

Miért kék az ég? Napfelkelte a laboratóriumban

I. rész

Az, hogy kék az ég, az egyik legközismertebb tény. Az égbolt kék színe számtalan költőt, dalszerzőt ihletett meg. Juhász Gyula „Milyen volt...” 1912-ben keletkezett versében a szeptemberi ég a már lassan fakuló emléket, Sárváry Anna szemének kékjét eleveníti fel:

*Milyen volt szeme kékje, nem tudom már,
De ha kinyílnak ősszel az egek,
A szeptemberi bágyadt búcsúzóinál
Szeme színére visszarévedek.*

Lermontovot a kék égen vándorló báránnyelűk készítették az alábbi gyönyörű sorok megfogalmazására:

*Mennyei fellegek, ti örök vándorok!
Azúrkék sztyeppében, igazgyöngy fűzérben vonultok...*

Vajon miért kék az ég, miért kékek Anna szemei, miért fehérek a báránnyelűk? Próbáljunk meg fizikusként választ adni ezekre a kérdésekre.

A törésmutató és a színszóródás

A geometriai optikában a fény terjedését homogén közegekben, illetve az ezeket elválasztó határfelületeken vizsgáljuk, állapítjuk meg a fény terjedésére vonatkozó törvényeket. De mi történik akkor, ha a közeg nem tökéletesen homogén, a fizikai tulajdonságok kisebb-nagyobb helyi ingadozásokat mutatnak? Ilyen helyi eltéréseket kiválthatnak a közegben található mikroszkópikus méretű idegen anyagok, a közeg sűrűségének helyi változásai, kristályos anyagoknál a rácshibák stb. Az így megjelenő inhomogenitások az optikai állandók hasonló mértékű változását vonják maguk után. Ennek az eredménye a *fényszóródásnak* (*fénydiffúzióknak*) nevezett jelenség, melyet a fénysugár fogalmát használó geometriai optika keretei között nem tudunk megmagyarázni.

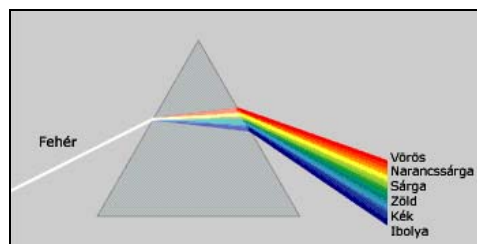
A fénysugár a fény terjedésének elég jó, de csak közelítő modellje. Akkor használhatjuk, ha a fény terjedését olyan térrészben tanulmányozzuk, melynek méretei sokszorosán meghaladják a fény hullámhosszát. Azok a fényjelenségek, amelyek a fény hullámhosszát nagyságrendben megközelítik, illetve annál nem sokkal nagyobb méretekkel rendelkező tértartományokban játszódnak le, nem értelmezhetőek a geometriai optika keretei között. Megértésükhöz a fény természetére vonatkozó feltételezéssel kell élnünk.

A fényt elektromágneses hullámnak tekintő hullámmélet szerint a fény időben és térben periodikusan változó elektromos és mágneses terek együttese. A klasszikus elektrodinamika a fény forrásának a rezgő elektromos dipólust tekinti. Elektromos dipólust egyenlő nagyságú, egymástól l távolságban lévő, de ellenkező előjelű $-q$ és $+q$ töltések alkotnak. Ha a töltések közötti távolság periodikusan változik, a rezgő dipólus periodikusan változó elektromos teret kelt, amely egy hasonlóképpen változó mágneses teret hoz létre. Ez a téregyüttes hullám formájában terjed tova, az elektromágneses hullámot eredményezve.

Az elektromágneses hullámok egyik fontos jellemzője a *frekvencia*, melynek alapján osztályozzuk őket. A frekvencia megadja hány teljes rezgése megy végbe a hullámnak egységnyi idő alatt (egy másodperc alatt végbement rezgések száma). Mértékegysége a hertz. Egy Hz a frekvencia akkor, ha egy teljes rezgés ideje egy szekundum.

