

FIZIKAÓRÁK FÉNYFOLTJAI TANÁRI EMLÉKMORZSÁK

Honyek Gyula

középiskolai tanár,
ELTE Radnóti Miklós Gyakorlóiskola
honyek@gmail.com

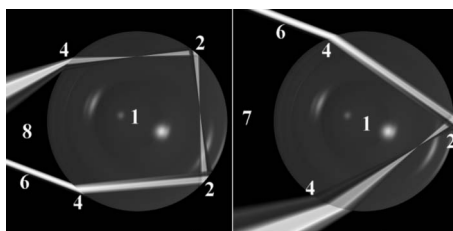
Ez az írás egy pályájának végén járó fizikatanár szubjektív visszaemlékezése néhány „fényes” élményére. 1975-ben végeztem az Eötvös Loránd Tudományegyetem fizikus szakán, ezt követően tíz évet töltöttem az ELTE Általános Fizika Tanszékén, ahol a kutatómunka mellett főként fizikatanár szakos hallgatókat oktattam. Néhány év alatt rájöttem, hogy a tanítást jobban szeretem a kutatásnál, így fizikatanári képesítést szereztem, és 1985-től gimnáziumi fizikatanárként dolgoztam egészen 2011-es nyugdíjazásomig.

Szivárvány

1984-ben (ekkor még az egyetemi tanszéken dolgoztam) *Farkas Csaba* diákköri dolgozatot készített az én témavezetésemmel a szivárványról. Csaba akkor harmadéves matematika-fizika szakos hallgató volt, nagy lelkesedéssel dolgozott, és kiváló munkát végzett. Szivárványt mindenki látott, hiszen meglehetősen gyakori jelenség, de a kettős szivárvány látványában csak ritkán gyönyörködhetünk.

Közismert, hogy a szivárványt esőcseppek hozzák létre. A felhőben lebegő, gömb alakú esőcseppeket megvilágító fehér napfény összetett, tartalmazza a látható spektrum színeit, vagyis a különböző hullámhosszakot (frekvenciákat), amelyekre nézve a víz törésmuta-

tója kissé változó. Legkevésbé a vörös, legjobban az ibolyaszínű fény törik meg, és ezért a vízcseppből (a prizmaéhoz hasonlóan) színes fénynyaláb távozik. A jobb oldali ábrán olyan sugármenetet látunk, amikor a fény egy belső visszaverődés után lép ki a vízcseppből, ez eredményezi az elsőrendű szivárványt, amit *főszivárványnak* hívunk. A bal oldali felső ábrán a fény fordítva, az óramutató járásával ellentétes irányban halad a vízcseppben, két belső visszaverődés után lép ki, és hozza létre a másodrendű *mellékszivárványt*. A különböző körüljárási irányok magyarázzák, hogy a fő- és a mellékszivárványban a színek sorrendje fordított, és azt is megérthetjük, hogy a mellékszivárvány szélesebb, mint a főszivárvány. További elmélkedést igényel, hogy megfejtjük, miért csak speciális szögben belépő sugarak hoznak létre szivárványt (ahogy az *1. ábrán* történik), miközben a napfény



1. ábra • A szivárvány kialakulása (URL1)

teljesen megvilágítja a vízcseppet, illetve, hogy miért éppen 42° alatt látjuk a főszivárványt és nagyjából 52° alatt a mellékszivárványt. Ezt 1637-ben René Descartes tudta elsőként megmagyarázni, aki rájött: csak ezekre a speciális beesési szögekre érvényes az, hogy ha két, egymáshoz nagyon közeli fénysugár lép be a vízcseppbe, akkor ezek kilépéskor is párhuzamosak maradnak. Ezek a beesési szögek a szivárvány színeire kissé különbözőek, vagyis más-más színre kissé eltérnek egymástól. Ha a közel párhuzamos belépő sugarak kilépéskor is párhuzamosak maradnak, akkor az a szín felerősödik, egyébként a széttartó sugarak összekeverednek, és fehér fényt eredményeznek. Ennél tovább középiskolában nem lehet jutni a szivárvány elméleti leírásában, vagyis nem haladhatjuk meg a geometriai optika kereteit. Szélsőérték-számítással (matematika tagozatosokkal) meghatározhatjuk a szivárvány szögeit, azonban további érdekes jelenségeket nem tudunk értelmezni.

