselni? <sup>4</sup>A fűtött kemence égeti az embert, de háromszor jobban a Nap a hegyeket. Izzó sugarakat lövell ki magából, tüze elkápráztatja a szemet. <sup>5</sup>Nagy az Úr, aki teremtette, szava irányítja gyors száguldását.” (Sirák fia könyve, 43. fejezet)

Feladatunk az volt, hogy megmutassuk különböző testek hőmérsékletét és annak eloszlását. A hőkamera működésének alapja, hogy minden olyan test elektromágneses sugárzást bocsát ki, amely melegebb az abszolút 0 foknál, azaz  $-273\text{ °C}$ -nál. Ennek jelentős része az emberi szem által nem látható, a  $-40\text{ °C}$  ...  $+800\text{ °C}$  hőmérsékleteken körülbelül  $8\text{--}15\text{ }\mu\text{m}$  hullámhosszúságú infravörös tartományba esik. Ez a



8. ábra. Hőkamerával készült felvételek. Balra a kéz, jobbra annak nyoma látható a pince felmelegített falán.

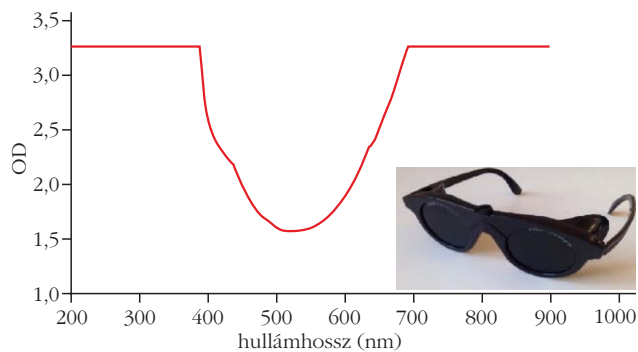
„fény” speciális anyagból készített szűrővel jól elválasztható a láthatótól. Érzékelése piciny ( $\sim 20$  mikron méretű) félvezető hőmérőkből kialakított pixel-detektorral történik (például  $512 \times 512$ ). A hőkamera elektronikája és programja a szokásos fényképezőgépekhez hasonlóan regisztrálja az intenzitáseloszlást, amiből a mikroprocesszor kiszámítja a hőmérséklet-eloszlást (a hőszugárzás a hőmérséklet negyedik hatványával arányos), és azt kép formájában – az eltérő hőmérsékletű tárgyakat/felületeket – különböző színekkel jeleníti meg. Ezt nevezzük termográfiának. Minél magasabb egy tárgy/felület hőmérséklete, annál több infravörös sugarat bocsát ki az említett tartományban.

A FLIR One típusú, okostelefonhoz csatlakoztatható készülékünkkel demonstrálni tudjuk: ha például a kezünket egy hidegebb felületre (egy felfüggesztett lepedőre vagy egy polcra) helyezük és pár másodpercig ott tartjuk, akkor ujjaink melegétől a felület egy, a környezetnél magasabb átlaghőmérsékletre áll be. Így a kéz elvétele után annak „hőlenyomata” a felületen kimutatható (8. ábra). Továbbá kezünk segítségével bemutatjuk a víz párolgásának hőigényét és megmagyarázzuk, hogy a víz a halmazállapot-változáshoz a testünkkel való érintkezési pontokról nyer hőt. Vagyis lokálisan a testfelület lehűl. Interaktívabb játékunk az, ha a pince legalsó részében hideg és meleg tárgyakat (forró vízzel töltött palack, alufóliába tekert 1,5 voltos elem, jégakku, jégkockákkal teli tartó) rejtünk el, és az érdeklődőknek a teljes sötétségben hőkamera segítségével kell megkeresniük ezeket, így is mutatva, hogy az eszköz sugárzás alapján mér.

## Lézerbiztonság

Külön fejezetben foglalkozunk a lézerek veszélyeivel, különösen azért, mert egyes kísérletekben nagyobb teljesítményű lézereket használunk, mint ami teljeséggel veszélytelen lenne.

A 18 év alatti korú tanulók korlátozottan tehetősek felelőssé a viselkedésükért, tehát – minden előzetes kitanítás, erről szóló nyilatkozat aláírása mellett is – a tanár felelőssége egy esetleges baleset kizárása.



9. ábra. Az általunk használt védőszemüveg abszorpciós spektruma.

