

# Bevezetés a modern optikába

**II. BSc fizikus hallgatóknak**

10.

Elektrooptika, nemlineáris optika,  
kvantumoptika, lézerek



Az **elektrooptika**, a **nemlineáris optikai** és az **akusztóoptika** a fény modulálásának lehetőségeivel foglalkozik.

Az elektrooptika és a nemlineáris optika ugyanakkor a jelenségkörnek két oldala: ez a **nemlineáris polarizáció**:

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} + 2(\mathbf{dE})\mathbf{E} + 4\chi^{(3)} E^2 \mathbf{E} + \dots$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \varepsilon(\mathbf{E})\mathbf{E}$$

$$\varepsilon(\mathbf{E}) = \varepsilon_0(1 + \chi) + 2\mathbf{dE} + 4\chi^{(3)} E^2 + \dots \equiv (n(\mathbf{E}))^2$$

Törésmutató:

$$n(\mathbf{E}) = n + \mathbf{a}_1 \mathbf{E} + a_2 E^2 + \dots \quad \text{A törésmutató a térerősségtől függ!}$$

$$\text{ahol } \mathbf{a}_1 = \mathbf{d}/n, \quad a_2 = 2\chi^{(3)}/n - d^2/(2n^3)$$

$\mathbf{a}_1 \neq 0$  : csak poláros kristályokban lehetséges: pl.  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , KDP (kálium-dihidrogén-foszfát)  
ADP ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ),  $\text{LiNbO}_3$ , stb.

A térerősség-függő törésmutató lehetővé teszi, hogy fényt elektromos térrel moduláljunk:

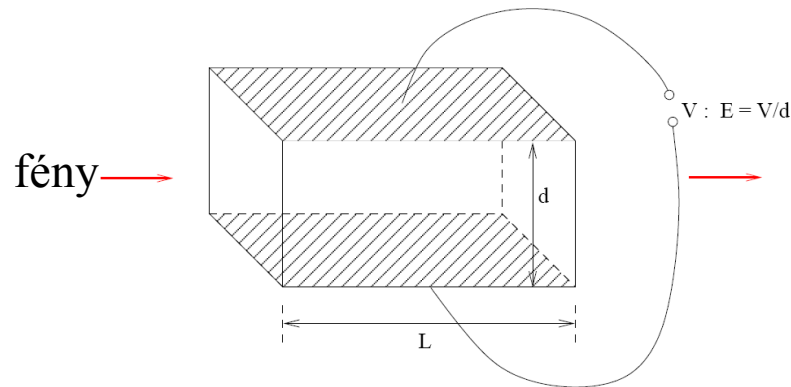
## 1) Modulálás sztatikus térrel ( $\sim 10^6$ V/m): **Elektrooptika**

a) Pockels-effektus:  $\mathbf{a}_1 \neq 0$  :  $n(\mathbf{E}) \approx n + \mathbf{a}_1 \mathbf{E}$

b) Kerr-effektus:  $\mathbf{a}_1 = 0$  :  $n(\mathbf{E}) = n + a_2 E^2$

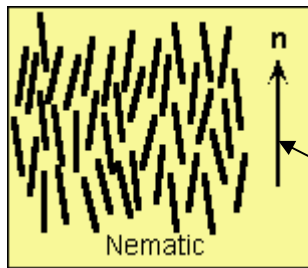
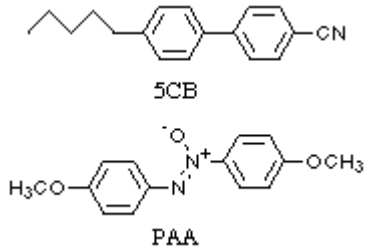
Alkalmazás: fázismoduláció

$$\Delta\varphi(\mathbf{E}) = Lk = Lk_0 n(\mathbf{E}) = Lk_0 n(V/d)$$



# Folyadékkristályok

Mechanikailag többé-kevésbe folyékony anyagok amelyek hosszúkas molekulái nem fagnak kristályrácsba, de **orientáció szerint rendeződnek**.

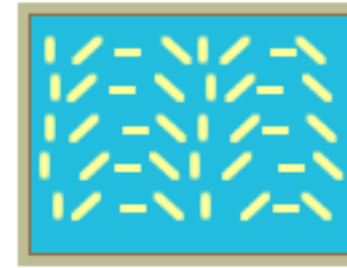


nematikus

óriási kettőtörés

$$|n_{\perp} - n_{\parallel}| \sim 0,1 \quad (\text{kvarc: } 0,01)$$

direktor



a körültekeredés hullámhossza:  $\Lambda$

csavart nematikus (koleszterikus)

óriási optikai aktivitás (cirkuláris kettőtörés)

orientáló elektromos térben kipörög egyenesre ( $\Lambda \rightarrow \infty$ ), ekkor nem forog, polarizátorok között modulálja az átengedett fényintenzitást



folyadékkristály-kijelzők (LCD)

Elektromos térrel erősen modulálható, gyenge tér is elég, energiatakarékos, nagy effektus, de lassú, kapcsolónak nem jó.

## 2) A moduláló elektromos teret is fényhullám adja:

Ez lényegében a nemlineáris optika. Elég erős elektromos tere csak a lézerefénynek van, ezért a terület csak a 60-as években indult be.

