

# *A Planck-eloszlásokról és a fényforrások ekvivalens színhőmérsékleteiről*

– Erbeszkorn Lajos –

*A Nap sugárzási spektruma – eltekintve a légkör szűk abszorpciós sávjaitól – jól közelíthető a 6000 K hőmérsékletű fekete-test emissziós spektrumával. Ez a foton-eloszlás az emberek jelentős részében a szem-együttes feldolgozása után közel azonos színérzetet kelt (szintévesztők kivételek). A fényforrások rendkívül különböző foton-energia spektrumokkal rendelkeznek. Ezek színhőmérsékletét az átlagember színérzete alapján adják meg, azon fekete-test sugárzó hőmérsékletét választva, amely a „legjobban hasonlít” az adott fényforrás színérzetéhez. A szerző a fekete-test és a fényforrások energia-spektrumainak közvetlen összehasonlítását javasolja a fényforrások színhőmérsékleteinek meghatározására, amelyet megkülönböztetésül ekvivalens színhőmérsékletnek célszerű elnevezni.*

## **1. Bevezetés**

A világítástechnikához kapcsolódó fogalmak egy része akkor alakult ki, amikor még a fénynek az emberi szemek által történő észlelése „gyerekcipőben” járt. A szín-háromszög, a színdiagram, a színínger diagram elnevezések ma már helytelennek tekinthetők. Dr. Schanda János professor úr is számtalanszor kifejtette, hogy a szem-együttes információ feldolgozása után a tudatunkban színérzet keletkezik. A CIE által rögzített diagram tehát magyarul helyesen megnevezve: színérzet diagram.

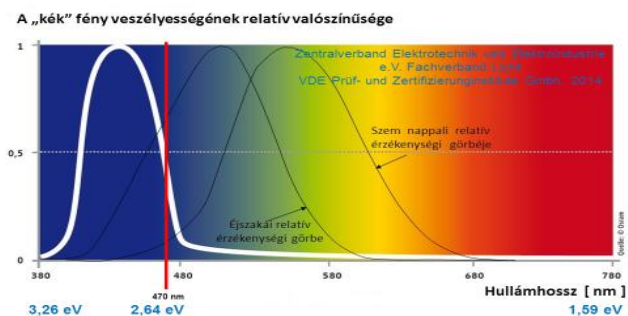
A fényerősség – mint alapfogalom – egysége, a kandela ma már adott térszögbe kisugárzott teljesítményként definiált. A gyakorlatban csak a leszármaztatott egységeket (lumen, lux) szabadna használni. A kandela kizárólag olyan optikai hitelesítő mérőrendszerek egységének a megnevezése, amelyekhez érvényes hitelesítő bizonyítványok tartoznak.

A korrelált színhőmérséklet CIE meghatározásai sem valami megnyugtatóak. Az ezzel kapcsolatos problémákra később részletesen kitérek.

## **2. Az emberi szemhez kötődő kutatások hatása**

A lámpák, fényforrások fotobiológiai biztonságával – többek között – az IEC 62471 szabvány foglalkozik. Az egyik a hőhatás (380 – 1400 nm), a másik a fotokémiai veszélyeztetés, az ún. „kékfény hatás” (380 – 700 nm), amikor a nagy-energiájú fotonok irreverzibilis változásokat eredményeznek a retinában. A kölcsönhatás tehát összetett.

