

# Számítógépes Grafika

## 1. előadás: bevezető, emberi látás és megjelenítőeszközök

Bán Róbert

`rob.ban@inf.elte.hu`

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Informatikai Kar

2025-2026. tavaszi félév

# Tartalom

## Adminisztráció

## Számítógépes grafika

- Motiváció

- Áttekintés

## Az emberi látás

- Motiváció

- A fény

- A látás fiziológiája

- Színek a számítógépen

## Megjelenítők, eszközök

- Megjelenítők

- Raszter- és vektorgrafika

## Bemutakozás és elérhetőségek

- ▶ Előadó: Bán Róbert
- ▶ E-mail: `rob.ban@inf.elte.hu`
  - ▶ A levél tárgyában szerepeljen a [BScGraf]
- ▶ Szoba: D 2.706
- ▶ Konzultáció: email-es egyeztetés után
- ▶ Információk: `canvas.elte.hu`

# Előadás

- ▶ IP-24[e]KVISZGE, IPM-24[E]sztkVSZGE
- ▶ Előfeltétel BSc-n: számítógépes grafika gyakorlat (gyenge)
- ▶ Szükséges előismeret: lineáris algebra
- ▶ Jegyszerzés: Két írásbeli részvizsga alapján
  1. Első az anyag felénél, második a félév végén
  2. Kb. 50%-50% elméleti és gyakorlati feladatok
- ▶ Vizsgaidőszakban: csak pót-részvizsga és UV-k
- ▶ Katalógus: [catalog.inf.elte.hu](http://catalog.inf.elte.hu)
- ▶ Tananyag: Canvas-on (diasorok az év közben folyamatosan lesznek feltöltve, a tavalyiak elérhetőek)

## Ajánlott irodalom

Magyar nyelvű irodalom:

1. *Szirmay-Kalos László, Antal György, Csonka Ferenc:* Háromdimenziós grafika, animáció és játékfejlesztés, ComputerBooks, 2003. (Már elfogyott, de a szerző honlapjáról elérhető:  
<https://cg.iit.bme.hu/~szirmay/3Dgraf.pdf>)
  - ▶ A gyakorlat során már újabb OpenGL-t használunk! (És nem is fogadunk el deprecated kódot)
  - ▶ Apróbb, formális különbségek is vannak (sorvektorok, transzponált mátrixok stb.)

## Ajánlott irodalom

Angol nyelvű irodalom:

1. *Andrew Glassner* (most már) ingyenesen elérhető könyvét ajánlom az érdeklődőknek:  
[http://realtimerendering.com/Principles\\_of\\_Digital\\_Image\\_Synthesis\\_v1.0.1.pdf](http://realtimerendering.com/Principles_of_Digital_Image_Synthesis_v1.0.1.pdf)
2. Aki később is komolyabban akar grafikával foglalkozni pedig ezeket is ismerje meg mindenképpen:
  - ▶ *Akenine-Möller, Haines, Hoffman*: Real-Time Rendering (3rd edition)
  - ▶ *Pharr, Humphreys, Hanrahan*: Physically Based Rendering (From Theory to Implementation)

# Gyakorlatok

- ▶ IP-18[e]KVISZGG, IPM-18[E]sztKVSZGG
- ▶ Előfeltétel BSc-n: matalap (IP-18[e]MATAG), imperatív programozás (IP-18[e]IMPROGEG)
- ▶ Koordinátor: Bán Róbert
  - ▶ Email: [rob.ban@inf.elte.hu](mailto:rob.ban@inf.elte.hu) (tárgy: [BScGraf]...)
  - ▶ De elsősorban a saját gyakorlatvezetőjének írjon mindenki
- ▶ Jegyszerzés: géptermi zárthelyi
  - ▶ Félév közben egy kis beadandó program

# Mi a számítógépes grafika?

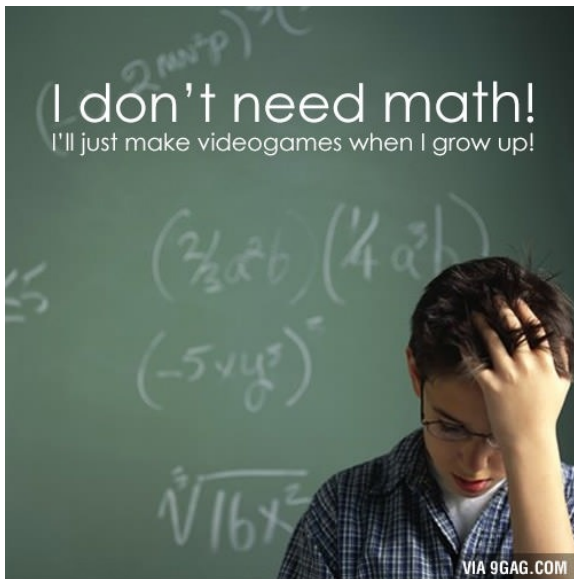
- ▶ Alkalmazott tudományterület, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni

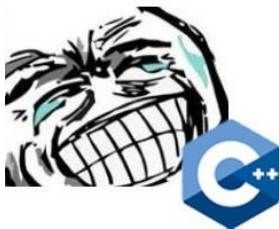
# Mi a számítógépes grafika?