A legtöbb hasznos jelenség a **másodrendű szuszceptibilitással** kapcsolatos:

$$P \approx \varepsilon_0 \chi E + 2dE^2$$

$$n \approx n + a_1 E^2$$

Intenzitás

**Felharmonikus keltése:** (valós résszel kell számolni!)

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad \longrightarrow \quad E^2(t) = E_0^2 \cos^2(\omega t) = \frac{E_0^2}{2} + \frac{E_0^2}{2} \cos(2\omega t)$$

$$P(t) = P_0 + P_1 \cos(\omega t) + P_2 \cos(2\omega t) + 3. \text{ rendű tagok} + \dots$$

$dE_0^2$        $\varepsilon_0 \chi E_0$        $-dE_0^2$

**Frekvencia-konverzió:**  $E(t) = E_1 \cos(\omega_1 t) + E_2 \cos(\omega_2 t)$

$$E^2(t) = E_1^2 \cos^2(\omega_1 t) + E_2^2 \cos^2(\omega_2 t) + 2E_1 E_2 \cos(\omega_1 t) \cos(\omega_2 t) =$$
$$= \frac{E_1^2 + E_2^2}{2} + \frac{E_1^2}{2} \cos(2\omega_1 t) + \frac{E_2^2}{2} \cos(2\omega_2 t) + E_1 E_2 \cos((\omega_1 + \omega_2)t) + E_1 E_2 \cos((\omega_1 - \omega_2)t)$$

egyen

másodharmonikus

összegfrekvencia  
„felkonvertálás”

különbségfrekvencia  
„lekonvertálás”

# Fázisillesztés

Haladó hullámok esetén nem mindegyik komponens jelenik meg: csak ahol a nemlineáris folyamat az egész térfogatban azonos fázisban történik.

**Fázisillesztés (= sebességillesztés = törésmutató-illesztés) kell!**

$$E(\mathbf{r}, t) = A_1 \cos(\mathbf{k}_1 \mathbf{r} - \omega_1 t) + A_2 \cos(\mathbf{k}_2 \mathbf{r} - \omega_2 t) \xrightarrow{\text{green arrow}} P(t) \approx E_0 + P_1 \cos(\mathbf{k}_1 \mathbf{r} - \omega_1 t) + P_2 \cos(\mathbf{k}_2 \mathbf{r} - \omega_2 t) \\ + Q_1 \cos(2\mathbf{k}_1 \mathbf{r} - 2\omega_1 t) + Q_2 \cos(2\mathbf{k}_2 \mathbf{r} - 2\omega_2 t) \\ + R_+ \cos[(\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2) \mathbf{r} - (\omega_1 + \omega_2) t] \\ + R_- \cos[(\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_2) \mathbf{r} - (\omega_1 - \omega_2) t]$$

nézzük pl. ezt a tagot

Ki tudnak jönni a nemlineáris közegből haladó (sík) hullám alakjában?

**fázisillesztés feltétele:**

$$\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 \\ \omega = \omega_1 + \omega_2$$

fotonok nyelvén:  $E = \hbar\omega$   $\mathbf{p} = \hbar\mathbf{k}$   
az impulzus és az energia megmaradás

Van ilyen hullám?  $\omega = \frac{c_0}{n} |\mathbf{k}|$

nem triviális, mert van **diszperzió**:  $n(\omega_1) \neq n(\omega_2) \neq n(\omega_1 \pm \omega_2)$

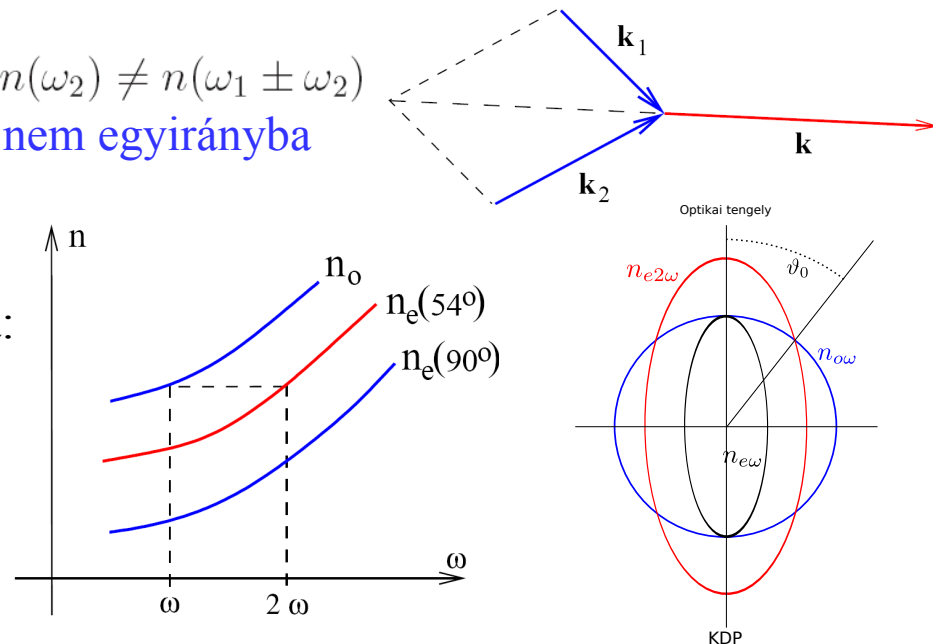
A két feltétel egyidejű kielégítéséhez általában **nem egyirányba**

haladó (**nem kollineáris**) hullámok kellene:

Sokszor a kettőstörést is be kell venni a játékba:

pl. **másodharmonikus-keltés KDP-ben**:

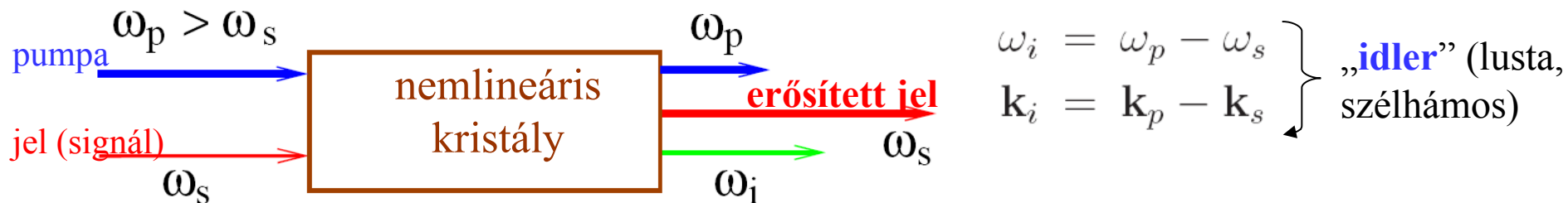
A feltételek általában csak  $P(t)$  egy tagjára teljesülnek: „háromhullám-keverés”



# Háromhullám-keverés más néven **paraméteres folyamatok**

A három hullám közül az egyik egy erős pumpáló lézer fénye; ez mint a gyenge hullámokra érzéketlen külső paraméter, modulálja a közeg dielektromos állandóját.