Aki figyelmesen megnézte a főszivárvány színeit, észrevehette, hogy nem egyszerűen a színek sorrendjét látja felülről lefelé (vörös, narancs, sárga, zöld, kék, ibolya), hanem a kék alatt egyre halványabban ismétlődő lila íveket is láthatunk. Ennek az a magyarázata, hogy a szivárvány interferenciajelenség, minden színre erősödések és gyengítések sorozata jön létre, azonban az elsőrendű maximumok többé-kevésbé elnyomják a többit. A Huygens–Fresnel-elv szerint a hullámfront minden egyes pontjából elemi hullámok indulnak ki, amelyek interferenciája eredményezi az új hullámfrontot. Síkhullám esetén (homogén közegben) az új hullámfront is sík, ezért terjed a fény egyenes vonalban. A vízcseppbe (a Descartes-féle szögben) belépő síkhullám viszont nem síkhullámként lép ki, hanem hullámos felületként, amely-

nek elemi hullámai eredményezik a szivárvány színeinek interferenciáját. Matematika-ilag ezt egy integrállal lehet leírni, amit a szivárvány Airy-féle integráljának nevezünk.

Ha a szivárvány interferenciajelenség, akkor az erősítések és gyengítések okozta jellegzetes vonalсорozatot egyetlen színnel is létre lehet hozni. Ezt valósította meg egyetlen vízcseppen Farkas Csaba vörös színű hélium-neon lézerrel (ami akkoriban terjedt el a világ oktatási intézményeiben). A vízcsepp egy függőleges üvegpálca végén függött, amit vízszintes lézersugárral világított meg. Nemcsak a fő- és a mellékszivárványt észlelte az elsötétített laborban, hanem egészen a 13-ad rendű szivárvány megfigyeléséig is eljutott. Számítógépes programot is írt az akkor korszerűnek számító ABC-80-as gépre, amit színes tévéhez lehetett kapcsolni. Erről dolgozatában úgy készültek képek, hogy a színes tévé képernyőjét filmes fényképezőgéppel lefényképezte. (Mielőtt megmosolyogjuk az elavult technikát, gondoljunk arra, hogy a fény évében jelen folyóirat csak fekete-fehér képeket közöl.)

Fényfoltok szappanhártyán

1988-ban Baranyai Klára ötödéves matematika-fizika szakos hallgató (ELTE) szakdolgozati témavezetője voltam. Dolgozatának címe: *Színek megjelenése különböző fizikai kísérletekben*. A kiváló és igen részletes szakdolgozat talán legélvezetesebb része egy híres kísérletező, Jearl Walker (1987) cikkében szereplő demonstráció adaptálása volt. Mindannyian láttunk már színes csíkokat, foltokat szappanhártyán, szappanbuborékokon. Ebben az esetben egy viszonylag nagyméretű, hagyományos, kocka alakú téásdoboz kör alakú nyílására kell kifeszíteni a szappanhártyát. A doboz belsejét fekete, fényelnyelő anyaggal

kell borítani, hogy amikor a hártát megvilágítjuk, akkor csak a róla visszaverődő fényt észleljük, ne zavarjon a doboz belsejéből visszaverődő fény. A hártya képét ernyőn jeleníthetjük meg. A 2. ábra mutatja a kísérleti összeállítást.

