6

117. évf.

1986

Természet Világa

Természet Világa

A TUDOMÁNYOS ISMERETTERJESZTŐ TÁRSULAT FOLYÓIRATA

Megindította Szily Kálmán 1869-ben

A TERMÉSZETTUDOMÁNYI KÖZLÖNY 117. ÉVFOLYAMA

1986. 6. sz. június

HORVÁTH GÁBOR: Fényszóródás a természetben

HU ISSN 0040—3717

HORVÁTH GÁBOR

Fényszóródás a természetben

A fényszóródás igen általános jelenség. Mint látni fogjuk, lényegében a szórással magyarázhatók az elhajlás- és interferencia-jelenségek, végeredményben a fénytörés is a fényszórás speciális esete, a fényszórás segítségével értelmezhető a törésmutató függése a hullámhossztól, azaz a diszperzió. Emiatt az általános jelleg miatt a természetben is számos helyen fordul elő olyan jelenség, színeffektus, amit a fény szóródásával magyarázhatunk. Cikkünk a szórás főbb típusainak bemutatása után részletesen tárgyalja ezen természetbeli fényszórási jelenségeket.

Főbb fényszórási típusok

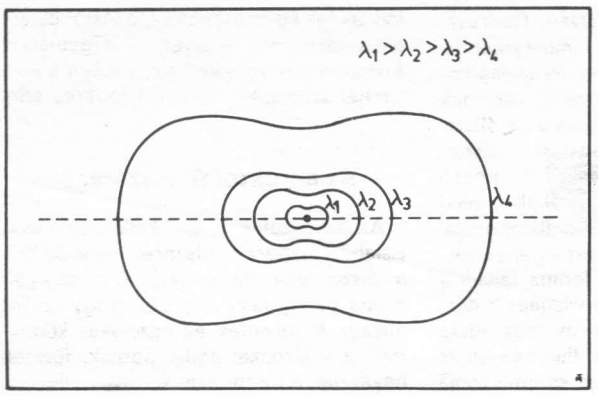
Koherens szórás

A fényszóródás többféleképpen létrejöhet. Ha a fény atomokon, molekulákon szóródik, molekuláris vagy *Rayleigh-szórásról* beszélünk, ha kolloidoldatokon, akkor *Tyndall-szórásról*, ha a fény hullámhossza nagyságrendjébe eső méretű szemcséken, akkor *Mie-szórásról*. A Rayleigh-szórásra $r \ll \lambda$, a többire $r \gtrsim \lambda$ jellemző, ahol λ a szóródó fény hullámhossza, r a szóró részecske sugara. Általában, ha egy részecske törésmutatója a környező közegétől eltér, ha gyengén elnyelő, akkor mikor fény esik rá, maga is szekunder fényforrássá válik, másodlagos fényt sugároz a tér minden irányába. Ellenben ha a részecske erősen elnyelő (pl. koromszemcse), akkor a fényt diffraktálja, ami lényegében szórási folyamat eredménye, csak úgy szóródik a fény, hogy a tér egy bizonyos tartományában interferenciás kioltás megy végbe, így a részecske a fényhullámtérből egy tartományt mintegy kitakar (ilyenkor az ún. Huygens—Fresnel-elv érvényesül).

Ha a fény gázokbeli szóródását tekintjük, feltételezhetjük, hogy minden egyes molekula a többitől függetlenül reemittálja a másodlagosan szórt fényt úgy, hogy a teljes szórt intenzitás — a levegőbeli szóródásnál az ún. égboltsugárzás — az egyes molekuláris intenzitások összegével egyenlő. Ennek oka, hogy a gázmolekulák az intenzív hőmozgások miatt véletlenszerűen helyezkednek el a térben, így a molekulák egyedi sugárzásai semmilyen irányban nem interferálnak úgy, hogy erősítenék vagy kioltanák egymást, csak a beeső fény irányában. Ez nem igaz akkor, ha a molekulák (atomok) periodikusan rendeződnek el, mint pl. a kristályos anyagban. Sőt a periodikusság nem is annyira szükséges, inkább az, hogy megfelelően sűrű legyen az anyag, s ne legyen a részecskék mozgása oly kaotikus, mint a gázokban. Ebből a szempontból tehát szóba jöhetnek amorf folyadékok, valamint szilárd anyagok is, ahol az oszcillátorként sugárzó molekulák már nem teljesen véletlenszerűen rendezettek, nem változtatják helyüket kaotikusan, így a számítások szerint a szórt hullámok határozott módon fognak interferálni egymással, aminek eredményeként a beeső fény útjának irányában erősítik egymást, minden más irányban gyengítik. Az egyes hullámok erős hullámmá összegződnek, amit megtört hullámnak nevezünk, a többi irányban kioltás jön létre. Ha a szóró specieszek tökéletesen periodikusan rendeződnének el, a kioltás teljes lenne (az amorf, sűrű anyagoknál fennmarad egy kis intenzitású oldalra szórt sugárzás a kioltás nem tökéletes volta miatt). A megtört hullám a fény vákuumbeli c sebességétől eltérő, $v = c/n$ sebességgel terjed, ahol az n törésmutató az oszcillátorrezgések amplitúdójával kapcsolatos. Minthogy az oszcillátorok amplitúdója függ a frekvenciától, az oszcillátorok (atomok, molekulák) pedig a gerjesztő fény frekvenciájával végeznek kényszerrezgést, azért érthető a diszperzió jelensége.

