

A szem

A geometriai optika alapjai A szem felépítése A látás jellemzése A receptorsejtek A fényérzékelés mechanizmusa Színlátás

A geometriai optika alapjai

A szem feladata, hasonlóan a legtöbb optikai eszközhöz, az hogy képet alkosson. Leggyakrabban fényképezőgéphez hasonlítják: az objektívnek felelnek meg a fénytörő elemek, a bejutó fény mennyiségét szabályozó fényrekesznek (blende) a pupilla, a filmnek pedig a retina.

A szem képalkotása jól leírható a geometriai optika segítségével, amely a fény terjedését és törését vizsgálja, úgy, hogy a fénysugarakat egyeneseknek tekinti, és a fény hullámjellegét figyelmen kívül hagyja.

A fénytörés

A képalkotás alapja a fénytörés.

Egy új közegbe lépve a fény megváltoztatja terjedési irányát, ha a két közeg törésmutatója más, azaz ha a két közegben a fény terjedési sebessége különböző.

Törésmutató

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\text{a fény terjedési sebessége vákuumban}}{\text{a fény terjedési sebessége az adott közegben}}$$

Példák:

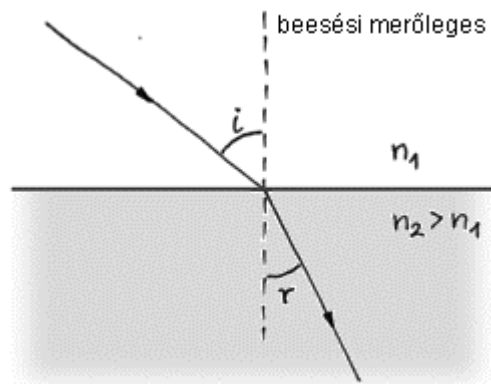
$$n \text{ (levegő)} = 1$$

$$n \text{ (víz)} = 1,33$$

$$n \text{ (üveg)} = 1,5 - 1,9$$

A fénytörés törvénye (Snellius-Descartes törvény)

Megadja, hogy egy i szög alatt érkező fénysugár milyen r szög alatt törik meg.



$$\frac{\sin i}{\sin r} = \frac{n_2}{n_1}$$

vagy

$$n_1 \sin i = n_2 \sin r .$$

Megjegyzések

Sűrűbb közegbe lépve a fény a beesési merőlegeshez törik (mint az ábrán).

A fény sugármenete megfordítható, tehát a felrajzolt fénysugár visszafelé is ugyanazon az úton haladna.

Ritkább közegbe lépve a beesési merőlegestől törik. Ez utóbbi esetben létezik olyan beesési szög (a határszög), amely esetén a fény 90° alatt törik meg, azaz a két közeg határán halad tovább. Ennél nagyobb szög alatt érkező fény egyáltalán nem törik meg, teljes visszaverődést szenved.

Optikai lencsék

A legegyszerűbb képalkotó eszközök közé tartoznak az optikai lencsék, amelyek két törőfelületből állnak. Legfontosabb típusuk a gömbi lencsék: olyan átlátszó, többnyire üvegből készült testek, amelyeket két gömb- vagy egy gömb- és egy síkfelület határol.

A lencseegyenlet

Megadja, hogy a lencsétől milyen távol (k) keletkezik a lencsétől t távolságra lévő tárgy képe.

$$\frac{1}{t} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$$

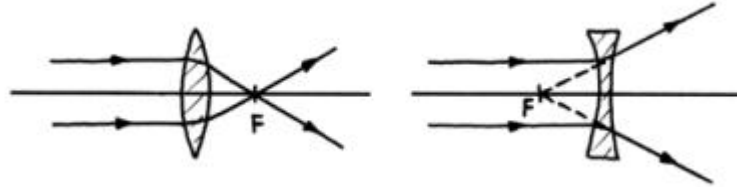
ahol f a lencse fókusz távolsága.

Lencsék képkalkotása

A kép megszerkesztéséhez három nevezetes sugármenetet használnak fel, amelyek egyúttal három fontos pontot is meghatároznak.

1/

A főtengellyel párhuzamosan beeső sugár törés után a képoldali fókuszponton (F) megy át (szórólencse esetén úgy megy tovább, mintha a fókuszból érkezne).

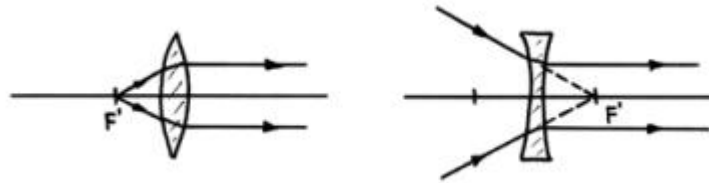


Ez a szabály a lencseegyenletből is megkapható:

Párhuzamos sugarak végtelenben lévő tárgyról érkeznek, tehát $t = \infty$. Behelyettesítve azt kapjuk, hogy $k = f$, azaz a kép a lencsétől f távolságban, a fókuszponton keletkezik.

2/

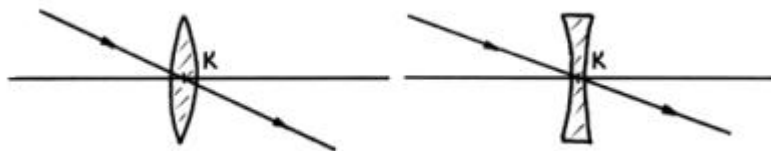
A tárgyoldali fókuszponton (F') át beeső (szórólencsénél a fókuszpont felé tartó) sugár törés után a főtengellyel párhuzamos lesz.