Osztályozáskor a frekvencia helyett használhatjuk a légürestérbeli hullámhosszt is, mely az elektromágneses hullám c vákuumbeli sebességének és a frekvenciának az aránya. A fény az elektromágneses hullámok széles spektrumában a 780 nm és 380 nm hullámhosszak által határolt keskeny tartományt foglalja el ($1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$, azaz a méter egy milliárdod része). Ezen intervallumba tartozó elektromágneses hullámok keveréke kelti a fehér szín érzetét. Azt, hogy a fehér fény összetett – színek keveréke – először Isaac Newton (1642-1727) igazolta, mára már híressé vált prizmás kísérleteivel.

A prizmával a rajta áthaladó fehér fényt alkotó elemeire bontotta szét (1. ábra). Megfigyelte, hogy ezek a színek egy újabb prizmával tovább nem bonthatók, de az első bontóprizmához viszonyítva fordítva elhelyezett prizma segítségével újból egyesítve, ismét fehér fényt adnak. Newton kísérleteiből arra lehet következtetni, hogy a fehér fény különböző színű fényekből áll, ezeket a prizma különböző mértékben törí meg, és így bontja a fehér fényt színeire.



1. ábra. Fehér fény felbontása prizmával

Ezt a jelenséget nevezzük *színszórásnak* vagy *diszperziónak*. (Nem tévesztendő össze a fényszóródással!) Oka a fény *légürestérbeli és közegbeli* terjedési sebességének arányként értelmezett *törésmutatójának* a szintől való függése.

A törésmutató a különböző közegek egyik legfontosabb optikai jellemzője. Arról ad információt, hogy mennyire lassul le az anyagban a fény sebessége a vákuumbeli sebességéhez képest, és ennek eredményeként milyen mértékben tér el vákuumbeli terjedési irányától (törí meg), amikor áthalad a közeget a vákuumtól elválasztó felületen. Ez a *fénytörésnek* nevezett jelenség. Minél nagyobb egy közeg törésmutatója, annál nagyobb mértékben változik meg a fény terjedési iránya a határfelületen való áthaladáskor.

Ma már tudjuk (az interferencia- és elhajláskísérletek alapján), hogy a fény színét frekvenciája határozza meg. Tehát a mai értelmezés szerint a diszperzió vagy színszórás jelensége alatt egy anyag törésmutatójának a frekvenciával, illetve a fény légürestérbeli hullámhosszával való változását értjük.

Hogy követhessük miért függ a törésmutató a frekvenciától, meg kell értenünk milyen fizikai mechanizmus alakítja ki a törésmutatót.

Amikor a fény a vákuumból behatol egy anyagba, elektromos térének hatására az anyag atomjaiban, molekuláiban található pozitív magok és elektronok egymáshoz képest ellentétes irányba eltolódnak. Mivel az atommagok sokkal nagyobb tömegűek, mint az elektronok, gyakorlatilag csak az elektronok mozdulnak el a fény nagyon nagy frekvenciával (nagyágrendben 10^{14} Hz , azaz másodpercenként százezer milliárdszor) váltakozó elektromos térerősségének hatására. A váltakozó térnek köszönhetően az elektronokra nagyon rövid ideig egyik irányba, majd ellentétes irányba hatnak elektromos erők, a fényvel azonos frekvenciájú periodikus mozgásra kényszerítve őket. Az eredmény rezgő elektromos dipólusok létrejötte az anyagban. Ezekből a kényszerrez-

gést végző dipólusokból elektromágneses hullámok indulnak ki, melyek minden irányban vákuumbeli sebességgel terjednek tova. Ez az állításunk kissé meglepő, de könnyen meggyőződhetünk arról, hogy igaz. Az atommag és elektronok méretéhez képest a közöttük lévő távolság rendkívül nagy (az atommagot és az elektronokat gombostűfejnyi nagyságúnak véve a távolság közöttük többméteres lenne). Ezért az atom terének nagy része üres, még a legsűrűbb földi anyag sem jelenthet mechanikai akadályt a fényhullám terjedésének útjában.

