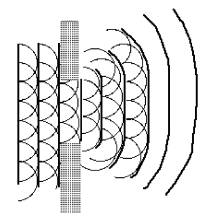


• **Ismertesse az optika fejlődésének legjelentősebb mérföldköveit!**

- Ókor: korai megfigyelések - Euklidész (i.e. 280)
 „A fény homogén közegben egyenes vonalban terjed.”
 Legrövidebb út elve (!)
 Tulajdonképpen geometriai optikai megközelítés.
- Hérón (i.e. I. század): visszaverődés törvénye, bizonyítással
- Ptolemaiosz (i.sz. II. század): fénytörés törvénye hibásan:
- A középkor: Descartes, Snell (Snellius), Newton és
- Fermat munkássága
 A fénytörés törvényének helyes megfogalmazása
*Érdekesség: a fénytörés törvénye francia nyelvterületen
 Descartes-törvény, angol/ német nyelvterületen Snell-törvény, magyarul
 Snellius–Descartes-törvény!*

• **Mit mond ki a Huygens–elv, és miben több ehhez képest a Huygens–Fresnel-elv?**

A hullámfront minden pontja elemi (általában gömb) hullámok – angolul *wavelet*ek - kiindulópontja. Az elemi hullámok a fény sebességével terjednek. Egy későbbi „t” időpontban a hullámfront új helyzetét az elemi hullámok burkolója adja meg.



Ehhez képest Huygens-Fresnel: A Huygens–Fresnel-elv szerint ugyanis a hullámfront minden pontjából elemi gömbhullámok indulnak ki, és a hullámter egy adott pontjában az amplitúdót ezek interferenciája adja meg. Amiben több, mint a Huygens-elv: az interferencia (kioltás, erősítés) megjelenik. Ezzel az elhajlás jelensége is magyarázhatóvá vált.

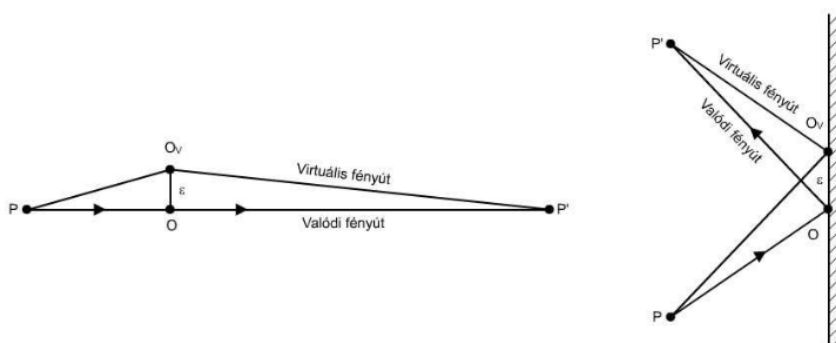
• **Mit mond ki Fermat törvénye? Milyen geometriai optikai törvények vezethetők le belőle? Mutassa be a Fermat–elvet egy példával!**

Fermat elv: Legrövidebb idő elve: egy fénysugár egy tetszőleges optikai rendszerben mindig olyan pályát követ, amelyre nézve a kezdő és végpontok közötti terjedési idő minimális. Másképp: az lesz a fény valódi útja, amelyre igaz, hogy a fényútban bekövetkező elsőrendűen kicsi változás az optikai úthosszban másodrendűen kicsi változást okoz. Fermat elvéből következik, hogy a fény homogén közegben egyenes vonalban terjed, illetve ez alapján könnyen igazolható a visszaverődés és (kicsivel nehezebben) a törés törvénye is. Azaz levezethető a Snellius-Descartes törvény:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

n: törésmutatók.

Példa: síktükör esetén a fény útja is így szerkeszthető



• **Mi a polarizáció? Hogyan függ a visszaverődéstől és szóródástól a polarizáció?**

Mechanikai hullámok esetén akkor beszélünk polarizált hullámról, ha a transzverzális hullámok rezgése egy jól meghatározható síkban zajlik le. A dipól sugárzással létrejött elektromágneses hullám (például rádióhullám) mindig polarizált, vagyis a hullámban rezgő E vektorok mindenütt párhuzamos egyenesek mentén rezegnek. Mivel a hullámegyenlet lineáris, az E.M. tér összeállhat síkhullámok tetszőleges összegéből. A hullám polarizálatlan, hogy „véletlenszerű keveréke az egyes polarizációknak, és polarizált, ha csak egy, kitüntetett irányú polarizáció van. A polarizáció tehát az EM hullám jellemző térerősségének irányultságát leíró fizikai mennyiség.

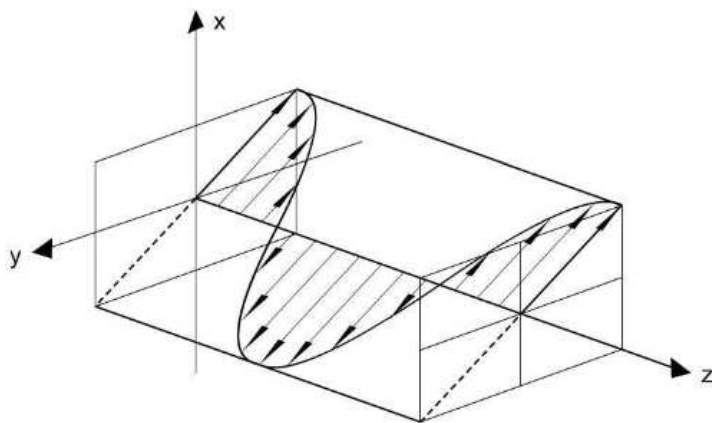
A visszaverődés mindig változtat a polarizáción. A polarizálatlan fény 100%-ban polarizálttá válik, ha a dielektrikum felületére a Brewster-féle szögben esik be. Más szögek esetén a visszavert fény részben polarizált.

