

# A NAPSUGÁRZÁS SPEKTRUMA ÉS AZ EMBERI SZEM ÉRZÉKENYSÉGE

Antal Ákos

BME, Finommechanikai, Optikai Tanszék

Kály-Kullai Kristóf, Farkas Henrik

BME Kémiai Fizika Tanszék

Aki tanulta fizikából a fekete test sugárzását, annak bizonyára ismerősnek tűnnek a következő mondatok: „A napfelszín hőmérsékletének (kb. 6000 K) megfelelő fekete sugárzás spektrális eloszlásának a maximuma körülbelül 550 nm. Ugyanitt van a maximuma a szem érzékenységi görbéjének is.” Ez a két állítás együtt azt sugallja, hogy nem véletlenről van ám szó, a szem érzékenysége nyilván igazodott a Nap sugárzásához, arra optimalizálódott.

Egyik legjellemzőbb példaként idézzünk egy magyar fordításban is megjelent tankönyvet [1]: „A Nap fekete-test-görbéje (15–2a. ábra) azt mutatja, hogy a kisugárzott energia 40%-a a látható tartományra jut, a fennmaradó energia legnagyobb része pedig a közeli infravörösbe... Az emissziós csúcs figyelemreméltóan közel van az emberi szem érzékenységi maximumához (15–2b. ábra). A két görbe csúcsai elhelyezkedésének hasonlósága több véletlen egybeesésnél. Az ember fejlődése során azok az egyedek kerültek kedvezőbb helyzetbe a természetes kiválasztódás folyamán, akiknek a szeme abban a színképtartományban volt a legérzékenyebb, amelyikben a legtöbb fény is volt. Így a fejlődés folyamán általában az állati populációk válaszgörbéjének a csúcsa a Nap fekete-test-görbéje csúcsának irányába toldott el.” Az idézett 15–2. ábra aláírása: „a) A Nap felületéről kisugárzott fény spektrális eloszlása; b) a szem válaszáinak spektrális eloszlása. A két függvény maximuma 550 nm környékén van.” Megjegyezzük, hogy mindkét ábrán a hullámhossz van feltüntetve a vízszintes tengelyen.

Másik példaként idézzünk egy, a közelmúltban megjelent, ugyancsak alapos optika tankönyvet [2]: „A nappali látás  $V(\lambda)$  függvényének maximuma 555 nm-en van; ez megegyezik a Nap (központi égítüstünk) spektrális sugárzási teljesítményének maximumhelyével! Ugyanakkor az esti látás  $V'(\lambda)$  függvényének maximuma 507 nm-nél található, és ez az éjszakai hold- és csillagfények kékebb teljesítményeloszlásának felel meg (21.7. ábra).”

Az interneten lévő friss anyagok között is található igen markáns megfogalmazásokat [3], a Wien-törvényt ismertető résznél szerepel (magyar fordításban): „a Nap sugárzásának maximuma a zöld színnél van (a szemünk erre a színre a legérzékenyebb).”

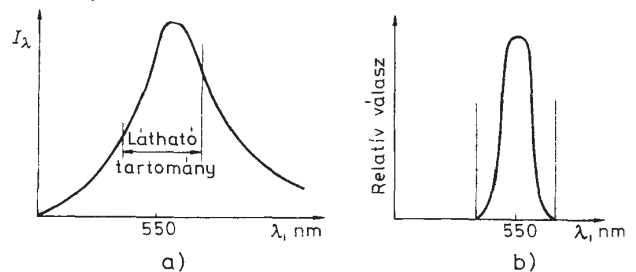
Az egyik legérdekesebb idézet e témával kapcsolatban a clevelandi Case Western Reserve University honlapján [4] található (magyar fordításban): „A Nap sugárzására a maximum 501,4 nm-nél van, ami a látható spektrum zöld részébe esik. Ha azonban ránézünk (amit persze sohase tegyünk, mert a szem károsodhat!), a Nap inkább sárgának látszik. Eddig senkinek sem sikerült megmagyaráznia, hogy miért tűnik a Nap sárgának ahelyett, hogy zöld lenne. Azonban érdekes tény, hogy szemünk körülbelül ilyen hullámhosszú zöld fényt lát a legjobban.”