Sűrű anyagokban, melyekben az atomok és molekulák egy bizonyos rend szerint helyezkednek el, ezek az elemi hullámok úgy adódnak össze, hogy eredőjük, az ún. *másodlagos hullám*, a közegre beeső fény terjedési irányával megegyező irányban c sebességgel haladó hullámot eredményez. A közegbe behatoló fényhullám (*elsődleges hullám*) energiájának egy részét a kényszerrezgéseket végző elektromos dipólusoknak adja át. Ez képezi a forrását a kibocsátott elemi hullámok energiájának. Az atommagok és elektronok közötti üres térben tehát két hullám halad tovább az elektromágneses rezgések vákuumbeli sebességével: a kissé legyengült elsődleges és a másodlagos hullám.

Ideálisan átlátszó anyagok esetében a két hullám összeadódásából a beeső fény intenzitásával megegyező intenzitású hullám keletkezik. A valóságban azonban a sűrű anyagokban (szilárd testek, folyadékok, nagy nyomású gázok) az atomok és molekulák közötti távolságok elég kicsinyek ahhoz, hogy egymással elég erős kölcsönhatásban álljanak. Ennek köszönhetően az elektronokra a környezet mintegy fékező hatást fejt ki. Az eredmény a dipólusok csillapodó rezgése, energiájuk egy része hő formájában disszipálódik az anyagban. Ezért a legtöbb esetben számolnunk kell a fény bizonyos mértékű elnyelődésével is.

A továbbiakban nézzük meg, miből következik, hogy a fény a legtöbb anyagban a vákuumbeli sebességénél kisebb sebességgel terjed. Vegyük figyelembe, hogy bár az elektron tömege rendkívül kicsi ($m_e \approx 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$), mégis véges. Tehetetlenségének következtében a rezgő elektron kissé késve követi az elektromágneses tér változását. Azt mondjuk, hogy fázisban eltolódik a kényszererőhöz képest. Ennek eredményeként a másodlagos és elsődleges hullám összeadódásából származó eredő hullám is késni fog azon esethez képest, amikor nem volt jelen az anyagi közeg. Ezt a fáziskésést érzékeli úgy a megfigyelő, hogy az illető közegben lassabban halad a fény.

Ezen kép alapján megérthető a színszóródás jelensége is. Nyilvánvaló ugyanis, hogy az elektron az elektromos tér gyorsabb változásait nehezebben követi, mint a lassabban bekövetkezőket. Tehát a nagyobb frekvenciájú fény esetében a fáziskésés nagyobb lesz, ezért a törésmutató kék fényre nagyobb, mint vörösre. Ez a magyarázata annak, hogy a fénytöréskor a kék fény jobban törik meg, mint a vörös. Newton kísérleteiben a prizma szerepe az, hogy a két oldallapján egymást követő fénytöréseknek köszönhetően az elterítő hatást megnöveli, jobban megfigyelhetővé téve a fehér fény felbontását.

A Rayleigh-szórás és a kék ég

A fény terjedésére vonatkozó eddigi tárgyalásunk során nem vettük figyelembe, hogy még a mikroszkópikus szinten legrendezettebb anyagok sem ideálisak. A kristályos anyagok is tartalmaznak számos rácshibát, szennyeződések. Ezek a rendellenességek kiszórják a fényt a megtört hullám irányából, nem lesz tökéletes az oldalirányú kioltás. Ezért látjuk például a lézermutató vörös fényét oldalról is, amikor egy átlátszó üvegle-

mezen, vagy porszemcséket tartalmazó levegőn halad át. Ezt a jelenséget nevezzük *fényszóródásnak*.

