

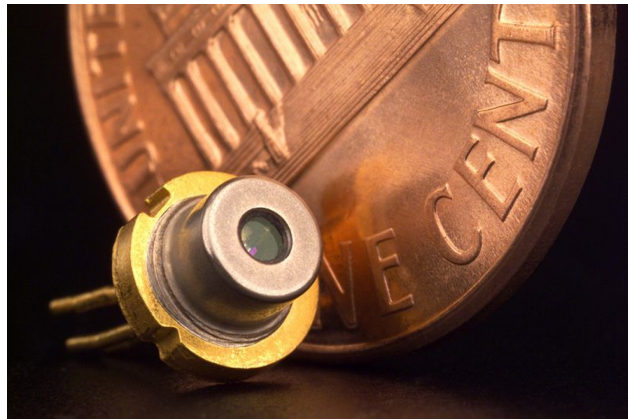
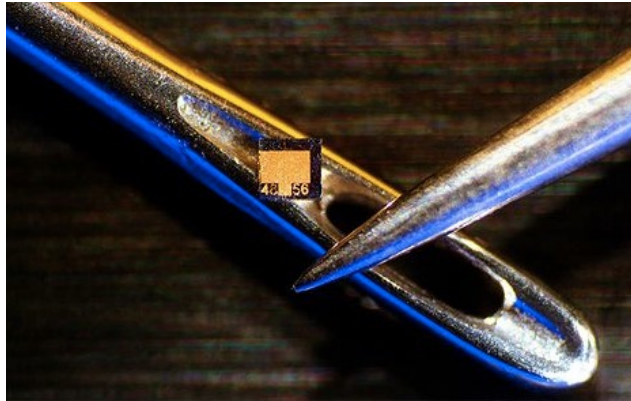
# FÉNYERŐSÍTÉS, LÉZER

KELLERMAYER MIKLÓS

# Lézerek mindenütt

“Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation”

Fényerősítést megvalósító **lumineszcens** fényforrás.



5 mW diódalézer  
néhány mm



Terawattos NOVA lézer - Lawrence Livermore Laboratories  
Futballpálya méret



# Lézertörténet dióhéjban

Albert Einstein  
(1879-1955)



**1917** - *Albert Einstein*: indukált emisszió elméleti predikciója.



Arthur L. Schawlow  
(1921-1999)

**1946** - G. Meyer-Schwickerather: első szemműtét fénnnyel.

**1950** - *Arthur Schawlow és Charles Townes*: az emittált fotonok a látható tartományba eshetnek.

Theodore Maiman  
(1927-2007)



**1954** - *N.G. Basow, A.M. Prochorov, és C. Townes*: ammónia mézer.

**1960** - *Theodore Maiman*: első lézer (rubin lézer).



Nikolay G. Basov  
(1922-2001)

**1964** - *Basow, Prochorow, Townes* (Nobel-díj): kvantum elektronika.

**1970** - *Arthur Ashkin*: lézercsipesz.

Charles H. Townes  
(1915-)

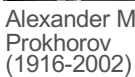


**1971** - *Gábor Dénes* (Nobel-díj): holográfia.

**1997** - *S. Chu, W.D. Phillips és C. Cohen-Tanoudji* (Nobel-díj): lézeres atomhűtés.



Steven Chu  
(1948-)



Alexander M. Prokhorov  
(1916-2002)

**2013** - *NIF* (National Ignition Facility, USA): magfúzió beindítása 192 lézernyalábbal, pozitív energiamérleg.

**2017** - ELI (Extreme Light Infrastructure) indulása, Szeged. Attoszekundumos ( $10^{-18}$  s) fényimpulzusok előállítása.



Gábor Dénes  
(1900-1979)

**2018** - Fizikai Nobel-díj: *Arthur Ashkin* (lézercsipesz), *Gérard Mourou* és *Donna Strickland* (ultrarövid lézerimpulzusok).

Krausz Ferenc  
(1962-)

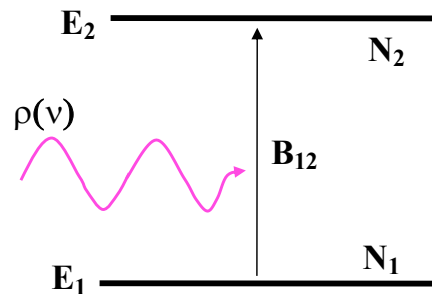


**2023** - Fizikai Nobel-díj: *Pierre Agostini, Krausz Ferenc, Anne L'Huillier*, attoszekundumos lézerimpulzusok.

# A lézer alapjai I.

## Indukált (stimulált) emisszió

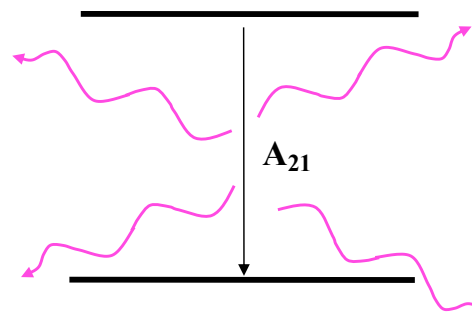
1. Abszorpció



Átmenet gyakorisága:  
 $n_{12} = N_1 B_{12} \rho(v)$

$\Delta E = E_2 - E_1 = h\nu$   
 energiakvantum  
 elnyelésekor.

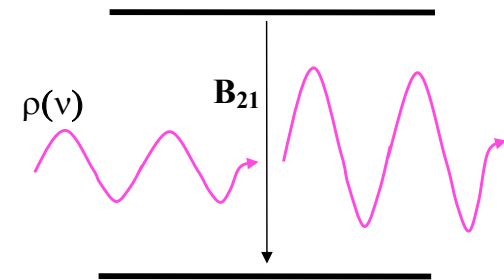
2. Spontán emisszió



Átmenet gyakorisága:  
 $n_{21} = N_2 A_{21}$

$E_2 - E_1$  fotonok  
 egymástól függetlenül  
 a tér minden irányába.

3. Indukált emisszió



Átmenet gyakorisága:  
 $n_{21} = N_2 B_{21} \rho(v)$

Külső sugárzási tér hatására.  
 Sugárzási tér energiája nő.  
 Emittált és külső fotonok fázisa,  
 iránya, frekvenciája megegyezik.