Más tankönyvek ennél sokkal árnyaltabban fogalmazzanak. Megtartják ugyan a Nap szemre gyakorolt hatásának legalábbis hallgatólagos feltételezését, de nem a két spektrum maximumhelyének azonosságát hangsúlyozzák, hanem gyakran megelégednek lazább megfogalmazással, például, hogy a spektrum maximuma a látható tartomány közepére esik. Egy ilyen árnyaltabb megfogalmazásra példa a következő [5]: „...a szem ezen érzékenységi görbéje összefüggésbe hozható érzékelő szerveink hosszan tartó alkalmazkodásával a bolygónkon uralkodó körülményekhez, ahol is a legfényesebb fényforrás mindig is a Nap volt.”

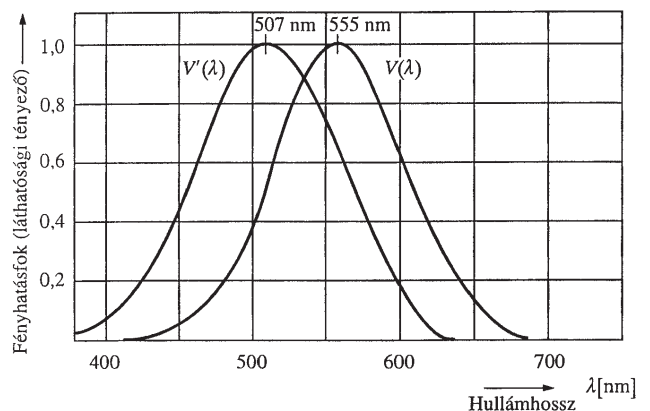
A tankönyvek, oktatási anyagok, szakirodalmak döntő többsége abban viszont közös, hogy a spektrumokat hullámhossz szerinti felbontásban ábrázolják. Az, hogy az evolúció során a Nap sugárzásának befolyása volt az emberi szem érzékenysége alakulására, kézenfekvő, racionális gondolat. Az viszont, hogy mindezt a hullámhossz szerinti spektrum maximumának helyéből olvassák ki, már erősen kifogásolható.

A továbbiakban kimutatjuk, hogy a hagyományos megfogalmazás, nevezetesen a spektrum maximumának és a szem érzékenységre jellemző láthatósági görbe (más néven érzékenységi spektrum) maximumának egybeesése – mivel az a hullámhosszhoz tartozó spektrum

A. NUSSBAUM, R.A. PHILLIPS: *Modern optika mérnököknek és kutatóknak* című könyvéből idézett 15–2. ábra



F. JENKINS ET AL.: *Optika* című könyvében szereplő 21.7 ábra



jellemzője – erősen vitatható, bizonytalan megalapozottságú érv. Kísérletet teszünk a napsugárzás spektruma és az emberi szem érzékenységi görbéje között egy egyértelműbb kapcsolat megállapítására.

## Spektrális eloszlás: mi a független változó?

A spektrumokkal kapcsolatos irodalomban, még a modern irodalomban is, a hullámhossz szerinti felbontás előfordulási gyakorisága magasán megelőzi a frekvencia szerinti felbontását. Ez nyilván csak tradicionális okok miatt van így, hiszen a frekvencia fizikailag sokkal alapvetőbb jellemzője az elektromágneses hullámoknak, mint a hullámhossz: a frekvencia megmarad, a hullámhossz pedig változik a közeghatáron való áthaladásnál vagy inhomogén közegben történő terjedésnél.

Legyen  $E_\nu(\nu)$  egy elektromágneses sugárzás spektrális sűrűségfüggvénye, ahol  $\nu$  a frekvencia. Ez azt jelenti, hogy a sugárzás intenzitása, az egységnyi felületre vonatkoztatott sugárzási teljesítmény

$$E = \int_0^{\infty} E_\nu(\nu) d\nu. \quad (1)$$

Bontsuk most föl ezt a sugárzást a frekvencia valamilyen függvénye szerint, azaz legyen adva egy kölcsönösen egyértelmű  $z = z(\nu)$  függvény, és adjuk meg a sugárzás  $E_z$  spektrumát a  $z$  független változó szerint:

$$E = \int_0^{\infty} E_\nu(\nu) d\nu = \pm \int_{z(0)}^{z(\infty)} E_z(z) dz, \quad (2)$$

ahol

$$E_z = \begin{cases} +E_\nu(\nu) d\nu/dz \\ -E_\nu(\nu) d\nu/dz \end{cases}; \quad dv/dz \begin{cases} > 0 \\ \leq 0 \end{cases}. \quad (3)$$