Ez a lencseegyenletben azt jelenti, hogy a lencsétől f távolságban, a tárgyoldali fókuszponton elhelyezett tárgy képe ($t = f$) a végtelenben keletkezik ($k = \infty$).

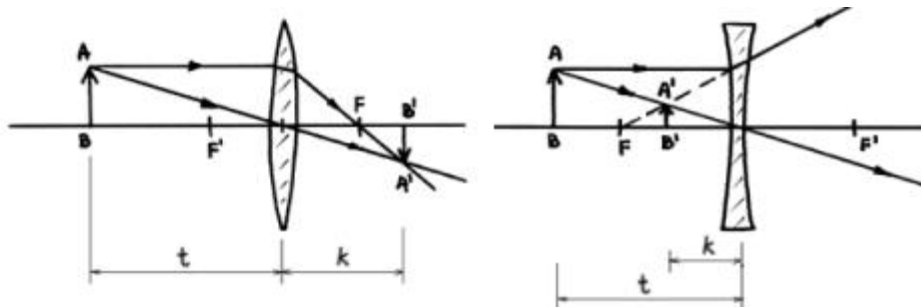
3/

A lencse csomópontján (K) átmenő sugár nem változtat irányt. A csomópont vékonylencsék esetén a lencse középpontja.



Képszerkesztés

A hibátlan képkalkotás fontos ismérve, hogy egy tárgypontnak mindig egyetlen képpont felel meg. Egy képpont megszerkesztéséhez elegendő két, a tárgypontból kiinduló sugarat megrajzolni, mivel ezek metszéspontja pontosan meghatározza a képpontot. Ilyenkor az előző három nevezetes sugár közül rajzolunk meg kettőt.



A keletkezett kép lehet

a) egyenes állású vagy fordított,

b) nagyított ($N > 1$) vagy kicsinyített ($N < 1$), ahol N a lineáris nagyítás:

$$N = \frac{\text{kép nagysága}}{\text{tárgy nagysága}} = \frac{k}{t}$$

c) valódi vagy látszólagos (virtuális). Előbbi esetben a kép ernyőn felfogható, utóbbi esetben a sugarak nem metszik egymást, csak olybá tűnik, mintha egy pontból jönnének.

Fókusz távolság és törőerősség

Minden lencsének két fókuszpontja van, mindkettő a lencsétől f távolságban, a lencse két oldalán. Az f a lencseegyenletben is szereplő fókusz- vagy gyújtótávolság. Kiszámítható, ha ismerjük a lencsét határoló gömbfelületek sugarait (R_1 , R_2), és a lencse anyagának törésmutatóját (n):

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

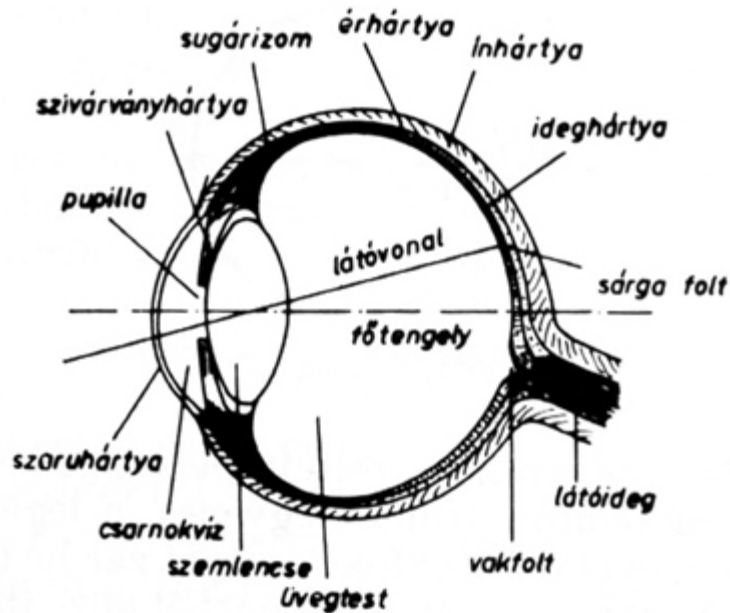
Az f a lencse fénytörő képességét jellemzi. Egy "erősebb", nagyobb törőerejű lencse fókusz távolsága kisebb. Használható még a törőerősség, amely a fókusz távolság reciproka:

$$D = \frac{1}{f(\text{m})} \text{ (dioptria)}$$

Gyűjtőlencsék esetén a törőerősség (D) és a fókusz távolság (f) pozitív.

Szórólencsék esetén mindkettő negatív.

A szem felépítése



A szem mint optikai rendszer

A szembe jutó fény négy határfelületen törik meg, amíg eljut a retinára. A határfelületek, és a hozzájuk tartozó törőerőségek (végtelenbe néző szem esetén) a következők:

$$\text{levegő} \xrightarrow{48} \text{száruhártya} \xrightarrow{-5} \text{csarnokvíz} \xrightarrow{7} \text{szemlencse} \xrightarrow{12} \text{üvegtest}$$

A szem össz-törőereje tehát kb. 60 dioptria. A fény legnagyobb mértékben a levegő-száruhártya határon törik meg. A lézeres szemműtétek során a száruhártya felszínéről égetnek le egy réteget oly módon, hogy a száruhártya felszínének görbületi sugara, így törőereje is épp a megfelelő mértékben változik meg.

Ahhoz, hogy a szem különböző távolságban lévő tárgyak képét egyaránt képes legyen a retinára fókuszálni, változtatnia kell törőerejét. Ezt a folyamatot hívják távolsági alkalmazkodásnak, vagy akkomodációnak.