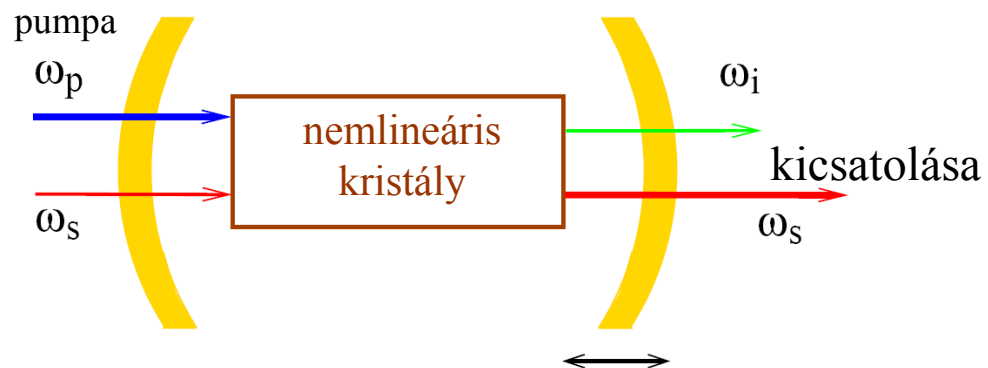
## a) Paraméteres erősítő:



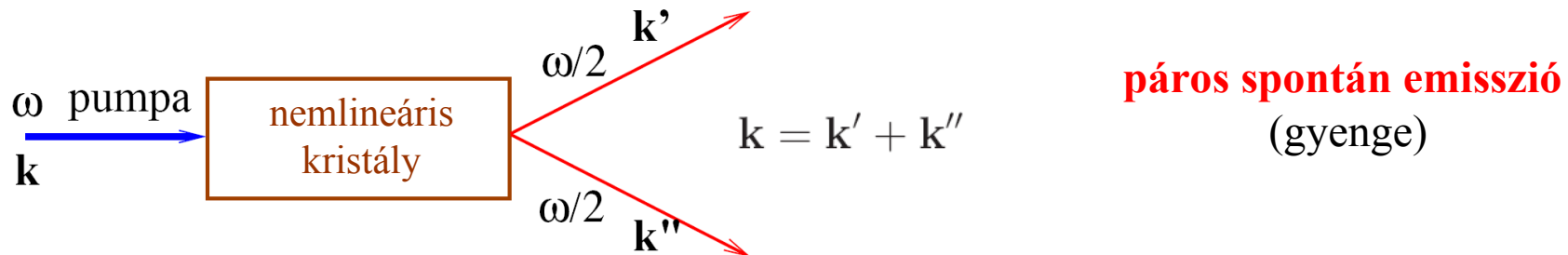
A jel és a „szélhámos” a pumpától kap energiát. A kimeneten  $\omega_p$  és  $\omega_i$  színszűrővel kiszűrhető, marad az erősített jel.

## b) Paraméteres oszcillátor:

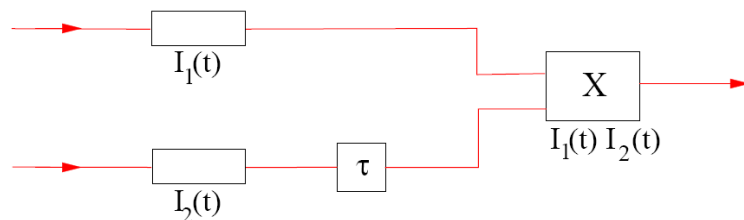
paraméteres erősítés **rezonátorban**:  
a rezonátorral hangolható,  
jóminőségű koherens fényforrás;  
jobb, mint a lézer, tisztább a fénye



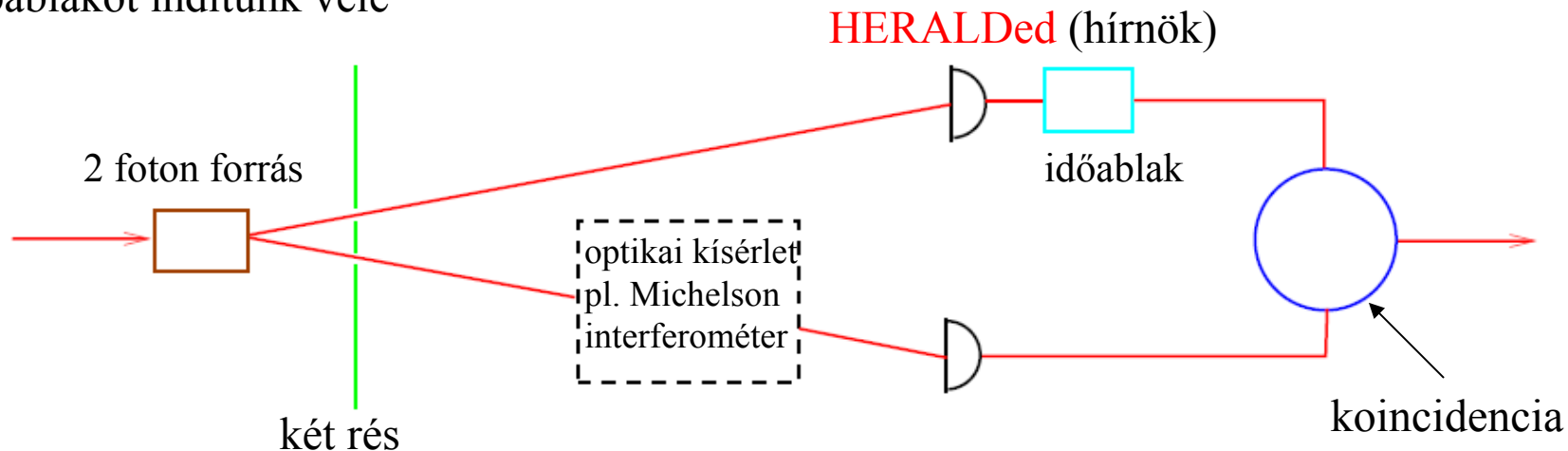
c) **Paraméteres lekonvertálás:** véletlen időpillanatban, de egyszerre két foton lép ki



