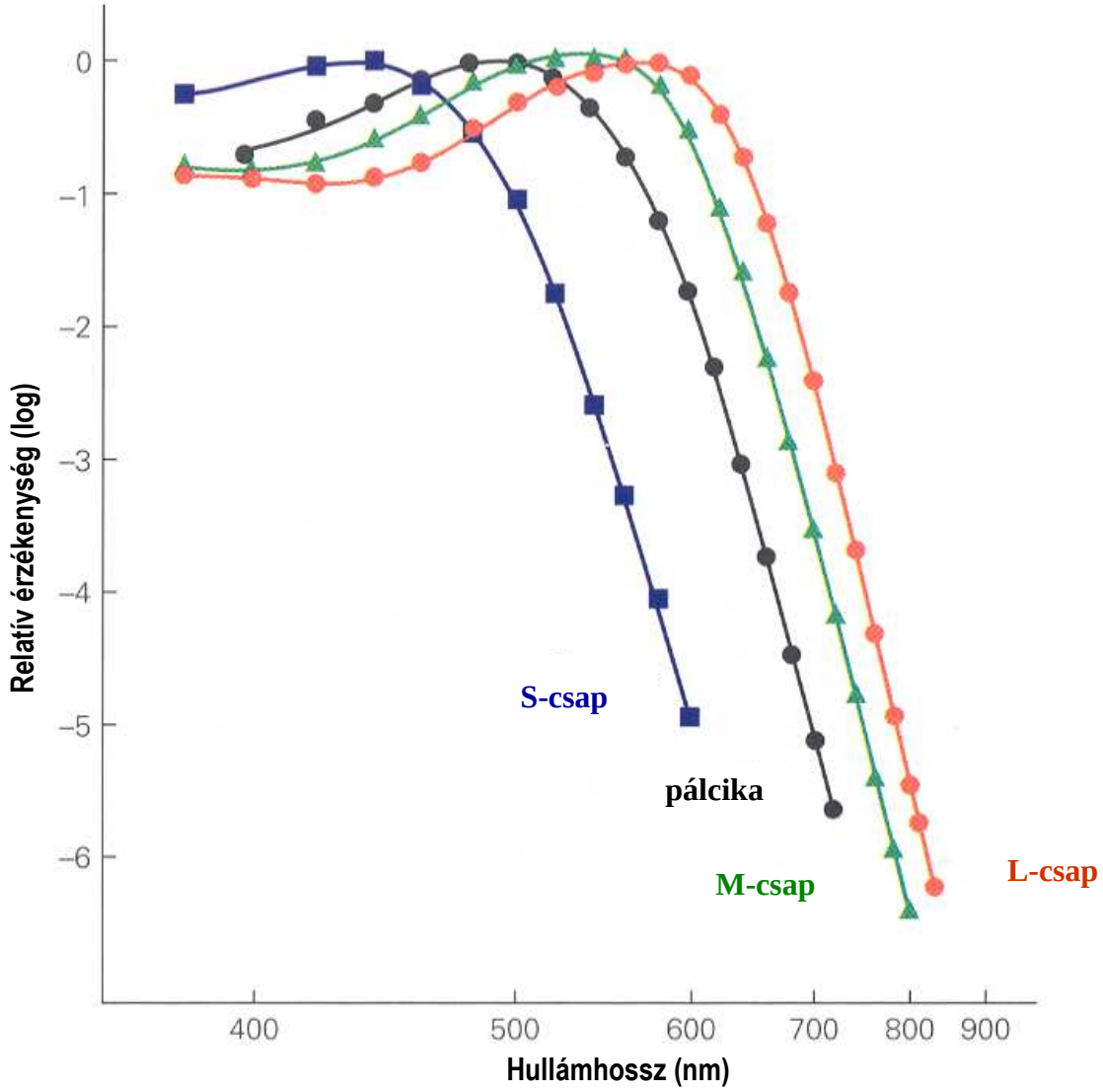
SZÍNLÁTÁS

Szél Ágoston

A színek az élőlények világában meghatározó szerepet játszanak. A tájékozódás, a zsákmányszerzés vagy éppen a ragadozó elől való menekülés elképzelhetetlen a környezetből származó színes információ érzékelése nélkül. Amíg a világos és sötét tónusok megkülönböztetéséhez elegendő egyetlenfajta fényérzékeny molekula (rodopszin), a színek felismeréséhez legalább kétféle látópigmentre van szükség, amelyek elnyelési maximuma (abszorpciós spektruma) különböző hullámhossztartományba esik, hogy a színeket a központi idegrendszer egymáshoz viszonyítva érzékelhesse. A fényérzékeny sejtek látópigmenteket tartalmazó része (fotoreceptor) a szem ideghártyájának meghatározott rétegében helyezkedik el, közvetlenül a pigmenthám alatt. Régóta ismert, hogy a gerincesekben, így az emberben is kétféle fotoreceptor sejt fordul elő. A hengeres alakú pálcikák sem a színérzékelésben, sem az éleslátásban nem vesznek részt, fényérzékenységük azonban igen nagy, így rossz megvilágítási körülmények között is lehetővé teszik a tájékozódást. Éjszaka aktív életmódot folytató állatok retinájában ezért igen nagyszámú pálcikát találunk. A másik fotoreceptorféleséget csapnak nevezzük, mert alakja kúpos. A nappali