



Írta:

**SCHANDA JÁNOS**

# **SZÍN ÉS ÉSZLELET**

## **SZÍNTERVEZÉS SZÁMÍTÓGÉPES FELHASZNÁLÁS SZÁMÁRA**

Egyetemi tananyag



**2011**

COPYRIGHT: © 2011–2016, Dr. Schanda János, Pannon Egyetem Műszaki Informatikai Kar  
Villamosmérnöki és Információs Rendszerek Tanszék

LEKTORÁLTA: Dr. Borbély Ákos, Óbudai Egyetem Rejtő Sándor Könnyűipari és  
Környezetmérnöki Kar Médiatechnológiai és Könnyűipari Intézet

Creative Commons NonCommercial-NoDerivs 3.0 (CC BY-NC-ND 3.0)

A szerző nevének feltüntetése mellett nem kereskedelmi céllal szabadon másolható, terjeszthető,  
megjelentethető és előadható, de nem módosítható.

#### TÁMOGATÁS:

Készült a TÁMOP-4.1.2-08/1/A-2009-0008 számú, „Tananyagfejlesztés mérnök informatikus,  
programtervező informatikus és gazdaságinformatikus képzésekhez” című projekt keretében.



ISBN 978-963-279-520-1

KÉSZÜLT: a [Typotex Kiadó](#) gondozásában

FELELŐS VEZETŐ: Votisky Zsuzsa

AZ ELEKTRONIKUS KIADÁST ELŐKÉSZÍTETTE: Erő Zsuzsa

#### KULCSSZAVAK:

színtan, színmérés, számítógépes színhasználat.

#### ÖSSZEFOGLALÁS:

A jegyzet megismerteti a hallgatót a színtan elemeivel. Röviden összefoglalja a látás észlelet alapjait, a szem felépítését, az optikai jel retinális feldolgozását. Foglalkozik a színmérés alapjaival, így a radiometriai és fotometriai fogalmakkal, a színinger-mérés törvényszerűségeivel, és a számítógépes szín-management kérdéseivel. Röviden áttekinti a szín-alkalmazás kérdéseit, így elsősorban a színinger megjelentetésére használt eszközöket (monitor, nyomtató), azok méréstechnikai elemeit. A jegyzetet a színek számítógépes használatával kapcsolatos néhány megjegyzés és a tématerület további megismeréséhez fontos könyvek és a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság vonatkozó jelentéseinek felsorolása zárja.

# TARTALOMJEGYZÉK

1.	Színes látás: a látórendszer felépítése és működése, a szem és részei (a retina felépítése, csapocskák, neurális hálózat a retinában); a jel útja a szemből az agyig, agyi színes jel feldolgozás.....	5
1.1.	Látás – észlelet .....	5
1.2.	A szem optikája.....	6
1.2.1.	A szem szerkezete .....	6
1.2.2.	Képalkotás a szemben .....	7
1.2.3.	A szem leképezési hibái .....	7
1.2.4.	Pupilla szerepe a látásban .....	10
1.2.5.	Látóélesség, kontraszt-érzékenység .....	12
1.2.6.	Akkomodáció változása az életkorral és korrekciója.....	15
1.2.7.	A tökéletes látástól való eltérések.....	19
1.3.	Az optikai jel feldolgozása a retinán .....	20
1.3.1.	A retina sejtszerkezete .....	20
1.3.2.	A színlátás mechanizmusa .....	22
1.3.3.	Színi adaptáció .....	24
1.3.4.	A színérzékenység intenzitás-függése .....	25
1.4.	A látásérzet útja a szemből az agyig .....	25
2.	Szabványos szín leírás és annak radiometriai, fotometriai alapjai: Pszichofizikai szín, a színinger, CIE színmetrika, egyéb színleírási rendszerek, atlaszok.....	27
2.1.	Az optikai sugárzás .....	27
2.1.1.	Fogalom meghatározások .....	27
2.1.2.	Az elektromágneses színkép .....	28
2.1.3.	Az elektromágneses sugárzás általános tulajdonságai .....	30
2.1.4.	Sugárzás hatásának értékelése .....	32
2.2.	Radiometria és fotometria.....	33
2.2.1.	Radiometria .....	33
2.2.2.	A radiometria mennyiségei és összefüggéseik .....	35
2.2.3.	Fotometria .....	39
2.2.4.	Villogásos fotometria .....	39
2.2.5.	Fotometriai mennyiségek és egységek .....	43
2.2.6.	Fotopos-, mezopos-, és szkotopos fotometria: .....	46
2.3.	Színinger-mérés .....	48
2.3.1.	Additív színkeverés .....	49
2.3.2.	Önvilágítók színinger-mérése .....	53
2.3.3.	Másodlagos sugárzók (nem önvilágítók) színinger-mérése .....	54
2.3.4.	Színhőmérésklet és korrelált színhőmérésklet .....	56
2.3.5.	CIE 1931 és 1964 színinger-mérő rendszerek .....	57
2.3.6.	Színinger-különbség, egyenlőközű színskálák .....	57
2.3.7.	Világosság – fénysűrűség összefüggés .....	59
3.	Színmenedzsment, sRGB színrendszer és csatlakozása más színrendszerhez, ICC szín management .....	61
3.1.	sRGB színrendszer .....	61
3.2.	ICC szín management .....	62

4.	Szín-alkalmazások .....	64
4.1.	Szín(inger)mérő műszerek (spektrális és tristimulusos eszközök) és jellemzésük	64
4.1.1.	Tristimulusos színinger-mérés .....	64
4.2.	Képmegjelenítők és kalibrációjuk.....	67
4.2.1.	Bevezetés .....	67
4.2.2.	Katódsugárcsöves monitorok.....	68
4.2.3.	Mátrix-vezérlésű (pl LCD) monitor .....	74
4.3.	Nyomtató és kalibráció .....	76
4.3.1.	Festéksugaras nyomtató.....	76
4.3.2.	Lézer-nyomtató .....	77
5.	Színekkel kapcsolatos irodalom.....	80
5.1.	Színtani alapművek .....	80
5.2.	A Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE) színekkel kapcsolatos kiadványai.....	80
5.3.	Felhasznált irodalom .....	81

# **1. SZÍNES LÁTÁS: A LÁTÓRENDSZER FELÉPÍTÉSE ÉS MŰKÖDÉSE, A SZEM ÉS RÉSZEI (A RETINA FELÉPÍTÉSE, CSAPOCSKÁK, NEURÁLIS HÁLÓZAT A RETINÁBAN); A JEL ÚTJA A SZEMTŐL AZ AGYIG, AGYI SZÍNES JEL FELDOLGOZÁS**

## **1.1. Látás – észlelet**

Az ember a környezetéből jövő információ túlnyomó többségét szeme közvetítésével kapja. Az informatikus számára fontos, hogy a látószervünk működésével megismerkedjék: az informatika módszereivel olyan eszközöket kell létrehoznia, amelyek alkalmasak arra, hogy a környezetből az információt felvegyék, azt feldolgozzák, majd az ember számára rendelkezésre bocsássák. Az információ megjelenítését pedig úgy kell megvalósítania, hogy azt a megfigyezőkönnyen, torzítások, információvesztés nélkül tudja észlelni. Ehhez ismernünk kell látószervünk tulajdonságait.

Az információs technológiákat az a kettősség különbözteti meg más tudományterületektől, amelyek vagy az élettelen, vagy az élő természettudományokhoz kapcsolódnak, hogy egyrészt fizikai eszközökkel dolgozik, az élettelen természettudományok területére tartozó módszereket használ, másrészt az információt a humán észlelő számára kell biztosítania, s nem hagyhatja figyelmen kívül az élő természet törvényszerűségeit sem.

Jelen fejezetben megismerkedünk a látószervünk működésének alapjaival, hogy informatikusi munkánkban olyan fizikai eszközöket és módszereket valósítsunk meg és használunk, amelyek lehetőleg veszteség nélkül közvetítik számunkra a megszerzett fizikai információt. Ehhez ismernünk kell, hogy hogyan működik a látószervünk; hogyan tudjuk a felfogott szöveges, rajzi, képi információt könnyen, hibamentesen észlelni; mit kell biztosítanunk ahhoz, hogy a számítógépes munkát egészsékgárosodás nélkül tudjuk végezni.

A látószervünk több, jól elkülöníthető részből tevődik össze, amelyek közül a bemenő rész hasonlít a fizikai eszközeink működéséhez. A jel további feldolgozása azonban már fiziológiai-biológiai mechanizmusokkal működik, s végül agyunkban az idegi ingerek hatására mentális kép alakul ki, amelynek létrejöttében már számos pszichológiai összetevő is részt vesz. Az alábbiakban sorra vesszük az egyes részek működési mechanizmusát, megkíséreljük ezek működéséből levonni az informatikus számára fontos következtetéseket, hogy azokat a továbbiakban fel tudjuk használni.

A látással kapcsolatban néhány alapfogalmat kell először tisztáznunk:

A környezetből érkező látható optikai sugárzást (a kb. 380 nm és 780 nm hullámhossz határok közé eső elektromágneses sugárzást *fény-ingernek*, fény-stimulusnak hívjuk.

A szemünkbe bejutó fény-inger ott idegi gerjesztést hoz létre, s *fényérzetet* kelt.

Adott tárgy különböző részéről érkező inger hatására kialakuló inger az agyban képpé áll össze, ezt hívjuk *fényészleletnek*. Ennek kialakulásában már mentális folyamatok is részt vesznek.

A fényingertől a fény-észleletig tartó úton végigkövetve az egyes látószerv-részek működését a következő főbb csoportosítást tehetjük:

- a szem leképező mechanizmusa;
- a retinán elhelyezkedő, optikai sugárzást ideg-ingerületté alakító, sejtcsoportok (csapok és pálcikák) mechanizmusa<sup>1</sup>;
- a csap és pálcika mechanizmust az agy felé továbbító ingerek kialakulása, még a retina szintjén;
- az idegpályák mechanizmusa a retina és az agy látás-feldolgozó területei között; végül
- az agyi feldolgozás, amelynek során kialakul a látott tárgy mentális képe, hozzárendelődik a forma-, mozgás-, szín-információ; asszociációk alakulnak ki már ismert jelenségekkel, tárgyak képével (ez „szék”, vagy adott betű képe, még ha az erősen eltérő is az iskola első osztályában megtanult betüképtől stb.).

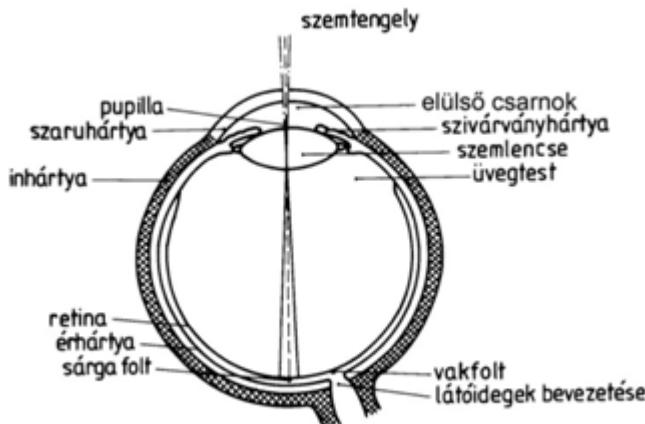
A vizuális információ feldolgozásának egyre magasabb szintjeiről ismereteink egyre gyérrebbek, bár napjainkban az agykutatás szinte naponta újabb részleteket tár fel. Ezek ismertetése azonban már messze túlmenne a jelen bevezető jegyzet keretein, azokkal sokkal inkább posztgraduális tanulmányok keretében ismerkedhet meg az ezek iránt érdeklődő informatikus.

## 1.2. A szem optikája

### 1.2.1. A szem szerkezete

A látási mechanizmus első lépcsője a külvilág letérképezése a szem fényérzékeny felületére és ott az optikai képnek ideg-ingerületté való átalakítása. A környezetünkbeli érkező optikai sugárzás „látható” hullámhossztartományba eső részét hasznosítja szemünk. A kb. 380 nm és

780 nm közé eső elektromágneses sugárzás képes látásérzetet kiváltani. Az optikai sugárzás mérésével, mennyiségeivel és mértékegységeivel a *radiometria*, a látásérzet átlagolt és szabványosított spektrális érzékenységével súlyozott optikai sugárzás mérésevel, mennyiségeivel és mértékegységeivel a *fotometria* foglalkozik. Ezekkel a [2.2. fejezet](#) keretében fogunk megismernedni. A jelen fejezetben a látásérzet képalkotással kapcsolatos jelenségeit tekintjük át.



1. ábra: Az emberi szem szerkezete

<sup>1</sup> A retinán van egy további fényérzékeny sejtcsoport is: a fényérzékeny ganglion sejtek csoportja, amely elsősorban a napi életritmussal kialakításában vesz részt, de szerepe lehet a szem pupillájának vezérlésében is.

A látást kiváltó optikai sugárzás szemünk közvetítésével jut szervezetünkbe. Az emberi szem egy kb. 24 mm átmérőjű gömb. Szerkezetének vázlatát az [1. ábra](#) szemlélteti. A külvilág felé a szemet a *szaruhártya* (*cornea*) zárja le, amely átlátszó, görbült felületű képződmény.

A levegő – szaruhártya átmenet a leképezésben az első és legfontosabb átmenet. A cornea a szem többi részét takaró *ínhártyában* folytatódik. Ez zárja be a szem egészét és különíti el többi testszövetünkötől.

Az optikai sugárzás fénytörést szenved a szaruhártyán és a *szemlencsén*, amelynek törésmutatója kis mértékben eltér az előtte és a mögötte lévő, a teret kitöltő kocsányás állagú testtől (*elülső csarnok* és *üvegtest*). A szemlencsét a sugárizmok (*fibrae zonulares*) képesek domborítani s ezzel az adott távolságban lévő tárgyat élesen leképezni a szemüreg hátsó részén elhelyezkedő *ideghártyára* (*retinára*).

A szemlencsét tartó és domborúságát szabályozó izmok (sugárizmok) külső felületét borítja a gyűrű alakú *szivárványhártya*, mely szemünk jellegzetes színét határozza meg. A pupilla vagy szem-bogár az a szem középpontjában látszó sötét felület, amelyen át a sugárzás belép a szembe. Feketének látjuk, mert a szem belsejébe behatoló sugárzás ott igen jó hatásfokkal elnyelődik. A pupilla átmérője reflexszerűen alkalmazkodik a szemet érő fénymennyiségek változásaihoz, átmérője kb. 2 és 8 mm közt változik.

Az ínhártya belső oldalát az *érhártya* borítja, ennek feladata, hogy a sugárzás érzékelését és a kezdeti jelfeldolgozást végző *retinát* (ideghártya) tápanyaggal lássa el. A legbelőre hártya a *retina*, ebben helyezkednek el az optikai sugárzást ideg-ingerületté alakító érzékelő sejtek, a *csapok* és *pálcikák*, valamint a napi életritmust szabályozó fényérzékeny ganglion sejtek (a legújabb kutatási eredmények szerint ezek ingerlése szabályozza a pupilla-átmérőt is), majd az ingerületet primer módon feldolgozó, a lokális ingerlések között kapcsolatot létrehozó sejtcsoportok, majd az ingerületet az agy felé elvezető látóidegek. Utóbbiak a *vakfoltnál* lévő látidegfön át hagyják el a szemet. A látásérzékelés elemeivel az [1.3. fejezetben](#) foglalkozunk.

### 1.2.2. Képalkotás a szemben

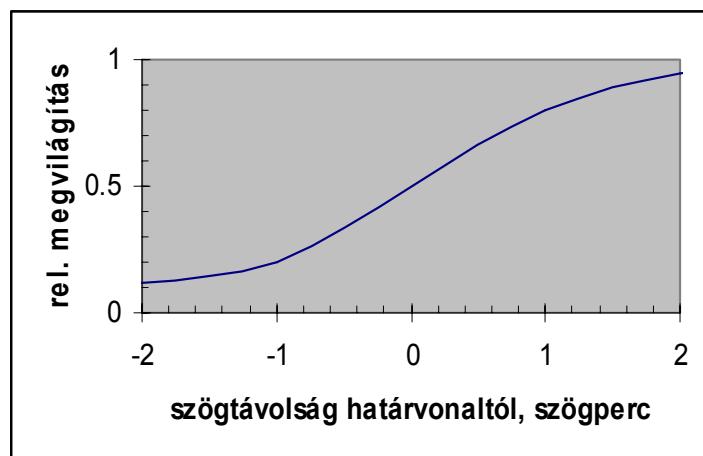
A szem fizikai szempontból optikai lencserendszer, amely a retinán a tárgyak kicsinyített, fordított, valódi képet állítja elő. A cornea és szemlencse képezi le a külvilágot a retinára, ahol a csapok és pálcikák a látható sugárzásból az idegi ingerületet hozzák létre. A különböző távolságban lévő tárgyak éles leképezéséhez a sugárizmok a szemlencse domborúságát változtatják, s ezáltal a szem lencserendszerének (cornea + szemlencse) eredő fókusztávolságát (jele *f*) szabályozzák úgy, hogy az adott tárgyat élesen lássuk. A szemészeti elterjedt, hogy a fókusztávolság helyett a méterben mért fókusztávolság reciprokával jellemzik a lencse töröképességét, ezt hívjuk dioptriának. Így a 20 cm fókusztávolságú lencse dioptria értéke  $1/5 \text{ m} = 5 \text{ dioptria}$ . Szóró lencse fókusztávolságát és a dioptria értékét negatív értékként tüntetjük fel.

### 1.2.3. A szem leképezési hibái

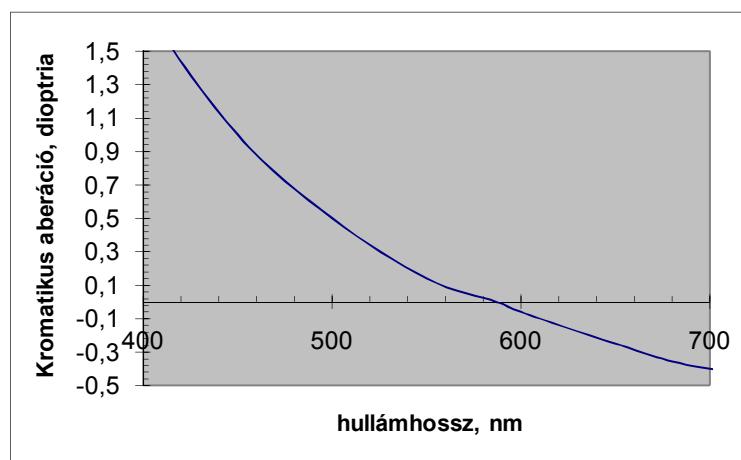
Minden lencsének vannak különböző hibái: az ideális lencsénél sem egyetlen pontban metszik egymást a párhuzamosan beérkező sugarak, mivel a lencse nyílásán fényelhajlás lép fel (lásd [2.1.3. fejezet](#)). Ehhez járul, hogy a lencse törésmutatója a különböző hullámhosszúságú sugárzásra más és más, így a fókusztávolság is törésmutató függő (*kromatikus aberráció*). További lencsehibákat okoz, ha a lencse törőfelülete eltér az ideális alaktól stb. Így pl. gömbfelületekkel határolt lencse esetén fellép a szférikus aberráció. Az emberi szem sem ideális lencse.

A 2. ábra a retina síkjában mutatja a fényleszlást, mely éles világos-sötét határvonal leképzésekor jön létre. Az ábrán a retina megvilágítását látjuk a határvonal éles képéktől szögpercben mért távolság függvényében.

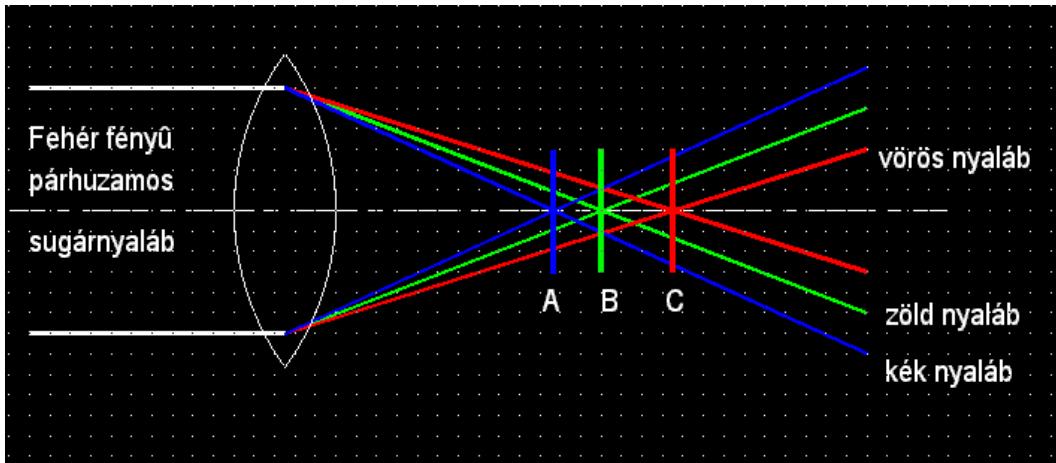
A 3. ábra azt mutatja, hogy ha 587 nm-es sárga fényre fókuszáljuk élesen a szemünket, úgy hány dioptria a kromatikus aberráció a színkép egyes hullámhosszain. (587 nm az ún. Fraunhofer d-vonal hullámhossza, a napszínképben jelentkező egyik elnyelési vonalé, amelyet a napfelszín héliumban dús rétege hoz létre. Ez az optikai számítások egyik fontos referencia hullámhossza.)



2. ábra: Sötét-világos határvonalnak a szem retinájára való leképezése során a retinán keletkező relativ megvilágítás eloszlás, Gubisch, 1967 nyomán [1]



3. ábra: A szem kromatikus aberrációja a hullámhossz függvényében, dioptriában mérve



4. ábra: Egyszerű, kromatikusan nem korrigált lencsén áthaladó párhuzamos fehér fényű sugárnyaláb fókuszálása

A 4. ábra sematikusan mutatja, hogy különböző hullámhosszúságú fény által létrehozott kép hol keletkezik egy egyszerű, kromatikusan nem korrigált lencse esetén. A rövidhullámhosszú sugarak erősebben törnek meg, a lencséhez közelebb fókuszálódnak (A hely). A közepes hullámhosszúak fókusztávolsága nagyobb (B hely), a hosszabb hullámhosszú, vörös sugárzásra a fókusztávolság a legnagyobb (C helyen fókuszálódnak). Ha szemünkkel úgy fókuszálunk, hogy az A hely van a retinán, úgy az élesen látható pont körül vörös színben jelenik meg egy gyűrű. Ha a B hely felel meg a retina helyzetének, úgy magenta (bíbor árnyalatú) gyűrűt látunk, mivel mind a vörös, mind a kék sugárzás életlenül képződik le a retinára. Ha a retina pozíciója a C helynek felel meg, úgy a külső gyűrű kék színben látszik. Ez a jelenség igen lényeges az informatikus számára, mert jelzi azt, hogy ha pl. vörös és kék színnel hozunk létre írásképet a képernyőn, szemünk egy időben csak vagy a vörös, vagy a kék képre tud akkomodálni, azt látja élesen, és a szomszédos más színű információk finom részleteit nem képes észlelni. Ha megróbálunk minden a vörös, minden a kék színben a képernyőn megjelenített információra koncentrálni, úgy állandóan át kell akkomodálnunk, s ez fárasztó.

Az éleslátáshoz a szemlencse görbületét kell, hogy a szem-izmok változtassák. Két szemmel történő látáshoz ezen kívül a két szem szemtengelyét is úgy kell állítanunk, hogy a két szemmel létrehozott kép egymással fedésbe kerüljön. Mind a két szem nézési irányának összehangolásában léphet fel hiba (*phoria*), minden a lencse domborítás lehet hibás (*aberráció*), távol - vagy közel - látás stb., lásd [1.2.5. fejezet](#).

Optimálisan működő szem esetében is a phoria és az újra akkomodálás bizonyos izmok mozgatásával jár, ennek időigénye van, s a túlzott igénybevétel fáradáshoz vezet. Ugyanakkor a szem végez apró rángó mozgást is. Voltaképpen ez teszi lehetővé, hogy időben nem változó képet is lássunk: Ha a szemet mesterségesen fixálják az ingerhez képest, úgy rövid idő alatt kifakul a kép és eltűnik. Csak annak következtében látunk, hogy a retinán a kép időben állandóan gyakran változik. A szem ezen nyugtalan mozgását hívják *hippus-nak*.

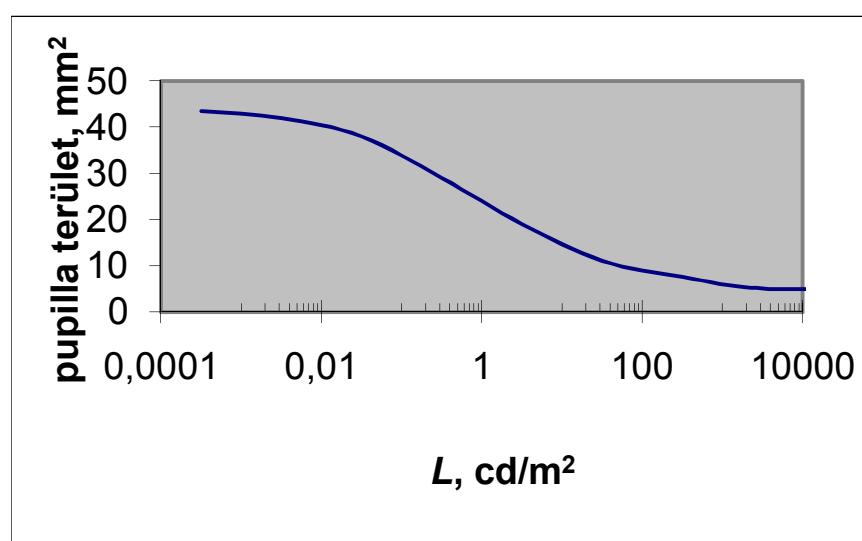
Amikor nézési irányunkat az egyik tárgyról egy másikra irányítjuk, a szemünk minden újra akkomodál (élesre állítja az új tárgy képét a retinán), és a két szemmel történő látás esetén az új tárgy távolságának megfelelően állítja be a két szem szemtengelyének irányát. Az új tárgy pontos fixálása (pl. olvasás során az egyes írásképek megfigyelése nagyobb szemmozgásokkal (*versiok*) és apró gyors mozgásokkal (*saccadok*) történik. 10°-os nézési irányváltásra kb. 40 ms-ra van szükségünk. Az olyan feladat, melynél az akkomodálási távolságot is váltani

kell, fárasztóbb, mert a két szem szemtengelyének egymáshoz történő állítása bonyolultabb szabályozási mechanizmussal történik, mint amikor a két szem azonos távolságban lévő két fixációs pont közt vált. Ezért számítógépes munkánál a klaviatúrát, képernyőt és jegyzetet (írásos anyagot, melyből az adatbevitel történik, vagy ahol feljegyzést készítünk) azonos távolságban célszerű elhelyezni az észlelő szemétől.

Szemünk akkomodációja is szabályozási mechanizmus alapján működik, két ellentétes irányban működő izomrendszer a szemlencsét laposítani, illetve domborítani kívánja, s az egyensúlyi, akkomodált állapot körül állandó 0,25 dioptriát is elérő oszcillációt végez.

#### 1.2.4. Pupilla szerepe a látásban

Ugyancsak két izomcsoport gondoskodik arról, hogy a szem pupillája a pillanatnyilag ural-kodó fényviszonyokhoz igazodjék: növekvő megvilágítás hatására szükül az írisz, csökkenő megvilágítás a pupilla tágulásához vezet. A környezet fénysűrűség viszonyaihoz való hozzáigazodást világosság *adaptációnak* nevezzük. Az egyszerű fényképezőgép lencséhez hasonlóan szemünk *látóélessége* (kis szögkülönbség alatt látszó tárgyak felismerése, l. [1.2.5. fejezet](#)) is növekszik, ha a pupilla átmérője csökken, azaz ha világosabb van. Az 5. ábra mutatja a pupilla területének változását a látótér fénysűrűségében [2]



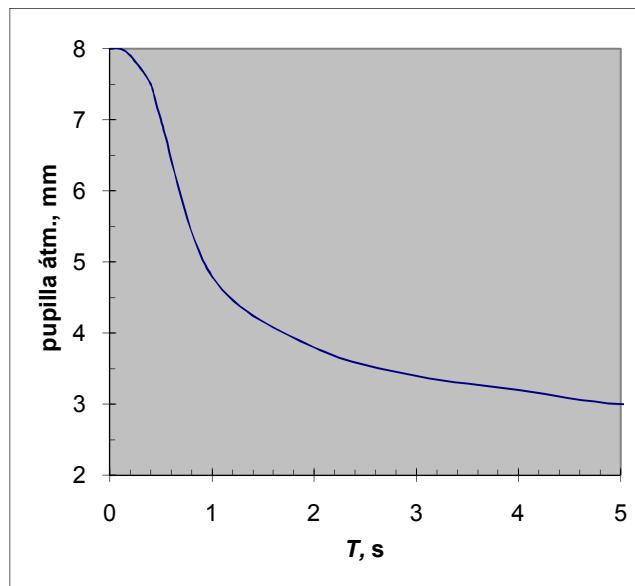
5. ábra: A pupilla területének változása az adaptációs fénysűrűség ( $L$ ) függvényében,  
Reeves, 1920 szerint

A pupillaátmérő változása csökkenő megvilágítás (pupilla dilatáció) és növekvő megvilágítás (pupilla kontrakció) esetén eltérő sebességű. A 6. ábra sötét állapotból kb.  $300 \text{ cd}/\text{m}^2$  látótér fénysűrűség<sup>2</sup> bekapcsolásának hatására szemlélteti a pupilla átmérő változását. A 7. ábra azt mutatja, hogy hogyan változik a pupillaátmérő, ha kb.  $300 \text{ cd}/\text{m}^2$  fénysűrűségű adaptációs mezőt kikapcsolunk. Látható, hogy a fény bekapcsolását viszonylag gyorsan követi a pupillaátmérő változása, míg a fény kikapcsolása után hosszabb idő szükséges, hogy szemünk alkalmazkodjék a csökkent megvilágítási színthez (elsötétített moziba belépve csak hosszabb idő után kezdünk „látni”, tudjuk a sötétben lévő tárgyak részleteit is kivenni, míg világos szobába lépve egy pillanatnyi káprázás után jól látjuk a környezetünket). A sötéthez való alkal-

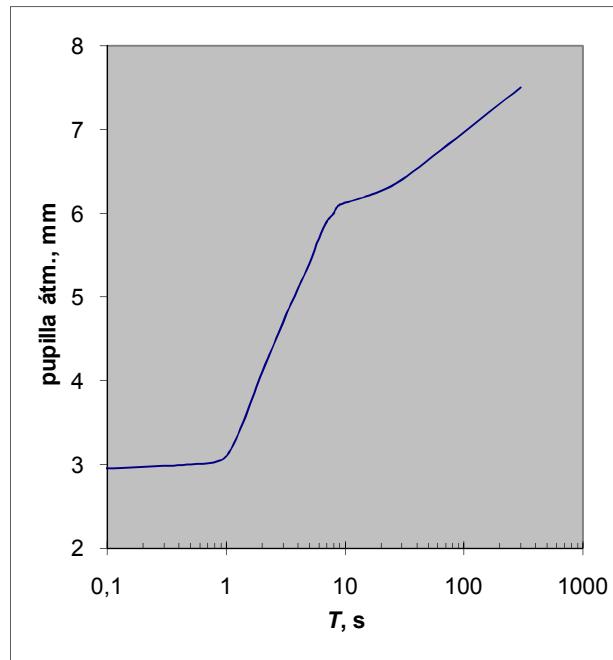
<sup>2</sup> Modern képernyők fénysűrűsége  $100 \text{ cd}/\text{m}^2$ -nél valamivel nagyobb.

mazkodás során a pupilla átmérőjének gyorsabb majd lassúbb változása a különböző retina folyamatok (csap és pálcika látás) hatására jön létre. Az adaptációnak csak egy részét biztosítja a pupilla átmérő változás, nagyobb részét neurális mechanizmusok hozzák létre.

Látószervünk a világítási szint mellett bizonyos mértékben annak színéhez is hozzáigazodik: színi adaptáció, lásd [1.3.3. fejezet](#).



6. ábra: A pupilla átmérő változása, ha sötétből kb.  $300 \text{ cd/m}^2$  fénysűrűségű helyre megyünk



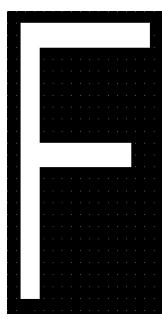
7. ábra: A pupilla átmérő változása, ha kb.  $300 \text{ cd/m}^2$  fénysűrűségű helyről sötétbe megyünk

A képernyős munkahely világítási viszonyai között adaptációtól vezetően ritkán hat hátrányosan a munkavégzésre. Gondoskodni kell azonban arról, hogy nagyon nagy világosságú

felületek ne legyenek a látótérben, így pl. az égre, vagy nagy fénysűrűségű környezetre nyíló ablak ne zavarja az adaptációt.

### 1.2.5. Látóélesség, kontraszt-érzékenység

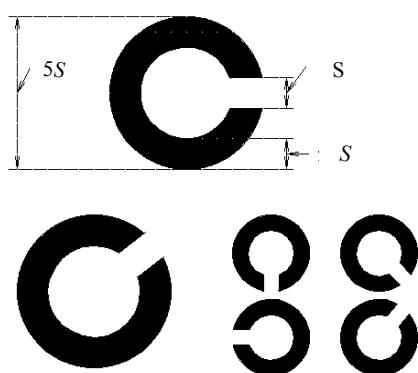
Látási feladatainknál a legalapvetőbb kérdés, hogy a még megkülönböztetendő részleteket külön látjuk-e, vagy azok összemosódnak. Amennyiben a szem akkomodálni tud az adott távolságban lévő tárgyra (lásd [1.2.6. alfejezet](#)), a még megkülönböztethető tárgy-részletek – különben azonos feltételek között – attól függnek, hogy milyen látószög alatt látjuk azokat. Azt a mennyiséget, mellyel a szemünk ezen szög-felbontó-képességet jellemizzük, *látóélességnak* nevezzük, és a szög-felbontással, vagy annak reciprok értékével jellemizzük.



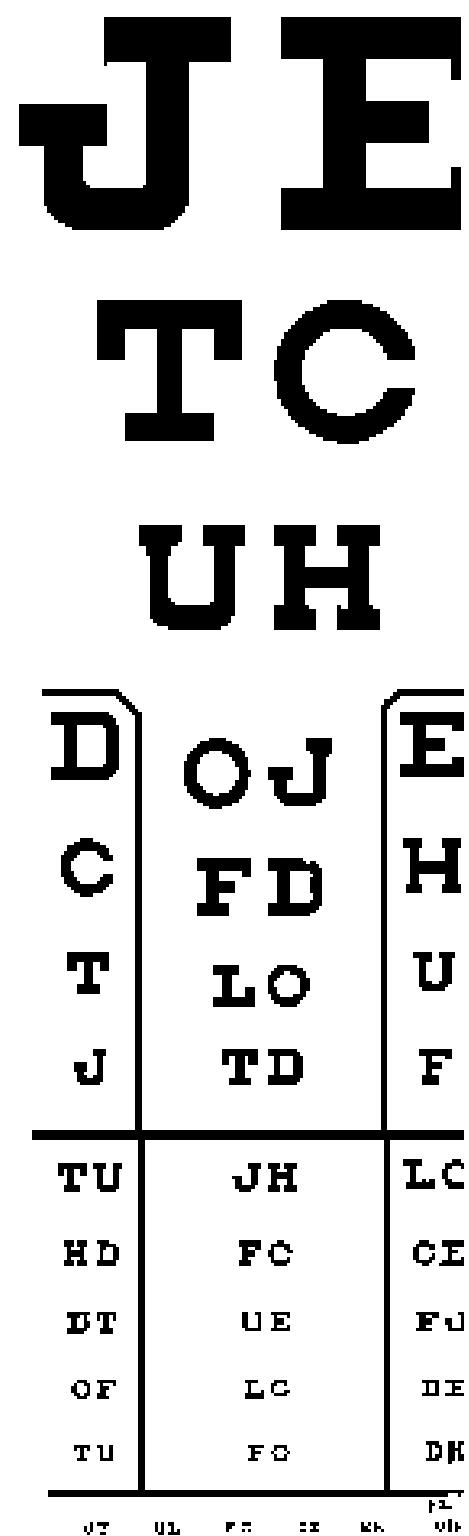
8. ábra:  
Snellen  
féle látó-  
élesség  
vizsgálat  
„F”

A látóélesség meghatározásának több módszere is ismeretes. Mindegyik azon alapul, hogy adott jel képében finom részleteket is meg kell tudni különböztetni. A szemorvosi gyakorlatban (ophthalmologia) sokszor használják az u.n. *Snellen* féle betű tesztet, melynél pl. azt kell felismerni (lásd 8. ábra), hogy adott méretű „F” betűt adott távolságból még F-betűnek látja-e a szemlélő, vagy már nem látja a két vízszintes vonal közötti hézagot, s összetéveszti a betűt a „P” betűvel. (Természetesen a Snellen betű tesztben számos más összetéveszthető betűkombináció is szerepel, az F – P betűtévesztés csak példaként szolgál.)