**kétfoton-forrás:** Hanbury Brown és Twiss kísérlet sok modern laboratóriumi változata



**egyfoton-forrás az időablakban:** ha az egyik foton detektorral megfogjuk és időablakot indítunk vele





# Harmadrendű ( $\chi^{(3)}$ ) nemlineáritás

Sokféle (hasznos és káros) jelenséget eredményez. Négy hullám van jelen. A pumpáló tér amplitúdója nagy, a polarizációban az  $E$ -ben harmadrendű tagok nem hanyagolhatók el.

## a) Négyhullám-keverés, fáziskonjugáló tükör:

impulzus megmaradás:  $\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 + \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 = 0$

Ha a pumpáló terek **frekvenciái azonosak**, és egymással **ellentétes irányból lépnek be** a nemlineáris kristályba:

$$\mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2 = 0 \quad \longrightarrow \quad \mathbf{k}_3 + \mathbf{k}_4 = 0$$

legyen a bejövő hullám:

$$\mathbf{k}_3 \equiv \mathbf{k} \quad \text{és} \quad \omega_3 \equiv \omega \quad \longrightarrow \quad \mathbf{k}_4 = -\mathbf{k} \quad \text{és} \quad \omega_4 = \omega$$

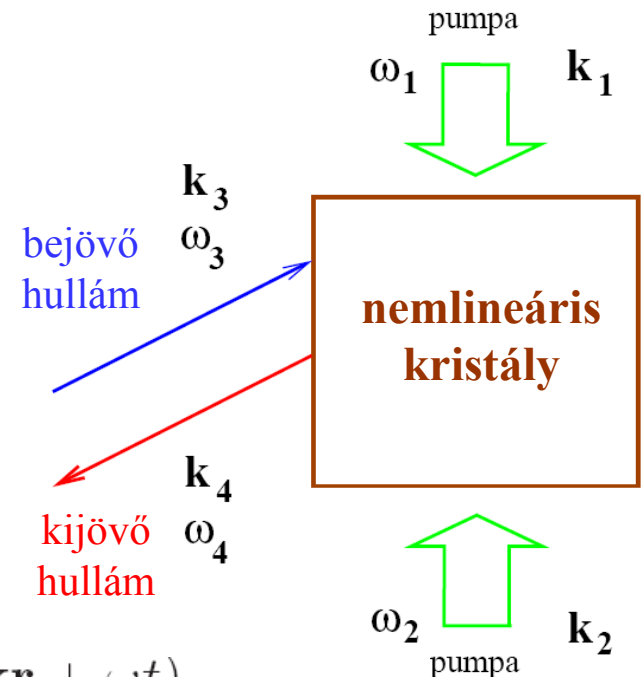
$$\cos(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)$$



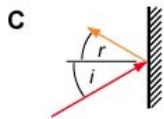
$$\cos(-\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)$$

$$\cos(\mathbf{k}\mathbf{r} + \omega t)$$

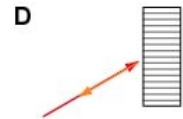
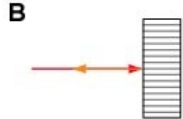
**időtükrozött hullám**



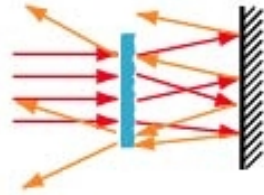
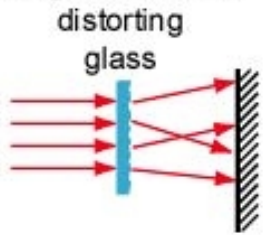
regular mirror



phase conjugate mirror

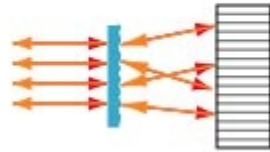
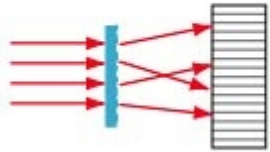


regular mirror

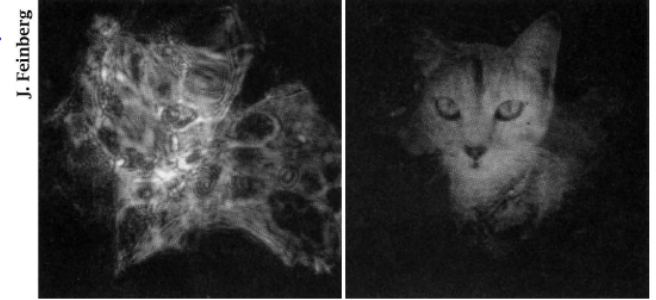


A fény egy olyan üvegen halad át, amely torzítja a bejövő hullámot. Ekkor a hagyományos tükör visszaveri a hullámot, de a torzítás tovább romlik a fénynek az üvegen való újabb áthaladásakor.