élőlények retinájában a pálcikák mellett jelentős számú csap helyezkedik el, amelyekben kék-, zöld- vagy vörösérzékeny látópigment fordul elő. Bár ezek csak erős fényben működnek, megfelelő körülmények esetén képesek a színinformáció közvetítésére és az éleslátás biztosítására is. Míg a retina perifériás részein a pálcikák és csapok egymás mellett fordulnak elő, az emberi sárgafolt (macula lutea, fovea centralis) területén kizárólag csapokat találunk. A csapok kizárólagos jelenléte miatt ez az éleslátás helye.

Valamennyi gerincesfaj színlátása nagyjából azonos elveken nyugszik, vagyis a retinában elhelyezkedő különféle csapok és a bennük elhelyezkedő színspecifikus látópigmentek teremtik meg a színlátás morfológiai és biokémiai alapját. Mindehhez természetesen bonyolult enzimrendszer és megfelelő neuronhálózatok is szükségesek. Alacsonyabb rendű gerincesekben (madarakban, hüllőkben) a csapok sokfélesége által biztosított spektrális variációt fokozzák a csapokban elhelyezkedő színes olajcseppek. Ezek a látópigmentet tartalmazó fotoreceptorrész (kültag) és a beeső fény között elhelyezkedő színszűrők, amelyek csak bizonyos hullámhossztartományba eső fényt engednek át (ún. cut-off filterek). Az emlősökben ilyen olajcseppek nincsenek *(1. ábra).*