Másik szokásos látóélességi teszt az u.n. *Landolt-C gyűrűkkel* végzett vizsgálat. Ennél a vizsgálatnál azt kell a megfigyelőnek megállapítania, hogy a mutatott gyűrű mely irányban szakad meg. Szokás a fő- és mellékégtájakat választani, mint lehetséges szakadási irányokat. 9. ábra mutatja a Landolt-C gyűrű szabványos méretviszonyait és néhány különböző méretű és nyílásirányú Landolt-C gyűrűt.



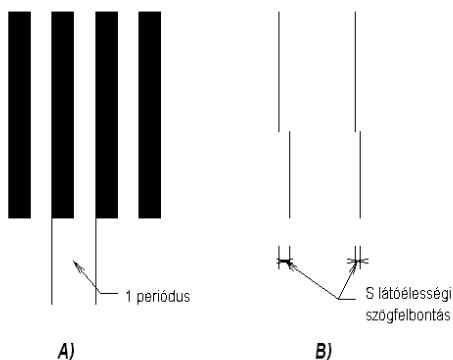
9. ábra: Landolt-C gyűrű szabványos mérete és néhány különböző nyílásirányú  
Landolt-C gyűrű



10. ábra: Magyarországon szokásos Kettész féle látóélesség vizsgáló tábla

A 10. ábra a magyar ophthalmologiai gyakorlatban használt *Kettesy féle látóélességi táblát* szemlélteti.

A 11. ábra két további látásélesség meghatározó módszert szemléltet. Az A) ábra rész az un. rács-tesztet szemlélteti, míg a B) ábra rész nóniusz-leolvasás alapján kidolgozott látóélesség tesztre mutat példát. Utóbbi igen fontos az informatikai gyakorlatban is, mivel pl. képernyőn megjelentetett, a képernyő rajzolási irányára kis szöget bezáró vonalat az eszköz csak mint egymástól egy pixelre eltolt vonal-darabokat tud megjelentetni, s ennek zavaró hatása attól függ, hogy a pixel-sorok távolsága a nóniusz-látóélesség határán belül van-e vagy sem.



11. ábra: Rács-periodicitás és nóniusz vonalfelismerés alapján működő látóélesség-vizsgáló teszt ábra.

A hazai szemorvosi gyakorlatban a látóélesség vizsgálatára a 10. ábra szerinti teszt ábra szolgál. Szokásos 6 m távolságból mutatni az adott méretű teszt-táblát, s ott az átlagos jó látóélességgel rendelkező személy még a „HD”-vel kezdődő sorban fogja közel hibamentesen felismerni a betűket. Ezt hívjuk 6/6-os látóélességnak. (Az angolszász világban még ma is használják a „láb” egységet (ft), és a 6 m igen jó közelítésben 20 ft-nek felel meg. Az angol Snellen-táblákon a jó látóélességhez a 20-as számot rendelik, ezért átlagos jó látóélességű személy látóélessége 20/20.) Ha valakinek a látóélessége 6/18 vagy 20/60, úgy ez azt jelenti, hogy az illető azt a sort látja még élesen, melyet egy jó látóélességű személy 18 m-ről (60 ft) tud leolvasni.

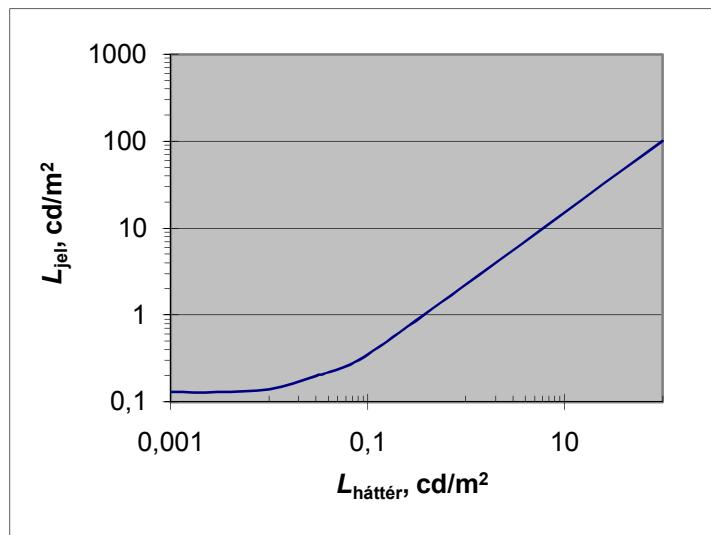
Landolt-C gyűrűkkel végzett vizsgálatnál normál látóélességűnek tekintjük azt a személyt, aki, megfelelő világítási és kontraszt viszonyok között, 1 szögperc alatt látszó nyílás irányát tudja még felismerni. Sokszor mutatva különböző nyílásirányú és méretű gyűrűket a megfigyelőnek, meg lehet határozni, hogy mely gyűrűméretnél mekkora a tévesztési valószínűsége. A látóélességet adott tévesztési százalékhoz tartozó radiánban mért látószöggel jellemezzük.

A 11. ábra A) ábrája szerinti teszt esetén a még éppen látható, az egy fokra eső rács-állandók száma (ciklus/fok) a látóélesség mérőszáma.

A 11. ábra B) ábrája szerinti nóniusz leolvasási látóélesség kb. 10-szer olyan jó, mint a Landolt-gyűrű nyílásértékkel meghatározott látóélesség, azaz kb. 0,1 szögperc alatt látszó két vonalszakaszt látja az átlagos látóélességű személy még irányban eltérőnek.

A látóélesség függ a világítási viszonyuktól és a vizsgálandó jel kontrasztjától (a jel és a háttér fénysűrűségeből konstruált mérték, lásd [2.2.5. fejezet](#)). Adott kontraszt esetén annak a valószínűsége, hogy egy jelet felismerünk-e vagy sem, függ a világítási viszonyuktól. A 12.

ábra azt szemlélteti, hogy adott jel-felvillanási idő és jel-felismerési valószínűség esetén mekkora jel fénysűrűségre van szükség ahhoz, hogy adott fénysűrűségű háttéren a jelet éppen meglássuk [3].



12. ábra: 4 szögperc látószögű, 1/5 s-re felvillantott jel láthatósági határértéke a háttér fénysűrűségének függvényében

Mint látható, az irodai világítási viszonyok között ( $\sim 100 \text{ cd/m}^2$ ) a szükséges jel-fénysűrűség logaritmusa a háttér fénysűrűség logaritmusával lineárisan változik. Az észlelhetőség határához jutunk - ebben a fénysűrűség tartományban - ha a jel/háttér fénysűrűség viszony kb. 1,05:1. Az észlelhetőség határértékére vonatkozó  $\Delta L/L = \text{konst}$  ( $L$ : fénysűrűség) törvényt Weber-Fechner törvénynek hívjuk<sup>3</sup>.

A fénysűrűségi viszony 1,05:1 határértékéből származtatják a grafikus iparban használt „szürke árnyalat”, „shade of grey” mennyiséget, mely kb. 7 éppen észlelhető lépcsőnek felel meg:  $1,05^7 \cong 1,41$ . Fényképezési szürke skálákat szoktak ilyen „shade of grey” lépcsőkben készíteni.

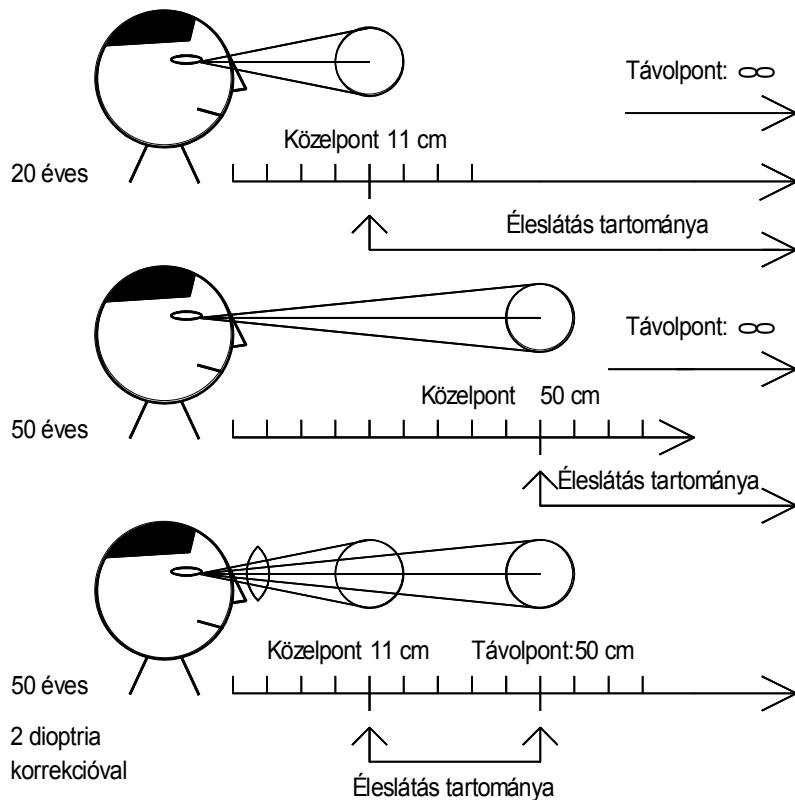
Villogó fények észlelhetősége nagyobb, mint az állandóaké, az észlelhető háttér a fentiekhez hasonló helyzetben kb. 1,005:1. Számítógép szoftver felhasználás szempontjából azt célszerű szem előtt tartani, hogy figyelem felkeltésre használt jel villogtatás akkor a leghatékonyabb, ha a jel látószöge kb.  $1/3^\circ$  (ami megfelel az átlagos betűméretnek) és a villogás gyakorisága az 1 ... 5 felvillanás / s körül van. (Ugyanakkor fel kell hívni a figyelmet arra, hogy az optikailag kellett epilepszia gerjesztése is ezen tartományba esik, epilepsziára hajlamos személy számára a villogó képernyőkép veszélyt jelent!)

### 1.2.6. Akkomodáció változása az életkorral és korrekciója

Fiatal személy szemlencséje még könnyen domborítható, tág határok között elhelyezkedő tárgyakról képes éles képet alkotni a retinán. Az életkor előrehaladtával a szemlencse domboruló képessége fokozatosan csökken. 20 éves korban szemhibával nem rendelkező személy kb. 11 cm-től a végtelenig bármely távolságban lévő tárgyat élesen tud látni, 50 éves korra a

<sup>3</sup> A Weber-Fechner törvény az észlelés/inger összefüggés első közelítése, pontosabb leírást ad a Stevens formula, mely szerint látásérzékelés esetére az összefüggés jó közelítésben köbgyökös.

közelpont általában 50 cm-re távolodik az észlelőtől (lásd 13. ábra). Az akkomodációs tartomány változását az életkorral a 14. ábra szemlélteti.

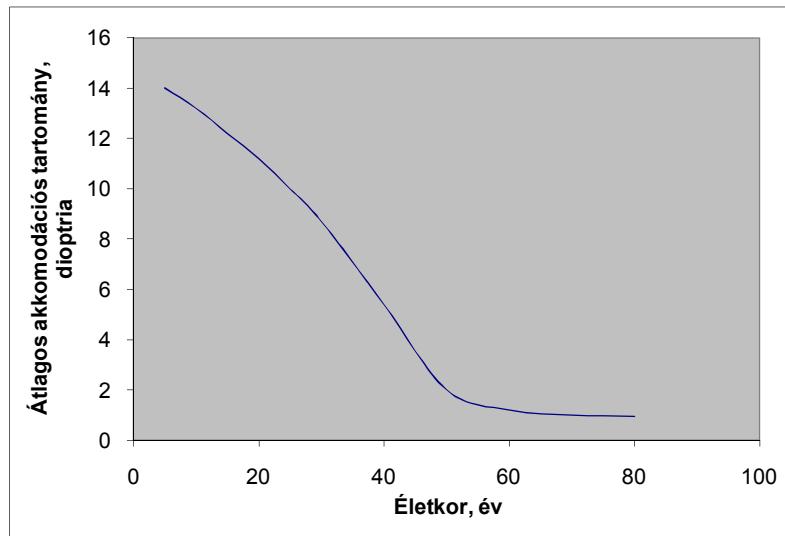


13. ábra: A közel- és távolpont változása az életkorral

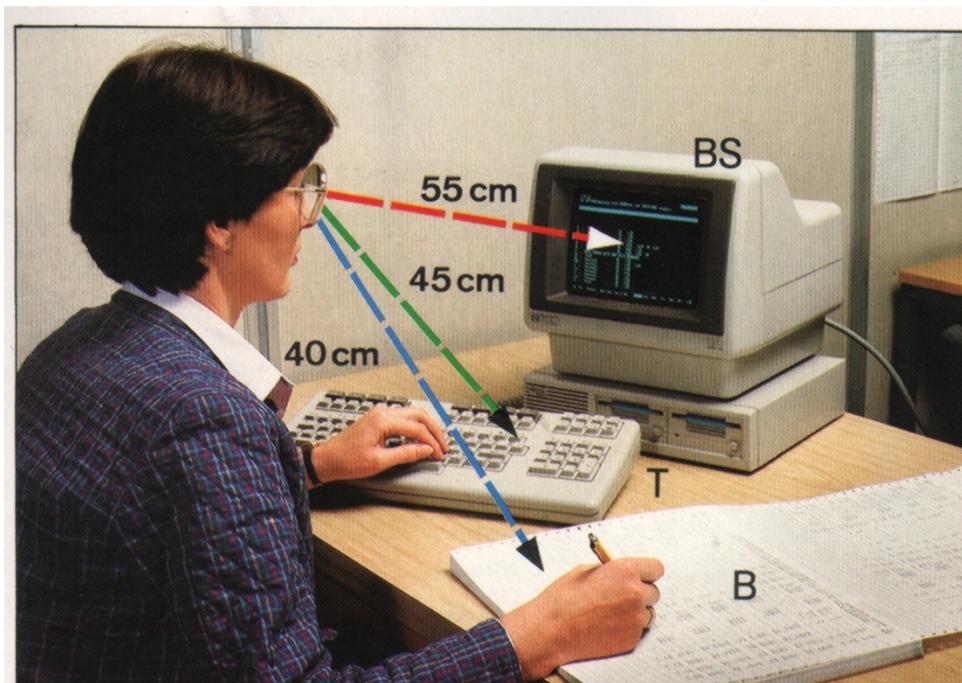
Olvasáshoz, számítógépes munkához idősebb korban a legtöbb embernek szemüveget kell viselnie. A szemüveges korrekció a közelpontot ismét a közvetlen közelünkbe hozhatja, de ugyanakkor a távolpont fog a végtelenről egy, a szemüveg „erősségeiről” (dioptria értékéről) és a szemlencse flexibilitásáról függő mértékben közelebbre húzódni. Így pl. ha valakinek a közel - ill. távol pontja 20 éves korban 11 cm, illetve a végtelen volt, s ez 50 éves korra 50 cm-re és a végtelenre változott, úgy ha olyan korrekciót alkalmazunk, mely a közel pontot ismét 11 cm-re állítja be, úgy a távol pont 50 cm-nél lesz (lásd a 13. ábra alsó sorával az 1. táblázat).

1. táblázat: Az akkomodációs tartomány változása az életkorral

Életkor, év	közelpont, cm	távolpont, cm	megjegyzés
20	11	∞	
50	50	∞	korrekció nélkül
50	11	50	korrekcióval



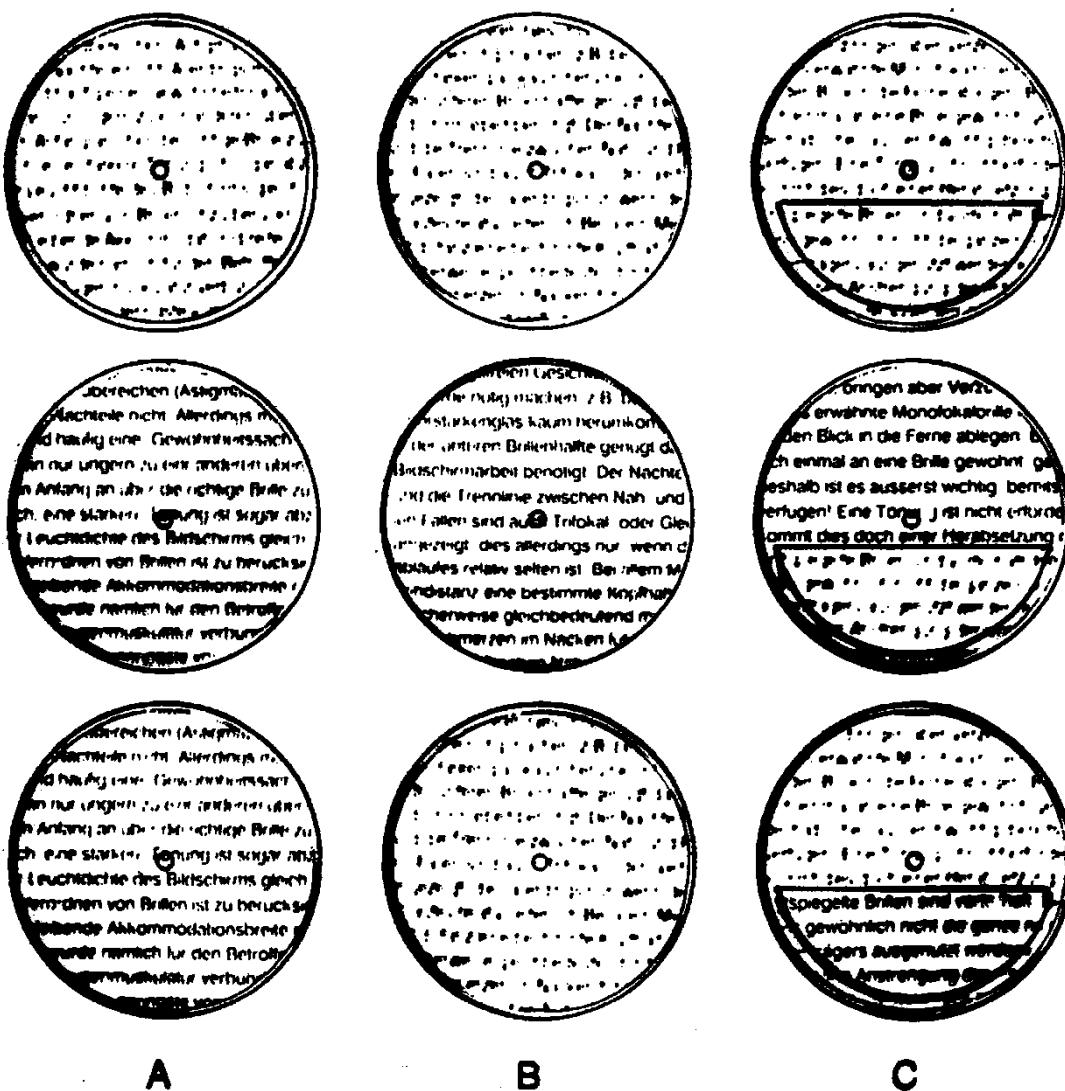
14. ábra: A dioptriában mért átlagos akkomodációs tartomány változása az életkorral [4]



15. ábra: Számítógépes munkánál használt eszközök a dolgozótól mért átlagos távolsága [5]

Számítógépes munkához az idősebb dolgozónak olyan speciális korrekcióra van szüksége, mely lehetővé teszi, hogy azon távolságtartományban tudjon élesen akkomodálni, melyben a különböző látási feladatai találhatók (képernyő, klaviatúra, jegyzet). A 15. ábra mutatja a dolgozó szemétől mért átlagos távolságokat: B, jegyzet; T, klaviatúra; BS, képernyő). Ha a képernyős munka során nagyobb távolságban lévő tárgyakra is kell akkomodálni (pl. számítógéppel segített tanácsadás, mint pl. repülőgépes helyfoglalás), úgy idősebb korban elkerülhetetlen a bi- vagy multifokális szemüveg használata, melynél a szemüveg különböző részén más és más korrekciót valósítanak meg. A 16.a ábra mono-, bi- és multifokális szemüveg használata során látható képet mutatjuk be. 16.a ábra első sorában a távolra nézéskor látott képet szemléltettük, a középső sorban a képernyő történő nézés során észlelhető képet, míg a

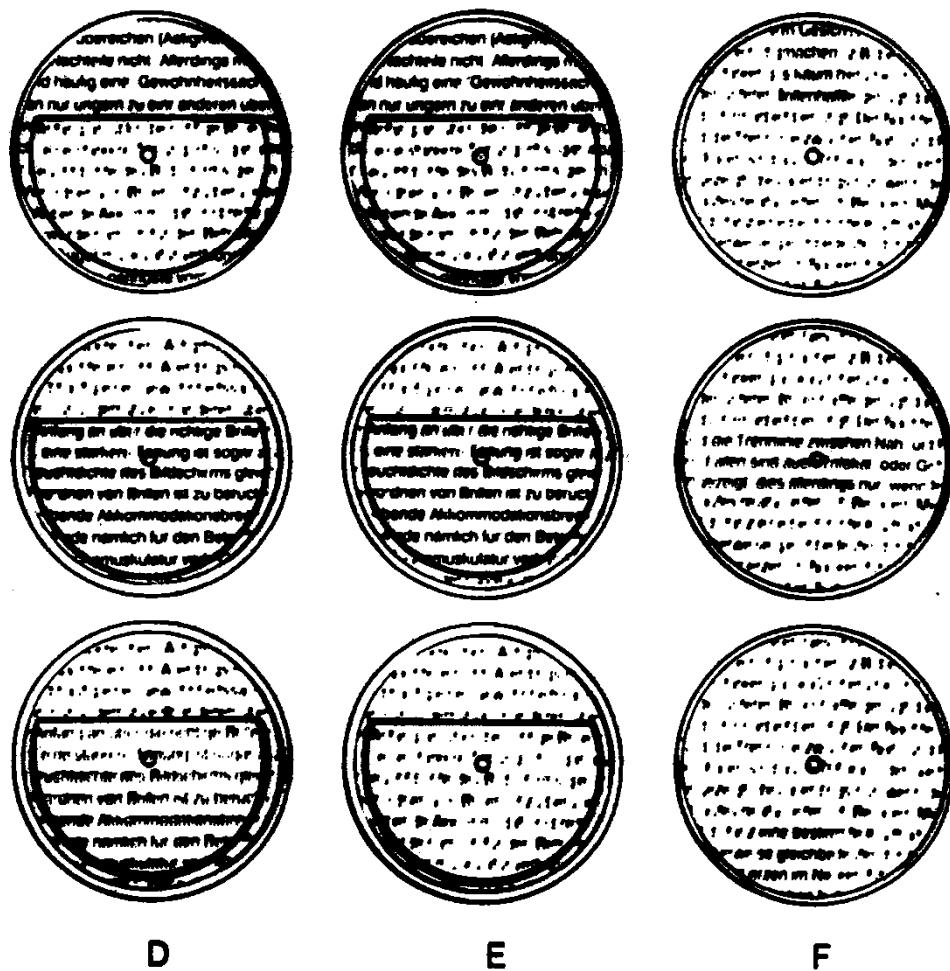
legalsó sorban a klaviatúra távolságban lévő tárgy láthatóságát tüntettük fel mono- és biforkális lencse esetére. Az A oszlop monofokális szemüveg esetén azt mutatja, hogy nagy megvilágításnál, képernyő távolságban való nézéshez optimalizált korrekció esetén, a képernyőről jól tud leolvasni az idősebb dolgozó, a klaviatúrát is még tűrhetően látja, de a munkahelyről feltekintve, a nagyobb távolságban lévő tárgyakra már nem tud akkomodálni. Ha a megvilágítási szint csökken, az akkomodációs tartomány is beszűkül, már a klaviatúrát sem látja jól (B oszlop). Bifokális lencsével lehet ezen segíteni: A C oszlop szerint készíthető olyan korrekció, mely a szemüvegen való áttekintés függvényében a képernyő vagy a klaviatúra éles látását teszi lehetővé.



16.a ábra: Mono-, és bifokális szemüveglencsével élesen látott tartományok

A 16.b ábra D és E oszlopa nagy és kis megvilágításnál szemlélteti azt az esetet, amikor olyan korrekciót alkalmaztak, hogy távolra és a képernyőre tud a szemüveg egyik vagy másik szegmensén át akkomodálni a kísérletező.

Végül az F oszlop az ún. multifokális szemüveg használatát tünteti fel: A szemüveg fókusztávolsága folyamatosan változik az egészen kis korrekciótól (távolra látás a szemüveg felső részén át) a nagy korrekcióig (közelre látás a szemüveg alsó részén át). Bár ez a szemüveg lehetővé teszi, hogy szükség esetén írás-olvasási távolságtól a végtelenig bárhol elhelyezkedő tárgyra tudjunk akkomodálni, a látómező egy-egy irányba való nézés számára erősen beszűkült, s adott irány kiválasztásához a fejet is mozgatni kell, ami sokszor kellemetlen testtartáshoz s így korai fáradáshoz vezet. Ezért számítógépes munkához lehetőleg mono-fokális szemüveget használunk, melynek korrekciója úgy készült, hogy a klaviatúra - képernyő távolságban biztosítson éleslátást. Ha ezt a távolságkülönbséget már nem tudja a dolgozó egyetlen korrekciójával áthidalni, úgy olyan bifokális szemüveg használata a célszerű, melynek a 16.a ábra C oszlopa szerint a látótér nagyobb részét korrigálták a képernyő nézés számára és alsó, kisebb részét a klaviatúra nézés számára.



16.b ábra: Bi- és multifokális szemüveglencsével élesen látott tartományok

### 1.2.7. A tökéletes látástól való eltérések

A lakosságnak csak kis százaléka rendelkezik „tökéletes” látással (*emmetropia*). Legtöbbünk szeme az ideálisztól eltér. Az irodai és számítógépes munka látási igénye nagy, ezért a szem optikai hibáit a lehetőségekhez képest korrigálni kell. Ez a szemorvos feladata, de az informati-

kusnak is célszerű, ha a leggyakoribb szemhibáknak (ametropia: a retinára való fókuszálás képességének csökkenése) legalább az elnevezését ismeri:

- *Hiperopia*, vagy messzelátás az a szemhiba, amikor a cornea és szemlencse görbülsége nem elég nagy ahhoz, hogy a külvilágot a retinára képezze le. A kép korrekció nélkül a retina mögött keletkezik. A korrekció szem elé helyezett gyűjtőlencsével történik.
- *Myopia* vagy közellátás az előző ellentéte, a kép a retina előtt keletkezik. Gyenge myopiát az ember úgy próbál korrigálni, hogy közelebb lép a nézendő tárgyhoz. Megfelelő szórólencsével korrigálható.
- *Presbyopia* az akkomodációs tartománynak az előző részben tárgyalt beszükülése, mely idősebb korban lép fel, oka a szemlencse rugalmasságának csökkenése.

Ezen legegyszerűbben korrigálható szemhibákon kívül számos további hiba is felléphet, mint pl. az, hogy a két szemben keletkező kép mérete eltérő, vagy hogy prizmatikus hiba miatt a két szem nem tudja minden távolságban egyformájában fedésbe hozni a két képet stb. Fontos, hogy számítógépes munka előtt szakorvos vizsgálja meg az illetőt és az adott munkához optimális korrekciós szemüveget írjon elő a számára<sup>4</sup>.

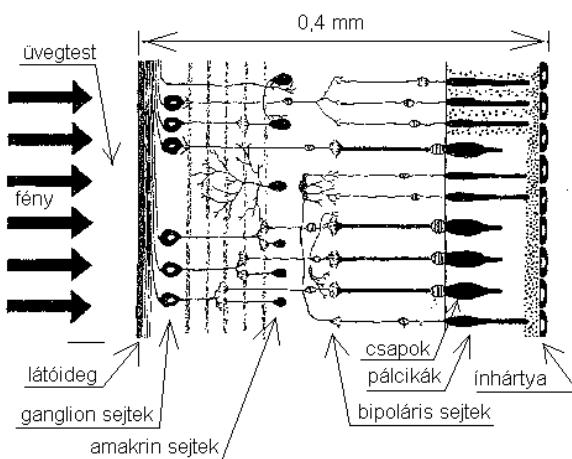
### 1.3. Az optikai jel feldolgozása a retinán

#### 1.3.1. A retina sejtszerkezete

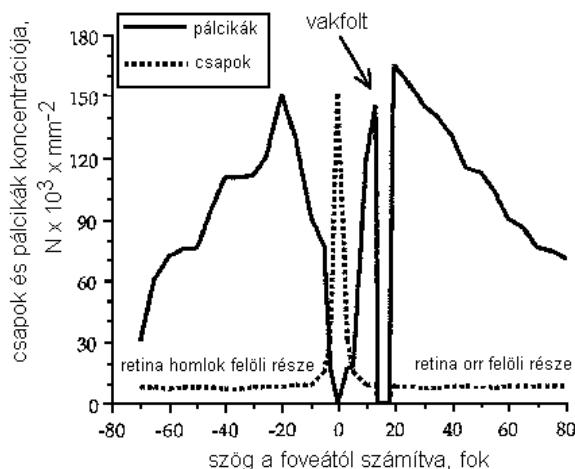
Az előző fejezetben láttuk, hogy a szem optikai rendszere a külvilág képét a retinára vetíti. A retinán keletkezik a fényinger hatására a fényérzet, amely ideg ingerületek közvetítésével jut el az agyba, ahol kialakul a fényészlelet. Jelen fejezetben a retina szintjén lejátszódó folyamatokkal fogunk megismernedni.

A 17. ábra az emberi retina szerkezetét szemlélteti. Az optikai sugárzást ideg-ingerületté átalakító sejtek neve *csapok* és *pálcikák*. A csapok és pálcikák eloszlása a retinán nem egyenletes, a szem optikai tengelye irányában elhelyezkedő látogödör, latin nevén *fovea*, területén elsősorban csapokat találunk, a foveától távolodva a csapok száma rohamosan csökken, ebben a tartományban a pálcikák veszik át a látás mechanizmusát (lásd [17. ábra](#)). Az emberi szemben kb. 120 millió pálcika van és kb. 6 millió csap. A szemből kivezető látóidegek száma kb. két nagyságrenddel kisebb, azaz nem minden egyes pálcika és csap ingerületét továbbítja egymástól függetlenül a látóideg köteg az agy felé, hanem még a retina szintjén a primer ingerületeket a bipoláris-, amakrin- és ganglion sejtek feldolgozzák. Valószínű, hogy a fovea középső részén, a fovea centrális, vagy más néven foveola felől az agyba szinte minden egyes csap jelét továbbítja idegszál. Ugyanakkor a periferiálisan, oldalt elhelyezkedő pálcikák nagy számából összegeződik először a jel, mielőtt az az agyba továbbítódnék.

<sup>4</sup> A törvény előírja, hogy számítógépes munkakörbe történő alkalmazás előtt a dolgozót szemorvosi vizsgálja meg és a számítógépes munkához szükséges szemüveget a vállalat köteles a dolgozó számára biztosítani.



17. ábra: A retina szerkezete

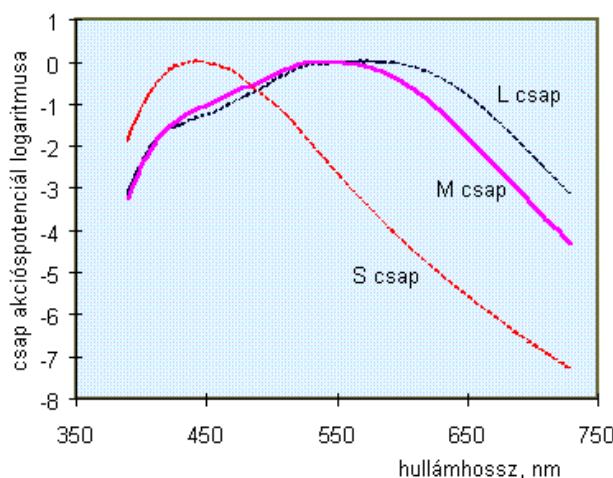


18. ábra: A csapok és pálcikák eloszlása a retinán

Csak a csapok érzékelnek színeket, a pálcikák „színvakok”. A pálcikákban a *rhodopszin* nevű látóbíbor nyeli el a sugárzást, s jön létre a rhodopszin egy módosulata, s ennek következtében a sejt membránján megváltozik a potenciál. Ezt a potenciálváltozást érzékeli a bipoláris és amakrin sejtek hálózata, s végzi el a receptor mezők jelének előfeldolgozását. A retina szintjén a jelfeldolgozás utolsó lépcsőjét a ganglion sejtek végzik, ezek kimenő jele már nem az ingerlés hatásával arányos potenciál, hanem az ingerlés erősségtől függő sűrűségű idegimpulzus sorozat. Elektronikai analógiával azt mondhatnánk, hogy a ganglion sejtekben az analóg jel frekvenciamodulált jelé alakul.

Mikropipettás és mikroelektródás vizsgálatok azt mutatták, hogy a csapokban háromfélé, különböző hullámhossz-tartományban érzékeny festékanyag nyeli el a sugárzást. A hosszú (L csap), a közepes (M csap) és a rövid (S csap) hullámhossz<sup>5</sup> tartományban érzékeny csap spektrumok akciós potenciáljának színképfüggését a 19. ábra szemlélteti.

<sup>5</sup> Az L-, M- S-csap megjelölés az angol Long wavelength-, Middle wavelength-, Short wavelength sensitive megnevezésből származik.



19. ábra: A hosszú (L csapok), a közepes (M csapok) és a rövid (S csapok) hullámhossztartományban érzékeny csapok színképi érzékenysége [6]

A fisiológiaileg mérhető csap mechanizmus színképek nem azonosak az egész szemén mért mechanizmusokkal, mert a csapok előtt a szemben elhelyezkedő egyes rétegek és összetevők nem teljesen színtelenek. Így pl. a fovea előtt helyezkedik el az un. *sárga folt, macula lutea*, amely a rövid hullámhossztartományban erősen elnyel, vagy pl. a szemlencse az életkor előrehaladásával elszíneződik (szürke hályoggal operált személyek sokszor beszámolnak arról az élményről, hogy operáció után sokkal erőteljesebb színekben látják a külvilágot) [7, 8]

A csaplátás a három különböző színképi érzékenységű csap pigmens következtében képes színek érzékelésére. Mechanizmusának részletes ismertetése túlmenne ezen bevezető kolokvium határán, itt csak nagyon leegyszerűsített formában ismertetjük ahhoz, hogy majd a későbbi fejezetekben a színmérés tárgyalásakor hivatkozhassunk a fisiológiai alapokra, amelyekre a színmérési mechanizmusok épülnek.