- ▶ Alkalmazott **tudományterület**, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni
- ▶ Ezzel jár, hogy erős elméleti háttér szükséges a megoldandó probléma leírásának megértéséhez

# Mi a számítógépes grafika?

- ▶ **Alkalmazott** tudományterület, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni
- ▶ De ezt az elméleti (javarészt matematikai) apparátust *használni* is kell
- ▶ Nem elég a képleteket ismerni







$$L_o(\mathbf{x}, \omega) = L_e(\mathbf{x}, \omega) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{x}, \omega') (\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega$$

# Számítógépes Grafika

- ▶ A **számítógépes grafika** az informatika tudomány egy ága.
- ▶ Feladata: vizuális anyagok
  - ▶ előállítása
  - ▶ elemzése
  - ▶ feldolgozása

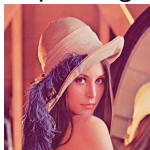
# Képmanipulálás



Brandon Christopher Warren, flickr

# Képfeldolgozás és képelemzés

## ► Képfeldolgozás



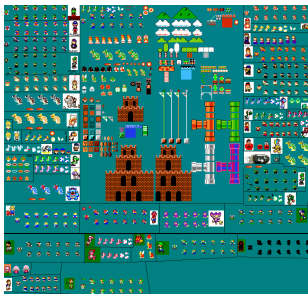
## ► Képelemzés



Beatrice Murch and OpenCV



## 2D: Modell → Kép



## 3D: Modell → Kép



# A számítógépes grafika eszközei

- ▶ Ezen az előadáson a képek előállításával foglalkozunk
- ▶ Ehhez szükségünk van arra, hogy
  - ▶ el tudjuk tárolni a számítógépen a megjeleníteni kívánt virtuális világot (**reprezentáció**),
  - ▶ a reprezentációt meg tudjuk jeleníteni (**képszintézis**),
  - ▶ a megjelenítést pedig megfelelő eszközökön kell elvégezni (**megjelenítők**).

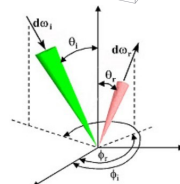
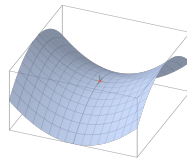
# Képszintézis

## Kérdések:

- ▶ Hogyan írjuk le a világot? – Modellezés
  - ▶ Ebben a félévben: geometriai modellek, fény–felület kölcsönhatás – matematikai és fizikai modellek
  - ▶ MSc: A számítógépes grafika matematikai alapjai
  - ▶ MSc: Felület- és testmodellezés
  - ▶ Szab.vál.: 3D modellezés Maya-val
- ▶ Hogyan számítjuk ki a képet? – Algoritmusok
  - ▶ Ebben a félévben: sugárkövetés és inkrementális képszintézis
  - ▶ Folytatás: Középhaladó grafika GY, Haladó grafika EA+GY
- ▶ Hogyan jelenítjük meg azt? – Eszközök
  - ▶ Ezen az órán egy rövid áttekintő

# Modellezés

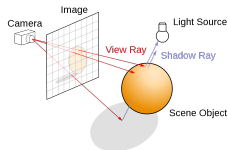
- ▶ Geometriai modellek
- ▶ Optikai paraméterek
- ▶ Textúrák
- ▶ *mind lehet generált, mért, fényképezett stb.*



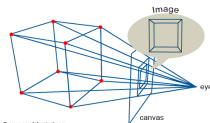
# Algoritmusok

## Megközelítési módok

- ▶ Sugárkövetés
- ▶ Inkrementális képszintézis



Henrik, Wikipedia



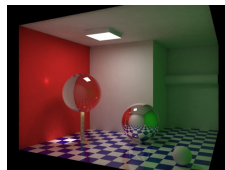
© www.scratchapixel.com



Gilles Tran, Oyonale.com



CryEngine2



Blender 2.48

## Fényjelenségek

- ▶ Tükröződés, fénytörés
- ▶ Vetett árnyékok
- ▶ Globális illumináció
- ▶ Térfogati jelenségek

# Motiváció

- ▶ Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:
  - ▶ Kép készítése a számítógép számára: ilyenkor a tényleges megjelenítéssel nem kell foglalkozni, egy leírást kell csak átadni (hol, milyen szín van)
  - ▶ Kép készítése ember számára: meg kell jeleníteni a képet → ehhez tisztában kell lenni az emberi látás bizonyos alap tulajdonságaival, hogy minél kevesebb torzuláson essen át az átadni kívánt információ
- ▶ Mi az utóbbival fogunk foglalkozni; az emberi látás pedig sok tényezőtől függ, már maguk a fények, árnyékok aktuális állapota is befolyásoló tényezők

## Cydonia – 1978



## Cydonia – 2001 VS 1978

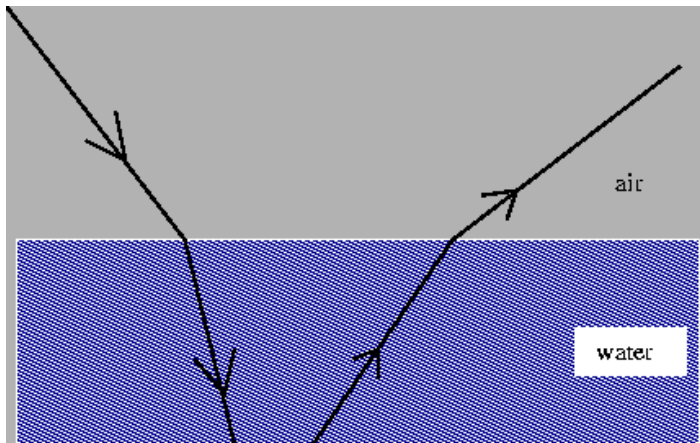


[en.wikipedia.org/wiki/Cydonia\\_\(Mars\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cydonia_(Mars))