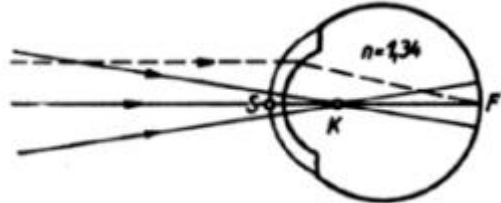


Akkomodáció során a lencse törőereje változik meg. A lencsét körülvevő sugárizmok összehúzódásakor a lencsét kifeszítő rostok elernyednek, a lencse domborúbb lesz. Ekkor főleg a szemlencse elülső felületének görbülete változik (kb. 10 mm-ről 6 mm-ig), nő a

szemlencse átlagos törésmutatója is, így a szem törőereje kb. 60-ról 70 dioptriára nő.

A redukált szem

A szem optikai szempontból közelítőleg helyettesíthető a redukált szemmel (ábra), amely csak egy törőfelülettel rendelkezik; ennek görbületi sugara 5,1 mm, tetőpontja 2,3 mm-re a szaruhártyáé (S) mögött van. E felület K görbületi középpontja a redukált szem csomópontja: a K felé tartó összes sugarak K-n irányváltoztatás nélkül mennek át.



A retinán keletkező valódi kép kicsinyített és fordított. A képet az agy látóközpontja „fordítja meg”.

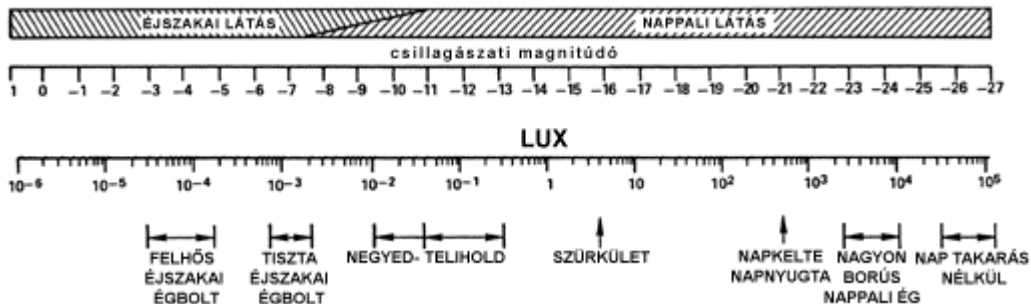
Számítási feladat

A végtelenbe néző szem törőereje 60 dioptria. A retinától milyen távol helyezkedik el a redukált szem csomópontja (17 mm)? Mennyivel nő a szem törőereje ha egy 1 m-re lévő tárgyat nézünk (1 dioptria)? Mekkora a tárgy képe a retinán, ha a tárgy 10 cm magas (1,7 mm)?

A látás jellemzése

A szem érzékenysége

A szem bámulatosan széles fényerősség tartományban képes fényérzékelésre: az átfogott tartomány tíz nagyságrendnyi, azaz a minimális és a maximális intenzitás közötti szorzó 10.000.000.000.

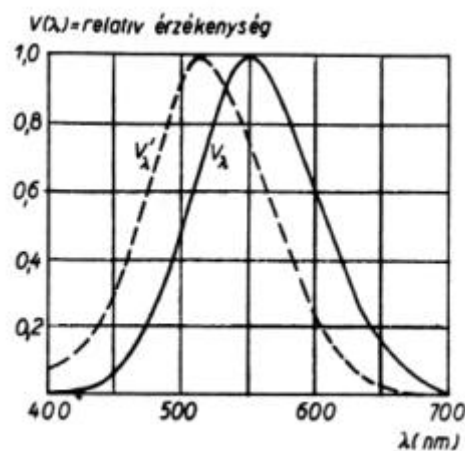


Képesek vagyunk látni ragyogó napfényben, de megfelelő körülmények között a szem akár 10 foton érzékelésére is képes. Ilyen nagyfokú érzékenységhez hozzászokásra, adaptációra van szükség. A teljes sötétadaptáció kb. 40 percet vesz igénybe. Adaptáció nélkül az érzékelt tartomány nagyjából 3 nagyságrendnyi.

Gyenge fényre nem a látógödör (fovea centralis), hanem a környezete a legérzékenyebb, mert itt található a legtöbb pálcika. Ezért könnyebb észrevenni egy halvány csillagot ha nem rá, hanem mellé nézünk. A csapsejtek színeket és finomabb részleteket érzékelnek.

A színérzékenységi görbe

Normális megvilágítás mellett az emberi szem kb. a 400–700 nm közötti hullámhosszakat érzékeli, ekkor az 555 nm-es sárgászöld fényre a legérzékenyebb. Gyenge megvilágításnál az érzékelt tartomány kb. 380-tól 650 nm-ig terjed, 507 nm-nél található maximummal. Az alábbi ábra a színérzékenységi görbét ábrázolja, ahol V_λ a normális, V'_λ a gyenge megvilágításhoz tartozik.



Mivel az UV tartományt főleg a lencse szűri ki, a lencse műtéti eltávolítása után az ember képes az UV tartomány egy részét látni.

A szem színi felbontása 500 nm-nél 1 nm, a látható spektrum alsó részén kb. 6 nm.

A szem felbontóképessége (látásélesség)

Két pont különállónak látszik, ha a pontokból kiinduló, K-n áthaladó sugarak szöge kisebb mint a látásélesség határszöge amely 1' (1 ívperc). Ekkor 1 m távolságból szemmel „felbontható” két egymástól 0,3 mm-re lévő pont.