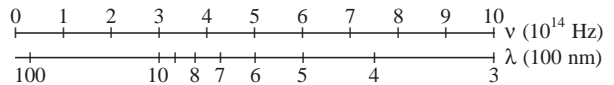
Tehát amiatt, hogy a  $\nu$  skálája nem egyezik meg a  $z$  skálájával, a két spektrális sűrűségfüggvény eltér: bejön egy  $d\nu/dz$  nem állandó szorzófaktor. Ezért az  $E_z$ , illetve  $E_\nu$  spektrális eloszlások alakja eltér egymástól, emiatt a spektrum maximuma sem invariáns erre a transzformációra, a  $z$  szerinti eloszlás maximuma eltér a  $\nu$  szerinti eloszlás maximumától, más a maximum értéke és máshol van a maximum helye is! Nézzük például a frekvencia és a hullámhossz közti transzformációt, azaz legyen  $z = \lambda = c/\nu$ ! A sugárzás intenzitása a hullámhossz szerinti spektrális eloszlásból

$$E = \int_0^{\infty} E_\lambda d\lambda, \quad (4)$$

ahol a spektrális eloszlás sűrűségfüggvénye

$$E_\lambda = E_\nu \frac{c}{\lambda^2}. \quad (5)$$

Az 1. ábrából leolvasható, hogy növekvő frekvenciatartományokban az „egységnyi” hullámhossztartomány a



1. ábra. A frekvencia és a hullámhossz skálája elektromágneses sugárzásnál vákuumban

spektrum egyre nagyobb részét fedi le. Az (5) formulából következik, hogy az  $E_\lambda$  a magasabb frekvenciáknál nagyobb faktoriall tér el  $E_\nu$ -től, tehát a hullámhossz szerinti maximumnak nagyobb frekvencia felel meg, mint a frekvencia szerinti maximumnak. Ha a maximum a látható tartományban van, akkor a hullámhossz szerinti maximum az ibolya felé tolódik el a frekvencia szerinti maximumhoz képest.

## A fekete test sugárzásának spektruma

A fekete test sugárzásának spektrális intenzitása, azaz az egységnyi felületre, egységnyi időre, egységnyi frekvenciatartományra és  $2\pi$  térszögre jutó kisugárzott spektrális energia, a spektrális emisszió (a sugárzás spektrális intenzitása):

$$E_\nu = \frac{2\pi b}{c^2} \frac{\nu^3}{e^{b\nu/kT} - 1}. \quad (6)$$

Ez Planck sugárzási törvénye [6, 7]. (Meggjegyezzük, hogy a különböző tankönyvekben a fenti alak helyett olyanok is előfordulnak, amelyekben a  $2\pi$  állandó helyett más szerepel. Az eltérés egyik oka lehet, hogy a vonatkoztatási térszög nem  $2\pi$ , hanem  $1$ ,  $\pi$ , vagy  $4\pi$ . Másik ok lehet, hogy néha a  $h = b/2\pi$  jelölést használják  $b$  helyett. Mindez nem érinti a sugárzási görbe alakját.)