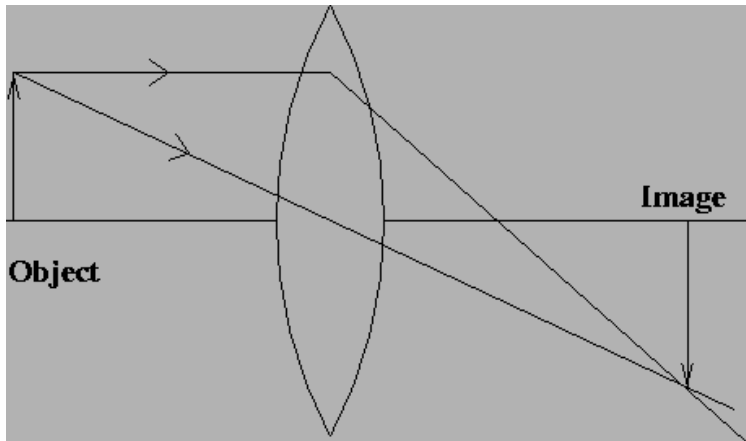
# Célunk

- ▶ A képszintézissel a célunk megmondani, hogy adott helyen milyen színt kell, hogy megjelenítsen a kijelző
- ▶ Fontos ezért, hogy absztrakt és konkrét leírást is tudjunk adni

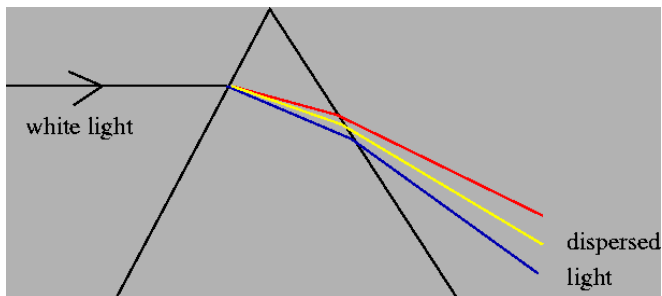
## A fény tulajdonságai – fénytörés



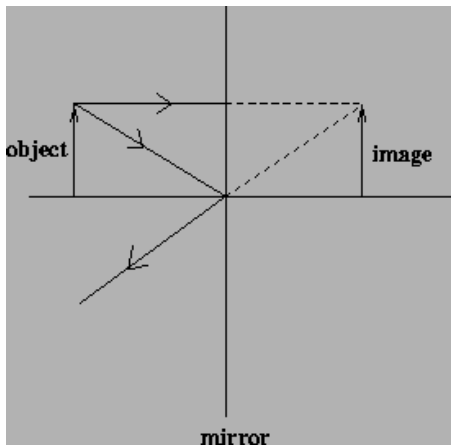
## A fény tulajdonságai – fénytörés



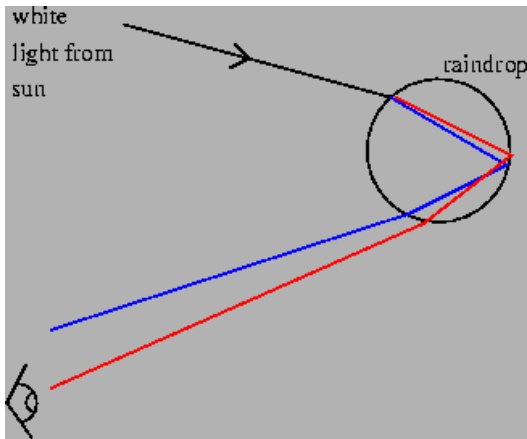
## A fény tulajdonságai – fénytörés prizmával



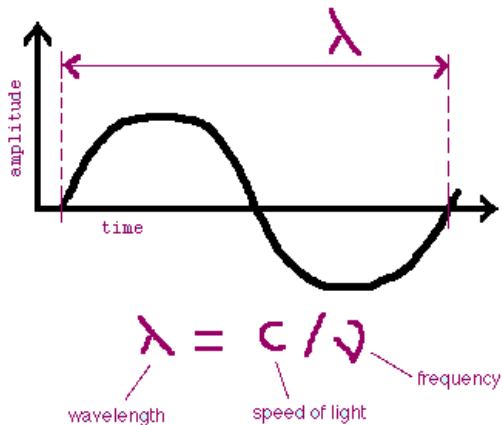
## A fény tulajdonságai – visszaverődés



## A fény tulajdonságai – szivárvány



## A fény tulajdonságai – hullám?



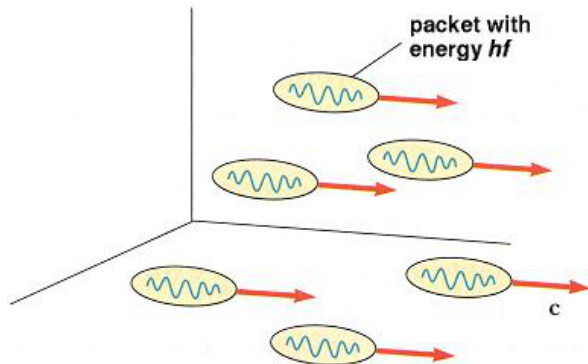
## A fény tulajdonságai – részecske?