Azonban a kristályos anyagok sem ideálisak, tartalmaznak számos rácshibát, szennyezést, és fonongerjesztések is léteznek az abszolút zérus hőmérséklet fölött. Ezek a rendellenességek kiszórják a fény egy részét a megtört hullám irányából. Ez a szóródás azonban azonos számú részecskére vonatkoztatva sokkal gyengébb a levegőbeli szórásnál, hiszen relatíve ezen rácsszabálytalanságok száma jóval kisebb, mint gázokban (a molekulák száma). Visszatérve a gázokra, másképpen is megközelíthető a szórási mechanizmusuk, mint az előbb tettük. A gázok molekuláinak említett rendezetlen mozgása miatt mikroméretekben erősen ingadozik a gázok sűrűsége. Ezen sűrűségfluktuáció miatt úgy fogható fel, mintha az így kialakult parányi molekuláris méretű sűrűsödési gócok szórnák a fényt. Az amorf anyagokban (folyadékok, üvegek) ezek a sűrűségfluktuációk mintegy be vannak fagyva, hiszen a részecskék hőmozgása csak az egyensúlyi helyzetük szűk környezetére korlátozódik, s ezen túlmenően az aperiodikus szerkezet ellenére is, a nagy sűrűség miatt kisebbek a fluktuációk, s időben sem olyan gyorsak. Ezzel indokolható, hogy ezek az anyagok a fénytörés szempontjából közelebb állnak a kristályos anyagokhoz, s csak kevéssé szórják a fényt (gondoljunk az átlátszó üvegre).

Fényszóródáskor másodlagos hullámok alakulnak ki a közegben, melyen a gerjesztő fény áthalad. Ilyen szekunder fényforrás fény hatására pl. úgy keletkezhet, hogy a részecskékben mint polarizálható töltésrendszerekben (a molekulák, atomok elektronburka az elektromágneses tér hatására deformálódik) állandó fázis-eltolódással kényszerrezgések keletkeznek, amelyek következtében a részecske azonos frekvenciájú elektromágneses hullámot, fényt bocsát ki. Ilyen természetű szóródás fénye tehát csakis a gerjesztő fény hullámhosszait tartalmazhatja. A λ-nál jóval kisebb méretű részecskén szóródott fényhullám fázisa a gerjesztőéhez képest állandó, mert a részecske különböző pontjaiból azonos fázissal induló fényhullámok közt számottevő útkülönbségek nem léphetnek fel, így nem létezhetnek olyan irányok sem, amelyek



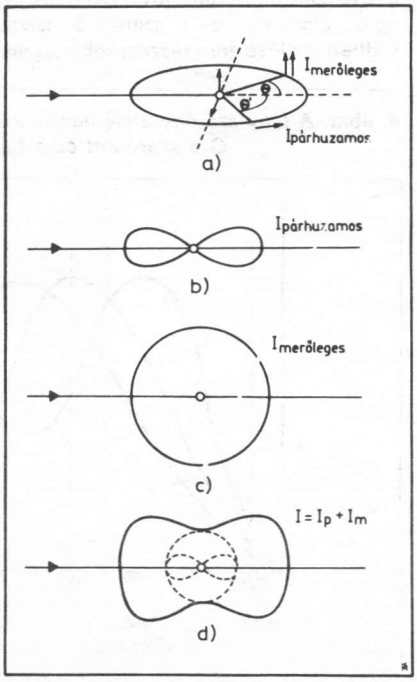
1. ábra. Rayleigh-részecskén való fényszóródás intenzitásának irányeloszlása a hullámhossz függvényében

mentén interferencia útján erősítés, kioltás következne be. Ezért a szóródott fény a gerjesztőével interferenciaképes, azaz koherens. Az ilyen kis részecskéknél ezért minden irányú, diffúz eltérítés áll elő, ezt nevezzük *Rayleigh-szórásnak*. A Rayleigh-szórásra jellemző, hogy a szórt és a teljes beeső fény intenzitásviszonya a fény hullámhosszának negyedik hatványával fordítottan arányos, tehát a hosszabb hullámhosszúságú fény jóval kisebb mértékben szóródik, mint a rövidebb. A szóródó fény intenzitásának irány szerinti eloszlását az *1. ábrán* tüntettük fel, ahol érzékeltettük a hullámhosszfüggést is. Rayleigh-szórásnál tehát a szórási kép hengerszimmetrikus a beeső fény iránya mint tengely körül, ezenkívül a részecskét tartalmazó, a beeső fény irányára merőleges síkra tükörszimmetrikus, vagyis azonos arányú a szórás előre és hátra. A szóródott fény polarizációs állapota eltér a beesőétől. A merőlegesen szóródott fény lineárisan poláros lesz, azaz polarizációfoka 1, rezgési síkja pedig a beeső fény irányára merőleges. A gerjesztő fény irányára merőlegesen szóródó fény rezgési síkja azért merőleges a szóródási síkra, mert a gerjesztő természetes (0 polarizációfokú) fény rezgési amplitúdójának mindig van a szórási síkra merőleges komponense. Ha a Θ szóródási szög eltér 90°-tól, akkor a szóródott fény polarizációfoka kisebb lesz egynél, $\Theta = 180°$ esetén pedig 0 lesz. Fektessünk gondolatban egy kört a szóró részecskére úgy, hogy az a kör középpontjában legyen, a beeső fénysugár pedig a kör síkjába essen a *2/a ábra* szerinti módon. Akkor ebben az esetben, ha Rayleigh-szórással van dolgunk, a kör síkjára merőleges, ill. azzal párhuzamos rezgésvektorú szórt sugárzás intenzitását a Θ szórási szög függvényében a *2/b, 2/c ábra* mutatja. A teljes szórási intenzitás nyilván e két I (párhuzamos), I (merőleges) részintenzitás összege lesz I = I (párhuzamos) + I (merőleges), s visszakapjuk az *1. ábra* polárdiagramját (lásd a *2/d ábrát*).