Több egymástól független kísérlet igazolta, hogy a nagyenergiájú, kék színérzetet keltő fotonok, amelyek még éles képet alkotva el tudják érni a retinát, ott a nagy energia koncentráció következtében egy kis területet, akár foto-érzékelőket is véglegesen tönkre tudnak tenni. A hatás közvetlenül nem érzékelhető. (Meg kell jegyezni, hogy kezdetben a röntgen-orvosok, akik a páciens átvilágításakor, a képnézésekor maguk is a röntgen-nyalámban voltak, de nem voltak ólom-köténnyel felvértezve, két-három évtized múltán rákban elhaláloztak.) Azt is megállapították, hogy az esti, lefekvés előtti órákban az ember anyagcseréje megváltozik [1] és a sárga-folt érzékenysége a százszorosára nő. A Zentralverband Elektrotechnik und Elektroindustrie e.V. Fachverband Licht valamint VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitute GmbH 2014-ben elfogadta és ismertette az OSRAM által kibocsátott, a hatásokat összegző függvényt, amely a hullámhossz függvényében mutat egy valószínűségi eloszlást, az adott energiájú fotonok relatív szemkárosító hatását (1. ábra). Ennek a görbének a maximuma 450 nm-nél van. Ez a „kék” LED-ek domináns sávja, alkalmazásukkal valósítják meg a TV-k, monitorok, laptopok, tabletek, mobiltelefonok jelentős részében a vakító fehér kijelző felületet. A modern autók lámpái, a LED-es fényvetők a jó fényhasznosítás céljából ugyancsak ezt a szemre veszélyesnek nyilvánított „kék” fénytartományt erőteljesen sugározzák. A levonható következtetés: bár a szokásos mérések, fogalmak a fotonok energiáit elkendőzik, azonban a

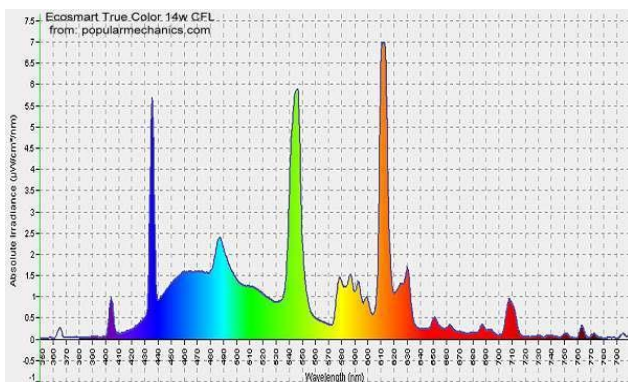


1. ábra. A fénytartomány és veszélyessége az emberi szemre

fény-fotonok energetikai sajátosságait nem lehet figyelmen kívül hagyni. Mellőzni kell a pillanatnyi üzleti, kereskedelmi érdekeket és a hosszú távú egészségügyi szempontokat kell az előtérbe helyezni.

### 3. Hogyan lehet egy fényforrást jól jellemezni?

Elsődlegesen úgy kell kezelni, mint egy adott frekvenciasávban működő eszközt, amely a teljesítményét a reá jellemző foton-energia eloszlással a térbe kisugározza. Az energia-spektrum mérésével az eszköz a gyártása során és később is tárgyilagosan ellenőrizhető, paramétereinek vizsgálatához emberi érzékeléshez kötődő tényezők nem kapcsolódnak. Lézerek, keskenysávú LED-ek paramétereit csak így rögzíthetők. A mért energia-spektrumoknak a láthatósági függvénnyel való szorzása – ami a szubjektív emberi tényezőt jelenti – igazán nem probléma. Vegyük szemügyre a 2. ábrát.



2. ábra. Abszcissa: 380-800 nm, ordináta: 0-7,5 ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2/\text{nm}$ )

Az abszcissa a szokásos hullámhossz szerint skálázott, az ordináta viszont [ $(\mu\text{W}/\text{cm}^2)/\text{nm}$ ] egységű. Nyilván az adott energia-spektrumhoz meg kell adni a kisugárzási irányt, a távolságot meg a térbeli eloszlási görbéket is. Az is észrevehető, hogy az adott spektrum nagyon eltér az értékeiben közel egyenletesen, folyamatosan változó Planck görbeseregtől ([2] valamint 6. ábra).

