

A Földön az életet a Naptól érkező fény teszi lehetővé. A fény az egyik legfontosabb fizikai rendszer, a fizika tanításakor mégsem hangsúlyozzuk eléggé a fény jelentőségét a természetben. A továbbiakban rámutatunk a fénytan hagyományos oktatásában tapasztalható néhány hiányosságra és következetlenségre, és a kiküszöbölésükre teszünk javaslatokat.

A fény mint fizikai rendszer

Gyakran elhangzik az a megállapítás, hogy a fény „tisza energia”, vagy hogy a fotonok „energiakvantumok”. Ezek az állítások nem helyesek. Az *energia* fizikai mennyiség, tehát emberi konstrukció, a természet leírásának matematikai eszköze. A *fény* létezése azonban független attól, hogy a fizikus észleli vagy leírja. Ezzel szemben, helyes ha azt mondjuk, hogy a fénynek *van energiája* – de nemcsak energiája van. Van impulzusa, impulzuszórája, nyomása sőt, sok esetben hőmérséklete és kémiai potenciálja is. Más szavakkal: minden rá vonatkozó alapvető fizikai változó értékkel bír – ez éppen az, amit fizikai rendszernek szokás nevezni. Ugyanúgy fizikai rendszer mint az ideális gáz, a merevtest vagy a fém szabad elektronjai. Gyakran azért tekintünk el az energián kívül a fényt jellemző többi változótól, mivel értékük nagyon kicsi, vagy pedig nehezen mérhető.

Nézzük meg, hogyan győzhetjük meg a hallgatókat arról, hogy (1) a fény entrópiát hordoz, és (2) a napfénynek magas a hőmérséklete.

(1) Ha vákuumban úgy függesztünk fel egy forró testet, hogy az szinte semmilyen termikus kapcsolatban sincs a tartály falával, akkor elektromágneses sugárzást bocsát ki, és lehűl. A lehűlés a test entrópia-csökkenésével jár. A termodinamika második törvénye kimondja, hogy entrópia keletkezhet, de megsemmisíteni nem lehet, így a test entrópiájának növekedése azzal magyarázható, hogy más testekről áramlik rá. Az entrópia a testet elektromágneses sugárzás révén hagyja el, a meleg test által kibocsátott elektromágneses sugárzás tehát entrópia-hordozó.

A Föld is „vákuumban felfüggesztett” test. Vizsgáljuk meg a Föld energia- és entrópiamérlegét.

A Föld sugárzást kap a Naptól, ez a sugárzás többek között energiát és entrópiát hoz magával. Ugyanezt teszi a Földet elhagyó infravörös sugárzás is. Átlagosan a Föld nem melegszik, ami azt jelenti, hogy sem az energiája, sem az entrópiája nem nő. A Föld által kisugárzott infravörös sugárzás tehát ugyanannyi energiát visz el, mint amennyit a Föld a Naptól kap:

$$P_{be} = P_{ki} = P, \quad (1)$$

Elhangzott a „Rio Után” IUPAP konferencián 1994 augusztusában, Egerben. Fordította: *Menczel György*, ELTE Szilárdtestfizika Tanszék.

másrészt: magával viszi a Naptól kapott entrópiát, ezen kívül a Földön termelt entrópiát is.

$$I_{S, ki} = I_{S, be} = I_{S, t}. \quad (2)$$

Könnyű belátni, hogy stacionárius állapot áll be. A j_E energiaáram-sűrűség a Stefan–Boltzmann-törvény szerint:

$$j_E = \sigma \cdot T^4. \quad (3)$$

Tételezzük fel, hogy a Föld kezdeti hőmérsékletét a ténylegesnél alacsonyabbra állítjuk be. A Naptól kapott fény hatására hőmérséklete nőni fog, ezért – (3)-nak megfelelően – a róla eltávozó energiaáram szintén nagyobb lesz. A hőmérséklet addig növekszik, amíg a P_{be} kimenő energiaáram nagysága egyenlő lesz a P_{be} felvett energiaárammal.