Kiszámítható, hogy ekkor a két kép a retinán mintegy 5 μm-re van egymástól. Összevetve ezt a kb. 2 μm-es receptorok közötti átlagos távolsággal, kiderül, hogy két pont akkor bontható fel, ha képük két olyan receptorra esik, amelyek között van egy harmadik, amely nem jön ingerületbe. A felbontóképesség ily módon függ a receptorok közötti távolságtól: legnagyobb a látógödörben (fovea centralis), mert itt maximális a receptorsűrűség.

A térbeli látás

Mindkét retinán alkotott kép sík! De mivel más perspektívájúak, az agy látóközpontja térhatású képpé egyesíti azokat. Fél szemmel a távolságok nehezen becsülhetők.

Ezt alkalmazzák a sztereomikroszkóp esetén.

Térbeli hatás érhető el sík képekkel is, ha a képet a két szem nézőpontjának megfelelő két képből állítják össze, és megfelelő szűrőn át nézve mindegyik szem csak a neki szánt képet látja. A szűrőpár lehet vörös és zöld üveg, vagy két merőlegesen elhelyezett polarizátorból, ez utóbbit használják a 3D mozikban.

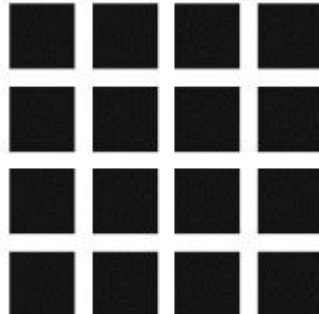
Optikai csalódások

Nem fizikai, hanem fiziológiai és pszichológiai okokra vezethetők vissza.

Kontraszthatások. Az intenzitásokat a környezettől függően nagyobbak vagy kisebbnek érezzük. Az alábbi szürke pontok egyformán sötétek



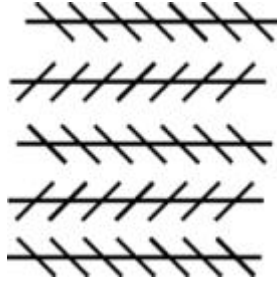
A négyzetháló kereszteződéseiben nincsenek szürke foltok.



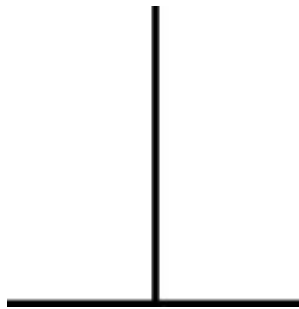
Az alábbi két terület átlagos szürkisége azonos, bár a jobb oldalt sötétebbnek véljük. A kontraszt eltűnik, ha egy ceruzával eltakarjuk a határvonalat.



Nagyságra és távolságra vonatkozó csalódások



A függőleges távolságokat általában nagyobbak becsüljük, mint a vízszinteseket, mint pl. az alábbi ábrán, ahol a két szakasz egyforma hosszú.



Egyes vélemények szerint ez az evolúció során alakult így, hogy “megvédje” az embert a mélységek és magasságok hordozta veszélyektől. Érdeemes elgondolkodni azon, hogy ezek alapján agyunk nem a természet objektív megismerését szolgálja, hanem a túlélést.

Szemhibák, szemüvegek

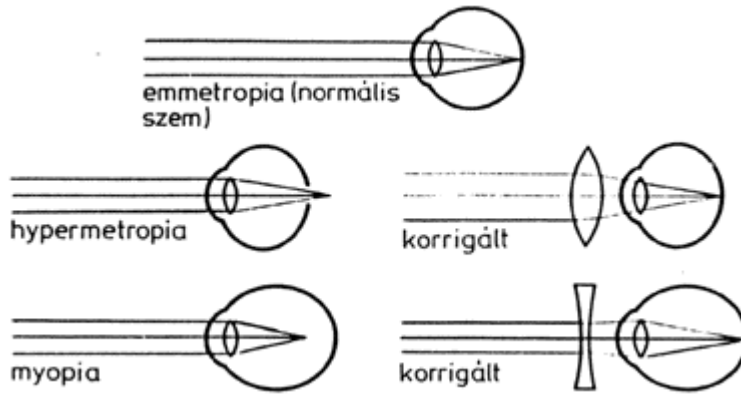
A helyes látású szem akkomodáció nélkül a főtengellyel párhuzamos sugarakat a sárgafoltra fókuszálja. Tehát a legtávolabbi élesen látható pont, a *távolpont* a végtelenben van.

Ha a távolpont közeledik, azaz adott pontnál messzebb nem látunk élesen, *rövidlátásról*, myopiáról beszélünk. A rövidlátó szem a retina elé fókuszálja a képet.

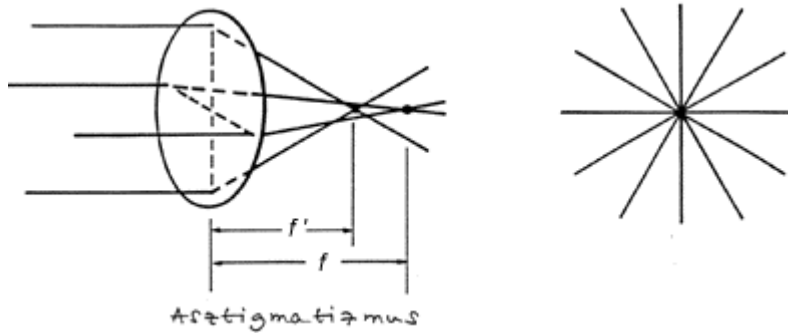
A legerősebb alkalmazkodás mellett élesen látható legközelebbi pont, a *közelpont* 10 éves korban kb. 7 cm, 30 éves korra kb. 15 cm, 60 éves korra kb. 80 cm. Ha a közelpont távolodik, *távollátásról* beszélünk. A távollátó szem a retina mögé fókuszálja a képet.