*Magyarázat:* kétállapotú atomi vagy molekuláris rendszer

$E_1, E_2$ : energianívók,  $E_2 > E_1$

$\rho(v)$ : sugárzási tér spektrális energiasűrűsége

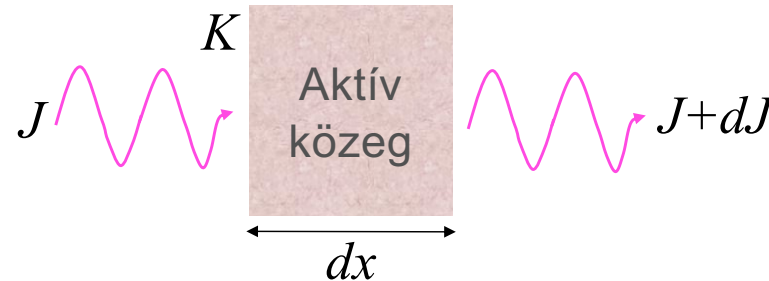
$N_1, N_2$ : adott energianívón levő atomok, molekulák száma

$B_{12}, A_{21}, B_{21}$ : energianívók közötti átmeneti valószínűségek (**Einstein**-féle együtthatók)

# A lézer alapjai II.

## Populáció inverzió

Fényerősítés az energianívók relatív betöltöttségétől függ



$$dJ = JK(N_2 - N_1)dx$$

$J$  = energiaáram-sűrűség

$K$  = állandó

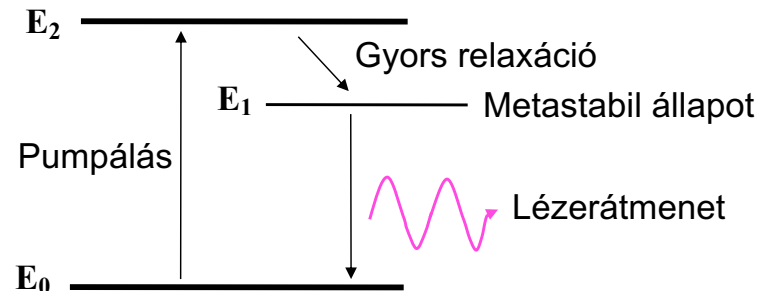
$x$  = fény által a közegben megtett út

$N_1, N_2$  = atomok száma az energianívón

**N.B.: Ha  $dJ$  pozitív, több fény jön ki a közegből, mint amennyi bejut!**

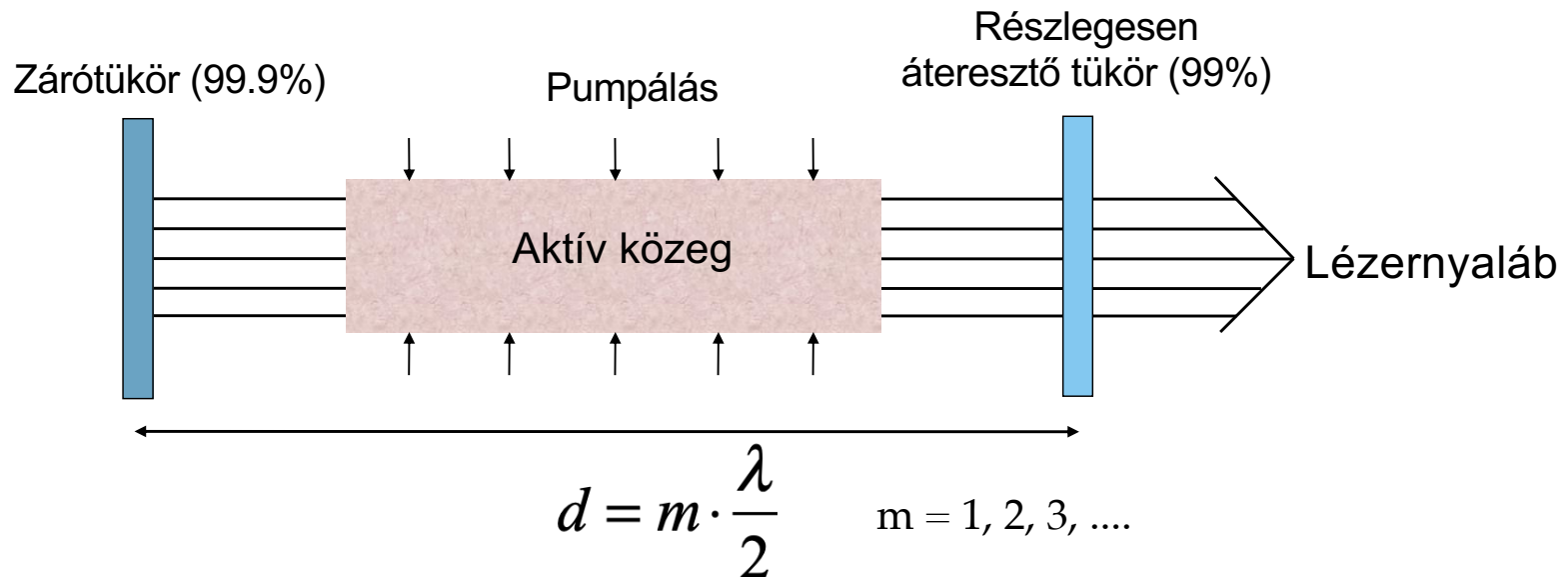


- Populáció inverzió csak többállapotú rendszerben!
- Pumpálás: elektromos, optikai, kémiai energia



# A lézer alapjai III.

## Optikai rezonancia



### Rezonátor:

- két párhuzamos sík (vagy homorú) tükör
- a kimenő fényt eljuttatja egy részét visszacsatolja a közegbe
- pozitív visszacsatolás -> öngerjesztés -> rezonancia

Optikai zár a rezonátorban: Q-csatolás, impulzus üzemmód

# A lézerfény tulajdonságai

## 1. Kis divergencia

Párhuzamos nyaláb

## 2. Nagy teljesítmény

Folytonos üzemmódban több tíz, akár száz W (pl. CO<sub>2</sub> lézer)

Q-csatolású üzemmódban a pillanatnyi teljesítmény hatalmas (GW)

Kis divergencia miatt óriási térbeli teljesítménysűrűség

## 3. Kis spektrális sávszélesség

“Monokromaticitás”

Nagy spektrális energiasűrűség

## 4. Polarizáltság

## 5. Rendkívül rövid impulzusok lehetősége

ps, fs, as

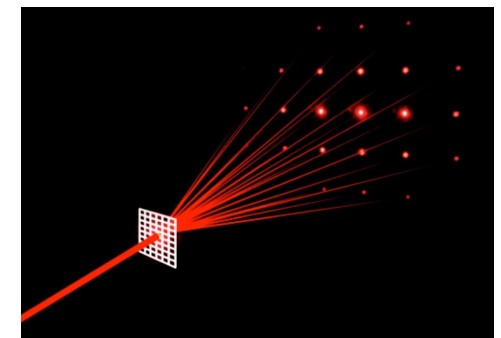
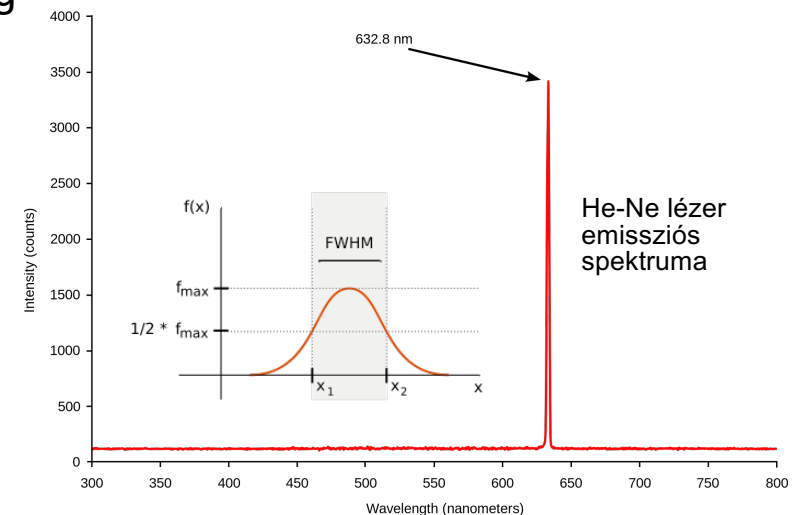
## 6. Koherencia