Szórt fény esetén, így pl. atisza égboltról érkező szórt napfény részben polarizált: a beérkező hullám a részecskéket rezgésbe hozza, amely mint elemi dipól antenna oldal irányban illetve „függőleges” irányba 100%-ban polarizált hullámot bocsajt ki, az előre és hátra szórt sugárzás polarizálatlan, míg más szögeknél a szórt sugárzás részben polarizált.

• Milyen polarizáció-típusokat ismer? Rajzzal szemléltesse az egyes típusokat!

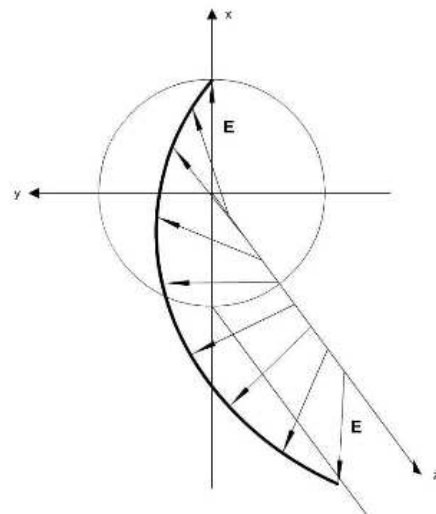
A polarizáció típusa a térerősségvektor (E) x és y irányú összetevői közötti fáziskülönbségtől függ: Az E_x és E_y fáziskülönbségének speciális esetei:

$$\Delta\varphi = 0 \text{ vagy } \pi$$



Lineárisan polarizált

$$\Delta\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$

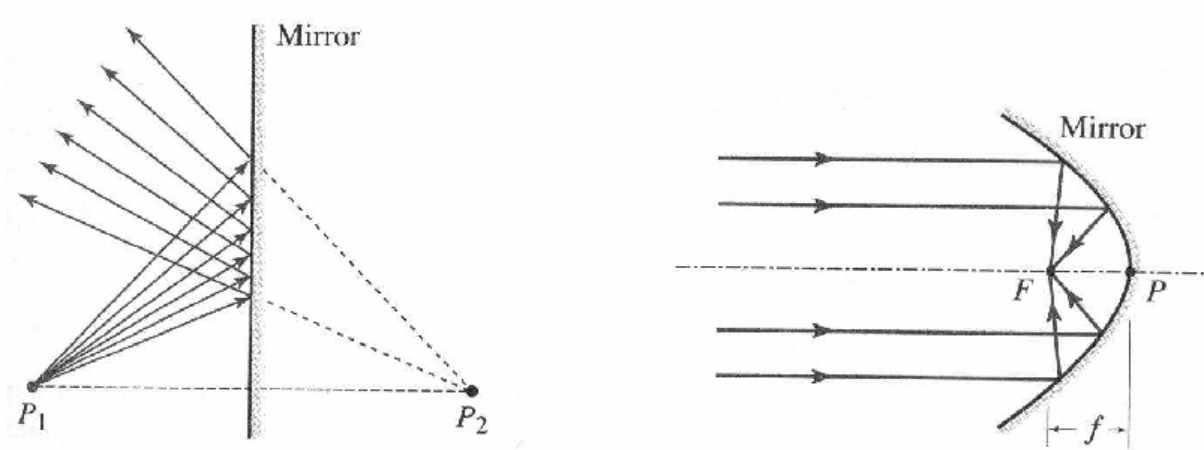


Cirkulárisan polarizált

Elliptikusan polarizált fény: A fénysugár haladási irányára merőleges síkban a térerősség vektorok végpontjai egy ellipszist írnak le.

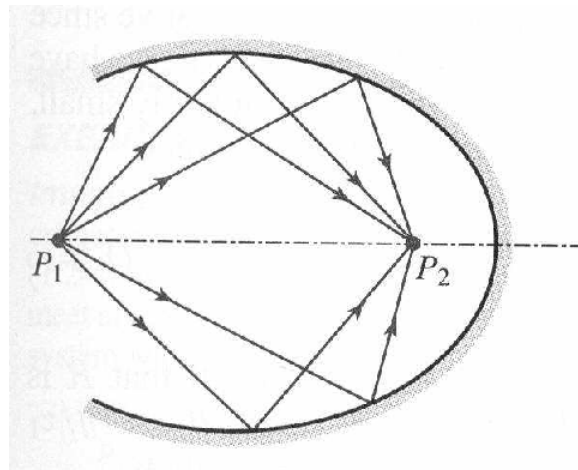
• Mutassa be a visszaverődés törvényét síkfelületen, parabola-, elliptikus, és gömbtükörn! Mit jelent a Fermat-elv elliptikus tükör esetében?

Pont tükörképe síktükörben és párhuzamos fénysugarak visszaverődés a fókuszpontba parabolatükör esetében:



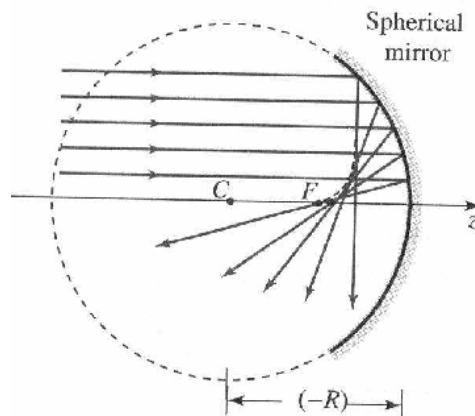
Szerkesztés szabálya: a felületegység normálisa és a beeső sugár által bezárt szög egyenlő a visszavert sugár és a normális által bezárt szöggel. A parabola középpontjának és az F fókuszpontnak a távolsága a fókusz-távolság. Parabolatükör alkalmas fény összegyűjtésére, illetve pontszerű fényforrásból párhuzamos nyaláb előállítására, hiszen minden beeső hullám a parabola fókuszpontjára verődik vissza, és vice versa.