Nézzük az entrópiamérleget. A hősugárzás P energiaárama és I_S entrópiája közötti összefüggés:

$$P = \frac{3}{4} T I_S \quad \text{vagy} \quad I_S = \frac{4}{3} \frac{P}{T}. \quad (4)$$

Legyen $T_{Föld}$ a Föld sugárzásának, T_{Nap} pedig a Nap sugárzásának hőmérséklete. Ekkor (1) és (4) alapján az $I_{S, be}$ bejövő entrópiaáram, azaz a Földre a napfényvel érkező entrópiaáram:

$$I_{S, be} = \frac{4}{3} \frac{P}{T_{Nap}}, \quad (5)$$

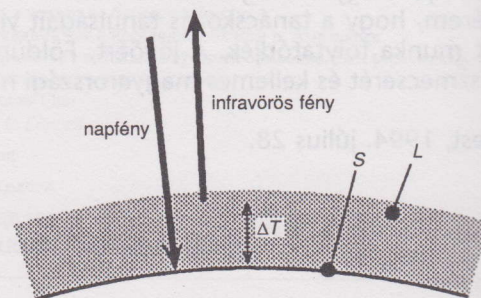
és az $I_{S, ki}$ kimenő, azaz a Földet az infravörös sugárzással elhagyó entrópiaáram:

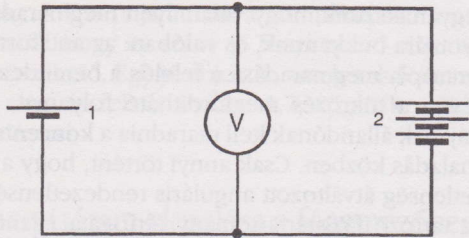
$$I_{S, ki} = \frac{4}{3} \frac{P}{T_{Föld}}. \quad (6)$$

A Föld hőmérséklete sokkal alacsonyabb a Napénál, ezért a Földről eláramló entrópia szinte teljes egészében a Földön termelődik – nagyobb része abban a folyamatban jön létre, amikor a Föld a napfényt elnyeli.

(2), (5) és (6) segítségével megkaphatjuk a termelt entrópia nagyságát:

1. ábra. Ahhoz, hogy az entrópiaáram fennmaradjon, a Föld S felszíne és a légkör L rétege között ΔT hőmérsékletkülönbséget kell feltételezni.





2. ábra. A voltmérő a két nyitott áramkör telepeinek feszültsége közötti értéket mutat.

$$I_{S, term} = \frac{4P}{3} \left(\frac{1}{T_{Föld}} - \frac{1}{T_{Nap}} \right)$$

$T_{Föld}$ annak a helynek a hőmérséklete, ahol az infravörös sugárzás kibocsátódik. Ez nem a földfelület, hanem a légkörnek egy magasabban fekvő L rétege – a felszíni rétegek ugyanis nem átlátszóak az infravörös sugárzás számára (1. ábra). A napfény elnyelése viszont a Föld L felületi rétegén megy végbe, így mielőtt az infravörös fény elviszi az entrópiát, annak el kell jutnia S -ből L -be. Entrópia átvitel csak úgy képzelhető el, ha van hőmérsékletgradiens, a földfelszín melegebb a légkör emittáló rétegeinél. Mennél kevésbé átlátszó a légkör az infravörös fény számára, annál nagyobbak kell lennie a hőmérsékletkülönbségnek. A földfelszín ilyen felmelegedése az üvegházhatás.

(2). A Naptól kapott fény attól az objektumból származik, amelyet mi a Nap felületének tartunk. Mivel a felület hőmérséklete 6000 K, ezért várható, hogy a kibocsátott fényé is ennyi, azaz 6000 K. Ez a következtetés nem látszik nagyon hihetőnek. Miért nem ég el azonnal minden test, amelyet a Nap sugarai érnek? És a napfényre kitett hőmérő miért nem mutat 6000 K-t? A kérdések megválaszolására vizsgáljuk meg közelebbről a hőmérsékletmérés folyamatát. Ha az A rendszer hőmérsékletét B hőmérővel meg akarjuk mérni, akkor A -t és B -t termikus érintkezésbe kell hoznunk, amiből következik, hogy ahhoz, hogy megmérjük a napfény hőmérsékletét, elegendő a hőmérőt a napfényre kitenni. Ebben az esetben a hőmérő valóban többet mutat, mint árnyékban, de jóval kevesebbet, mint 6000 K.