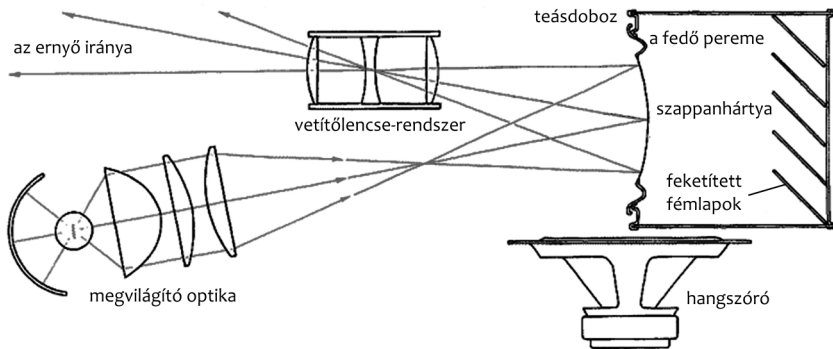
Idézek a szakdolgozatból: „A kezdetben szürke kép felülről lefelé haladva kiszínesedik. Vízszintes színes csíkok jelennek meg, amelyek lassan lefelé vándorolnak. A felső csíkok egyre szélesebbek lesznek. Hosszú idő után a hártya teteje elveszti színét, az ernyőn feketének látszik. Ezután a hártya elpattan.”

A jelenség magyarázata, hogy a szappanhártya első és hátsó felületéről is történik visszaverődés, és ez a két fénynyaláb interferenciára képes. Furcsa színek jönnek létre (ugyanúgy, mint például az olajfoltokon), nem a prizma színeképenek szép tiszta színeit látjuk. Ennek az a magyarázata, hogy bizonyos színek esetében erősítés, más esetekben gyengítés, esetleg teljes kioltás is történhet, és ezek keveréke jut a szemünkbe. A függőleges szappanhártya két felülete közötti folyadék lassan lefelé mozog, ezért vastagsága felülről lefelé egyre nő. A színeket a rétegvastagság határozza meg. Erősítéskor az optikai útkülönbségnek a féll hullámhossz páros számú

többszörösének, gyengítéskor páratlan számú többszörösének kell lennie. Ezért ismétlődnek a színek, ezért alakulnak ki a csíkok. Amikor a hártya felül már annyira elvékonyodik, hogy a látható fény hullámhosszánál sokkal kisebb lesz, akkor már sem erősítés, sem gyengítés nem történik, ilyenkor egyáltalán nem verődik vissza fény a hártáról, hanem a megvilágító fény teljesen áthalad rajta, ezért a hártya felső részét egyre szélesebben feketének látjuk, csak alatta maradnak meg a csíkok. Hanghullámokkal kör alakú rezonanciaábrákat kelthetünk, mert így állóhullámokat alakíthatunk ki a hártában. A tanulók különösen azt élvezték, amikor az akkoriban népszerű heavy metal zene ütemére mozgott, kavargott a színes „szappanhártya-forgatag”.

Autók középső visszapillantó tükrre

A legtöbb gépkocsivezető tudja, hogy ha az autók középső visszapillantó tükrén egy kis kallantyút elfordítunk, akkor ugyanaz a tükörkép jelenik meg, de halványan, ami éjszakai vezetéskor hasznos lehet, hogy a mögöttünk haladó jármű fénye ne vakítson el minket. Gyárilag ezek a középső tükrök síktükrök, vagyis se nem nagyítanak, se nem kicsinyítenek (persze vannak, akik ezt a tükröt dombo-



2. ábra • A Jearl Walker-féle kísérleti elrendezés

rú, tehát kicsinyítő panorámatükörre cserélik). Egyszer valahogyan eszembe jutott, hogy megértsem, hogyan működnek ezek a középső tükrök. Sehol sem találtam leírást róluk (lehet, hogy rosszul kerestem, mert mára már axiómává vált, hogy az interneten minden fent van), ezért megkérdeztem a kollégáimat, ismerőseimet, hogy mit tudnak erről. Mivel nem kaptam választ (illetve olyan bonyolultak voltak a javasolt megoldások, hogy azokat elvettem), így magam próbáltam megfejteni a rejtvényt, ami végül is sikerült.