$$E = hf$$

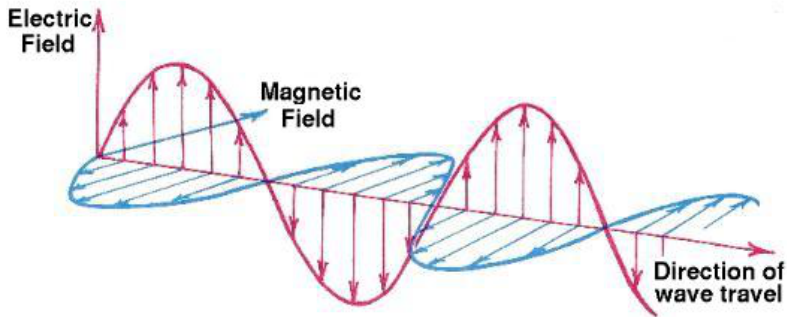


$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Joules} \cdot \text{sec}$$

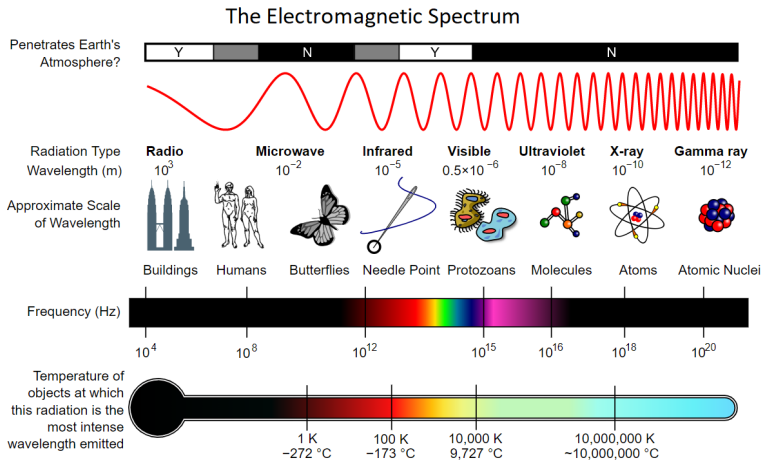
## A fény tulajdonságai – fotonok



## A fény tulajdonságai – a fény elektromágneses sugárzás



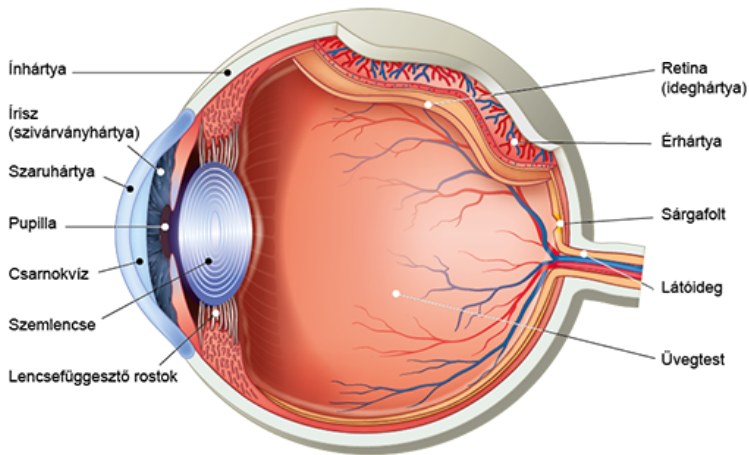
# Elektromágneses sugárzás



# A látás

- ▶ A fény érzékelése
- ▶ Fiziológiai és pszichológiai aspektusai is vannak
- ▶ A szem és az agy vesz részt benne

# Az emberi szem felépítése



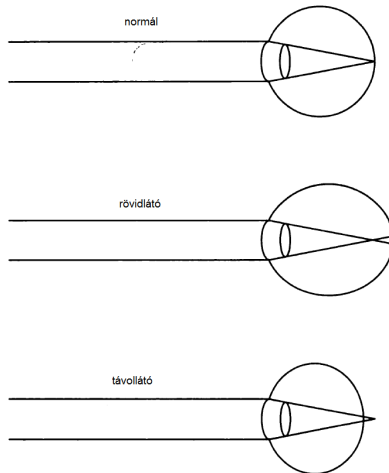
## A fény útja a szemben

- ▶ A fény a szaruhártyán megtörve jut a szembe – ez lényegében egy fény-gyűjtőlencse
- ▶ A szivárványhártya (írisz) csökkenti a szembe jutó fény mennyiségét (szűri), a pupilla pedig fényretereszként funkcionál
- ▶ A szemlencse a második gyűjtőlencse; a belépő fénysugarakat a recehártyára (retinára) fókuszálja (az „egészséges” szemben)

## A szem ereje

- ▶ A szem különböző részeit összesítve kb.  $+60$ ,  $+80D$  erejű – ez 16-12.5mm fókusztávolságot jelent
- ▶ Az átlagos emberi szem 24mm hosszú a szaruhártyától a retináig – a sárgafoltra fókusztávolsághoz így kb.  $42D$ -t kell
- ▶ A szemben maradó optikai erő a szem alakjának tökéletlenségeinek kompenzálására kellenek illetve a nagyon közeli és nagyon távoli objektumokra való fókusztávolságnál

## A fény útja a szemben



# Fényreceptorok

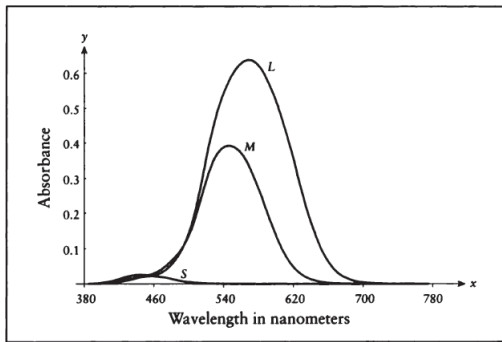
- ▶ A retinában kétféle fény érzékelésre szolgáló idegsejt található:
  - ▶ *Pálcikák (rod)*: alacsonyabb intenzitású fényre érzékenyek, a sötét-világos megkülönböztetésére alkalmas, alacsonyabb felbontásúak
  - ▶ *Csapok (cone)*: erősebb fényingert igénylő idegsejtek, a színlátást és éleslátást szolgálják, tizedannyira érzékenyek a fényre, mint a pálcikák
- ▶ Az elektromágneses energia egy bizonyos sávjára érzékenyek csak a fenti sejtek
- ▶ Gyakorlati számításokban ennek a 380-780 nanométer (1 nanométer = 1 nm =  $10^{-9}$  m) közötti hullámhosszú részével foglalkozunk, ez a látható színtartomány (*visual band*)