phase conjugate mirror



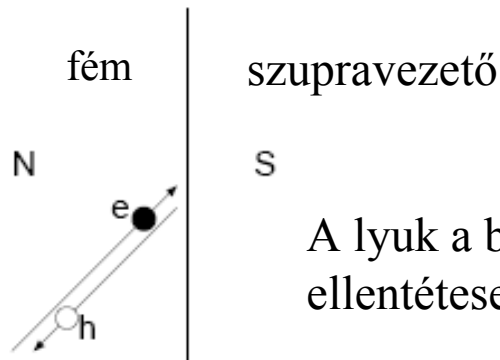
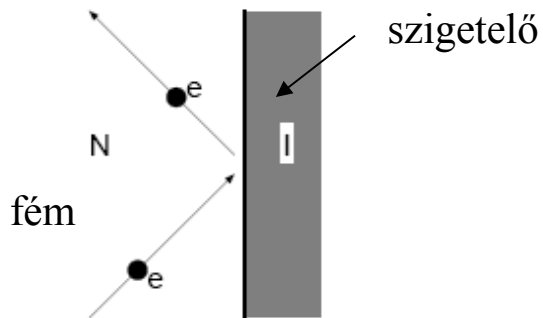
Fázis-konjugáló tükörrel a torzított kép rekonstruálható.



J. Feinberg, Opt. Lett. 7, 486 (1982)

Szilárdtestfizikában hasonló jelenség lép fel

Andrejev- reflexió esetén: elektron  $\rightarrow$  lyuk konverzió



A lyuk a bejövő elektron irányával ellentétesen irányban verődik vissza.

C. W. J. Beenakker: *Why does a metal–superconductor junction have a resistance?*,

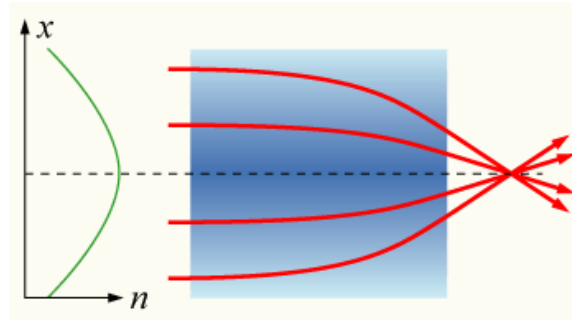
arXiv: cond-mat/9909293v2

b) **Önfokuszálás:** a törésmutatót a bejövő fény intenzitása modulálja

$$n \approx n + a_1 E^2$$



változó törésmutató (SELFOC, GRIN)

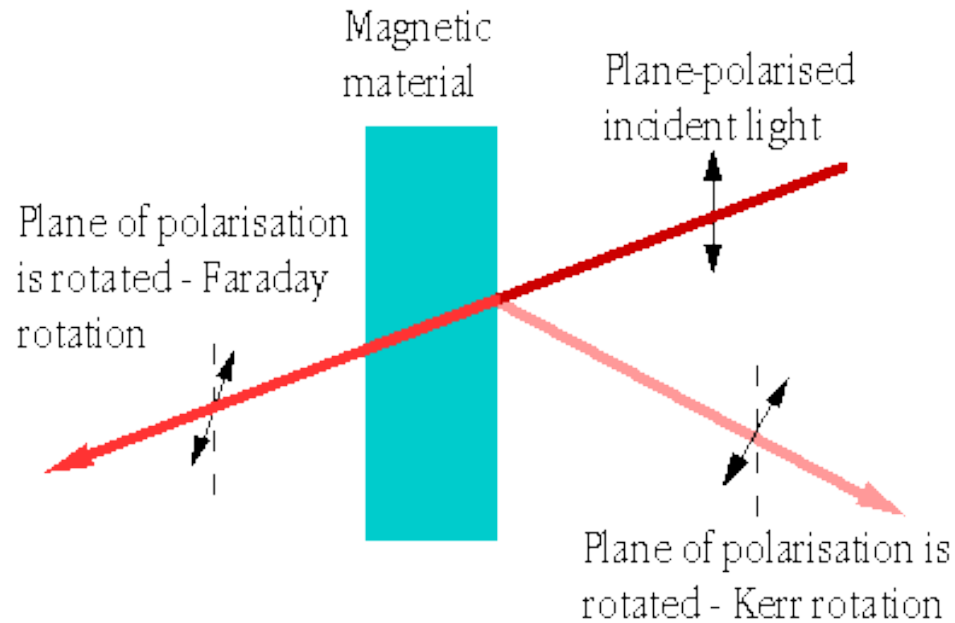


Nagy intenzitás-sűrűség

# Kerr mikroszkóp (Kerr microscope)

Faraday-effektus: mágneses tér által indukált optikai aktivitás, polarizációs forgatás (lásd 5. fejezet, 23. oldal).