Öregkori látás (presbiopia) során a közelpont távolodik, főleg azért, mert a lencse rugalmassága csökken. Ha a távolpont eközben közeledik, bifokális szemüveget használnak.

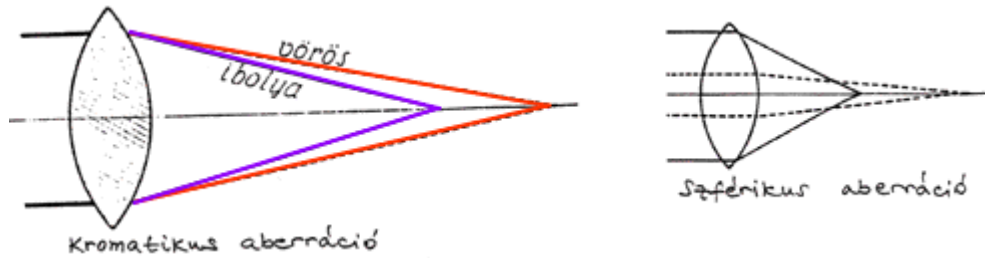
A *tiszta látás távolsága* amelynél nem megerőltető alkalmazkodás mellett lehet olvasni, írni, 25 cm.



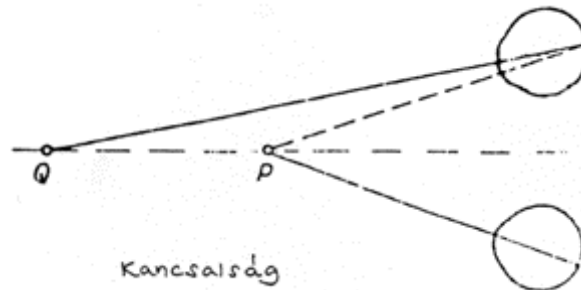
Asztigmatizmus esetén a szem az egymásra merőleges vonalakat nem látja egyszerre élesen. Az ok hogy a szem két egymásra merőleges síkban vett gyújtótávolsága különbözik. Hengerlencsés szemüveggel korrigálható.



Kromatikus aberráció esetén a különböző színű fénysugarak más pontba fókuszálódnak. Szférikus aberráció esetén a főtengelytől különböző távolságban érkező sugarakra vett fókusztávolság különbözik.



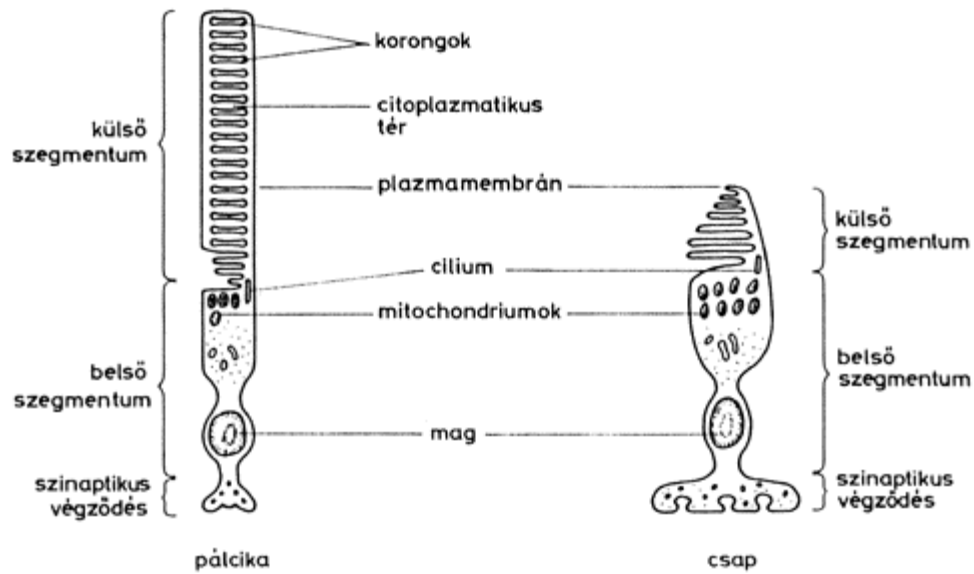
A kancsalság hibás szemállás. A két szem látóvonalára nem ugyanabban a pontban metszi egymást, más pontokat látnak élesen.