Elliptikus tükör:



Két fókuszpont egyikéből a másikba ekvivalensek a fényutak. (A Fermat-elv szerint mindegyik fényút megvalósul).

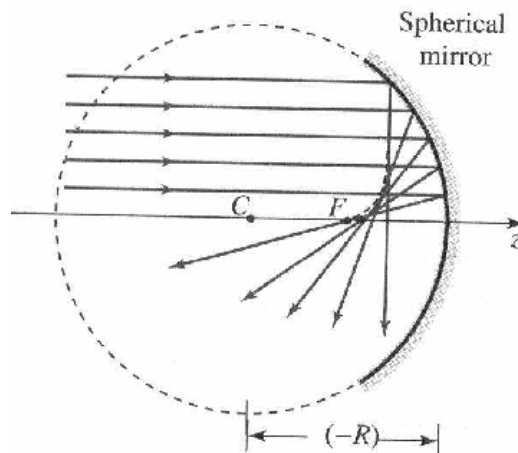
Gömb-tükör:



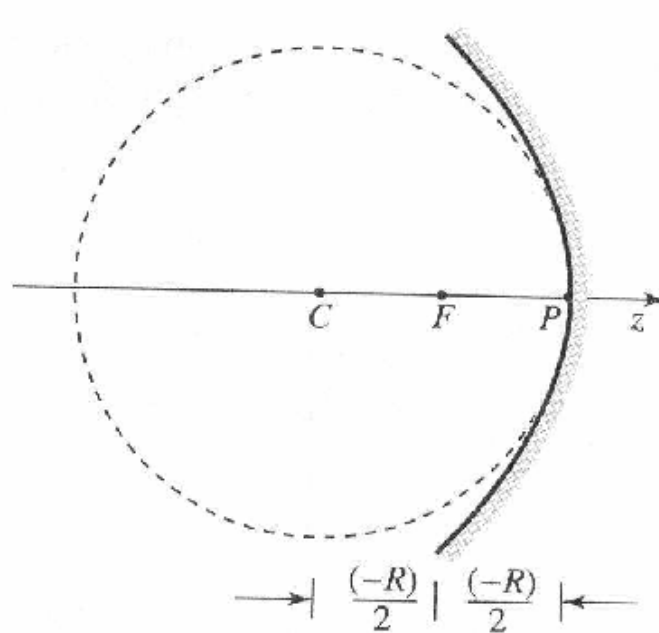
A gömbtükör esetében a párhuzamos nyalábok nem egy pontban találkoznak. Kis beesési szögnél azonban igaz, hogy a gömb geometriai középpontját és optikai középpontját felező fókuszpontban gyűlnek össze a sugarak. Az ilyen sugarak a paraxiális sugarak. (A valós sugarak burkolóját kausztikus görbének hívjuk.)

- **Mutassa be a gömbtükör közelítését parabolatükörrel! Milyen elhanyagolásokkal élünk? Mit eredményeznek az elhanyagolások a gömbtükör képalkotását illetően?**

Gömb-tükör:



A gömbtükör esetében a párhuzamos nyalábok nem egy pontban találkoznak. Kis beesési szögnél azonban igaz, hogy a gömb geometriai középpontját és optikai középpontját felező fókuszpontban gyűlnek össze a sugarak. A gömbtükör tehát paraxiális esetben parabolatükörként viselkedik, így kis beesési szögek esetén közelíthető, számolható parabolatükörként:



Hiba:???

• Milyen törvények érvényesek sík közeghatáron történő fénytörésnél?

Két alapvető eset:

Kisebb törésmutatóból a nagyobbba („külső reflexió”):

- Snellius–Descartes-törvény érvényes

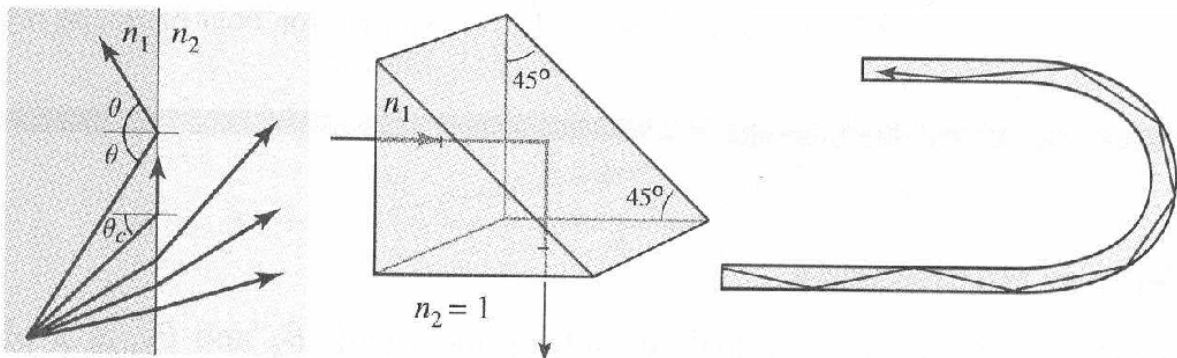
Nagyobb törésmutatóból a kisebbbe („belső reflexió”):

- A S-D csődöt mond akkor, ha a beesési szög túl nagy, a visszaverődés szög szinuszának nagyobbak kéne lennie, mint 1.
- Teljes visszaverődés, vagy totálreflexió.

A teljes visszaverődés határszöge:

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

• Rajzzal mutassa be a totálreflexió jelenségét 3 különböző optikai elem esetében! A prizma esetében határozza meg a teljes visszaverődés numerikus feltételét!



