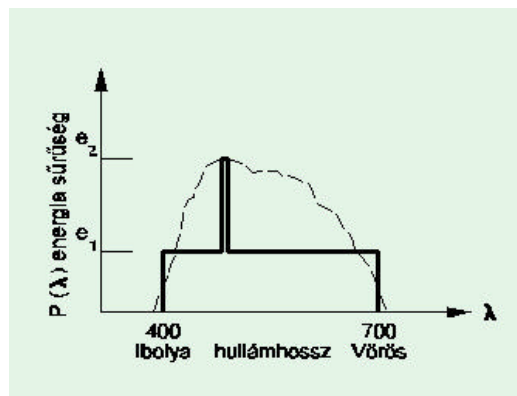


1.3 fejezet.

CIE színrendszerek

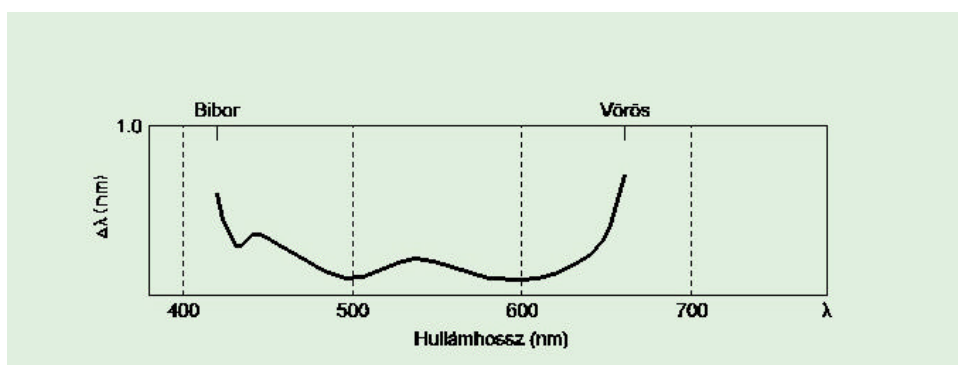
A színek jellemzőinek meghatározása vita tárgya, mert színinger a fényero, alakzat és háttér, látószög, méret és mozgás kölcsönhatásában keletkezik. Újabb megfigyelések szerint a receptorok fényérzékenységi görbéi az egészséges színlátók körében eltérőek. A fény spektrális energiamegoszlása három dimenzióval kapcsolható a színinger kongnítív tartalmához, ez a szín (Hue), telítettség (Saturation) és a világosság (Value).

a) A szín vagy színárnyalat (Hue) a fényben a legnagyobb energiával rendelkező hullámhossztól függ, amelynek fizikai elnevezése domináns hullámhossz. A színérzetet az a receptor határozza meg, amelyhez a domináns hullámhossz a legközelebb áll. Ha például a domináns hullámhossz (?) = 440, akkor a szín kék.



1. sz. ábra. Domináns hullámhossz, kibocsátási tisztaság és a luminancia szemléltetése leegyszerűsített spektrális energia eloszlási függvényvel $P(?)$. A szaggatott vonal a CIE D65 fehér szín spektrális energiaeloszlását mutatja.

Az emberi szem 128 domináns tiszta színt képes egymás mellett megkülönböztetni, és ez a képesség a hullámhossztól függően változó. A spektrum két szélén csak 10 nm-es lépcsőkben érzékelhető színekülönbség, a spektrum közepén pedig 2-4 nm között hullámzik.



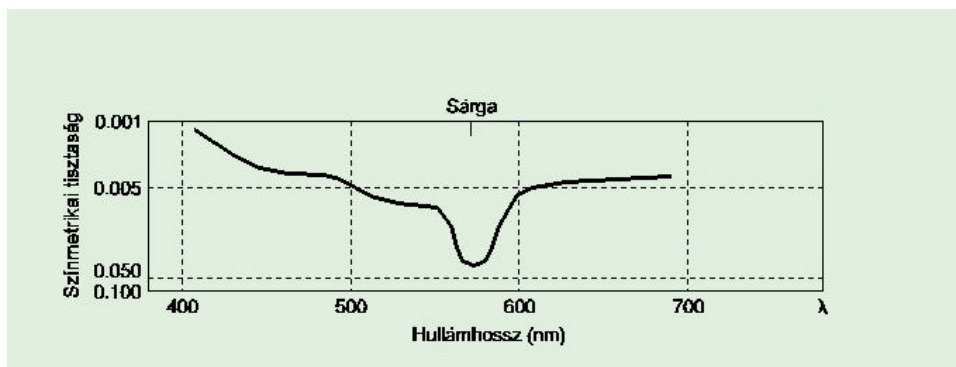
2. sz. ábra. Az emberi szem átlagos színmegkülönböztető képessége. A magasabb érték az érzékenység csökkenését mutatja.