Az ilyen hőmérsékletméréskor elfeledkezünk arról, hogy a hőmérő nem csak a napfényvel, de a levegővel is termikus kontaktusban van. A levegő azonban nincs termikus egyensúlyban a napfényvel, ezért hőmérséklete eltér a fényétől. Akkor viszont mit mutat a hőmérő?

Ehhez hasonló kérdés például a következő: mit mutat az a voltmérő (2. ábra), amelyet két különböző nyitott teleppel kapcsoltunk párhuzamosan? Világos, hogy a voltmérő a két telep feszültségkülönbségét mutatja, de a pontos érték a telepek belső ellenállásától függ.

Így okoskodva rájövünk, hogy a hőmérő által mutatott érték is kompromisszum a vele érintkező rendszerek között, de még nem tudjuk eldönteni, hogy az egyes rendszereknek, külön-külön mekkora a hőmérséklete.

Úgy tűnik, hogy a mi esetünkben könnyű a dolgon segíteni: annyit kell csak tennünk, hogy a hőmérőt átlátszó légtüres tartályba helyezzük el. Eredmény: a hőmérő

által mutatott érték nagyobb, mint előbb, de messze nem éri el a 6000 K-t. Most milyen hibát követhettünk el? Tegyük fel újból a kérdést, hogy melyik rendszerrel van a hőmérő termikus kapcsolatban? Persze, a Nap fényével. De itt közbelép egy másik zavaró tényező, amelyet nem vettünk figyelembe: a minden irányból – azt a kis térszöget kivéve, ahonnan a napfény érkezik – jövő hősugárzás. Az irányok 99,995 %-ából szobahőmérsékletű, körülbelül 300 K-es nem látható infravörös sugárzás árad, és csak a maradék 0,005 %-ból jön a napfény. A hőmérő megint kompromisszumot köt, és a mérleg erősen a 300 K-es szobahőmérséklet javára billen.

Újabb megoldásokat keresünk. Arra kell ügyelnünk, hogy a napfény az irányoknak ne csak egy töredékéből érkezzék; jöjjön a tér minden irányából. Ezt – legalábbis elvben – nem nehéz megvalósítani. A hőmérő körül úgy kell elhelyezni tükröket és/vagy prizmákat, hogy az érzékelő minden irányból kapjon fényt. Erre való egy folytonos tükrök, a fénykoncentrátor, amelynek pontos kivitelezését most nem tárgyaljuk. Nagyon közel jutunk a jó koncentrátorhoz, ha parabolatükröt, kúpos tükröt, vagy lencsét alkalmazunk. Könnyen elérhetünk így 1000 K körüli hőmérsékletet – további javításokkal több ezer kelvint is; a tökéletes tükrrendszer elvezethet a 6000 K-hez. (Természetesen a szokásos hőmérők nem bírják ki ezt a magas hőfokot.)

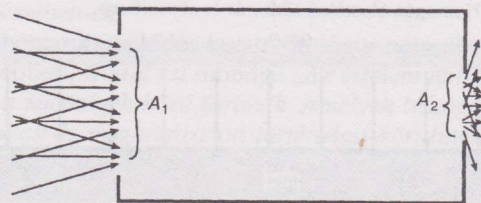
Abból az egyszerű tapasztalatból, hogy gyűjtőlencse vagy parabolatükrök segítségével testeket magas hőmérsékletre lehet hevíteni, levezethető, hogy a napfény hőmérséklete is magas.

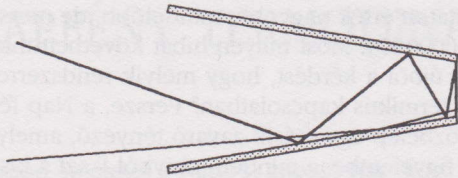
Tárgyalásunk alapján világos, hogy nincs sok értelme amit gyakran mondanak, hogy a „Napban” a hőmérséklet például 45 °C. A napfényre kitett hőmérő nem mutatja sem a napfény, sem a levegő, sem a környezetből jövő infravörös sugárzás hőmérsékletét; a mutatott érték alig értelmezhető, bonyolult kompromisszumok árán alakul ki.