Fázisazonosság, interferenciaképesség

Időbeli koherencia (különböző időpontokban emittált fotonok fázisazonossága)

Térbeli koherencia (nyalábkeresztmetszet menti fázisazonosság)

*Alkalmazás:* holográfia, optikai koherencia tomográfia



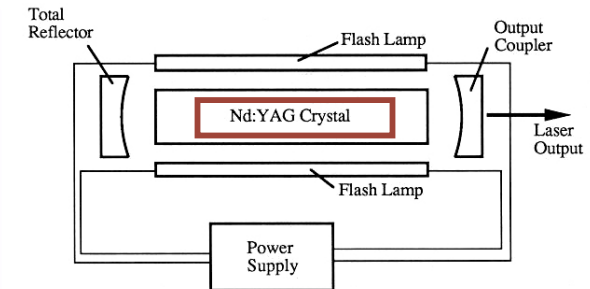
# Lézertípusok

Fényerősítő közeg alapján:

## 1. Szilárdtest lézerek

Kristályokba v. üveganyagokba bevitt fémszennyeződés; Rubin, Nd-YAG, Ti-zafír

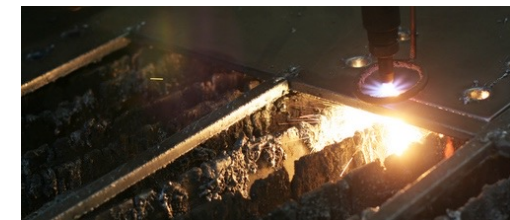
Vörös-infravörös spektrális tartomány; Folytonos, Q-kapcsolású üzemmód, nagy teljesítmény



## 2. Gázlézerek

Legismertebb: *He-Ne lézer* (10 He/Ne). Kis energia, Széleskörű használat

*CO<sub>2</sub> lézer*: CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He keverék;  $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$ ; Óriási teljesítmény (100 W)

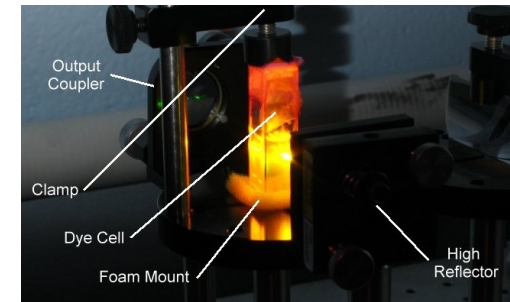


fémleap  
vágása  
CO<sub>2</sub>  
lézerrel

## 3. Festéklézerek

Szerves festékek (pl. rodamin, kumarin) híg oldata; Pumpálásra más lézer használt

Nagy teljesítmény (Q-kapcsolt módban); Hangolható



festéklézer

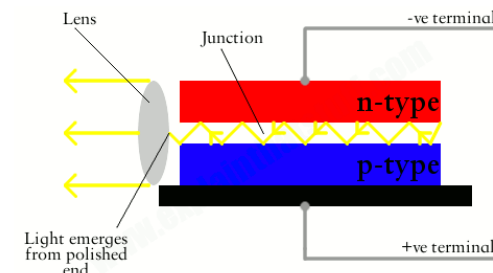
## 4. Félvezető (dióda) lézerek

Összefekvő p- és n-típusú, szennyezett félvezetők határán.

Rezonátor tükrökre nincs szükség (belső visszaverődés)

Vörös, IR spektrális tartomány. Nagy kontinuus üzemmódú teljesítmény (akár 100W)

Nyalábkarakterisztika nem túl jó. Kis méret miatt széleskörű alkalmazás.



diódalézer

A röntgentől az infravörösre rendelkezésre állnak lézervonalak.

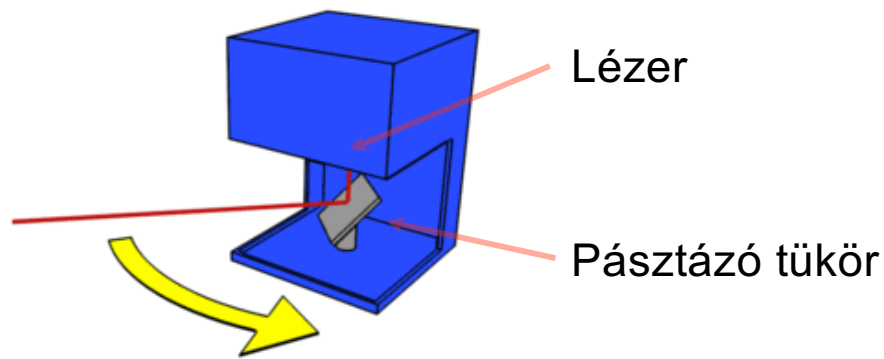


# Lézeralkalmazás szempontjai

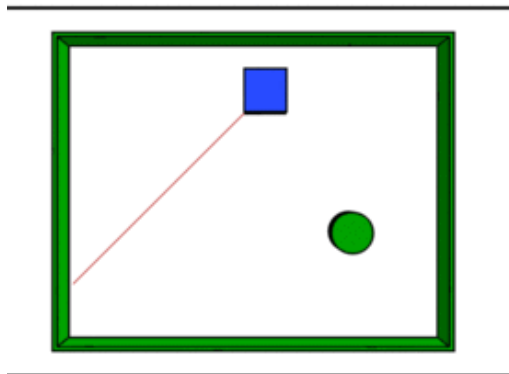
- Irányíthatóság, kis divergencia
- Monokromaticitás/hangolhatóság
- Koherencia
- Rövid impulzusok lehetősége
- Teljesítmény:
  - 5 mW – CD-ROM meghajtó
  - 5–10 mW – DVD lejátszó vagy DVD-ROM meghajtó
  - 100 mW – Nagysebességű CD-RW író
  - 250 mW – DVD-R író
  - 1–20 W – szilárdtest-lézer mikromegmunkálásra
  - 30–100 W – sebészeti CO<sub>2</sub> lézer
  - 100–3000 W – ipari CO<sub>2</sub> lézer (lézervágó)
  - 1 kW – 1 cm diódalézer rúd