Az autók középső visszapillantó tükrének a „tükkje” az, hogy bár a tükrő homlokfelülete is sík, hátlapja is sík, de ez a két sík nem párhuzamos, hanem 5–6°-os szöget zár be egymással. A hátlap foncsorozott, vagyis ezüst-, illetve alumíniumtartalmú bevonattal van ellátva, ami nagyon jó fényvisszaverő. Ezzel szemben a homlokfelület egyszerű üveg, ami részben visszaveri, részben átengedi a fényt. Ha tehát úgy forgatjuk a tükröt, hogy a hátsóoldali tükröző felület a szemünkbe juttatja a visszavert fénysugarakat, akkor fényerős képet látunk, ha pedig éjszaka elforgatjuk a tükröt, és a homlokfelületét használjuk fényvisszaverő közeghatárnak, akkor gyenge fényintenzitású képet láthatunk.

A tükrő működését jól szemlélteti, ha lézer-mutatópálcával megvilágítjuk, és egy ernyőre vagy a falra kivetítjük a visszavert sugarakat. A visszavert fényfoltok egy egyenes mentén helyezkednek el, egymástól meglehetősen nagy távolságra, és általában négy-öt, esetleg még több foltot is megfigyelhetünk. Ezek közül az első gyengébb, mint a második: az elsőt használjuk éjszakai vezetéskor, a másodikat nappal, azonban fokozatosan gyengülve még további visszavert sugarakat is láthatunk. Ez azért van, mert a fénysugár egy része ide-oda „pattog” a két üveglap között,

miközben gyengül, ahogy egyre több sugár lép ki a homloktagon.

Manapság a fizikatanításnak sok nehézséggel kell megküzdenie, ezek közül az egyik az, hogy az órákon jól bevált gyakorlati alkalmazásként tanított eszközök elavulnak. Például ma már nem használnak fotocellát; alig használják a bimetált; hiába vannak sorba kötve a karácsonyfaizzók, nem alszik el a fűzér, ha kiég egy izzó, hanem fogja magát, és azonnal rövidzárú alakul; a mágneses memóriákat elektrosztatikus elven működő memóriák váltották fel a mobilok, kamerák memóriakártyáiban, és még hosszan sorolhatnánk. Hasonló dolog történt az autók középső visszapillantó tükrével is. A legújabb autókban már nincs kis kallantyú a tükrön, mert a tükrő automatikusan észleli a külső és belső fényviszonyokat, „tudja”, hogy éjszaka van, és „érzi”, hogy túlságosan erős a mögöttünk jövő jármű fénye, ezért elsötétíti a tükrő képét. Fototranzisztorral vagy fotodiódával érzékeli a jármű a fényintenzitást, és az ún. elektrokromatikus hatást kihasználva sötétíti el az üveget meglepően gyorsan és minimális energiafelhasználással. Vannak manapság már okos üvegek (*smart glass*) is, nemcsak okos telefonok és okos tévék. Lassan a környezetünkben lévő tárgyak mind „okosabbak” lesznek, mint mi, legalábbis sokszor ilyen érzések támadhatnak bennünk.

Háromdimenziós szemüvegek régen és most

A fényképezés, a mozi megjelenésével egyidejűleg felmerült az emberekben az igény, hogy a képet térben lássuk, amit ma már a fiatalok mind így mondanak, hogy 3D-ben. A háromdimenziós fényképezés valamikor a XIX. század végén kezdődött, amikor két különböző szögű fényképeztek le ugyanazt a tárgyat, és a két papírképet egy olyan eszközzel