Ha a szélsőérték helyére vagyunk kíváncsiak, akkor elegendő vizsgálnunk az

$$E_x(x) = K \frac{x^3}{e^x - 1} \quad (7)$$

függvényt, ahol  $K$  állandó. E függvénynek  $x_1$ -nél maximuma van, ahol  $x_1$  az

$$x_1 + 3e^{-x_1} = 3 \quad (8)$$

nem algebrai (transzcendens) egyenlet gyöke, körülbelül 2,82. Áttérve az  $y = 1/x$  változóra, a spektrális eloszlásfüggvény

$$E_y = \frac{K}{y^5} \frac{1}{e^{1/y} - 1}. \quad (9)$$

Ennek viszont  $y_2$ -nél van maximuma, ahol  $y_2$  az

$$\frac{1}{y_2} + 5e^{-1/y_2} = 5 \quad (10)$$

egyenlet gyöke. A megfelelő  $x_2 = 1/y_2$  értéke:  $x_2 = 4,96$ . A két maximumhely tehát jelentősen eltér egymástól, a frekvencia szerinti maximum a közeli infravörös, a hullámhossz szerinti maximum pedig a kék tartományba

1. táblázat

**A különböző spektrális maximumok és láthatósági tartományok összevetése a tapasztalati értékekkel (1 THz = 10<sup>12</sup> Hz).**

	A	B	C	D	E
$\nu_a$ (THz)	241	425	336	327	384
$\lambda_a$ (nm)	1241	706	894	915	780
$\nu_m$ (THz)	341	601	474	463	540
$\lambda_m$ (nm)	878	499	632	647	555
színe	infravörös	(világos)kék	vörös	vörös	sárgászöld
$\nu_b$ (THz)	483	850	671	655	789
$\lambda_b$ (nm)	621	353	447	457	380

A) A frekvencia szerinti spektrális eloszlás maximumából számolt adatok.

B) A hullámhossz szerinti spektrum maximumából számolt adatok.

C) A logaritmikus skálából számolt adatok.

D) Az energiahasznosítás optimumából számolt adatok.

E) A fotometriában nemzetközileg elfogadott láthatósági görbéből [11] vett adatok.

Az indexek jelentése a  $\nu$  frekvenciáknál és a  $\lambda$  hullámhosszaknál:  $a$ : a tartomány vörös felé eső határa,  $b$ : a tartomány ibolya felé eső határa,  $m$ : a tartomány határainak geometriai közepe, tehát az alsó határ 2<sup>1/2</sup>-szerese, kivéve az E oszlopot, ahol ez a láthatósági görbe maximumhelye.

esik, annak is a nagyobb hullámhosszú részére, amit [8] világoskéknek (*light blue*) nevez, tehát a *világos* előtag nem a telítettségre, hanem a frekvenciára utal. A gyakorlatban gyakran célszerű logaritmikus skálát használni. Bevezetve a  $w = \ln x$  új skálát, az  $E_w$  spektrális eloszlása

$$E_w = x E_x = K \frac{x^4}{e^x - 1} \quad (11)$$

E függvény maximuma  $x_w$ -nél van, ahol  $x_w$  az

$$x_w + 4 e^{-x_w} = 4 \quad (12)$$

egyenlet gyöke,  $x_w = 3,92$ . A spektrum maximumának helyére alapozott érvelés tehát nem egyértelmű: nagyban függ a használt skálától. Nézzünk meg ezért most egy más típusú gondolatmenetet!

Először is felhívjuk a figyelmet arra, hogy az emberi szemnél a spektrum látható tartománya mind a világosban, mind a sötétben való látás esetén körülbelül egy oktáv, a két végpont frekvenciájának aránya közel 2. Hasonló a helyzet a legtöbb állatnál, még akkor is, ha előfordul látás az ultraibolya, illetve az infravörös tartományban is. Az embernél az eltérő spektrális típusú fotoreceptorok száma három, az állatoknál ez a szám ettől különböző lehet (emlősöknél 2, lepkéknél 5, a sáskaráknál 10–12) [9].

A látás során több különböző folyamat, mechanizmus, illetve többféle sejt játszik szerepet (a fény abszorbeálása, elektromos jellé, ingerületté alakítása, továbbítása, feldolgozása: ezeket végzik a fotoreceptorok, csapok, pálcikák, idegsejtek). Nem tisztázott, és ennek tisztázására mi sem vállalkozunk, hogy mi a pontos magyarázata e komplex folyamatban annak a tapasztalati ténynek, hogy az embernél és az állatok többségénél a látható tartomány körülbelül egy oktáv szélességű. Itt csak egy elképzelést, analóg példákat hozunk a fizikából ennek a ténynek egyik lehetséges magyarázatára.