# Sebességmérés lézerrel

## LIDAR: “Light Detection and Ranging”



Irányíthatóság,  
kis divergencia



Felülnézeti elrendezés



Felvétel:  
rekonstruált térbeli  
elhelyezkedés.  
Közlekedési  
sebességmérőben:  
100 impulzus 0.3 s alatt

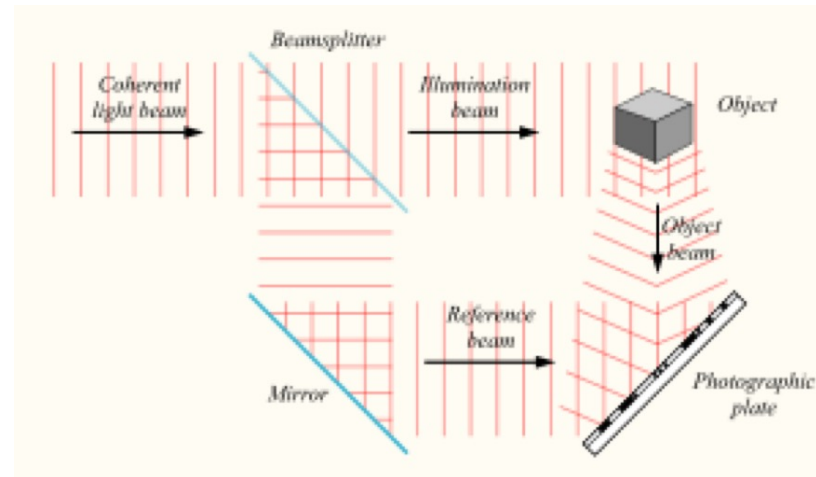


# Holográfia

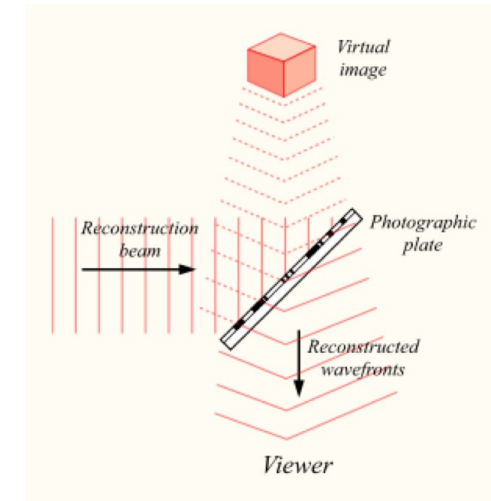
## Koherencia



Gábor Dénes  
(1900-1979)