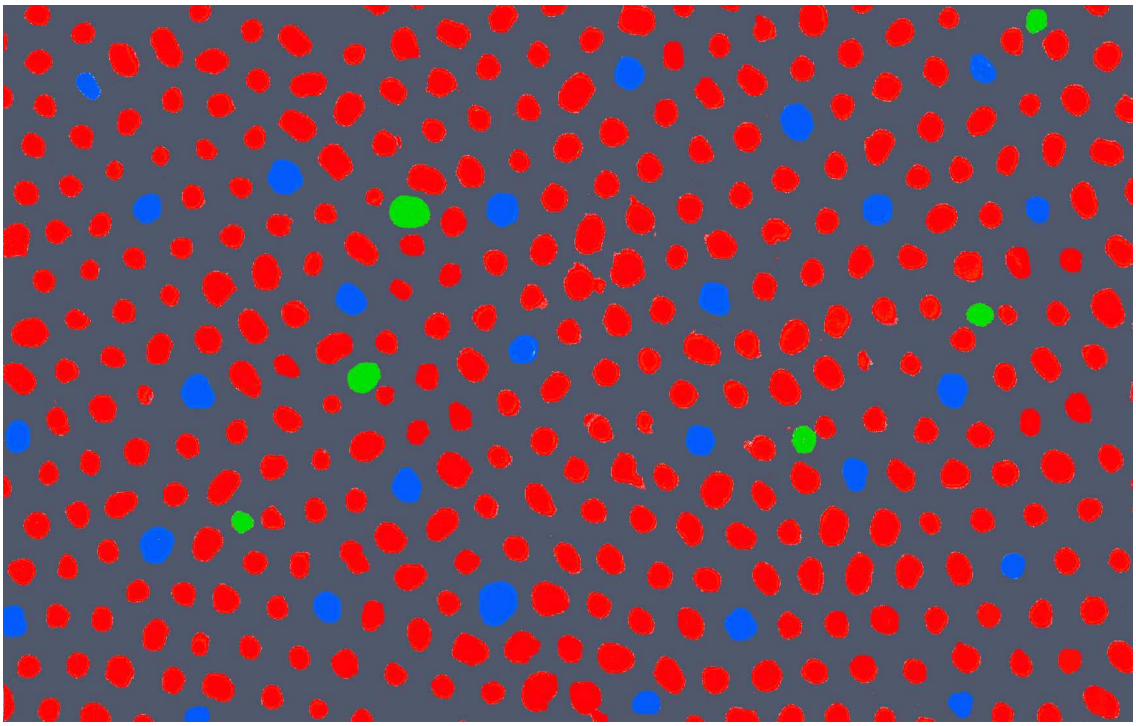


1. ábra. A rodopszin és a három színspecifikus látópigment abszorpciós spektruma

Élettani és genetikai vizsgálatok alapján ma már elég világos képünk van arról, hogy az egyes fajokban milyen hullámhossz-érzékenységű látópigmentek találhatók. Az emlősök legtöbbjére a dikromatikus színlátás jellemző, ami azt jelenti, hogy retinájukban kétféle csap fordul elő. Az egyik csaptípus legerősebben a kék fényre érzékeny, míg a másik csapféleségben olyan látópigment fordul elő, amely a zöld színre a legérzékenyebb. Bizonyos rágcsálók rövidhullámhossz-érzékeny csapjaiban kékérzékeny pigment helyett ultraibolya-érzékeny festéket találunk. Egyes fajokban (pl. hörcsög) egyáltalán nincsenek kék- vagy ultraibolya-érzékeny csapok. A pusztán pálcikákra és „zöld” csapokra épülő monokromatikus látás a szó szoros értelmében nem is nevezhető színlátásnak, hiszen nincs jelen az adott fényviszonyok mellett egyidejűleg kétféle hullámhossz recepciójára képes látósejtkontingens (bár a pálcikák nem vesznek részt a színek érzékelésében, abszorpciós maximumuk a zöld tartományában van). A legfejlettebb főemlősökben a kék-zöld színpár érzékelése mellett kifejlődött a vörösérzékelés képessége is. Az óvilági majmok és az ember retinájában így vörösérzékeny csapokat is találunk, amelyek abszorpciós maximuma a valóságban inkább a narancsszínhez

áll közelebb, de elnyelési görbéjük kiterjed a vörös színig is. A színlátás evolúciójának elemzése arra enged következtetni, hogy a főemlősökben a zöld vegetáció és az égbolt kékjének észlelése mellett a narancsszínű vagy piros gyümölcs azonosítása „tette szükségessé” a harmadik csaptípus megjelenését.

Nagyon érdekes a színspecifikus csapok térbeli eloszlása a retinában. Közismert, hogy a főemlősökben az éleslátás helye egy mindössze néhány milliméter átmérőjű terület (macula lutea, fovea centralis), ahol a feloldóképesség növelése érdekében a csapok nagyon nagy sűrűségben (pálcikák közbeiktatása nélkül) helyezkednek el. A *2. ábra* a vörös-zöld (piros) és kékcsapok (kék) szabályos elrendezését mutatja főemlősben.