Az izzólámpák esetében könnyű volt az emittált fényspektrumot a fekete test sugárzási eloszlásával jellemezni, ezért bevezethették a jelentősen egyszerűsítő fogalmat: a szín-hőmérséklet fogalmát. Egy fogalom, amelynek értéke sok mindent rögzített. Sajnos a későbbiekben a színre helyezték a hangsúlyt nem pedig az adott emissziós spektrumot legjobban megközelítő tényleges hőmérsékleti eloszlásra. Ez ugyanis a világítástechnika beépített csapdájává vált. Miért? Eltekintve a dekorációs világításoktól (karácsonyi füzérek, reklámok, stb.) a lámpák feladata a környezetük megvilágítása. A belső terekben, a lakoszobákban, munkahelyeken, de a külterületeken is a környező tárgyak felületének reflexiós tulajdonságai az elsődlegesek az emberi érzékelés számára [3]. Lehet, hogy egy fényforrás színe nem egyezik meg a CIE színérzet diagram Planck görbéjének a színével, de ha az adott hőmérsékleti eloszláshoz az energia-sűrűség függvénye átlagosan a legközelebb esik, akkor ennek ellenére a legkevesebb színi problémát okozza a környezetének megvilágításakor. Eltekintve az un. művészi megoldásoktól az emberek a nappal megszokott színeket, világításokat kedvelik.

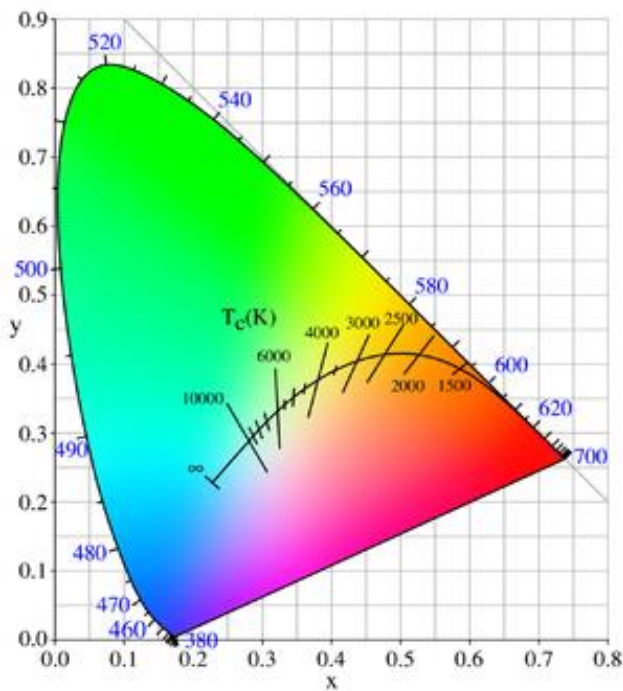
A jó hatásfokú fényforrások a megvilágítási szintet – kevés kivételtől eltekintve – a nappali szint közelébe emelték. Ezért a nappali láthatósági-függvény jellemző már az esti észleléskor is, amit a fényforrás paraméterek kialakításánál figyelembe kell venni.

### 4. Miért nem szimpatikus nekem a CIE színérzet diagram és felhasználása a színhőmérséklet megállapítására?

A 3. ábra a CIE színérzet diagram. Kívül, a görbe vonal mentén helyezkednek el a különböző energiájú

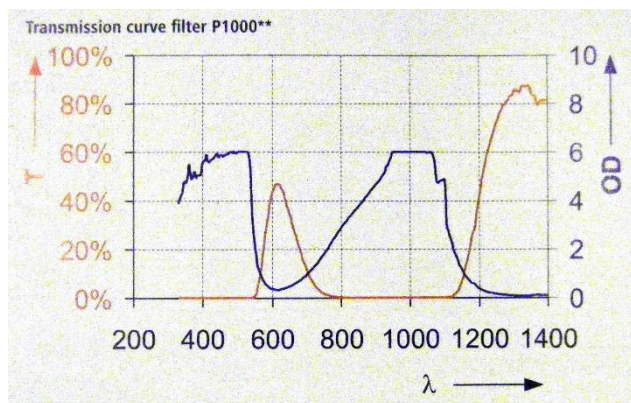
fotonok (nanométerben), azaz a való világ, míg a belseje az emberi színérzet tartomány a Planck-görbe vonalával. Vegyük sorra, hogy mi nem tetszik.

- A színérzet egy részét nem tartalmazza. A barna színt a piros és zöld megfelelő keveréke hozza létre, és mivel ez az ábrázolásnál egybe esne a szivárvány-színek vonalával nincs lehetőség a szemléltetésükre.