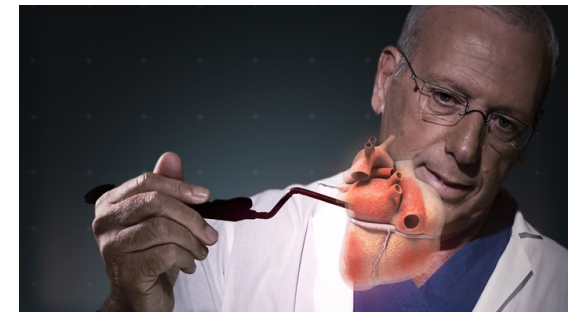
Hologram felvétele



Hologram megtekintése



Hologram fotolemez felülete



Hologramok

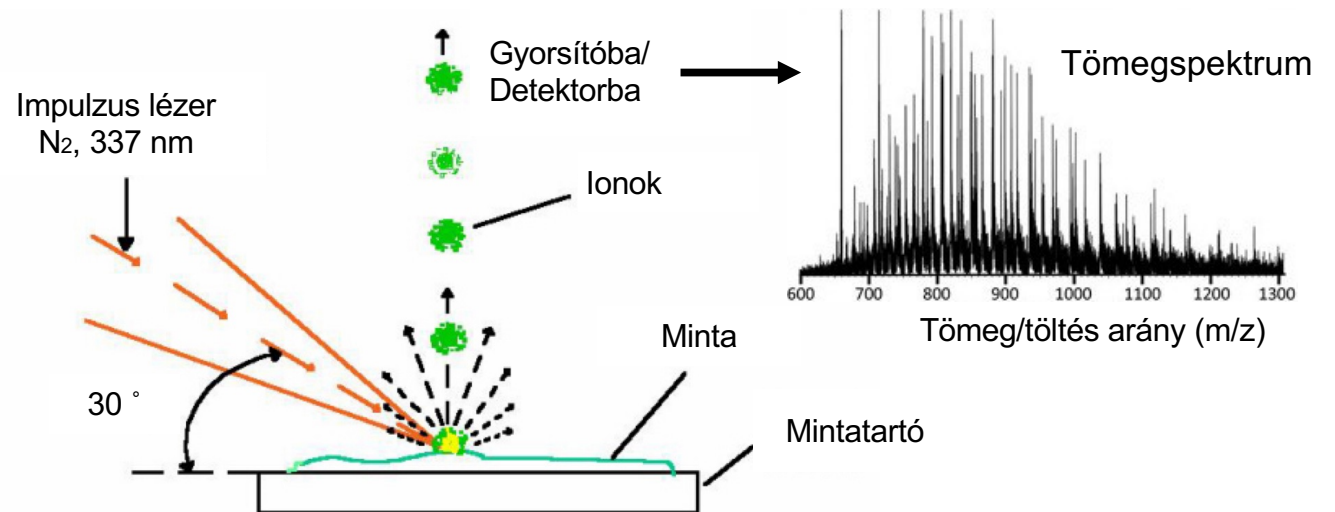
# Molekuláris analitika

## MALDI-TOF

### tömegspektrometria:

Matrix-Assisted Laser  
Desorption/Ionization Time Of Flight  
mass spectrometry

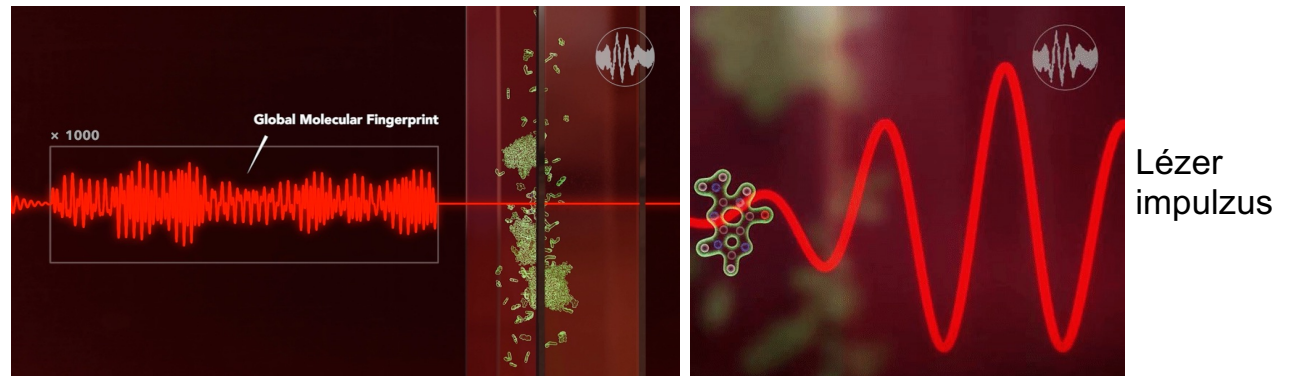
Teljesítménysűrűség



## Molekuláris ujjlenyomat

Rövid impulzusok,  
hangolhatóság

Krausz Ferenc  
(1962-)  
Nobel-díj 2023





# Molekuláris és celluláris manipuláció

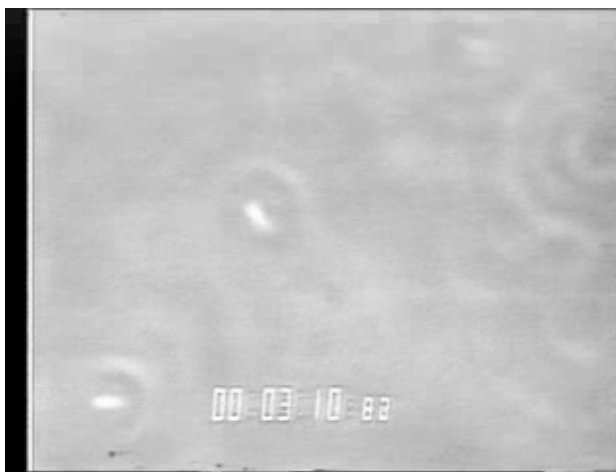
## Lézercsipesz

Teljesítménysűrűség,  
irányíthatóság

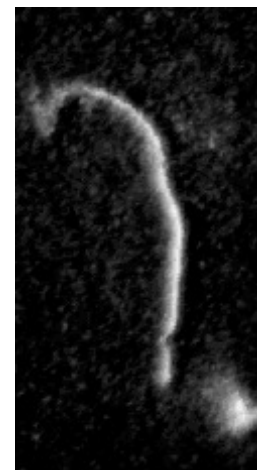
Arthur Ashkin  
(1922-2020)  
Nobel-díj 2018



*E. coli* sejtek



Aktin filamentum



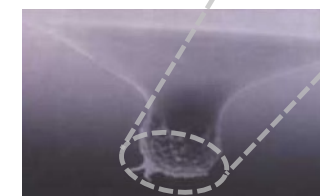
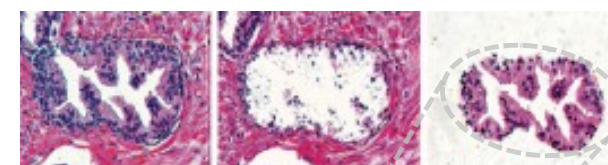
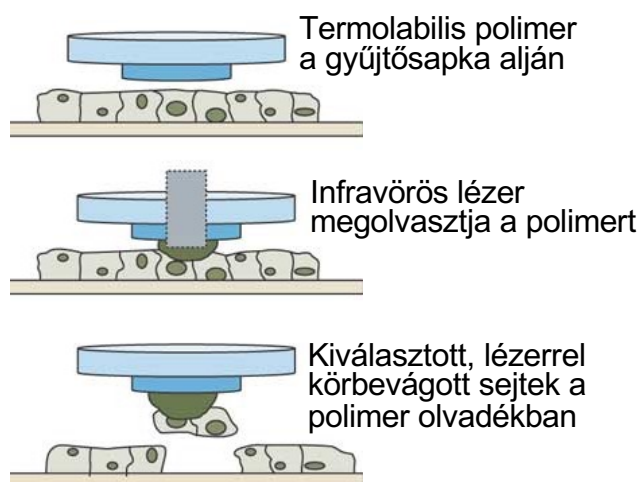
dsDNS



Molekuláris  
erőmérés  
lehetősége!

## “Laser capture microdissection”

Teljesítménysűrűség,  
irányíthatóság

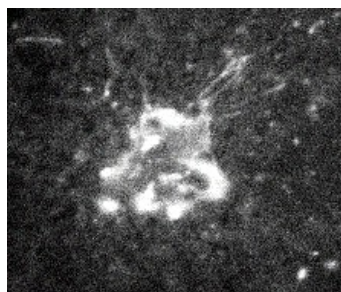


Lokális (térhez kötött) analitika  
(kémia, biokémia, genetika)