A fényszóródás szempontjából meghatározó jelentősége van az inhomogenitások méretének, ettől függenek jellegzetességei. Ha a szórócentrumok mérete a hullámhossznál jóval kisebb – nem haladja meg a hullámhossz egy tizedét – a jelenséget a Rayleigh-elmélet írja le (John William Strutt, Lord Rayleigh (1842 – 1919), Nobel-díj 1904). A fényszóródásnak ezt az esetét Rayleigh-szóródásnak nevezzük. Meg kell jegyeznünk azonban, hogy a fényszóródást először John Tyndall (1820-1893) figyelte meg és vizsgálta kolloid oldatokon. (Kolloidnak nevezzük az olyan anyagokat, amelyek részecskéinek nagysága nagyobb, mint az atomok és a molekulák mérete, de szabad szemmel még nem különböztethetőek meg.) Tiszteletére nevezzük a kolloidrészecskék által kiváltott fényszóródást Tyndall-effektusnak. Nagyon kis méretű kolloidszemcsék esetén a Tyndall-szórásra is alkalmazható a Rayleigh-elmélet.

Rayleigh elméletének egyik következménye, hogy a szórt fény intenzitása fordított arányban áll a fény hullámhosszával, azaz minél rövidebb a hullámhossz (a látható tartományban minél kékebb a fénysugár), annál több szóródik belőle. A kék fény hullámhosszát 450 nm-nek, míg a vörösét 750 nm-nek véve, a szórt fényben a kék szín $(750/450)^4 \approx 8$ -szor erősebben szóródik, mint a vörös. Ez az oka annak, hogy a fehér fényel megvilágított kolloid oldatok, gélek (gél – félszilárd halmazállapotú kolloid anyag) és a cigarettafüst is oldalról nézve kékes színűek.

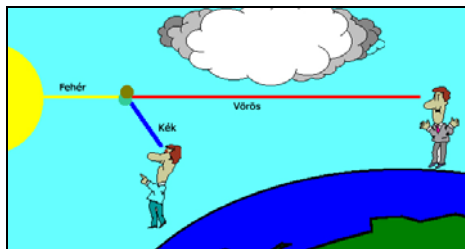
A kék égbolt látványában a Rayleigh-szóródás játszik kulcsszerepet. Rayleigh maga alkalmazta elméletét az ég kék színének magyarázatára. Eleinte a por és ködcszemcséket tételizte fel szórócentrumokként. Feltételezése azonban ellentmondásba került a tapasztalattal. Az ég kékje száraz, verőfényes időben különösen tiszta. Magas hegyekben mélykék, ugyanakkor a városok felett, párás vagy füstös levegőnél fehéres színű, jóval halványabb árnyalatú, pedig a feltételezett szórócentrumok koncentrációja éppen itt a nagyobb, itt kellene intenzívebb kéknek lennie az égboltnak. Hamarosan rájött, hogy a sikertelenség oka a por és ködcszemcsék mérete. Míg elmélete a fény hullámhosszával jóval kisebb méretű szórórészecskékre vonatkozik, addig az általa feltételezett szórócentrumok mérete ezen hullámhossznál jóval nagyobb. A Rayleigh-elmélet feltételeinek viszont eleget tesznek a légkörben található oxigén és nitrogén molekulák. Erre maga Rayleigh is rájött, és módosította álláspontját. Végül Albert Einstein (1879 – 1955, Nobel-díj 1921) számításainak köszönhetően nyert igazolást ezen feltételezés. Einstein 1911-ben közölte a fény molekulákon bekövetkező szórásával kapcsolatos eredményeit, melyek teljes összhangban voltak a kísérleti megfigyelésekkel. Így az ég kék színe javarészt a *molekuláris fényszóródásnak* az eredménye, amikor is az inhomogenitás molekuláris szinten lép fel.