b) A telítettség (Saturation) vagy színtartalom a domináns és a nem domináns hullámhosszok viszonylagos energiaeloszlásától függ, fizikai elnevezése kibocsátási tisztaság. A telítettség minősíthető a fehértartalom ellenében. A tökéletes fehér színeképében valamennyi hullámhossz jelen van, és energiájuk

azonos, egyik sem domináns. A tökéletesen telített szín monokromatikus, egy hullámhosszú fénnel rendelkezik. Eszerint ha $e_1=0$, akkor a színero 100 %-os. Ha $e_1=e_2$, akkor a színero – 0 %-os, azaz a színinger fehér.

A fehérhez viszonyított telítettség csökkenéséhez hozzájárul a hullámhossz különbség mértéke is. Minnél távolabb van egymástól a spektrumban két szín, a keverék annál telítetlenebb lesz. Egyes színpárok, például a kékeszöld és a vörös, a zöldessárga és az ibolya kifejezetten fehér ingerületet eredményeznek. Ezeket komplementer színeknek nevezzük.

Az emberi szem egy színnek 20 telítettségi fokozatát képes megkülönböztetni, és ez a képesség is a hullámhossztól függően változó. Változatlan fényero mellett a telítettség változása a spektrum szélén jobban érzékelhető, mint középen. Két oldal 23 telítettségi szint érzékelhető, középen 575 nm körül csak 16, azaz a kék és a vörös színező képessége, jobb mint a sárgáé. Ha a szín telítettsége csökken, a szem színárnyalat megkülönböztető képessége is csökken, a fehér közelében a szín alig azonosítható.



3. sz. ábra. Az emberi szem átlagos telítettség megkülönböztető képessége. A mérés állandó fényero mellett fehér fényhez viszonyítva történt a $P_c = L_c / L_w + L_c$ egyenlet alapján, ahol P_c a kolormetrikus tisztaság (telítettség), L_c szín világossága, L_w a fehér világossága.

e) A fényero (Luminancia) valamennyi hullámhossz energiájától függ, fizikai elnevezése fényerősség. Ha a fény energiája csökken, a szín fekete tartalma nő, például a vörösből barna lesz. Ha e_1 és e_2 közel $=0$, akkor a színinger fekete. A látás a fényerőváltozás igen nagy tartományát képes átfogni, és különböző fényero mellett a színlátás másként működik. Változatlan fényero mellett két szín kölcsönhatása a színinger tartalmát a következőképpen módosítja:

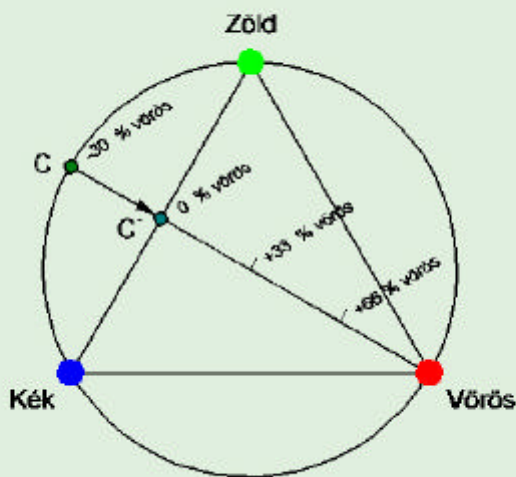
ea) heterokromatikus világosságkülönbség jelentkezik két szín viszonyában, mert a közép hullámú csapoknál a kromatikus és akromatikus ingerületi csúcsok egybeesnek, a rövid és a hosszuhullámú csapoknál pedig nem. Azonos fényerősség mellett a spektrum szélső színei, az ibolya és a vörösek sötétebbek, a középso sárgák és zöldek világosabbak.

eb) a telítettség csökkentés fényesség különbséget keletkeztet két szín viszonyában, mert a mindhárom csap együttes ingerlése nettó hatásában egyenértékű a fényerőnövekedéssel. Azonos fényero mellett a telítetlen pasztell színek világosabbak mint a telített színek.

ec) szintelenség keletkezik két szín viszonyában, ha a telítettség úgy módosul, hogy a relatív fényerőkülönbségek nem változnak. Azonos fényero mellett a színek elszíntelenednek.

A színlátás a relatív ingerkülönbségek összevetésén alapul, ezért a különböző spektrális energiaeloszlású fények azonos színingert eredményeznek. Ez a metamerizmus. A metamer színek azonosnak látszó színek, spektrális energia összetételük azonban különböző. Az azonosság több színre is érvényes. Ha a A szín megegyezik B színnel, és B szín C színnel, akkor A szín is megegyezik C színnel. Az azonosság a színösszeadásnál is fennmarad. Ha A és B illetve C és D szín megegyezik egymással, akkor A + C szín is megegyezik B + D színnel.