## Fotoreceptorok

- ▶ Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy elektromos impulzust küldenek az agy felé
- ▶ Az egyes fotoreceptorok más-más mértékben reagálnak (érzékenyek) a különböző hullámhosszú fényekre:
  - ▶ *Pálcikák*: hullámhossztól függően az ugyanolyan erős fényre adott reakció nagysága harang-görbe jellegű görbével írható le – az ember éjszakai látásának nagyjából megfelelő módon
  - ▶ *Csapok*: háromféle van belőlük (S, M, L jelűek); mindegyik különböző hullámhosszú fényre ad maximális reakciót, azoktól fokozatosan eltérőkre egyre kisebbet
- ▶ Az elektromos impulzusok csak az érzékelés tényét rögzítik: pontos hullámhossz nem továbbítódik az agy felé! (Térbeli és frekvenciabeli felbontás „trade-off”)

# Fotoreceptorok – csapok

- ▶ Háromféle csap található a szemben:
  - ▶ S csap: 420nm körüli fényre a legérzékenyebb (kék)
  - ▶ M csap: 530nm körüli fényre a legérzékenyebb (zöld)
  - ▶ L csap: 560nm körüli fényre a legérzékenyebb (vörös)



## Fotoreceptorok – csapok

- ▶ Ha egy csap egy adott hullámhosszra 30%-ban érzékeny az azt jelenti, hogy 10-ből 3-szor fogja abszorbeálni az olyan hullámhosszú fénykomponenst és küld jelet az agy felé
- ▶ A fényreceptorok észleléseit a látóideg továbbítja az agy felé
- ▶ A látóideg csatlakozási pontja a szemgolyóhoz a vakfolt, itt nincsenek sem csapok, sem pálcikák
- ▶ A látógödör, ami a vakfolttól oldalra található az éleslátás helye, a közepe a foveola, ahol kizárólag csapok találhatóak (150000 csap per  $\text{mm}^2$ , de: sósóymnál 1 millió a legsűrűbb rész)
- ▶ A foveolától kifelé haladva a csapok egyre ritkábbak és a pálcikák váltják fel őket

## A vakfolt kimutatása

x



## A fotoreceptor jele

- ▶ Az egyetlen fotonra adott neurális jel néhány ms-ig tart
- ▶ Minden egyes újabb beérkező foton hatása hozzáadódik az előzőhöz
- ▶ → A receptor által leadott jel lényegében egy időbeli átlag, egy alul-áteresztő szűrő, aminek vágási frekvenciája függ a megvilágítási körülményektől

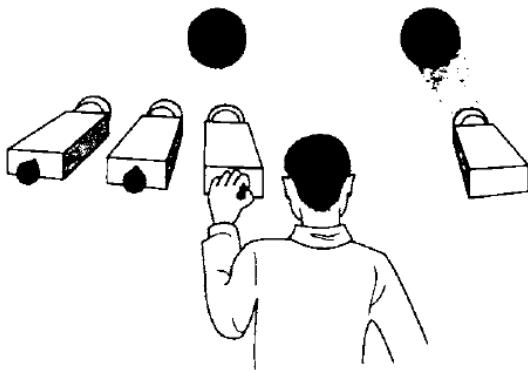
## A fotoreceptor jele

- ▶ Egy lassan villogó fényt külön-külön felvillanásokként észlelünk
- ▶ Azonban ha a felvillanások között eltelt idő egyre kisebb, akkor a fotoreceptorok által leadott jelek „összetorlódnak” (eléri a *Critical flicker frequency*-t) → folyamatos fénypontként érzékeljük a látottakat
- ▶ A fenti képsorozatokra is igaz: CFF alatt a felvillanó képeket különálló elemekként kezeljük, azt átlépve folytonos képfolyamnak. Ezen alapul az animáció
- ▶ A flicker rate sok tényezőtől függ (háttérmegvilágítás, a megjelenített kép nagysága stb.)
- ▶ Ideális körülmények között nagyjából 60Hz (méheknél ugyanez 300Hz)

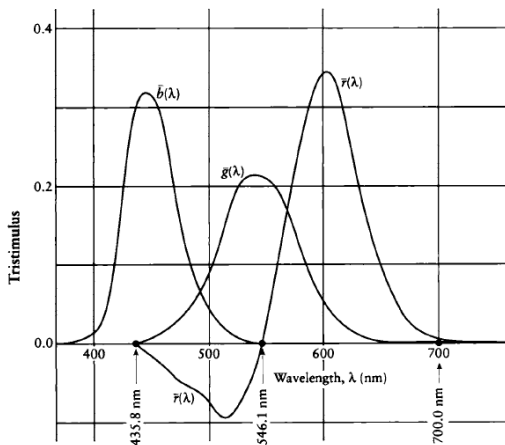
# CIE

- ▶ International Commission on Illumination, 1931.: hogyan lehetne egy „standard” leírást adni arra, hogy egy ember miképp érzékeli a színeket
- ▶ A kísérletek egyik eredménye volt, hogy bármely szín előállítható három, megfelelő szín keverékeként (itt: színes fények egymásra vetítésével)
- ▶ Ugyanaz a szín többféleképpen is előállhat különböző színek kombinációjaként! Ezek a metamerek. (pl. nátriumlámpa vs. sárga szín a monitoron)
- ▶ → Bármely színérzet kódolható egy számhármassal, *tristimulus* értékkel