Fénykoncentráció és a termodinamika második tétele

Régebben az optika főleg a képalkotás törvényeivel foglalkozott. Annyira hozzászoktunk ehhez a látásmódhoz, hogy gyakran elfeledkezünk arról, hogy a geometriai optika módszerei csak közelítések, és megsértene egy alapvető fizikai törvényt, a második főtételt. Fénykoncentráció esetén csak lencsére vagy parabolatükrökre gondolunk. Vannak azonban olyan eszközök, amelyekkel a fény hatásosabban és olcsóbban

3. ábra. A fény az A_1 felületen lép be a koncentrátorba, és a kisebb A_2 felületen lép ki.





4. ábra. A szögdiszperzió nő, a térbeli diszperzió csökken amikor a fény koncentrátoron áthalad.

koncentrálhatók. Az ilyen „koncentrátorok” működésének magyarázatára a geometriai optika hagyományos közelítései nem elegendők – előnyösebb a termodinamika eszközeit használni.

A 3. ábrán egy koncentrátor vázlatát látjuk. A fény A_1 nagyságú felületen lép be a készülékbe, és az annál kisebb A_2 felületen lép ki. A

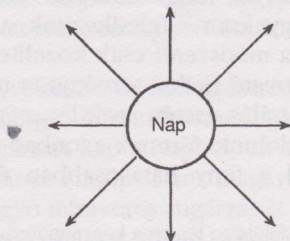
$$c = \frac{A_1}{A_2} \quad (7)$$

hányadost koncentráció-tényezők nevezzük. Kiemeljük, hogy az eszköz nem képezi le A_1 -et. Tipikus koncentrátor egy forgási szimmetriával rendelkező tükröző felület, ami egyfajta tölcser a fény számára. Egyszerű kivitelezését, egy kúpot a 4. ábrán látjuk.

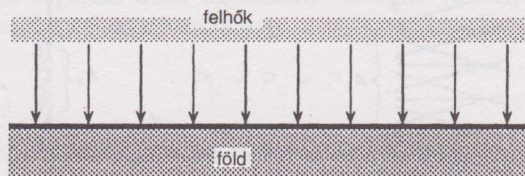
Egy kis apertúraszöggel érkező fénynyalábon szemléltetjük a koncentrátor működését. Megjegyezzük, hogy az apertúra nyílásszögén egy adott helyen a fénysugarak által bezárt maximális szöget értjük. Ez a szög arra jellemző, hogy mennyire rendezett a fény. Azt mondja meg, elkenet-e a nyaláb vagy pedig csak egyetlen irányból érkezik – más szavakkal, hogy nagyon diffúz vagy térbelileg koherens-e. Még másképpen: ebből adódik ki a fény bizonytalansága.

A 4. ábrán látható koncentrátorban a fény (vagy bizonyos hányada) visszaverődik a falak belső felületéről, és csökken annak a felületnek a nagysága, amelyen keresztül áramlik. Lényeges a következő: amilyen arányban csökken a felület, olyan arányban nő az apertúraszög. Nő (az optikai tengelyre merőleges síkban) a fény helyzeti rendezettsége a szögrendezettség rovására.

5. ábra. Példa a gömbalakú Lambert-forrásra, a Nap.



6. ábra. Homogén eloszlású síkforrás és abszorbens.



Arra gyanakszunk, hogy valamilyen megmaradási törvény nyomára bukkanunk, és valóban: az antikorrélációért az entrópia megmaradása felelős a berendezésünkben. Lévén a tükrözés megfordítható folyamat, a fény entrópiájának állandónak kell maradnia a koncentrátoron való áthaladás közben. Csak annyi történt, hogy a térbeli rendezetlenség átváltozott anguláris rendezetlenséggé. A fényhez tartozó fázistértartomány térfogata állandó marad: a normális tér kiterjedése csökken, az impulzustér viszont nő. Ezt a következő összefüggéssel fejezhetjük ki:

$$A \sin^2 \alpha = \text{állandó}, \quad (8)$$

ahol A a nyaláb keresztmetszete, α az apertúra fénynyílásszöge. Helyettesítsük be (8)-at a koncentráció-tényezőt definiáló (7) egyenletbe:

$$c = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\sin^2 \alpha_2}{\sin^2 \alpha_1} \quad (9)$$

Felvetődik egy kérdés, amely nemcsak a gyakorlati, de elvi szempontból is érdekes: mennyire koncentrálható a fény, létezik-e felső határ?