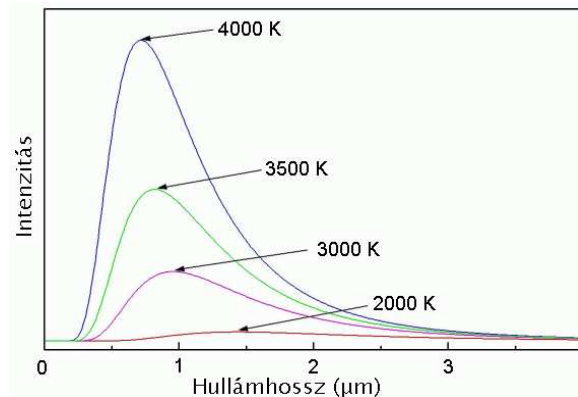
Teljes visszaverődés határszöge:

$$\theta_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$$

- 1.: Teljes visszaverődés sík felületen
- 2.: Teljes visszaverődés prizmán, numerikus feltétel: 45%-os prizma esetén, ha $n_1 > \sqrt{2}$
- 3.: Optikai kábelben

• Fogalmazza meg a Stefan–Boltzmann-törvényt!

Feketetest sugárzás:



Stefan-Boltzmann-törvény adja meg a feketetest teljes kisugárzott teljesítményét (egységnyi felületen) a hőmérséklet függvényében:

$$R = \sigma \cdot T^4$$

ahol R a teljes fajlagos kisugárzás vagy emittancia, vagyis a feketetest által egységnyi idő alatt, egységnyi felületen, valamennyi hullámhosszon kisugárzott energia. T az abszolút hőmérséklet, és σ a Stefan-Boltzmann-állandó, melynek értéke:

$$\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} = 5,672 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

A spektrális eloszlás tehát nem függ az üreg anyagi minőségétől, hanem csak az abszolút hőmérséklettől.

• Definiálja a lumineszcencia fogalmát! Mi a különbség a katód és az elektrolumineszcencia között?

Az anyagok olyan fénysugárzása, amely nem hőközlés miatt bekövetkező gerjesztés következménye.

Ezen belül a gerjesztés jellege alapján:

katódlumineszcencia, szonolumineszcencia, kemilumineszcencia, bio-lumineszcencia, elektrolumineszcencia, fotolumineszcencia

katód lumineszcencia: Gerjesztés: szabad térben gyorsított elektronok becsapódása. Pl.: CRT (katódsugárcső) belső felszínére felvitt foszforréteg

Elektrolumineszcencia: Gerjesztés: elektromos tér hatására elmozduló elektronok. Pl.: injektált elektrolumineszcencia

• Hasonlítsa össze a bio- és kemolumineszcenciát! A különbségeket egy-egy példán keresztül mutassa be!

Gerjesztés: kémiai reakció. Akkora a reakció során felszabaduló energia, amely a reakcióterméket gerjeszteni képes. A kemilumineszcencia során tehát a kémiai reakciókban keletkező energiadús köztitermékek plusz energiájukat úgy adják le, hogy fény formájában kisugározzák.

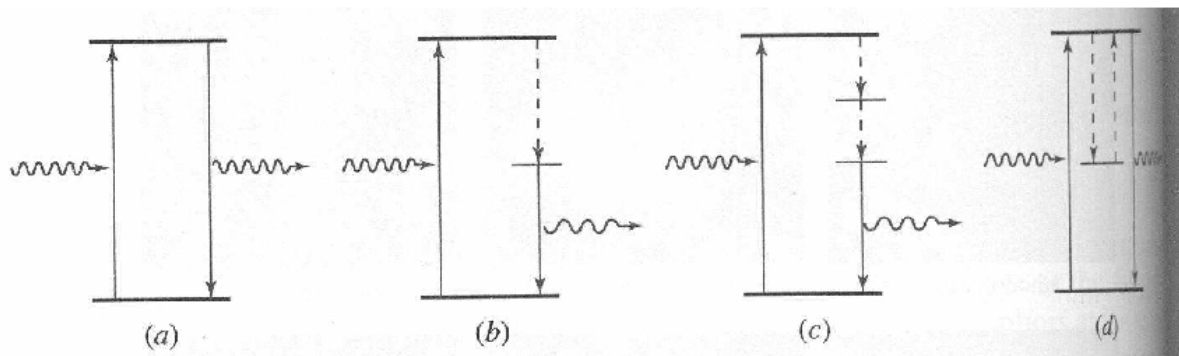
Példa: fénypálca: megtörés után engedjük a kétfajta folyadékot összekeveredni, melyek reakciója adja a gerjesztési energiát. Általában UV fényt eredményez. A pálca színe a folyadékba kevert UV aktív festék eredménye (ami viszont fotolumineszcens).

Gerjesztés: szintén kémiai reakció, azonban itt élő organizmusban jön létre. A biolumineszcencia a szentjánosbogár-fajokra jellemző, kémiai reakció eredménye, a reakció során gerjesztett állapotba kerülő elektronok rövid idő múlva, fényleadás közben térnek vissza nyugalmi állapotukba. Példa: férgék, mélytengeri élőlények. Legismertebb természetesen a szentjánosbogár