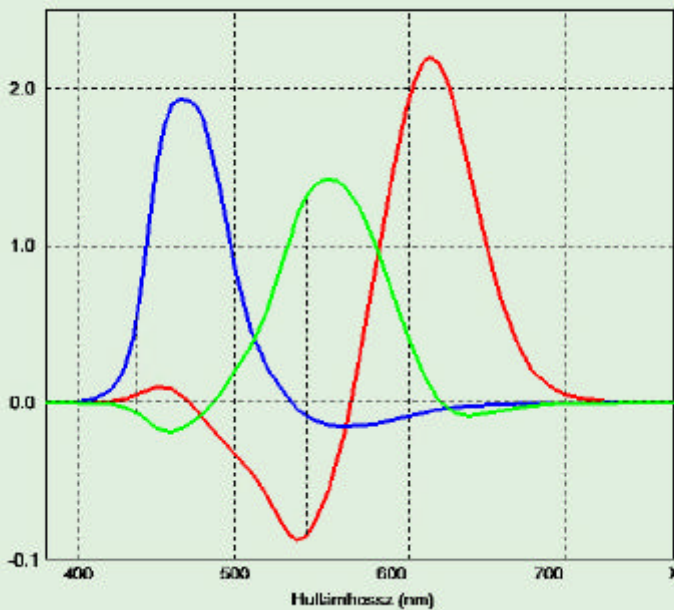
A hasonló (metamer) színekből a látható színek teljes atlasza összeállítható. Ebben az atlaszban a színek többsége három egymástól független (egymással nem kikeverhető) monokróm szín keverékével előállítható, és a három szín aránya alapján katalogizálható. Mai tudásunk szerint a három szín, elnevezése alapszín vagy elsődleges szín (primary color), a legerősebb színingert kiváltó 700 nm-es vörös, 546.1 nm-es sárga és a 435.8 nm-kék. Mivel azonban a három színérzékelő csap spektrális érzékenységi eloszlása átlapoló, nincs három olyan reprezentatív hullámhossz, amelyeknek keverékeivel valamennyi színárnyalat meghatározható lenne. Két szín keveréke mindig kevésbé telített színt eredményez, s a hozzáadott harmadik alapszín pedig a fehértartalmat is növeli. A színháromszög területén kívül eső telített szín tehát csak két méréssel katalogizálható. Az első mérés a mintaszínt összehasonlítja két alapszín keverékével. A második lépés a mintaszínhez a harmadik alapszínből annyit tesz hozzá, annival tompítja, hogy az megfeleljen a két alapszín keverékének. Ez utóbbi hozzáadott alapszín értéke tehát negatív lesz.



4. sz. ábra. A negatív színkeverés szemléltetése a Newton féle színháromszög segítségével. C' helyzete meghatározható a három alapszín keverékével (+50% zöld, +50% kék, 0% vörös). C helyzete viszont csak úgy határozható meg, ha megmérjük, hogy mennyi vöröset kellene hozzáadni C-hez, hogy C'-vel azonos színu legyen (+50% zöld, +50% kék, -30% vörös)

Az első mérésen alapuló trikromatikus színekatalógust Wright (1928) és Guild (1931) egymástól függetlenül végzett vizsgálatai alapozták meg. A spektrum 5 nm-es lépcsőkben tabulált monokróm színeit 17 hibátlan színlátású megfigyelo 2°-os látószög mellett kevert színekkel hasonlította össze. A kevert színeket a fényerősség változtatásával, három, 650 – 530 – 460 nm-esre szűrt, 4800 K° viszonyított színhőmérsékletű fényforrással állítottak elő. A fényerő különbségek mint a színt pontosan meghatározó stimulusok háromszögletű koordináta-rendszerben ábrázolhatók, ahol a katalogizálandó szín egyenlete a következő:

$$C = \pm rR_{650} + \pm gG_{530} + \pm bB_{460}$$



5. sz. ábra. A Guild és Wright kísérletei alapján készült CIE színösszehasonlító függvény, amely a spektrum telített színeihez hasonló metamer színekben a vörös, zöld és kék alapszínek arányát mutatja.