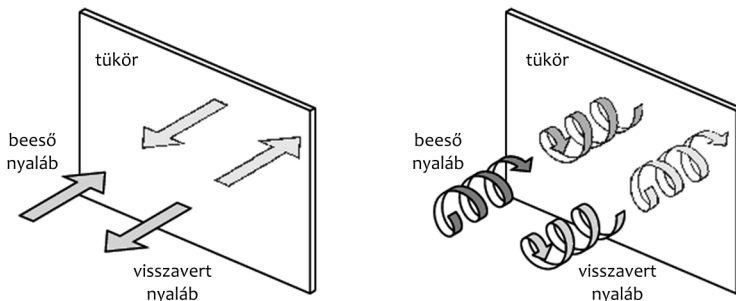
(a sztereoszkópba) tették, hogy egyik szemünkkel csak az egyiket, másikkal csak a másikat lássuk. A múlt század első felében minden gimnázium szertárában volt ilyen eszköz, tartozott hozzá gazdag képsorozat, amelyek egy-két középiskola jól őrzött szertárában még ma is megtalálhatók.

Évtizedekkel ezelőtt sokan jóslták, hogy a holografikus film lesz a térbeli mozi megoldása. A jóslat nem vált be, ám egyre népszerűbbek a multiplex mozikban a 3D-filmek, amelyeket a közönség speciális szemüveggel lát három dimenzióban. Ha megkérdezzük egy fizikatanárt, hogyan működik az ilyen mozi, mire való a szemüveg, nagy valószínűséggel a következő választ kapjuk: A szemüvegben a két lencse helyén polárszűrőket találunk, amelyek csak egymásra merőleges polarizált-ságú fényt engednek át. A moziban két vetítógép két képet vetít a vászonra, de úgy, hogy ezek a képek polarizált fényűek, továbbá a két kép egymásra merőleges polarizáltságú. Az egyik szemünkbe csak az egyik kép juthat el a szemüvegen át, míg a másik szemünkbe csak a másik, és az agyunk a két képből térhatású látványt hoz létre. Nagyjából ez lenne a tanárok válasza, ami régebben helyes is volt, mára azonban némiképp megváltozott a helyzet.

A mai 3D-mozikban nem lineáris polárszűrőket használnak, hanem ún. cirkulárisan polárosakat. A lineáris polárszűrő a polarizálatlan fényből olyat állít elő, amelyben az elektromos vagy a mágneses mező rezgése egyetlen síkban történik. Ilyen polárszűrőket hosszú, párhuzamos molekulákat tartalmazó műanyag lemezekkel tudnak a legegyszerűbben előállítani, és régebben valóban ilyen lemezek voltak a 3D-szemüvegekben. A cirkuláris polárszűrőkön áthaladva a fény megcsavarodik, mintha egy csavarvonal haladna

előre. Az elcsavarodás lehet jobbcsavar vagy balcsavar, amit úgy képzelhetünk el, hogy a fény a kiegyenesített hüvelykujjunk irányába halad, miközben a többi ujjunk mutatja az elcsavarodás irányát. A mai mozikban azért változtattak a régihez képest, mert a régi rendszer csak akkor működött tökéletesen, ha teljesen egyenesen tartottuk a fejünket. A mai 3D-mozikban akármerre dönthetjük a fejünket, ugyanolyan jól érvényesül a térhatás.

