

reaktorbalesetből azt a következtetést is le lehet vonni, hogy a további súlyos nukleáris baleseteket nagy valószínűséggel el lehet kerülni.

A fukushimaihoz hasonló baleset valószínűsége igen kicsi, hiszen ott olyan, földrengést – amelyet a reaktor még sértetlenül átélt – követő cunami pusztított, amilyen szerencsére csak nagy ritkán (ott korábban még soha nem) történik. A földrengés és a cunami kivédhetetlen, ezek akkor rengeteg halálesetet, sérülést, anyagi kárt okoztak (és nemcsak Fukushima-ban). E közvetlen következményekhez képest a nukleáris baleset igen kevés áldozatot követelt.

A csernobili baleset pedig elkerülhető lett volna, ha a személyzet nem követ el sorozatos hibákat, azaz lényegesen nagyobb technológiai fegyelemmel a további balesetek megelőzhetők. A tragédiát fokozta, hogy a mentésben résztvevők nem voltak kellőképpen felkészítve a feladatra. A lakosság sugárterhelése kisebb lett volna, ha hamarabb tájékoztatják az embereket, kezdik meg a kitelepítést. Ez azonban már túlmutat a technikai felkészültségen, egy zárt, diktatórikus társadalom következménye. Napjainkra már összehasonlíthatatlanul nagyobb eséllyel kerülhet el egy hasonló méretű baleset, illetve a következmények mérséklésére is több lehetőség van.



24. ábra. A múzeum legmegindítóbb terme.

A nukleáris reaktorok biztonsági rendszere többszörös, így csupán *egy műszer* vagy alkatrész meghibásodása, vagy *egy emberi mulasztás*, sőt ezek halmozódása sem vezet tragédiához. Csernobilban az operátorok *sok egymást követő súlyos hibája* – amit a mai biztonsági rendszerek kikapcsolhatatlanul(!) nem engednek meg – vezetett a balesethez. A közlekedés, ahol a legtöbb esetben egyetlen hiba elegendő a tragédiához, csak hazánkban több áldozatot szedett már, mint az összes reaktorbaleset. Az energiatermelés többi módja bőven tartogat veszélyeket a súlytőlégrobbanástól a duzzasztógátak szakadásáig, a savas esőktől az üvegházhatású gázok kibocsátásáig.

A FIZIKA TANÍTÁSA

HOLOGRÁFIA A TANTEREMBEN

Gombkötő Balázs, Bokor Nándor

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizika Tanszék

A holográfia feltalálásakor és az első látványos hologramok készítésekor az alkalmazott technológia csak kutatólaboratóriumokban állt rendelkezésre. Sokáig csak egy nem sokkal szélesebb közönség, az egyetemi hallgatók találkozhattak testközelből hologramok

készítésével, mivel az alkalmazott eszközök és anyagok drágák és veszélyesek voltak. Pár éve azonban már odáig jutott a fejlődés ezen a területen, hogy akár otthoni, akár iskolai, tantermi környezetben is bemutatható, sőt, diákok által is elvégezhető feladat egy



Gombkötő Balázs egyetemi adjunktus a BME-n szerzett mérnök-fizikus diplomát 2001-ben, majd ugyanott PhD fokozatot 2004-ben. Kutatási területei az optikai mérés-technika, fázis-visszaállítás, további érdeklődési körei a holográfia, optikai örvények és a komplex klasszikus mechanika.



Bokor Nándor egyetemi docens a BME-n szerzett villamosmérnök diplomát 1993-ban, majd ugyanott fizikából PhD fokozatot 1999-ben. Munkájában – az optika számos területén végzett kutatásai mellett – legszívesebben a fizika, azon belül kiemelten a relativitáselmélet oktatásának pedagógiai kérdéseivel foglalkozik. Ez utóbbi témában számos publikációja jelent meg a *Fizikai Szemlében*, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.

hologram készítése. Az elérhető egyszerűbb eszközökkel is többféle hologramtípus készíthető, akár holografikus interferogram is.