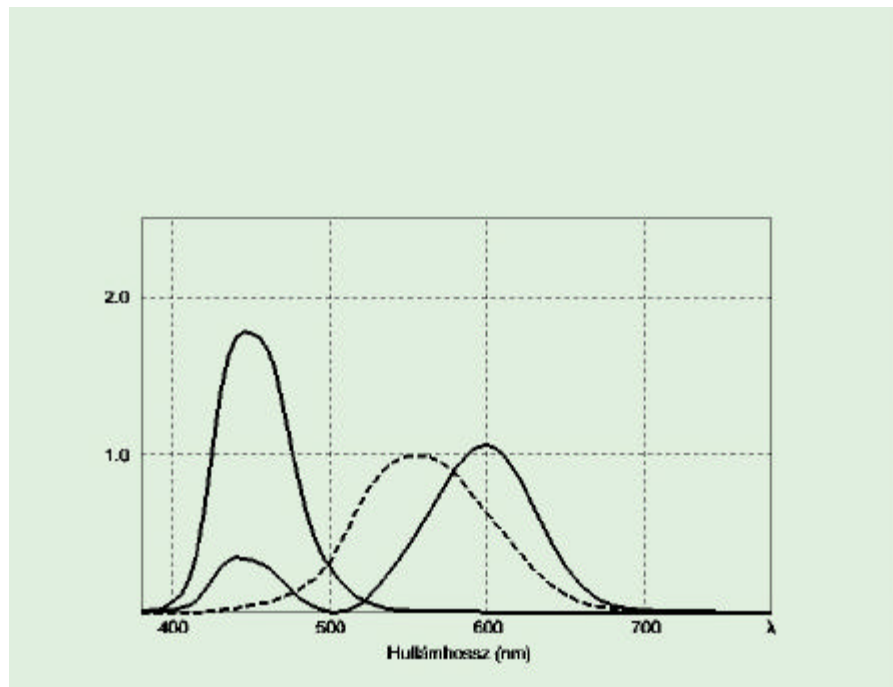
A Nemzetközi Világítási Bizottság (*Commission Internationale de l'Éclairage*) 1931-ben olyan színösszehasonlító segédfüggvényeket javasolt, amelyek segítségével Wright és Guild referenciaértékei háromszögletű téren belül elhelyezhető, azaz minden színérték pozitív. Továbbá a színkoordináták nemcsak szemrevételező színösszehasonlítással határozhatók meg, hanem a spektrális energiaeloszlása alapján, számítással is. A CIEXYZ színrendszerben X, Y és Z elnevezésű - nem létező - színek helyettesítik a vörös, zöld és kék alapszíneket, és a hozzájuk tartozó $x(?)$, $y(?)$, és $z(?)$ segédfüggvények az X, Y és Z alapszínek arányát (és ezzel a szín koordinátáit) 360-830 nm közötti intervallumban 1 nm-es lépcsőkben súlyozzák. A CIE megfogalmazás szerint a szabványos színmérő megfigyelő (*standard colorimetric observer*) a katalogizálandó színt a következő színösszehasonlító egyenletekkel határozná meg:

$$X = k \int P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = k \int P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad Z = k \int P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda.$$

ahol $P(\lambda)$ a katalogizálandó szín spektrális energia eloszlása, a k fényerő együttható hivatott a remissziós színeket fényvisszaverő képességük, az emissziós színeket fényerősségük szerint osztályozni, mégpedig a Y szín súlya alapján. A 0 – 100-ig terjedő skálán normalizált k értéke a háromszögletű koordináta-rendszer középpontjából induló Y_L luminancia tengelyen mérhető. A mértékadó luminancia (a méréshez használt és egyúttal a mértékadó fehér színben található Y mennyisége, azaz

$$k = \frac{100}{\int P_{\text{fehér}}(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

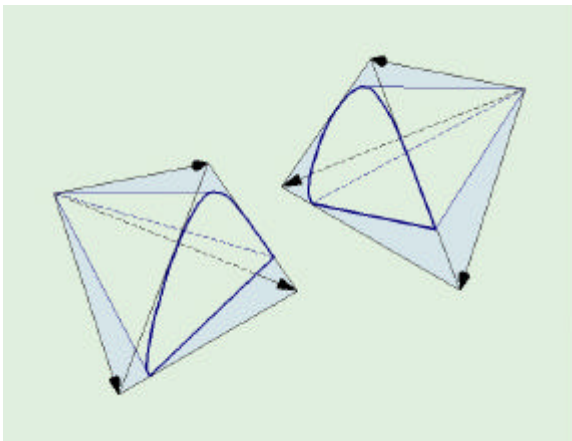
$K=1$ nél ajánlott világosság az emissziós anyagoknál 683 lumen/watt mechanikai fényegyenérték, a remissziós anyagoknál baritlap (BaSO_4) vagy magnéziumoxid. Az Y szín azért lehet mérhető, mert a Y szín $y(\lambda)$ segédfüggvénye nem más mint a korabeli fotópikus luminancia érzékenységi görbe. Lásd sz. ábrát. Ezzel a megoldással színek heterokromatikus világossága összemérhető, viszont a színmeghatározás (domináns hullámhossz és telítettség) elkülönül a fényerőtől. Az energiaegyenleg ugyanis minden színmetszetben Y-tól függő állandó, ezért a lineárisan csökkenő fényerő-színmetszetekben a szín és a telítettség kötött helyzetű. A rendszer furcsasága, hogy az X és Z tengely által közrefogott síkon nincs fényerősség. Ezt a síkot a legjobban a 400 nm-es monokróm kék és a csökkenő fényerősséggel sötétülő árnyalatai közelíti meg, míg a reális fekete, amely az X, Y és Z tengely találkozásánál érinti, itt $Y = Y_L = 0$.