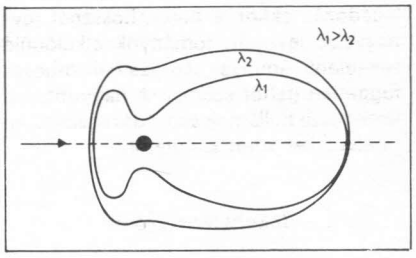
Ha a részecskeméret a szóródó fény hullámhosszának nagyságrendjébe esik, akkor *Mie-szórásról* beszélünk. Ilyenkor megváltozik a polarizációviszony és az irányeloszlás is. Egy Mie-szóró részecskén való fényszóródás intenzitásának irányeloszlását mutatja *3. ábránk*. Megmaradt a beeső fény iránya körüli hengerszimmetria, de a részecskét magában foglaló, a beeső fény irányára merőleges sík már nem tükörszimmetria sík. Jóval több fény szóródik előre, mint hátra. A szóródás változatlanul hullámhosszfüggő, de már nem annyira, mint a Rayleigh-szórásnál. Az ábrán látható, hogy a különböző hullámhosszak szóródási képe főleg oldalirányban tér el. A Mie-szórásnál megmarad a nagyobb hullámhosszak felé való kisebb szórási jelleg.

A gázmolekulák méretük miatt Rayleigh-szórnak; Mie-szóró részecskék pl. a makromolekulák, de a Tyndall-szórásért felelős kolloidszemcsék is, így a Tyndall-szórás speciális Mie-szórás. A Mie-szórásnak a gyakorlatban számos alkalmazása létezik. A víz, az üveg pl. a bennük eloszló kolloidális méretű aranyszemcsék hatására csak a rubinvörös fényt engedi át, a többi, kisebb hullámhosszúságút kiszórják, így fényszűrőként alkalmazhatók (rubinüveg). Különböző kolloidoldatokon a szóródó fény relatív intenzitásából következtetni lehet a részecskék koncentrációjára, átlagos méretére. Egyes fényszórást okozó polimer vegyületek molekulasúlyát is meg lehet határozni ily módon.

2. ábra. Rayleigh-szóródáskor a különböző rezgésvektorú szórt hullámok intenzitásának irányfüggése



A fényszórás részecskeméret-függése a hullámhossz függvényében a *4. ábrán* látható. A Rayleigh-szórás $r<0{,}03$ μm-es részecskékre áll fenn. $r<0{,}5$ μm részecske sugaraknál a rövid hullámhosszú fény szóródik jobban („sárga Hold" tartomány, meteorológiai nómenklatúrával élve), míg nagyobb szóró-szemcséknél a nagyobb hullámhosszú fény szóródik erősebben („kék Hold" tartomány). A meteorológiai elnevezések magyarázata az, hogy ha a levegőben sok olyan részecske lelhető fel, amelynek mérete a szóban forgó tartományba esik, akkor pl. a Hold fénye sárgás, ill. kékes árnyalatúvá válik a fényszóródás következtében. Nagy részecskeméret esetében, a „kék Hold" intervallumon túl nem lehet az eddigiekhez hasonló jellegzetes szórási tartományokat elkülöníteni, ekkor gyakorlatilag megszűnik a fényszórás hullámhosszfüggése, az eredetileg fehér fény ebben a tartományban diffúzan fehéresen szóródik, innen nevezik ezt az intervallumot „fehér"-szórási tartománynak.



3. ábra. Mie-féle szórás irányeloszlása a hullámhossz függvényében. A fény a nyíl irányában esik a részecskére, amit gömb alakúnak tételezünk fel

A meteorológiai „sárga Hold" tartomány megegyezik a fizikai Mie- és Tyndall-szórásival. A fenti szórási módok tisztán persze csak akkor figyelhetők meg, ha a szóró részecskék túlnyomó többsége egy jól meghatározott mérettartományba esik, ami ténylegesen ritkán áll fenn, így az egyes szórási típusok keverednek egymással. Mivel a szóró részecskék között a levegő molekulái számbeli többségben vannak, ezért a Rayleigh-szórásra fennáll az előbbi feltétel, tehát a Rayleigh-szórás viszonylagos állandósággal bír.