Gábor Dénes legelső hologramját gázkisüléses fényforrással készítette, amelynek koherenciája még alig-alig volt elegendő a holográfiához. A lézer feltalálása adott nagy lökést a területnek. Az ilyen célra leginkább alkalmas, nagy teljesítményű gázlézerek (Ag-ion, He-Ne, Kr-ion) azonban még ma is igen drágák, üzemeltetésük – vízűtés esetén – szintén drága. Ma már szilárdtestlézerekből is létezik megfelelő koherenciájú és nagy teljesítményű változat a holográfiához, azonban ezek ára sem sokkal kedvezőbb. Szerencsére kisebb méretekben, 5-10 cm-es tárgyak holografálásához elegendő 5-20 mW teljesítmény, ezt az olcsó félvezetőlézerek is képesek – akár különösebb szabályozás nélkül – megfelelő nyalábparaméterekkel előállítani. A megszokott keskeny lézernyalábokkal szemben egy csupasz félvezető lézerdióda eleve táguló nyalábot bocsát ki, így a nyalábtágítás kevésbé kedvelt lépésére sincs szükség.

A másik fő újdonság a rögzítőanyagok területén jelent meg. Korábban a legtöbbször alkalmazott fényérzékeny anyagok az ezüst-halogenid tartalmú emulzió, valamint kiváló tulajdonságai miatt a kromát tartalmú emulziók voltak. Az előbbi típus legfőbb hátrányai a vegyszeres előhívás folyamata, amely veszélyes anyagokat is használ, valamint az öregedés akár a felhasználás előtt, akár utána. Az utóbbi típus pedig eleve veszélyes anyagot tartalmaz, így szintén alkalmazatlan iskolai használatra. A legkevésbé veszélyes, legkevésbé környezetszennyező vegyszereket (például rézgalic, C-vitamin, metol) igénylő Slavich PFG-03M ezüst-halogenid emulzió is legfeljebb középiskolások körében alkalmazható tanári felügyelettel.

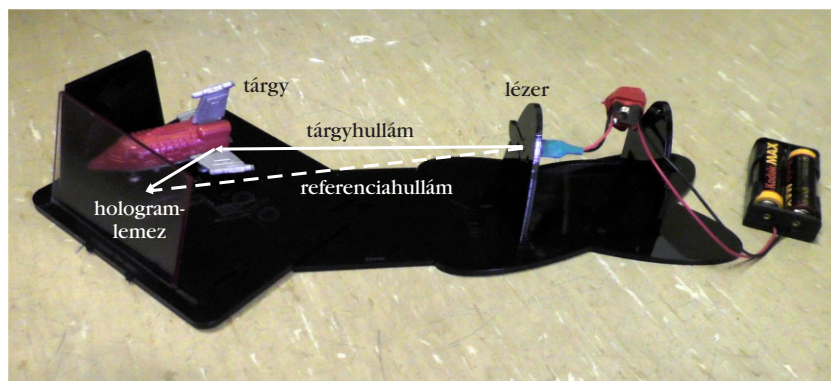
A fent felsorolt anyagokkal szemben a ma elérhető *fotopolimerek* számos előnnyel rendelkeznek. Nem igényelnek vegyi kidolgozást, rosszabb esetben is csak UV-lámpás elő/utókezelésre, vagy utólagos hőkezelésre (például a Bayer cég fóliái) van szükség, de bizonyos típusoknál még erre sem, így ezen típusoknál a hologram magával az expozícióval el is készül. Jelenleg a leginkább diáklarát rögzítőanyag a Litiholo CRT20 instant film [1]. Ennél a típusnál sem elő-, sem utókezelésre nincs szükség, ráadásul a film fotopolimerizációja alsó intenzitásküszöbvel rendelkezik, így a tanterem teljes elsötétítésére sincs szükség. 16 mikronos vastagsága a használt lézer hullámhosszának sokszorosa, ennek köszönhetően alkalmas reflexiós látványhologramok készítésére, diffrakciós hatásfoka pedig – fázishologram lévén – ideális esetben közel 100%. Nem lehet túlexponálni, mivel a polimerizáció idővel – körülbelül 5-6 perc után, amikor elfognak a monomerek – magától leáll. „Színes” anyagnak számít, így vörös, sárga vagy zöld lézerral is használható.