### 1.3.2. A színlátás mechanizmusa

Már jóval az előtt, hogy a háromféle csap fisiológiai szerkezetét felderítette volna a tudomány, abból kiindulva, hogy három jól megválasztott színes fény keverékéből (kisebb megszorításokkal) bármely szín létrehozható, arra következtettek a kutatók (Young majd Helmholtz [9] eredményei), hogy háromféle fotoreceptor működik az emberi szemben.

Ugyanakkor abból a felismerésből, hogy a színek megnevezésénél fekete-szürke-fehér sorozatról, vörös, sárga, zöld és kék alapszínekről beszélhetünk, és hogy egy szín soha nem lehet egyszerre vöröses és zöldes (de lehet sárgás vörös, azaz narancsszínű), és hasonlóan soha nem lehet sárgás kék (de lehet sárgászöld vagy kékes vörös, azaz bíbor árnyalatú) Hering arra következtetett [10], hogy színlátási mechanizmusunk három antagonisztikus alapszínpárra épül: fehér – fekete, vörös – zöld és sárga – kék.

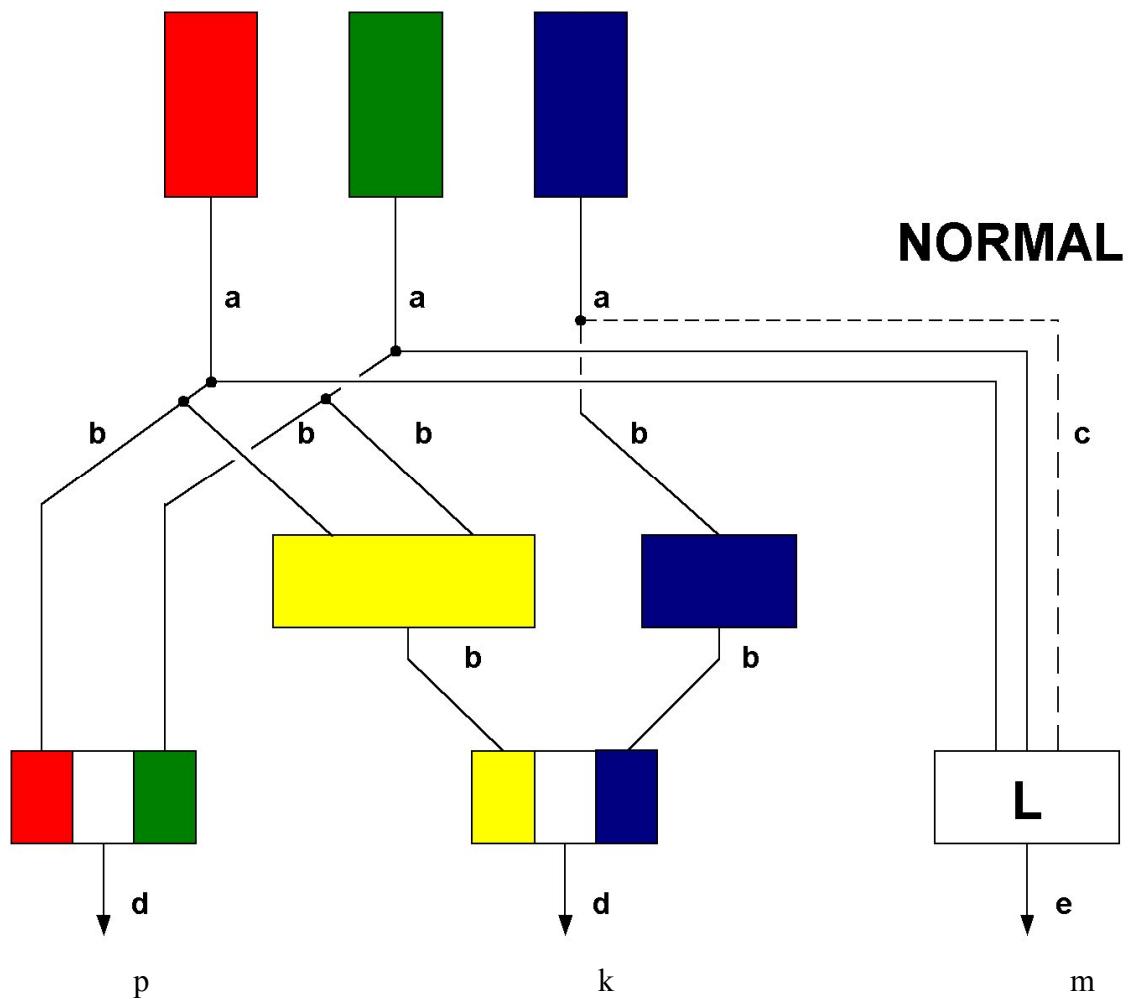
A két tábor – a háromszín-elmélet és az ellenszínek elmélet tábora – közel egy századon keresztül harcolt egymással, és csak a 20. század második felében sikerült a színlátás fisiológiai alapjait oly mértékben tisztázni, hogy a két elméletet össze lehessen békíteni. Ma tudjuk, hogy a primer mechanizmus a három különböző színképi érzékenységű csap mechanizmusára épül, de még a retina szintjén ebből kialakul három másik, antagonisztikus mechanizmus.

Leegyszerűsítve a három antagonisztikus mechanizmus felépülését a következőképen képzelhetjük el:

- Az M- és L- csapok egy-egy szűk tartományában a következő sejttrétegben elhelyezkedő keresztcsatolásokért felelős sejtek központ-környezet jellegű antagonisztikus jeleket hoznak létre, ahol a központban lévő néhány L + M csap jele kapcsolódik szembe a környezetükben lévő L + M csapok jelével. Így, ha csak a központi terület kap gerjesztést, az ezen csap-csoporthoz kapcsolódó ganglion sejt tüzelési gyakorisága megnő, ha mind a központi terület, mind a környezete kap gerjesztést, átlagos ganglion sejt tüzelési gyakoriságot tapasztalunk, míg ha csak a környezet kap gerjesztést (pl. egy sötét-világos határvonal mozog el a sejtcsoport fölött, és a fény még nem érte el a központi sejtcsoportot), akkor gátlás lép fel, a ganglion sejt tüzelési gyakorisága az átlag érték alá csökken. Ez a ganglion sejt-féleség az ún. magnocelluláris idegelvezetés típusába esik, amelynek jellegzetessége, hogy viszonylag nagy területről gyűjti az információt (nagyobb központ/kerületi területről) és a vastagabb idegszálakon az ingerület vezetése gyorsabb, mint a másik két sejtcsoporthoz tartozó ganglion sejteké. Az M és L csapok összegzett jelének színképfüggése jól közelíti a fotometria  $V(\lambda)$  láthatósági függvényének alakját (lásd [2.2.4. fejezet](#)), ezért úgy gondoljuk, hogy a villogásos fotometria segítségével meghatározott színképi érzékenység az L + M csap mechanizmus eredménye [11]. Ezt a jelkialakulást sematikusan szemlélteti a 20. ábra *m* kimenete, amely az L (vörös) és M (zöld) érzékenységű csapok jelének összegezését mutatja. (Egyes szerzők szerint az S-csapok is hozzájárulnak ezen akromatikus, csak a gerjesztés intenzitására jellemző jel létrejöttéhez, ezt kívánja szemléltetni a szaggatottan berajzolt elvezetés (*c* vonal)).
- Az L- és M-csapok szembekapcsolásából származik egy vörös – zöld ellentétes (antagonisztikus) jel, amely pl. úgy jön létre, hogy a központban lévő L-csap elvezetése szembekapcsolódik a környezetében lévő M-csapok jelével. Ezen csoport kimenő ganglion sejtjén tehát átlagos tüzelési gyakoriság lesz, ha a központ és környezete azonos gerjesztést kap, tehát pl. sárga színű fénnel világítjuk meg; ha a fény színe vöröstre vált, az L- csap gerjesztése nő meg, s ez a ganglion sejten tüzelési gyakoriság növekedéshez vezet, ha zöldre, úgy a környezet gerjesztése nő meg (M-csapok) s ezek gátló hatásúak, a ganglion sejt tüzelési gyakorisága lecsökken. Ennek a mechanizmusnak a fordítottja is fellép, amikor M-csap<sup>6</sup> a központ és L-csapok a környezet. Ezt a kettős mechanizmus szimbolizálja a 20. ábra vörös - zöld jelű *p* kimentete. Ezt az idegelvezetést hívják parvocelluláris idegpályának, mely sokkal finomabb szerkezetű, mint a magnocelluláris, így finom részletek felismerésében is fontos szerepe van, de a vörös/zöld ellenszínek kialakulásáért is felelős. A vékonyabb, finomabb idegröstök jel-vezetési sebessége kisebb, mint a magnocellulárisoké, ezért gyorsan változó (15 Hz – 20 Hz) fény-szín változásokat már nem képes követni (lásd [2.2.4. fejezet](#)).
- A harmadik idegpálya S-csapoknak az L- vagy M-csapokkal való szembekapcsolódása során alakul ki, neve koniocelluláris idegpálya (lásd 20. ábra *k* kimenete), és a kék – sárga színpárok kialakulásában van szerepük

<sup>6</sup> vagy csapok: a foveolában egyes csapokhoz tartozhat elvezetés, ahogy a retina periferiális tartományai felé haladunk egyre több azonos típusú csap jelét összegzik a horizontális összeköttetést létrehozó sejtek.

Kisebb fénysűrűségeknél (mezopos látás) a pálcikák jele elsősorban a magnocelluláris idegpálya jelének kialakulásához járul hozzá.



20. ábra: Az antagonisztikus jelek kialakulása a retinában

### 1.3.3. Színi adaptáció

A látási folyamat során lezajló számtalan jelenség közül egyet kell itt még megleítenünk: a színi adaptációt. Ahhoz, hogy az ember a hajnali vagy esti Nap vöröses fényében épp úgy fel tudja ismerni az egyes testek színét, mint a déli Nap, vagy borús égbolt alatt, a látómechanizmusunk hozzáigazodott a kissé eltérő színárnyalatú megvilágításokhoz, s pl. a fehér papírt fehérnek észleljük borús időben is, amikor az égbolt kékes fehér, és a lemenő Nap sugarai mellett is, amikor a megvilágítás sokkal gazdagabb hosszú hullámhosszú sugárzásban.

Az egyik megvilágításról a másikra való adaptálást színi áthangolódásnak nevezzük. Első közelítésben ehhez hozzájárul a sugárzást érzékléssé átalakító fotopigmenseknek a kifakulása és újra termelődése közötti egyensúly (azaz a [19. ábra](#) azonos amplitúdóval ábrázolt L, M, S csap érzékenységei úgy adaptálódnak, hogy az LMS jelek a megvilágító sugárzáseloszlás eltérő gerjesztési sűrűségei között fehér felületek esetén azonos értéket vegyenek fel. Ezen leegyszerűsített von Kries féle adaptációnál a tényleges mechanizmus sokkal bonyolultabb, és napjaink egyik kutatási területét képezi.

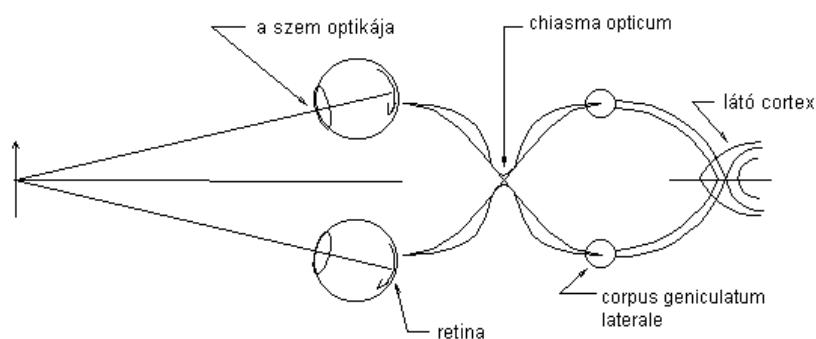
### 1.3.4. A színérzékenység intenzitás-függése

A fovea centralisban szinte csak L és M csapok vannak (a fovea centralis kék színvak). Mint azt a [18. ábra](#) kapcsán említettük, a foveától távolodva a csapok száma rohamosan csökken, perifériálisan csak pálcika látásunk van. Mivel a pálcikákban csak egyfajta fotopigmens van, a pálcikák már nem képesek színeket megkülönböztetni (ha adott élénk színű tárgyat a fejünk mögül a látóterünkbe hozunk, megfigyelhetjük, hogy előbb látjuk a tárgy formáját, s csak mintegy 20 – 30°-ra a szemtengelyünkötől ismerjük fel a színét). Ezzel szemben a pálcikák sokkal érzékenyebbek, mint a csapok, ezért alkonyatkor a csap-látás kikapcsolódik s már csak a pálcikák közvetítette látásérzetünk marad. Ilyenkor nem tudunk színeket megkülönböztetni. A pálcikák színképi érzékenységének maximuma a színkép rövidebb hullámhosszúságú tartományában van, mint a nappali látásért felelős csap-mechanizmus világosság észlelete (lásd [2.2.4. fejezet](#)). Ezért a fénysűrűség csökkenésével a kezdetben azonos világosság észleletet okozó vörös és kék színinger közül kis fénysűrűségeknél a kék világossabbnak tűnik, mint a vörös. A besötétedés során a vörös és kék színű tárgyak színélénségében észlelt változást hívjuk Purkinje-hatásnak [12]. Ez a jelenség jól demonstrálható színes monitoron is: Ha elsötétített szobában hozunk létre színes monitor képet, s annak intenzitását fokozatosan csökkentjük, úgy azt tapasztaljuk, hogy először a vörös majd a kék színek halványodnak el, végül az egész kép kifakul. A vörös színek intenzitásvesztése gyorsabb, a szemünk a világosból, *fotopos* látás, a *mezopos* (alkonyi) látáson át (ilyenkor mind csap mind pálcika mechanizmusok működnek) a *szkotopos* (közel sötétben való) látás tartományába való átállása során színképi érzékenységét változtatja.

## 1.4. A látásérzet útja a szemtől az agyig

Miként láttuk, a retinára érkező fény elektromos jelekké alakul a fényérzékelő sejtekben. Ez a jel egy előfeldolgozó szakaszon át jut el aqy látóközpontjába. Ezen szakaszban történik a színek első értelmezése, és a képet az idegsejtek szövedéke élekre, vonalakra, formákra, tónusokra, foltokra bontja fel. Ezen feldolgozás részben a retina szintjén jön létre, részint az idegrost-kötéget két további állomásán, a *kereszteződésben* (*chiasma opticum*) és az *ikertestekben* (*corpus geniculatum laterale*).

A két szem felől érkező idegrost a *chiasma opticumban* részint kereszteződik egymással (21. ábra), részben itt történik a látott alakzatok térbeli észlelése, elhelyezése (*sztereopszis*).



21. ábra: A látásérzet útja a szemtől az agyig

A kereszteződött idegrostok innen az ikertestekhez jutnak, melyekben további jelfeldolgozás történik. Az ikertestek mintegy relé állomás a szem és a látókéreg (cortex) között. Felépítését nagyrészt felderítették, működésének részletei azonban még nem ismeretesek. Úgy tűnik, hogy az ikertestekben tükröződik a jel elindulási helye. Két jól megkülönböztethető sejtstruktúrát találunk itt, az u.n. *parvocelluláris* rétegeket, amelyeknek a vörös-zöld színinformáció továbbításában van nagy szerepük és a *magnocelluláris* rétegeket, amelyek elsősorban a mozgás-érzékelésben vesznek részt. Mind a magno-, mind a parvo-celuláris sejtek a retinában lévő ganglion sejtek egy-egy jól meghatározott csoportjától kapják a jelet. A conio-celluláris idegek, amelyeknek a sárga-kék színi jelfeldolgozásban van nagy szerepük, a két másik réteg között kisebb egységekben kapcsolódnak a látókéreghez vezető idegpályákba.

Az ikertestekben az oda befutó idegköteg (tractus opticus) rostjainak nagy része átkapcsolódik az un. látókisugárzás (radiatio optica) rostjaira, amelyek az ingert a látókéreghez továbbítják. Az ingerek az un. V1 látóközpontba futnak be. A cortexben történik meg a kép végső feldolgozása. Az itt lévő idegsejtek közvetlen kapcsolatban állnak az agy többi részével, az emlékezettel, a többi érzékelő központtal, és együtt alakítják ki a látott (hallott, ízlelt, szagolt, tapintott) kép értelmezését. Itt alakul ki a végső színkorrekció is. Az a „kép” alakul ki, amelyet „látunk”, amit elraktározunk, és amire emlékezünk. A cortex működéséről még nincsen részletes tudásunk, napjaink biológiai, fiziológiai kutatásának középpontjában áll.

## **2. SZABVÁNYOS SZÍN LEÍRÁS ÉS ANNAK RADIOMETRIAI, FOTOMETRIAI ALAPJAI: PSZICHOFIZIKAI SZÍN, A SZÍNINGER, CIE SZÍNMETRIKA, EGYÉB SZÍNLEÍRÁSI RENDSZEREK, ATLASZOK**

### **2.1. Az optikai sugárzás**

E fejezetben röviden összefoglaljuk az optikai sugárzásra vonatkozó alapismereteket. Egyes részkérdésekkel, amelyek az információ felvétel, továbbítás és feldolgozás szempontjából jelentősek, a későbbiekben még részletesebben fogunk foglalkozni.

#### **2.1.1. Fogalom meghatározások**

Az irodalomban néhány fogalmat nem egészen pontosan használnak, ezért előljáróban ezek meghatározását adjuk meg. Az itt következő meghatározások nem metrológiaiag feszes definíciók, csak az egyes fogalmak egymásra épülésének megértését segítik.

- *Optikai sugárzás*: Az elektromágneses színkép 100 nm – 1 mm közötti tartománya.
- *Látható sugárzás*: Az optikai sugárzás (kb.) 380 nm – 780 nm közötti tartománya, ilyen sugárzás az átlagos emberi észlelőből fény-érzetet vált ki<sup>7</sup>.
- *Fény*: A látható sugárzás, mint inger, által az emberben kiváltott érzet illetve észlelet. Sokszor – helytelenül - használják a „fény” szót olyan összetételben is, amikor az ingert kívánják jellemzni (fény sugárzás, vagy még helytelenebbül UV-fény).
- *UV-sugárzás*: Optikai sugárzás, amely a látható sugárzás tartományához a rövidebb hullámhosszak felől csatlakozik. Három részre szokás felosztani:
  - UV-A: 315 nm – 400 nm közötti tartomány,
  - UV-B: 280 nm – 315 nm közötti tartomány,
  - UV-C: 100 nm – 280 nm közötti tartomány,
- *Infravörös-sugárzás*: A látható sugárzás tartományához a hosszabb hullámhosszak felé csatlakozó optikai sugárzási tartomány. Három részre szokás felosztani:
  - IR-A: 780 nm – 1400 nm közötti tartomány,
  - IR-B: 1,4 μm – 3 μm közötti tartomány,
  - IR-C: 3 μm – 1 mm közötti tartomány,

---

<sup>7</sup> Voltaképpen ez a kifejezés is ponyola, a „sugárzás” nyilvánvalóan nem „látható”, csupán ezen hullámhossztartományba eső optikai sugárzás vált ki látás-érzettel.

### 2.1.2. Az elektromágneses színkép

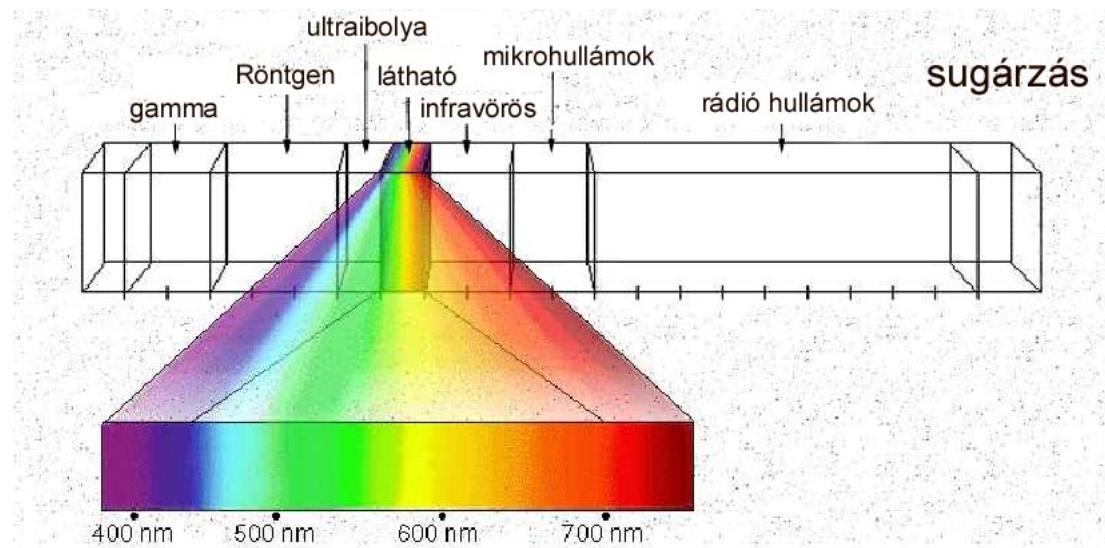
Elektromos töltések mozgása mágneses teret hoz létre, a mágneses tér változása pedig elektromos feszültséget kelt.

Ha elektromos vezetőben változó erősségű áram folyik, e vezető körül is változó erősségű mágneses tér alakul ki, e körül ismét változó elektromos tériterősség jön létre. Ez a jelenség a fény terjedési sebességével terjed tovább a vezető mentén. Az így létrejövő elektromágneses sugárzást a kialakuló hullámok  $\lambda$  hullámhosszával vagy a tér adott pontján másodpercenként áthaladó hullámok számával, a  $v$  frekvenciával jellemzik. A hullámhossz és a frekvencia szorzata a sugárzás terjedési sebessége. A légiűres térben – s jó közelítéssel levegőben is – fennáll, hogy

$$(2-1) \quad v \cdot \lambda = c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

( $c$  pontosabb értéke  $299792458 \pm 1,2 \text{ m/s}$ )

Az elektromágneses sugárzást kiváltó töltések rezgési frekvenciája vagy a mágneses tériterősség ingadozásának frekvenciája igen eltérő lehet a néhány Hz-tól a sok millió Hz-ig.



22. ábra: Az elektromágneses színkép, és ezen belül a látható színképtartomány

A 22. ábra az elektromágneses sugárzás különféle fajtáinak felosztását szemlélteti. Áttekintést ad arról, hogy a különféle frekvenciájú ill. hullámhosszúságú sugárzásokat a hétköznapi életben hogyan jelöljük, illetve nevezzük. Ezen óriási tartományból szemünk egyetlen oktátót, a 380 nm - 780 nm közötti tartományt érzékeli. A látható színképtartomány különböző részéből szemünket érő sugárzás az ábrán mutatott színészleletet váltja ki.

A 100 nm és 1 mm közötti tartományt, amely a láthatóval szomszédos ultraibolya és infravörös tartományokat is felöleli, együttesen optikai sugárzásnak nevezzük. Az optikai sugárzás gyűjtőfogalomban használatát e sugárzások keletkezésének, fizikai tulajdonságainak és a mérésükre szolgáló eszközöknek a hasonlósága is indokolja.

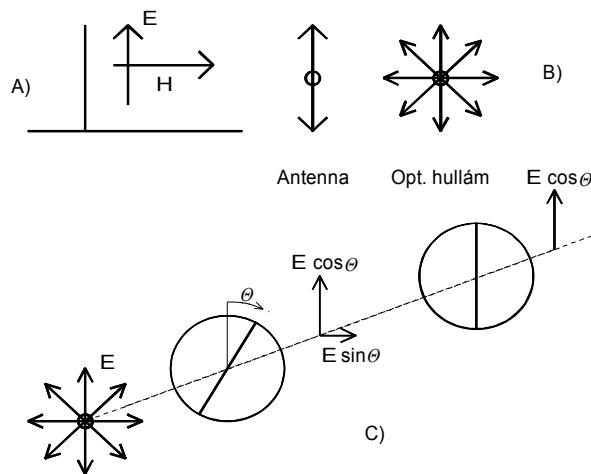
Az elektromágneses hullámok transzverzális, a haladási irányukra merőleges rezgéseket végeznek (23. ábra), terjedésük anyaghoz nincsen kötve.

Az optikai sugárzás keletkezése a sugárzó atomokban lezajló folyamatokkal magyarázható. Az atomok szerkezetéről szerzett tudásunk szerint az atommag körül meghatározott energiaszinteken lévő elektronok energiaközlés (pl. hőhatás, más részecskével való ütközés) hatására labilis nagyobb energiájú, úgynevezett gerjesztett állapotokba kerülhetnek. E gerjesztett állapotuktól a stabilis állapotba visszatérve elektromágneses sugárzás, foton kibocsátása formájában szabadulnak meg a fölösleges energiájuktól. A foton energiája a két állapot közötti energiakülönbségnek felel meg. Minél nagyobb ez az energiakülönbség, annál rövidebb hullámhosszúságú a kibocsátott sugárzás. Az elemi, már oszthatatlan sugárzási mennyisége a foton, melynek energiája  $E = h\nu$ , ahol  $E$  a kibocsátott foton energiája,  $h$  a Planck állandó ( $6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ); ma használatos pontos értéke  $h=6,626\ 075\ 5(40) \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ),  $\nu$  a foton frekvenciája.

A látható színképtartomány foton-energiája  $2,55 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  és  $5,23 \cdot 10^{-19} \text{ J}$  közötti, vagy elektronvoltban kifejezve  $1,6 \text{ eV}-3,3 \text{ eV}$  (az elektronvolt, eV, a félvezető fizikában szívesen használt energia egység, az az energia, amely szükséges ahhoz, hogy egy elektron 1 V potenciál különbséget győzzön le). A mikrométerben ( $\mu\text{m}$ ) megadott hullámhossz ( $\lambda$ ) és az eV-ban mért energia között a számérték kapcsolat a következő:

$$E (\text{eV}) = 1,234 / \lambda (\mu\text{m}) \quad 1$$

A sugárzó energia elnyelése legtöbbször (ha nincs rezonanciajelenség, l. lézer) az emisszióhoz képest fordított módon lezajló jelenség. Megfelelő energiájú sugárzás hatására az elektron el is hagyhatja az atomhoz, molekulához vagy kristályrácshoz kötött helyzetét - ez a fotoelektromos hatás.



23. ábra: Az elektromágneses sugárzás keletkezése

- A) A rezgő dipólus antennaként sugároz, s egymásra, valamint a terjedési irányra merőleges elektromos (E) és mágneses (H) térerősség rezgéseket végez. B) Nem-koherens (nem lézer) sugárzó esetén ezen térerősség-oszcillációk a terjedési irányra merőleges síkban statisztikusan változó irányt vehetnek fel. C) A sugárzási térbe helyezett polarizátor ezen kevert polarizációjú sugárzásból egyetlen irányban rezgő sugárzást választ.

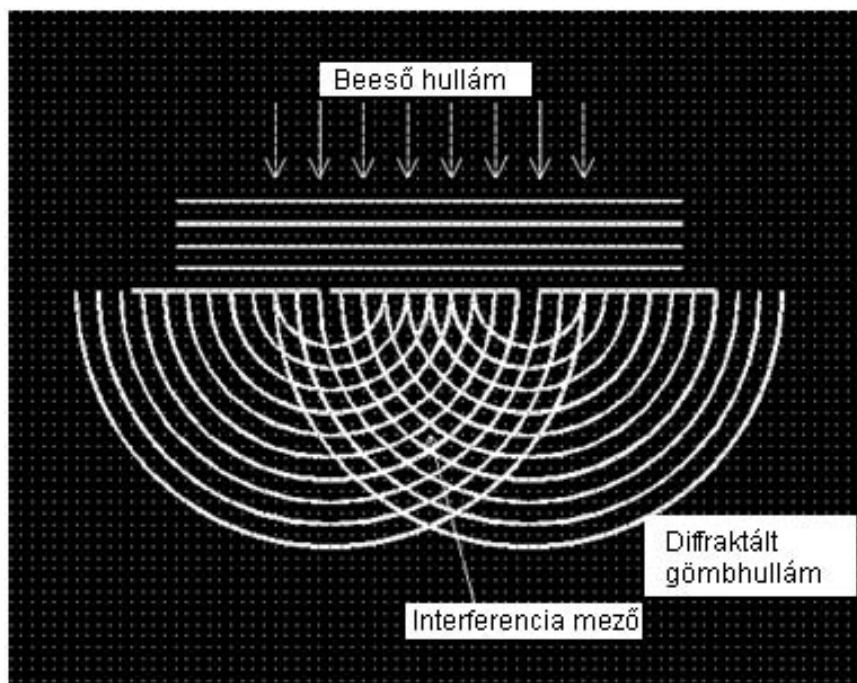
### 2.1.3. Az elektromágneses sugárzás általános tulajdonságai

Az elektromágneses sugárzás leírására a hullámjelenségek és a kvantumos folyamatok egyaránt jellemzőek. Szokás e sugárzás duális jellegéről (vagy részecske – hullám kettősségről) beszélni, különösen a látható jelenségek leírásakor.

A sugárzás terjedését hullámként lehet leírni, míg az emisszió és abszorpció magyarázata a kvantumos leírás alkalmasabb. E jelenségek ismertetése a látható sugárzás, vagy ponyola kifejezéssel élve, a fény\* jellegzetes tulajdonságainak leírásával történhet.

Szemünk csak több elemi hullám összességéből álló nyalábokat képes érzékelni. Ezek lehetnek polarizáltak, vagy polarizálatlanok, azaz bennük vagy meghatározott, vagy a legkülönbözőbb rezgéssíkú hullámok fordulhatnak elő.

A hullámok egyik jellegzetes tulajdonsága az interferencia. Ekkor két hullám, attól függően, hogy a rezgések amplitúdó változása egymáshoz képest hol tart, erősítheti, gyengítheti, sőt ki is olthatja egymást. E jelenségeket szemlélteti a 24. ábra. Teljes kioltás esetén a két hullám frekvenciája azonos, fáziskülönbössége  $\lambda/2$  kell, hogy legyen. A minden nap életben is gyakran láthatunk interferenciajelenségeket, ha egy fényforrás sugarai találkozásuk előtt különböző hosszúságú utakat tesznek meg. Ilyenek a vékony olajfoltokon keletkező úgynevezett Newton gyűrűk, összetett sugárzás (fehér fény) esetén ezek szírványszínűek, mivel minden hullámhosszágra más helyre esik a kioltás, monokromatikus fényben (pl. Na lámpa fényénél) sötét és világos csíkok sorozata keletkezik. Az informatikus fegyvertárában is több eszköz alapul az interferencia jelenségén. Így pl. a monitor reflexió-mentesítésének egyik leghatékonyabb eljárása interferenciás rétegeknek a képernyőre való felhordásán alapul.



24. ábra: Az interferencia jelensége két gömbhullám esetén

\* A „fény” szót szigorú értelemben csak az emberben kialakuló érzet és észlelet leírására szabad használni. A szemünket éró és fény-érzettel kiváltó elektromágneses sugárzást „látható optikai sugárzás”-nak hívjuk

Az elektromágneses hullámok követik a hullámmozgásra érvényes Huygens elvet, amely szerint a hullámmozgás elemi hullámokból tevődik össze, amelyek egy új hullámmozgás kiindulópontjának, centrumának tekinthetők. Ezzel magyarázható, hogy a hullámok az útjukban levő akadályokon elhajlasi jelenségeket mutatnak.

A fényelhajlás a fény és árnyékhatások életlenségét okozza. Minél nagyobb a hullámhossz a nyílás átmérőjéhez viszonyítva, annál nagyobb a fényelhajlás mértéke. A fényrekeszek éle a vörös (nagyobb hullámhosszúságú) fényt jobban elhajlítja, mint az ibolyát. Hasonló jelenség tapasztalható az optikai rácsnál.

A fényrekeszek képének kialakulása a fényelhajlás következménye. A létrejövő erősítési és kioltási gyűrűk alkotják a fény és árnyék határát, a nyílás képét. Ha valamely megvilágított tárgy felszínét végtelen sok fénypontból összetettnek tekintjük, akkor a képet számtalan elemi képpont hozza létre, amelyek elhajlasi gyűrűkkel határolt fényfoltok. Ezek nagysága arányos a  $\lambda$  hullámhosszúsággal és fordítottan arányos a rekesz átmérőjével ( $d$ ). Az elemi képpont sugarát a fényrekesz és a képsík távolság függvényében a fényrekesztől mért látószög ( $\alpha$ ) szinuszával adják meg.

$$\sin \alpha = k \frac{\lambda}{d}, \quad 2$$

ahol  $k$  arányossági tényező.

Minél kisebbek az elemi képpontok annál részletgazdagabb a kép. Az elemi képpont mérete az eszköz optikai felbontóképességének jellemzője. Két egymás melletti képpont akkor látszik különállónak, ha középpontjuk egymástól legalább egy sugárnyi távolságra található, ekkor ugyanis az egyik képpont elhajlasi képének maximuma a másik minimumával esik egybe. Mindebből következik, hogy az eszközök felbontóképességének a fény hullámhossza határt szab, hiszen ha két közeli tárgypontról érkező sugár egymással kisebb szöget zár be, mint az elemi képpont intenzitás maximumának és az első, az elhajlásból adódó kioltási gyűrű távolságának látószöge, a két sugár a képtérben nem különül el egymástól.

Kör alakú nyílások (apertúrák) esetén az optikai rendszer alkotta képben a besugárzás eloszlás az elsőfajú Bessel függvényel ( $J_1$ ) írható le:

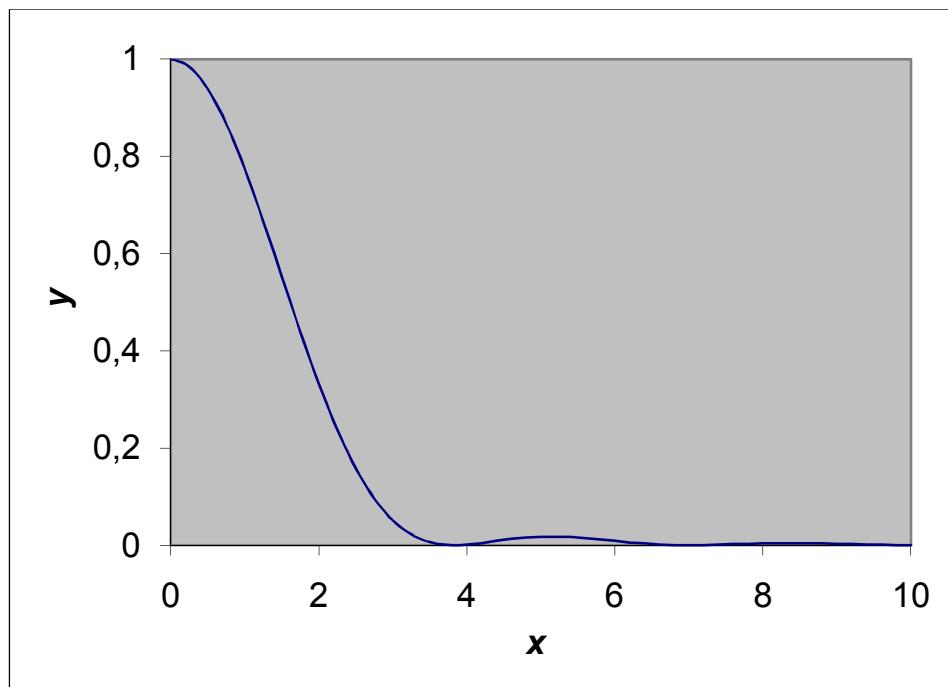
$$E(x) = E(0) \left[ \frac{2J_1(x)}{x} \right]^2 \quad 3$$

ahol  $x = k \cdot a \cdot \sin \alpha$ , és  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $a$  az apertúra (pl. a leképező optika nyílása) sugara, és  $\alpha$  az apertúra középvonalától mért szögérték.  $E(0)$  a középvonalban a felfogó ernyőn,  $E(x)$  az  $x$  értékhez tartozó szögtávolságra mért besugárzás. A [25. ábra](#) az  $x = (2\pi \cdot \sin \alpha)/\lambda$  függvényében szemlélteti a relatív besugárzás szögeloszlását. Az ábrán jól látható, hogy a központi világos területben koncentrálódik a sugárzott teljesítmény legnagyobb része. Az első sötét gyűrű az  $x = 1,22\pi$  értéknél helyezkedik el. Ezt a gyűrűt a probléma első feldolgozójáról Airy gyűrűnek hívjuk. Az apertúra sugarával kifejezve az Airy gyűrű iránya:

$$\alpha = \frac{1,22 \cdot \lambda}{2 \cdot r} \quad 4$$

Ha két szomszédos képpont közelebb van egymáshoz, mint az Airy gyűrűk távolsága, úgy azok, az elhajlasi képek átfedése miatt, már nem látszanak külön. Klasszikus optikai leképezésnél ez szabja meg, hogy adott rendszerrel milyen kis szögeltrésséssel rendelkező két

képpontot tud feloldani a rendszer, ha egyéb leképezési hibáktól eltekintünk. Ez szab határt a csillagászati távcsövekkel megfigyelhető egymáshoz közel látszó csillagok megkülönböztetésének; ezért egyre nagyobb átmérőjű teleszkóp tükröket készítenek, illetve több tükrőr szinkronizálásával növelik az apertúra sugarát. De ez szab határt az optikai leképezéssel működő félvezető eszközökkel előállító maszk-fényképező berendezéseknel is a félvezető felületén kialakítható jelsűrűségnek. Ezért igyekeznek egyre rövidebb hullámhosszúságú sugárzással megoldani a leképezést. (A félvezető maszk-készítésnek még számos más, a jel-sűrűséget befolyásoló összetevője van, valamint ismeretesek eljárások, amelyekkel az optikai diffrakciós határon belüli jel-sűrűség is megvalósítható, de ezekre itt nem tudunk kitérni.)