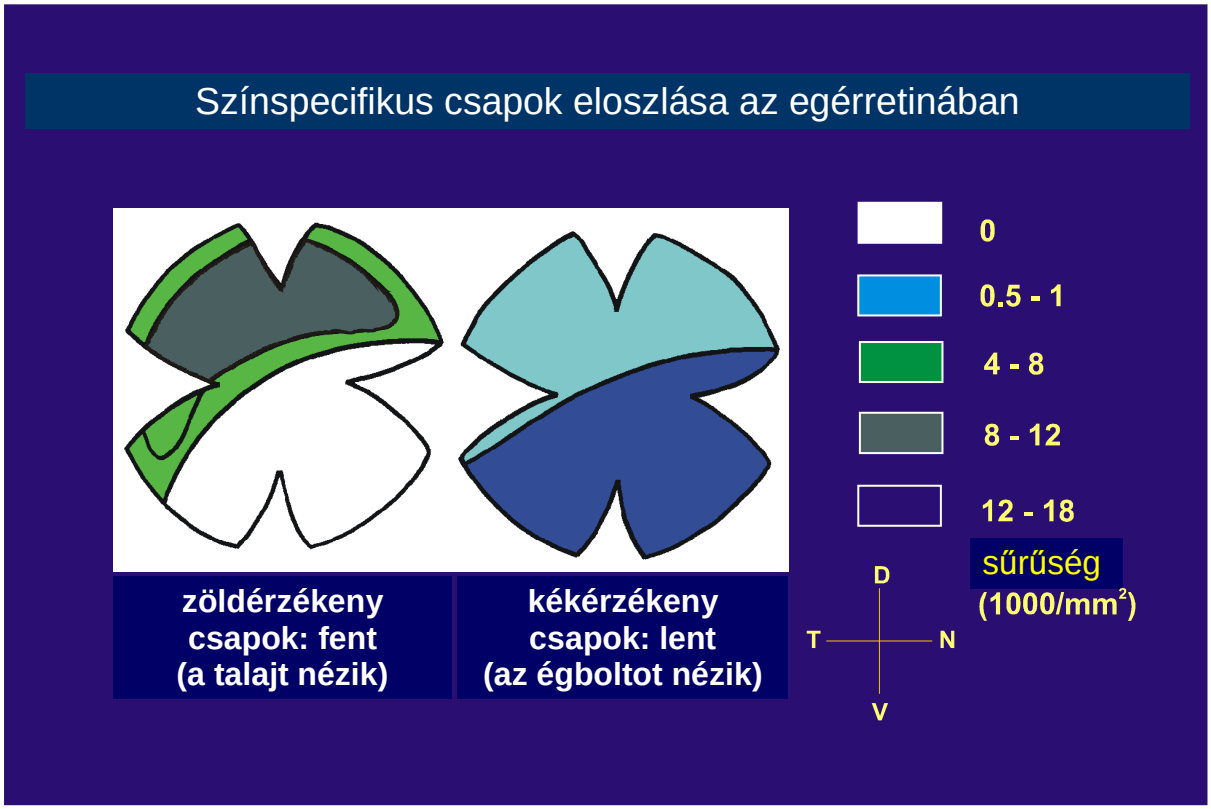
2. ábra. Vörös-zöld (piros) és kékcsapok (kék) szabályos elrendezése főemlősben

A kép a fovea centralis széléről származik, így néhány szabálytalanul elhelyezkedő pálcika (zöld) is látszik. A látásélesség további növelésére a csapok itt egészen keskenyek és hosszúak, így területegységre sokkal több jut belőlük, és nagyobb mennyiségű látópigment fér el bennük, mint a retina más részein. A beeső fény még jobb hasznosítását szolgálja, hogy a retina rétegei ezen a területen jelentősen elvékonyodnak (fovea – kerek bemélyedés), így a fotonok könnyebben jutnak el a fotoreceptorokhoz. A többi emlősben is megfigyelhető egy csapokban gazdagabb körülírt terület (area centralis), amelyben nagyobb a csapsűrűség, mint a periférián, de a pálcikák nem hiányoznak teljesen erről a területről. Érdekes, hogy ragadozókban (pl. macska, tigris) az area centralis alakja kerek; ezekben az állatokban a binokuláris látás igen fontos az áldozat helyének pontos meghatározásában. Olyan állatokban azonban, amelyek nagy sebességgel, nyílt terepen, hosszú ideig futnak, miközben a horizontot teljes szélességében pásztázzák (pl. menekülés közben az antilop és a nyúl), az area centralis vízszintesen elnyújtott, ovális terület. Rágcsálókban nem beszélhetünk area centralisról, mindössze jellegzetes centroperiférias gradiens figyelhető meg, vagyis a retina közepén

magasabb az éleslátásra (és színlátásra) képes csapok sűrűsége, és ez a sűrűség a periféria felé fokozatosan csökken.

A fenti megállapítások egyszerű szövettani képek alapján igazolhatók, hiszen a csapok és pálcikák morfológiai eszközökkel jól megkülönböztethetők. Sokkal nehezebb dolgunk van akkor, ha a színspecifikus csapok eloszlását kívánjuk vizsgálni. Ehhez olyan antitestekre van szükségünk, amelyek az egyes látópigmenteket felismerik, és az antigén-antitest reakció segítségével detektálhatóvá teszik az egyes csaptípusok topográfiai elhelyezkedését. Nagyon sok emlősben a zöldérzékeny csapok száma egy nagyságrenddel meghaladja a rövidhullám-érzékeny csapokét. Ennek az lehet a magyarázata, hogy a középhullámú tartományba eső zöld szín kínálja a legtöbb hasznos információrészletet az uralkodó zöld növényzet környezetében. Az égbolt kékjében viszonylag kevés részlet felismerése szükséges, ezért annak áttekintésére jóval kevesebb kékcsap is elegendő. A kékérzékeny csapok az emberi szemben is mindössze az összes csap mintegy egytizedét teszik ki, a többi csap – nagyjából fele-fele arányban – zöld-, illetve vörösérzékeny.