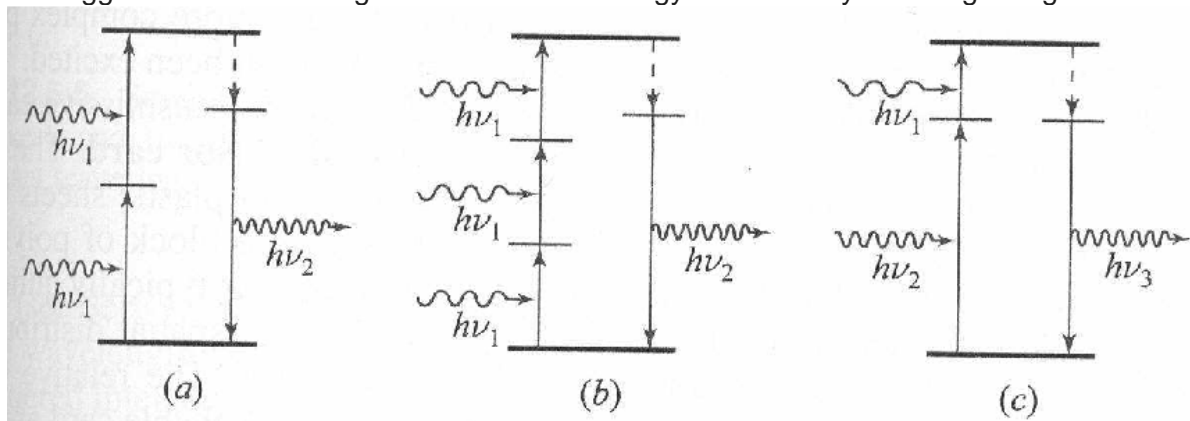
• Mi a fotolumineszcencia, és milyen fajtáit ismeri?

Fotolumineszcencia során a gerjesztés: elnyelődő fotonok, azaz olyan folyamat, amely során az anyag fotonokat nyel el, így magasabb energiájú állapotba lép, majd fotonokat sugároz vissza, így fényt bocsájt ki, ami alatt ismét nyugalmi állapotba lép.

Két alapvető fajtája (gerjesztés nívósémája alapján): fluoreszcencia és foszforeszcencia.



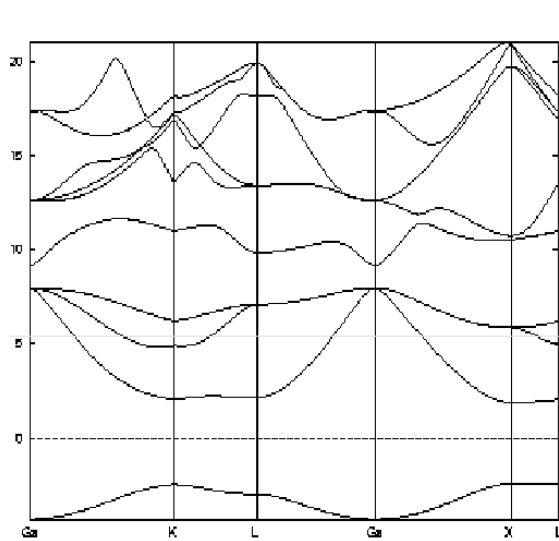
A szaggatott vonal nem sugárzásos átmenet. Az egyetlen szabály az energiamegmaradás.



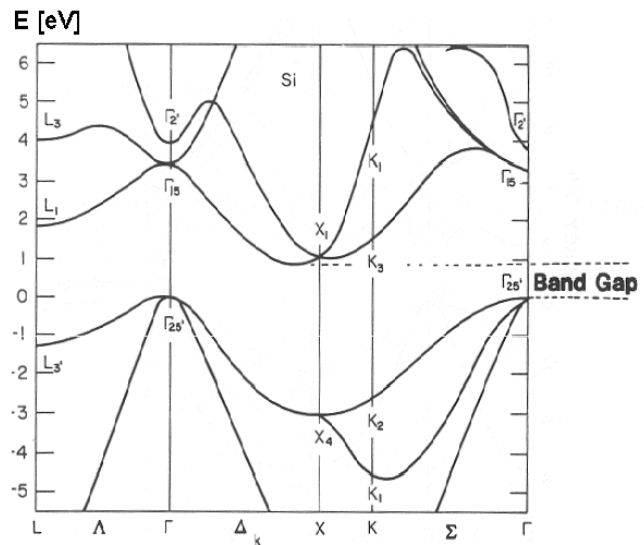
• Ismertesse a foton rugalmas szórás folyamatait! Az egyes típusok fizikai tulajdonságait részletesen is fejtse ki!

• Ismertesse a foton rugalmatlan szórás folyamatait! Mi a jelentősége az egyes típusoknak?

- Rajzoljon fel egy tipikus direkt és indirekt sávszerkezetet! Jelölje be mindkét ábrán a vezetési- és vegyértéksávot, a tiltott sávot! Mi a különbség a betöltöttségben $T=0K$ -en és $T>0K$ -en?

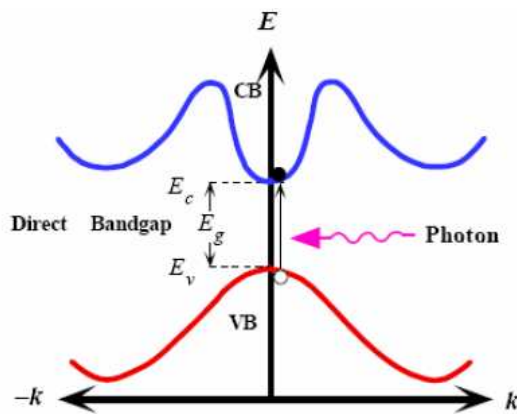


Gallium-arszenid
(direkt)

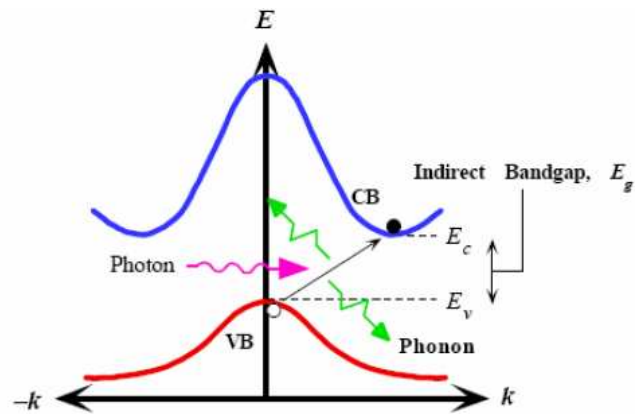


Szilícium
(indirekt)

vagy:



(a) GaAs (Direct bandgap)



(b) Si (Indirect bandgap)

$T=0K$: vezetési sáv üres, elektronok csak a vegyérték sávban

$T>0K$: gerjesztés hatására elektronok kerülnek a vezetési sávba, aminek hatására lyukak keletkeznek a vegyérték sávban.