Ha sorrendet állítunk fel az egyes szórási módok természetbeli előfordulásának gyakorisága szempontjából, első helyre a Rayleigh-szórás kerül, utána a Mie-szórás, ill. a „fehér-szórás" következik, legutolsó pedig a „kék Hold"-szórás. Mint később látni fogjuk, az utóbbi típus csak igen ritka természeti feltételek fennállása esetén, csak rendkívül heves vulkánkitörések alkalmával figyelhető meg. Az eddigiekhez hasonló természetű fényszóródást idegen részecskéktől mentes, olyan optikai közeg is előidézhet, amelyben a törésmutató térben és időben statisztikusan ingadozik (ez az ún. Schlieren-jelenség). Ilyen helyzet alakul ki forró, napsütéses időjárás esetén, mikor a légkör rendszertelen törésmutató-fluktuációit a különböző hőmérsékletű légtömegek turbulens kavargása idézi elő. A látható fény szóródása ekkor jellegzetes remegés, vibrálás formájában (a tereptárgyak kontúrja elmosódik, vibrál) közvetlenül észlelhető; de a hosszabb hullámok is szóródnak, mivel a törésmutató-ingadozás ekkor a hullámhossznál jóval nagyobb levegőtartományok elkülönüléseit jelenti, amelyek szórása hullámhosszfüggetlen (fehér-szórás). A nagyobb hullámhosszú hullámok szóródását ekkor infrafelvétellel lehet kimutatni.

Inkoherens szórás

Eddig olyan szóródási típusokról volt szó, amikor a beeső és a szórt fény frekvenciája azonos volt. Egy részecske azonban fény hatására nemcsak egyszerű kényszerrezgése miatt válhat másodlagos fényforrássá. Többatomos molekulán felléphet a fény ún. Raman-szóródása is, mikor a molekula mélyebb kölcsönhatásba lép a gerjesztő fénnyel, s oszcillációja, ill. rotációja révén a beeső fényénél eltérő frekvenciájú és éppen ezért inkoherens fényt képes kibocsátani. Ekkor arról van szó, hogy a molekula vagy energiát vesz fel, vagy gerjesztettségénél fogva energiát ad le (kvantumokban) a beeső fénynek. Az előbbi eset kisebb, az utóbbi nagyobb frekvenciájú fény kisugárzását eredményezi, mint a beeső fény. Másik fajtája a szóródásnak, mikor pl. egyatomos alkáli gőzök bizonyos hullámhosszúságú fényt abszorbeálnak és azonnal azonos hullámhosszúságú, igen koherens rezonanciasugárzást, szórást keltenek.

A röntgensugárzás az egészen lazán kötött atomelektronokon szóródhat, aminek hatására a szóródott fény hullámhossza irányfüggően, de minden esetben nő. Ez a Compton-effektus, az inkoherens fényszórás egyik jellegzetes képviselője. Egyes kristályok vagy molekulák fotolumineszcencia útján is szórhatják a rájuk eső fényt.

Lumineszcencián értjük a fénysugárzás azon eseteit, amikor a fénykibocsátás oka nem a hőmérsékleti sugárzás. Fluoreszcencia esetében (mint a lumineszcencia speciális esete) a fénnyel megvilágított anyag maga is fényt bocsát ki, melynek spektruma jellemző az anyagra és általában a gerjesztőénél nagyobb hullámhosszúságú. Fluoreszkáláskor a beeső fényt elnyelik az atomok, molekulák, majd többnyire megváltozott hullámhosszal reemittálják addig, amíg tart a gerjesztés. A lumineszcencia másik fontos fajtája a foszforeszcencia. Ekkor a világítás a gerjesztés után is hosszabb-rövidebb ideig még fennmarad. Míg a fluoreszcencia esetén a fény abszorpciója és emissziója elemi folyamata ugyanazon molekulában, atomban történik, addig a foszforeszcenciánál általában ez nem így van, utóbbi esetben igen bonyolult tárolási mechanizmus iktatódik az abszorpciós és emissziós folyamat közé. Végül megemlítjük, hogy az 1960-as évek elején amerikai fizikusok a fény bizonyos kristályokon való Rayleigh-szóródását tanulmányozva fedezték fel az optikai felharmonikusok jelenségét, amikor a szóródó fény kölcsönhatva a beesővel, két, ill. három azonos frekvenciájú (energiájú) foton egyesülvén kétszeres, ill. háromszoros frekvenciájú, igen gyenge sugárzás keletkezik.