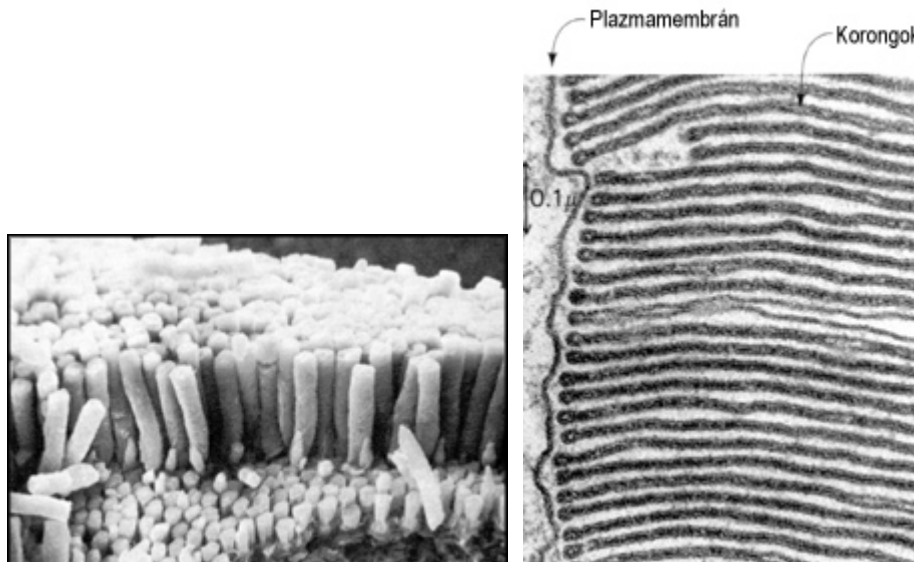
A receptorsejtek

A szem működése szempontjából az első lépés az, hogy a szem, mint optikai eszköz a tárgy képét a retinára vetíti. A második lépésben a retinát alkotó receptorsejtek a rájuk eső fényjelet átalakítják idegi impulzusokká.

A csapok és pálcikák felépítése



A külső szegmentumban zajlik a fényérzékelés folyamata, a belsőben leginkább ATP és fehérjék szintetizálódnak.



Pálcikák elhelyezkedése a retinában. Korongok egy pálcika külső szegmentumában. Elektronmikroszkópos felvételek.

A receptorsejtek tulajdonságai

Nappali látás – csapok,
Sötétben látás – pálcikák,
Szürkületi látás – csapok és pálcikák.

Pálcika	Csap
Kis fényintenzitást képes érzékelni (optimális esetben akár 1 fotont!)	Kevésbé érzékeny, de nagy intenzitástartományban érzékel
Közepes fényerősségnél válasza telítődik	Nincs telítődés
Főleg a retina perifériáján található	Foveaban, főleg fovea centralis
Egy ganglionnak több pálcika adja át az ingerületet (nagyobb érzékenység, kisebb térbeli felbontás)	Kevésbé konvergáló idegi kapcsolatok (jobb térbeli felbontás)
Nem érzékel színeket	Színérzékes

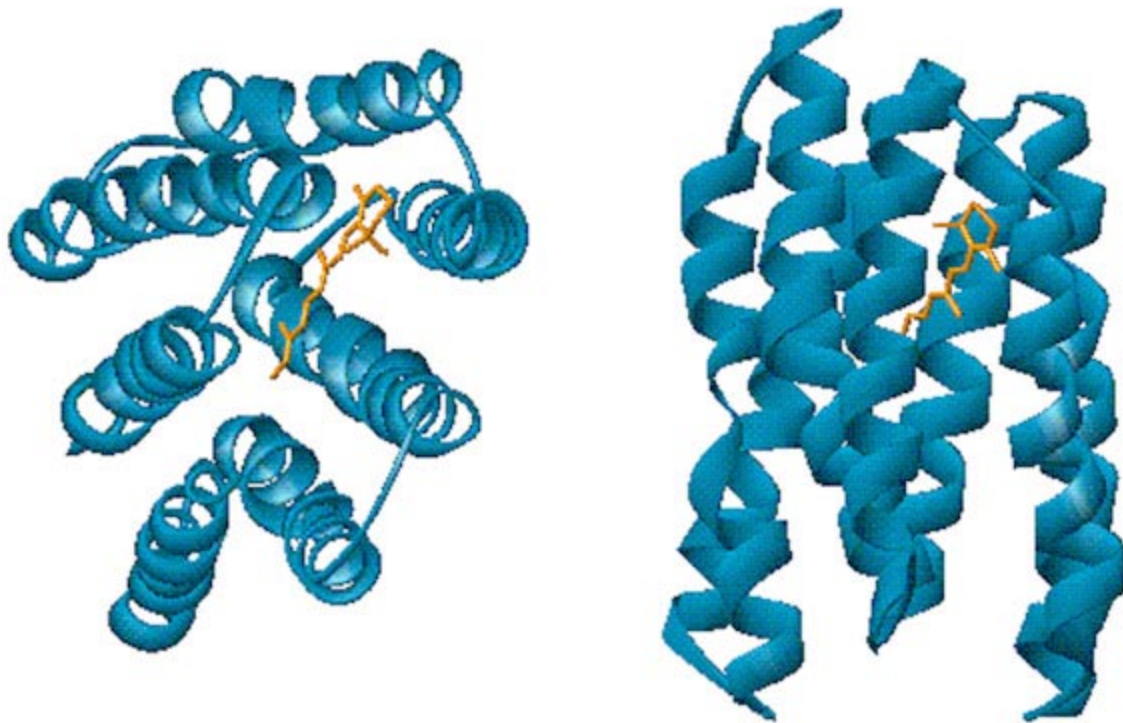
A fényérzékelés mechanizmusa

A csapok és pálcikák működési elve azonos. Mindkettő alapvetően ugyanúgy alakítja át a beérkező fényingert az idegrendszer számára is használható kémiai ingerré.