(Kék színben diffrakciós hatásfoka már kicsi.) A több-rétegű fólia belsejében az emulzió védett, az egész fólia pedig egy üveglemezre kasírozva érkezik. A kész hologramok tartósak, csak arra kell ügyelni, hogy ne karcolódjanak, és hogy ujjlenyomat lehetőleg ne kerüljön rájuk. A megfelelő sötét háttér biztosításához és a mechanikai védelemhez akár az üveg, de javasoltan inkább a fólia oldala fekete akrilfestékkel lefújható. (Ma már akrilfesték spray-ből is kapható kevésbé veszélyes, vízbázisú kivétel.) Az 5×7 cm-es vagy a négy-szer nagyobb területű lemezeket először egy komplett csomagban érdemes megvásárolni, ez tartalmazza a megfelelő lézerdiódát és az összes szükséges mechanikai tartóelemet is, tehát a hologram elkészítéséhez csak az alkalmas helyszínt kell biztosítani. Ennek érdemes egy lesötétíthető szobát vagy tantermet választani. A rezgésmentesség érdekében az elrendezést legjobb egy stabil asztalon, vagy a terem padlóján (lehetőleg ne parketten, hanem kőburkolaton vagy linóleumon) összeállítani.

Az utóbbi években a BME Fizika Tanszékén számos tapasztalatot szereztünk iskolás gyerekek és a holográfia találkozásáról. A *Nobel-díjas kísérletek középiskolásoknak* sorozat részeként több éve fut egy holográfia- és hologramkészítés-bemutató [2]. (2016-ban a BME Gyerekegyetem részeként felső tagozatosok is beleszólhattak ebbe a látványos tudományterületbe.) Itt az érdeklődő diákok először rövid elméleti ismertetőt kapnak (mi a különbség a fénykép és a hologram között, miért kell az utóbbi elkészítéséhez koherens fényforrás, miért kell kiküszöbölni a rezgéseket, hogyan zajlik a hologram felvétele és rekonstrukciója), majd tanári vezetéssel részt vesznek látványhologramok készítésében. Általános tapasztalat, hogy a diákokat lenyűgözi a képek térbelisége, élethűsége, és túlnyomó többségük életében először lát hologramot vagy akár lézert is. A holográfia kapcsán jól bemutatathatók a valóban térbeli holografikus kép, illetve a 3D TV és mozi sztereografikus képe közötti különbségek. A kész hologramokat a csoportok hazavihetik, így kézzel fogható emlékek is marad.

Az alábbiakban két holografikus elrendezést mutatunk be (egy transzmissziós és egy reflexiós típusú), amelyek akár egy középiskolai tanteremben is könnyen felépíthetők. Kifejezetten ügyeltünk arra,

1. kép. A transzmissziós hologram felvételi elrendezése.



hogya ne használjunk olyan optikai vagy mechanikai elemeket, amelyekkel egy középiskolai szertár esetleg nem rendelkezik, ezért mindkét elrendezésnél kizárólag a Litiholo cég hologramkészleteiben található elemeket használtuk. Az egyetlen kiegészítés, hogy (még előzőleg, egyetemi hallgatói méréshez előkészítve) a lézerdióda és a tápegység közé beiktattunk egy kapcsolót, de az nyugodtan kihagyható az elrendezésből.

Az 1. kép transzmissziós hologram munkakészítésének elrendezését mutatja. A lézerdiódból kiinduló szétartó nyaláb egy része a tárgyat – egy három ponton megtámaszkodó műanyag játékreplőt – éri, majd onnan a hologramlemezre szóródik. Ez a tárgy hullám. (A tárgy kiválasztásánál ügyelni kell arra, hogy a lézerdióda hullámhosszán erősen reflektáljon. Vörös lézerdióda esetén a legjobb piros és/vagy fehér színű tárgyat használni.) A szétartó nyaláb másik része közvetlenül a hologramlemezre világítja meg. Ez a referenciahullám. Mint az 1. képen látható, a transzmissziós hologramokra jellemző módon a tárgy hullám és a referenciahullám azonos oldalról éri a hologramot.