Emiatt azt javasoljuk mindenkinek, hogy a kísérletekben lehetőleg az 1-es, illetve 2-es lézertosztályba sorolt (1 mW-nál nem nagyobb teljesítményű), illetve látható tartományban a szem védekező reflexével, a pisantással kivédhető expozíciót produkáló lézereket használjanak.

A látványpedagógia lényege a látvány, tehát célunk eléréséhez a fény útjának láthatónak kell lennie. Ezt elvileg három módon lehet realizálni: vagy (i) nagyobb teljesítményű nyalábot használunk, vagy (ii) kellően sötét helyen építjük ki a rendszert, illetve (iii) megnöveljük a levegő fényszórási képességét. A mi pincénk szinte teljesen elsötétíthető, így viszonylag kis teljesítményű lézereket használhatunk. Kevésbé sötétíthető helyen, illetve még látványosabb kísérlet érdekében használhatjuk a harmadik megoldást, füst-(kód-) géppel – többnyire glicerinnel – párat fújunk a levegőbe. Ez utóbbi után célszerű hosszabban szellőztetni, mivel a pára mindenhol lerakódik, így a használt tükrökre, a lézerek kilépő ablakára is, lerontva azok reflexióját, illetve nem kívánt szórás eredményezve, tisztításuk pedig elég körülményes.

Meg kell különböztetnünk a lézerbiztonsági ismeretekkel nem rendelkező látogatókat, illetve a kísérleteket végző, beállító tanulóakra vonatkozó szabályokat. Első esetben semmilyen tudatos baleset-megelőző cselekedetet sem feltételezhetünk, tehát a legrosszabb eset feltételezésével kell a beállításokat, hozzáféréseket, teljesítményszinteket beállítani.

A másik esetben – a kísérleteket tervező, megvalósító szakköri tagoknál – a részletes, a veszélyek ismeretése, bemutatása révén megvalósított kitanítással felelős viselkedés várható el, amelynek betartatása a tanár felelőssége. Az összes előírt óvintézkedést továbbra is be kell tartani, így, ha az 1. vagy 2. osztálybeli lézerek teljesítménye nem lenne elegendő, akkor kötelező a védőszemüveg használata.

A mi rendszerünk kiépítése, a tükrök beállítása során – amíg az elektronikus védelem nem léphetett életbe – védőszemüveget használtunk. A probléma az, hogy a teljesen kizáró – egy adott hullámhosszra 3–5 optikai sűrűségű (OD-jú), vagyis  $10^{-3}$ – $10^{-5}$  transzmissziójú – szemüvegben nem látszik a lézertér útja, helye, így időnként le kell venni, oda a védelem. Ezért olyan szemüvegeket szereztünk be, amelyek széles sávúak (vagyis minden lézere, a használt 404–635 nm fényhullámhosszon közel azonos, 1 körüli

OD-vel rendelkeznek), és az esetlegesen szembe jutó lézer teljesítményét a megengedett (1 mW) szint alá csökkentik, de a nyaláb látható marad.

Az általunk használt szemüveget hegesztéshez gyártották (szabványban rögzített abszorpcióval rendelkeznek: 5 SCS 1 DIN 0196 CE, abszorpciós spektrumukat lásd a 9. ábrán) és nem mellesleg 1 nagyságrenddel olcsóbbak a speciális lézer védőszemüvegnél.

Lézerlabirintusunkban a benne közlekedőket üzemszerűen érheti lézerbesugárzás. A hosszú, több tíz méteres fényutak mellett a diffrakciólimitált, körülbelül 1 mm átmérőjű nyalábok 10–30 mm-re szélesednek, a retinán keltett inger (a csökkenő felületi teljesítménysűrűséggel arányosan) fokozatosan csökken. Ezért automatikus biztonsági kikapcsolóval ellátott nagyobb teljesítményű lézert használunk (lásd fent). Az elektronikus védelmi rendszer személyi felügyelet mellett működik, a nyaláb megszakítása után emberi beavatkozás (egy nyomógomb megnyomása) szükséges a lézerek visszakapcsolásához, amit csak akkor tesz meg a kezelő, ha a labirintusban lévő személy visszamegy a kezdő pozícióba, kikerül a fényútból. A felügyelő személy azt is észleli, ha az automatika nem megfelelően működik (megszakítják a lézer útját, mégsem kapcsol le az elektronika) és a vészleállítóra rácsapva kikapcsolja az egész rendszert.