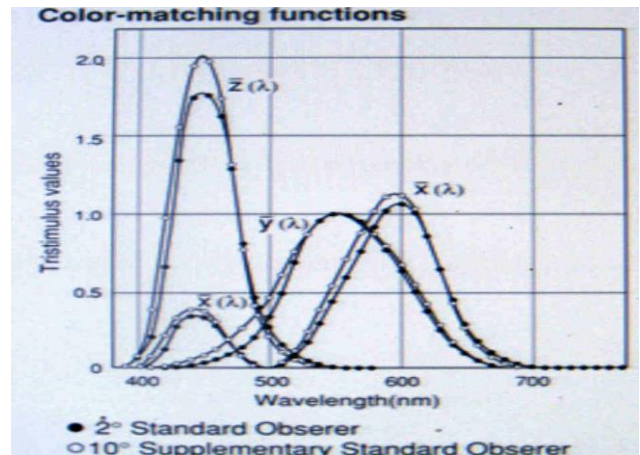
3. ábra. A CIE színérzet diagram

A problémát egy narancs-barna színszűrő optikai denzitásának (OD) menete (4. ábra) igazolja. A kék tartományt a szűrő a milliomod részére csökkenti, azaz a barna színek tartománya a zöld és vörös sávot összekötő egyenesre kellene, hogy essen az ábrázolásban.



4. ábra. Egy narancs-barna szűrő jellemzői [4]

- A CIE által definiált összefüggések, a színillesztő függvények viszonylag szűk látószögre érvényesek (2° - 1934, 10° - 1964). A 5. ábra mutatja a különbségeket. A világítástechnikában használt fényforrások zöme jelentősen nagyobb térszöget sugároz be.



5. ábra. A CIE színillesztő függvények [5]

- A CIE színérzet diagram lényege: egy kiválasztott MacAdam ellipszisen belüli színérzet nagyon sokféle módon létrehozható. Erre jó példa a Wyszecki & Stiles [6] által publikált három, rendkívül különböző energia-spektrum, de mindegyiknek a színérzete azonos azaz közép-szürke adott, C típusú fényforrás esetén.

- Miért kell akkor a CIE színérzet diagramban a Planck-eloszlások színérzetét is ábrázolni és ennek alapján következtetni egy ismeretlen fényforrás színhőmérsékletére. Amúgy pedig éppen a Planck-görbe vonalának az irányába esnek a színérzet bizonytalansági, MacAdam ellipsziseinek a nagytengelyei. Az emberi fényérzékelés számára a színekben éppen ez a legkevésbé megkülönböztethető irány. Feltételezhetően a felhők járásából eredő színhőmérséklet változások észlelését a szem-agy együttes tompítani akarja.

- Tehát a fizikai valóságot először bonyolultan transzformálják egy bizonytalanabb biológiai jellemzőre, majd ebből következtetnek vissza egy másik fizikai valóságra. Az adott eljárás önmagában nem alkalmas az így meghatározott korrelált színhőmérséklet bizonytalanságának a megállapítására sem. Erre a célra egy sokkal

bonyolultabb eljárást kell végrehajtani és a színvisszaadási indexet is meg kell határozni. A két paraméter együttese jellemezheti a fényforrás minőségét tömörített módon.

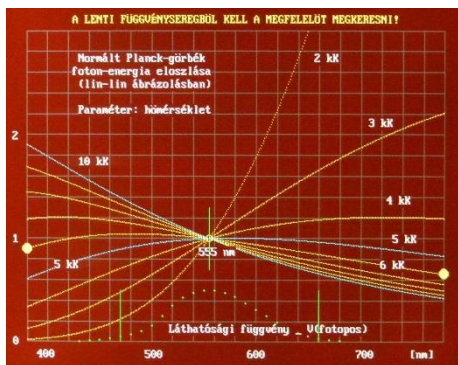
- Terjednek a mobil-telefonra letölthető alkalmazások, amelyekkel a beépített érzékelőkre és CIE összefüggésekre alapozva színhőmérsékleti adatok határozhatóak meg. Például egy reklámban a bejelölt felületre, amely alapvetően szürkének néz ki, 9873 Kelvin a kijelzés. A téves eszmék lehet, hogy a CIE definíciók alapján terjednek. Magyar Wikipedia, címszó: színhőmérséklet, idézet: „Napos idő, árnyékban: 6000 K # Nappal, kissé felhős égbolt: 8000 K # Borult, ködös idő: 10000 K”. Angol Wikipedia, címszó: Color temperature, idézet: „6,500 – 9,500 K LCD or CRT screen # 15,000 – 27,000 K Clear blue poleward sky”