A légkörben található molekulák tehát a Rayleigh-törvény szerint szórják a Nap fényét a tér minden irányába. Ha nem a Napra nézünk, hanem az égre, minél távolabb a Naptól, akkor onnan a molekulák által szórt fény érkezik szemünkbe. Bár a napfényben az összes látható hullámhossz jelen van, a levegő molekulái a kisebb hullámhosszú, azaz nagyobb frekvenciájú (ibolya, kék) fényt szórják ki nagyobb mértékben a Nap sugarai-ból. De miért nem ibolya színű az ég, hiszen az ibolya színű fény frekvenciája nagyobb a kékénél? Csupán a Rayleigh-szórást figyelembe véve az égboltnak ibolyakéknek kellene lennie. Azonban a levegőnek, különösen a benne levő vízgőznek erős abszorpciója van az ibolyakéket is magába foglaló közeli ultraibolya tartományban (ultraibolya az ibolyá-

nál rövidebb hullámhosszú fény, amelyet szemünk már nem érzékel). Ezért jut le első sorban a szórt fény kék komponense a Föld felszínére.

Szintén a fényszóródás az okozója a vörös naplemente, illetve napfelkelte látványának.

Este vagy reggel a Nap környékére nézve olyan sugarak jutnak szemünkbe, amelyek hosszú távolságot futottak be a levegőben. Ilyenkor ugyanis a Föld görbülete miatt hosszabb utat jár be a fény a levegőben, mint délben, amikor fejünk felett van a Nap (2. ábra). Mivel most szemünkbe a Nap irányából érkeznek a fénysugarak, a kék nagyobb szóródása miatt leginkább a hosszabb hullámhosszú vörös, narancs és sárga színek maradnak meg.



2. ábra. Vörös naplemente (napfelte)

Az alkonypír színeffektusait fokozni képesek a levegőbe – természetes vagy mesterséges úton – bekerülő kis részecskék (aeroszolok). Példaként felhozhatjuk a Krakatau vulkán 1883-ban bekövetkezett kitörését. Az ezt követő jó néhány évben világszerte gyakori igen vörös, bíboros naplementék, illetve –felkelték voltak. A kitörés során hatalmas mennyiségű hamu került a levegőbe. A nagyobb hamurészecskék hamar kihullottak, a kisebbek azonban sokkal tovább lebegtek, és a légkör áramlatainak köszönhetően többször is megkerülték a Földet, szétszóródtak a légkörben. Ez a finom porból álló ködfátyol sokféle szokatlan optikai jelenséget okozott, többek között az említett vörös napkeltét és –lementét. Bár az aeroszolok fokozzák a fényszóródás hatásait, a jelenséget mégis túlnyomórészt a Rayleigh-szórás a felelős, ami érthető is, hiszen a szóró részecskék között a levegő molekulái vannak többségben.

Az időjárás változás bekövetkezését előrejelző feltűnően vörös árnyalata az ég aljának szintén a fényszóródás következménye. Időjárási front közeledtekor a felerősödő légmozgások a szokásosnál több port, finom vízcseppeket juttatnak a magasabb levegőrétegekbe. Ilyenkor az ég aljának feltűnően vörös árnyalatából következtetni lehet egy időjárásváltozás gyors bekövetkezésére.

Szintén a hullámhossz-szelektív fényszóródás miatt használunk a mindennapi életben vörös, narancssárga, illetve sárga fényforrást, ha nagyobb távolságra akarunk fényjelleggel információt továbbítani. A levegőben található pára, por és füstszemcsék miatt a rövidebb hullámhosszú fény intenzitása jelentősen lecsökken, alkalmatlanná válik jelteváltásra. Ezért vörös például az útkereszteződések forgalmát irányító lámpák tiltó jelzése, sárga csíkos az útkarbantartó dolgozók mellénye, vörös vagy narancssárga a tűzoltó kocsik, veszélyes anyagokat, nagy méretű berendezéseket szállító járművek figyelemfelkeltő villogó jelzése.