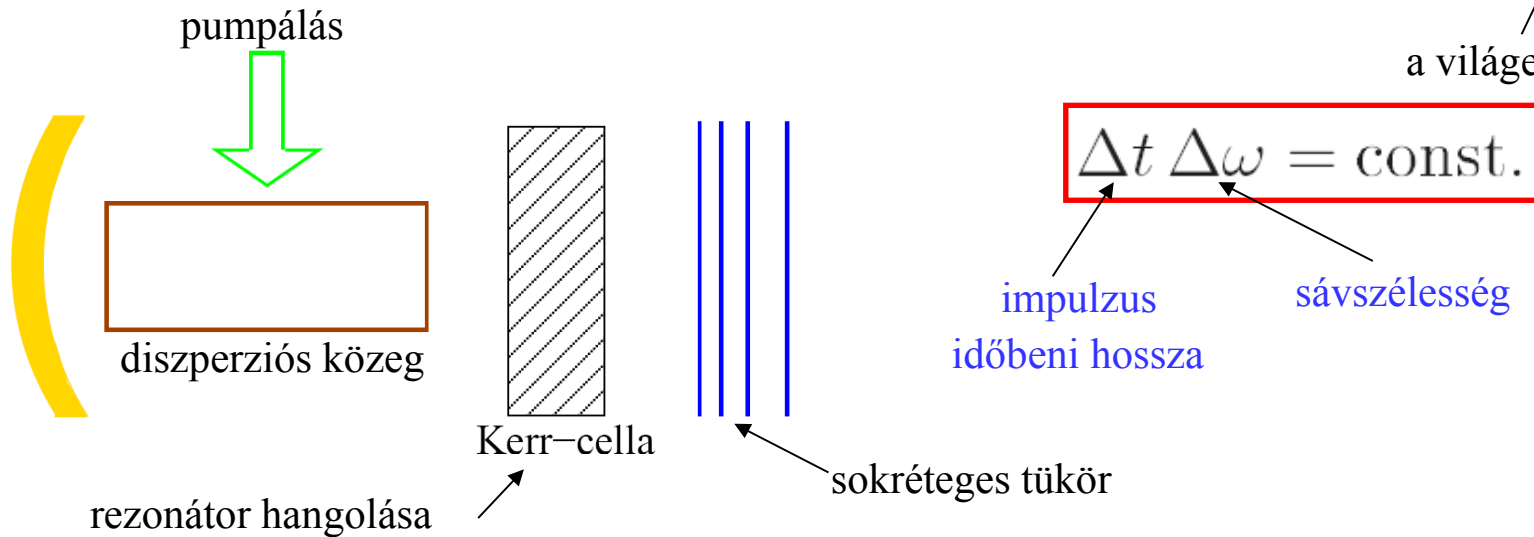
Mágneses anyagon áthaladó fény polarizációja elfordul, így alkalmas az anyag mágnesezettségének a mérésére.



# Rövid lézerimpulzusok

Néhány femtoszekundumos lézerimpulzusok  $1\text{fs} = 10^{-15}\text{s}$

$1\text{perc} = \sqrt{10^{18}\text{s} \times 10\text{fs}}$   
a világegyetem kora



- **módus-összehangolás (mode locking):** sok módus egyidejű indítása
- **diszperzió kihasználása:** nagyobb frekvenciájú (ezért gyorsabb) módusok hosszabb utat tesznek meg, ezt „**csörpölt**” („**chirp**”) tükrökkel valósítják meg (Szipöcs Róbert és Krausz Ferenc alkalmazták először a világon.

R. Szipöcs, K. Ferencz, C. Spielmann, F. Krausz: Optics Lett. **19**, 201 (1994)

Heibling János: *Ultrarövid fényimpulzusok előállítása és alkalmazása*, Fizikai Szemle, 1999/4 126. old.)

Óriási energiasűrűség, térerősség!

**Femtokémia:** valós időben letapogatni egy molekula rezgéseit,

Ahmed Zewail: kémiai Nobel-díj, 1999

**Attoszekundum:** elektron mozgása atomban

$$1\text{as} = 10^{-18}\text{s}$$

# Kvantumoptika

A newtoni mechanika és a maxwelli elektrodinamikán alapuló klasszikus fizikai világról a XX. században kiderült, hogy csak közelítés: meghatározott körülmények között a világ megértéséhez át kell térnünk a **kvantummechanikára** (pl. az atomokban mozgó elektronok helyes leírása), és a **kvantumelektrodinamikára**. Ez utóbbit nevezik az optikai frekvenciatartományban **kvantumoptikának**, a mikrohullámú tartományban (ritkábban) **kvantumelektronikának** is.

Magának a fénynek mérhető tulajdonságaiban a kvantumoptikai hatások alapvetési laboratóriumokban vizsgált, finom jelenségekre vezetnek (pl. kétfoton-korrelációk): lásd a „Sugárzások és részecskék” előadás és speciket (Janszky: Statisztikus kvantumoptika, Geszti Tamás: Kvantumjelenségek elmélete)

A kvantumoptika nagy és megkerülhetetlenül fontos jelenségei a **fény-anyag kölcsönhatásában** jelennek meg\*. Első azonosításuk *Planck*, *Einstein* és *Bohr* nevéhez fűződött; későbbi feltárásuk vezetett el a lézerek kifejlesztéséhez és a rájuk épülő viharosan fejlődő alkalmazásokhoz. Ezek az anyag legrejtettebb törvényeinek kutatástól az információkezelés és távközlés hihetetlen teljesítőképességű eljárásaiig terjednek.

\* a fény is anyag; ebben a megkülönböztetésben, szűkebb értelemben „anyagnak” azt nevezzük, ami nyugalomban is tud létezni (nem úgy, mint a fény, ami csak mozgásban létezik).

**Hőmérsékleti sugárzás (Planck):** adott hőmérsékletű üregben  $\nu$  és  $\nu + d\nu$  frekvenciák között a sugárzás  $u(\nu, T) d\nu$  sűrűségű energiát tárol, ami spektrométerrel mérhető. Az eredményből felismerhetjük, hogy az üreg „normál módusai” nem folytonosan vehetnek fel energiát, hanem frekvenciájukkal arányos  $h\nu$  adagokban („kvantumok”).

A Planck-állandó:

$$h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

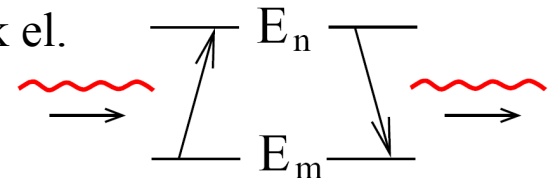
**Fotoelektromos effektus (Einstein):** a katódból kilépő elektronok a  $\nu$  frekvenciájú fénytől  $h\nu$  energiát vesznek fel, ami a fémbeli kötés leküzdése (kilépési munka:  $W$ ) és a maradék kinetikus energia (fékezőtérrel mérhető):

$$h\nu = W + \frac{1}{2} mv^2$$

**Atomok szinképe (Bohr):** Egy atomi rendszernek  $E_1, E_2, \dots$  energiájú „stacionárius állapotai” vannak. Ezek között időnként ugrásszerű átmenetek történnek, ilyenkor

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$$

frekvenciájú fény sugárzódik ki, ill. nyelődik el.