### 5. Javasolt módszer a fényforrások spektrumának közelítő jellemzésére: ekvivalens színhőmérséklet megadása.

Induljunk ki abból, hogy egy alkalmazott fényforrás ne veszélyeztesse hosszútávon az emberi szem egészségét lehetőleg az élete végéig és ez a paramétereiből kiolvasható legyen.

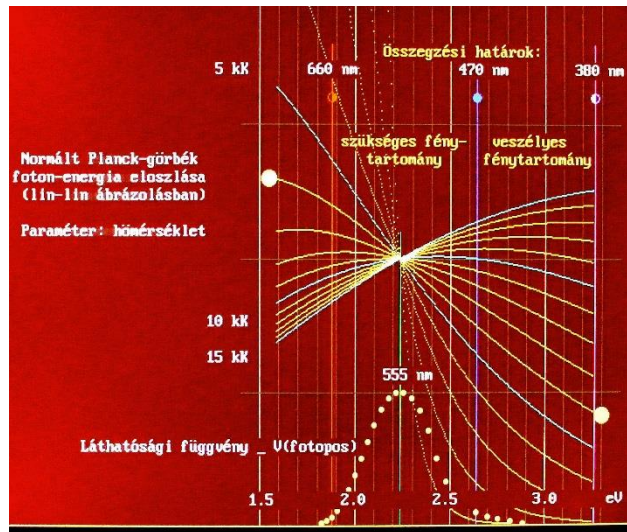
A természet-közeli fekete-test sugárzás – amelyhez az emberi látószerv alkalmazkodott – elfogadható referenciaként.

Kérdés: ha van egy fényforrás spektrumunk, milyen egyszerű módszerrel állapítsuk meg a neki megfelelő, közel azonos tulajdonságú fekete-test hőmérsékletét?



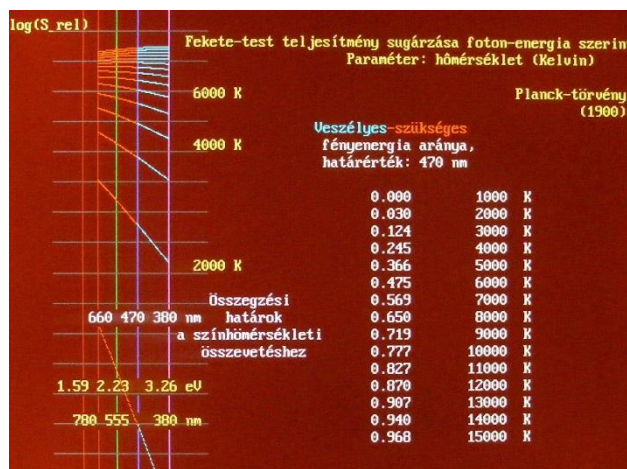
6. ábra. Normált Planck-görbék, láthatósági függvény

Először is az 1. ábrán látható veszélyességi függvény alapján a 470 nm-es hullámhossz jó a veszélyességi tartomány elkülönítésére. Másként ábrázolva (6. és 7. ábrák) a láthatósági függvény másik oldalán nagyjából szimmetrikusan a 660 nm-es érték a megfelelő. A 470 és a 660 nm-es határokkal (zöld vonalakkal) kijelölt ablak közrefogja a „szükséges fénytartományt”, amelyet a 7. ábrán, az energia-sűrűségi ábrázolási módban adok meg.