A lineáris oszcillátor gerjesztett rezgéseinek rezonancia a sajátfrekvencia közelében fordul elő. Nemlineáris oszcillátorok gerjesztésénél viszont előfordulhat

szuper-, sőt szubharmonikus rezonancia is, a sajátfrekvencia  $n$ -szeresénél, illetve  $n$ -ed-résznél is, ahol  $n$  egész szám [10]. Különböző hangforrások által keltett hanghullámoknál, például húrok és sípok esetén, már lineáris esetben is megjelennek felhangok. Infravörös abszorpciós spektrumokban egy csúcs mellett gyakran megfigyelhető egy gyengébb csúcs („felharmonikus sáv”) is.

Mindezek alapján elképzelhető, hogy a látásban szerepet játszó tényezőknél is előfordulhat, hogy ha egy adott frekvenciára érzékeny egy bizonyos érzékelő, akkor ugyanaz a kétszeres frekvenciájú fényt is érzékeli. Ha a láthatósági tartomány oktávnál nagyobb lenne, akkor előfordulhatna, hogy a szem nem tudná megkülönböztetni a kétszeres frekvenciájú jelet, tehát egyfajta szintévesztés fordulhatna elő.

Valóban, szubjektív színérzetünk szerint a vöröstől távolodva a spektrumban, a színt a kékig távolodni érezzük, de az ibolyában mintha megint közelebb kerülnénk a vöröshöz, ugyanis az ibolyát a kék és vörös színekből lehet kikeverni. A színmérésben használt papucsdiagram is tükrözi a spektrum két szélének viszonylagos közelségét [2].

Ezért kézenfekvő tekintenünk a következő optimalizációs problémát. Hol helyezünk el egy oktáv szélességű ablakot a spektrumban (ez felelne meg a látható tartománynak) úgy, hogy ez az ablak a kisugárzott energia legnagyobb részét fedje le? Keressük tehát az

$$\int_{\nu_{3a}}^{2\nu_{3a}} E_\nu d\nu = \text{maximum}, \quad (13)$$

vagyis az azzal egyenértékű

$$\int_{x_{3a}}^{2x_{3a}} \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \text{maximum} \quad (14)$$

szélsőérték-probléma megoldását. A szélsőérték szükséges feltétele

$$\frac{2(2x_{3a})^3}{e^{2x_{3a}} - 1} = \frac{x_{3a}^3}{e^{x_{3a}} - 1},$$

melyből egyszerűsítéssel adódik

$$e^{x_{3a}} = 15, \quad (15)$$

azaz  $x_{3a} = \ln 15 = 2,71$ . A megfelelő optimális tartomány határai tehát  $x_{3a}$ ,  $x_{3b} = 2x_{3a}$ . A tartomány „közepének” tekinthetjük a logaritmikus skálához igazodó geometriai közepe, azaz  $x_3 = 2^{1/2}x_{3a}$ , ekkor teljesül, hogy  $x_{3b}/x_3 = x_3/x_{3a}$ . Ez a választás van összhangban azzal a megfigyeléssel, hogy egyes érzékszerveink skálája jó közelítéssel logaritmikus. A logaritmikus skála jelentőségét húzza alá a Weber–Fechner-féle pszichofizikai törvény: az ember érzetei (látás, hallás, tapintás) az ingerek logaritmusával arányosak. (Itt azonban ez csak analógia, mert itt nem az intenzitásról, hanem a frekvenciáról van szó.)

2. táblázat					
A sugárzás intenzitásának százalékos eloszlása a láthatósági ablakon belül és kívül 5800 K hőmérsékletű feketetest-sugárzás esetén					
	A	B	C	D	E
a)	18,0	50,2	34,3	32,9	43,1
m)	41,5	42,4	47,5	47,5	46,7
b)	40,5	7,4	18,2	19,6	10,2

A, B, C, D, E jelentése ugyanaz, mint az 1. táblázatban.

a) Az ablakon kívüli, kisfrekvenciás sugárzás.

m) Az ablakon belüli sugárzás.

b) Az ablakon kívüli, nagyfrekvenciás sugárzás.

Mindhárom adat az összintenzitás százalékában értendő.