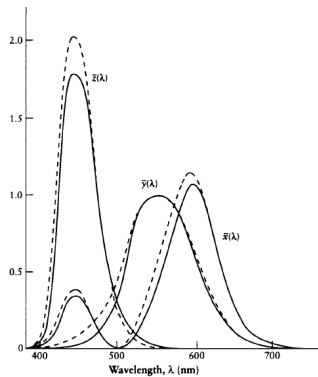
## CIE



## CIE



## CIE



## CIE

$$C(\lambda) = X \bar{x}(\lambda) + Y \bar{y}(\lambda) + Z \bar{z}(\lambda)$$



$$X = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_v} C(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

$$Y = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_v} C(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_v} C(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

## *Tristimulus értékek*

- ▶ *Színérzet*  $\rightarrow$  *színtér*
- ▶ Itt kijelölhető egy koordináta rendszer három „független” bázis-vektorral.
- ▶ Válasszunk három kellően távoli hullámhosszt, majd minden színérzetre adjuk meg, hogy három ilyen *monokromatikus* (csak az adott hullámhosszt tartalmazó) fénynyaláb milyen keverékéből áll össze.
- ▶ Ezek lesznek az adott színérzet *tristimulus koordinátái*

## RGB színtér

- ▶ Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

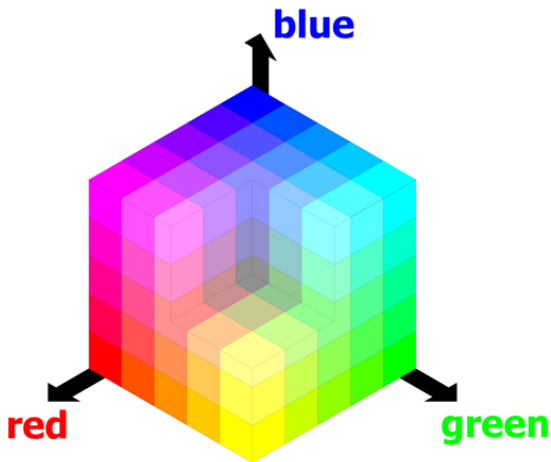
$$\lambda_{red} = 700nm, \lambda_{green} = 546.1nm, \lambda_{blue} = 435.8nm$$

- ▶ Legyen  $\lambda$  egy monokromatikus fénynyaláb.

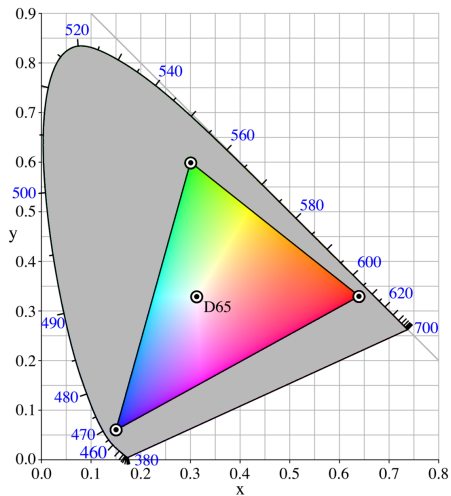


- ▶ Ekkor a hozzátartozó RGB értékeket megadására használjuk az  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$  *színillesztő függvényeket*.
- ▶ A spektrum minden színe megadható így? Nem.
- ▶ Az ember által érzékelhető minden szín megadható így? Nem.
- ▶ További színérzékeléssel kapcsolatos furcsaságok: [videó]

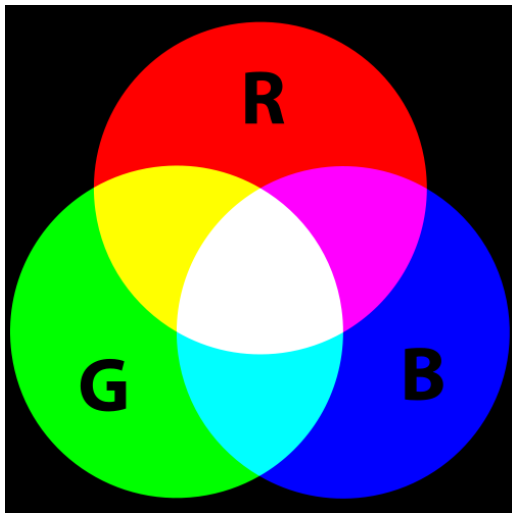
# RGB színekocka



# RGB-ben leírható színek



## Additív színkeverés

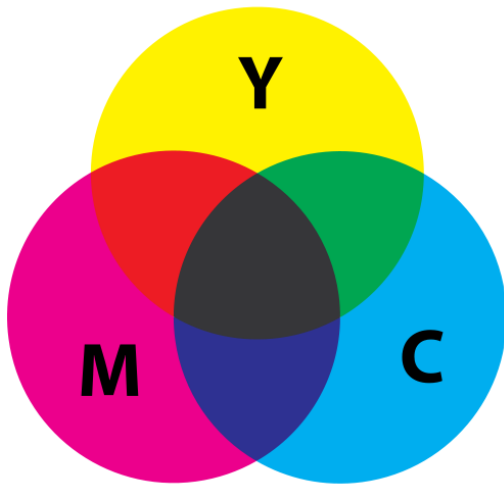


A monitor/projektor fényt bocsát ki (összeadunk)