6. sz. ábra. A CIE 1931 XY és Z alapszínekhez tartozó színösszehasonlító függvények.

A Y_{max} illetve $Y_L = 100$ értékhez több mértékadó fehér szín is választható. Ilyen például a CIE standard C kibocsátó, amelynek viszonyított 6774° Kelvin színhőmérsékletű enyhén sárgás színe a napfényt utánozza, ezért koordinátái nem pontosan esnek egybe az $x=y=z=1/3$ középponttal. A CIE standard A kibocsátó viszonyított 2854° Kelvin színhőmérsékletű színét a beltéri megvilágításhoz használják. A CIE standard D65 kibocsátó viszonyított 6504° Kelvin színhőmérsékletű színét a kültéri megvilágításhoz használják.

A színösszehasonlító segédfüggvények nem az XY és Z színek spektrális energiaeloszlását adják, és nem a Wright és Guild féle hármas stimulus nem létező színekre alkalmazott változata. A CIEXYZ segédfüggvények a katalogizálandó színben, amely többféle hullámhosszú fényből tevődik össze, hullámhosszról hullámhosszra határozzák meg az XY és Z színek jelenlétét, és a diszkrét értékek integrálja adja az XY és Z végleges arányát. A X, Y és Z mennyisége kiszámítható spektrométerrel mért spektrális energiamegoszlás alapján, vagy fotóméterrel, két ismert koordinátájú telített szín keverékével összehasonlítva.

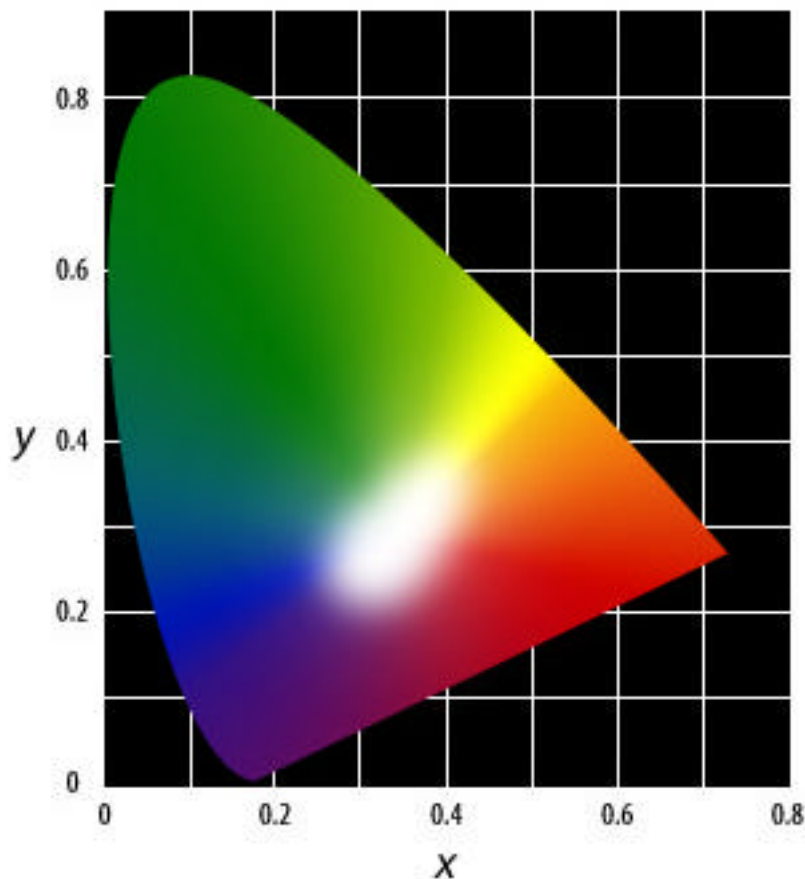
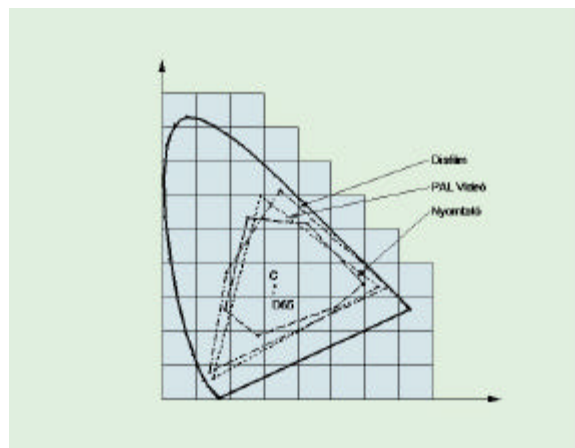


7. sz. ábra. Az 1931-es CIEXYZ színrendszer koordináta-rendszere két nézetből.