A kilencvenes évek elején nagy meglepetést keltettünk azzal az immuncitokémiai vizsgálatsorozatunkkal, amelyet a SOTE-n készített ellenanyagkönyvtárral végeztünk, mert kiderítettük, hogy a korábban említett centralis, csapgazdag területeken kívül bizonyos emlősökben jelentős heterogenitás figyelhető meg az egyes csapok eloszlásában. Megállapítottuk, hogy számos fajban (főleg rágcsálókban) csak a retina felső (dorsalis) felére jellemző a kékérzékeny és zöldérzékeny csapok 1:10 arányban való megoszlása. A retina alsó (ventralis) részén ezzel szemben kizárólag kékérzékeny csapokat találtunk *(3. ábra)*.



3. ábra. Az egérretina csaptérképe

A meghökkentő topográfia magyarázata minden bizonnyal abban rejlik, hogy a fordított képalkotás miatt az alsó retinafél az égboltot pásztázza. A kisméretű rágcsálók számára a felülről érkező ragadozó sziluettje életfontosságú információt hordoz, a nagyszámú, kék (vagy ultraibolya) színre érzékeny csap jelenléte miatt ez az információ hamarabb észlelhető. A földközelben elhelyezkedő zöld vegetáció leképezésére ugyanakkor alkalmasabb a zöldérzékeny csapokban gazdag felső retinafél. A jellegzetes osztott retinát azóta számos más fajban is leírtuk, és más (pl. spektrofotometriai) vizsgálatok is megerősítették a korábban nem ismert eloszlási forma létét. Meg kell jegyezni, hogy sok fajban ilyen topográfiai szeparáció csak korlátozottan mutatható ki, vagyis a kékérzékeny csapok kisebb-nagyobb dominanciája észlelhető az alsó retinaterületeken, de a zöldérzékeny csapok teljes hiánya nem tapasztalható. Ismét más fajokban pedig a polarizált eloszlás egyáltalán nem figyelhető meg.

Jelen munka terjedelmét messze meghaladja a látópigmentek genetikájának ismertetése, gyakorlati jelentősége miatt azonban feltétlenül meg kell említenünk, hogy a trikromatikus színlátású emberben a törzsfejlődés „legfiatalabb" látófestékének, a vörösérzékenynek, illetve elődjének, a zöldérzékenynek az aminosavsorrendje csaknem teljesen azonos. A két gén ugyanazon kromoszómán, egymás mögött (tandem) helyezkedik el, és másolódik. A közelség és a hasonlóság miatt viszonylag gyakori az olyan defektus (színvakság, színtévesztés), amelynek következtében a két látópigment közül csak az egyik fordul elő funkcióképes formában, a másik azonban hiányzik. A vörös-zöld színtévesztés éppen ezért általában veleszületett fejlődési rendellenesség. Mivel a vörös és a zöld pigment génje az X-kromoszómán van, nemhez kötött az öröklődés – férfiakon sokkal gyakoribb. Meg kell jegyezni, hogy az aminosavsorrend hasonlósága (96%-os azonosság) miatt a mai napig nem sikerült előállítani a kétféle látópigment egymástól való elkülönítésére alkalmas ellenanyagokat. A kékérzékeny pigment aminosavsorrendje ezzel szemben jelentősen különbözik a másik két pigmentétől, más a kék pigmentet kódoló gén kromoszomális elhelyezkedése is, ezért a kékérzékenység hiányát nemigen okozza genetikai zavar. Ugyanakkor a kékérzékeny fotoreceptorok szerkezete (éppen a látófehérje eltérő volta miatt) alapvetően más, ezért sokkal könnyebben károsodik oxigénhiány vagy anyagcserezavar következtében. Ennek tudható be, hogy bizonyos krónikus betegségek (pl. diabétesz) esetén a kék színlátás zavara jelenik meg. A kor előre haladtával is nagyobb arányban pusztulnak az amúgy is kisebb számban jelen levő kékcsapok. Ennek következtében alkonyatkor hamarabb romlik a látásfunkció: mivel a sötétedő égbolt kékje a képalkotásban ilyenkor egyre nagyobb szerepet játszik, ugyanakkor éppen ennek a színnek az érzékelése romlik a pusztuló kékcsapok miatt.