Érdekes kísérletet végezhetünk, ha mindkét fajta (régi és új) szemüvegünk is van. Először vegyük fel a régi szemüveget, és álljunk tükör elé, mondjuk a fürdőszobában, ha ott elég erős a fény. Csukjuk be az egyik szemünket, és nézzük meg a tükörben a tükörképünket. A nyitott szemünket látjuk, a csukott szemünket viszont nem, olyan, mintha átlátszatlan fekete fólia lenne a szemüvegben a csukott szemünk oldalán. Ezt könnyen megérthetjük, hiszen a nyitott szemünkről a tükörbe érkező kép éppen olyan polarizáltságú, mint amit a nyitott szemünk előtti polárszűrő átenged, a tükör nem változtatja meg a lineárisan poláros fényt. A csukott szemünkről érkező, merőleges polarizáltságú fényt a nyitott szemünk előtti szűrő nem engedi át, ezért nem látjuk a csukott szemünket (3. *ábra*, balra). Ha viszont ugyanezt a kísérletet az újfajta 3D-szemüveggel végezzük, akkor az a furcsa látvány fogad, hogy éppen fordítva, a csukott szemünket látjuk a nyitott szemünkkel, viszont a nyitott szemünket nem látjuk, mert előtte feketévé válik a fólia. Ennek az a magyarázata, hogy az elcsavarodást a tükör nem változtatja meg, de a haladási irányt igen, amint ez a 3. *ábra* jobb oldalán látható. Vagyis a tükör a jobbcsavarból balcsavart, a balcsavarból jobbcsavart állít elő. Tehát ha mondjuk a csukott szemünk előtt lévő polárszűrő balcsavart hoz létre, akkor ebből



3. ábra • Kísérlet térhatású képet előállító szemüveggel

a tükör jobbsavart képez, amit viszont a nyitott szemünk előtti polárszűrő átenged, ezért látjuk a csukott szemünket. Viszont a nyitott szemünkből jobbsavaros fény érkezik a tükörrre, ami balsavarosként verődik vissza, de ezt nem engedi át a nyitott szemünk előtti polárszűrő, tehát nem láthatjuk a nyitott szemünket!

Szemüvegek és kontaktlencsék

Hagyományosan a fénytan tanításakor az egyik legfontosabb alkalmazásként a szemüveget szoktuk emlegetni. Furcsa módon a kontaktlencséről szinte soha nem teszünk említést. Pedig a világban igencsak elterjedőben vannak, leginkább az Egyesült Államokban és Japánban. Ahogy a szemüvegek esetében is, ugyanígy a kontaktlencsék terén is hatalmas a fejlődés. Vannak már bifokális, illetve multifokális kontaktlencsék is, ez utóbbiakat szokás nálunk progresszív lencsének is hívni. Ezeknek meghatározott helyzetben kell állniuk, hogy például az alsó részük erősebb dioptriájú, a felső pedig gyengébb dioptriájú legyen. Az állandó pozíciót például úgy lehet elérni, hogy a kontaktlencse alsó peremét kissé nehezebbre gyártják, és egyszerűen a gravitáció mindig beforgatja a kontaktlencsét a megfelelő helyzetbe, hiszen ezek

a lencsék szinte úsznak a szaruhártya állandóan folyadékkal borított felületén.

Sokan vannak, akiknek van szemüvegük is, kontaktlencséjük is, és szerencsés esetben mindkettővel élesen látnak. Érdekes megfigyelést tehetünk arról, hogy ugyanakkorának látjuk-e a tárgyakat kontaktlencsével, illetve szemüveggel, mint pusztá szemmel. Nem könnyű a megfigyelés, mert csak akkor hordunk szemüveget vagy kontaktlencsét, ha nélkülük nem látunk tisztán. Mégis azt a talán meglepő megállapítást tehetjük, hogy a kontaktlencsék gyakorlatilag nem változtatják meg a tárgyak látszólagos méretét, velük mindent ugyanakkorának, csak élesebbnek látunk. Ezzel szemben, ha pozitív dioptriás szemüvegünk van, akkor nagyobbak látjuk a világot, ha viszont negatív dioptriásra van szükségünk, akkor szemüveggel minden kisebbnek látszik. Ennek az a magyarázata, hogy ha a korrigáló lencse nagyon közel van a szemünkhöz (ez a kontaktlencse esete), és ha mondjuk négyszeres nagyítású képet állít elő a szemünktől 25 cm-re lévő könyvről, akkor a lencse által előállított látszólagos kép éppen négyszer messzebb, tehát a szemünktől 1 méterre keletkezik. A kép négyszer nagyobb, de négyszer messzebb is van, tehát ugyanakkorának látjuk, mint kontaktlencse