A felvételt a Műegyetem Fizika Tanszékén, a 19. labor linóleumpadlóját készítettük el. A tárgy behelyezése után körülbelül 1 percet vártunk az exponálásig, hogy az esetleges mechanikai rezgések elhaljanak. A lézerdióda bekapcsolása után az exponálás körülbelül 10 percig tartott.¹ Exponálás után – a fent leírtak szerint – a hologram mindenfajta vegyi eljárás vagy utókezelés nélkül, azonnal láthatóvá vált (2. kép).

Itt a tárgyat egyszerűen kivettük a helyéről (közben a hologramlemez a helyén, a lézerdióda pedig végig bekapcsolva maradt!), így a lézerdióda fénye az elkészült holografikus rácson diffraktálódva létrehozta a kis repülőgépet térbeli rekonstruált képét. A 2. képen a tárgyat az előtérbe helyeztük, hogy a fotón jól elkülönüljön a tárgy háromdimenziós holografikus képétől. Ez utóbbi a hologramlemezen, mint ablakon keresztül nézve tűnik a szemünk elé.

Ezután a Litiholo-készlet reflexiós hologramokhoz való műanyag kiegészítő elemeiből építettük fel a 3. képen látható elrendezést.

Itt a lézerdióda – mint látható – egy magasított állványra kerül, és fénye felülről, körülbelül 45°-ban éri a hologramlemezre. Ha a tárgyat szorosan a hologramlemez mögé helyeztük, a lézerdiódból érkező fény egyrészt közvetlenül megvilágítja a hologramlemezre (ez a referenciahullám), másrészt a hologramlemezen átha-

¹ Ha a lézerdióda és a tápegysége közé nem építettünk volna kapcsolót, akkor a felvétel úgy zajlott volna, hogy a működő lézerdióda fényét fekete kartonpapírral kitakartuk volna addig, amíg a tárgy a helyére kerül és a mechanikai rezgések lecsillapodnak. Utána a kartonpapírt óvatosan eltávolítva kezdődött volna az exponálás.