25. ábra: Kerek apertúra diffrakciós képének besugárzás eloszlása  
az  $x = 2\pi \cdot \sin\alpha / \lambda$  függvényében

#### 2.1.4. Sugárzás hatásának értékelése

Valamely határfelületre érkező sugárzás arról visszaverődik vagy behatol az anyagba. Ha a sugárzás számottevő energiaveszteség nélkül visszaverődik, a sugárzást visszaverő anyagról, ha a behatolás számottevő energiaveszteséggel jár, elnyelő anyagról beszélünk. A visszavert sugárzás az anyagot sem fizikai, sem kémiai, sem biológiai állapotában nem befolyásolja, az anyaggal kölcsönhatásba csak az elnyelt sugárzás képes lépni. Az elnyelt sugárzás az elnyelő anyag energiatartalmát növeli. Az energianövekedés az elnyelő közeg hőmérsékletét növelheti, kémiai változásokat okozhat, biológiai hatásokat kelthet, vagy szekunder sugárzást hozhat létre. E hatások a különböző energiájú (hullámhosszúságú) sugárzásokat különböző mértékben hasznosítják, ezért e hatások jellemzésére bevezethető a  $B(\lambda)$  „hatásfüggvény”. Ez az egyes hullámhosszúságú sugárzások relatív hatékonyságát adja meg. E függvénytel súlyozva minden Watt-ban mért  $X(\lambda)$  sugárzáseloszlás esetében számítható annak adott B hatásra vonatkozó „hatásos” teljesítménye:

$$X_B = K_B \int B_\lambda \cdot X(\lambda) \cdot d\lambda \quad 5$$

ahol  $K_B$  arányossági tényező (értéke megszabja az adott hatás leírására definiált mértékegység nagyságát; ha értékét 1-nek választjuk, a hatásos teljesítményt súlyozott Watt-ban kapjuk.

## 2.2. Radiometria és fotometria

Az informatikus feladata többek között, hogy a számítógép adta információt a humán megfigyelő számára optimális formában szolgáltassa. Az előző alfejezetben röviden foglalkoztunk az ingert létrehozó optikai sugárzás néhány jellemzőjével, az [1. fejezetben](#) pedig bepillantást kaptunk az optikai sugárzás érzékelésének mechanizmusába. Ahhoz, hogy az optikai sugárzás által létrehozott képet a humán megfigyelő számára optimalizáljuk, a látásészleletet létrehozó ingert meg kell tudnunk mérni. Nyomatékosan hangsúlyozni kívánjuk, hogy a fény és szín az emberi agyban kialakuló észlelet. Az észleletet kiváltó inger primer módon a látható sugárzás, az elektromágneses színkép 380 nm és 780 nm közötti tartományában sugárzott teljesítmény. Amikor ezen inger leírásához a humán észlelő néhány pszichológiai vizsgálattal megállapított sajátosságát is figyelembe veszik, pszichofizikai mennyiségekről beszélünk, ezekkel foglalkozik a fotometria és a színmérés, amelyek méréstechnika alapjaival foglalkozik a jelen fejezet. Ezek leírásához azonban a sugárzás mérés alapjait is át kell tekintenünk:

- A radiometria az optikai sugárzást fizikai mennyiségek formájában határozza meg.
- A fotometria ezt a sugárzást az átlagos emberi megfigyelő látására jellemző színképi függvény alapján értékeli.
- A színmérés a színérzékeléshez kíván objektíven mérhető mennyiségeket rendelni.

Feladatunk ebben a fejezetben az lesz, hogy az optikai sugárzás mennyiségi értékelésének három jellemzőjével részletesebben megismерedjünk. Mind ebben a fejezetben, mind a továbbiakban az *optikai sugárzás* kifejezést használjuk, ha az elektromágneses sugárzásnak az optikai tartományáról beszélünk (100 nm – 1 mm hullámhossz tartomány). *Látható sugárzás*, ha a látásinger kiváltására alkalmas optikai sugárzásról van szó (kb. 380 nm – 780 nm közötti tartományba eső optikai sugárzás). A *fény* kifejezést az emberi látószervben kiváltott észlelet leírására használjuk, bár néhány esetben – a hazai, helytelen, gyakorlathoz igazodóan – a fény szót a látható sugárzás szinonimájaként is szerepeltetjük.

### 2.2.1. Radiometria

Az optikai sugárzás mérésének neve *radiometria* (Pontosabban optikai radiometria, hiszen pl. a korpuszkuláris sugárzás méréstechnikáját is radiometriának hívják; mivel azonban tárgunk keretében csak az optikai sugárzás mérésével foglalkozunk, a radiometria fogalmát az optikai sugárzás mérésére szűkítve használjuk).

Az elektromos mennyiségeket a vezetőhöz lokalizálva képzeltük, csak az antennák esetén merült fel az, hogy az elektromágneses sugárzás az antennától távolodva széttartó sugárnyaláb formájában terjed. Ott szerepelt már a pontszerűnek tekinthető antennából gömbhullámként terjedő energiafolyam és különböző irányító eszközök segítségével szűkebb szögtartományba irányított sugárzás. Ilyen esetekben általában az alapvető optikai tanulmányainkra szoktak visszautalni a jelenségek leírásánál.

A mechanika tárgyalásánál rendszerint szintén nem kell a tér háromdimenziós szerkezetét figyelembe vennünk (kivéve az égi mechanikát). Az elemi hőtan sem tartalmazza a kiterjedt sugárzó és kiterjedt érzékelő közötti kölcsönhatások leírását.

A képmegjelenítők (monitor, nyomtató stb.) optikai tulajdonságainál figyelembe kell vennünk, hogy a sugárzást kiterjedt forrás hozza létre, az onnan esetleg ugyancsak kiterjedt felületekről visszaverődve jut el szemünkbe. Az optikai sugárzást keletkezése, tovaterjedése és az emberi megfigyelő, vagy azt helyettesítő objektív mérőműszer (radiométer, fotométer, színinger-mérő) térbeli helyén annak kiterjedését és az optikai sugárzással való kölcsönhatását figyelembe véve kell értékelni.

#### 2.2.1.1. Segédmennyiségek és egységeik, jelölési konvenciók

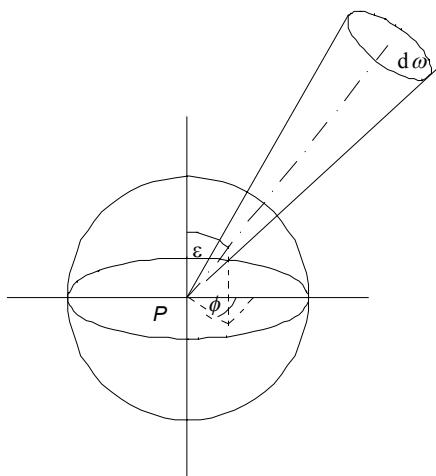
- *Térszög*

Radiometriai mennyiségeket térben kell tárgyalnunk. Ehhez vezetjük be a *térszög* fogalmát. Ha pontszerű sugárforrásból lép ki sugárzás, az egyenes vonalú pálya mentén terjed (az elhajlási jelenségeket itt elhanyagoljuk).

A  $P$  pontszerű sugárzó a gömb középpontjában helyezkedik el. Az  $\varepsilon, \phi$  irányban a  $d\omega$  térszöget értelmezzük, l. 26. ábra: A  $d\omega$  térszög a sugárkúp által a gömbfelületből kímetszett terület és a gömbsugár négyzetének hányadosa:

$$d\omega = dA/r^2$$

A sugárzó különböző  $\varepsilon, \phi$  irányokban különböző intenzitással sugározhat.



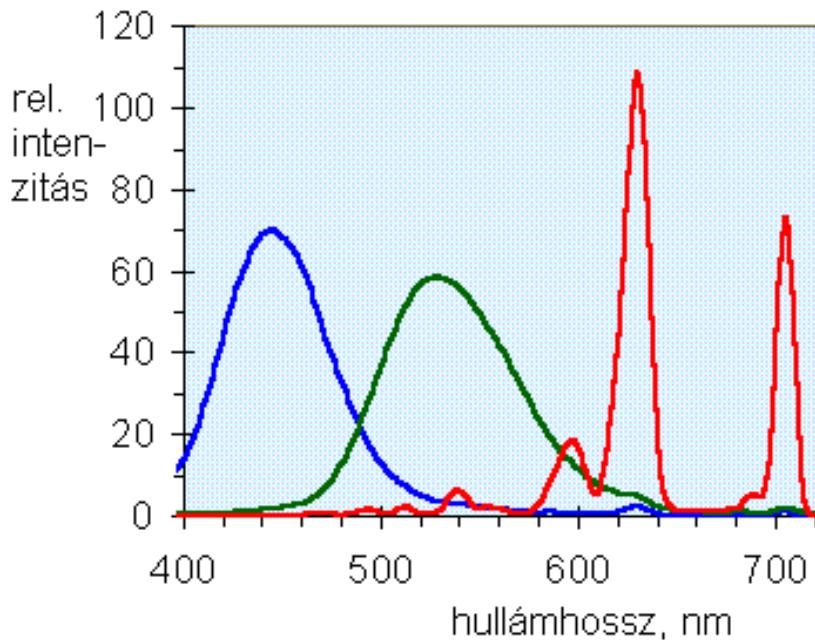
26. ábra: A térszög értelmezése

- *Színképfüggő mennyiségek leírása*

A  $P$  sugárzó által kibocsátott sugárzott teljesítmény lehet hullámhosszfüggő. A hullámhosszfüggés jelölésére a  $\lambda$  jelet használjuk. Ha valamelyen  $X$  mennyiség hullámhosszfüggő, úgy azt  $X(\lambda)$  formában jelöljük.

Az  $X$  mennyiségnak a hullámhossz függvényében lehet valamelyen eloszlása. A 27. ábra szokásos színes katódsugárcsöves monitor fényporainak színképi eloszlását szemlélteti. Mivel itt az egyes hullámhosszak közvetlen közelében, adott szűk hullámhossztartományban ( $\Delta\lambda$ ) sugárzott teljesítményt kívánjuk ábrázolni, nem magát a teljesítményt, hanem annak színképi eloszlását tüntetjük fel. Az eloszlás a hullámhossz szerinti derivált függvény:  $dX/d\lambda$ . Ezt az értéket indexbe helyezett  $\lambda$ -val szokás jelölni:

$$\frac{dX}{d\lambda} = X\lambda$$



27. ábra: Katódsugárcsöves monitor fényporainak színképi eloszlása

### 2.2.2. A radiometria mennyiségei és összefüggései

A fizika legtöbb területén az ott szokásos mennyiségeket, a lényeges összefüggéseket az energia fogalmából kiindulva szokás bemutatni. A radiometriában nem így járunk el, mert a sugárzási jelenségek tárgyalására a teljesítmény, az energia idő szerinti deriváltja, alkalmasabb.

Az elektromágneses hullámok leírására a Maxwell egyenletekből lehet kiindulni. A különböző anyagi testek határfelületén fellépő törési, visszaverési stb. jelenségek leírására a Maxwell egyenletek síkhullám megoldása alkalmas.

Az elektromágneses hullámok tárgyalása során a *Poynting vektor* ( $\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}$ ) írja le az izotrop közegben a teljesítmény-sűrűséget ( $\text{W/m}^2$ ). Ez jelenti a kapcsolatot az elméleti villamosságtanban tárgyalt, az elektromágneses hullámok által szállított energia és a radiometria sugárzott teljesítmény fogalma között.

- *A sugárzott teljesítmény (radian flux or power)*<sup>\*</sup>, jele:  $\phi$  vagy  $F$ ; egysége: watt ( $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

A sugárzott teljesítmény hullámhossz szerinti eloszlását a [2.2.1.1. fejezetben](#) leírtak szerint *teljesítmény eloszlásnak (spectral power distribution)* nevezzük:

$$\phi_\lambda = d\phi/d\lambda \quad 6$$

- *Sugárzott energia (radian energy)*, jele:  $Q$ ; egysége: joule,  $1 \text{ J} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$ .

\* Az angolszász irodalom könnyebb olvasása érdekében a fontosabb kifejezések angol fordítását is közöljük.

A sugárzott teljesítmény idő szerinti integrálja:

$$Q = \int \Phi dt$$

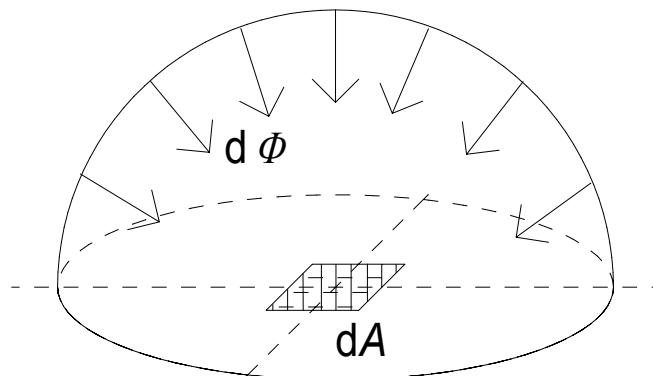
7

- *Besugárzás (irradiance), jele:  $E$ ; egysége:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ .*

Adott felületelemre beeső sugárzott teljesítmény és a felületelem hányadosa (lásd 28. ábra).

$$E = d\phi / dA$$

8



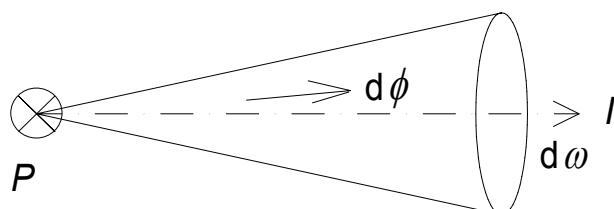
28. ábra: A besugárzás fogalmának szemléltetése:  
A  $dA$  felületre érkező sugárzott teljesítmény.

- *Sugárerősség, pontszerű sugárforrás esetén (radiant intensity),  
jele:  $I$ , egysége:  $\text{W} \cdot \text{sr}^{-1}$ .*

A sugárerősség fogalmát csak pontszerű sugárforrásra értelmezhetjük: az adott pontból az adott irányba, az elemi térszögbe kisugárzott sugárzott teljesítmény (lásd 29. ábra):

$$I = d\phi / d\omega$$

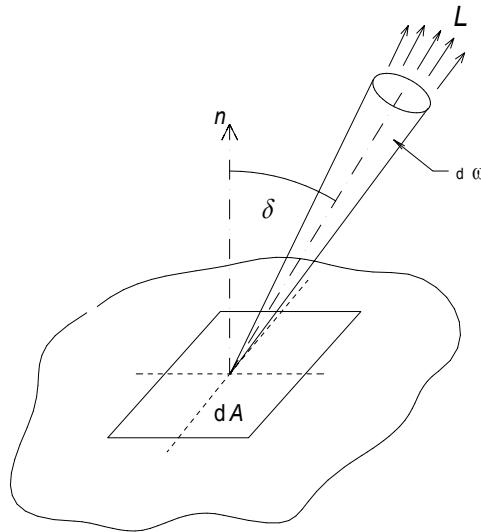
9



29. ábra: A  $P$  pontszerű sugárzó az  $I$  irányba, a  $d\omega$  térszögben  $d\phi$  sugáráramot emittál

- *Sugársűrűség (radiance), jele:  $L$ , egysége:  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$ .*

A radiometria legfontosabb mennyisége. Felületek által adott irányban kisugárzott teljesítmény jellemzésére használjuk, de meghatározhatjuk a tér adott felületelemén áthaladó sugárzott teljesítmennnyel is. Definícióját a 30. ábra segítségével magyarázzuk meg:



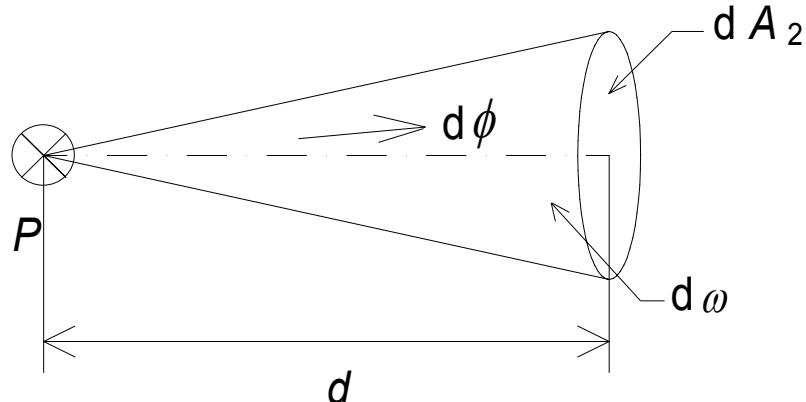
30. ábra: A sugársűrűség fogalmának magyarázata, lásd szöveg

A sugárzó felület  $dA$  felületeleme által a felület normálisától ( $n$ )  $\delta$  szögre elhelyezkedő irányban, a  $d\omega$  elemi térszögbén kibocsátott  $d\phi$  sugáráram az adott irányban mért sugársűrűség kapcsolata:

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega \cdot dA \cdot \cos \delta} \quad 10$$

A sugársűrűség esetén is beszélhetünk annak spektrális eloszlásáról. A *spektrális sugársűrűség* definíciója:

$$L(\lambda) = \frac{d^3\Phi}{d\omega \cdot dA \cdot \cos \delta \cdot d\lambda} \quad 11$$

31. ábra: A  $P$  pontszerű sugárzótól  $d$  távolságra  $d\omega$  térszög alatt látszó  $dA_2$  felületelem besugárzása  $E = I/d^2$

- *Távolságtörvény (inverse square law)*

A radiometria legtöbbet alkalmazott összefüggése az ún. távolságtörvény. Pontszerű sugárzó esetén, ha annak sugárerőssége adott irányban  $I$ , akkor a tőle  $d$  távolságban lévő felfogó ernyőn keletkező besugárzás ( $E_2$ )<sup>\*</sup> a 31. ábra alapján számolható. A sugárerősség 9. képletéből:

$$d\phi = I \cdot d\omega$$

A 31. ábra alapján

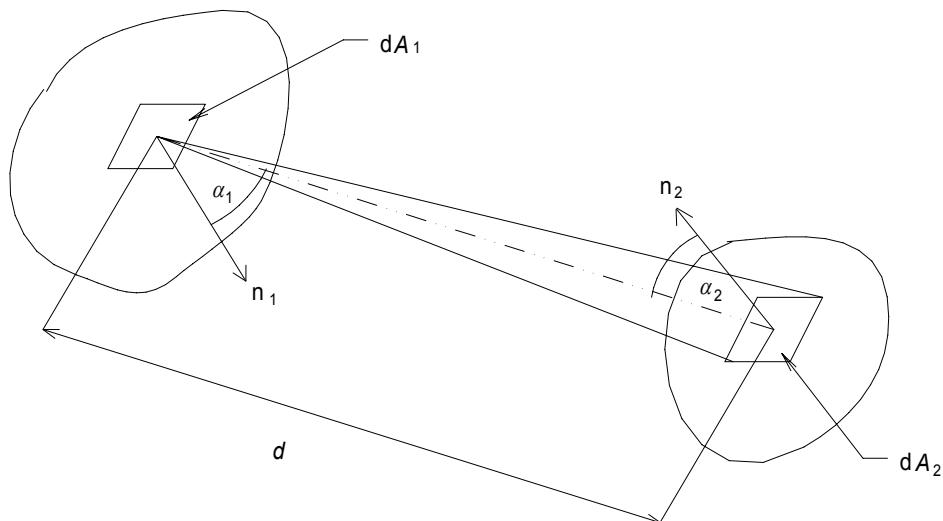
$$d\omega = dA_2/d^2$$

Ezt a fenti egyenletbe behelyettesítve és minden két oldalt  $dA_2$ -vel osztva:

$$d\phi/dA_2 = E_2 = (I \cdot d\omega)/dA_2 = (I \cdot dA_2)/(dA_2 \cdot d^2) = I/d^2 \quad 12$$

A távolságtörvény általánosítását kapjuk, ha az  $n_1$  normálisú  $L$  sugársűrűségű  $dA_1$  felületelem által a  $dA_2$  felületelem helyén létrehozott besugárzást határozzuk meg. Az általános esetnek megfelelően a  $dA_2$  felületelem a  $dA_1$ -től nézve  $\alpha_1$  szög alatt látszik. A  $dA_1$ -et  $dA_2$ -vel összekötő  $d$  távolság és a  $dA_2$  normálisa ( $n_2$ ) közötti szög  $\alpha_2$ .

$$dE_2 = (L \cos\alpha_1 \cos\alpha_2 dA_1) / (d^2) \quad 13$$



32. ábra: A  $dA_1$  felületelem által a  $dA_2$  felületelem helyén létrehozott besugárzás szemléltetése.

- *Lambert sugárzó (Lambert radiator)* az olyan sugárzó, amelynek sugársűrűsége szögfüggetlen, azaz a 30. ábra jelöléseihez  $L$  értéke független  $\delta$ -tól:

$$L(\delta) = \text{const.} \quad 14$$

vagy a 26. ábra jelöléseit használva:  $L(\varepsilon, \phi) = \text{const.}$  A katódsugárcsöves monitor világítása jó közelítésben követi a Lambert törvényt.

---

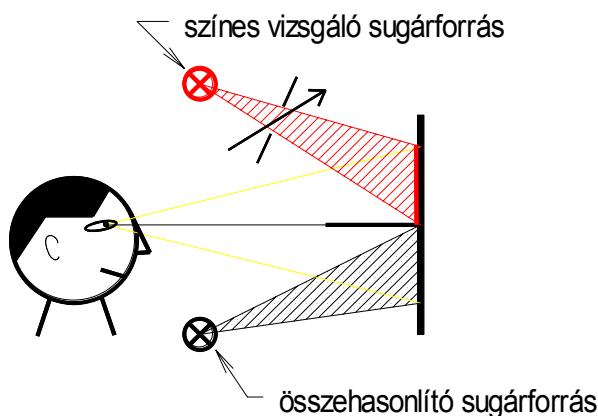
\* Tárgyalásunk során ahhoz a konvencióhoz tartjuk majd magunkat, hogy az emitter (forrás) oldali mennyiségeket 1-es indexsel jelöljük, az érzékelő oldali mennyiségeket 2-es indexsel. Ezért itt az érzékelői oldalon mérhető besugárzást  $E_2$ -vel jelöltük.

### 2.2.3. Fotometria

Ha az optikai sugárzást azzal a céllal hozzuk létre, hogy fényszleletet keltsünk (azaz lásunk), jogosan merül fel az igény, hogy a sugárzást ne fizikai teljesítmény egységekben mérjük, hanem a látószervünkhez illeszkedő rendszerben. Fénymennyiségeket már régóta mérnek vizuálisan. Szemmel történő összehasonlítás esetén a szem automatikusan „közös nevezőre” hozza a különböző színű fények erősségeit. Amikor felismerték, hogy a fény-inger a látható színképtartományba eső optikai sugárzás, felmerült annak az igénye, hogy azonos fényszleletet kiváltó különböző színű fényeket objektíven is össze lehessen hasonlítani.

Hamar nyilvánvalóvá vált, hogy a látható színkép különböző tartományából származó, azonos világosság észleletet keltő fényhez tartozó fizikai inger hullámhosszfüggően eltérő erősségű. Ha két különböző színű fényfoltot egymás mellé vetítünk, és az egyik fénysűrűségét állandó értéken tartjuk, akkor világosságegyenlőség észleléséhez a második fényfolt sugársűrűségének változtatásával juthatunk el (lásd 33. ábra). A legkisebb fizikai intenzitásra (sugár-sűrűségre) van szükségünk zöld fény esetén, és növekvő sugársűrűség kell mind a vörös, mind a kék színű sugárzás felé haladva a színképben.

Ha ezt a jelenséget számszerűen kiértékelhető formába kívánjuk hozni, egy olyan kísérletet kell összeállítanunk, ahol a látómező két szomszédos területén két fényfoltot hozunk létre, s a megfigyelőnek azt a feladatot adjuk, hogy az egyik (színes, lehetőleg nagyon keskeny hullámhossztartományból származó, ún. monokromatikus) fényfolt erősségeit addig változtassa, míg azt ugyanolyan világosnak nem észleli, mint a másik (általában színtelen, azaz fehér) fényfoltot. Ezt követően meg kell mérni minden két fényfolt sugársűrűségét. A vizsgálandó fényfolt esetén különböző hullámhosszúságú sugárzásokat (színeket) beállítva, minden egyes monokromatikus sugárzáshoz hozzárendelhetünk egy sugársűrűség értéket, amely jellemző a világosság azonosságára.



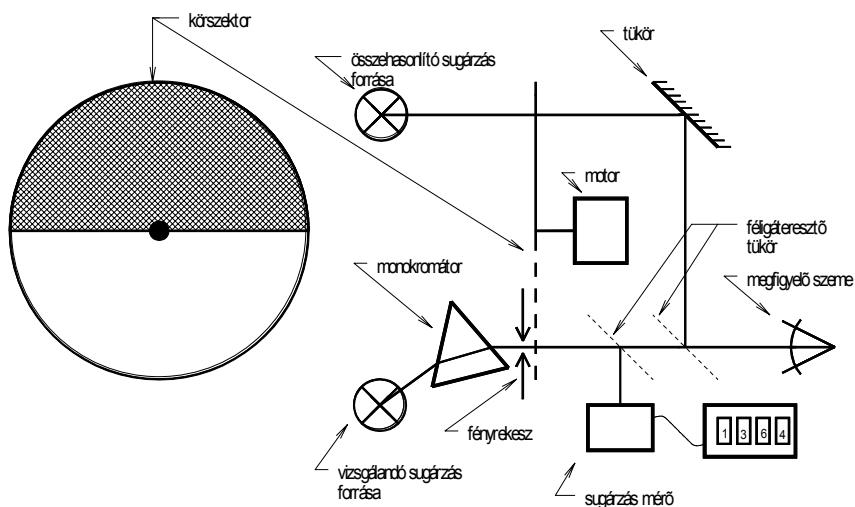
33. ábra: Színes vizsgálandó fényinger összehasonlítása adott sugársűrűségű fehér fénnel

### 2.2.4. Villogásos fotometria

A világosságészlelet ilyen összevetése pontatlan, a világosság-egyenlőség megkeresésének szórása nagy<sup>8</sup>. Van azonban a látásmechanizmusnak egy különleges tulajdonsága, amelyet a világosság egyenlőség beállítása helyett használhatunk, s amelyről a korai kísérletek (a XIX.

<sup>8</sup> Színes fények világosságának meghatározása további problémákat is felvet, a világosság érzet már nem elégíti ki a linearitás és összegezhetőség feltételét, ami mint látni fogjuk a fotometria alapfeltétele.

század vége, XX. század eleje) azt mutatták, hogy a közvetlen összehasonlíttal közel azonos eredményt szolgáltat. Ha két különböző színű fénysugarat felváltva vetítünk szemünkbe, és a váltási frekvenciát folyamatosan növeljük, azt tapasztaljuk, hogy kis frekvencia esetén (néhány Hz) követni tudjuk, hogy milyen színezetű sugárzás éri szemünket, és hogy a két színfolt közül melyik a világosabb. Ha a váltási frekvenciát növeljük, eljutunk egy olyan értékhez (általában 10-20 Hz között), amikor megszűnik a színezet-felismerésünk, csak a két nyaláb közti intenzitás-eltérést érzékeljük fényerősségtükörrel, úgynevezett „villogás” formájában<sup>9</sup>. Miután a villogás észleletéhez szükséges váltási frekvenciát beállítottuk, növelhetjük vagy csökkenhetjük a vizsgálandó fénynyaláb erősségét és megkereshetjük azt az intenzitás értéket, amelynél a villogás érzet megszűnik (vagy legalábbis minimumra csökken). Ezt a módszert hívják *villogásos fotometriának* (heterochromatic flicker photometry: HFP). Összehasonlító fényként pl. 555 nm-es zöld színű sugárzást választhatunk. A módszer gyakorlati megvalósításához használható kísérleti elrendezés vázlatát a 34. ábra szemléleti. Felváltva juttatunk fényt szemünkbe az 555 nm-es összehasonlító fénynyalából és a különböző hullámhosszúságú vizsgálandó fénynyalából. A két fénynyaláb váltását a fényútra helyezett körszektor végzi, amely felváltva engedi az egyik vagy a másik fénynyalábot a megfigyelő szemébe. A körszektor váltási frekvenciáját olyan értékre állítjuk be, hogy a színek váltását már ne érzékeljük, a fények erősségeinek különbségét még igen. A változtatható hullámhosszúságú sugárzást pl. szűk hullámhossztartományban áteresztő interferencia szűrők sorozatával állíthatjuk elő. E fénynyaláb útjába helyezzük a sugárzás erősségét állító fényrekeszt (mérő blendét) és a sugárzás erősségét mérő műszert.



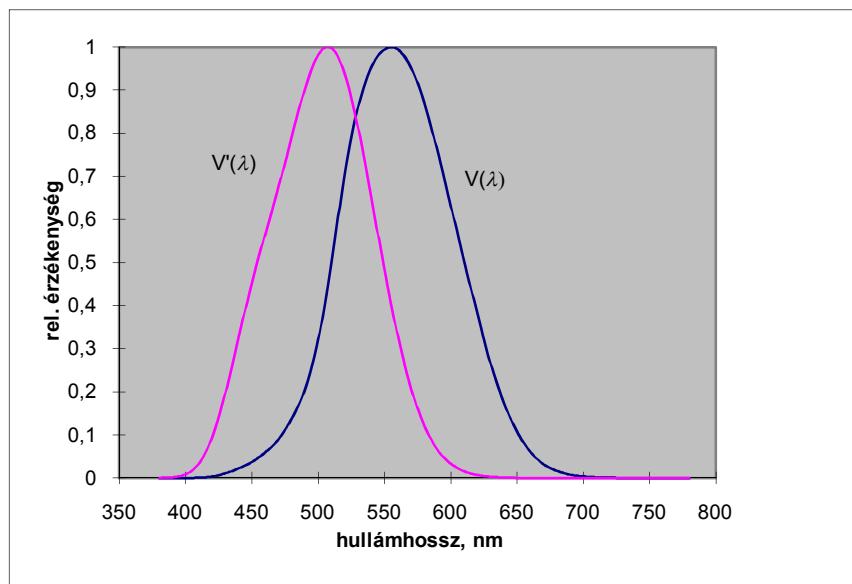
34. ábra: Villogásos fotométer elvi felépítése

A megfigyelő feladata az előzőek szerint az, hogy villogási minimumot állítson be a fényrekesz szabályozásával. A minimum helyzetben leolvassuk a vizsgálandó nyaláb útjába helyezett műszeren az ehhez az állapothoz tartozó sugáráramot. Ezt megismételjük különböző hullámhosszakat beállítva a monokromátoron. Ha az összehasonlító sugárnyalában mért sugáráramhoz viszonyítva jegyezzük fel a villogási minimumhoz tartozó sugáráramokat és ezek reciprok értékét ábrázoljuk a hullámhossz függvényében, a 35. ábra szerinti görbét kapjuk: 555 nm-nél van a görbe maximuma, s haranggörbe-szerűen csökken az érzékenység a rövidebb és hosszabb hullámhosszak felé.

<sup>9</sup> Az. 1.3.2. fejezetben láttuk

Ezen s néhány hasonló elv alapján végzett kísérlet eredményeit átlagolva rögzítette 1924-ben a Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (Comission Internationale d'Éclairage, CIE) a világosban látás körülmenyei közt használható átlagos „láthatósági” függvényt, s ezt a *visibility* szó kezdőbetűje alapján a világosban látás (Pontosabban *spektrális fényhatásfok*)  $V(\lambda)$ - függvényének nevezték (CIE, 1924 [13]). A napjainkban is használt fotometriai rendszer egyik alappillére ez a  $V(\lambda)$ -görbe.

Ahhoz, hogy a radiometriából a látásészleettel korreláló rendszert lehessen felépíteni, még egy további kísérletsorozatra volt szükség. Meg kellett vizsgálni, hogy milyen hatást vált ki, ha két fényinger összegével, vagy adott fényinger többszörösével ingereljük szemünköt. A kísérletek azt mutatták, hogy a villogásos fotometria lineáris, proporcionális és additív tulajdonságokat mutat, azaz



35. ábra: Az ún. láthatósági görbék, a világosban (nappali) látás  $V(\lambda)$  - és a sötétközötti látás  $V'(\lambda)$  - görbe hullámhossz függése

- ha  $A_1$  sugárzás villogási minimumot mutat  $B$  összehasonlító sugárzással, azaz  $A_1 \equiv B$  (az azonosság jelét használjuk a vizuális hatás azonosságának jelzésére), akkor  $xA$  sugárzás  $xB$  sugárzással fog villogási minimumot szolgáltatni:  $xA_1 \equiv xB$ ;
- ha  $A_1$  sugárzás villogási minimumot ad  $B$ -vel és  $A_2$  is minimumot ad  $B$ -vel, akkor az  $A_1$  és  $A_2$  szuperpozícióját használva vizsgálandó sugárzásaként a  $B$  kétszeresével kapunk villogási minimumot. Azaz, ha  $A_1 \equiv B$  és  $A_2 \equiv B$ , akkor  $A_1 + A_2 \equiv 2B$ .

Matematikailag megfogalmazva azt találjuk, hogy a fotometriai mennyiségekre igazak az alábbi törvényszerűségek:

- *szimmetria*: ha  $A \equiv B$ , akkor  $B \equiv A$ ;
- *tranzitivitás*: ha  $A \equiv B$  és  $B \equiv C$ , akkor  $A \equiv C$ ;
- *arányosság*: ha  $A \equiv B$ , akkor  $\alpha A \equiv \alpha B$ ;
- *additivitás*: ha  $A \equiv B$ ,  $C \equiv D$  és  $(A+C) \equiv (B+D)$ , akkor  $(A+D) \equiv (B+C)$ .

Az  $A$ ,  $B$ ,  $C$  és  $D$  (monokromatikus) fény-ingert (stimulust) felírhatjuk, mint a sugárzás teljesítményeloszlásának és a láthatósági függvénynek szorzatát, pl.  $A=S_\lambda V(\lambda)d\lambda$ .