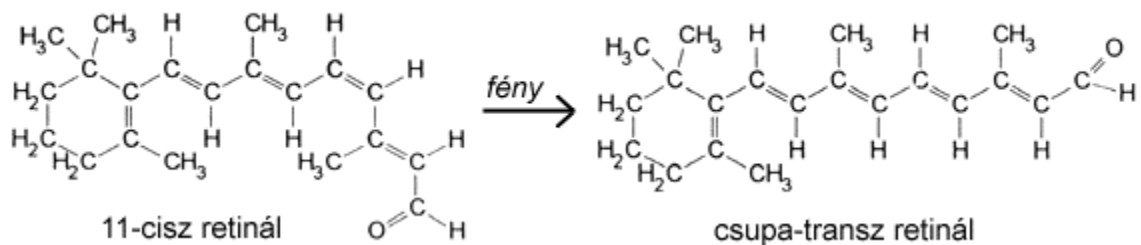
A fényérzékelés első lépésében a beérkező fotont a fotopigment (rodopszin, magyarul látóbíbor) elnyeli. A rodopszin molekula a korongok membránjába épül be. Két részből áll:

- 1/ egy fehérjéből, 7 transzmembrán alfa-hélix szakasszal = *opszin*,
- 2/ és egy kromofórból (az A vitamin aldehidje) = *retinál*.

A kromofór a fehérjeláncok között foglal helyet, kovalensen kötődik egy aminosavhoz.

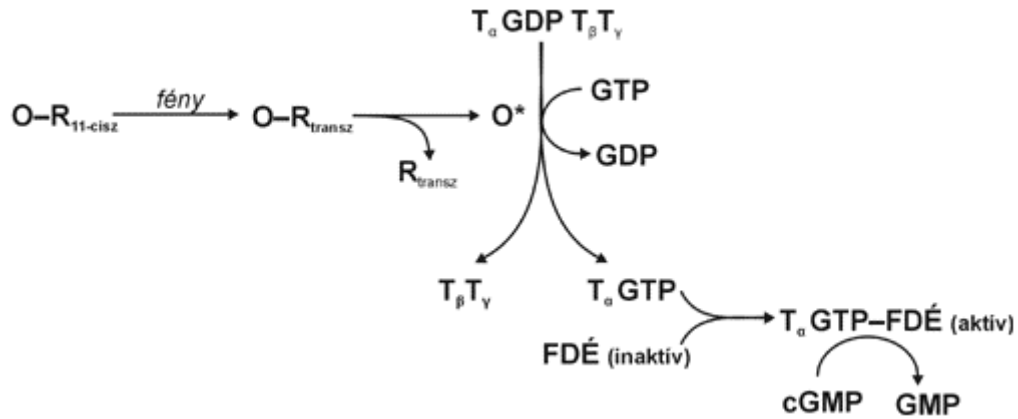


A fényt a kromofór nyeli el, és ennek hatására izomerizálódik: 11-cisz formából csupa-transz formába alakul:



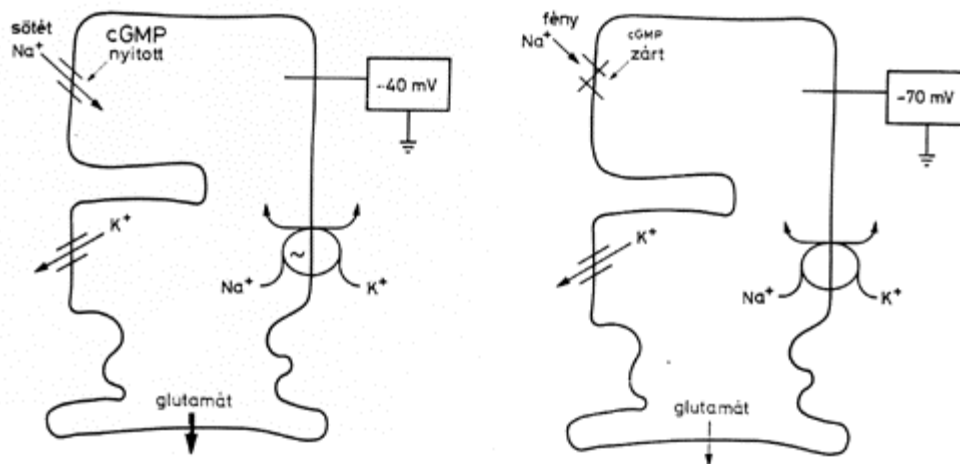
Az izomerizáció nyomán a retinál leválik az opszinről. Sötétadaptációhoz azért kell kb. 40 perc, mert az erősebb fény hatására nagy mennyiségben lebomlott rodopszin újratermelése viszonylag lassú.

A csupa-transz-retinál leválása után hátramarad egy aktív opszin molekula. Ez a molekula egy G-fehérje jelátviteli utat aktivál, amely cGMP hidrolízishez vezet. A szereplők és a folyamat vázlatja így fest:



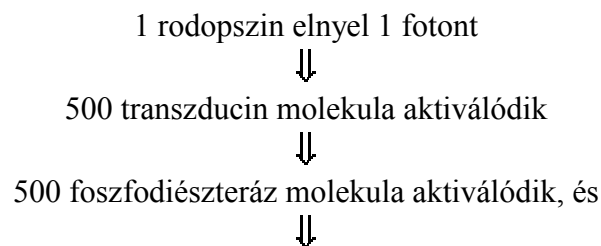
O = opszin,
 R = retinál,
 T = transzducin (G-fehérje, a görög betűk alegységeket jelölnek)
 FDÉ = foszfodiészteráz.