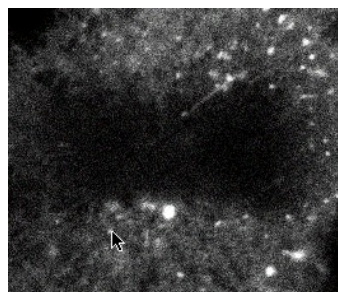
# Celluláris analitika

## FRAP

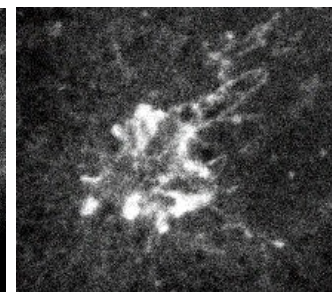
Teljesítménysűrűség,  
irányíthatóság



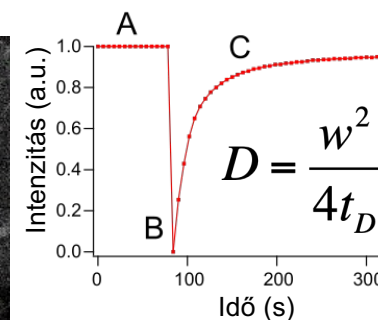
A. Kifehérítés  
előtt



B. Közvetlenül a  
lézermegvilágítás után



C. Fluoreszcencia  
visszatérése



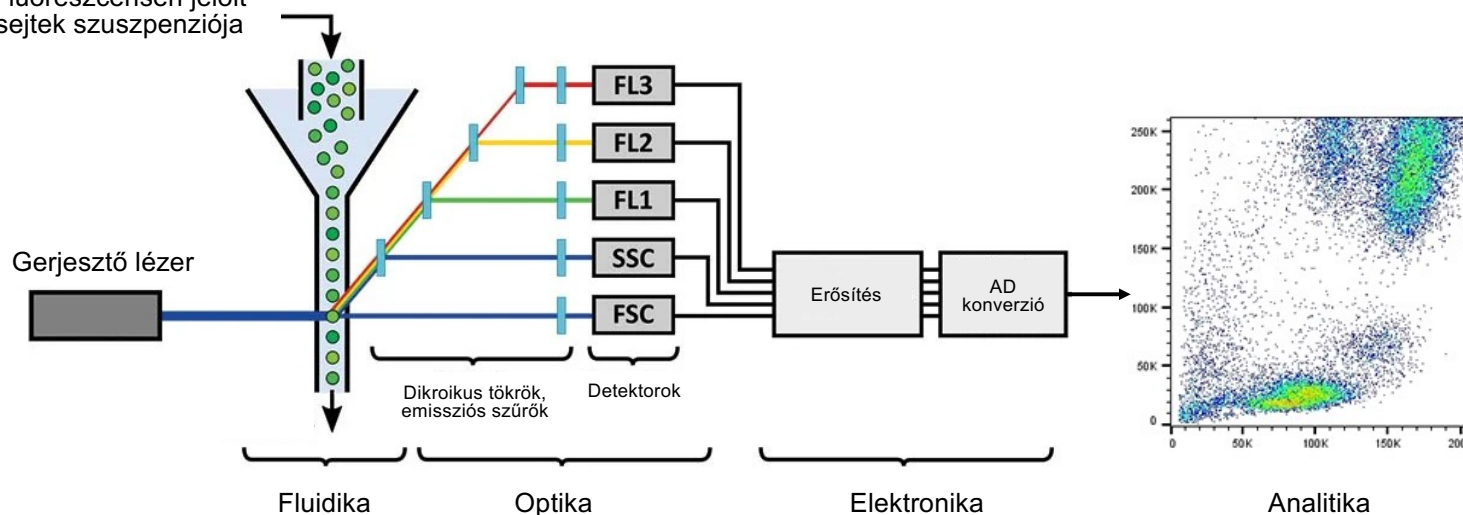
$D$  = diffúziós állandó  
 $w$  = kifehérített terület átmérője  
 $t_D$  = időállandó

## Áramlási citometria

Monokromaticitás

Fluoreszcensen jelölt  
sejtek szuszpenziója

Gerjesztő lézer

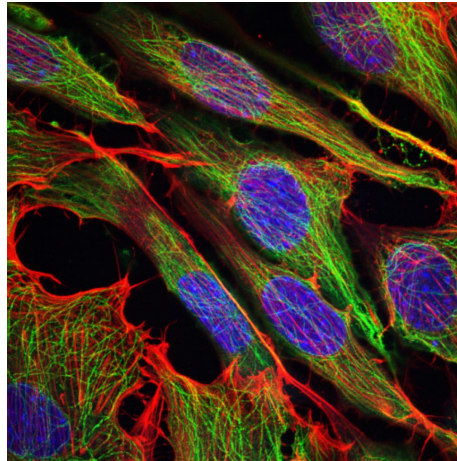
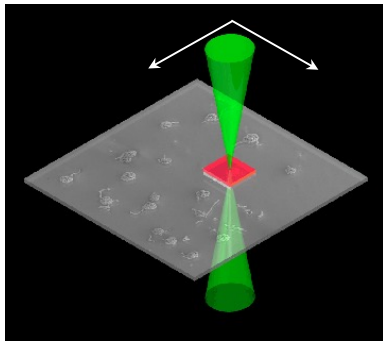


# Mikroszkópiák

**Probléma:** a koherencia miatt a lézermegvilágítás különleges megoldásokat igényel!

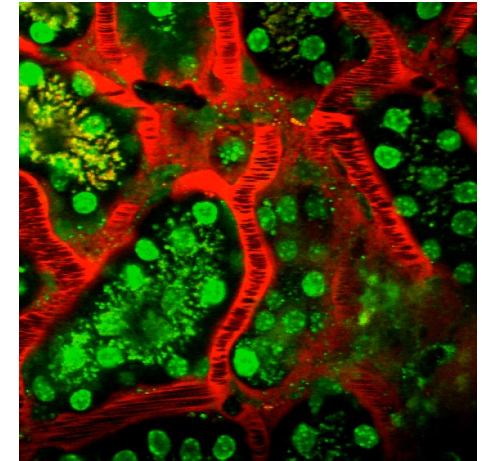
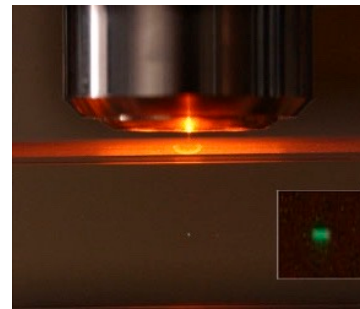
## Lézer pásztázó konfokális mikroszkópia

Monokromaticitás,  
irányíthatóság



## Multifoton fluoreszcencia mikroszkópia

Monokromaticitás,  
irányíthatóság,  
rövid impulzusok



## Lokalizáció alapú superfelbontású mikroszkópiák

Monokromaticitás,  
teljesítménysűrűség



E. Betzig



W.E. Moerner

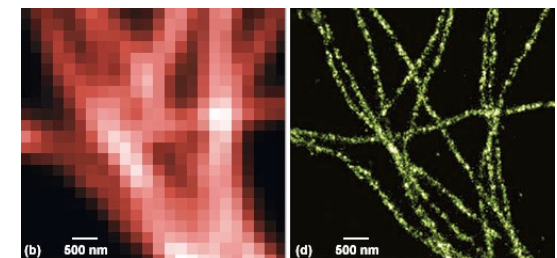
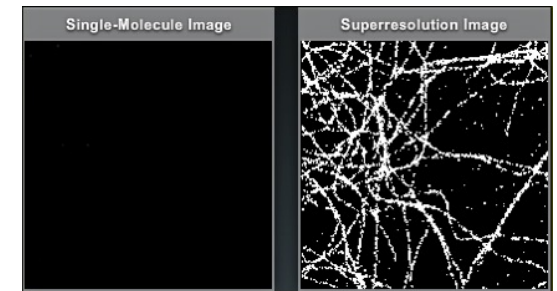
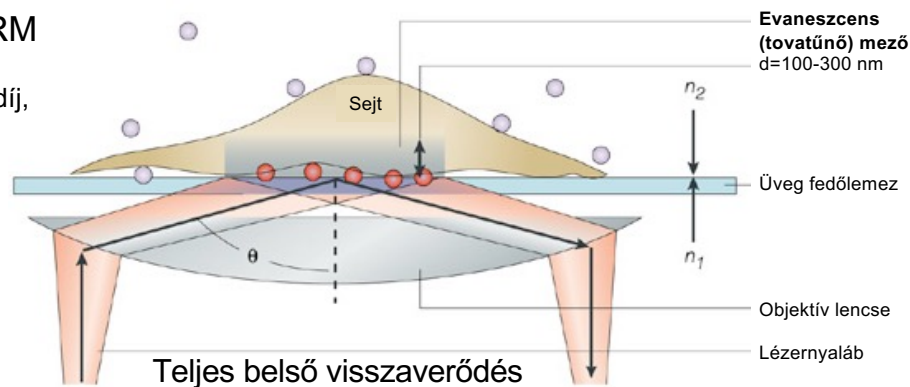
STORM