Mielőtt rátérnénk a fényszóródás természetbeli előfordulásaira, megemlítünk egy mindenki által könnyen elvégezhető kísérletet, amivel egyszerre demonstrálható a kékes színt okozó Rayleigh-szórás és a hullámhosszfüggetlen „fehér-szórás". Megfigyelhető, hogy az égő cigaretta izzó, parázsló végéből kékes füst száll fel, míg a kifújt, valamint a szűrőn át kiszüremlő füst fehéres színű. Az elölről felszálló füst kékes színezetét a Rayleigh-szórás okozza, mivel ezek a füstszemcsék a fény hullámhosszánál jóval kisebbek. Az egész cigarettán és a szűrőn át szívott füstben az előző apró részecskék koagulálódnak (az egymáshoz csapódástól összetapadnak), s olyan nagyméretű füstszemcsék keletkeznek, amiken a fény „fehér-szóródik". Innen a fehéres szín.

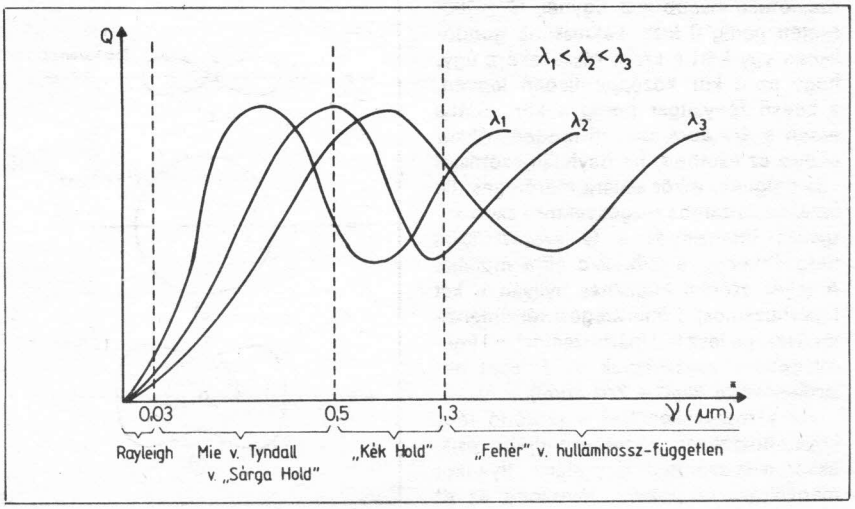
Az aeroszol fényszórása

Az aeroszolok olyan kolloidális, kvázistabil, diszperz rendszerek, amelyekben a diszpergáló fázis gáz, a diszpergált anyag pedig vagy folyadék, vagy szilárd anyag. A folyadék aeroszolokat ködöknek, a szilárdakat pedig pornak, füstnek nevezzük. A bennünket körülvevő légkört is ilyen kolloidális rendszernek foghatjuk fel, ahol az oldószer a levegő, számtalan benne diszpergált részecskével, korom- és porszemcsével, víz és különböző oldatok cseppecskéivel.

Ha a kolloidrészecske a természeti erők munkája során kerül a diszpergáló közegbe, akkor természetes aeroszolokról beszélünk. Így a vulkáni működéskor láva, hamu, kőzettörmelék, erdők égéstermékei jutnak a levegőbe. A szelek homokot, virágport, spórákat, apró növényi maradványokat, ásványszemcséket stb. kavarnak fel, a partok szikláihoz verődő hullámokból pedig vízcseppek keletkeznek, diszpergálódnak, s a tengervíz elpárolgása után sókristályok maradnak vissza a levegőben. Ezek az idegen anyagok csak egy részét képezik a légkörben levő kolloidrészecskéknek, mivel az emberi tevékenységek ugyancsak hozzájárulnak az aeroszol képződéséhez. Ezen utóbbiakat mesterséges aeroszoloknak nevezzük. Így a városi tüzelés, közlekedés, az iparvidékeken termelődő porok, égéstermékek, a cigarettázás, de a seprés stb. is lényegében aeroszolkeltés.

Az aeroszoloknak nemcsak a légköri fényszóródási jelenségekben van nagy szerepük, hanem jelentős biológiai, fiziológiai hatásuk is ismert; fontosak továbbá

4. ábra. A fény szóródásának hullámhosszfüggése (λ) és részecskesugár-függése (r). Q a szóródott és a beeső fény intenzitásviszonya



a meteorológiai hatásuk (felhő-fizika területén a csapadékképződésben). Az aeroszolszemcsék mérete igen széles tartományt fed le, s attól függően, hogy az átlagos, többségi aeroszolméret milyen intervallumba esik, előidézhet „sárga Hold", „kék Hold", Rayleigh- vagy „fehér"-szórást s az ezeknek megfelelő színeffektust.

Speciális, korunkra, a nagyvárosi levegőre igen jellemző aeroszolfajta a fotokémiai szmog. Bizonyos mesterséges eredetű légszennyező anyagok (pl. a kipufogó gázok) a Nap sugarainak hatására átalakulnak, s ún. peroxi-acetilén-nitrát (PAN) és bizonyos N-tartalmú részecskék képződnek, amikre a 0,5 μm körüli méret a jellemző. Ezek a szilárd kristályos szerkezetű részecskék a fényt úgy szórják, hogy az égbolt tejszerű, opálos fényt kap.