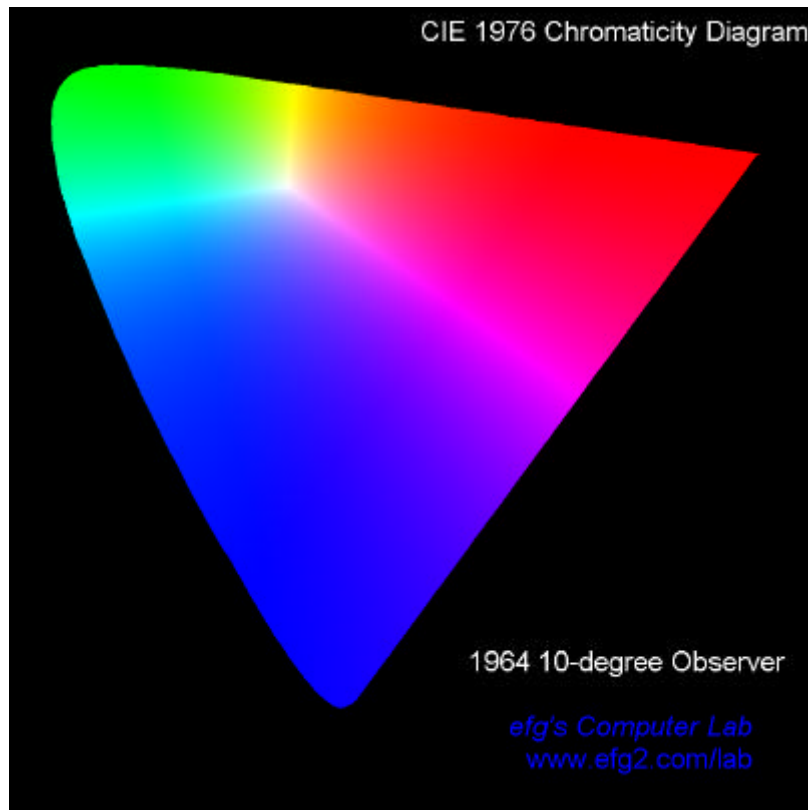
A rendszer akkor képes a színháromszögön belül tartani a színeket, ha a minden színben XY és Z mennyisége normalizált, azaz $X + Y + Z = 1$. Eszerint

$$x = \frac{X}{(X + Y + Z)}, \quad y = \frac{Y}{(X + Y + Z)}, \quad z = \frac{Z}{(X + Y + Z)}.$$

Mivel a színarányok összege mindig = 1, a Z érték elhagyható, és a színek derékszögu koordináta-rendszerben xy koordinátákkal egyértelműen meghatározhatók. Az egyenlo energiájú fehér az $x=0.333...$ $y=0.333...$ pontban található. A telített spektrumszínek a segédfüggvények szélsőértékeinek megfeleloen jellegzetes lópatkó (- cápauszony) alakú görbét rajzolnak, amely a rövidhullámú kékkel indul és a hosszuhullámú vörössel végzodik. A napfénybol hiányzó bibor színek – a kék és vörös keverékei - az átköto egyenes mentén találhatók. E színekben nincs Z szín. A kevésbé telített színek e területen belül helyezkednek el. A pasztel színek a színtér közepén ovális alakot formálnak. A fehér referencia színek a színhomérseklet csökkenésétol függően sorakoznak a vörös szín felé tartó Planck féle íves pályán. A kiinduló alapszínek (700 - 546.1 - 435.8 nm) nincsenek egymástól egyenlo távolságra. Például egy típusos katódsugárcso foszfor színekoordinátái a következők: R(x,y)=0.62,0.33 G(x,y)=0.21,0.685, B(x,y)=0.15,0.063. 8-9. sz. ábra. 1931-es CIExyz színrendszer