A fentieket általánosíthatjuk, s összetett, különböző hullámhosszúságú  $S_\lambda$  színképi teljesítményeloszlású sugárzást szemlélve, annak fotometriai hatékonyságát összetéve képzelhetjük a monokromatikus sugárzások hatékonyságából:

$$\sum S_\lambda \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda$$

Ha a  $\phi_{e,\lambda}$  a sugáráram (sugárzott teljesítmény) színképi eloszlását jelzi, akkor ennek fotometriai megfelelőjét *fényáramnak* hívjuk:

$$\phi_V = k \int_{\lambda=380\text{nm}}^{780\text{nm}} \phi_{e,\lambda} V(\lambda) d\lambda \quad 15$$

A képletben szereplő  $k$  együttható a fotometriai és a radiometriai egységek egymáshoz rendelésénél kap értelmet (lásd [2.2.5. fejezet](#)).

Szokásos ugyanazzal a betűjellel jelölni az egymásnak megfelelő fotometriai és radiometriai mennyiségeket (mint példánkban a fényáramot és a sugáráramot). Ilyenkor a  $V$  index jelzi, ha fotometriai mennyiségről van szó, és e indexet használunk a radiometriai mennyiség (energetikai) jelzésére. Olyan esetekben, amikor teljesen nyilvánvaló, hogy fotometriai (vagy radiometria) mennyiség szerepel egy összefüggésben a  $V$  (illetve  $e$ ) index el is hagyható.

Hangsúlyozni szeretnénk, hogy bár a század elején azzal a céllal hozták létre az előzőekben vázolt fotometriai rendszert, hogy a különböző világítások világosságészlelet egyenlőségének előrejelzéséhez hozzanak létre mérőrendszer, a fotometria nem a világosság észleletet modellezzi, hanem a villogási minimumot. Az elmúlt 75 év kísérletei azt mutatták, hogy az emberi világosságészlelet nem követi a fotometriai törvényeket, de a munkavégzés szempontjából alapvető fontosságú látóélesség jól korrelál a fotometriai mennyiségekkel. Ha a képernyőn különböző színekkel létrehozott írások olvashatóságát kell jellemezni, erre a fotometria használható, ha színes fényfoltokat hozunk létre a képernyőn, és az ezek által létrehozott világosságészleletet szeretnénk azonosra állítani, akkor a fotometriai adatokat tovább kell korrigálni (ehhez a színmérés módszereit is fel kell használni, lásd [4.4. fejezet](#)).

Látószervünk tárgyalásakor említettük, hogy szemünkben kétféle, a látásért felelős fényérzékeny képződmény van, a világosban látásért (*fotopos látás*) felelős csapok és az igen gyenge világítás körülményei között működő, a „sötétben látásért” (*szkotopos látás*) felelős pálcikák. Az eddig leírtak a világosban látás viszonyaira vonatkoztak, a  $V(\lambda)$ -görbét akkor kapjuk, amikor a csapok működnek (ezek látnak színt, s egyes színlátási hatások megkerülésére kellett a villogási fotometria módszeréhez folyamodni).

Igen kis megvilágítás esetén (pl. holdvilág) a pálcikákban látunk. A pálcikákban csak egyféllel *szembíbor* van (rhodopsin), ezért a pálcikák színvakok. Pálcikalátás körülményei között közvetlenül összehasonlíthatunk két szomszédos, különböző spektrális teljesítmény-eloszlású mezőt. Ilyen vizsgálatokkal fel lehet építeni a  $V(\lambda)$ -görbéhez hasonló görbét, amely a sötétben látás körülményei közt írja le a különböző hullámhosszúságú sugárzások által létrehozott világosság érzetet [14]. Ezt  $V(\lambda)$ -val szokás jelölni, lásd [35. ábra](#).

Kísérletek azt mutatták, hogy sötétben látás körülményei között is fennáll a proporcionalitás és additivitás, így a sötétben látás körülményei között is a [15. képletnek](#) megfelelő integrálképlet szolgáltatja a radiometria és fotometria kapcsolatát:

$$\dot{\phi}_v = K_m \int_{\lambda=380nm}^{780nm} \Phi_{e,\lambda} V'(\lambda) d\lambda \quad 16$$

ahol  $K_m = 1700 \text{ lm/W}$

### 2.2.5. Fotometriai mennyiségek és egységek

Fotometriai méréseket végeztek már akkor is, amikor még nem ismerték a radiometria és a látásészlelet közötti összefüggéseket. Az idők során gyertyát, olajlámpát, izzólámpát majd fizikailag jól definiálható és reprodukálható sugárforrást (fekete testet vagy un. Planck sugárzót) használtak etalonként.

Napjainkban a fotometriai mértékrendszert nem sugárforrás tulajdonágaira vezetjük vissza, hanem közvetlenül a sugárzott teljesítménynek a mérésére. Amikor ezt az áttérést végrehajtották, a fotometria már jól megalapozott szakma volt, számos mérőműszer állt rendelkezésre fotometriai mérések számára. Ezért a 15. és 16. képletben a  $k$  ill.  $k'$  konstans számára olyan értéket választottak, hogy az új alapetalon és a hagyományos etalon segítségével végzett mérés számértéke lehetőleg azonos legyen. (Az új etalonra való áttérés csak az alapetalon meghatározásának szórását volt hivatva csökkenteni).

A fentiekre való tekintettel a fényáram és a sugárzott teljesítmény kapcsolatát az alábbi egyenlet segítségével definiálták:

$$\dot{\phi}_v = K_m \int_{\lambda=380nm}^{780nm} \phi_{e,\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad 17$$

ahol  $K_m = 683 \text{ lm/W}$ , a sugárzás fényhasznosításának legnagyobb értéke (l. sugárzás fényhasznosítása, alább).

A fényáram egysége a *lumen*.

Történelmi okokból a fotometria alapegysége nem a lumen, hanem a fényerősség egysége, a *kandela* (miként említettük régebben sugárforrást tudtak stabilan, reprodukálhatóan előállítani).

A fényerősség pontszerű fényforrásból adott irányban, infinitezimális térszögben ( $d\Omega$ ) kibocsátott fényáram és térszög hányadosa:

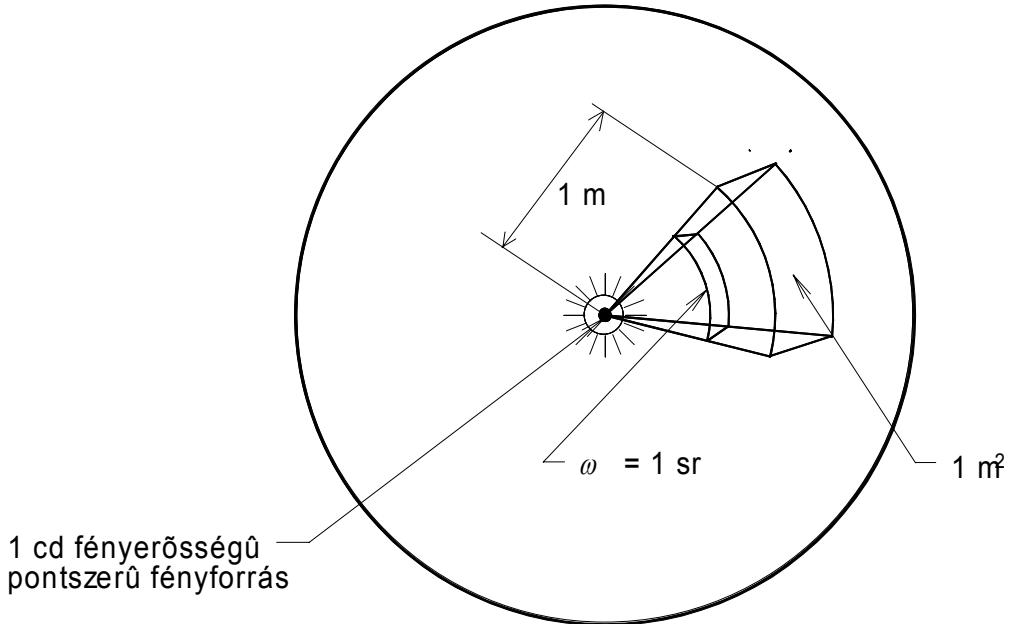
$$I_v = \frac{d\phi_v}{d\Omega} \quad 18$$

Egysége a kandela, jele: cd=1 lm/sr

A kandela ma érvényes definíciója:

**„A fényerősség SI egysége: Azon  $540 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$  frekvenciájú monokromatikus sugárzást kibocsátó fényforrásnak a fényerőssége adott irányban, amelynek sugárerőssége ebben az irányban  $1/683 \text{ W/sr}$ ” [15].**

A fényáram és fényerősség kapcsolatát a 36. ábra szemlélteti. Pontszerű, minden irányban egyenletesen sugárzó 1 cd fényerősségű fényforrás köré 1 m sugarú gömböt képzelve az adott irányt körülvevő 1 sr térszögbbe 1 lm fényáramot emittál. A teljes  $4\pi$  térszögben a minden irányban 1 cd fényerősségű fényforrás fényárama (szokás összfényáramnak nevezni)  $4\pi$  lm.



36. ábra: A fényáram származtatása a fényerősségből

A világítástechnika két legfontosabb mennyisége a fénysűrűség és a megvilágítás a sugársűrűség és besugárzás fotometriai megfelelője:

- Fénysűrűséget az adott irányban, a  $dA_1$  felület által a  $d\Omega$  térszögben kisugárzott fényáram segítségével határozhatjuk meg:

$$L_v = \frac{d^2\phi_v}{d\Omega dA_1 \cos\alpha_1} \quad 19$$

ahol  $\alpha_1$  a felületelem normálisa és a vizsgált irány közötti szög.

A fénysűrűség egysége a  $\text{cd}/\text{m}^2$ .

A fénysűrűségnek kitüntetett szerepe van az optikai rendszerekben való fénytovaterjedés szempontjából, mert a fényforrás fénysűrűségénél nagyobb fénysűrűséget az optikai leképező rendszer segítségével nem tudunk létrehozni. A fénysűrűség a rendszerben fellépő veszteségek miatt (reflexiók, abszorpciók stb.) csak csökkenhet.

- Megvilágítás: Adott felületelemre ( $dA_2$ ) beeső fényáram és a felületelem hányadosa.

$$E = d\phi_v / dA_2 \quad 20$$

A megvilágítás egysége a *lux*, jele: lx;  $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm}/\text{m}^2$ .

Szekunder sugárzók, azaz megvilágított felületekről visszaverődő sugárzás, értékelésénél is használhatjuk a fénysűrűség fogalmát. Ha adott felület  $E$  megvilágítást kap, s a felület fénvvisszaverését a  $\rho$  reflexiós együtthatóval írjuk le, akkor ennek a  $\rho$  értéknek a visszaverési

iránykarakterisztikájától függően különböző irányokban különböző fénysűrűséget mérhetünk. A fényvisszaverő felületek speciális osztályát alkotják a teljesen matt, a fény minden irányban egyenletesen szóró felületek. Ezeket hívjuk *Lambert-reflektáló felületeknek*, a melyekről visszavert fény fénysűrűsége szögfüggetlen (lásd [2.2.1. fejezet: Lambert sugárzó](#)). Ezen esetben az  $E$  megvilágítású  $\rho$  reflexiós együtthatójú felület fénysűrűsége:

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad 21$$

Számítógépes fotometriai szimulációk esetén igen gyakran élnek azzal az egyszerűsítéssel, hogy a felületeket, melyek között fényvisszaverést kell leírni, Lambert felületnek tekintik.

Adott jel láthatóságát a jel fénysűrűségén kívül a háttér fénysűrűsége is befolyásolja. A jel és háttér fénysűrűség viszonyait a kontraszt és kontrasztviszony fogalmaival jellemzzük:

- *Kontraszt, jele:  $c$ .*

A kontrasztot a jel (target) fénysűrűsége ( $L_t$ ) és a háttér (background) fénysűrűsége ( $L_b$ ) segítségével definiáljuk:

$$c = \frac{L_t - L_b}{L_b} \quad 22$$

Ezen meghatározás értelme, hogy a háttéről elkülönülő, ahoz járulékosan jelentkező ( $L_t - L_b$ ) fénysűrűséget viszonyítja a háttér fénysűrűségéhez.

Számítástechnikai láthatósági leírásokban sokszor használjuk az egyszerűbb formájú kontrasztviszony fogalmát is:

- *Kontrasztviszony, jele:  $C_v$*

A kontrasztviszony a jel fénysűrűsége a háttér fénysűrűségéhez viszonyítva:

$$C_v = \frac{L_t}{L_b} \quad 23$$

Sugárzók további fontosabb jellemzői a következők:

- *Sugárzási hatásfok,  $\eta$*   
A sugárzó sugárzott és felvett teljesítményének hányszáma.
- *A sugárforrás fényhasznosítása, jele:  $\eta^*$*  A kibocsátott fényáram és a sugárzó által felvett teljesítmény hányszáma; egysége: lm/W.

Ezt a mennyiséget használjuk fényforrások hatásfokának összehasonlításához. Néhány jellegzetes fényforrás fényhasznosításának adatait az [2. táblázat](#) tartalmazza.

2. táblázat. Fényforrások fényhasznosítása [16]

Fényforrás típusa	Fényhasznosítás (lm/W)
Hagyományos izzólámpa	14,4
Halogén izzólámpa	17
Hagyományos fénycső	65
3 sávos fénycső, elektronikus előtéttel	93
Kompakt fénycső	85
Nagynyomású Hg-lámpa	54
Nagynyomású fémhalogén lámpa	90
Nagynyomású Na-lámpa	116
Kisnyomású Na-lámpa	206
Meleg fehér fényű LED*	110
Hideg fehér fényű LED*	160

\* 2010 első félévi adatok

- A sugárzás fényhasznosítása, jele:  $K$ .

A  $\phi_v$  fényáram és az annak megfelelő  $\phi_e$  sugárzott teljesítmény hányadosa, egysége: lm/W.

$$K = \frac{\phi_v}{\phi_e} = \frac{k \int \phi_{e,\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int \phi_{e,\lambda}(\lambda) d\lambda} \quad 24$$

A sugárzás fényhasznosítása maximuma a kandela definíciójának megfelelően  $\lambda=555$  nm-nél van, értéke

$$K_m = 683 \text{ lm/W} \quad 25$$

világosban (fotopos) látás esetén.

A sötétközötti látás  $V'(\lambda)$ -görbéjének maximuma 507 nm-nél van. Az 555 nm-es sugárzás esetén a mért fotometriai mennyiségek a  $V(\lambda)$  és a  $V'(\lambda)$  használatától függetlenül azonos értéket kell, hogy felvegyen. Ebből azt kapjuk, hogy sötétközötti (szkotopos) látás esetén a  $K'(\lambda)$  legnagyobb értéke:

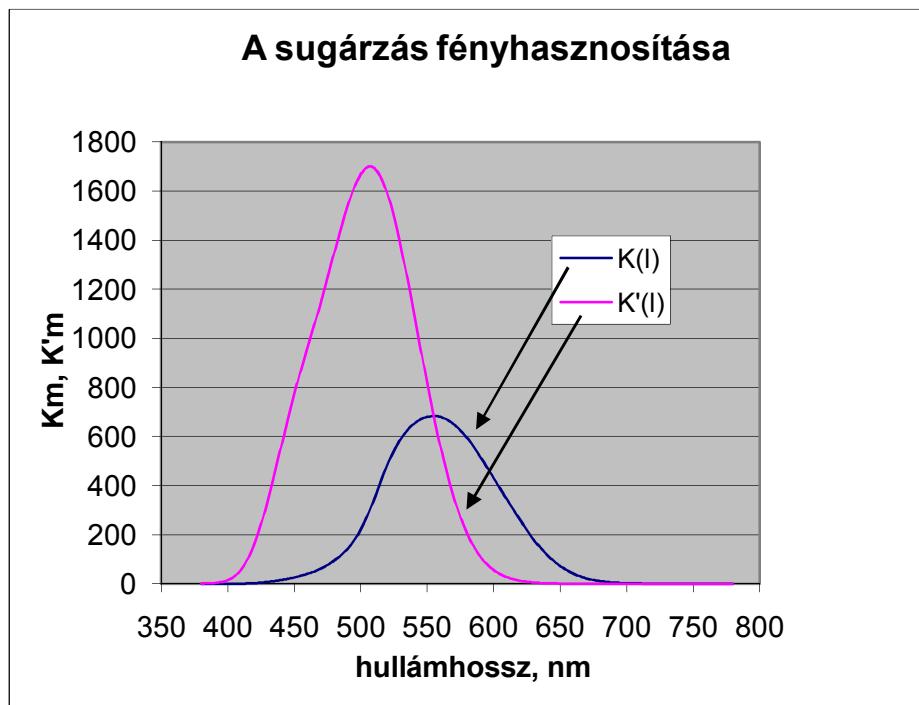
$$K'_m = 1700 \text{ lm/W} \quad 26$$

s ezt az értéket az 507 nm-nél veszi fel. A [37. ábra](#) a  $K(\lambda)$  és  $K'(\lambda)$  hullámhossz függését szemlélteti.

## 2.2.6. Fotopos-, mezopos-, és szkotopos fotometria:

A világosban látás ismertetett egységeit akkor használjuk, amikor a világítási szintek elég nagyok ahhoz, hogy a látószervünk csap mechanizmusát ingerelje a szemünkbe jutó sugárzás. Ez kb. 3 cd/m<sup>2</sup>-nél nagyobb fényűrűség esetén teljesül. Ezt hívjuk *fotopos* fénysűrűségi tartománynak. A tartománynak egyezményes felső határa nincsen, de 10<sup>5</sup> cd/m<sup>2</sup> fölött káprázási, majd vakítási jelenségek lépnek fel, ilyen körülmények között a fotometria additivitási, proporcionalitási stb. törvényei már nem teljesülnek, így a fotometriai leírás érvényét veszti.

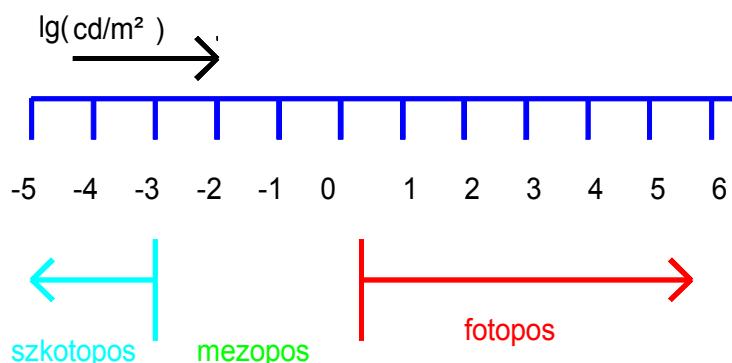
Kb.  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup>-nél kisebb fénysűrűségeknél a csapok már egyáltalában nem működnek, csupán a pálcikák segítségével látunk. Ezt a fénysűrűség tartományt hívjuk a *szkotopos* fénysűrűségek tartományának. A legkisebb fényértékek, melyek még fényérzéstet képesek kiváltani a néhány foton/s nagyságrendjébe esnek.



37. ábra: A sugárzás fényhasznosításának görbéi fotopos és szkotopos látás esetén

A  $10^{-3}$  cd/m<sup>2</sup> és 3 cd/m<sup>2</sup> közti fénysűrűség tartományt *mezopos* tartománynak hívjuk. A fotopos tartománytól kezdve folyamatosan csökken a csapok okozta látás és nő a pálcika látás aránya. Ennek megfelelően fokozatosan tolódik el a fényérzékelés színképi érzékenysége a  $V(\lambda)$ -görbétől a  $V'(\lambda)$ -görbe felé. Számos próbálkozás történt a mezopos fotometria megalkotására [17]. A CIE napjainkban fogad el egy ajánlást, melynek segítségével mezopos fénysűrűségeket lehet számítani [18].

A 38. ábra a három fénysűrűség tartományt szemlélteti.



38. ábra: A fotopos, mezopos és szkotopos fotometria fénysűrűség tartománya

Az informatikus számára a legfontosabb a fotopos tartomány, képernyőkön megjelenő információk fénysűrűsége a néhány  $\text{cd}/\text{m}^2$  és  $100\text{-}150 \text{ cd}/\text{m}^2$  közé esik. Kisebb fénysűrűségek kis fényerejű írásvetítők és LCD-panelek esetén jönnek létre, valamint speciális alkalmazási területeken, mint pl. radiológia és Röntgen-kép kiértékelések, repülőtéri irányítók stb.

#### *Megjegyzés:*

A fotostól eltérő fotometria más területeken jelentős, és a nem megfelelően használt rendszer (pl. fotopos a mezopos vagy szkotopos helyett) komoly hibákhoz vezethet. Így pl. az útvilágítás területén az előforduló fénysűrűségek általában a mezopos tartományba esnek. A következő összeállítás azt szemlélteti, hogy ha az útburkolat fénysűrűségét fotopos  $0,05 \text{ cd}/\text{m}^2$ -nek választjuk, úgy a mezopos, vagy szkotopos fotometria rendszerét használva kisnyomású nátrium lámpa (aranyosárga fényű) és nagynyomású higany lámpa (kékeszöld fényű) mért fénysűrűségének számértéke miként változik.

*3. táblázat. Kisnyomású Na és nagynyomású Hg lámpa összehasonlítása: az útburkolaton azonos fotopos fénysűrűség beállítása esetén értékelt fénysűrűségek*

	Na	Hg
Fotopos:	0,05	0,05
Mezopos:	0,028	0,061
Szkotopos:	0,01	0,07

Látható, hogy a kékeszöld fényű lámpa a mezopos vagy szkotopos fotometria szerint értékelve nagyobb fénysűrűséget mutat, mint a sárgás színű. Ugyanakkor ez a színlégtér fénysűrűség változás csak egy összetevője a fényérzetnek. Ha arra vagyunk kíváncsiak, hogy az úton akadályt milyen könnyen, gyorsan veszünk észre, úgy szemünk csap-mechanizmusának ingerlését kell figyelembe venni, még a mezopos vagy szkotopos fénysűrűségek tartományában is, azaz a fotopos érzékenységgel kell számolni. Az egyes rendszerek megfelelő használata a modern világítástechnika egyik sarkalatos problémája.

### 2.3. Színinger-mérés

A számítógépes információ közlést gazdagítja, ha színeket is használunk. Modern képmegjelenítés szinte elképzelhetetlen színek alkalmazása nélkül. Ezért röviden meg kell ismerkednünk ezek számszerű meghatározásával is. Elöljáróban le kell szögeznünk, hogy a szín észlelet, az ami agyunkban keletkezik. Leírni csak azt az ingert, stimulust tudjuk<sup>10</sup>, amely az észlelet kiváltásához hozzájárul. A keletkező színészlelet nagyon sok összetevőtől függ, itt csak a színinger-megfeleltetés leírásának alapvető módszerére szorítkozunk.

Színinger-megfeleltetés alatt azt értjük, hogy két színes foltot, különben azonos külső körülmények között (mint amilyenek a környezet megvilágítása, a folt mérete, helyzete a látómezőben stb.) azonos színűnek látunk, azonos színészleletet keltenek.

Színingerek létrehozására két alapvető eljárás létezik, az úgynevezett *additív színkeverés*, amikor különböző színű színes fényingerek keverékéből állítunk elő újabb színingert, és a *szubtraktív* vagy elvonó *színkeverés*, amikor egy kiinduló, pl. fehér fényingerből szűrők,

<sup>10</sup> A pontos szóhasználat megköveteli, hogy az ingert és a keletkezett érzetet/észleletet különválasszuk, ezért helyesen színinger-mérésről kell beszélnünk. A nemzetközi szabvány azonban megengedi, hogy amikor a szövegkörnyezetből egyértelműen kitűnik, hogy ingermetrikáról van szó, akkor az „inger” kiegészítést elhagyjuk.

festékek segítségével elvonunk különböző színképtartományokat. (Mivel a színkeverés csak ingerek keverésére vonatkozhat, az inger szót itt külön nem használjuk, lásd fentebbi megjegyzés.)

A számítógépes monitor vagy a TV készülék színelőállítása jó példája az additív színkeverésnek: Itt egymás mellett sok apró, három különböző színű fénypor-foltocskából álló egység van, ezek különböző erősségi gerjesztése, s a szinfoltocskáknak a szemünkben való összeolvadása hozza létre a különböző színészleteket.

A szubtraktív színkeverés példája a színes fénykép, ahol a fehér papír előtt helyezkedik el a három különböző színű színszűrő réteg, és a beeső fény ezeken áthaladva gyengül, majd a papírról visszaverődve és ismét áthaladva a színes rétegeken újabb gyengülést szenved, s így a beeső fehér fényt a kép különböző részein, az egyes rétegek fényelnyelésének függvényében más-más arányban gyengíti. A színes nyomat készítésénél 3 különböző színű festékanyag részben egymásra nyomtatása, részben egymás mellé elhelyezett festékcsapjai az additív és szubtraktív színkeverést együtt használják, s így jönnek létre a köztes színek. A szubtraktív színkeverés törvényszerűségei bonyolultak, a színek egyszerű leírására ez a módszer kevésbé alkalmas.

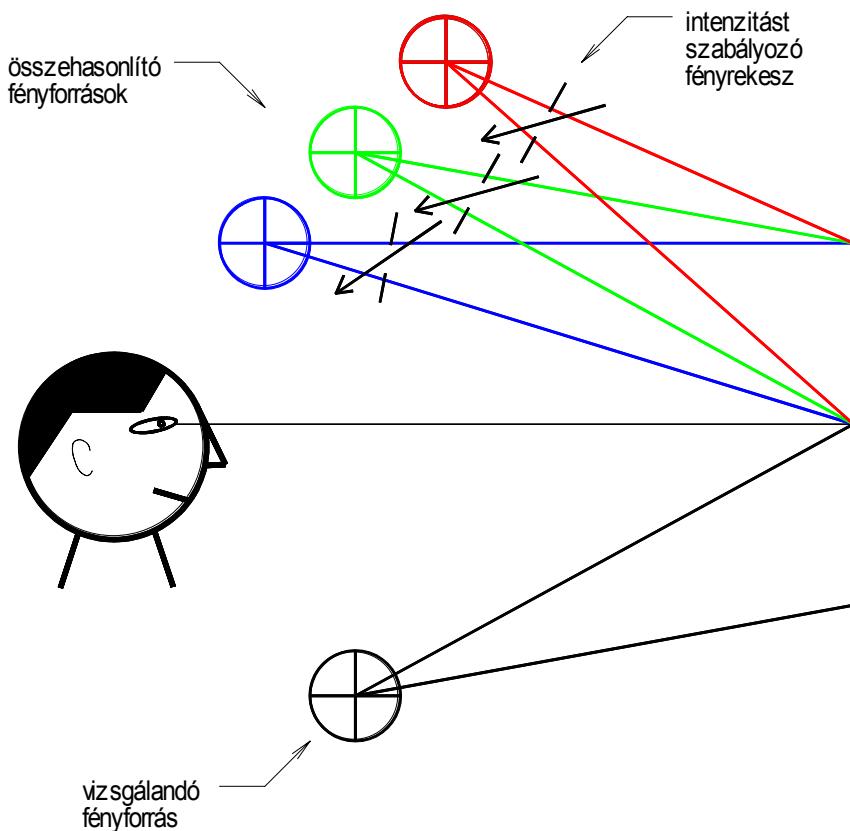
### 2.3.1. Additív színkeverés

Az additív színkeverés törvényszerűségei sokkal egyszerűbbek, lényegileg a fotometria törvényeinek 3 dimenzióba történő általánosításával leírhatók a színingerek, jelen bevezetőben ennek néhány elemével fogunk megismerkedni.

Az additív színkeverés a következő empirikus törvényekre épül (Grassmann törvények):

1. minden színinger létrehozható 3 egymástól független színinger additív keverékeként. A függetlenség alatt azt értjük, hogy a három színinger közül egyik sem hozható létre a másik kettő additív keverékeként.
2. Színegyeztetés létrehozásához csak a választott alapszíninger a lényeges, a színképi összetétele nem.
3. Az egyes színingerek erősségeinek folyamatos változtatásának hatására az eredő színinger is folyamatosan változik.

A fentiek alapján a színmérés alapkísérletét [39. ábra](#) szemlélteti: három különböző színű fényforrás sugárnyalábját (pl. 3 diavetítő fényét, melyek sugármenetébe helyezünk egy-egy színszűrőt) vetítjük egy fehér ernyő azonos felületére, s melléje vetítjük egy negyedik fényforrás sugárzását - a vizsgálandó színingert. A három összehasonlító fényforrás színingerét célszerűen vörös, zöld, kék színezetűnek választjuk (ezzel sok különböző színezetű vizsgálandó fénnel sikerül színegyeztést elérnünk). Az összehasonlító fényforrások fényerősségeinek szabályozásával hozzuk létre a színegyeztést a látómező szomszédos felületére vetített fényfolttal. A három összehasonlító fényforrás által a felfogó ernyőn a színegyeztéskor létrehozott megvilágítás érték jellemző a vizsgálandó fényforrás színére.



39. ábra: Az additív színmegfeleltetés alapkísérlete

Mivel az additív színkeverés esetén is érvényes a disztributivitás, additivitás és proporcionalitás törvénye, éppúgy, mint a fotometriában (lásd 2.2.3. fejezet), a három színjellemző a fotometria 15. képletéhez hasonló három egyenlettel írható le. Az ezekben szereplő, a színlátásra jellemző súlyozó függvényeket nem kell a villogásos fotometria viszonylag mesterkélt módszerével meghatározni, hanem azt közvetlen színegyeztetéses módszerrel is megkapthatjuk: a 39. ábra szerinti elrendezésben a vizsgálandó fényforrásként a látható színképtartomány különböző hullámhosszúságú monokromatikus sugárzását választjuk és minden egyes különböző hullámhosszúságú sugárzáshoz meghatározzuk, hogy a 3 összehasonlító sugárzásból mekkora intenzitást kell venni ahhoz, hogy színegyeztést tudjunk létrehozni (színinger-megfeleltetés). A nemzetközi gyakorlatban összehasonlító sugárzásként a 700 nm-es vörös, az 546 nm-es zöld és a 435 nm-es kék monokromatikus sugárzást szokták alap-színingernek választani.\*

Az egyes alapszíningerek egységnyi mennyiséget úgy határozták meg, hogy azok additív összege fehér fény érzetét keltse<sup>11</sup>. A kísérletek azt mutatták, hogy ha

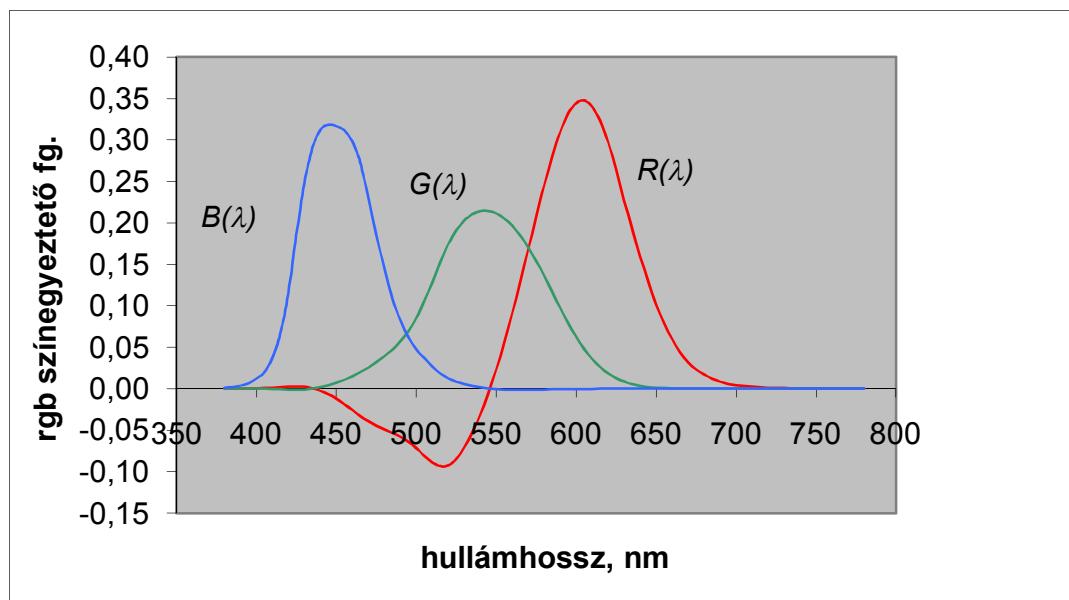
\* Az 546 nm és 435 nm választása annak köszönhető, hogy ez két viszonylag erős higany vonal, s ezért nagy megbízhatósággal előállítható, ha fényforrásként Hg-lámpát használunk. A tényleges kísérletekben a fentiekkel eltérő valós összehasonlító sugárzást, un. *alapszíningert* (real-primary) is szoktak használni, ilyenkor egy egyszerű mátrix transzformációval a kísérletben felhasznált összehasonlító sugárzásokról az egyezményes RGB alapszínekre transzformálhatjuk a színegyeztető függvényeket.

<sup>11</sup> Pontosabban, hogy azok azonos színészleletet keltsenek, mint az equienergetikus színkép, melyben minden monokromatikus összetevő azonos sugársűrűségű.

- a 700 nm-es sugárzást  $100 \text{ cd/m}^2$  -re választjuk, úgy
- az 546 nm-es sugárzásból  $459,07 \text{ cd/m}^2$ -t kell venni, és
- a 435 nm-es sugárzásból  $6,01 \text{ cd/m}^2$ -t.

A színinger megfeleltetéssel meghatározott függvényeket *színinger-megfeleltető függvényeknek* nevezzük (angolul: colour matching function), alakjukat a 40. ábra szemlélteti. A színinger-megfeleltető függvények egyezményes jelölése az adott alapszínre utaló betűvel<sup>\*\*</sup> felülvonással és zárójelbe helyezett  $\lambda$  jel. A számítógépes ábrafeliratokban a felülvonást sokszor technikai okokból el kell hagyni, ezért újabban az adott rendszerre utaló nagybetűt használják. Így az rgb színinger-megfeleltető függvények egyezményes jelölése:

$$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda), \text{ vagy } R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda).$$



40. ábra: Valós összehasonlító sugárzásokra vonatkoztatott színinger-megfeleltető függvények

Az additivitás és proporcionalitás törvényeinek teljesülése ezek után biztosítja, hogy az így meghatározott  $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$  színinger-megfeleltető függvények segítségével összetett színképű,  $S_\lambda$ -sugárzáseloszlású színingert leírunk:

$$\begin{aligned} R &= k \int S_\lambda \bar{r}(\lambda) d\lambda \\ G &= k \int S_\lambda \bar{g}(\lambda) d\lambda \\ B &= k \int S_\lambda \bar{b}(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad 27$$

Az  $R, G, B$  számhármasokat *színinger-összetevőknek* vagy *tristimulusos* értékeknek hívjuk.

A színinger-megfeleltető függvények alakja függ az alapszínek megválasztásától. A 435 nm-es, 546 nm-es és 700 nm-es monokromatikus alapszíninger segítségével meghatározott színinger-megfeleltető függvények alakjával kapcsolatban még egy tényre szeretnénk a

<sup>\*\*</sup> Az  $R, r; G, g; B, b$ ; jelölés az angol vagy német nyelv vörös (red, rot); zöld (green, grün); kék (blue, blau) kezdőbetűiből terjedt el.

figyelmet felhívni. A három alapszíninger hullámhosszánál egyetlen alapszíninger elegendő ahhoz, hogy a választott színnel színegyezést hozunk létre, hiszen a vizsgálandó színinger azonos monokromatikus sugárzás (lásd 40. ábra). minden más hullámhosszon azonban az egyik vagy másik színinger-megfeleltető függvény értéke negatív. Így pl. az 520 nm-es monokromatikus sugárzás számára színegyezést akkor kapunk, ha a vizsgálandó (520 nm-es) fényingert nem a 3 alapszíninger additív keverékével feleltetjük meg, hanem a zöld (G) és kék (B) alapszíningerből vett keveréket egyeztetjük a vörös (R) alapszíninger és a vizsgálandó színinger additív összegével. Ezt írjuk le azzal, hogy a vörös színingerből negatív mennyiséget vettünk.