Van felső határ, és ez a belépő apertúra szögétől függ. A koncentrálhatóság korlátos, mivel a koncentrátorból való kilépéskor a nyílásszög nem lehet a teljesen diffúz fény szögénél, 90° -nál nagyobb. Egyszerűen kaphatjuk meg a koncentráció-tényező maximumát meghatározó kifejezést. Akkor van maximum, amikor legkisebb a térbeli bizonytalanság, azaz a szög bizonytalansága maximális – $\alpha_2 = 90^\circ$ -nál. A (9) egyenletből:

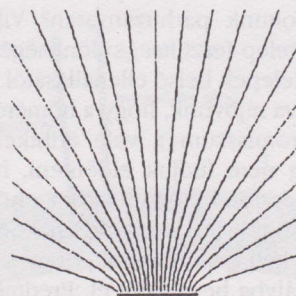
$$c_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \alpha_1} \quad (10)$$

Látjuk, hogy kis szögdiszperziójú fény jobban koncentrálható, mint ha nagyobb az apertúraszög. Diffúz fényre, ahol $\alpha_1 = 90^\circ$, az előbbi kifejezésből $c = 1$ lesz, azaz a diffúz fény nem koncentrálható.

Nézzünk egy számszerű példát. A Nap fénye $\alpha_1 = 0,266^\circ$ szöggel érkezik hozzánk. (10) alapján kiszámítható, hogy a maximális koncentráció 46 400-szoros.

Azt gondolhatjuk, hogy nagyon bonyolult feladat olyan koncentrátort készíteni, amellyel ez a maximális koncentráció megvalósítható, pedig nem ez a helyzet. Tükröző felületű anyagból készített kúpos tölcserrel ennek az értéknek a 70 %-a elérhető.

7. ábra. Az energiasűrűség áramvonalai mindig merőlegesen lépnek ki a Lambert-forrásból.

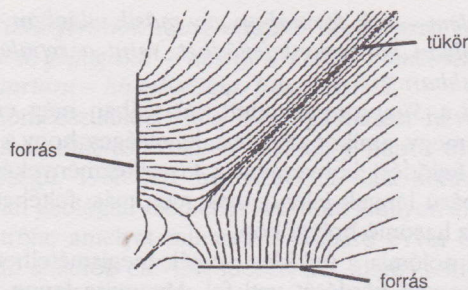


Azok, akik nem járatosak a „nemleképező” optikában, felvethetik, hogy az arány jó fényképező-objektívvel tovább növelhető. Egy jó objektív, amelynek fókusz-távolsága 50 mm, és relatív nyílása 1,7, c_{\max} -nak csak 10 %-át eredményezi.

Az energiaáram eloszlása a fénymezőben

A fény gyakran, ha nem is mindig, egyik helyről a másikra halad, ilyenkor tehát transzportjelenség. A transzportfolyamat gyakran stacionárius, ezért kényelmesen lehet áramvonalakkal leírni. Bármilyen extenzív mennyiség árama szemléltethető áramvonalakkal. Sok probléma szempontjából az energiamező árama a legfontosabb.

Ha fényről van szó, nem szokás az energiaáramot vizsgálni. Ez talán onnan származik, hogy hagyományosan a fény esetében nem tartották lényegesnek az energiát – elsősorban a képszerkesztéssel foglalkoztak. Ebből a szempontból az energiaáram elhanyagolható, a geometriai optika módszerei erre sokkal jobbak voltak. Megvizsgáljuk az energiaáramlás áramvonalait egyszerű, de tipikus hőszugárzási mezőkben. Ez a fény nagyon kevésbé koherens, ezért az energiaáram időátlagát ábrázolhatjuk; az ingadozások rendkívül gyorsan zajlanak, a pillanatnyi értékek eloszlása nem volna érdekes. (Ugyanaz a hely-



8. ábra. Két Lambert-forrás és egy tükör. Az energiasűrűség áramvonalai mindig párhuzamosan futnak a tükör felületével.

zet, mint a folyadékáramlás esetében – az energiaáramlást ott sem írjuk le molekuláris szinten.)