## CMY(K)

- ▶ Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel „szemközti” tengelyeket!
- ▶ Ezek a ciánkék (C – cyan), bíbor (M – magenta) és sárga (Y – yellow).
- ▶ Ez a három „tengely” ugyanúgy kifeszíti a színteret.
- ▶ Ezt használják a színes nyomtatáshoz. Itt CMYK, ahol K a fekete, pontosabban „Key” – kulcsszín, mivel ez adja a kontrasztot

# Szubsztraktív színkeverés



A papír/festék fényt nyel el (kivonunk)

# HSL és HSV – motiváció

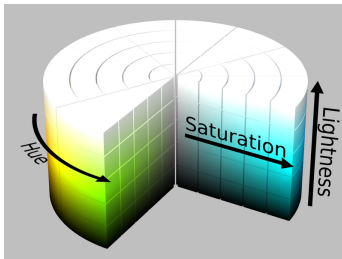
- ▶ Amikor színekről beszélünk gyakran használunk olyan fogalmakat, hogy *telítettség*, *élénkség*, *világosság* vagy *sötétség*. Hogyan használhatjuk ezeket RGB színtérben?
- ▶ Vegyünk RGB-ben egy színt. Keressük egy kevésbé élénk árnyalatát! Mi az összefüggés a komponensek és az élénkség között?



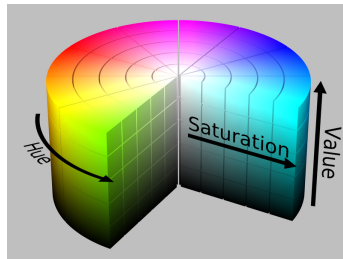
Jacobolus, Wikipedia

# HSL és HSV

- ▶ A színeket egy hengerrel adjuk meg, egy színérték (*Hue*), egy telítettség (*Saturation*) és egy fényesség (*Lightness*) vagy világosság (*Value*) segítségével.



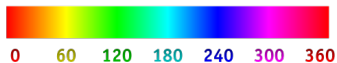
SharkD, Wikipedia



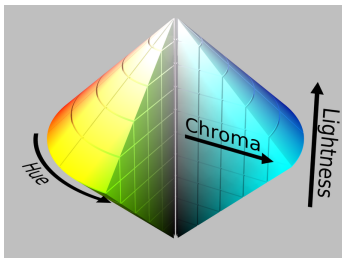
SharkD, Wikipedia

# HSL és HSV

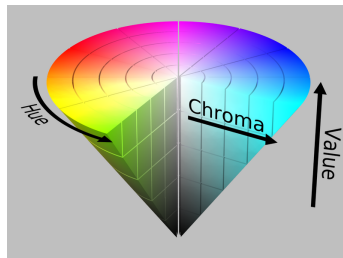
- *Hue* (színérték) skála:



- Azonos színek:



SharkD, Wikipedia

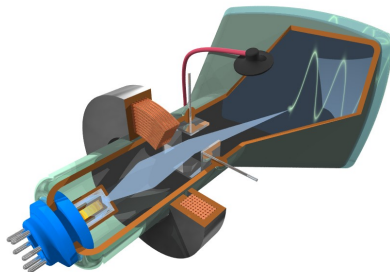


SharkD, Wikipedia

## Eszközök – Oszcilloszkóp



Felix E. Guerrero, flickr

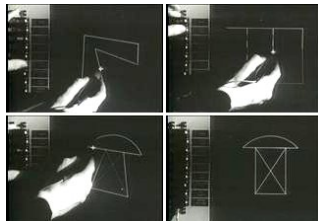


Søren Poo Pedersen, Wikipedia

- ▶ Az eszköz hátuljában található elektronágyú elektronokat bocsájt ki.
- ▶ Az elektronnyaláb útját elektromágnesekkel téríti el a vizsgált jel alapján.
- ▶ Az eszköz elején lévő foszforrétegbe csapódó elektronok bocsájtják ki a fényt.

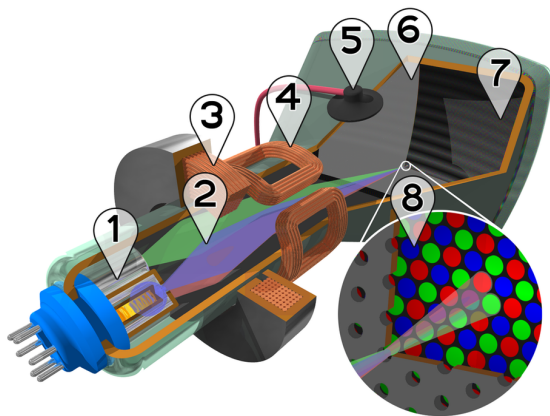
## Eszközök – Sketchpad

Sutherland – Sketchpad, 1963 [link]



- ▶ a CAD alkalmazások őse
- ▶ 1024x1024-es kijelző
- ▶ fényceruzával + 40 nyomógombbal volt vezérelhető
- ▶ bevezette a kényszer alapú rajzolást: párhuzamos, merőleges stb.