**Bohr:** a frekvenciafeltétel egyben **energiamegmaradási** feltétel is: ilyenkor a környezet

$h\nu = E_n - E_m$  nyer, illetve veszít.

**Einstein:** az elektromágneses sugárzási tér  $h\nu$  energiájú „**fotonokból**” áll; a sugárzás-anyag kölcsönhatás elemi folyamata: **1 foton kisugárzása**, illetve **elnyelése**

**Einstein-együtthatók:** az elemi folyamatok **gyakorisága** (időegység alatti valószínűség, angolul „rate” (ráta)) (tegyük fel, hogy  $E_n > E_m$ )

$E_n \rightarrow E_m$  **kisugárzás:**  $\frac{dN_m}{dt} = [A_{mn} + B_{mn}u(\nu)] N_n$

$E_m \rightarrow E_n$  **elnyelés:**  $\frac{dN_n}{dt} = B_{nm}u(\nu)N_m$

$u(\nu)$  spektrális energia sűrűség, Planck-féle sugárzási törvény  
 $u(\nu) = \frac{2\pi\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$   
 $u(\nu)$  sűrűségű sugárzás jelenlétében

spontán emisszió (pointing to  $A_{mn}$ )  
 indukált (stimulált) emisszió (pointing to  $B_{mn}u(\nu)$ )  
 abszorpció (pointing to  $B_{nm}u(\nu)$ )

$B_{mn} = B_{nm}$  „részletes egyensúly” (időtükrozési szimmetria)

A klasszikus optika annak a kérdésnek a megválaszolásával kezdődött, hogy **hogyan lehet a fény sugár, ha hullám.**

Most a kvantumoptika hasonló kérdést vet fel, **hogyan lehet a fény hullám, ha fotonokból áll?**

**A válasz:** a fotonok nem függetlenül röpködnek, hanem általában rengeteg, fázisban összehangolt fotonból álló **koherens állapotot** érzékelünk.

A Maxwell-egyenletek is ilyen koherens állapotú elektromágneses teret írnak le.

A fotonok tehát tipikusan „sokan együtt járnak”. Ha egyetlen fotonnal szeretnénk találkozni, trükkökre kényszerülünk (lásd 7. és 8. oldal).



# Lézerhatás

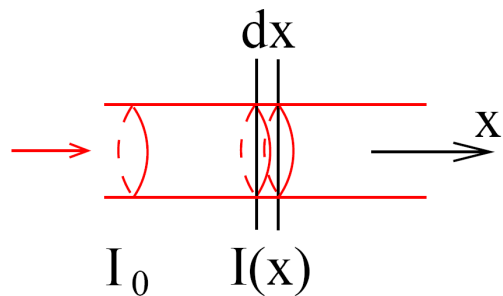
Erős fényben az indukált folyamatok sokkal erősebbek a spontán emissziónál:

$$u(\nu)B_{mn} \gg A_{mn}$$

Ha a sugárzás rezonáló, azaz  $\nu = \frac{E_n - E_m}{h}$ , akkor  $N$  atom közül térfogategységenként

$N_n$  számú van az  $E_n$  energiájú és  $N_m$  számú van  $E_m$  energiájú állapotban.

$B_{mn} = B_{nm}$  miatt az  $N_n, N_m$  „betöltési számokon” múlik, hogy az indukált emisszió vagy az abszorpció dominál.



Poynting-vektor:  $S = cu$ ,  $I = S$

$$dI = \left(\frac{I}{c}\right) (N_n B_{mn} - N_m B_{nm}) \frac{dx}{c} = IGdx$$



$$I(x) = I_0 e^{Gx}$$

erősítési tényező (gain):  $G = (N_n - N_m) \frac{B_{mn}}{c^2}$

Termodinamikai egyensúlyban:

$$N_n \sim e^{-\frac{E_n}{kT}} \rightarrow N_n \ll N_m, \text{ ha } E_n > E_m \rightarrow G < 0$$

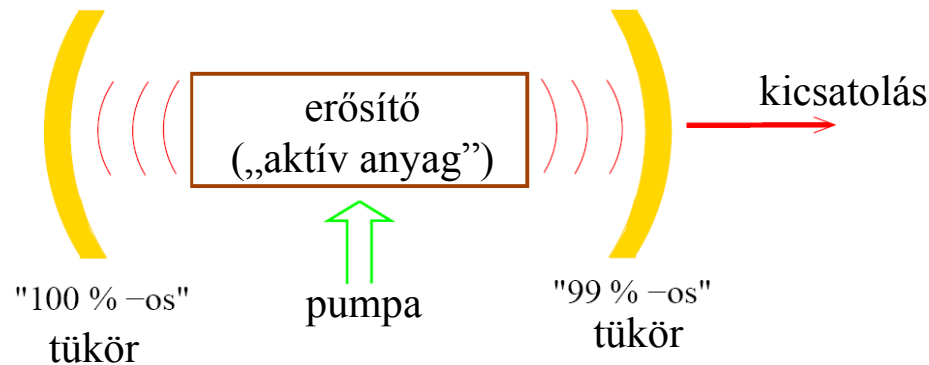
Megvalósítható a **populáció-inverzió**:  $N_n > N_m$ ,  $G > 0$  erősítés!

A populáció-inverzió alapuló fényerősítő neve **lézer-erősítő**,  
**LASER**: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation  
MASER: Microwave ....

A populáció-inverzió létrehozására erős gerjesztéssel kibillentik a lézer rezonáló energiaszintjeit termikus egyensúlyból („pumpálás”: az atomokat „felszivattyúzzák” a magasabb energiaszintre). Ennek annyi módja van, ahány lézer.