Az 5. ábrán egy gömbalakú Lambert-emittert, például a Napot mutatjuk be, a 6. ábrán egy homogén eloszlású síkforrást és egy sík abszorbert látunk. A 7. ábra egy kis kiterjedésű sík Lambert-forrás fénymezejét szemlélteti. Lambert-forrás esetében az energia áramvonalai a felületről mindig merőlegesen indulnak ki. Az utolsó, 8. ábrán két Lambert-forrás fénymezeje látható, ahol a fény egy síktükör két oldaláról verődik vissza. Itt az az egyszerű szabály érvényes, hogy bármilyen is a tükör alakja, az energia-áramvonalak mindig a felülettel párhuzamosan haladnak.

A leírásból kitűnik, hogy a fényáramlás jellege nagyon hasonló a folyadékáramláséhoz.

A HŐMÉRSÉKLET ÉS A FÖLDI BIOSZFÉRA FEJLŐDÉSE

David W. Schwartzman
Howard Egyetem, Biológia Tanszéke
Washington D.C., USA

Úgy tűnik, hogy a felszín hőmérséklete kritikus módon meghatározta a mikrobiológiai fejlődést a prekambriumban. A szélsőséges, hőmérséklet-tűrő termofil baktériumok, cianobaktériumok, aerob eukarióták és többsejtűek kialakulását nyilvánvalóan a felszíni hőmérséklet-csökkenés váltotta ki, amikor a felszín hőmérséklete ezen szervezeti csoportok életképes növekedéséhez szükséges hőmérséklet felső határértéke alá csökkent. A geokémiai és geológiai adatok alátámasztják ezeket a magas hőmérsékleti értékeket. A földfelszíni hőmérsékletek okozati összefüggésben állanak a biotikus és a bioszférikus fejlődés visszacsatoló mechanizmusával, a Nap fényességének változása és a Föld szerkezetének történelmi kialakulása okozta kényszerfeltételeken belül. A Föld felszínének fokozatos hűlése, amely a földi élővilág, a fauna és flóra kialakulását eredményezte, kapcsolatban áll azzal, hogy a vegyi mállás következtében a légköri szén-dioxid mennyisége csökken. Lehetséges, hogy a nem-földi bioszférák szabályozása hasonló módon történik. A felszíni

hőmérséklet történelmi alakulása kritikus jelentőségű lehet a komplex élet és az intelligencia kifejlődéséhez szükséges idő szempontjából.

Bevezetés

A legtöbb kiváló, törzsfajlás kutatással foglalkozó biológus hevesen ellenzi a Földön kívüli értelmes lények keresését (SETI = search for extraterrestrial intelligence). Érveik arra irányulnak, hogy „a természetes értelem megjelenése hihetetlenül valószínűtlen”. Tipler, aki a SETI nagy ellenzője, az alábbi módon fogalmazza meg ezt: „A korszerű szintézis, a törzsfajlás mai elmélete a törzsfajlás valamennyi ágának véletlen esélyét hangsúlyozza: az összes elágazáshoz képest rendkívül kis számban vannak azok a lehetséges elágazások, amelyek értelmes élethez vezethetnek.”

Néhány törzsfajlás-kutató biológus nem olyan bizonyos ebben. Gould azt mondja: „Az értelem tényleg azok közé a jelenségek közé tartozik, amelyek túlságosan bonyolultak és meghatározott történelmi körülmények között ismétlődhetnek meg? Nem hiszem, hogy erre következtethetnénk abból, hogy nincs hozzá fogható a Földön.

Elhangzott a „Rio Után” IUPAP konferencián 1994 augusztusában, Egerben. A Biosztronómiai Szimpóziumon Santa Cruzban, 1993-ban is elhangzott, és az S. Sostak, ASP szerkesztette Proceedingsben megjelent előadás változtatás nélküli másolata.