- Mi a radiometria és a fotometria? Rajzolja fel vázlatosan az emberi szem érzékenységi görbáját!

Radiometriai egységek: a sugárzás által vitt energiára vonatkoznak, ezek az SI mértékrendszer részei.

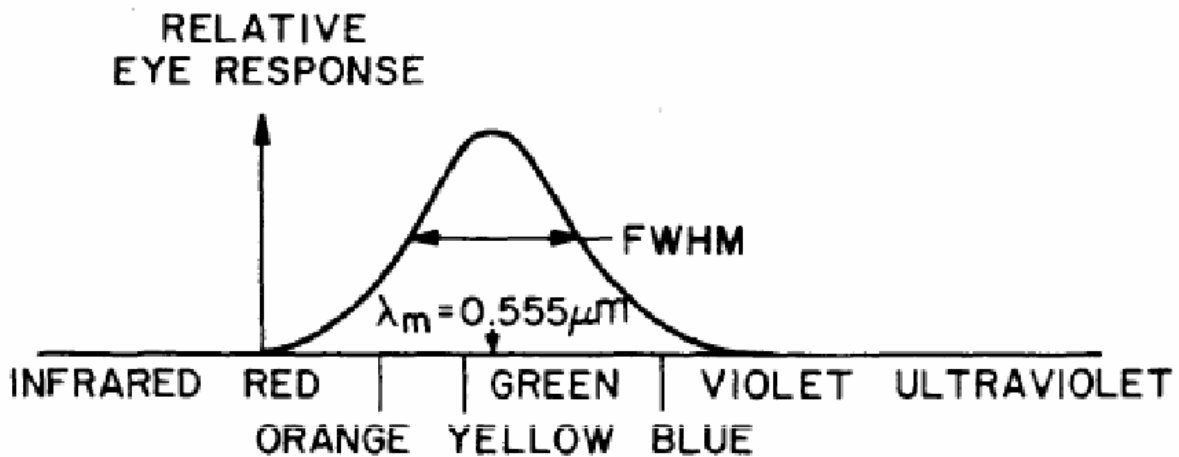
Fotometriai egységek: Ezek az emberi szem által érzékelt spektrális tartományra és az ember "fényérzetére" vonatkoznak.

Mennyiség	Radiometria	Fotometria
Fényáram	W	lumen
Fényerősség	W/szteradián	kandela
Megvilágítás	W/m ²	lux = lumen/m ²

Fényerősség → egységnyi térszögbe kibocsátott fényáram

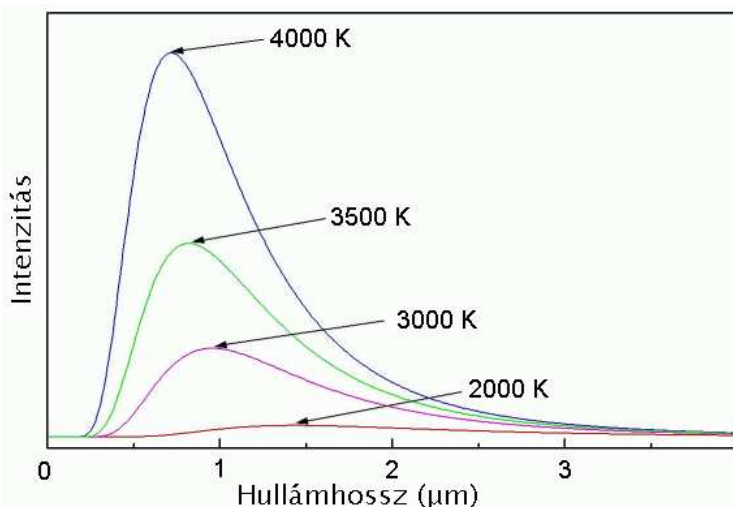
Egy kandela erősségű fényforrás 4π lument bocsát ki.

A kandela (cd) mai definíciója (1979): Annak a fényforrásnak az erőssége, mely adott irányba 540x10¹² Hz frekvenciájú monokromatikus fényt bocsát ki és sugárerőssége 1/683 W/szteradián.



Emberi szem standardizált érzékenységi görbéje szerint a relatív érzékenység maximuma $\lambda = 0,550 \mu\text{m}$ -nél van, (sárgás-zöld), itt 1 watt sugárzási teljesítmény 680 lumennel egyenértékű (1 lm megfelel 1,47 mW-nak). A relatív érzékenység 0,380 μm -nél (ibolya) és 0,780 μm -nél (vörös) válik nullává.

• **Vázolja a Wien-féle eltolódási törvényt grafikonon! Mi a szöveges megfogalmazása a törvénynek?**



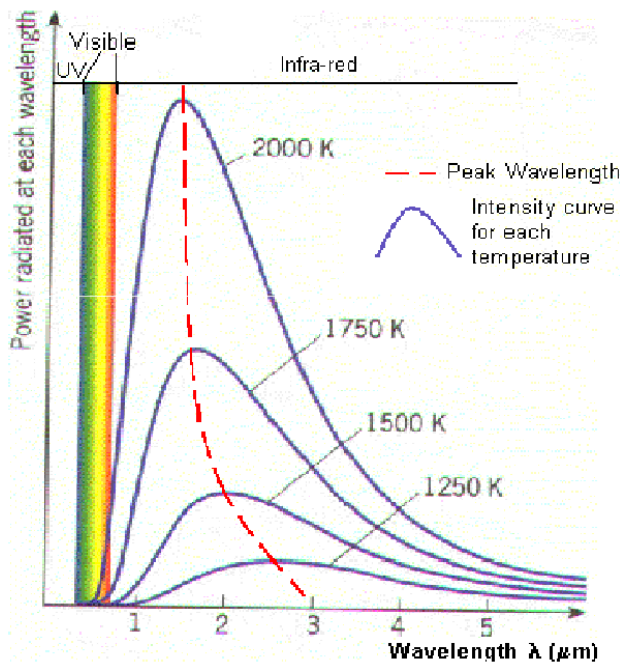
A testek bizonyos T hőmérsékleten elkezdnek láthatóan „világítani” mint pl. egy kályha vagy kemence. Draper pont vagy hőmérséklet az, ahol a testek elkezdnek halvány vörösön világítani (kb. 798 K). 1000 K hőmérsékletű test vörösnek, 6000K-n pedig fehérnek látszik. Még magasabb hőmérsékleteken pedig kéknek.