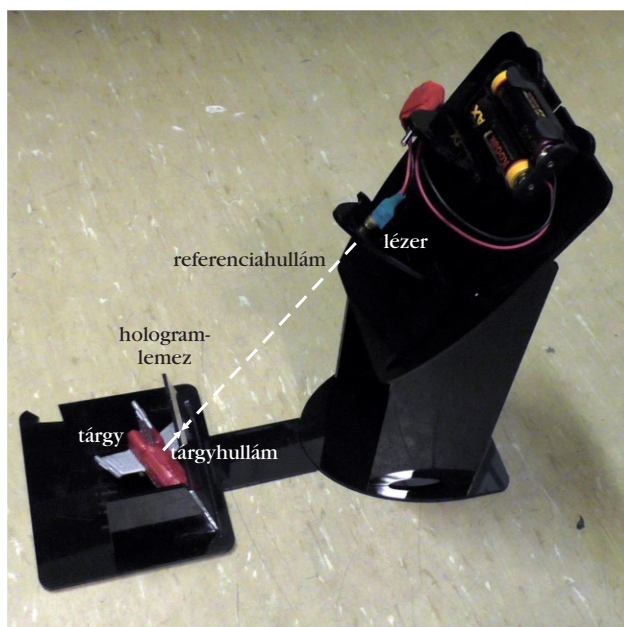


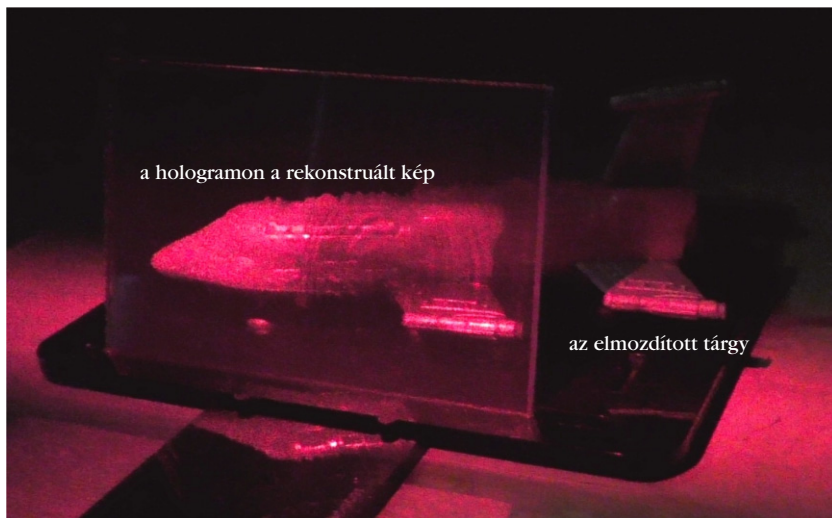
2. kép. A transzmissziós hologram rekonstrukciója.

ladva megvilágítja a tárgyat, és arról visszashóródik a hologramlemez felé (ez a tárgy hullám). Így ennél az elrendezésnél – a reflexiós hologramokra jellemző módon – a tárgy hullám és a referenciahullám ellentétes oldalról éri a hologramot. A felvétel ugyanazon a helyszínen, ugyanolyan időbeli paraméterekkel zajlott, mint az 1. kép transzmissziós hologram-elrendezésénél. A körülbelül 10 perces exponálás végén óvatosan kimozdítottuk a tárgyat a helyéről, miközben a lézerdióda bekapcsolva maradt, és továbbra is megvilágította a hologramlemezre. A holografikus rácson ekkorra már rögzült a lemezben, és a lézerdióda fénye a rácson diffraktálódva ismét jó hatásfokkal létrehozta a tárgy háromdimenziós virtuális képét (4. kép).

A 2. és 4. képet összevetve láthatjuk, hogy a rekonstruált kép mindkét esetben a hologramlemez, mint ablak mögött látszik elhelyezkedni. A különbség az, hogy a transzmissziós hologramnál (2. kép) a

3. kép. A reflexiós hologram felvételi elrendezése.





4. kép. A reflexiós hologram rekonstrukciója.

megvilágítás a hologramlemez mögül érkezett (a lézertióda látható is a 2. kép jobb felső sarkában), míg a reflexiós hologramnál (4. kép) a lézertióda fénye előlről, a fényképezőgéppel azonos oldalról világította meg a hologramlemezt.

Hologramkészítéshez hagyományos, ezüst-halogenid- vagy kromát-tartalmú emulziókat használva alapkövetelmény, hogy a felvétel ideje alatt a laborban a lehető legteljesebb *sötétség* legyen (legfeljebb olyan hullámhosszú halvány fény világíthat, amelyre az emulzió nem érzékeny), és az elrendezés minél *rezgésmentesebb* legyen.² Ezek a szigorú feltételek egy középiskolai fizikaórán vagy -szakkörön nem, vagy csak nagy áldozatok árán teljesíthetők. Kipróbáltuk tehát, hogy a lézertiódás, *fotopolimeres* elrendezésnél mennyire lazíthatók a sötétséggel és a rezgésmentességgel kapcsolatos követelmények. A 3. képen látható elrendezést ezért olyan „mostoha” körülmények között is teszteltük, amelyek ezüst-halogenid- vagy kromát-tartalmú emulzióknál szoba sem jöhetnének. A helyszín ezúttal egyikünk (G.B.) egyetemi szobája volt, amely parkettburkolatú padlóval és hatalmas ablakokkal rendelkezik. Az ablakokat bézs színű szalagfüggönnyel sötétítettük el abban a napszakban, amikor az ablak az épület árnyékos oldalán van, de

² Ennek érdekében az optikai és mechanikai elemeket általában légpárnás lengéscsillapítókra nyugtató, nagy tömegű vasasztalon szokás felállítani.