3. táblázat					
A mért spektrummal végzett optimumszámítások adatai					
	A	B	C	D	E
$\nu_a$ (THz)	212	428	317	335	384
$\lambda_a$ (nm)	1416	700	946	896	780
$\nu_m$ (THz)	299	606	448	473	540
$\lambda_m$ (nm)	1001	495	669	634	555
színe	infravörös	(világos)kék	vörös	vörös	sárgászöld
$\nu_b$ (THz)	424	857	634	669	789
$\lambda_b$ (nm)	708	350	473	448	380

A jelölések magyarázata megtalálható az 1. táblázatnál.

4. táblázat					
Százalékos intenzitáseloszlások a mért spektrummal számolva					
	A	B	C	D	E
a)	10,9	52,4	29,1	31,9	43,4
m)	40,5	46,2	56,5	57,6	53,4
b)	48,6	1,4	14,4	10,5	3,2

A jelölések magyarázata megtalálható az 1. és 2. táblázatnál.

A frekvencia és a hullámhossz szerinti maximumokhoz is hozzárendelhetünk egy megfelelő, oktáv szélességű „látható” tartományt oly módon, hogy a maximum helye az oktáv szélességű tartomány geometriai közepén legyen. Az így számolt látható tartományok egymással és a tényleges láthatósági adatokkal való összehasonlítását az 1. táblázat tartalmazza.

A 2. táblázat azt mutatja, hogy a sugárzás intenzitása hogyan oszlik el a spektrumnak a láthatósági ablakon belüli és az azon kívüli részei között, 5800 K hőmérsékletű feketetest-sugárzásra.

## A mért napsugárzás és az emberi szem érzékenységének kapcsolata a spektrumok alapján

Az irodalomban hozzáférhető napspektrumok nagy része csak a látható tartományra terjed ki, továbbá megkülönböztetik a direkt napsugárzásból, valamint a szórt, vagyis az égboltról jövő sugárzásból eredő spektrumokat. A számításokhoz az adatokat [12] a *Renewable Resource Data Center* honlapjáról vettük, és a *global tilt* oszlopot használtuk, amely az USA-ban tipikus besugár-

zásnak felel meg. A napsugárzás folytonos spektrumát a 2. ábra mutatja.

A 3. táblázat összehasonlítja a háromféle optimumszámítás adatait.

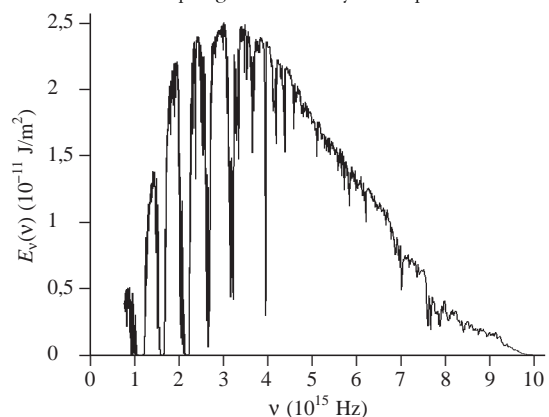
## Elemzés

A biofizikai irodalomban sok cikk foglalkozik azzal a kérdéssel, hogy az élőlények a napsugárzás elektromágneses spektrumának melyik részét hasznosítják, és miért éppen azt (lásd pl. [13, 14]). Egyik ismert jelenség, amely a láthatósági ablakkal kapcsolatos, a polarizációlátás UV-paradoxona: egyes rovarok a polarizált égboltfényt UV-tartományát látják [15].

Nyilvánvalóan összefüggés van a földi élőlények fényérzékelése, így az emberi szem érzékenységi spektruma, és a napsugárzás között. Az az érvelés viszont nem meggyőző, amely ezt az összefüggést a hullámhossz szerinti spektrális maximumhelyek közelségére alapozza. A hullámhossz szerinti spektrum használatát csak tradicionális okok magyarázzák. Az általunk javasolt követelmény, nevezetesen, hogy az oktáv szélességű láthatósági tartományt a hasznosított energia maximuma jelölje ki, független a skálától, hullámhossz, frekvencia vagy bármely más skálán is ugyanazt az eredményt kapjuk.