Wien-tv.:

A hőmérséklet növekedésével a maximum-hoz tartozó hullám-hossz csökken.

• **Mutassa be az izzólámpa működését! Térjen ki a gáztöltés szerepére!**

Az izzószál magas hőmérséklete (2500-3100 °C) következtében elektromágneses energiát sugároz, főként infravörös és kisebb részben látható fény tartományban. A volfrám jól közelíti az ideális feketetest tulajdonságait, ezért sugárzása nagyon közel esik a Planck törvényből számolhatóval. Ebből adódóan a szál hőmérséklete egyértelműen megadja mind a kapott fény spektrumát, mind az elérhető maximális fényhasznosítást. A magas hőmérséklet egyúttal alacsony élettartamot is jelent, a megnövekedett párolgás miatt. Az elpárolgott volfrám a bura falon lecsapódik, és rontja annak fényáteresztő képességét. A bura anyagát tekintve leggyakrabban lágüveg, halogénizzók esetén keményüveg vagy kvarc.



Gáztöltésű lámpa: a gázatmoszféra alapvető célja, hogy meggátolja a W transzportját (volfrám párolgás), illetve az elpárolgott volfrámot visszajuttassa a szál

testébe.

A halogén izzólámpákban az elpárolgott volfrám és a gáztérben jelenlévő halogén reakcióba lép és volfrám-jodidot (pontosabban volfrámoxijodidot) alkot. A vegyület az izzószál környezetében elbomlik és a volfrám lerakódik a melegebb részekben. Ez a körfolyamat lehetővé teszi az izzószál hőmérsékletének emelését, ami kedvez a fényhasznosításnak, de növeli a kibocsátott UV sugárzást is.

• **Vázlatosan ismertesse a kisnyomású gázkisülőlámpák működését!**

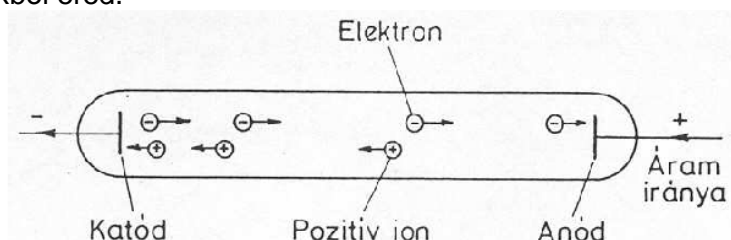
Fizikai alapok: gázon vagy gőzön áram folyik át, sugárzási jelenségek lépnek fel. A sugárzás az ütközések következtében magasabb energiaállapotokba gerjesztett vagy esetleg ionizált atomokból ered.

A gázkisülés spektruma sávos/vonalas szerkezetű.

Működés alapja: ívkisülés, felhevített elektródból elektronok lépnek ki, ezek ütköznek a közeg atomjaival, és gerjesztik ill. ionizálják őket. Gerjesztett és ionizált anyag (plazma):

- Higanygőz: fénycső, higanylámpa
- Nátriumgőz: nátriumlámpa
- Egyéb fémek gőze: féshalogén lámpák
- Gáz: xenonlámpa

KISNYOMÁSÚ FÉNYFORRÁSOK: Nyomás: néhány száz Pa, áram: néhány A. Az ionizáció elektronütközésekből ered.



Elektron-semleges atom ütközés:

- rugalmas ütközés,
- az atom gerjesztődik a kinetikus energia rovására,
- az atom ionizálódik,

Az ionizációs valószínűség az elektronenergiától függ. Az atomok ionizációs energiái 10 – néhány 10 eV nagyságúak.

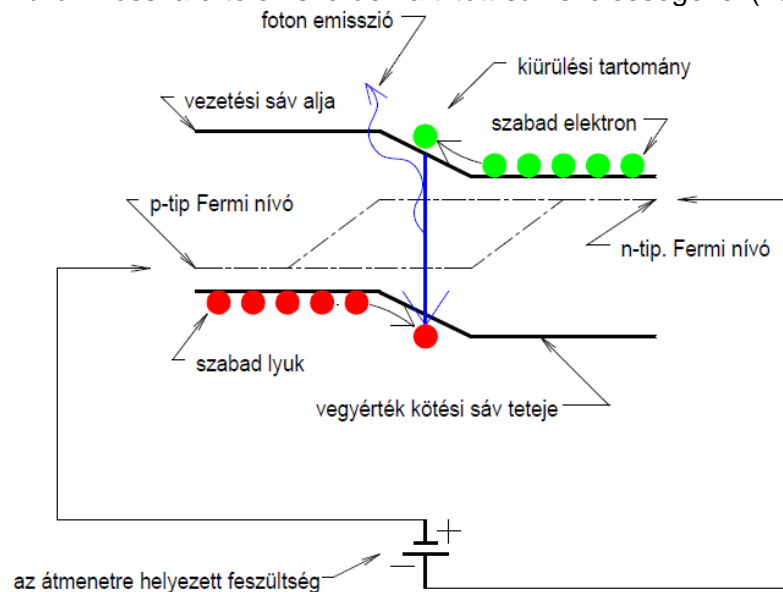
A fénycsövek kisnyomású gázkisülési lámpák, a kisüléskor emittált UV sugárzást fénypor alakítja át látható fénné. A fényporok a beeső nagyobb energiájú (rövidebb hullámhosszú) sugárzás hatására belső elektron energiaszintek közötti átmenetek révén látható tartománybeli fényt emittálnak (lumineszcencia). Ezek általában foszforvegyületek, vagy foszfort is tartalmazó keverékek.