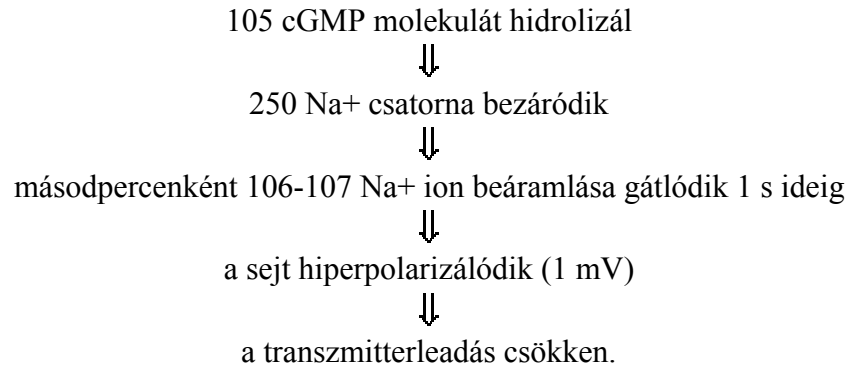
A sejtben alapállapotban magas koncentrációjú cGMP közvetlenül kötődve hozzájuk nyitott állapotban tartja a külső szegmentum Na⁺-csatornáit. Így a sötétben lévő sejtben a membrán magas Na⁺ permeabilitása miatt a membránpotenciál lecsökken (ld. Goldman-Hodgkin-Katz egyenlet): a sejt depolarizált állapotban van (-40 mV). Fény hatására lecsökken a cGMP szint, a Na⁺-csatornák bezáródnak: a sejt hiperpolarizálódik (-70 mV). A hiperpolarizáció hatására csökken a kibocsátott transzmitterek mennyisége.



A sejt tehát egy fényjelet alakít át idegrendszeri kémiai jelzéssé. Paradox módon a fény hatására leadott kémiai jel, a jel megszűnése.

A folyamat összefoglalása még egyszer, utalva a mennyiségekre is:





Színlátás

Fontos: a szín az idegrendszer által létrehozott érzet és nem fizikai tulajdonság!
A látható spektrum (400-700 nm):



Adott hullámhosszokhoz rendelhető színérzetek nagyjából a következők:

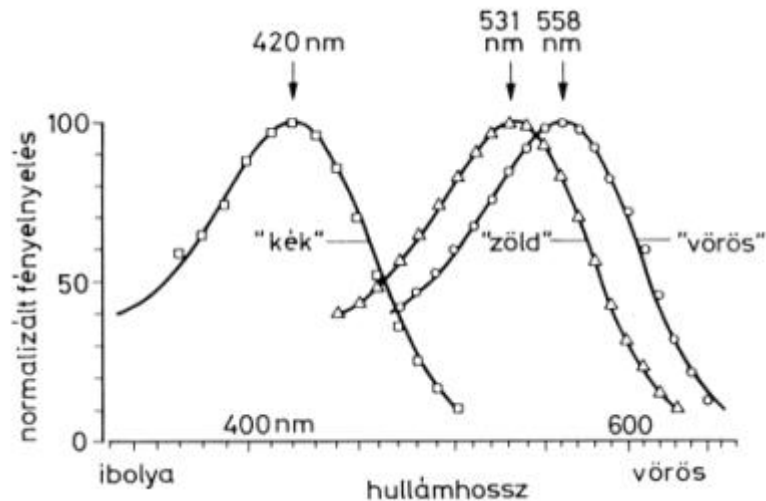
- 430 nm – ibolya
 - 460 nm – kék
 - 520 nm – zöld
 - 575 nm – sárga
 - 600 nm – narancs
 - 650 nm – vörös
-

A színlátás elmélete

Thomas Young, 1801: “igen valószínűtlen, hogy végtelen típusú színérzékelő sejt létezzon, amelyek közül mindegyik más színt érzékel, valószínűbb véges számú, pl. 3 sejttípus létezése.”

Valóban kimutatták, hogy 3 féle csapsejt létezik, és mindegyik már spektrális tartományt érzékel. A 3 típus maximális érzékenységu a következő hullámhosszakon:

- "kék" csap – 420 nm,
- "zöld" csap – 530 nm,
- "vörös" csap – 560 nm.



A 3 féle sejtípus csupán a bennük található rodopszinban különbözik. Adott típusú csapsejtben csak egyféle rodopszin található.

Molekuláris háttér: a rodopszinban a kromofór mindhárom esetben a 11-cisz-retinal, különbözik viszont a fehérjerész, amely így megváltoztatja a hozzá kötődött kromofór elnyelési tulajdonságait.

Az ember egyes színek keverékét új színeként érzékeli. Így pl. a vörös és zöld keveréke sárgát ad, a kék és sárga keveréke zöldet. Ezért mondjuk, hogy a szín érzet. A színek "kikeverését" valószínűleg a látóközpont végzi.

A színkeverési elmélet

A színkeverés elméletével már Isaac Newton is foglalkozott.

Maxwell és Helmholtz állapította meg, hogy megfelelően megválasztott 3 szín adott arányú összegzésével bármilyen mintaszín kikeverhető:

$$\text{Szín} = a*V + b*Z + c*K,$$

A leggyakrabban használt 3 szín a vörös, a zöld és a kék, ezek arányát jelzik a , b , c együtthatók.

A fenti képlet az *additív* színkeverést írja le, amelyben 3 különböző színű fény összege adja a mintaszínt, amely lehet tetszőleges szín, vagy akár fehér is. Ilyen elven működik a színes televízió, amely a vörös, zöld, kék (RGB = Red, Green, Blue) színrendszert használja. A nyomdaiparban és a színes nyomtatóknál használják még a ciánkék, sárga, bíbor, fekete (CYMK = Cyan, Yellow, Magenta) színrendszert.



additív színkeverés



szubtraktív színkeverés

Szubtraktív színkeverés esetén az előállítandó színt úgy kapják, hogy általában fehér színű fényből adott komponenseket vonnak ki (pl. színszűrőkkel). Példa erre fényképek előhívása színes negatívról.