Nobel-díj,  
2014



PALM

Xiaowei  
Zhuang



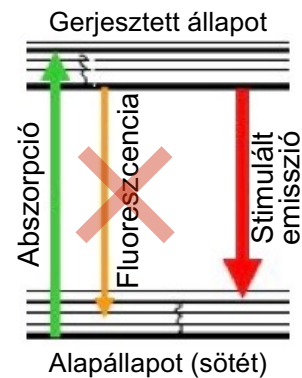


# STED szuperfelbontású mikroszkópia (STimulated Emission Depletion)

Lézer alapjelenség, monokromaticitás, teljesítmény, irányíthatóság

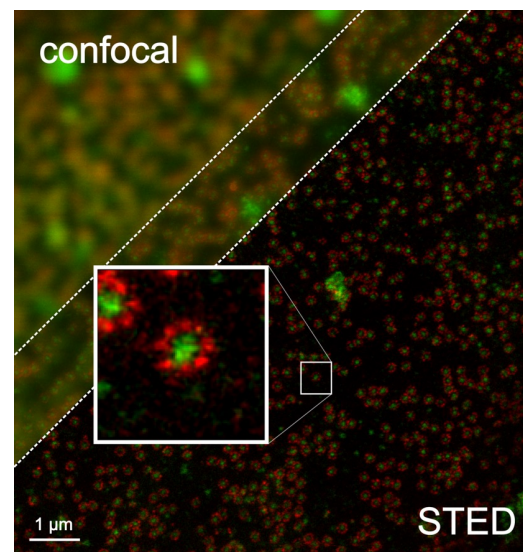
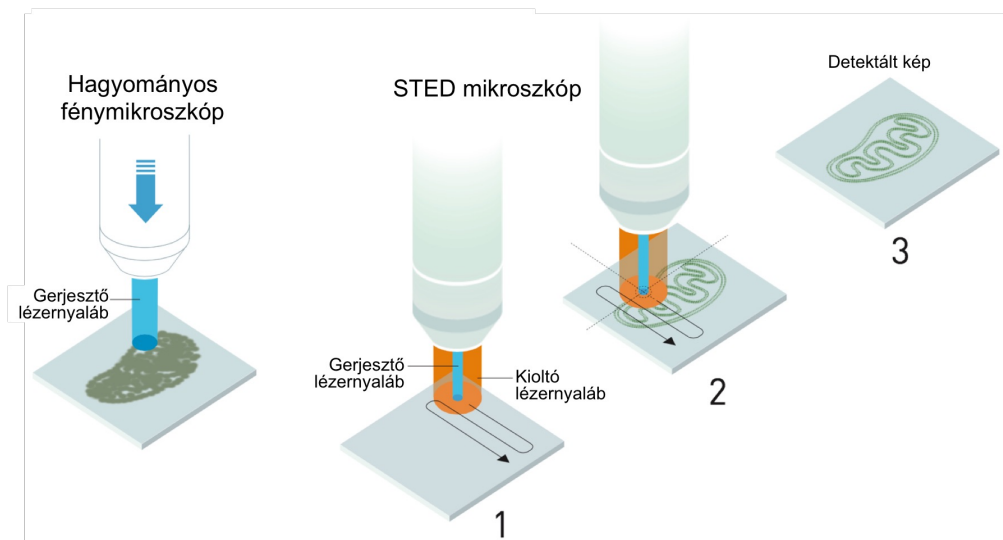
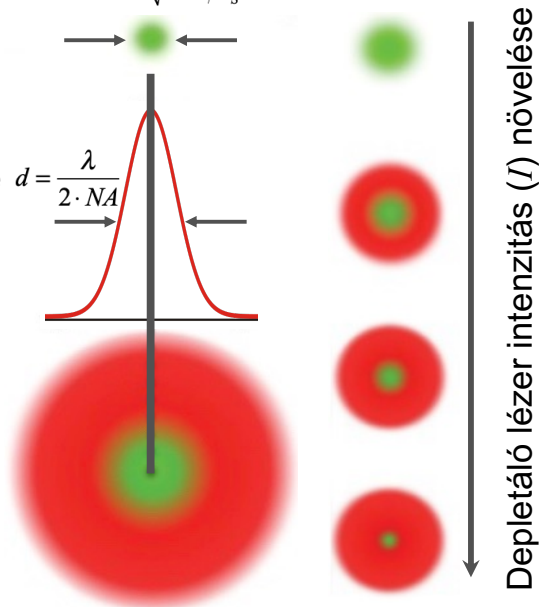


Stefan Hell  
(Nobel-díj 2014)



Hell:  $d = \frac{\lambda}{2 \cdot NA \sqrt{1 + I/I_s}}$

Abbé  $d = \frac{\lambda}{2 \cdot NA}$



Maghártya pórus komplexek  
STED mikroszkópos képe



# A lézer orvosi alkalmazásai

Beeső lézernyaláb

Reflexió



Megfontolandó  
lézertulajdonságok:

- Irányíthatóság (kis divergencia, sebészi alkalmazások)
- Teljesítménysűrűség (sebészi alkalmazások)
- Monokromaticitás (szöveti abszorbancia)
- Koherencia (interferencia, képalkotás)

A biológiai szövet tulajdonságai alapvetőek a hatás kialakításában:  
abszorbancia, transzmittivitás, fényindukált reakciók

# Bőrgyógyászati alkalmazások I.

## Lézeres szőrtelenítés

Phototricholysis, photoepiláció

**Alapja:** szelektív photothermolysis chromophorok általi szelektív abszorpció által

Alkalmazott **chromophorok:**

1. Szén (exogén, széntartalmú kenőcsök)
2. Hemoglobin (endogén)
3. Melanin (endogén)



Kezelés előtt

Kezelés után

# Bőrgyógyászati alkalmazások II.

## Tetoválás eltávolítás



Kezelés előtt



Kezelés után

## Anyajegy (naevus) eltávolítás



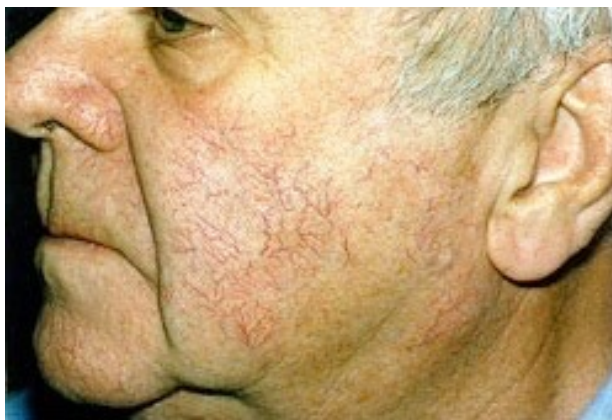
Kezelés előtt



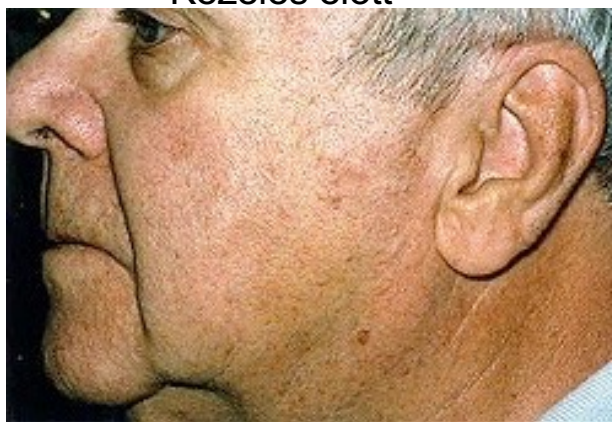
Kezelés után

# Bőrgyógyászati alkalmazások III.

Felületes erek, vénák  
eltávolítása



Kezelés előtt



Kezelés után

Bőr felületi módosítása  
("resurfacing")



Ránctalanítás



Rhinophyma (faggyúmirigy hipertófia, fibrózis)



# Onkológiai alkalmazások

## Fotodinámiás terápia

### Photodynamiás terápia (PDT):

Roswell Park Cancer Institute 1970-es évek.