Az alpesi fény

Az alkonypír színeffektusait fokozni képes a megnövekedett aeroszolkoncentráció, de a jelenségért mégis túlnyomórészt a Rayleigh-szórás a felelős, ami érthető is, hiszen a szóró részecskék között a levegő molekulái vannak többségben. Az alkonypírral rokon fényjelenségben, az ún. alpesi fényeffektusban igen nagy szerepet játszik az aeroszol. Az alpesi fény többnyire a magasabb hegységekben figyelhető meg, s keletkezéséhez elengedhetetlen, hogy a sztratoszférában megnövekedjék az aeroszolkoncentráció, valamint a troposzférában jók legyenek a látási viszonyok. E két feltétel csak ritkán teljesül egyszerre; főleg az nagyon ritka, hogy jelentősen nő a sztratoszféra aeroszolkoncentrációja. A sztratoszféra ugyanis — mivel az alatta lévő átmeneti rétegben pozitív a légkör hőmérsékleti gradiense — mentes a nagyobb függőleges feláramlásoktól, inkább a nagy horizontális szelek a jellemzőek rá, ezért csak igen nehezen, hatalmas energiák felszabadulása árán (főleg vulkánkitörések alkalmával) kerülhet nagyobb mennyiségű aeroszolszemcse e rétegbe. (Lásd Béll Béla—Zólyomi Bálint: Alpesi fény Budapesten c. cikkét folyóiratunk 1984. évi 1. számában. — a szerk.)

Nagy vulkánkitörések okozta légköri optikai színeffektusok

A Krakatau 1883-as kitörésének hatása oly drámai és katasztrofális volt, hogy a szokásosnál is részletesebb leírások születtek róla. A Royal Society korabeli jelentésében pl. külön fejezetet szenteltek leírásának. A fejezet az 1883—86 között lejátszódott szokatlan légköri optikai jelenségekről szólt, beleértve a szürkületi hatásokat, halo-jelenségeket, az égbolt elhomályosodását, elszíneződését, a Nap, a Hold színváltozásait stb. Mi itt most a témánkhoz kapcsolódó részeit tekintjük az *E. A. Russel* és *E. D. Archibald* tollából származó leírásnak, azaz az égbolt, a Nap színeire vonatkozó utalásokat.

A Krakatau kitörése, különösen a tetőponton bekövetkezett robbanások hatalmas mennyiségű hamut lövelltek a levegőbe kb. 8 km magasságba. Ennek hatása a kitörés közvetlen környékén sűrű hamuhullás és nagy sötétség volt, a hamufelhő eltakarta a Napot. A nagyobb hamurészecskék gyorsan kihullottak, a kisebbek azonban sokkal tovább lebegtek, és a felső légkör áramlatai nyugat felé sodorva őket, a Földet többször megkerülték. A hamufelhő első körutazása a trópusok vonalába eső keskeny zónára korlátozódott, a továbbiak során egyre inkább szétszóródott, végül jó néhány körülfordulás után a hatását már az egész Földön, a sarkvidékek kivételével, szinte mindenütt észlelni lehetett. Ez a finom porból álló ködfátyol sokféle szokatlan optikai jelenséget okozott. A legemlékezetesebbek a világszerte gyakori igen vörös, bíboros naplementék, ill. -felkelték voltak. Egyikük ihlette meg *Alfred Tennysont* is: „. . . Tüzes hegycsúcs lökte izzó salakját
Oly magasra: a föld körül forog?
Hiszen nap mint nap, a négyszázadik
Nyáron Krisztus után, hány vérszín estén
Meredt haragvó alkony a keresztre . . ." (Szent Thelemakhosz. Ford.: Ferencz Győző.)

Ezeket a szokatlanul vörös naplementéket és -felkeltéket a Nap sugarainak a parányi hamurészecskéken való Rayleigh-, ill. „sárga Hold" -szórása okozta azáltal, hogy a rövid hullámok (kék, zöld, sárga) kiszóródtak a direkt napsugárzásból, s az így narancssárgás-vörössé váló direkt fény a hamufelhőnek a Naptól kis szögben látszó részeiről szóródva, visszaverődve intenzív alkonypírral öntötte el a tájat.

De a vulkanikus hamuból álló felhők szemcsemérete korántsem volt azonos. A kisebb részecskékből álló, magasabbra is feljutó felhők Rayleigh- és Mie-szórást okoztak, a nagyobb szemcséjűek pedig a „kék Hold" tartományban szórták a fényt, így az égbolt és a Nap színe éppen a szokásosnak megfelelőhöz képest megfordult, a Nap lett kék és az ég vörös, mint ahogy az kiderül az előbb említett beszámolóból (Ceylon Observer 1883. szept. 17.): „. . . Az utóbbi három napban a Nap ragyogó zöld színben kel fel, s ilyen marad addig, míg kb. 10°-kal ér a látóhatár fölé. Feljebb haladtában azután gyönyörű kék színbe vált át, majd ez a kék olyan tündöklő lesz, mint az égő kén lángja. Amikor kb. 45°-kal van a látóhatár felett, puszta szemmel már nem lehet ugyan belenézni, de fénye még a zeniten is kék. Ez később a fakó kéktől a világoskékig változik, s még délben is egy kicsit a holdsütéshez hasonlít. Napszálltakor ugyanezek a változások zajlanak le, csak fordított sorrendben.