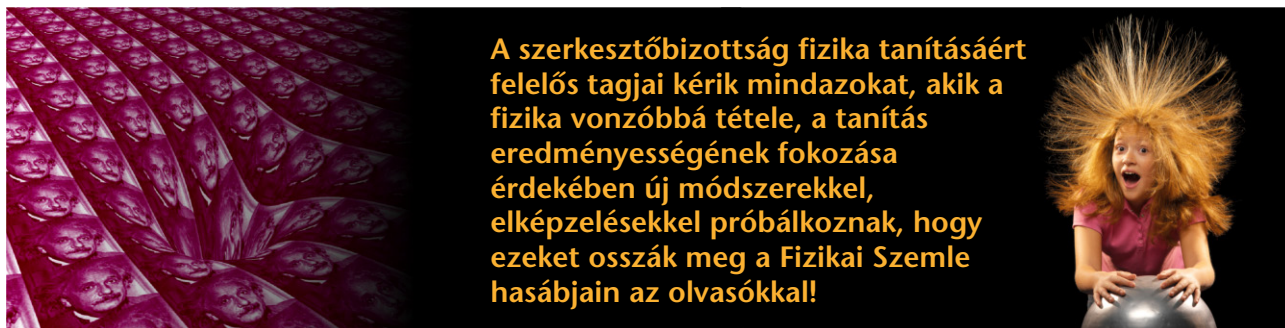
ez is bőven hagyott annyi fényt beszűrődni az egyetem parkja felől, hogy a szobában kényelmesen olvasni lehetett. Ráadásul a folyosóról az üvegajtón át is beszűrődött a fénycsövek fénye. A 3. képek megfelelő elrendezést a szoba egy árnyékos sarkában, a parketten állítottuk fel. A tárgy behelyezése után ismét 1 percet vártunk, majd körülbelül 10 percig exponáltunk. Meglepetésünkre még ilyen elképesztően igénytelen körülmények között is egészen jó minőségű reflexiós hologramot kaptunk, amelynek fényessége majdnem elérte a 4. képen látható, teljes sötétségben és stabilabb talapzaton felvett hologramét. Mindezekből azt a következtetést von-

hatjuk le, hogy a lézertiódás, fotopolimeres hologramkészlet bármely középiskolában, akár egy sötétítő vagy szalagfüggönnyel elsötétíthető tanteremben is szép, látványos hologramokat tud produkálni.

A hologramkészítés önmagában is nagy élményt nyújt a középiskolás diákoknak. Ezt az élményt néhány ötlettel fokozhatjuk. Megpróbálhatunk valamilyen optikai eszközt, például homorú vagy domború tükröt választani tárgynak. Ekkor – reflexiós hologram-elrendezés esetén – az elkészült hologram maga is homorú vagy domború tükörként fog viselkedni, vagyis gyártottunk egy *holografikus optikai elemet*. Tanulságos kísérlet az is, amikor a hologramot úgy rekonstruáljuk, hogy közben a tárgyat a helyén hagyjuk. Ekkor a tárgyat és a holografikusan rekonstruált képét egymásra lapolódva, egyszerre látjuk. Ha most a tárgyat parányi mértékben elmozdítjuk – például ráfújunk, vagy óvatosan az ujjunkkal megérintjük –, a rekonstruált kép és a tárgy már nem lesz tökéletesen ugyanaz, és interferenciacsíkok jelennek meg a tárgy képén: ezzel az egyszerű kísérlettel a *holografikus interferometria* alapelvét illusztrálhatjuk. Összességében tehát elmondható, hogy a bemutatott készlettel – egyszerűsége ellenére – élményt is adó, látványos és változatos demonstrációs órát lehet tartani.

Irodalom

1. <https://www.litiholo.com>
2. <http://felvi.phy.bme.hu/index.php/Holográfia>



A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kérik mindazokat, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Fizikai Szemle hasábjain az olvasókkal!