A gyakorlati színmérésnél igyekeznek kerülni a negatív színinger-megfeleltető függvény értékek használatát. Ezért általában nem ezekkel az  $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$  színinger-megfeleltető függvényekkel dolgozunk, hanem ezek mátrix transzformáltjaival, melyek minden hullámhosszon pozitív értékűek. Egy ilyen, csak pozitív színinger-megfeleltető értékeket tartalmazó színrendszer a CIE 1931-ben nemzetközileg szabványosított, ezt hívjuk CIE 1931 színinger-mérő rendszernek, vagy röviden CIE XYZ rendszernek. A transzformációnak három fő kikötést kellett teljesítenie:

- a fehér pont az új alapegységek esetében is azok azonos értékénél legyen (láttuk előbbiekbén, hogy az RGB rendszerhez ennek megfelelően választották meg a három alap színingert);
- egyik színinger-megfeleltető függvénynek se legyen negatív tartománya;
- a valós színek minél teljesebben töltsek ki az első térfolycadot.

Ezen követelményeknek a következő mátrix-transzformáció eleget tesz:

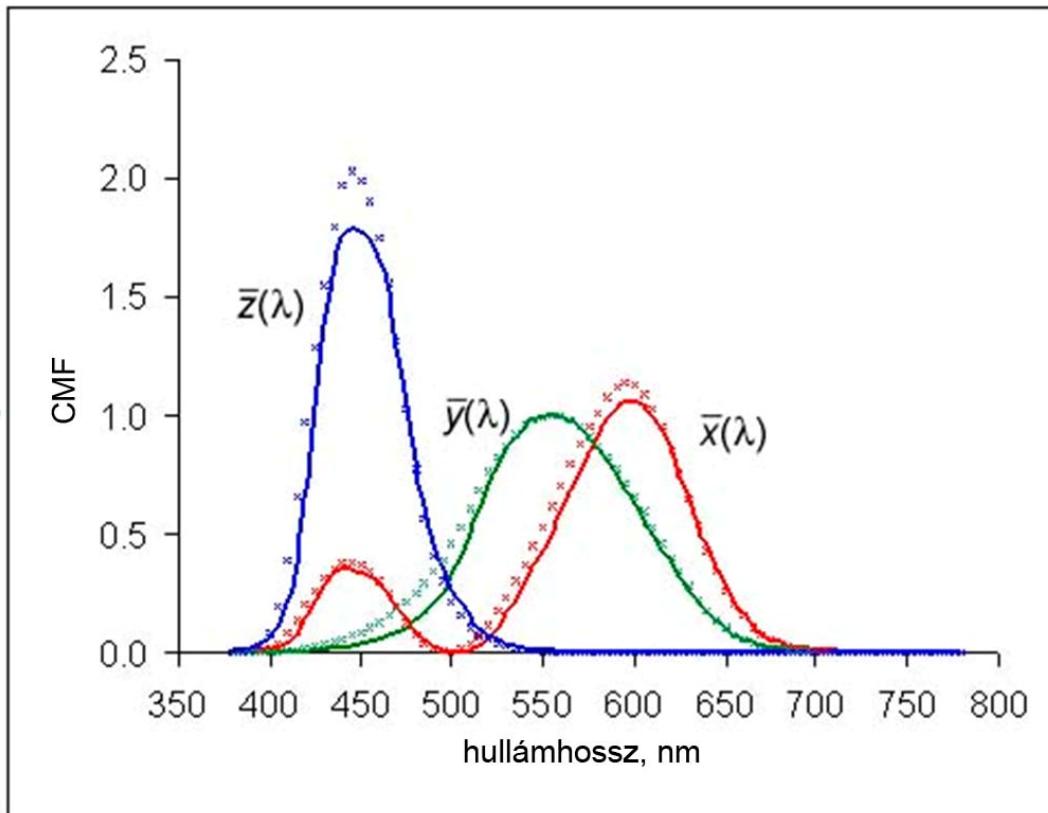
$$\begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 2.768\,892 & 1.751\,748 & 1.130\,160 \\ 1.000\,000 & 4.590\,700 & 0.060\,100 \\ 0 & 0.056\,508 & 5.594\,292 \end{vmatrix} \bullet \begin{vmatrix} R \\ G \\ B \end{vmatrix} \quad 28$$

Az XYZ rendszer színinger-megfeleltető függvényeit  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ -vel jelöljük, alakjukat a [41. ábra](#) mutatja. Láthatjuk, hogy ebben a transzformációban az Y összetevő az RGB alapszíningerek arányában összegzi az R, G, B színinger-összetevőket, tehát ez az összetevő tartalmazza a teljes fénysűrűséget. Az új rendszerben ennek megfelelően az  $\bar{y}(\lambda)$  megegyezik a fotometria  $V(\lambda)$  függvényével.

A CIE XYZ trítritmusos értéket (színinger-összetevőket) a

$$X = k \int_{380}^{780} S_\lambda \bar{x}(\lambda) d\lambda; \quad Y = k \int_{380}^{780} S_\lambda \bar{y}(\lambda) d\lambda; \quad Z = k \int_{380}^{780} S_\lambda \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad 29$$

egyenletek szolgáltatják. A  $k$  együttható értékét a következő alfejezetekben adjuk meg.



41. ábra: A CIE  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  és  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$  színinger-megfeleltető függvények.  
(lásd 2.3.5. fejezet)

### 2.3.2. Önvilágítók színinger-mérése

Miként látható, az  $\bar{y}(\lambda)$  színinger-megfeleltető függvény alakja megegyezik a  $V(\lambda)$ -függvény alakjával. A CIE XYZ rendszerben az  $Y$  színinger-összetevő a fotometriai mennyiséget írja le, ha  $k=683 \text{ lm/W}$  értéket választunk, és az  $S_\lambda$  radiometriai mennyiség. Ezt az eljárást használjuk, ha pl. katódsugárcsöves monitor színinger-összetevőit kívánjuk meghatározni, azaz olyan eszközöt vizsgálunk, mely maga állítja elő a látható sugárzást. Az ilyen vizsgálandó mintát önvilágítónak nevezzük, szemben az olyan mintákkal, melyeket külső fényforrással kell megvilágítanunk, ilyen pl. a nyomtatott kép színmérése, lásd később.

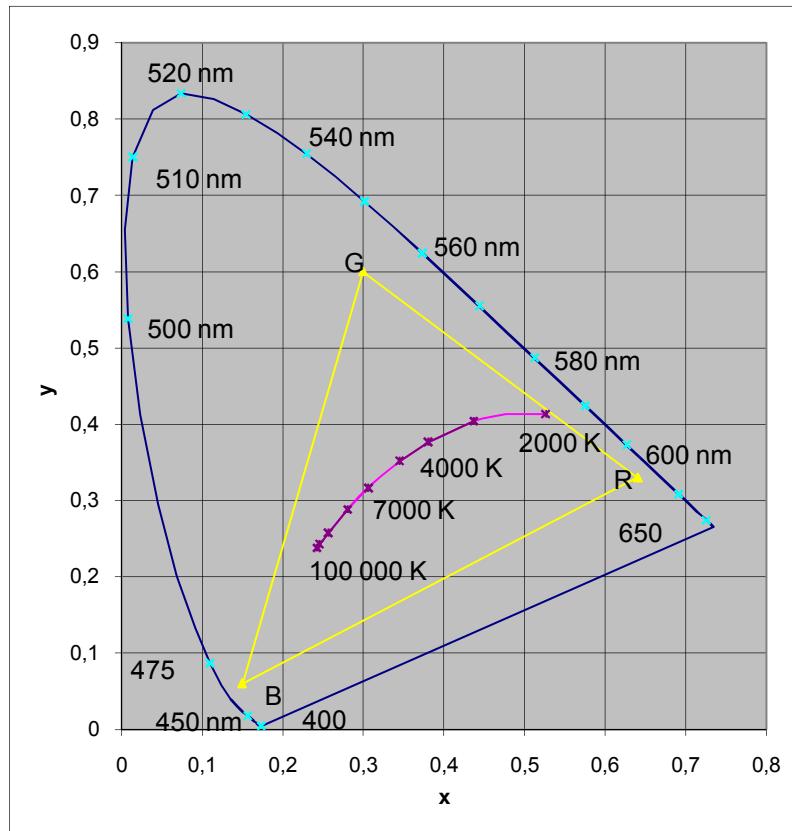
Szemléletes, ha az  $Y$  fotometriai mennyiséget mellett a színingert nem a  $X$  és  $Z$  színinger-összetevővel jellemizzük, hanem a színinger-összetevőkből konstruált úgynevezett szín(inger-)koordinátákkal, vagy más néven színességi koordinátákkal

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad 30$$

mivel  $z = 1 - x - y$ , így az többlet információt nem tartalmaz. Az  $x$ ,  $y$  színességi koordináták közösen a színinger színességét határozzák meg.

Lényeges azonban, hogy a színingert ezen esetben is három szám jellemzi, az  $x, y$  színességi koordináták mellett mindenkor meg kell adni a  $Y$  színinger-összetevőt, monitoron mért színinger esetén pl. a fényfűrészét.

Az  $x,y$  színességi koordinátákat ábrázolva az úgynevezett *szín(inger-)diagramot* vagy színességi diagramot kapjuk, lásd 42. ábra. A monokromatikus színingerek színességi koordinátái patkó alakú görbe mentén helyezkednek el (az ábrán helyenként feltüntettük az adott monokromatikus ingerhez tartozó hullámhosszat). A patkó kék és vörös határértékét összekötő vonalat hívjuk bíbor-egyenesnek. A látható színképtartományban sugárzáró források által létrehozott színességi értékek a színpatkó és a bíbor-egyenes által határolt területen belül helyezkednek el. Az ábrán berajzoltuk még a színes katódsgugárcsöben használt vörös (R), zöld (G) és kék (B) fénypor által létrehozott színpontokat a CCIR 709 szabvány szerint (lásd [19]), valamint egy vonalat, amely mentén találjuk a különböző hőmérsékletű fekete tesek (Planck sugárzók) színpontjait. Fehér fények jellemzésére használjuk a kb. azonos színeségű fekete test hőmérsékleteket, s ezeket korrelált színhőmérsékletnek nevezzük (lásd később).



42. ábra: CIE xy-diagram, feltüntettük a Planck-görbét és a CCIR 709 szerinti CRT-monitor színességi pontjait is

A színességi diagram jellegzetessége, hogy a két színinger additív összegének színpontja a színességi diagramban a két inger színpontjait összekötő egyenes mentén fekszik. Az egyenes mentén elfoglalt helyet a színingerek fénysűrűsége szabja meg.

### 2.3.3. Másodlagos sugárzók (nem önvilágítók) színinger-mérése

Reflektáló felületek jellemzése annyiban különbözik az eddig tárgyalt önvilágítók színinger-mérésétől, hogy a színinger ( $S_\lambda$ ) ebben az esetben a mintáról visszavert spektrális sugársűrűségből keletkezik. Ha a mintát megvilágító fényforrás spektrális eloszlását  $S(\lambda)$ -val jelöljük és a felület spektrális reflexióját  $\rho(\lambda)$ -val, akkor a színinger-összetevők:

$$X = k \int S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = k \int S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

31

$$Z = k \int S(\lambda) \rho(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

A  $k$  értékét ezen esetben

$$k = \frac{1}{\int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda} \quad 32$$

formában választjuk meg, ami a megvilágító fényforrás fénysűrűségével arányos mennyiségeg.

Reflektáló felületek színingerének leírására éppen úgy használhatjuk a színesség koordinátákat, mint önvilágítók esetén.

Mint az a 31. egyenletekből látható, a felület színinger-összetevői és színességi koordinátái függnek a megvilágító fényforrás színképéktől. Ezért ahhoz, hogy nemzetközileg is egyértelmű színinger összetevőkhöz jussunk, fényforrás színképeket kellett szabványosítani. Napjainkban a színmérésnek két szabványos sugárzáseloszlása az úgynevezett „CIE A sugárzáseloszlás” és „CIE D65 sugárzáseloszlás”.

A CIE A sugárzáseloszlás 2856 K-es Planck sugárzó teljesítmény eloszlása. A fizikai tanulmányokból ismert, hogy zárt üregben kialakuló termikus egyensúly esetén az üreg falának elemi része által emittált színképi teljesítmény eloszlás termodinamikai megfontolások alapján számolható. A sugárzás kvantumos jellegét is figyelembe véve Planck sugárzási törvényét kapjuk:

$$L_{e,\lambda}(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} (e^{\frac{c_2}{\lambda T}} - 1)^{-1} \quad 33$$

ahol  $c_1 = 2\pi h c_0^2$

$$c_2 = hc_o / k = (1,438\,769 \pm 0,000\,012) \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$k = (1,380658 \pm 0,000012) \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

Gyakorlati célra gáztöltésű izzólámpa segítségével hozhatunk létre „CIE A sugárzáseloszlást”.

A másik szabványos sugárzáseloszlás, a CIE D65 sugárzáseloszlás, a természetes világítást hivatott utánozni<sup>12</sup>. D65-nek nevezzük, mert daylight (nappali, azonban magyarra sajnos „természetes” fény szóval fordították)<sup>13</sup> eloszlást utánoz, a 65 pedig arra utal, hogy a színeségben legjobban hasonlító fekete test a 6500 K-es Planck sugárzó.

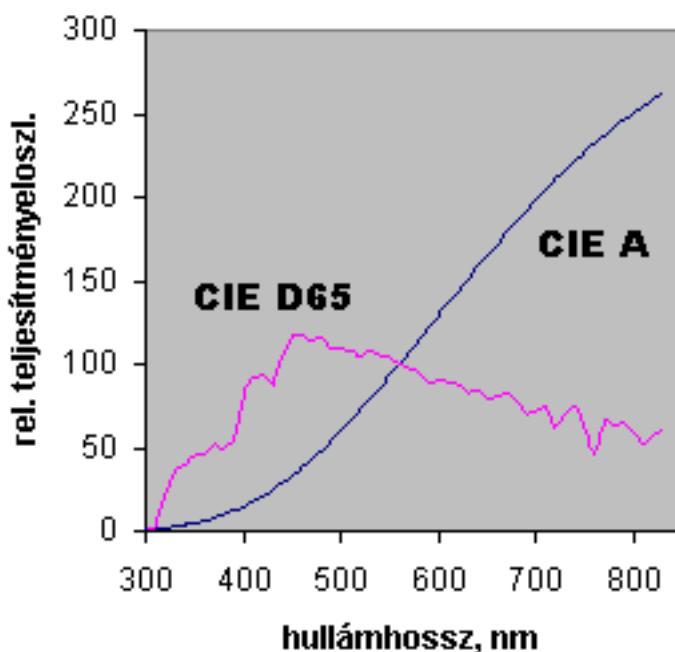
A CIE A- és D65-sugárzás-eloszlás színképét a 43. ábra szemlélteti.

<sup>12</sup> A külföldi szakirodalom a fogalmat a „daylight”, „Tageslicht” szavakkal jelöli, mert a nappali körülmények között (Nap-fény + felhős ég fénye) mérhető sugárzáseloszlások átlagos szabványosított színképére vonatkoznak. A hazai színtani szakirodalomban is szívesen használjuk a nappali sugárzáseloszlás fogalmat, mivel a „természetes” a mesterséges (pl. izzólámpa) sugárzásnak az ellentettje, és természetes pl. a villám fénye is.

<sup>13</sup> Az európai nyelvekben a természetes fényt nappalinak (daylight, Tageslicht) nevezik, a hazai szabványok azonban természetes fényről beszélnek.

### 2.3.4. Színhőmérséklet és korrelált színhőmérséklet

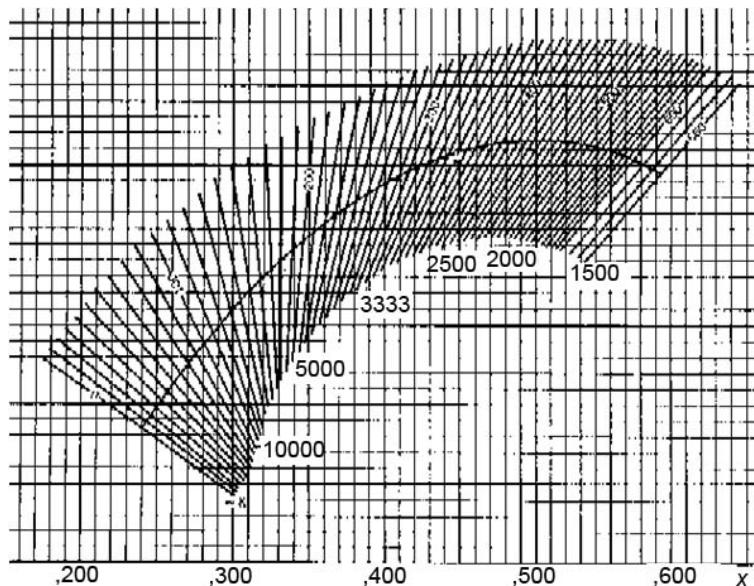
A 42. ábra Planck-görbéjének két távoli pontja felel meg a 2856 K-es (izzólámpa) és a 6500 K-es fekete test színességi koordinátáinak (5000 K felett nem a Planck görbe, hanem azzal gyakorlatilag párhuzamosan futó, a nappali sugárzáseloszlás különböző fázisait magában foglaló nappali sugárzáseloszlások görbéje mentén elhelyezkedő színpontokat tekintjük fehérnek, a D65 színpont ezen görbén fekszik). Ha a két ilyen fényforrás által megvilágított felületet egymás mellett látjuk, úgy a 2865 K-eset sárgásnak találjuk, ha azonban csak izzólámpa által megvilágított környezetben vagyunk, úgy a fehér papírt fehérnek látjuk, szemünk (és agyunk) adaptál a fényforrás színéhez (lásd 1.3.3. fejezet).



43. ábra: CIE A- és D65 sugárzáseloszlás szinképe

Mivel látószervünk ilyen tág határok között adaptálni tud a fényforrás színéhez, a közel fehér színű fényforrások színét a különböző hőmérsékletű Planck sugárzók színpontához hasonlítjuk, s arról beszélünk, hogy pl. egy régebbi gyártású katódsugárcsöves monitork fehér pontja 9300 K, vagy ma a modernebb monitornál beállíthatjuk a fehér pontot akár 3000 K és 10.000 K között (ha elsötétített szobában nézzük az ilyen monitor képét, a fehér felületeket fehérnek fogjuk látni, ha azonban két különböző színhőmérsékletre állított monitor képét látjuk egymás mellett, akkor szembetűnő a színhőmérséklet különbség).

Monitorunk fehér pontja (színességi koordinátái) esetleg nem fekszik pontosan a Planck görbén (vagy a nappali sugárzáseloszlások görbéjén), de kisebb eltérések esetén még mindig fehérnek látjuk a felületet, az ilyen színpontokat a korrelált színhőmérséklet fogalmával jellemezzük, ami azt jelenti, hogy megkeressük, melyik Planck hőmérséklet színessége tér el legkevésbé a vizsgált színességtől. Mivel az x-y színességi diagram – mint láttuk – nem egyenlőközű, ezek az azonos korrelált színhőmérsékletet leíró vonalak nem merőlegesek az xy-diagramban a Planck görbüre. A 44. ábra mutatja az azonos korrelált hőmérsékletek vonalait (iso-temperature lines).



44. ábra: Azonos korrelált színhőmérsékletek vonalai a CIE xy-diagramban

### 2.3.5. CIE 1931 és 1964 színingermérő rendszerek

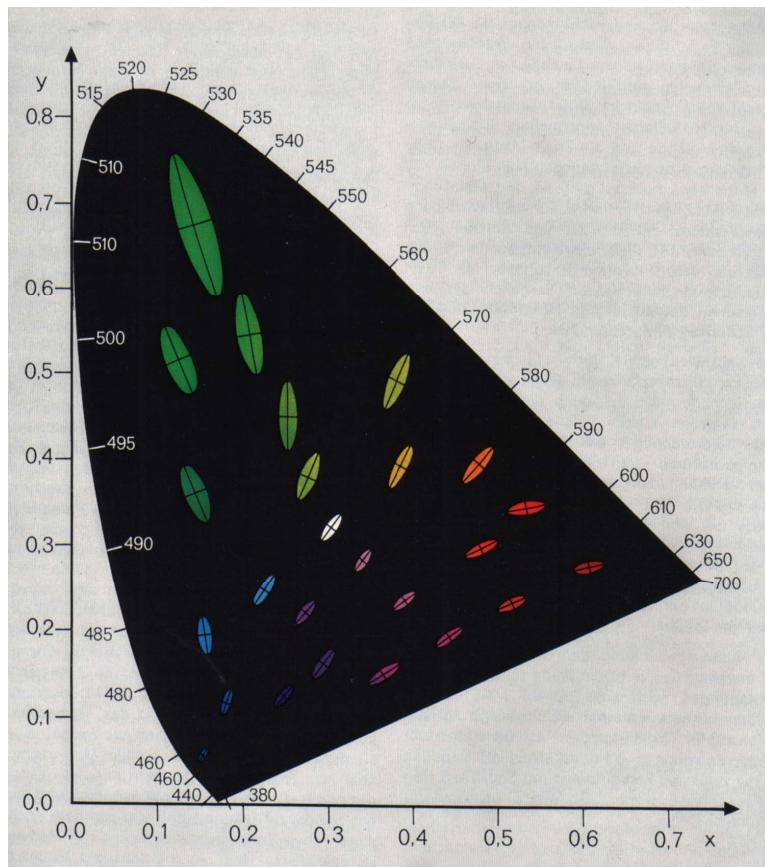
Az emberi szem szerkezetének tárgyalásakor ([1.3.1. fejezet](#)) említettük, hogy a szem színképi érzékenysége kissé eltér, ha csak a fovea kb.  $2^{\circ}$ - $3^{\circ}$ -os tartományát tekintjük, vagy ha nagyobb, kb  $10^{\circ}$ -os tartományt szemlélünk. Annak megfelelően, hogy csak kis méretű tárgyakat szemlélünk (pl. írást a képernyőn), vagy nagy felületeket nézünk (pl. a képernyő teljes háttérét kivevő felületet), az úgynevezett  $2^{\circ}$ -os vagy a  $10^{\circ}$ -os látómezőre érvényes színinger-megfeleltő függvényeket használjuk. Az eddigiekben a CIE 1931 színingermérő rendszert tárgyalta, amelynek színinger-megfeleltető függvényeit  $2^{\circ}$ -os látómező használatával állapították meg. A  $10^{\circ}$ -os vagy úgynevezett CIE 1964 színingermérő rendszer [\[20\]](#) színinger-megfeleltető függvényeinek jelölése  $\bar{x}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{y}_{10}(\lambda)$ ,  $\bar{z}_{10}(\lambda)$ . Ezeket a [41. ábrán](#) pontozott vonalakkal tüntettük fel. A színinger-megfeleltető függvények használatától eltekintve a CIE 1964-es ún.  $10^{\circ}$ -os látótérre érvényes színrendszer ugyanúgy használható, mint a CIE 1931-es  $2^{\circ}$ -os színinger-megfeleltető függvényeket használó rendszer.

### 2.3.6. Színinger-különbség, egyenlőközű színskálák

Az eddig tárgyalt színtani előírások színinger megfeleltetésre vonatkoztak. A gyakorlatban sokszor előforduló feladat kisebb-nagyobb színkülönbségek meghatározása. Vizsgálatok azt mutatták, hogy a [42. ábrán](#) bemutatott színességi diagramban az azonos észlelt színkülönbségekhez eltérő színességi különbségek tartoznak. MacAdam vizsgálatai [\[21\]](#) szerint a színességi diagram különböző részeiben az éppen észlelhető színességi különbségek ellipszis alakú felületek, ezek tízszeres értékeit a [45. ábra](#) szemlélteti.

A színmérés gyakorlati felhasználása érdekében célszerű lenne a színességi diagramot, és a fénysűrűség dimenziót is figyelembe véve a színinger-teret úgy torzítani, hogy a színtér különböző részeiben azonos koordináta különbség azonos érzet szerinti szín-különbségnek felejjen meg. Az évtizedek során számos próbálkozás történt e feladat megoldására. Ma már tudjuk, hogy ez Euklideszi térben nem oldható meg maradék nélkül. Egy számítógépes alk-

mazásokban használható megoldást kínál a CIE ún. CIELAB transzformációja [22]. Ezen színtér három koordinátájának definíciós egyenletei a következők:



45. ábra: Éppen észlelhető színiger-különbségek a CIE 1931 színességi diagramban, MacAdam mérései szerint, 10x-es nagyításban.

$$L^* = 116 f(Y/Y_n) - 16$$

$$a^* = 500 [f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \quad 34$$

$$b^* = 200 [f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)]$$

ahol

$$f(X/X_n) = (X/X_n)^{1/3} \text{ ha } (X/X_n) > (24/116)^3$$

$$f(X/X_n) = (841/108)(X/X_n) + 16/116 \text{ ha } (X/X_n) \leq (24/116)^3$$

és

$$f(Y/Y_n) = (Y/Y_n)^{1/3} \text{ ha } (Y/Y_n) > (24/116)^3$$

$$f(Y/Y_n) = (841/108)(Y/Y_n) + 16/116 \text{ ha } (Y/Y_n) \leq (24/116)^3$$

és

$$f(Z/Z_n) = (Z/Z_n)^{1/3} \text{ ha } (Z/Z_n) > (24/116)^3$$

\* Mivel a  $24/116$  hányados nem egyszerű tört, egyes publikációkban a  $6/29$  hányadossal, másokban a  $0,008856$  közelítő értékkel találkozunk. Hasonlóan egyes szerzők a  $841/108$  hányados helyett a  $(1/3) \times (29/6)^2$ , vagy annak  $7,787$  közelítő értékét használják, hasonlóképen  $16/116$  helyett a  $4/29$  értékkel is találkozhatunk.

$$f(Z/Z_n) = (841/108)(Z/Z_n) + 16/116 \text{ if } (Z/Z_n) \leq (24/116)^3$$

A fenti képletekben  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  a kérdéses színpont színinger-összetevői (tristimulusos értékei),  $X_n$ ,  $Y_n$ ,  $Z_n$  pedig a vonatkoztatási fehér pont színinger-összetevői. A vonatkoztatási fehér pont reflektált fény esetén a megvilágító fényforrás színinger-összetevői (ahol a  $Y_n$  érték 100), képernyők esetén a képen látható fehér felület színinger-összetevőit szokás fehérpontnak választani.

Az  $L^*$  koordinátát, amely pszichofizikai világosság korrelátum: egy színinger koordináta, amely jó közelítésben arányos a képben látható világosság viszonyokkal, relatív világosság-nak is nevezzük. Az  $a^*$  koordidána, pozitív félengelye a vörös színek, negatív félengelye a zöld színek irányába mutat. A  $b^*$  pozitív félengelye a sárga színek, negatív félengelye a kék színek irányába mutat. Ezzel ez a színrendszer jól közelíti a Hering elmélete szerinti fisiológiai színleírást (lásd [1.3.2. fejezet](#)). A CIELAB színrendszer alapján készített színtest (valós színingerek által elfoglalt térrész) modelljét a [46. ábra](#) szemlélteti.

A CIELAB színtérben színinger-különbségeket Euklideszi távolságok formájában határozhatunk meg, így az  $L^*_1$ ,  $a^*_1$ ,  $b^*_1$  és  $L^*_2$ ,  $a^*_2$ ,  $b^*_2$ -vel jellemzett két színinger közötti színinger különbséget a következő egyenlet írja le:

$$\Delta E^*_{ab} = [(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2]^{1/2} \quad 35$$

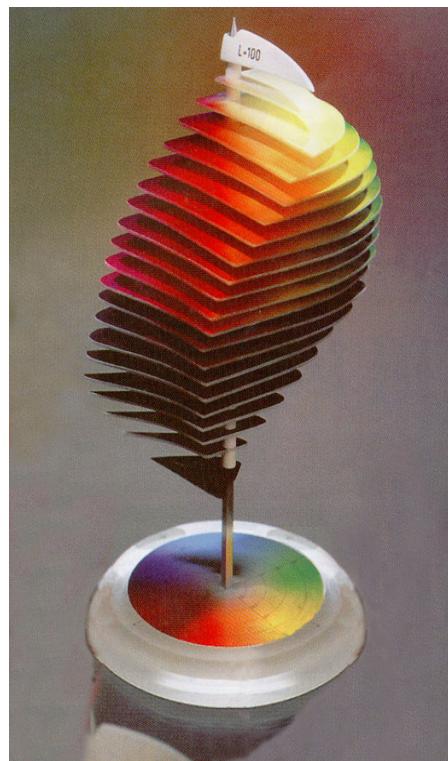
### 2.3.7. Világosság – fénysűrűség összefüggés

Bár az  $L^*$ -ot pszichofizikai világosságnak hívják, voltaképpen ez a koordináta a fénysűrűség nemlineáris transzformáltja, s mint ilyen csupán az L és M csap jelekből képzett érzet leírását tudja adni (lásd [1.3.2. fejezet](#)). Színes fények esetén a színi csatornák is hozzájárulnak a világosság észlelet kialakításához, ezeket a CIELAB színrendszer nem veszi figyelembe. Egy lehetséges – és szokásos – korrekció a Ware és Cován által kidolgozott korrekció [23], amely a fénysűrűséget a színességi koordináták figyelembe vételével korrigálja. A korrekciós egyenlet szerint a fénysűrűség logaritmusrához járul hozzá a színi korrekció:

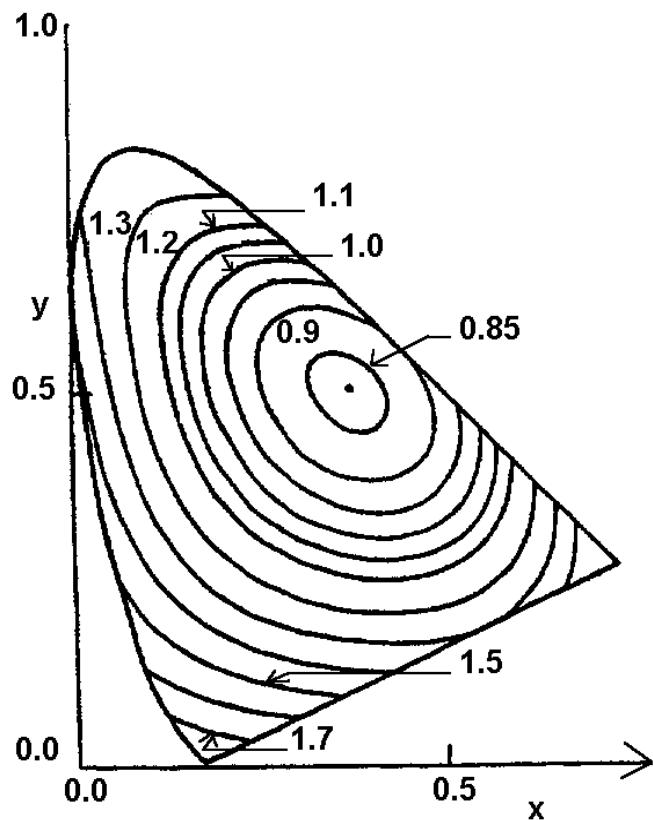
$$L^{**} = \lg(L) + C \quad 36$$

ahol  $C = 0,256 - 0,184y - 2,527xy + 4,656x^3y + 4,657xy^4$

A [47. ábra](#) azt szemlélteti, hogy adott fénysűrűséghez milyen korrekciós faktor adódik a színességi diagram különböző részében. Mint látható kék vagy vörös fény akár másfél vagy kétszeresen is olyan világosnak tűnhet, mint az azonos fénysűrűségű sárga fény. Erre számítógépes tervezésnél gondot kell fordítani.



46. ábra: A CIELAB színtest modellje



47. ábra: Egységnyi fénysűrűségű felületek korrigált pszichofizikai világosságainak kontúrvonalai az CIE színességi diagramban

### 3. SZÍNMENEDZSMENT, SRGB SZÍNRENDSZER ÉS CSATLAKOZÁSA MÁS SZÍNRENDSZEREKHEZ, ICC SZÍN MANAGEMENT.

#### 3.1. sRGB színrendszer

Képi beviteli eszközök, valamint hagyományos képmegjelenítők valamelyen RGB rendszerben dolgoznak, ahol az egyes gyártmányok R, G, B alapszíneinek CIE színrendszerbeli értékei különbözök lehetnek. Ilyen esetben, ha a pusztai R,G,B kódokat küldjük a képfelvezőtől a leadóhoz, úgy teljesen bizonytalan, hogy milyen színeket fog az megjeleníteni, mert a két RGB színrendszer közötti kapcsolatot nem ismerjük, s semmiféle transzformáció nem jön létre. A különböző gyártmányok összekapcsolhatóságának érdekében a nagy gyártók megállapodtak, majd az IEC keretében szabványt dolgoztak ki arra, hogy egy egységes RGB rendszerbe transzformálva szolgáltassák a felvett jeleket, s azokat egységes intenzitás függő transzformációinak vessék alá. Az IEC szabvány [24] rögzíti, hogy a felvevő saját RGB színteréből az alábbiakban rögzített három alapszínnel jellemzett színtérbe történjék a transzformáció. A World Wide WEB (w3org) szervezet által kidolgozott előterjesztés [25] szerint az RGB alapszínek színességi koordinátái megfelelnek az ITU-R BT.709, lásd [4. táblázat](#).

4. táblázat. Az sRGB alapszínek színességi koordinátái

	Vörös, R	Zöld, G	Kék, B	Fehér, D65
x	0,6400	0,3000	0,1500	0,3127
y	0,3300	0,6000	0,0600	0,3290
z	0,0300	0,1000	0,7900	0,3583

A megvilágított tárgy CIE 1931 szerinti színinger összetevőit az alábbi mátrix transzformációval kell az sRGB rendszerbe transzformálni<sup>14</sup>:

$$\begin{bmatrix} R_{sRGB,lin} \\ G_{sRGB,lin} \\ B_{sRGB,lin} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3,2410 & -1,5374 & -0,4986 \\ -0,9692 & 1,8760 & 0,0416 \\ 0,0556 & -0,2040 & 1,0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad 37$$

Az így kapott lineáris értékeket gamma korrekciójának vetik alá, hogy a kimenő jel közvetlenül felhasználható legyen egy félhomályos katódsugárcsöves (CRT) monitoron vagy televíziós képmegjelenítőn való nézésre. Az átlagos gamma 2,2 kellene, hogy legyen, melyet azonban a szabvány két részből összetett függvényteljesítő közelít:

$$C_{sRGB} = 12,92 C_{sRGB,lin}, \text{ ha } C_{sRGB,lin} \leq 0,0031308$$

<sup>14</sup> Az IEC szabvány a w3org előírásától a negyedik tizedesben kissé eltérő értékeket ad meg, de ez a gyakorlati megvalósításban nem érezhető hatását.

és

$$C_{\text{sRGB}} = (1+a) C_{\text{sRGB,lin}}^{1/2,4}, \text{ ha } C_{\text{sRGB,lin}} > 0,0031308$$

és  $a = 0,055$ .  $C = R$ , vagy  $G$ , vagy  $B$ .

8 bit per csatorna átvitel esetén a  $C_{\text{sRGB}}$  értékek 0 és 255 között változnak.

A nézési környezet értékeit a szabvány az alábbiakban rögzíti, lásd 5. táblázat. Itt a felvételre D50 megvilágítást, a nézésre D65 megvilágítást ír elő.