Miért lehet kék a szem?

A szem színét a szivárványhártyában található festékanyagot (pigmentet) tartalmazó sejtek száma, pigmenttartalma és elrendeződése határozza meg. A szivárványhártya (latinul iris) alapvetően fényrekesz szerepet betöltő sejtállomány. A szemgolyó külső védőburkolatának az elülső, áttetsző, szaruhártyának nevezett része mögött található, tőle a csarnokvízzel kitöltött elülső szemcsarnok választja el. Fényáteresztő – embernél kerek, 4 milliméter átlagos átmérőjű – nyílása a pupilla. A pupilla átmérőjét, így a szemnek

a fény erősségéhez való alkalmazkodását, a pupillatágító és -szűkítő izom szabályozza. A szivárványhártya két különböző részből áll. A frontális része egy vékony, tejfehér réteg (stroma), melyet sötétbarna festékanyagot tartalmazó sejtek rétege követ (iris epithelium). Hogyan léteznek mégis kék szemű emberek?

A szemben kék festék nincs. A kékszemű ember szivárványhártyájában is, a többi emberhez hasonlóan, csak sötétbarna pigment van. A kék szem annak a következménye, hogy a stromában olyan szórócentrumok találhatóak, melyeknek mérete pont akkora, hogy rajtuk a fény Rayleigh-szórásnak van kitéve. Ha a fehér napfény belép ebbe a szórórétegbe, akkor a kék összetevő szóródik a legjobban (az ibolya elnyelődik). Megfelelő vastagságú réteg esetén a nagyobb hullámhosszú, kevésbé szóródó fénysugarak elérik a réteg alatti sötét felületet, ahol elnyelődnek. Mivel a kék fény szóródik a legjobban, nagy része az erős szóródás miatt visszafelé is halad, mielőtt elnyelődne a sötét felületen. Így a kék fénysugarak kilépnek a stroma elülső felületén, a szem kék színét eredményezve.

Karácsony János

Számítógépes grafika

XXII. rész

A GLU

A *GLU (OpenGL Utility Library)* magasabb szintű függvények gyűjteménye, amelynek segítségével könnyebben programozhatjuk az OpenGL lehetőségeit.

A függvényeket a következőképpen csoportosíthatjuk:

- Görbékkal és felületekkel kapcsolatos függvények
- Hibaüzenet függvény
- Általános transzformációs függvények
- Kvadratikus objektumokat (másodrendű felületeket) kezelő függvények
- Textúra függvények (lásd a *Firka* előző száma)

Görbékkal és felületekkel kapcsolatos függvények

A geometriai alapelemekkel csak pont, vonal és sokszög rajzolható, de természetesen igény van görbék és görbült felületek megjelenítésére is.

Az OpenGL a Bézier-görbék és felületek megjelenítését támogatja közvetlenül, de a GLU függvénykönyvtár lehetőséget biztosít NURBS görbék és felületek megjelenítésére is.

A racionális B-spline, vagyis a NURBS (*Non-Uniform Rational B-Spline*) görbékkel sokféle alak írható le egzaktul, így pl. a Bézier-görbe vagy a hagyományosan használt kúpszeletek is.

GLU függvények segítségével az alábbi eljárást követve tudunk NURBS görbét vagy felületet megjeleníteni:

- Létrehozunk egy új NURBS objektumstruktúrát a `gluNewNurbsRenderer()` paranccsal. Az itt visszakapott címmel tudunk hivatkozni az objektumra a tulajdonságok beállításakor és a megjelenítéskor.
- A `gluNurbsProperty()` paranccsal beállíthatjuk az objektum megjelenését befolyásoló paramétereket, továbbá ezzel engedélyezhetjük a közelítő töröttvonal, illetve sokszögháló adatainak visszanyerését.