Arra, hogy a hullámhossz szerinti spektrum és a frekvencia szerinti spektrum maximuma jelentősen eltér egymástól, már régebben rámutattak, például *Overduin* [16]. Mint láttuk, a frekvencia szerinti maximum az infravörös tartomány felé tér el a láthatósági görbe maximumától. *Overduin* felvet egy másik lehetséges megközelítést, melyben a szemnek mint fotondetektornak az optimalizálását javasolja (a látásban hasznosított fotonok száma legyen maximális). Ha azt követelnénk meg, hogy a napsugárzásból hasznosított fotonok száma legyen maximális, akkor az  $E_\nu(\nu)$  függvényt, illetve ennek egy ablakban való integrálját kellene maximalizálni, az azonban még inkább a rossz irányba – még kisebb frekvenciák felé – tolná el.

2. ábra. A Nap sugárzásának folytonos spektruma



Overduin is láthatósági ablak bevezetésével, az ezen ablakra vett integrál maximalizálásával véli felfedezni a helyes leírást, a napsugárzás és a szem érzékenysége közti kapcsolat magyarázatát. Ám okoskodása lényegében ugyanazt a hibát tartalmazza, ami a kifogás volt: ő is kitünteti a hullámhosszat a frekvenciához képest. A másik eltérés az itt közölt optimalizációs elképzeléstől az, hogy ő az ablak abszolút szélességét veszi adottnak, mi pedig nem az intervallumot, hanem a végpontok arányát vesszük adottnak.

Az 1. és a 3. táblázat összevetésével láthatjuk, hogy a különböző optimalizálási követelményekből levonható következtetések közel azonosak mind az 5800 K-es feketetest-sugárzásra, mind a számításainkhoz felhasznált mért napsugárzásra. Tehát a napsugárzás esetünkben is közelíthető 5800 K-es feketetest-sugárzással, ami régóta közhírt.

Arra, hogy a hullámhossz szerinti maximumokra alapozott érvelés jól illeszkedik a tényleges láthatósági görbéhez, sőt jobban, mint akár a frekvenciára, akár az energiaoptimumra alapozott érvelés, két magyarázat képzelhető el:

1. Az evolúció során a látásra nem a fekete sugárzás, még csak nem is – vagy pontosabban nemcsak – a napspektrum gyakorolható döntő befolyást, hanem más tényezők, például a konkrét környezetben lévő – a létért való küzdelemben fontos – másodlagos fényforrások által visszavert és szórt napfény, amelynek spektrális eloszlását legfeljebb becsülni lehetne.

2. A másik elképzelhető, de általunk valószínűtlennek tartott magyarázat szerint létezik valami olyan feltáratlan tényező a látás mechanizmusában, amely a hullámhossz szerinti eloszlást kitüntetetté teszi például a frekvencia szerinti eloszláshoz képest is.

## Köszönetnyilvánítás

A munkát részben az OTKA T-42708 számú pályázata támogatta. A szerzők köszönetet mondanak *Chbris A. Gueymard*nak, a Solar Consulting Services kutatóintézet (Edgewater, Florida, USA) kutatójának, *Wenzel Klára* egyetemi magántanárnak (BME, Mechatronika, Optika és Műszertechnika Tanszék) és *Verbás József* egyetemi tanárnak (BME, Kémiai Fizika Tanszék) értékes segítségükért.