A CIEXYZ az elvárásoknak nem tudott maradéktalanul megfelelni. Az egyenletes színérzeti lépcsők a koordináta-rendszerben nem eredményeznek egyenlő távolságokat, mert a színillesztő függvények megállapításánál figyelmen kívül hagyták, hogy a szem színtelítettség érzékenysége a spektrum különböző szakaszain változó. A foveára szűkített 2°-os látószög miatt a rövid hullámhosszú színtartomány terjedelme szűknek bizonyult. A fovea területén ugyanis a kék receptorok száma kevesebb. Ezt a fogyatékoságot az erőteljesen fejlesztett kék foszfor megnövelt telítettsége exponálta. A kék színerő a TV képernyő fényességét növeli. A CIEXYZ többszöri módosítása után 1976-ban a CIE egyidejűleg két színrendszerre is javaslatot tett. A televízió fejlesztése során felhalmozódott tapasztalatok elismeréseként a CIELUV és a CIELAB színrendszerekben a két legfontosabb újdonság a fényerő és a szín összekapcsolása, és a sárga-kék, vörös-zöld kettős színtengely. Emellett a színérzeti lépcsők is egyenletesebbek lettek.



10. sz. ábra. CIELUV színrendszer.

A CIELUV a CIEXYZ továbbfejlesztett változata. Nincs köze a hasonló nevű televíziós LUV színrendszerhez. A koordináta-rendszer három tengelyes ortogonális. Az u és v tengelyen ábrázolhatók a segédfüggvényekkel súlyozott X, Y és Z színarányok, de most a centrumban a színek akromatizálódnak.

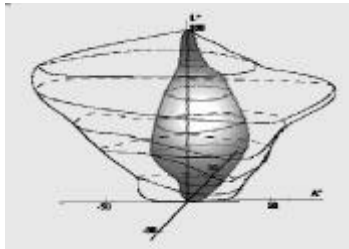
$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z}$$

A fényerő tengely elnevezése L mint luminancia. A katalogizálandó szín világosságát a referencia fehérhez mért Y arány határozza meg.

$$L^* = 116 \cdot \sqrt[3]{Y/Y_w} - 16$$

Bár nagy reményeket fűztek a CIELUV elterjedéséhez, a CIEXYZ népszerűségét nem csökkentette.

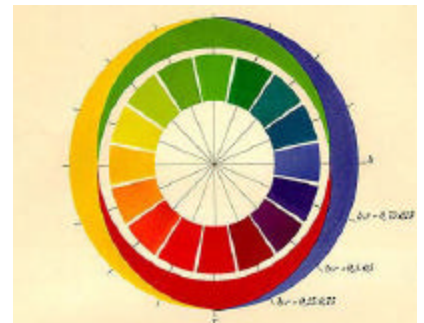
A CIELAB a luminancia tengelyhez ugyanazt az egyenletet használja, mint a CIELUV, de a világosság – telítettség – szín kolormetriai értelmezése módosult. Amíg a CIE XYZ –nál a telítettség a referencia fehérhez viszonyul, addig a CIELAB-nál a színtelenséghez. A fehérhez viszonyított telítetlen szín elfehéredik, ezáltal a világossága nő, a színtelenséghez viszonyított telítetlen szín elszürkül, a világossága változatlan marad. Az L mint Luminancia tengelyen a színek akromatikus fényerősségük/fényvisszaverő tulajdonságuk szerint osztályozhatók 0 -100 közötti értékkel. Adott L értékű színmetszeten a CIELUV-nál azonos fehér tartalmú de különböző heterokromatikus világosságú színek helyezkednek el, a CIELAB-nál különböző fehér tartalmú, de kiegyenlített heterokromatikus világosságú színekkel találkozunk, azaz szín nélkül a metszet azonos világosságú szürke lenne. A CIELAB luminanciát pszichometriai világosságnak nevezik, mert e világosságban a heterokromatikus világosság (sárga világosabb mint a kék) és a fényerősség (két felület fényvisszaverő képessége különböző) kiegyenlítődik. Ezt a színosztályozást a földfelszíni színes televíziós adás igényelte, amely elkülöníti a fekete-fehér (luma) és a szín információkat (chroma). A televízióban két különböző szín, például zöld és kék, nem lehet azonos világosságú. A televíziós színrendszerekről részletesebben lásd később.