• Mi az injekciós lumineszcencia? Mutassa be a folyamatot sáv szerkezet ábrán!

Ha az elektron egy magasabb energiájú állapotba való gerjesztés után az alapállapotba visszakerülve a többletenergiját sugárzás kibocsátásával veszi el, akkor a jelenséget lumineszcenciának nevezik.

A gyakorlat számára a legfontosabb a pn átmenetben végbemenő töltéshordozó-injekció által keltett elektrolumineszcencia, mely a fénykibocsátó diódák illetve a lézerek alapvető működési mechanizmusát jelenti.

Az injekciós lumineszcencia során tehát a p és n típusú töltéshordozók nyitóirányú külső télerősség hatására a kiürülési tartományba injektálódva ahol, ill. amin áthaladva rekombinálnak, eközben fotont, azaz fényt bocsátanak ki. A kibocsátott fény hullámhossza értelemszerűen a tiltott-sáv szélességével (kb.) egyenlő.



Alapvetően miért nem alkalmas a Si fényemisszióra? Milyen félvezetőkből készülnek a fényemittáló eszközök, és miért?

A szilícium fénykibocsátó eszköz készítésére fizikai tulajdonságai miatt nem alkalmas. A vezetési sávbeli elektron és a vegyértéksávbeli lyuk rekombinációjánál a két sáv energiája különbségének megfelelő energiájú foton keletkezik, ez a jelenség az ún. sugárzásos rekombináció. Ez a folyamat is lehet direkt vagy indirekt.

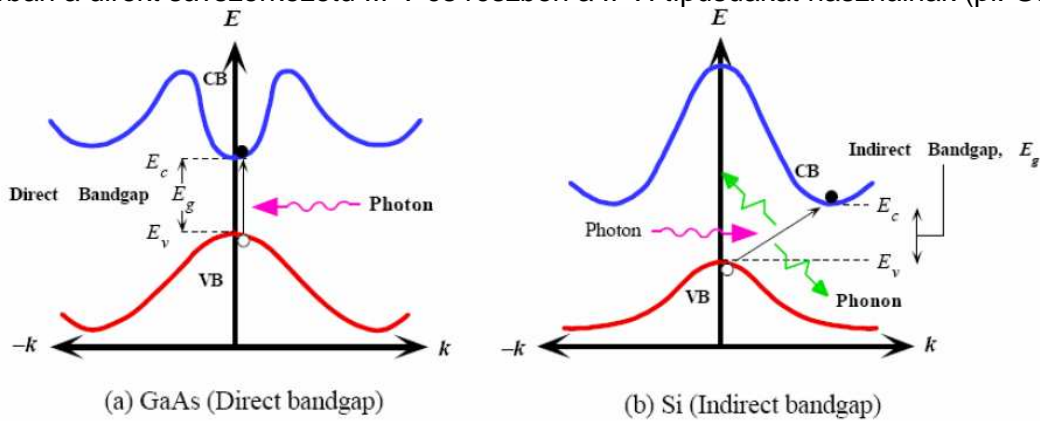
Közvetlen (direkt) elektron-lyuk rekombináció csak azonos impulzusú töltéshordozók között mehet vége. Eltérő impulzusú elektron és lyuk csak egy, az impulzus-megmaradás feltételét biztosító harmadik részecske, esetünkben egy vagy több fonon (a rácsrezgés kvantuma) részvételével mehet végbe (indirekt rekombináció).

Direkt sáv szerkezetű félvezetőkben (pl. GaAs, InP, InGaAs, GaN) az impulzus-megmaradás feltétele Γ -pontbeli sáv szélsőértékek közötti átmenetnél teljesül, ezért a sugárzásos rekombináció valószínűsége nagy.

Indirekt sáv szerkezet esetén (pl. Si, SiC, GaP) a harmadik részecske (fonon) elkerülhetetlen részvétele miatt a rekombináció valószínűsége lényegesen kisebb. A sugárzásos rekombinációs valószínűség elméletileg becsülhető értéke

300 K-en direkt sáv szerkezetű III-V félvezetőkben $5 \times 10^{-11} - 1 \times 10^{-9} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$, míg indirekt sáv szerkezet esetén $5 \times 10^{-14} - 2 \times 10^{-15} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$. A különbség 3-5 nagyságrend! Ez a magyarázata többek között annak, hogy pl. miért nincs Si lézer!

A gyakorlatban tehát fény kibocsájtó eszközök létrehozásához vegyület-félvezetőket, elsősorban a direkt sáv szerkezetű III-V és részben a II-VI típusúakat használnak (pl. GaAs).



Direkt és indirekt szerkezet

• Vázzon fel, hogy hogyan függ a félvezető eszközök tiltott-sáv szélessége, és rácsállandója az összetételtől? Mi a következménye annak, hogy a vegyület-félvezetők esetében „folytonosan” változtatható az összetétel?

• Hogyan működik a p-n átmenetes fotodióda?

A fotodiódák mindig záróirányban működnek. Fény hatására a zárórétegben a belső fényelektromos hatás miatt töltéshordozók szabadulnak fel, a **fotodióda** vezetővé válik. A fotodióda külső feszültség nélkül fényelemként működik. A fotodiódákat elsősorban mérési és vezérlési feladatokban használják.