nélkül. Persze mindez nagyon kellemes a számunkra, mert az 1 méterre lévő dolgokat már tisztán látjuk a pusztá szemünkkel, viszont az 1 méterre lévő könyv betűi már olyan kicsiknek tűnnek, hogy nem tudjuk elolvasni, hiába nyújtjuk messzire a kezünkben lévő könyvet. A szemüvegek lencséje néhány milliméterre van a szemünktől, ezért a fenti érvéles csak közelítőleg érvényesül, ilyenkor a látásunk szögnagyítása kissé megváltozik.

Elgömbülő fény változó koncentrációjú oldatokban

Végezetül egy érdekes jelenségről írok, amelyet lehet elméleti feladatként is tárgyalni, de talán még érdekesebb a kísérleti megfigyelése. Azt szoktuk mondani, hogy a fény egyenes vonalban terjed, de ez a kijelentés csak homogén közegekre érvényes. Ha például különböző koncentrációjú sóoldatokat rétegezzünk egymásra, de még jobb, ha ugyanezt vizes cukoroldatokkal tesszük, akkor jól megfigyelhető, hogy a fény elgömbül az oldatban. Történt egyszer, hogy egy népszerű országos verseny számára kértek tőlem feladatot, és én éppen ezzel a jelenséggel kapcsolatban fogalmaztam meg a kérdést, amely lényegében így hangzott: „Egy közegben függőleges irányban változik az optikai törésmutató. Erre merőlegesen vékony fénysugarat indítunk, amely a közegben körív mentén halad. Hogyan függ a törésmutató a magasságtól?” (Gnädig et al., 2014) A feladat nagy felháborodást váltott ki nemcsak a diákok, hanem a tanárok részéről

is, amit a verseny szervezője végül úgy szerelt le, hogy kísérletileg megvalósította az összeállítás, és láthatóvá tette a jelenséget.

Mi okozta a felháborodást? Mit gondoltak a versenyzők? Úgy érveltek, hogy a törésmutató csak függőlegesen változik, vízszintesen nem, tehát a vízszintesen érkező vékony fénysugár csak egyféle törésmutatóval „találkozik”; azzal, amit a közegbe lépésekor talál, tehát egyáltalán nem térhet el az egyenes iránytól. Erre a megállapításra a diákokat (és számos kollégát is) az vezette, hogy a geometriai optika végtelen vékony fénysugarát akarták alkalmazni erre az esetre is. Azt kellett volna észrevenni, hogy nincs végtelenül vékony fénysugár, hanem csak véges vastagságú létezhet. Ha tehát a törésmutató függőlegesen változik, mondjuk, felfelé csökken, akkor a nyaláb teteje olyan közeget észlel, amelyben gyorsabb a fény, az alja viszont lassabban halad, vagyis a fénysugár lefelé elgömbül!

A fizikában nagyon sokszor egyszerű modelleket használunk, és időnként előfordul, hogy olyannyira megszokjuk ezek használatát, például a geometriai optika esetében, hogy már el is felejtsük, hogy minden modellünknek megvannak a maguk korlátai, és még akkor is az egyszerűsített modellt erőltetjük, amikor annak már nincs meg a létjogosultsága. Szép is, nehéz is a fizikatanár élete.

Kulcsszavak: *fizikatanítás, szivárvány, interferencia, visszapillantó tükrök, 3D-mozi, kontaktlencse*

IRODALOM

Gnädig Péter – Honyek Gy. – Vigh M. (2014): 333 *furfangos feladat fizikából*. Typotex, Budapest
Walker, Jearl (1987): Music and Ammonia Vapor Excite the Color Pattern of a Soap Film. *The Amateur*

Scientist. Aug. • <http://optica.machorro.net/Optical/SciAm/Bubbles/1987-08-fs.html>
URL: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rainbow_formation.png