A stimulált emisszió **koherens** a beeső rezonáns fénnel, ezért tükrökkel **visszacsatolható** egy **Fabry-Perot rezonátorban**:

**lézer-erősítő** + **visszacsatolás** = **lézer oszcillátor** (röviden ezt hívják lézernek)



Az oszcillációhoz nagyon jóminőségű tükör kell. A fémtükör vesztesége túl nagy. Ha a tükör nem az aktív anyag saját felülete, akkor sokrétegű dielektrikum-tükröket használnak.

A Fabry-Perot rezonátor általában egyetlen módust erősít: móduskiválasztás történik.

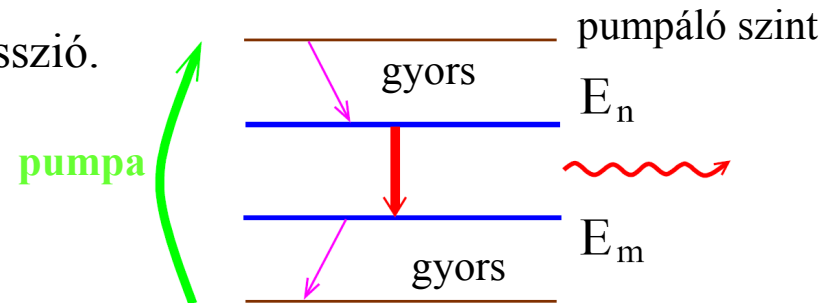
# Lézertípusok

Sok energiaszintű rendszerekből a rezonátor választja ki, azt a két szintet, amelyek között a lézerműködés lejátszódik.

A „lézelő” szintpár általában „védett”: a pumpálás-kiürítés durva beavatkozása nem közvetlenül érinti.

**Feltétel:** a lézelőszinten legyen gyenge a spontán emisszió.

A felhasználható szintek mindenféle gerjesztést használhatnak: elektron (Ne), rezgés (CO<sub>2</sub>), stb.

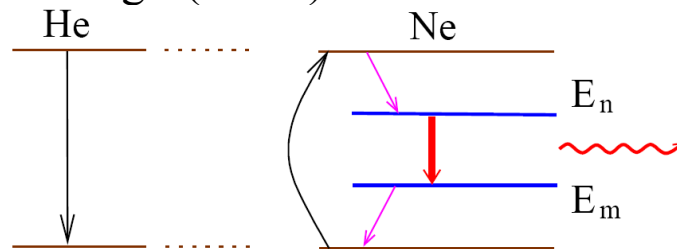


**Gázlézerek:** a pumpálás gázkisülésben, elektronütközéssel történik

Az ütközéssel szerzett gerjesztés áttevődik a lézer-szintre.

**He-Ne lézer** (a legolcsóbb, legkevésbé kényes, mW):

- a gázkisülés a héliumot gerjeszti:  $\text{He} + e^- \rightarrow \text{He}^*$
- a hélium ütközéssel átadja a gerjesztést a neonnak:  $\text{He}^* + \text{Ne} \rightarrow \text{He} + \text{Ne}^*$
- a gerjesztett neon lézerként világít (**vörös**)



Ar, Kr, CO<sub>2</sub> gázlézerek: növekvő teljesítmény, bonyolultabb kezelés, az intenzív fény veszélyes

**Szilárdtest-ionlézerek:** szigetelőkristályban vagy üvegbe beágyazott átmenetifém vagy ritkaföldfém ion gazdag spektrumából választanak pumpált és lézelő szinteket.

Optikai pumpálás (lámpával vagy másik lézerrel)

**Rubin:**  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}^{3+}$

**Neodimium:** YAG ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ ) vagy üveg +  $\text{Nd}^{3+}$

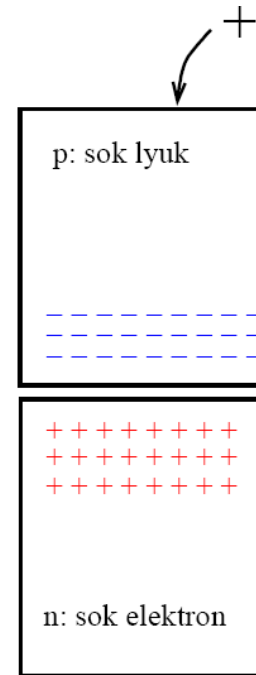
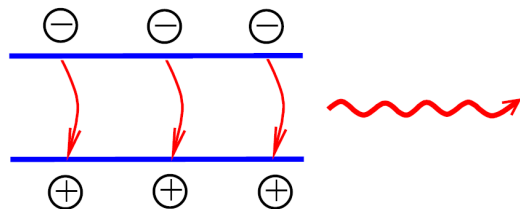
**Titán-zafír:**  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti}^{3+}$  kiszorítja a többit az alkalmasokban

$\text{Er}^{3+}$  ionnal adalékolt  $\text{SiO}_2$  szál, a távközlés slágere! infra  $\sim 1.3 \mu\text{m}$ , ahol a szálnak legkisebb a csillapítása

**Félvezető lézerdiodák:** kicsi, olcsó egyszerű, ellenálló, szétterülő nyaláb, erős melegedés

**p-n átmenet**, nyitóirányban meghajtva: pumpálás, az injektált kisebbségi töltéshordozók jelenléte populáció-inverziót jelent.

elektron-lyuk rekombináció → lézersugárzás



Az átmeneti réteg sugároz; egyben optikai hullámvezetőként is működik!  
A rezonátortükör maga a félvezetőkristály felülete!

Látható fény:  $\text{GaAs}/\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$

Második nemzedék:  $\text{InP}/\text{InGaAsP}$       infra:  $1.3 - 15 \mu\text{m}$   
ezen a hullámhosszon a távközlési szál elnyelése sokkal kisebb