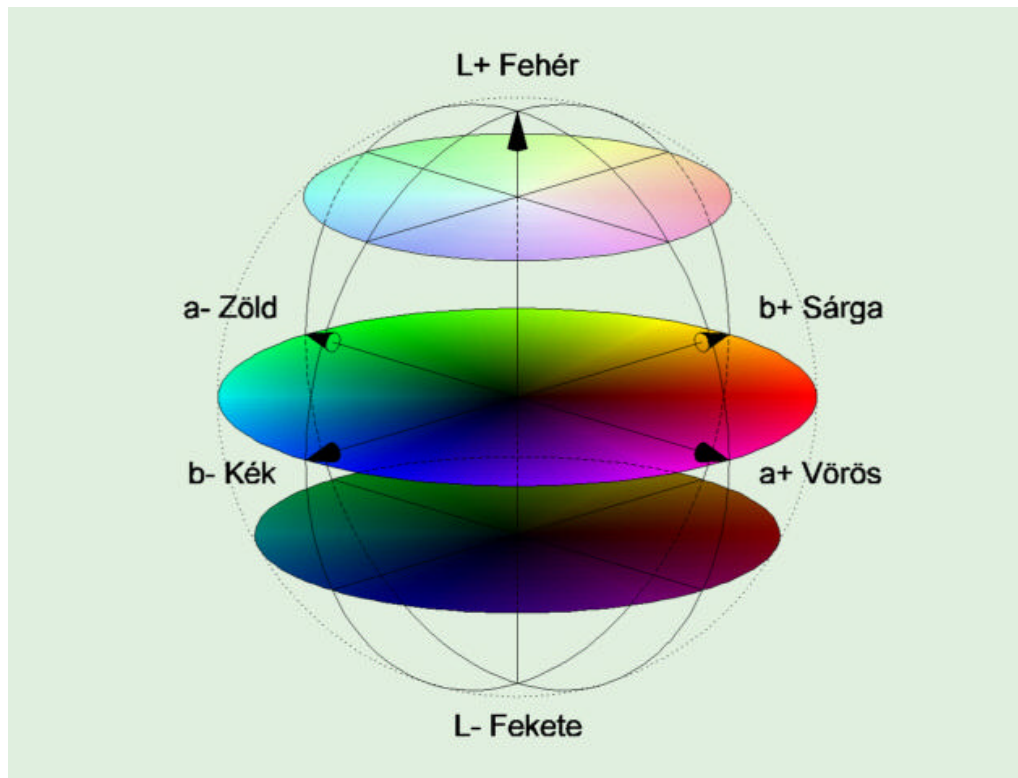


A CIELAB luminancia tengely akromatikus tengely. A tengelynél a színek színtelenek (szürkék), a tengelytől eltávolodva telítettségük fokozódik. A CIELAB telítettséget a szaturáció helyett kromának (Chroma) is nevezik. A színek kiosztása a Hering féle ellentétes színek elméletén alapul, amely szerint egy szín egyszerre nem lehet kék és sárga, illetve vörös és zöld. Az a tengelyen a vörös-zöld színek határozhatók meg, a b tengelyen a kék és a sárga színek. Ez a megoldás nem jelenti a Hering elmélet revideálását, de egyenletesen lépcsőzhető és szemléletes színteret eredményez.

A CIELUV és a CIE XY rendszerekben az xy és uv tengelyeken felvett értékek a színekről nem sokat mondanak. A televíziós színrendszerek is kettős tengelyt használnak.

A szín és a telítettség a két tengelyen felvett abszolút számmal határozható meg. A nagyobb érték azonban nem feltétlenül jelent telítettebb színt, például az L50, A80, B80 kevésbé vörös, mint L50, A50, B20. Ha $A = B = 0$, akkor a szín színtelen, szürke. $L=50$ -nél a fehér-fekete tartalom kiegyenlített, ezen a magasságon kifelé haladva találhatók a legtelítettebb színek. A színtér alul és felül összeszűkül, $L=0$ fekete illetve a $L=100$ fehér értéknél a színeknek nincs $A-B$ értéke. A leegyszerűsítő ábrázolás a CIE LAB terét gömbnek mutatja, fekete-fehér irányban szűkülő meridián metszetekkel. Ebben a rendszerben azonban nincsenek abszolút telített színek, a telítettebbnél is telítettebb színekkel a rendszer bővíthető. Az $A'-B'$ tengely tetszőleges hosszúságú lehet, ezért a realizálható színárnyalatok változó alakú amorf teret töltönek ki, amely a világos pasztelszíneknél sárga irányban, a sötét színeknél kék irányban tágul. A telítettség növelésének nincs fiziológiai vagy pszichológiai határpontja. Az abszolút telített szín az lenne, amely a spektrális érzékenységmegosztás tetopontján a másik két receptort teljesen gátolná. Ezt a történetileg változó alapszínek is bizonyítják: a vöröshez képest a bíbor XX. századi jellemény.





11. ábra. CIELAB színmodel leegyszerűsített ábrázolása. Új telítettség meghatározás.

A CIELAB rendszert a festék- és a nyomtató gyártók használják, mert a szín és telítettség a luminanciától függetleníthető. A fő meridián metszetre különböző világosságú és fekete tartalmú festékszínnek vetíthetők. Így egy palettán egyesíthetők például a földfestékek, a kadmium sárga, ultramarinkék, ciánzöld és ókersárga, illetve a szíenna, szépia, égetett umbra, indigó és krómoxidzöld.