## Irodalom

1. A. NUSSBAUM, R.A. PHILLIPS: *Modern optika mérnököknek és kutatóknak* – Műszaki Könyvkiadó 1982. 367. o., A mű eredeti címe: *Contemporary Optics for Scientists and Engineers* – Prentice Hall Inc.
2. F. JENKINS ET AL.: *Optika* (szerk. *Ábrahám György*) – Panem Kft., 1997, 473. o.
3. University of New Hampshire, Astronomy, *Course Review*, part 7. <http://www-ssg.sr.unh.edu/406/Review/rev7.html>
4. [http://home.cwru.edu/~sjr16/advanced/sun\\_ourstar.html](http://home.cwru.edu/~sjr16/advanced/sun_ourstar.html) – Case Western Reserve University honlapja
5. N.I. KALITYEVSKIJ: *Vólnovaja optika* – Izdatyelsztvo Nauka, Moszkva 1971, 13. o. (orosz nyelven)
6. CSEREPES L., PETROVAI K.: *Kozmikus fizika* – Egyetemi jegyzet, ELTE, 2. kiadás, Budapest, 2002.
7. NAGY K.: *Termodinamika és statisztikus mechanika* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1991.
8. C.A. GUEYMARD, H.D. KAMBEZIDIS: *Solar Spectral Radiation* – in: *T. Muneer et al.: Solar Radiation & Daylight Models* – 2nd ed., Elsevier, 2004, Ch 5, 221–301
9. MOLNÁR G., BLAHA B., HORVÁTH G.: *Látás az ibolyán túl* – Természet Világa, 1997. április, 155–159
10. BUDÓ Á.: *Mechanika* – Tankönyvkiadó, Budapest, 1988.
11. *MSZ 9620, Fénytechnikai terminológia*
12. Renewable Resource Data Center honlapja: <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/ASTMG173/ASTMG173.xls>
13. D.M. GATES *Biophysical Ecology* – Springer-Verlag, Heidelberg–Berlin–New York, 1980.
14. G. HORVÁTH, J. GÁL, T. LABHART, R. WEHNER: *Does reflection polarization by plants influence colour perception in insects?* The Journal of Experimental Biology 205/21 (2002) 3281–3298
15. BARTA A., MIZERA F., HORVÁTH G.: *Miért érdemes az égboltfény polarizációját az ultraibolyában érzékelni?* – Fizikai Szemle, 54(2004) 401–408
16. J.M. OVERDUIN: *Eyesight and the solar Wien peak* – Am. J. Phys. 71/3 (March 2003) 216–219

# A POLIKRISTÁLYOS MEGSZILÁRDULÁS TÉRELMELETI MODELLEZÉSE

Gránásy László, Pusztai Tamás, Börzsönyi Tamás  
MTA SZFKI, Budapest

Legtöbb szerkezeti anyagunk polikristályos szerkezetű, azaz nagyszámú kristályszemcsekből épül fel, amelyeknek méret, összetétel, alak stb. szerinti eloszlása, a *mikroszerkezet* határozza meg az adott anyag fizikai és korróziós tulajdonságait. A fémekkel kapcsolatos több ezer éves gyakorlat és a több mint száz évre visszatekintő tudományos vizsgálatok ellenére a polikristályos anyagok képződésének részletei csak kevéssé ismertek. A polikristályos anyagokat formálisan az alábbi két csoportba sorolhatjuk be:

a) Anyagok, melyeket a nukleálódó és egymással ütköző egykristályok kölcsönhatása során létrejövő „habszerű” *szemcsehatár-hálózat* jellemez. Ez a mikroszerkezet a legtöbb anyagtudós jó ismerőse, minthogy gyakori jelenség az öntéssel létrehozott kristályos anyagokban.

b) *Polikristályos növekedési alakzatok*, melyeknél új, eltérő kristálytani orientációjú szemcsék képződnek a megszilárdulási fronton.

Az 1. ábra a polikristályos szerzetek morfológiai gazdagságát illusztrálja. Az egymással versengő nukleációval és növekedéssel létrejövő habszerű szemcsehatár-hálózat az 1.a ábrán látható. Polikristályos dendrites mintázat figyelhető meg az 1.b ábrán, mely elegendően hosszú idő után az 1.a ábrán látható alakzathoz hasonlóvá válhat. Polikristályos növekedési formák láthatók az 1.c–1.i ábrákon. A közelmúltban végzett kísérletek szerint kristályos szemcsék hozzáadásával az egykristály dendrites megszilárdulási forma polikristályos „szédelgő” dendrité alakítható (1.c ábra). Jellegzetes polikristályos növekedési mintázat a műanyag bevásárlószatyrok anyagában is megtalálható *szferolit* (1.d ábra). Ez az alakzat az anyagok meglehetősen széles körében figyelhető meg, többek között elemi szelénben (Se), noduláris öntöttvasban és különféle ásványokban is. Egyes esetekben a szferolitok képződése a két végén szétterülő *kristálykévék* (1.e