(Az inverz transzformáció képleteit lásd pl.: <http://en.wikipedia.org/wiki/SRGB>)

5. táblázat, a felvételi (kódolási) és nézési környezet

Paraméter	érték
fénysűrűség	80 cd/m <sup>2</sup>
megvilágító fehér pont	$x=0,3127; y=0,3291$ (D65)
kép környezet reflexió	20% (közepes szürke)
kódolási környezeti megvilágítás	64 lx
kódolási fehér pont	$x=0,3457; y=0,3585$ (D50)
kódolási csillogás (tükrös reflexiós háttér fény)	1 %
tipikus környezeti megvilágítás	200 lx
tipikus környezeti fehér pont	$x=0,3457; y=0,3585$ (D50)
tipikus nézési csillogás (tükrös reflexiós háttér fény)	5 %

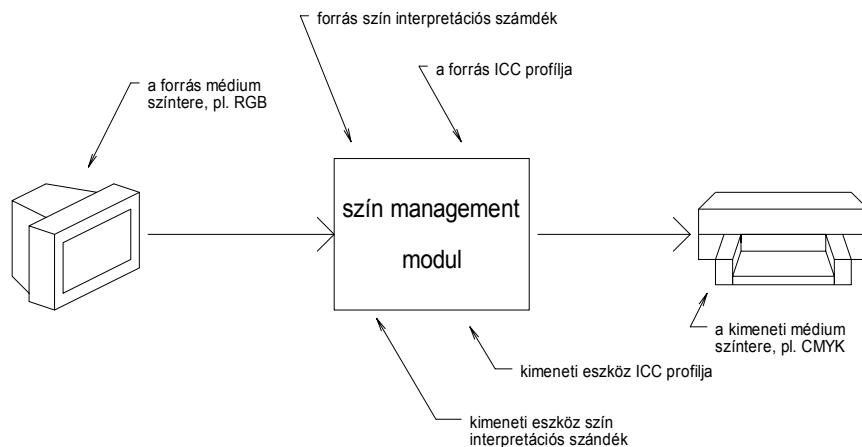
Ha pl. a digitális fényképezőgép gyártó betartja ezen szabályokat, és a nyers képet a lehetőségekhez képest az sRGB rendszerbe transzformálja, majd az így transzformált kép Internetes közlésre kerül s végül a felhasználó azt olyan képmegjelenítőn kívánja nézni, vagy nyomtatón kinyomtatni, mely szintén betartja az sRGB kódolási előírásait, úgy a megjelenített képet általában elfogadható minőségen fogja látni.

Az sRGB szabvány lehetővé teszi, hogy sok felhasználói beavatkozás nélkül jussunk tűrhető képátviteli minőséghez. Nagyobb igényű felhasználó a következő alfejezetben ismertetendő ICC szín managementet kénytelen használni.

### 3.2. ICC szín management

Nagyobb igényű színhelyes átvitelhez az sRGB szabvány nem megfelelő. 1993-ban nyolc, a számítógépes képfeldolgozással foglalkozó nagyvállalat létrehozta az International Color Consortium (ICC) nevű tömörülést annak érdekében, hogy a színhelyes képátvitelhez szükséges felületet dolgozzon ki, melyhez illeszkedő egyedi szoftvereket fejleszthessenek az egyes gyártók [26]. 2005-ben az ISO az ISO 15076-1 szabványában nemzetközi szabvány rangjára emelte ezt a jelen Jegyzet írásakor (2011) 4. verziójában lévő ajánlást.

Az ICC színmanagement ajánlás szerint a színes kép átvitelének protokollját több részre osztjuk, lásd [2. ábra](#).



48. ábra: Az ICC szín-management áttekintő ábrája

A szín management egyes lépései a következők:

- A bemeneti médium saját teréből a referencia színtérbe, pl. CIE XYZ, transzformáljuk az egyes pixelek színpontjainak értékét, és figyelembe vesszük a bemeneti eszköz esetleges nem-lineáris karakterisztikáját. Az így egységes formára hozott jeleket dolgozza fel a szín management modul.
- A színmanagement modullal először is közölni kell a felvétel körülményeit, azaz, hogy mi volt a felvétel fehér pontja, milyen világítási körülmények (világos, alkonyi stb.) körülbelül között készült a felvétel. Az ilyen adatokat a felvételhez csatolt „a forrás ICC profilja” file-rész tartalmazza.
- A bemeneti és kimeneti médiumokat összekötő színterből a kimeneti médium színterébe történő transzformációhoz a színmanagement modulnak ismernie kell a kimeneti médium színterét. Itt hangsúlyoznunk kell, hogy pl. nyomtatával esetén ez nem csak a nyomtatótól és az abban alkalmazott színes tintáktól függ, de függ pl. a nyomathordozótól is. Más eredményt kapunk irodai papírra, vagy újságpapírra való nyomtatáskor. A különbségek kompenzálsához eltérő kimeneti profilra van szükségünk.
- Fontos továbbá az „interpretációs szándék” (rendering intent), mely a reprodukciós céltól függ. Az ICC négy interpretációs szándékot különböztet meg:
  - Médiumhoz viszonyított színmetrikai szándék (media-relative colorimetric intent): olyan leképezéskre szolgál, amikor a megfigyelő teljesen adaptált a felvételi illetve visszaadási világításhoz. Ilyenkor a felvételi fehér pontot átskálázzák a profilokat összekető tér (profile connection space: PCS) fehér pontjába és minden a felvételi térbeli színinger-összetevőt megfelelően skáláznak.
  - Az ICC abszolút színmetrikai szándék esetén a színtéren belüli színek változatlanok maradnak. Ezt használják pl. adott vállalati színt (pl. a KODAK sárgát) kell reprodukálni.
  - Észlelési (perceptual) szándék használható ha „megnyerő” színekben szeretnénk a kimeneti képet látni, mint pl. amatőr színes képek kidolgozásánál. Ilyenkor egy ideális kimeneti képhez hasonlítva kerülnek a transzformációk beállításra, a színtér méretét és a színpontok transzformációit az egyes gyártók egyedileg készített optimalizációs eljárásai szerint hajtja végre a program. Ennek megfelelően gyártó függő kimenetet kapunk.
  - A telítettségi (saturation) szándék is gyártó függő, célja élénk színű reprodukciók előállítása, ezt használják pl. diagramok készítésénél.

## 4. SZÍN-ALKALMAZÁSOK

### 4.1. Szín(inger)mérő műszerek (spektrális és tristimulusos eszközök) és jellemzésük

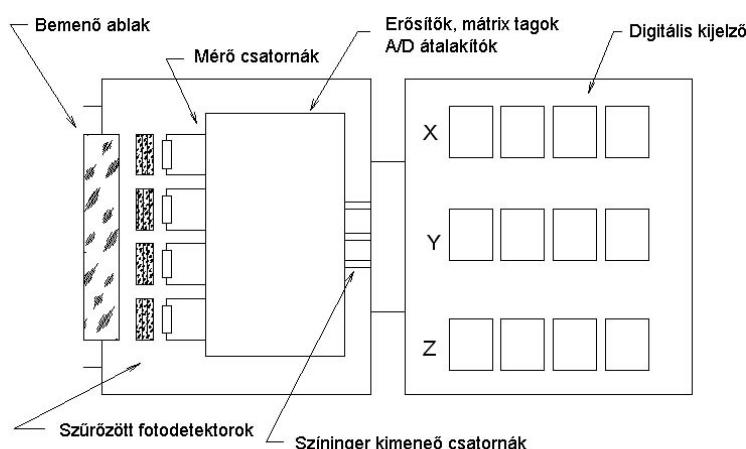
A színinger mérés során a [29. egyenlet](#) szerinti színinger-összetevőket kell meghatározni. Ennek két módszere ismert: vagy a detektor színképi érzékenységét alakítjuk ki olyanná, hogy az az  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  függvényeknek megfeleljen, vagy spektrális méréssel elvégezzük az  $S_\lambda$  függvény meghatározását és numerikus integrálással határozzuk meg az  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  értéket. Az előbbi esetet „tristimulusos” színinger-mérésnek, utóbbit „spektrális” színinger-mérésnek hívják.

#### 3.1.1. Tristimulusos színinger-mérés

A tristimulusos színinger-méréskor a [41. ábra](#) szerinti színinger-megfeleltető függvényeket kell műszeresen leutánoznunk. Napjainkban általában szilícium fényelemet használnak érzékelőként, melynek színképi érzékenysége nagyon eltér az  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  függvények alakjától. Színes szűrőüvegekből készített előtétekkel igyekeznek a gyártók az az  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  függvény alakokat megközelíteni. (Ezen közelítés jóságáról, és annak mérőszámáról a későbbiekben lesz szó.)

Mivel a CIE  $\bar{x}(\lambda)$  függvénynek két maximuma van, és olyan szűrőt nagyon nehéz lenne készíteni, melynek két áteresztési maximuma van, az  $\bar{x}(\lambda)$  függvény általában két érzékelővel valósítják meg (egyes egyszerűbb készülékekben a  $\bar{z}(\lambda)$  megfelelően skálázott értékét használják az  $\bar{x}(\lambda)$  függvény rövidhullámú ágának utánzására). Ezeknek megfelelően egy tristimulusos színinger-mérő műszer blokk vázlata a 49. ábra szerint alakul. A bemenő ablak általában megvilágításmérőknél szokásos cosinus korrekciós felépítésű, ahol a bemenő ablak maga fényt diffúzan szóró opál-üveg, a nagy beesési szögeknél korrekciót biztosító árnyékoló gyűrűvel.

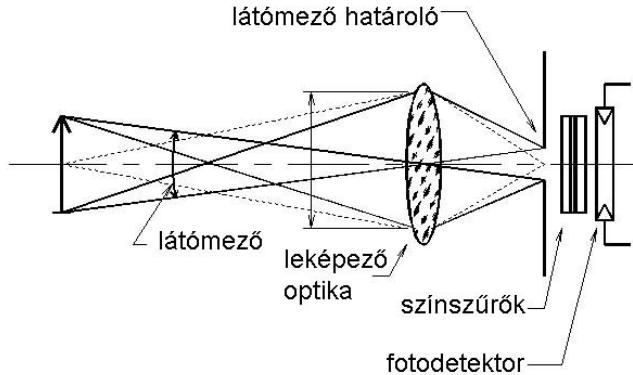
Ezt követik a szűrőzött fotodetektorok. Ez lehet az ábra szerinti négy detektor különálló szűrőkkel, az információ egyidejű felvételére, vagy egyetlen detektor, mely előtt a négy szűrőcsomagot váltják. Utóbbi esetben csak olyan fények mérhetők, melyek időben állandóak, és a szűrőváltás közben nem változik a méréndő jel.



49. ábra: Tristimulusos színinger-mérő felépítésének blokk-vázlata

A fotodetektor(ok) jelét általában műveleti erősítő elektronika alakítja mérhető feszültséggé, mivel a fényelemeket rövidzárban kell működtetni ahhoz, hogy a kimenő jelük a besugárzással lineárisan arányos legyen. A felerősített jeleket digitalizálják, az  $\bar{x}(\lambda)$  csatorna két rész csatornájának jelét összegzik majd mérési eredményt kijelzik. (A 4 bemenő csatorna jelét mátrix áramkörrel feldolgozva lehetőség van a színinger-mérő függvényalakoktól való kisebb eltérések korrekciójára is [27].)

Tristimulusos színinger-mérőknél sokszor nem besugárzás-mérésen alapuló jel-feldolgozásra van szükségünk. Így pl. monitoron megjelenített színes képek esetén a sugársűrűséget kell értékelnünk. Ilyen bemenő optikára mutat példát az 50. ábra.



50. ábra: Sugársűrűség mérésen alapuló mérőfej vázlatá

#### 4.1.1.1. A színképi illesztés

A tristimulusos színinger-mérő berendezéseknél a legtöbb problémát a megfelelő színképi illesztés jelenti, azaz, hogy mennyire sikerül a szűrkombinációval a detektor színképi érzékenységét hozzáigazítani a színinger-megfeleltető függvényekhez. A Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE), a fény és színmérés, valamint a világítástechnika más területeinek nemzetközi szabványosítási szervezete módszert dolgozott ki a színképi illesztés jóságának leírására [28]. Ennek lényege a következő: az egyes csatornák illesztési jóságát (spectral mismatch index: hibás spektrális illesztési index) az alábbi  $f_{1,i}$ ' indexszel jellemzzük.

$$f_{1,i}' = \frac{\int_0^{\infty} |s_{\text{rel},i}^*(\lambda) - \bar{t}_i(\lambda)| \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} \bar{t}_i(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot 100\% \quad 38$$

ahol  $s_{\text{rel},i}^*(\lambda)$  az adott színmérő csatorna relatív színképi érzékenysége,  $\bar{t}_i(\lambda)$  a megfelelő spektrális színinger-megfeleltető függvény ( $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$ ). Az  $s_{\text{rel},i}^*(\lambda)$  relatív színképi érzékenységi függvényt az alábbi képlet alapján kell kiszámítani:

$$s_{\text{rel},i}^*(\lambda) = \frac{\int_0^{\infty} S_m(\lambda) \cdot \bar{t}_i(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} S_m(\lambda) \cdot s_{\text{rel},i}(\lambda) \cdot d\lambda} \cdot s_{\text{rel}}(\lambda) \quad 39$$

ahol  $S_m(\lambda)$  a műszer kalibrálásához használt sugárzáseloszlás,  $s_{rel,i}(\lambda)$  a szűrőzött detektor színképi érzékenysége. Fotometriai és színmérő műszereket a CIE A sugárzáseloszlást felhasználva (lásd [2.3.3. fejezet](#)) szokás kalibrálni, annak színképi teljesítmény-eloszlását kell az  $S_m(\lambda)$  helyére illeszteni. napjainkban az  $\bar{y}(\lambda)$  csatorna  $f_1$  értéke jó színmérő esetén 1,5% alatti érték lehet, az x és z csatornák illesztési jósága általában rosszabb. Ötödik csatorna beépítésével, a méréndő mintákhoz igazodó aktív mátrixok felhasználásával modern tristimulusos színinger-mérők mérési hibája összemérhető a lényegesen drágább spektrális műszerekével [29].

A fenti „hibás spektrális illesztési index” csak becslést ad a várható hiba értékére, korrekcióra nem használható. Ha a méréndő fényforrás színképi teljesítmény-eloszlását ( $S_T(\lambda)$ ) jó közelítésben ismerjük (pl. kisebb megbízhatóságú színképmérő eszközzel meghatároztuk), úgy használhatjuk a hibás színképi illesztési korrekciós faktort ( $F_{TC,i}$ ), melynek felhasználásával a mért érték korrigálható:

$$F_{TC,i} = \frac{\int S_T(\lambda) \cdot \bar{t}_i(\lambda) \cdot d\lambda}{\int S_m(\lambda) \cdot \bar{t}_i(\lambda) \cdot d\lambda} \Bigg/ \frac{\int S_T(\lambda) \cdot s_{rel,i}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int S_m(\lambda) \cdot s_{rel,i}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad 40$$

#### 4.1.1.2. A térbeli illesztési jóság mérőszámai

Miként a fejezet bevezetőjében, a színmérő műszer felépítésének ismertetésénél említettük, a két leggyakrabban használt bemenő optikai elrendezés a besugárzás mérés és a sugársűrűség mérés geometriáját valósítja meg. A CIE által javasolt illesztési jóság jele  $f_2$ . A besugárzás mérés esetén a műszer fénysűrűség érzékenysége a beesési szögtől független kell, hogy legyen, azaz a beeső fényáramban elforgatva a műszer mérőfejét a jelzett érték a cosinus függvény szerint kell, hogy csökkenjen (lásd [2.2. fejezet](#)). Ezért az irány-érzékenységi hiba index (directional response error index) az ideális cosinus függvénnytől való eltérés meghatározásán alapul a következők szerint:

$$f_2 = \int_{\varepsilon=0}^{85^\circ} \left| \frac{Y(\varepsilon)}{Y(0^\circ) \cdot \cos \varepsilon} - 1 \right| \cdot \sin 2\varepsilon \, d\varepsilon \quad 41$$

ahol  $Y(\varepsilon)$  az  $\varepsilon$  szögnél mért fotoáram,  $Y(0^\circ)$  pedig a merőleges megvilágítás esetén mért fotoáram.

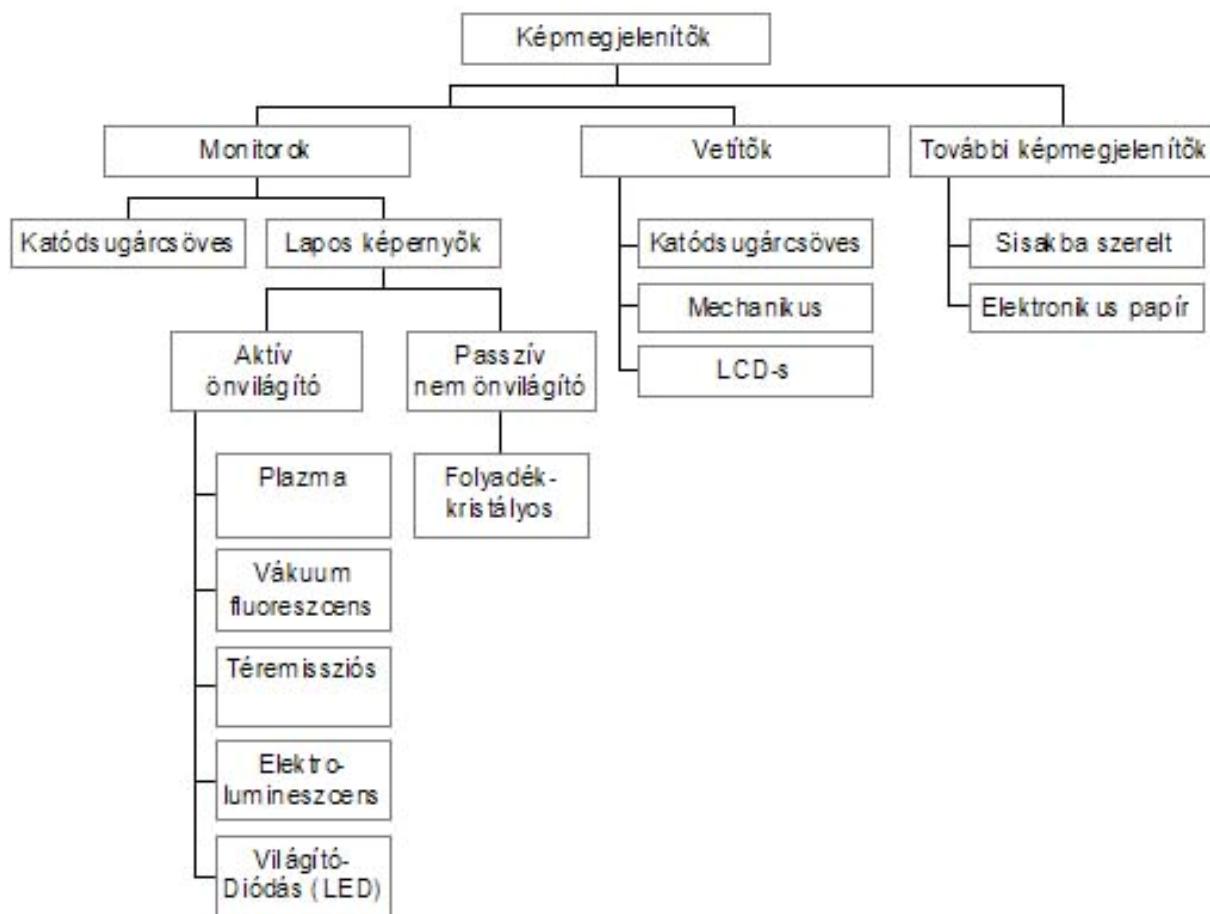
Sugársűrűség-mérő bemenő optika estén a látómezőn belül állandó kell, hogy legyen az érzékenység, azon kívül pedig lehetőleg zérus legyen. Ezért meghatározzuk, hogy miként változik a beesési merőlegestől számított különböző  $\varepsilon$  szögeknél hogyan változik az érzékenység, és meghatározzuk azon szögeket, ahol az érzékenység a merőlegesen mért érték 10%, ( $\varepsilon_{1/10}$ ) illetve 1%-a ( $\varepsilon_{1/100}$ ). Ezt több azimut szög esetén kell megmérni és az átlagos  $\varepsilon_{1/10}$  és  $\varepsilon_{1/100}$  értékét meghatározni. Ezzel  $f_2(\varepsilon_{1/100})$  definícióját a következő egyenlet adja meg:

$$f_2(\varepsilon_{1/100}) = \left( 1 - \frac{\bar{\varepsilon}_{1/10}}{\bar{\varepsilon}_{1/100}} \right) \quad 42$$

## 4.2. Képmegjelenítők és kalibrációjuk

### 4.2.1. Bevezetés

A számítógéphez kapcsolt képmegjelenítő létrehozhat maradandó képet, ebben az esetben nyomtatóról beszélünk, és csak a számítógép működésének idején látható képet, melyet azonban a számítógép segítségével változtathatunk, ezt a megjelenítő típusát hívjuk monitorak<sup>15</sup>. További eszközök, melyek a képek megjelenítésére szolgálhatnak a vetítők és pl. az elektronikus papír. A monitor azon felülete, melyen a kép megjelenik, a képernyő. A képmegjelenítők főbb típusainak áttekintését az 51. ábra szemlélteti.



51. ábra: A képmegjelenítők főbb típusai

Megkülönböztetünk önvilágító (vagy aktív) és passzív képmegjelenítőket. Az aktív képmegjelenítők maguk hozzák létre azt az optikai sugárzást, melyet látunk. A passzív képmegjelenítők a rajuk előtt sugárzást módosítják, de a kép csak akkor látszik, ha fényforrással megvilágítjuk (vagy átvilágítjuk, mint ezt pl. a folyadékkristályos számítógépes képmegjelenítőknél tesszük).

<sup>15</sup> Az angol szóhasználat szerint a nyomtatók „hard-copy”-t hoznak létre, a képmegjelenítőn látható kép a „soft-copy”.

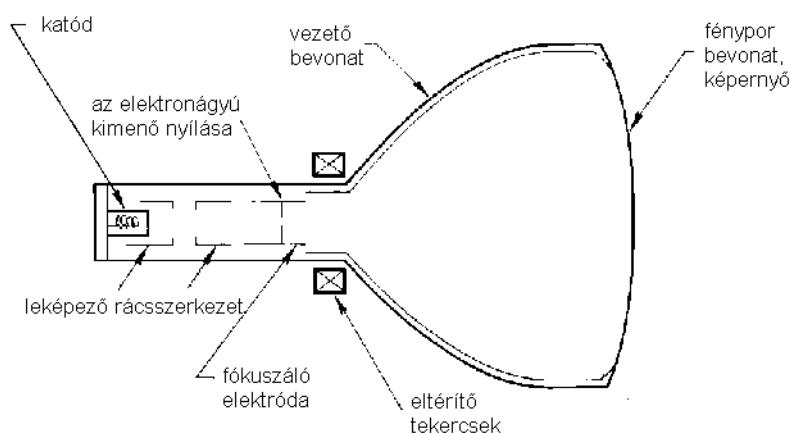
A képmegjelenítők legfőbb jellemzői:

- hány pixel, azaz függetlenül megcímezhető és láthatóvá tehető képpontot lehet egy sorban elhelyezni és hány ilyen képsorból állhat a teljes kép;
- mi az egyes pixelek címzésének technikája: sorról sorra rajzolja fel a képmegjelenítő a képet (raszter), mint a katódsugárcsöves képmegjelenítő esetén, vagy a sorok és oszlopok mátrixában történik a címzés, mint pl. az LCD képmegjelenítőknél;
- az adott képben létrehozott írásképben mi a legfinomabb vonalszerkezet, amit létre lehet hozni, és azt milyen kontraszttal lehet előállítani (több pixel kiterjedésű fehér-fekete sakktáblaszerű elrendezésnél a kontraszt általában nagyobb lehet, mint nagyon finom struktúrájú kép esetén, melynél szomszédos pixelekre hol fehér, hol fekete jel megjelenítése jut);
- legnagyobb képfrissítési frekvencia;
- az írás vagy kép legnagyobb váltási sebessége, azaz mozgó képek megjelenítésénél mennyiben jönnek létre a mozgást elkenő utóképek.

#### 4.2.2. Katódsugárcsöves monitorok

Bár napjainkban a katódsugárcsöves (cathode ray tube: CRT) monitorok jelentősége erősen lecsökkent, a legnagyobb igényű színes megjelenítések nél még mindig ezt a típust használják, és a modernebb eszközökknél is még igyekeznek a CRT-vel csereszabatos rendszert készíteni, ezért röviden ismertetjük a CRT felépítését is.

Az 52. ábra egyetlen színben (monokrom) világítani képes katódsugárcső hosszmetszetét mutatja. A katódsugárcső nagyvákuumra leszívott üvegballon. A cső nyakában van a fűtött katód. Ennek felületi rétege BaO vagy más hasonló anyagot tartalmaz, melyből termikus hevítés hatására (fűtőszál) elektronok tudnak kilépni. Az elektronnyalábot fókusztáló elektronoptika hozza létre. Ez az elektronoptika általában különböző potenciára kapcsolt lyukblendék sorozatából áll, de vannak elektromágneses fókusztáló rendszerek is (ilyeneket használnak például az elektronmikroszkópokban).



52. ábra: Katódsugárcső hosszmetszetének vázlata.

A fókusztáló rendszert követi a ballon kiszélesedése tájékán az eltérítő rendszer, mely az elektronnyalábot a homlok lap különböző helyére irányítja. Az eltérítés is lehet elektrosztati-

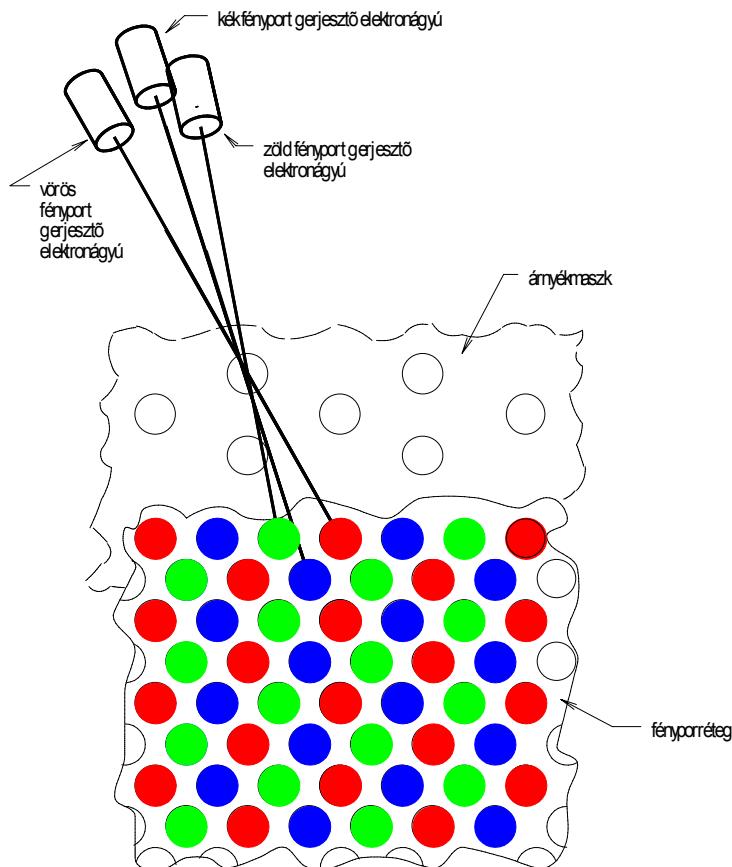
tikus (oszcilloszkóp csövekben ezt használják), számítógép kijelzőben általában elektromágneses eltérítést alkalmaznak.

A katódsugárcső homloküveg laptának belső felületére fénypont visznek fel, mely a beeső elektronok hatására lumineszkál. Ahhoz, hogy a lumineszcencia elég fényerős legyen, az elektronoknak kellő nagy energiával kell becsapódniuk. Ezért a katód és a fénypont rétegre felvitt igen vékony, elektron áteresztő, fémes anód közt nagy (10 kV nagyságrendű) gyorsító feszültségek különbség kell, hogy uralkodjék. Az elektronokat a fénypont rétegről el is kell vezetni, ezért a cső oldalán elhelyezkedő anód kivezetést és a fénypont réteget takaró, a gyors elektronokat áteresztő vékony alumínium réteget a ballon belső falára felvitt úgynevezett aquadag (kolloid szénréteg) köti össze.

A ballon belsejét evakuálják, ezért arra 1 atmoszféra nyomás nehezedik. Ahhoz, hogy ez a nyomás ne roppantsa össze a csövet, a homloklapját vastag (cm-es vastagságú) üvegből kell készíteni. Bár a mai modern technológiával készített katódsugárcső esetén valószínűtlen, hogy kisebb ütés, koccanás hatására a cső berobbanjon (implosio), azért a katódsugárcső cseréjéhez, annak szereléséhez megfelelő védőpajzsos szemüveget és speciális testvédő kesztyűt kell hordani. Ha a cső berobban, a homloklap szilánkjait az atmoszféra nyomás puskagolyó sebessége gyorsíthatja.

Mind a televíziós technikához, mind a modern számítástechnikai képmegjelenítéshez a képcsövön színes képet kell létrehozni. Ezt az additív színkeverés elvén valósítják meg. Időrendben elsőként az úgynevezett lyukmaszkos, vagy árnyékmaszkos (shadowmask) képcsövek terjedtek el. A nagyfelbontást, finom rajzolatot igénylő megjelenítők ma is ezen elven épülnek fel.

Az [53. ábra](#) árnyékmaszkos cső felépítését szemlélteti. A színes képet vörös (red: R), zöld (green: G) és kék (blue:B) színben világító fénypont fényének keveréke hozza létre. Ehhez a három fénypont szabályos síkrács formában ülepített kis szigetekként kell a ballon homlokkalára felvinni, és elektronnyalábbal gerjeszteni. Ehhez három elektronnyalábra van szükség, melyet a régebbi csőtípusokban egyenlő oldalú háromszög csúcsaiban ( $\Delta$ :Delta) elrendezett katódok és elektronágyúk hoztak létre (R, G, B). Az elektronnyalábot úgy fókusztálták, hogy a homloklap közelében lévő árnyékmaszk lyukain áthaladó elektronnyalábok közül az R nyaláb csak vörösen világító fénypont szigetet érhessen, a G nyaláb csak zöldet, a B nyaláb csak kék szigetet.



53. ábra: Árnyékmaszkos képcső részlete

Modern árnyékmaszkos képcsöveknél két-két szomszédos lyuk távolsága 0,2 mm ... 0,3 mm, az árnyékmaszk invar ötvözetből készül, melynek hőkitágulási együtthatója igen kicsiny. Erre azért van szükség, mert az elektronnaláb egy része az árnyékmaszkba ütközik, azt felmelegíti s így nem invar anyag esetén kitágul. Ha ez lokálisan jön létre, mert adott helyen nagyobb az elektronáram, az árnyékmaszk torzul, a torzult maszon áthaladó elektronok szomszédos fényporszigeteket is elérhetnek, ami hamis színek létrehozásához vezet.

A gyorsan mozgó elektronok maguk körül mágneses teret keltenek, mely hosszabb idő alatt felmágneseli az árnyéklemezt. Ez az elektronnaláb defókuszálja, ami a kép minőségét rontja. Ezért az árnyékmaszk lemez időnként le kell mágnesezni. Modern monitoroknál ez a bekapcsoláskor automatikusan történik: az árnyékmaszk lemez körül elhelyezkedő tekercsbe váltakozó áramot vezetnek, melyet fokozatosan kikapcsolva a tekercsben lévő mágneses anyagok doménjei eredeti rendezetlen irányítottságukat veszik fel.

A katódsugárcsöves monitoroknak több további változata is ismert, mint pl. az in-line technika vagy a trinitron maszkos képcső, melyekkel nagyobb fénysűrűséget lehet elérni.

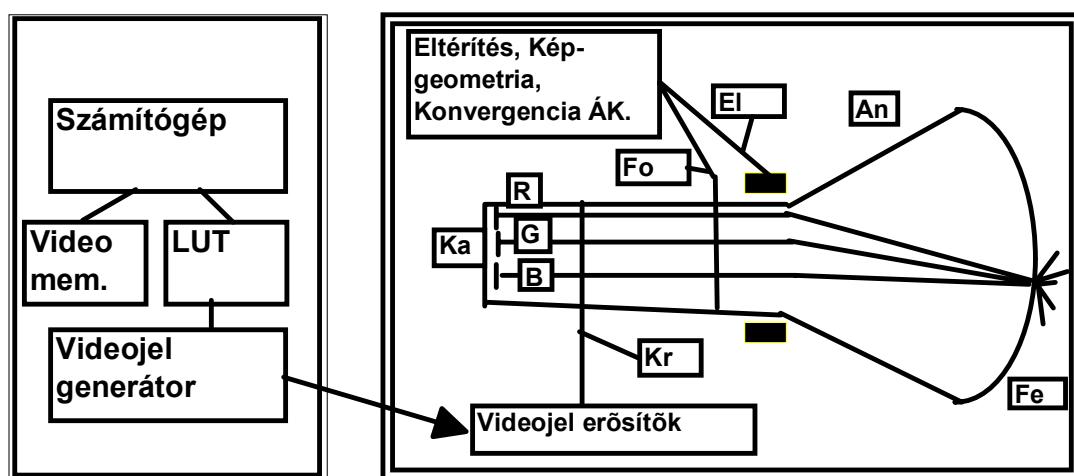
Színmegjelenítési szempontból minket elsősorban a képcsőben használt fényporok színképe és színessége érdekel. A [27. ábra](#) katódsugárcsöves monitorokban használt vörös, zöld és kék fényporok színképét szemlélteti. Látható, hogy a vörös fénypor színképe több keskeny sávból áll, ez gondot okoz amikor színhelyesen szeretnénk megjeleníteni színes képeket mind a monitoron, mind pedig kinyomtatva, mert a nyomtatott képeken az azonos színponthoz tartozó színkép nagyon más lesz, erős metameria lép fel.

A CCIR 709 nemzetközi szabvány szerinti fénypor színességi koordinátákat a 6. táblázat mutatja, a CRT monitoroknál szokásos fehérpontokkal: színtani felhasználás esetén 6500 K-es fehér pontot kell beállítani, nyomdaiparban az 5000 K-es fehérpontot használják, egyéb számítógépes munkánál sokszor találkozunk a 9300 K-es fehérponttal is, mert ilyen körülmények között nagyobb fénysűrűségű képet lehet megjeleníteni.

6. táblázat: A CCIR 709 szabvány szerinti fénypor színességi koordináták

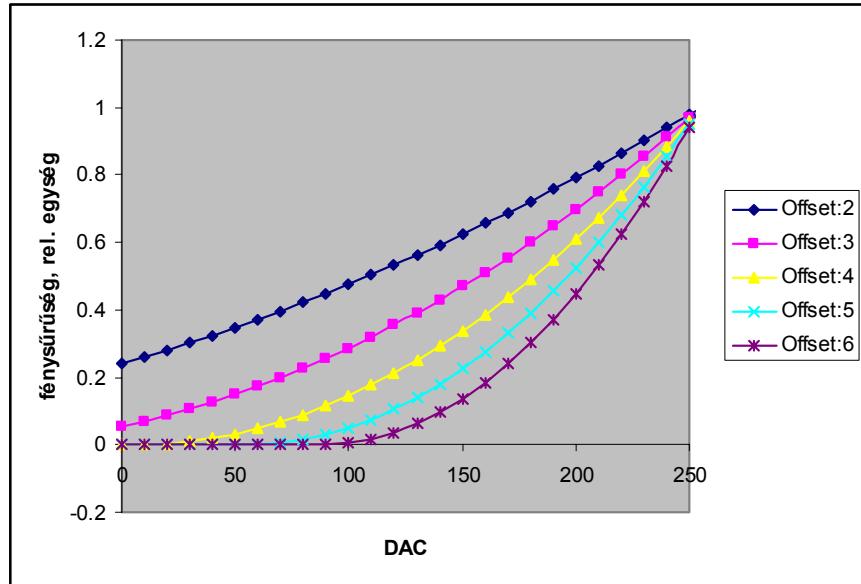
	<i>x</i>	<i>y</i>
Vörös (R) fénypor	0,640	0,330
Zöld (G) fénypor	0,300	0,600
Kék (B) fénypor	0,150	0,060
Fehér (W) színpont		
6500 K	0,313	0,359
5000 K	0,346	0,329
9300 K	0,280	0,312

A katódsugárcsöves monitor elvi felépítését szemlélteti az 54. ábra. A monitor a videó jelet a számítógéptől kapja. A napjainkban szokásos elrendezés szerint a számítógép videó kártyája szolgáltatja az R, G, B csatornák számára a meghajtó jelet valamint a sor és képfrekvencia szinkron jeleit. A digitál-analog konverterek (D/A-konverter) a számítógépben feldolgozott digitális jeleket (ma általában csatornánként 8 bit információval, szokás ezen jelet DAC értéknek hívni) analóg jellé alakítják, melyeket a monitorban lévő erősítők felerősítenek és ezzel a katódsugárcső elektronnyalábjainak erősségeit szabályozzák. Ezen erősítőkön két szabályozó elemet találunk: az egyik az egyenáramú erősítő nulla-pontját állítja, ezzel állíthatjuk be, hogy a vezérlő jel hányadik bitjétől kezdődően legyen hatással a vezérlés az elektronáramra.