A Hold, amely mostanában délutánonként is látható, napnyugta után ugyancsak kékes árnyalatú . . ."

Ezeket az elszíneződési jelenségeket annak idején a Földön szinte mindenütt lehetett látni. Az eddigiek alapján meg tudjuk magyarázni e szokatlan színeffektusokat. A Nap alacsony állásakor a zöld színét az okozta, hogy a hamufelhő nagyobb szemcsékből állt, s a „kék Hold" tartományban a nagyobb hullámhosszúságú fénysugarak szóródtak jobban, így a Föld felszínére érő direkt napfényből kiszóródtak a vörös, narancs- és citromsárga sugarak. A levegőmolekulákon történő Rayleigh-szórás továbbra is megmaradt, így a direkt fényből az ibolya és kék komponens is kiszóródott, maradt egyedül a zöld. Felsőbb napálláskor a Rayleigh-szórással kiszóródó kék hányad a kisebb levegőréteg miatt jelentősen csökkent, tehát a zöld szín eltolódott a zöldes-kék, majd a kék árnyalat felé. A Holdra, amely a Nap fényét reflektálja, ugyanez érvényes.

Az égbolt ilyenkor az oldalra kiszóródó nagyobb hullámhosszúságú fényben, azaz vöröses-rózsaszínben dereng. Igazán meglepő és csodálatos látvány lehetett a rózsaszín égbolton zöld, kék színben tündöklő Nap. Persze a hamuszemcsék nem különültek el mindig egyértelműen a „kék Hold" szórási tartományba, számos átmenet létezett, az optikai jelenségek ennek megfelelően keveredtek, a finom színárnyalatok egybefonódtak. Jól példázza ezt *Russel* 1883. november 9-i, Surreyből származó beszámolója: „. . . Naplementekor igen finom cirruszfátyol a Nap fölött. Figyelemre méltó fehéres-zöldes opálos derengés. Napszállta után kb. 15 perccel a Ny—DNy-i égbolt majdnem egészen a horizonttól 45°-ig finom rózsaszínben tündökölt. Ez alatt különleges zöldes és zöldesfehér opálos fény. A rózsaszínű ragyogás előbb bronzsárgába, majd zöldesbe fakult . . ." Hasonló hosszú idejű aeroszolkoncentrációt figyeltek meg századunkban is, 1963-ban az Agung-vulkán, valamint 1980-ban a Mt. St. Helens-vulkán heves kitörését követően, 1982-ben pedig az El Chichon tört ki, s a kidobott hamufelhő hasonló jelenségeket idézett elő. Vulkánkitörésekkor, főleg a légkörbe kerülő kén-dioxidból és vízgőzből a napsugárzás hatására kénsav keletkezik, ami igen apró cseppeket alkot. Az aeroszol további jelentős részét képezik a szulfátrészecskék, szilikátszemcsék, fémsókristályok kb. 0,1 μm-es átlagmérettel.

A Mars légkörének optikai szórása

A bolygók közül a Merkúron kívül mindnek van légköre. A Vénuszé igen sűrű, számottevő felhővel. A vénuszi felhőkben

igen sok kénsavcsepp fordul elő, s szinte összefüggő felhőréteg takarja el a Napot, így a felszínére csak kevés, diffúz fény juthat le. A légköri gázok domináló komponense a CO_2, s nagyon sűrű légkörről van szó, hiszen a légnyomás a felszínen a földiének mintegy 100-szorosa. Éppen ezért felhőtakaró hiányában az erőteljes fényszóródás érdekes színeffektusokat okozhat. A jóval erősebb Rayleigh-szórás miatt a Földön megszokottnál jóval intenzívebb kék lenne az égbolt, s a naplemente vörös színárnyalata is szokatlanul mélynek és erősnek tűnne. A nappali mélykék égbolton a Nap is jóval sárgább színben tündökölne. Az óriásbolygókkal is hasonló a helyzet. Sűrű, az egész bolygóra kiterjedő sávos szerkezetű felhőrendszerük van, de mivel űrszonda még nem látogatta meg őket közelebbről úgy, hogy légkörükbe lemerült volna (a Nasa tervbe vette ezt, a Galileo-űrszondával, de a Challenger-katasztrófa miatt mindez késik), ezért nem is tudunk sokat róluk. A Marssal már más a helyzet. Szondák is meglátogatták, és légköre is igen ritka, a földiének alig ezredrésze a felszíni légnyomás. Pályaexcentricitása kb. 6-szor nagyobb, mint a Földé, ez lényeges különbséget okoz a naptávolságban a perihélium és afélium között (1,38, ill. 1,67 CSE). A perihéliumban beérkező nagyobb mennyiségű napsugárzás magasabb hőmérsékletet és erősebb szeleket hoz létre. A szél által felkevert por közvetlen szoláris fűtése még nagyobb felszíni hőmérsékletet eredményez. A felkavart por hőelnyelése és a szél egymást erősítve olyan hatalmas porviharokat kavar, amelyek néha hónapokon keresztül fennmaradnak. A szélsebesség eléri a 160 km/h-t, a hőmérséklet 20 °C-kal is meghaladja az átlagot, és a finom porrészecskéket a szél 50 km magasra emeli. A nappalok és éjszakák közötti nagy hőmérséklet-különbségek által előidézett erős örvénylő légmozgások következtében a por sohasem ül le teljesen, mintegy 30 km magasságig mindig megtalálható. Mivel a finom por szemcsemérete éppen a „kék Hold" tartományba esik, ezért a fényszóródás miatt a Mars ege halvány rózsaszínű, amit csak fokoz, hogy a diszpergált por maga is bizonyos fémoxidoktól vöröses, barnás színezetű.