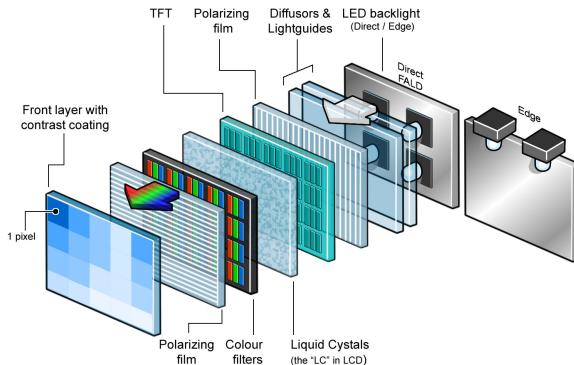
## Eszközök – CRT monitor



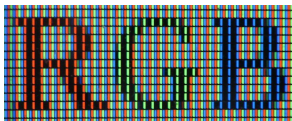
## Eszközök – CRT monitor

- ▶ Őse az oszcilloszkóp – azonos működési elv.
- ▶ Az elektronnyaláb sorról sorra végigpásztázza a képernyőt másodpercenként többször is.
- ▶ A sugár ereje határozza meg fényerőt – a pásztázás során folyamatosan változik.
- ▶ Színek: három elektronágyú, a beesési szöghkülönbségből adódóan érik a megfelelő színszűrővel rendelkező területet.
- ▶ Alacsony válaszidő
- ▶ A kontrasztarány jó, a fekete tud valóban fekete lenni
- ▶ Már nem gyártják
- ▶ Lassított videó [\[link\]](#)

# Eszközök – LCD monitor



flatpanelhd.com

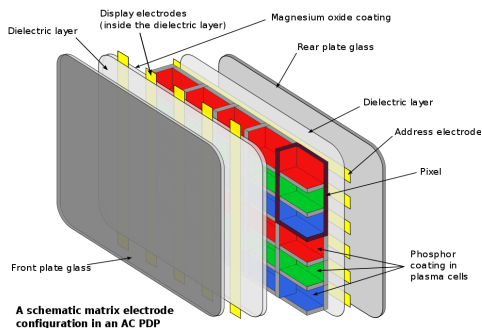


Luis Flavio Loureiro dos Santos, Wikipedia

## Eszközök – LCD monitor

- ▶ Fehér háttérvilágítás
- ▶ Először egy polárszűrőn megy keresztül a fény
- ▶ Ezután következik a névadó folyadékkristály-réteg, melynek tulajdonsága, hogy elektromos feszültség hatására különböző mértékben forgatja el a fény polarizáltságát.
- ▶ Színek: minden színszűrőre különböző polarizáltságú fény jut.
- ▶ Végül a korábbira merőleges polárszűrőn jut át a fény, így szabályozva a kijutó fény mennyiségét.
- ▶ CRT-nél lassabb válaszidő
- ▶ Kontrasztaránya változó – fekete színhez aktívan ki kell szűrnie a háttérvilágítást.

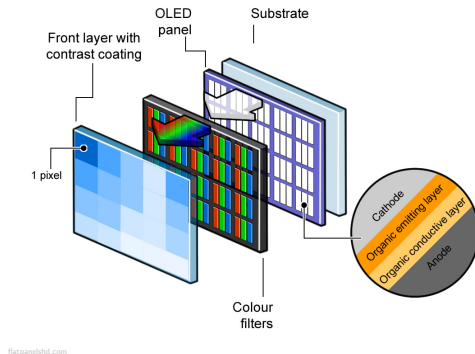
## Eszközök – PDP kijelző (Plasma Display)



Wikipedia

- ▶ Minden képpont maga bocsájt ki fényt.
- ▶ A pixelekben nemesgáz van, ami feszültség hatására világít, a neoncsőhöz hasonló elven.
- ▶ Már nem gyártják.

## Eszközök – OLED kijelző



- ▶ Minden pixel maga is fényforrás.
- ▶ Jó kontrasztarány
- ▶ Alacsony válaszidő

## Eszközök – 3D megjelenítők

- ▶ *Stereoscopy*

Mást lát a két szem, nincs mozgás parallaxis

- ▶ *Head Mounted Display*
- ▶ *Shutter glasses*
- ▶ Polarizált lencsésű szemüveg

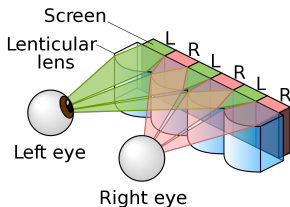
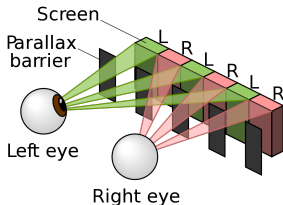
- ▶ *Autostereoscopy*

Nem kell hozzá külön eszköz a felhasználó részéről

- ▶ *Parallax barrier*
- ▶ *Lenticular lens*

## Eszközök – 3D megjelenítők

### Parallax és Lenticular



és még...

- ▶ Nyomtatók
- ▶ 3D nyomtatók
- ▶ Plotterek
- ▶ Mini LED kijelzők
- ▶ Projektorok
- ▶ ...

# Rasztergrafika



Doink, vecteezy.com



# Rasztergrafika

- ▶ Az ábra legkisebb egysége a pixel, ami egy színt reprezentál.
- ▶ A pixeleket valamilyen  $N \times M$ -es tömbben tároljuk.
- ▶ Nagyításkor és kicsinyítéskor csak a pixelek látható méretét módosítjuk.
- ▶ A képen lévő alakzatok módosítása relatívan nehéz – festéshez hasonlítható
- ▶ A tárigény direktben a felbontástól függ (a tömörítéstől eltekintve)

# Vektorgrafika



Doink, vecteezy.com



# Vektorgrafika

- ▶ A kép matematikailag leírható elemekből épül fel: görbék, síkidomok.
- ▶ Ezekhez vannak rendelve különböző tulajdonságok: szín, kitöltés, vonalvastagság.
- ▶ Az egyenes tényleg egyenes, a görbék bármilyen nagyítás alatt ívesek maradnak.
- ▶ A képen lévő alakzatok szerkesztése egyszerű.
- ▶ A tárigény az objektumok számával arányos, jellemzően hasonló tartalmú raszteres képeknél kevesebb.