A rendszer meghibásodása – természetesen – soha nem zárható ki, ezért a kapcsoló dobozon külön vészleállító van, ami az egész elektronikát, lézereket áramtalanítja; a bejövő tápfeszültséget kapcsolja le. Ez így együtt – az egészségügyi berendezésekhez hasonlóan – háromszoros védelem a szándékolatlan besugárzás elkerülésére: üzemi főkapcsoló + elektronikus védelmi rendszer + vészleállító.

A további installációinknál használt lézerek teljesítménye is meghaladja az 1 mW-ot, így potenciálisan veszélyesek lehetnek a szemre.

Az interferenciás (katedrálüveges) berendezés a fejként, 2,5 m magasan van rögzítve, a 3 lézer nyalábjára már 10 cm után oly mértékben kitágul, hogy messze (2-3 nagyságrenddel) alatta marad a szabványban (MSZ EN 60825-1) rögzített, a szaruhártyán megengedett maximális expozíció értékének (MPE), így még vele szemben állva is teljesen veszélytelen.

A Lissajous-görbéket kivetítő 405 nm-es lézer is nagyobb teljesítményű (15 mW), szemünk érzékenysége erre a hullámhosszra több nagyságrenddel van zöld fényé alatt, így csak oldalról látható. A lézert és a fluoreszkáló ernyőt is 2,5 m magasan helyeztük el, és még az ernyő fényes felületéről visszaverődő, mintegy 4 százalékos reflexió sem irányul lefelé, noha az már veszélytelen lenne (< 1 mW). A beállítás, felszerelés közben természetesen védőszemüveget kell használni.

A cukros vízben való – görbült – fényterjedés demonstrálásához szintén kék, 445 nm-es lézert használtunk, 10 mW teljesítménnyel. Itt elvileg bármilyen színű fény jó lenne, de a fényszórás (90°-ban) a hullámhossz negyedik hatványával fordítottan arányos, azaz a kék fény szórt intenzitása a piros (635 nm) fé-

nyének több, mint négyszerese. Beállításakor itt is kötelező a védőszemüveg viselése. Az üvegkádra merőlegesen álló, rögzített lézerből nem lép ki veszélyes szintű lézertény, a túloldalon esetlegesen kilépő nyálábót a téglafal elnyeli.

Megfelelő óvintézkedésekkel – minden esetben rámutatva a lézerek látásunkra veszélyes voltára – a balesetek, szándékolatlan besugárzás elkerülhetők.

A kísérletek összeállításában részt nem vevő látogatókat is figyelmeztetni kell ezen veszélyekre, és a lézerekre figyelmeztető, a szabványokban előírt táblákat kell elhelyezni a megfelelő helyekre (terem ajtajára, a lézerek kilépő nyílásai mellé).

## Összefoglalás

A kis létszámú szakköri csoportban folyó munka pályorientációs célzatú is. A szükséges alapok, tapasztalatok biztosításával szeretnénk ablakot nyitni diákjainknak a tudományos kutatásra és a műszaki tudományokra.

A lézeres barlang különleges színfolt az iskola életében. Olyan hely diákjainknak, ahová nem léphetnek be bármikor, mert titkos, zezugos – ami mindig izgalmas – úton kell odajutni. Egy sötét pince, ami mégis tele van fényekkel! Nem egy készen kapott játéktér, hanem a diákokkal közösen kigondolt, megtervezett és kialakított barlang. A megteremtéséhez elvégzett munka öröme és haszna legalább olyan izgalmas és tanulságos, mint a végeredmény használatba vétele. A hely mérete és szelleme természetesen magában hordozza a folyamatos munkálkodás és újabb ötletek megvalósításának lehetőségét.

Az egész projektben pedig mindvégig benne rejlik a játék, ami vonzóvá teszi az amúgy komoly elméleti alapot és gyakorlati megoldások nehézségét. Remélem, hogy az iskolai lézeres projekt résztvevői közül lesznek olyan fiatalok, akik nem csupán műszaki és természettudományos irányban tanulnak tovább, hanem akár a lézerfizika művelőivé is válnak, az ELI munkatársai lesznek. Legalább ilyen fontos, hogy bárhová is kerüljenek az életben, a természettudományok iránti érdeklődésük megmaradjon.