A légköri aeroszolkoncentráció növekedésével magyarázható a földi téli napfelkelték és naplenyugták erős vörös színe is, hiszen télen a fűtés miatt nő a mesterségesen keltett aeroszol mennyisége, de e részecskék akkorák, hogy nem a „kék Hold" tartományba, hanem a „sárga Hold"-ba vagy a Rayleigh-tartományba esnek. A marsi porviharoknál jóval kisebb mértékű hatásról van szó, mikor időjárási front közeledtekor a felerősödő légmozgások a szokásosnál több aeroszolt juttatnak a magasabb levegőrétegekbe. Ilyenkor az ég aljának feltűnően vörös árnyalatából következtetni lehet egy esetleges időjárás-változás gyors bekövetkezésére.

A felhők fényszórása

A felhők is lényegében sűrű aeroszolkoncentrátumok, amelyekben az aeroszol a kondenzációs magvakon kicsapódott apró vízcseppek, ill. jégkristályok. A felhő aeroszolrészecskéit a meteorológia felhőelemeknek nevezi. A felhőelemek olyan mérettartományba esnek, hogy rajtuk a fény hullámhossz-függetlenül szóródik. Ezért fehéres-szürkés színűek a felhők. De ez nemcsak a látható optikai tartományra igaz, hanem az UV-ra és infravörösre is a hullámhossz-függetlenség miatt. A Rayleigh- és a „fehér"-szórás közti különbség érzékeltetésére vizsgáljuk meg kissé az infravörös fény szóródását a levegőben.

A csak infravörös sugarakat áteresztő szűrőn keresztül, infrasugarakra érzékeny filmre készült negatív fényképek pozitív másolatain több eltérést láthatunk a normálfényképektől: 1. a felhők fehérek; 2. a derült égbolt egészen sötét; 3. a távolabbi tárgyak párás levegőben is kontrasztosabban látszanak.

A magyarázat egyszerű. Mivel a Rayleigh-szórás $1/\lambda^4$-es, ezért még párás levegőben is az infravörös sugarak jobban megtartják irányukat, kevésbé szóródnak, mint a látható, rövidebb hullámhosszúságúak. Ezért láthatók jobban infravörös fényképen a távolabbi tárgyak. (Ennek pl. a geodéziában, ill. a katonaságnál van jelentősége.) A derült ég nappali fénye a Napból jövő, de a levegőben szóródott sugarakból áll. Mivel a rövidebb hullámhosszúságú napsugarak szóródnak jobban, ezért az égboltfényben a nagyobb hullámhosszú (s így kevésbé szóródó) infrasugarak alig fordulnak elő. Az infravörös felvételen ezért sötét az ég. Infravörösben a felhők világosságát az okozza, hogy a felhőkben a sugárzást szóró részecskék a fény hullámhosszánál nagyobbak, ezeken nemcsak a kék, de az infravörös sugarak is jelentős mértékben szóródnak (hullámhossz-függetlenség). Amíg tehát az égbolt felhőtlen részéről túlnyomóan kék sugarak érkeznek a fényképezőgéphez, addig a felhők bőven irányítanak ide infrasugarakat is. Az infravörös szűrő a kék sugarakat nem engedi a filmre, ezért a derült ég a pozitív felvételen sötét lesz, a felhők világosak.

A köd cseppecskéi a felhőelemekhez hasonló méretűek. A ködön ezért az infrasugarak sem tudnak nagyobb távolságra szóródás nélkül áthatolni. Amíg tehát a párás, vízgőzzel telített levegő az infravörös sugarak számára jól átlátszó, addig a vízcseppecskékből álló köd legfeljebb áttetsző.

Ha UV-ra érzékeny filmre fényképeznénk, akkor érthető módon minden egészen fehéresnek, opálosnak, tejszerűnek tűnne, a felhők nem látszanának a fehér égbolton, s a viszonylag közeli tárgyak is alig lennének kivehetők, annyira elmosódna a képük.

Ugyancsak a hullámhosszfüggetlen „fehér"-szórás miatt látható a repülőgépek kondenzcsíkja, a Wilson-féle ködkamrában az ionizáló részecskék pályája, a poros, füstös levegőn áthaladó lézersugár útja és az elsötétített szobába beszüremlő napsugár csillogása. ♣

(Cikkünk következő részében a Rayleigh-szórás okozta kék szín megjelenésének eseteit vizsgáljuk a természetben.)