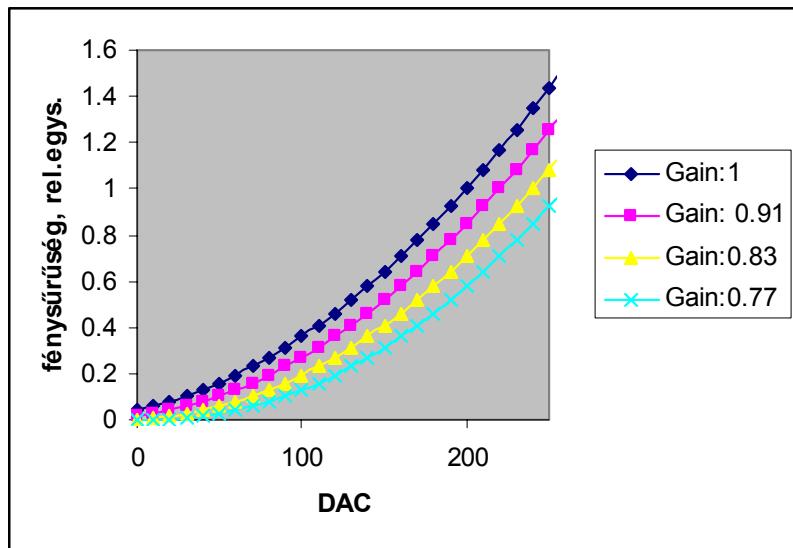
54. ábra: Katódsugárcsöves monitor elvi felépítése: *Ka*: katód, *An*: anód, *Fo*: fókuszáló elemek, *El*: eltérítő elemek, *Kr*: kontroll rács, *Fe*: fényporernyő árnyékoló maszkkal; *R*, *G*, *B*: a vörös, zöld, illetve kék fényporra jutó elektronnyaláb.

Az 55. ábra a video erősítő különböző null-pontot megszabó előfeszítéseinek felvett vezérlő jel (DAC érték, digital analogue converter) fénysűrűség görbe-sereget szemléltet. A video erősítő null-pont eltolásával az átviteli karakterisztika meredekségét változtathatjuk.



55. ábra: Fénysűrűség – DAC érték összefüggés különböző erősítő nullpont beállítások esetén

Az analóg erősítő erősítésének állításával (lásd 56. ábra) az adott DAC érték változásához tartozó fénysűrűség átfogást (maximális/minimális fénysűrűség) lehet befolyásolni, ezért ezt a szabályozót sokszor „kontraszt” (contrast) állító gombnak nevezik.



56. ábra: A fénysűrűség – DAC érték összefüggése különböző erősítő erősítések esetén

Látható, hogy az elektronagyú elektronáram sűrűségét szabályozó feszültséggel („rács-“ vagy „Wehnelt-henger feszültség“) a fénysűrűség nem lineárisan változik. Az összefüggés jó közelítésben hatványfüggvényvel írható le, melynek kitevője 2,2 körüli érték:

$$L = aD^{\gamma} + b$$

ahol  $L$  a kimenő fénysűrűség,  $D$  a beállított DAC érték,  $a$  az analóg erősítő erősítése,  $b$  az erősítőn alkalmazott nulla-pont eltolástól függő érték,  $\gamma$  pedig a hatványfüggvény hatvánkitevője.<sup>16</sup>.

#### 4.2.2.1. CRT monitor kalibrálása

##### A.) Gamma-görbe meghatározás

A katódsugárcsöves monitorok gamma-görbéinek matematikai modellje minden csatorna (vörös, zöld, kék) esetében megegyezik, így csupán egy általános esetet tárgyalunk, melybe értelemszerűen behelyettesíthetjük a megfelelő csatornára vonatkozó R (red), G (green) és B (blue) szimbólumokat. Az általános modellben  $T$  jelöli az aktuális csatornát.

A katódsugárcsöves monitoron megjelenített homogén színes mező fénysűrűségét az alábbi függvény írja le:

$$L_T(D_T) = \begin{cases} L_{T,\max} \cdot \left( k_{T,g} \cdot \left( \frac{D_T}{2^N - 1} \right) + k_{T,o} \right)^{\gamma_T}, & \text{ha } k_{T,g} \cdot \left( \frac{D_T}{2^N - 1} \right) + k_{T,o} \geq 0 \\ 0 & \text{ha } k_{T,g} \cdot \left( \frac{D_T}{2^N - 1} \right) + k_{T,o} < 0 \end{cases} \quad 43$$

ahol:

$N$  a monitor színcsatornáinak címzésére használt bitek száma. A ma használatos video-kártyák és monitorok esetében általában  $N = 8$ , ami 0 és 255 között digitál-analog (DAC) értékek kiválasztását jelenti. Ezek a 0 és  $2^N - 1$  között választott DAC-értékek szerepelnek a magas szintű programozási nyelvek palettabeállító függvényeiben is.

$D_T$  a  $T$  csatorna DAC-értéke;

$L_{T,\max}$  a vizsgált  $T$  csatorna esetében, kizárolag ezt a színcsatornát használva megjeleníthető színes mező fénysűrűsége a legnagyobb DAC-értéknél, tehát a legnagyobb DAC-értékű palettabeállításnál;

$k_{T,g}$  a matematikai modell azon paramétere, mely a monitor erősítését írja le a  $T$  csatornára vonatkozóan;

$k_{T,o}$  a matematikai modell azon paramétere, mely a monitor zero-pont eltolását (offsetjét) írja le a  $T$  csatornára vonatkozóan;

$\gamma_T$  a modell hatványfüggvényének kitevője a  $T$  csatorna esetén.

A gamma-görbék paramétereit érdemes abban az esetben vizsgálnunk, amikor a görbéket *normáljuk*, ami annyit jelent, hogy a gamma-görbét leíró függvény a legnagyobb DAC-érték

<sup>16</sup>  $\gamma$ -val szokás jelölni a hatvánkitevőt, mivel az elektronikus képátvitelnél fellépő hatványfüggvény nagyon hasonlít a fényképezési technikában az expozíció fénymennyisége és a keletkezett feketedés közötti összefüggésre, s ott a foto-film „keménységét” a hatványfüggvény  $\gamma$  kitevőjével jellemzik;

esetén vesz fel 1-et, azaz esetünkben  $L_T(255)=1$ . Ekkor a modellben szereplő  $L_{T,\max}$  értéket értelemszerűen 1-nek kell definiálnunk és a továbbiakban nem kell vele foglalkoznunk.

A monitorkalibráció során tehát a  $k_{T,g}$ ,  $k_{T,o}$  és  $\gamma_T$  paramétereket kell meghatároznunk mindenáron csatornára. Minthogy  $k_{T,g} + k_{T,o} = 1$ , ezért csatornánként kettő, azaz összesen hat ismeretlen paramétert kell meghatároznunk a gamma-görbék megadásához.

A gamma-görbék meghatározandó paraméterit tulajdonképpen regressziós illesztés nyomán kapjuk (modellfüggvényként a  $L_R$ ,  $L_G$  és  $L_B$  függvényeket használhatjuk).

### B.) Fénypormátrix meghatározása

Miután meghatároztuk egy monitor gamma-görbéinek *normált* alakját, az additív színkeverés törvényeiből kiindulva a következő egyenettel teremthetünk összefüggést a monitort vezérlő DAC-értékek és a monitoron megjelenített színes mezők CIE XYZ színinger-összetevői között:

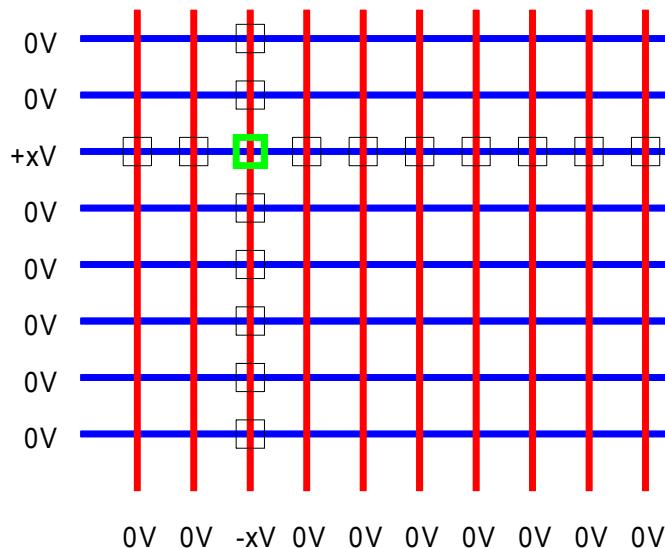
$$\begin{bmatrix} X(D_R, D_G, D_B) \\ Y(D_R, D_G, D_B) \\ Z(D_R, D_G, D_B) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{R,\max} & X_{G,\max} & X_{B,\max} \\ Y_{R,\max} & Y_{G,\max} & Y_{B,\max} \\ Z_{R,\max} & Z_{G,\max} & Z_{B,\max} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} L_R(D_R) \\ L_G(D_G) \\ L_B(D_B) \end{bmatrix}.$$

A fenti egyenletben az  $L_R$ ,  $L_G$  és  $L_B$  szimbólumok a vörös, zöld és kék színcsatornák *normált* gamma-görbét modellező függvények. Az egyenlet bal oldalán található oszlopvektorban a  $(D_R, D_G, D_B)$  palettabeállítással (DAC-érték-hármas) létrehozott színes mező CIE XYZ színinger-összetevői szerepelnek. Az egyenletben szereplő  $3 \times 3$ -as mátrixot nevezik a monitor *fénypormátrixának*. A benne szereplő szimbólumok az indexeikkel összhangban a következőt jelentik: adott színcsatorna megfelelő színinger-összetevője a csatorna legnagyobb DAC-értékével.

Amennyiben a fénypormátrix invertálható (és a valós esetekben az szokott lenni), kölcsönösen egyértelmű leképezést kaptunk a palettabeállítások és a CIE XYZ színinger-összetevők között és ezzel készen is vagyunk a monitor kalibrációjával.

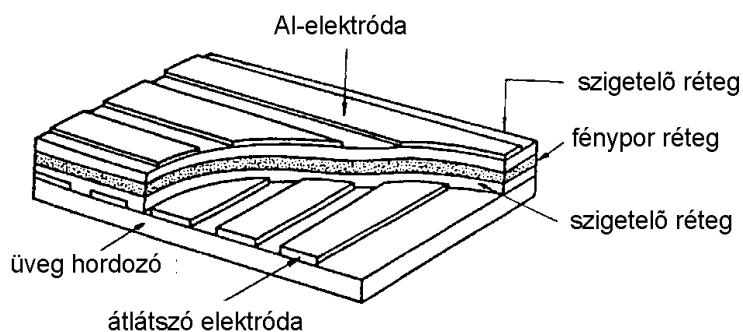
#### 4.2.3. Mátrix-vezérlésű (pl LCD) monitor

A mai számítástechnikai eszközökben általában folyadékkristályos (liquid crystal, LCD) képmegjelenítőkkel találkozunk. Ezek a CRT típusuktól első sorban az egyes pixelek címzésében különböznek. Az [57. ábra](#) mutat példát a mátrix címzésre: ha minden sorhoz és minden oszlophoz tartozó elektródát nulla potenciálra állítunk, csak például a 3. oszlop és a 3. sor elektródájára kapcsolunk jelet, úgy a 3. sor 3. pixelje kap vezérlést. Látható azonban az is, hogy a 3. oszlop összes sorában és a 3 sor összes oszlopában lévő pixeleken a hasznos vezérlő jel értékének felével lép fel vezérlés. Ahhoz, hogy ez ne okozzon hamis fényjelenséget a képmegjelenítő fény/vezérlő-jel karakterisztikája olyan meredek kell, hogy legyen, hogy a példa szerinti 1/2 vezérlő jelnél még ne jöjjön létre kimenő jel, azaz fényjelenség változás. Ez az egyszerű mátrix címzés nagy hátránya, melyet a különböző technológiák más-más módon igyekeznek kiküszöbölni.



57. ábra: Példa a mátrix címzésre

A mátrix címzésnél a kiléző fény irányában lévő elektródasor átlátszó kell, hogy legyen. Ezt üveg hordozóra létrehozott óndioxid ( $\text{SnO}_2$ ) vagy indiumoxid ( $\text{In}_2\text{O}_3$ ) átlátszó vezetővel oldják meg. Utóbbit például  $\text{In}$ -ot  $10^{-5}$  torr vákuumban a felületre katódporlasztással felhordva lehet készíteni. Megfelelő optikai áteresztés mellett az ilyen rétegek kb.  $20 \text{ Ohm/cm}^2$  ellenállást mutatnak. Aktív, önvilágító, mátrix címzésű képmegjelenítő a vékony-rétegű elektrolumineszcens vagy legújabban a szerves elektrolumineszcens megjelenítő. Ilyen megjelenítő szerkezeti rajzát mutatja az 58. ábra.

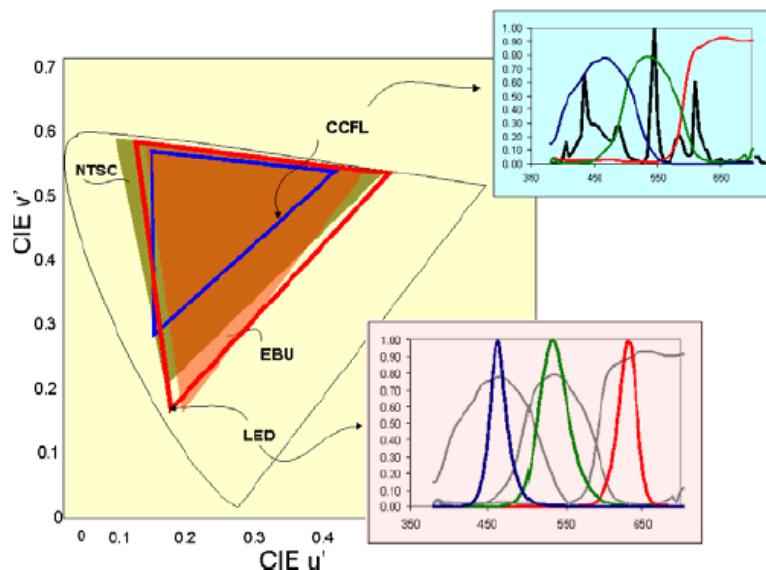


58. ábra: Vékony-réteg képmegjelenítő metszeti képe

A folyadékkristályos megjelenítők vezérlése is hasonló. A lényeges különbség, hogy ezek passzív kijelzők, nem önvilágítók, hanem az LCD panel mögött elhelyezett fényforrás fényét gyengíti az egyes pixelek abszorpciója. Színes képmegjelenítőhöz egy pixelt szubpixelekre osztanak, melyek külön-külön kapnak vezérlést, melyek előtt vörös, zöld, illetve kék színképtartományban áteresztő színszűrők vannak. A mátrix elrendezés miatt a címzett pixelhez tartozó azonos sorban illetve oszlopban lévő többi pixel is kap vezérlést, ennek hatását megfelelő segéd-elektronikával, a pixelt közvetlenül vezérő nagy meredekséget biztosító tranzisztoros (vagy más nem-lineáris elemet tartalmazó félvezető eszközzel) vezérléssel lehet lecsökkenteni.

LCD monitoroknál szokás volt hidegkatódos fénycsővel (CCFL: cold cathode fluorescent lamp) megoldani a háttér világítást. Ezen fényforrások színképe eltér a CRT monitor színké-

pétől, de szintén több színképvonalat és keskeny sávot tartalmaz. Újabban terjed a LED-es háttér világítás, mind azon formában, hogy fehér fényt hoznak létre, de vörösen, zöldön és kéken világító LED-ekkel is. A következő ábra a hidegkatódos fénycsöves és RGB-LED-es háttérvilágítást hasonlítja össze: Az  $u'$ ,  $v'$  diagramba berajzoltuk a régi amerikai szabvány (NTSC), az EBU szabvány szerinti színteret, valamint a hidegkatódos fénycsővel, illetve RGB-LED-del elérhető színességi területet. A jobb oldali felső betoldott ábra a hidegkatódos fénycső színképét mutatja három – az LCD pixelek elől helyezhető színszűrő áteresztéssel, az alsó színkép az R, G, B LED-ek színképét szemlélteti a három lehetséges színszűrő áteresztéssel.



59. ábra: Hidegkatódos fénycső és RGB-LED-es háttér világítás LCD monitor esetén, színképek és színességi terület a CIE  $u'$ ,  $v'$  diagramban

Az LCD monitor gamma-karakterisztikája eltér a CRT monitorétől, jó közelítésben S-görbe alakú. A monitor kalibrálásakor ezt a görbét kell felvenni minden a három alapszín esetén, majd a színi mátrixkorrekciót ugyanúgy elvégezhetjük, mint a CRT monitor esetén.

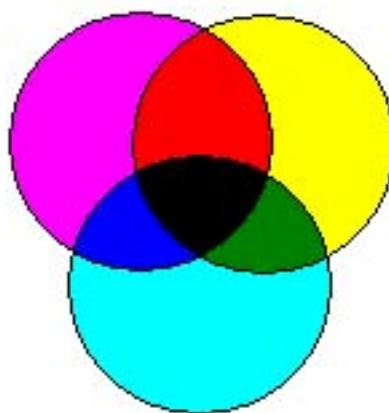
### 4.3. Nyomtató és kalibráció

Napjainkban a számítógépes gyakorlatban két nyomató típusnal találkozunk: festéksugaras (mondják tintasugarasnak is) és lézer nyomató. A kétféle nyomató szín-kezelése eltérő, jelen helyen csak a festéksugaras technikát fogjuk röviden áttekinteni.

#### 4.3.1. Festéksugaras nyomtató

A festéksugaras nyomtató az egyes színeket úgy hozza létre, hogy a három színes festék (sárga: Y, yellow; bíbor: M, magenta; cián: C, cyan – sokszor türkizkékként említik) és fekete festékből nagyon finom apró cseppeket visz a papírra, ha az egyik színből több kell, úgy arra a területre több csepp jut. A cseppek részben egymás mellé, részben egymásra kerülnek, így a festéksugaras nyomtató esetén mind additív, mind szubtraktív (elvonó) színkeverés létrejön (lásd [2.3. fejezet](#)). A [60. ábra](#) szerint ha az eredetileg fehér színű fény útjába egy sárga és magenta (bíbor) szűrőt helyezünk, úgy az eredő szín vörös, ha a sárga szűrőt cián (türkizkék) szűrő előtt tesszük, úgy zöld színt kapunk, míg a magenta és cián szűrők együttes használatával

kék színhez jutunk, s végül, ha minden szűrőt a fény útjába helyezzük, úgy nem tud a szűrőcsomagon fény áthaladni, az eredmény fekete. Ez történik a nyomtatás esetében is, ha a festékcsomagok egymásra kerülnek. Ahol a festékcsomagok egymás mellé esnek, ott additív színkeverés jön létre. Neugebauer ezen elv alapján dolgozta ki a festéksugaras (Pontosabban egyetlen a nyomdaiparban használt autotípiai árnyalat) nyomtatás számára egyenleteit.



60. ábra: A szubtraktív színkeverés példája

Az egy pixel területén a csak cián, csak magenta, csak sárga tintával, valamint a festék-párokkal (eredők: vörös, zöld kék színek), továbbá a minden festékkel (fekete) beborított területet, valamint az egyetlen festék által sem lefedett területet (fehér) figyelembe véve lehet a keletkezett színt meghatározni. Mivel az egyes tinták színképi áteresztése nem ideális, azaz nem csupán a megkívánt hullámhossz tartományban eresztenek át, illetve a saját fő-áteresztési tartományukban is rendelkeznek elnyeléssel, a végső egyenletek igen bonyolultak, melyekkel az adott szín létrehozásához szükséges sárga, bíbor és türkiz festékmennyiséget meg lehet határozni. Tovább bonyolítja a helyzetet, hogy az eredő színhatást befolyásolja a papírnak a tintát felszívó tulajdonsága és az alap papír színe. Mindehhez járul még, hogy a gyakorlatban a papír azon helyeire, melyeken fekete színhatást szeretnénk elérni nem a három színes festék cseppeit juttatjuk, hanem ezt az összeget fekete festékkel váltjuk ki. Utóbbita két szempontból is szükség van: egyszerűbb a három színes festék egymásra nyomtatása nem tökéletesen fekete hatást kelt, mert a tinták színképi áteresztése nem ideális, másrészt a színes tinták lényegesen drágábbak, mint a fekete, kormot tartalmazó festék, s ezért utóbbi használata sokkal gazdaságosabb.

Fentiekre való tekintettel a festék nyomtatások gyakorlati kalibrálását úgy végzik, hogy nagyszámú, ismert színínger koordinátájú színmintát kinyomtatnak, a nyomatokat megméri, ennek alapján a nyomtatási paramétereiket korrigálják, s a korrigált paramétereiket hozzárendelési táblázatokban (look-up table) tárolják s ezek felhasználásával vezérlők vezérlők a nyomtatást.

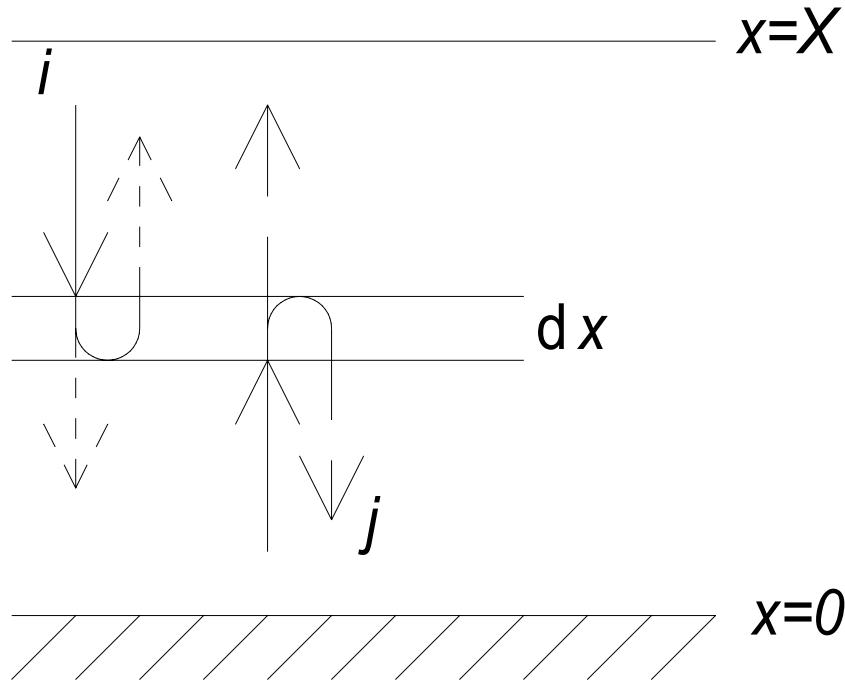
#### 4.3.2. Lézer-nyomtató

Lézer (elektrofotográfiai elven működő) nyomtatók esetén teljesen a szubtraktív színkeverésen alapul a szín meghatározás. Az adott pixel felületére a három (illetve itt is feketével (K) együtt négy (YCMK)) alapszínből vékony rétegben kerül fel a festék, s ennek a rétegeknek a vastagsága változik annak függvényében, hogy milyen színt szeretnénk elérni. Kubelka és Munk textilfestés számára kidolgozott elméletét jól lehet ezen esetben is használni. Ezen elmélet lényege, hogy feltételezi, hogy a festékrétegben két főirányú fényszórás jön létre. a

papír síkjára merőlegesen a felszíntől a réteg belsejébe és vissza a felszín felé. A festék-rétegen lejátszódó jelenséget a 61. ábra szemlélteti: a  $dx$  vastagságú rétegen a beérkező  $i$  sugárzás részben elnyelődik ( $K$  abszorpciós együttható), részben szóródik ( $S$  szóródási együttható). A sugárzás csökkenése, illetve növekménye a következő formában írható fel:

$$-di = -(S+K)idx + Sjdx$$

$$dj = -(S+K)jdx + Sidx$$



61. ábra: Fény-elnyelés és szóródás a Kubelka-Munk elmélet szerint

A parciális differenciálegyenletek integrálásával a reflexióra kapunk értéket. A  $K/S$  hánnyados az egyes színhordozók koncentrációjának nemlineáris függvénye. A pontosabb számításhoz több koncentrációval készített kalibráló mintára van szükség. A különböző közelítések alapján számos színszámítási algoritmust dolgoztak ki [30].

#### 4.4. Színek használata

Színek előnyösen használhatók írott anyagban kiemelésre, figyelem felkeltésére. Visszatérő probléma azonban, hogy sok esetben a készítő nem gondol a színtévesztőkre: míg egy vörös-zöld kombináció esetleg jól látható az ép színlátó számára, a protanop vagy deutanop megfigyelő csak a maradék világosság kontraszt alapján fogja a pl. zöld háttéren a piros színű írást olvasni tudni. Mindig célszerű először a világosság kontrasztot beállítani és csak az után a színekkel további kiemelést végrehajtani.

Az emberi szem nem akromát, azaz nem tud egyszerre rövid és hosszú hullámhosszú sugárzásra fókuszálni. Így ha egymás mellett alkalmazunk kék és vörös jeleket, azokat nem fogja az olvasó egyszerre élesen látni.

Bár az ember akár egymillió színárnyalatot is meg tud különböztetni, ha azok megfelelő felületek formájában kellő megvilágítással látszanak, de színes ábrákban 5-6 színnél többet

nem tud hozzárendelni valamilyen megnevezéshez. Ugyanakkor, ha hosszabb munka során többször vissza akarunk ugyanahhoz a fogalomhoz tértünk, különböző ábrákban, úgy azonos fogalmat mindig ugyanazzal a színnel jelöljünk, különben áttekinthetetlenné válik a bemutatás.

Túlzottan sok élénk szín egy ábrában nyugtalan érzést kelt, célszerű pl. azonos színárnyalat kis telítettségű háttérén nagy telítettséggel készíteni a feliratot.

A számítógépes gyakorlatban visszatérő feladat színes grafikonok készítése. Sokszor tapasztalt hiba, hogy a számítógépen a grafikon hátterét halvány szürkére választva, minden a sötétebb színű vonalak, pl. sötétkék, minden a világos vonalak, pl. sárga, jól látszanak. Nyomtatáshoz azonban általában jobban szeretjük a fehér hátterset, és olyankor a világos sárga vonal már beleolvad a fehér háttérbe.

A képi információ helyes színvisszaadásánál figyelembe kell vennünk a színmenedzsmenttel kapcsolatban leírtakat.

## **5. SZÍNEKKEL KAPCSOLATOS IRODALOM**

Az alábbiakban a színekkel kapcsolatos alapirodalom, majd a vonatkozó nemzetközi szabványok összefoglalóját közöljük.

### **5.1. Színtani alapművek**

- Berns RS, Billmeyer and Salzmann's Principles of color technology, 3rd ed. Wiley 2000.  
Fairchild MD: Color appearance models, Addison – Wesley, Reading 1998.  
Homann J-P. Digitales color-management, Farbe in der Publishing-Praxis, 2. Aufl. Springer 2000.  
Hunt RWG. Measuring colour. 3rd ed. Fountain Pr. 1998.  
Hunt RWG. The reproduction of colour, 5th ed. Fountain Pr. 1995.  
Kaiser PK, Boynton RM. Human color vision OSA 1996.  
Lukács Gy. Színmérés, Műszaki Kiadó 1982.  
Ohta N, Robertson AR. Colorimetry, Fundamentals and applications. Wiley 2005.  
Schanda J. ed.: Colorimetry, Using the CIE system. Wiley 2007.  
Valberg A. Light vision color. Wiley 2005.  
Wright WD. The measurement of colour. 3rd ed. Hilger & Watts Ltd. London 1964.  
Wyszecki G, Stiles WS. Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae. 2nd ed. Wiley 1982.

### **5.2. A Nemzetközi Világítástechnikai Bizottság (CIE) színekkel kapcsolatos kiadványai**

- Specification of Colour Appearance for Reflective Media and Self-Luminous Display Comparisons, CIE 195:2011 ISBN 978 3 901906 93 0.  
Practical Daylight Sources for Colorimetry, CIE 192:2010. ISBN 978 3 901906 90 9.  
Chromatic Adaptation under Mixed Illumination Condition when Comparing Softcopy and Hardcopy Images, CIE 162:2010. ISBN 978 3 901 906 82 4.  
Reappraisal of Colour Matching and Grassmann's Laws, CIE 185:2009. ISBN 978 3 901906 78 7.  
Indoor Daylight Illuminants, CIE 184:2009. ISBN 978 3 901906 74 9.  
Methods for Characterising Tristimulus Colorimeters for Measuring the Colour of Light, CIE 179:2007. ISBN 978 3 901906 60 2.  
Colour Rendering of White LED Light Sources, CIE 177:2007. ISBN 978 3 901906 57 2.  
Fundamental Chromaticity Diagram with Physiological Axes - Part 1, CIE 170-1:2006. ISBN 978 3 901906 46 6.

Criteria for the Evaluation of Extended-Gamut Colour Encodings, CIE 168-2005. ISBN 978 3 901906 42 8.

Recommended Practice for Tabulating Spectral Data for Use in Colour Computations, CIE 167:2005. ISBN 978 3 901906 41 1.

Cognitive Colour, CIE 166:2005. ISBN 978 3 901906 40 4.

The Effects of Fluorescence in the Characterization of Imaging Media, CIE 163:2004. ISBN 978 3 901906 35 0.

A Review of Chromatic Adaptation Transforms, CIE 160:2004. ISBN 978 3 901906 30 5.

A Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM02, CIE 159:2004. ISBN 978 3 901906 29 9.

Guidelines for the Evaluation of Gamut Mapping Algorithms, CIE 156:2004. ISBN 978 3 901906 26 8.

Colorimetry, 3rd Edition, CIE 015-2004. ISBN 978 3 901906 33 6.

International Recommendations for Colour Vision Requirements for Transport, CIE 143-2001. ISBN 978 3 901906 09 1.

Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation, CIE 142-2001. ISBN 978 3 901906 08 4.

A Method for Assessing the Quality of Daylight Simulators for Colorimetry, CIE 051.2-1999 (including Supplement 1-1999). ISBN 978 3 901 906 03 9.

Industrial Colour-Difference Evaluation, CIE 116-1995. ISBN 978 3 900734 60 2.

Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources, CIE 013.3-1995. ISBN 978 3 900734 57 2.

A Method of Predicting Corresponding Colours under Different Chromatic and Illuminance Adaptations, CIE 109-1994. ISBN 978 3 900734 51 0.

Review of the Official Recommendations of the CIE for the Colours of Signal Lights, CIE 107-1994. ISBN 978 3 900734 49 7.

Parametric Effects in Colour-Difference Evaluation, CIE 101-1993. ISBN 978 3 900734 38 1.

Colorimetry of Self-Luminous Displays, A Bibliography, CIE 087-1990. ISBN 978 3 900734 24 4.

Recommendations for Surface Colours for Visual Signalling, CIE 039.2-1983. ISBN 978 92 9034 039 3.

### 5.3. Felhasznált irodalom

- 1 Gubisch RW. 1967 Optical performance of the human eye, *JOSA* **57** 407-415.
- 2 Reeves P (1920) The response of the average pupil to various intensities of light, *JOSA* **4** 35 (based on W-SA)
- 3 CIE, An analytical model for describing the influence of lighting parameters upon visual performance, CIE 19.2 – 1972.

- 4 Cakir A, Hart DJ, Stewart TFM, Bildschirmarbeitsplätze, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg New York, 1980.
- 5 Rodenstock Information, Datalit und BT-Color, Optische Werke G Rodenstock, München
- 6 Schnapf JL, Kraft TW, Baylor DA, Spectral sensitivity of human cone photoreceptors, Nature 325 439-441 1987.
- 7 Werner JS, Aging through the eyes of Monet, in Color Vision, Perspectives from different disciplines, ed.: Backhaus WGK, Kliegl R, Werner JS, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1998.
- 8 Schanda J, Current CIE work to achieve physiologically corrected colour metrics, in Color Vision, Perspectives from different disciplines, ed.: Backhaus WGK, Kliegl R, Werner JS, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 1998.
- 9 Helmholtz, Hermann, lásd Young-Helmholtz elmélet:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Young%E2%80%93Helmholtz\\_theory](http://en.wikipedia.org/wiki/Young%E2%80%93Helmholtz_theory)
- 10 Hering E. 1878 Zur Lehre vom Lichtein, Carl Gerold's Dohn, Wien (from W-S).
- 11 Lennie P, Pokorny J, Smith CV 1993 Luminance. JOSA 10 1283-1293.
- 12 Purkinje J 1823 Beobachtungen von Versuche zur Physiologie der Sinne, Zweites Bändchen, G. Reiner, Berlin (from W-S).
- 13 CIE 1924 Proceedings 1924 Cambridge Uni. Pr., Cambridge 1926..
- 14 CIE Compte Rendu Vol. 3 1951, Table II. 37-39.
- 15 Magyar Szabvány: Fénytechnikai terminológia, A sugárzás alapfogalmai, mennyiségei és egységei. MSZ 9620-1:1991 845-01-50 fogalom.
- 16 Coaton JR, Marsden AM, Lamps and lighting, 4th ed., Arnold and Contributors, 1997.
- 17 CIE Technical Report: Mesopic photometry: History, special problems and practical solutions, CIE 81-1989.
- 18 CIE Recommended system for mesopic photometry based on visual performance. CIE Publ. 191:2010.
- 19 Hunt RWG 1995 The reproduction of colour. 5th ed. Fountain Pr. England.
- 20 CIE Proc. of the 1963 Vienna Session, Bureau Central de la CIE, Paris, 1964.
- 21 MacAdam DL (1942) Visual sensitivities to color differences in daylight. J. Opt. Soc. A. 32 247 - 274.
- 22 Schanda J 2007 CIE Colorimetry in Colorimetry, Understanding the CIE system, ed. J. Schanda, Wiley – Intercience 2007.
- 23 CIE 1994 Brightness-luminance relations in CIE Collection in colour and vision CIE Publ. 118/3:1994.
- 24 EC (1999) IEC 61966-2-1 Multimedia systems and equipment – Colour measurement andmanagement – Part 2-1. Colour management – Default RGB colour space – sRGB. IEC Switzerland.
- 25 World Wide Web Consortium: A standard default color space for the Internet – sRGB,  
<http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>

- 26 CC: Making color seamless between devices and documents. <http://www.color.org>
- 27 Kosztýán mátrix korrekció
- 28 CIE Technical Report (1987) Methods of characterizing illuminance meters and luminance meters, CIE 69 - 1987, CIE Central Bureau, Vienna.
- 29 Kosztýán Zs, Sturm S, Müller D, Schanda J. (2008) Decreasing colour measuring systematic error in image taking tristimulus colorimeters CIE D2 Symposium Torino 2008
- 30 Wyszecki G, Stiles WS 1982 Color science: Concepts and methods, quantitative data and formulae, Wiley Interscience, pp. 221-222, 785-786.