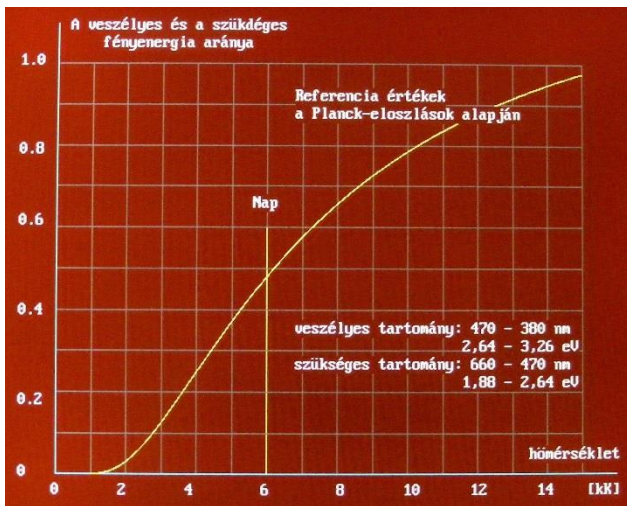
7. ábra. Planck-görbék a foton-energia függvényében

A 380 – 470 nm-es legyen a „veszélyes fénytartomány”. Ha képezem a veszélyes és szükséges tartományok össz-energiáinak hányadosát (8. ábra), akkor a Planck eloszlások alapján a szükséges referencia értékek adóttak.



8. ábra. A referenciaként szolgáló arányok

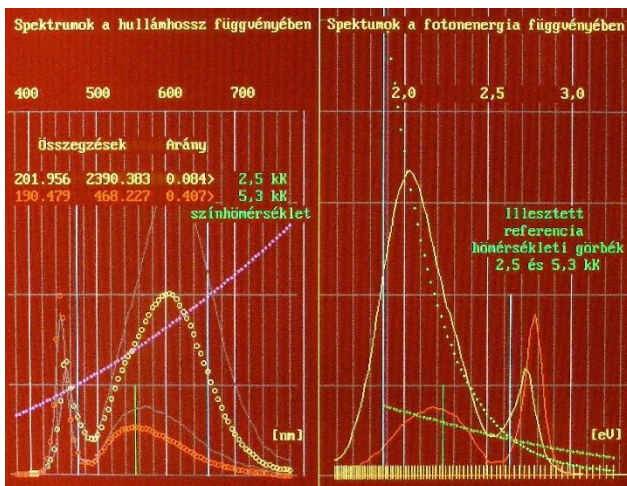
A 9. ábrán már a referencia-függvény értékei vannak ábrázolva.



9. ábra. A referencia-függvény az ismeretlen emissziós spektrum ekvivalens színhőmérsékletének meghatározásához

Egy ismeretlen spektrum esetében hasonlóképpen képezni kell az adott hányadost. Az ordináta értékétől az abszcisszával párhuzamosat húzva és a keresztezési pontot levetítve adódik az ekvivalens színhőmérséklet értéke. Az ehhez az értékhez tartozó eloszlást (6. ábra) már csak illeszteni kell lineáris eltérések alapján a kérdéses spektrumhoz és rögtön adódnak a különbségek is.

Az eljárás egyszerű, áttekinthető. Nyilván az a legtokéletesebb fényforrás, amelyiknek az eltérései a referencia eloszlástól minimálisak.



10. ábra. Két spektrum, a lila függvény az energiaspektrum értékeinek számolásához kell, mivel a résszélesség energiában jelentősen változik. Az illesztett függvények jobboldalt zölddel jelöltek.

## 6. Alkalmazási példák

Kísérletképpen két ismeretlen színhőmérsékletű LED spektrumot választottam. A 10. ábrán bal oldalt a megszokott módon (abszcissza nm-ben lineárisan) skálázottan, míg a jobboldalt ugyanazok az eloszlások a foton-energia függvényében láthatóak. A bal oldali ábrán a spektrométer résszélessége állandó, 10 nm volt. Ezeket az értékeket a jobboldali abszcisszára átszámolva energiában folyamatosan változó résszélességeket kapunk 21 meV-től egészen 86 meV-ig. Ennek következtében az energiasűrűség függvények értékei is eltérnek a baloldalt ábrázolt értékektől, méghozzá a matematika törvényszerűségei szerint négyzetesen a kiválasztott referencia értékekhez (470 nm) képest. Az energia összegzéseket bármelyik rendszerben elvégezhetjük és ugyanarra az eredményre jutunk. Azt viszont be kell látni, hogy a hagyományos spektrométerek az energia-sűrűség függvényeket a nagyobb energiájú tartományban közelítőleg négyszer rosszabb felbontással határozzák meg.

Az eltérések támpontot adhatnak a színvisszaadás minőségére. Lehetséges azonban, hogy egy súlyfüggvényt kell kialakítani az átlagember csapjainak érzékenységeire alapozva, mert a különböző foton-energiákon tapasztalt azonos eltérések nem biztos, hogy azonos hatásúak.

Az internetről letöltöttem [7] egy gyártói lapot, ahol három, megadott színhőmérsékletű LED spektrum található. A 2011-es adatokat 2014 novemberében is megismételték. A három fényforrás színhőmérsékletei rendre: 2700, 4000, 5700 Kelvin. A javasolt ECT (Equivalent Colour Temperature) azaz ekvivalens színhőmérsékleti értékek: 2600, 6100, 5700 Kelvin. A két szélső érték rendkívül jó egyezést mutat, a középső viszont hatalmas eltérésű méghozzá kedvezőtlen irányban. Vagy egy 6000-es értéket 4000-re elírtak és ezt 3 év alatt sem vették észre, vagy az alkalmazott CIE színillesztő függvények az adott tartományban nem az igaziak. Ez utánjárást igényel, mivel a szemmel történő ellenőrzés is a 6,1 kK értékű illesztő-függvényt tartja megfelelőnek.

A 2. ábra spektrumának ECT értéke: 4 kK.

## 7. Összefoglalás

A javasolt paraméter (ekvivalens színhőmérséklet, angolul: equivalent colour temperature, rövidítve: ECT) és annak meghatározási módszere a Planck-eloszlásokkal történő közvetlen összehasonlításokra alapozott. Áttekinthető és a szem védelmét is biztosítja, mivel az emittált veszélyes fénytartomány össz-energiáját a szükséges fénytartomány össz-energiájához viszonyítja.

Megbízható mérőeszközök készíthetők a 380 – 470 nm és a 470 – 660 nm tartományok össz-energiájának a mérésével energia-sűrűségi spektrumok felvétele nélkül is.

A spektrumfelvételek alapján meghatározott eltérések a fényforrás és a referencia spektrum között lehetővé tehetik a csapok színérzékelését figyelembe véve a színvisszaadási jellemző becsült értékének a meghatározását.

### Irodalomjegyzék

[1] Richard H. W. Funk, Medizinische Fakultät TU Dresden

[2]. Erbeszkorn Lajos: A fény keletkezése, keltése, érzékelése, biológiai hatásai, avagy a fény jellemzésére miért nem a foton-energiát használjuk? – Világítástechnikai Évkönyv 2014-2015, 18-21. oldal

[3] [http://lowel.tiffen.com/edu/color\\_temperature\\_and\\_rendering\\_demystified.html](http://lowel.tiffen.com/edu/color_temperature_and_rendering_demystified.html)

[4] LASERVISION GmbH, Germany, Bamberg, Katalógus

[5] <http://sensing.konicaminolta.asia/learning-center/color-measurement/general-color-terms/>

[6] G. Wyszecki & W. S. Stiles (1982) Color science (2th ed.), John Wiley and Sons, New York

[7] [https://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2012/02/OSRAM-OS\\_WEBINAR\\_HighCRI\\_06-26-12.pdf](https://ledlight.osram-os.com/wp-content/uploads/2012/02/OSRAM-OS_WEBINAR_HighCRI_06-26-12.pdf) (page 25)

### Szerző



**Erbeszkorn Lajos**

okl.villamosmérnök

okl. nukleáris elektronikai

szakmérnök

nyugdíjas

E-mail: lajkorn@t-online.hu

Ok. villamosmérnök (műszer és finommechanika - optika szak), okl. nukleáris elektronikai szakmérnök. Optikai Kutató: Optikák szórt fényeinek mérése, szilícium detektorok mérése. Országos Mérésügyi Hivatal: típusvizsgálatok, nemzetközi összehasonlító mérések, az atomerőmű indításakor a kémények gáz kibocsátását ellenőrző "Kalina" rendszer hitelesítése. VTT-tagként előadások tartása, cikkek írása főleg az emberi szem tulajdonságaihoz kötődő témákban.