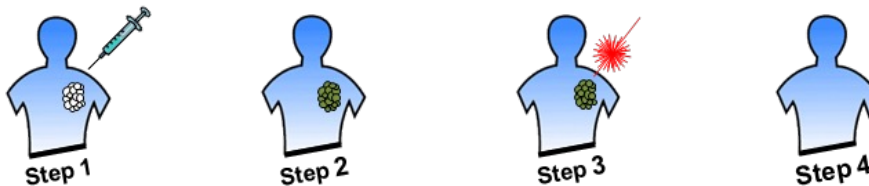
### Háromkomponensű tumorterápiás módszer:

1. Fotoszenzitizáló ágens, 2. Fény, 3. Oxigén.



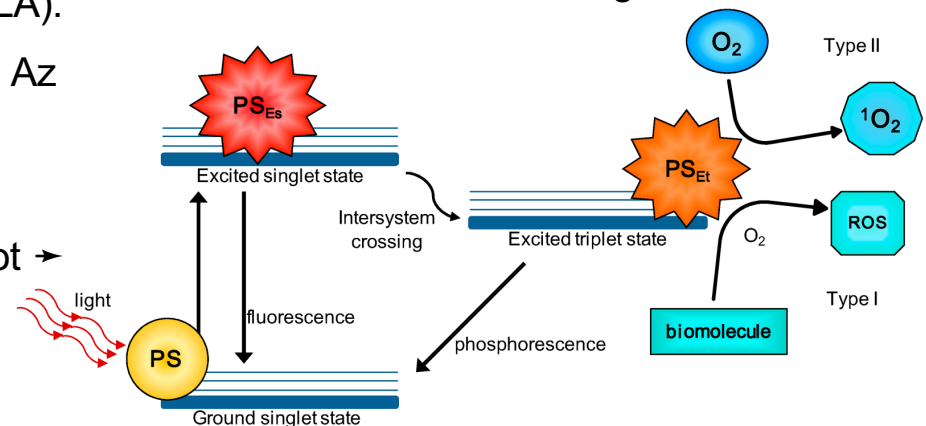
Fény szervezetbe juttatása: felületi megvilágítás, optikai kábel

### Lépések:



1. Fotoszenzitizáló prekursor beadása (aminolevulinsav, ALA).
2. Néhány órás inkubációs idő koncentráció a tumorban. Az ALA protoporphyrin IX-é alakul.
3. A célterület megvilágítása diódlézerrel (néhány perc).
4. Protoporphyrin abszorbeál  $\rightarrow$  gerjesztett szingulett állapot  $\rightarrow$  triplett állapot  $\rightarrow$  energiatranszfer triplett oxigénnel  $\rightarrow$  gerjesztett, reaktív oxigén  $\rightarrow$  szöveti reakció. Néhány napon belül a terület elhal, leválik.

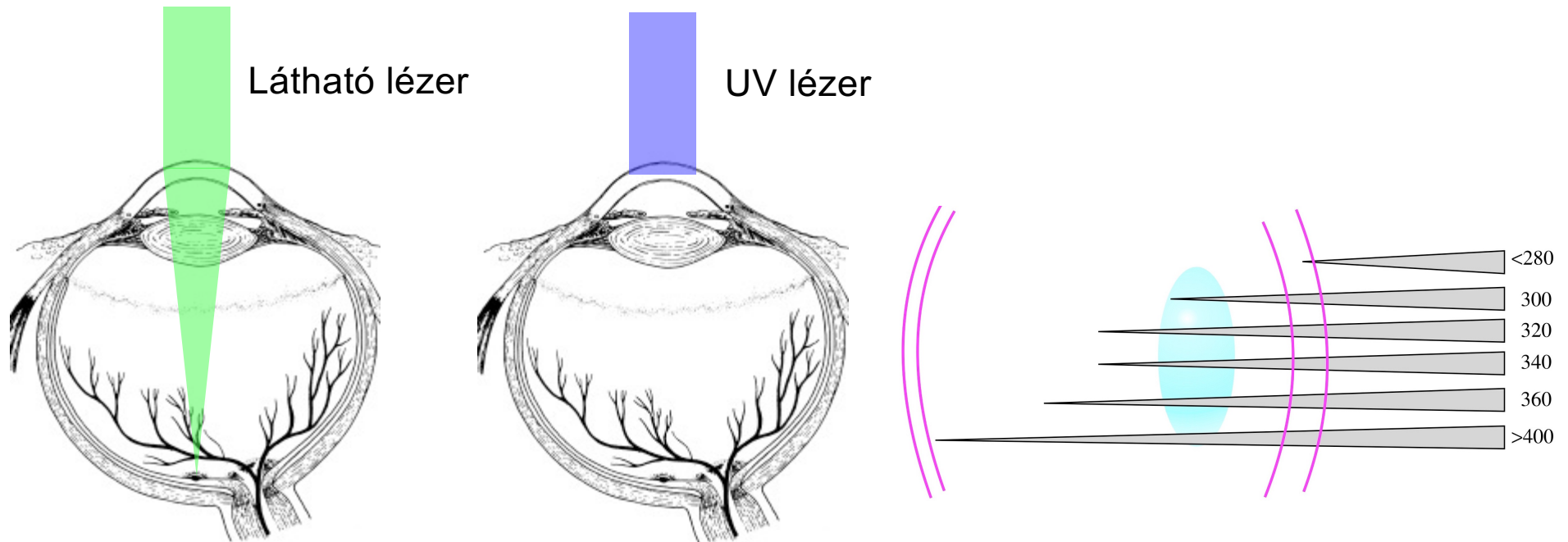
### PS: fotoszenzitizáló ágens



# Szemészeti alkalmazások

## Alapelv:

Az optikai közegek transzmittivitása hullámhossz-függő



# Szemészeti alkalmazások

## LASIK

### “Laser-assisted In Situ Keratomileusis”

A refraktív lézer-szemsebészet egy fajtája

#### Történet:

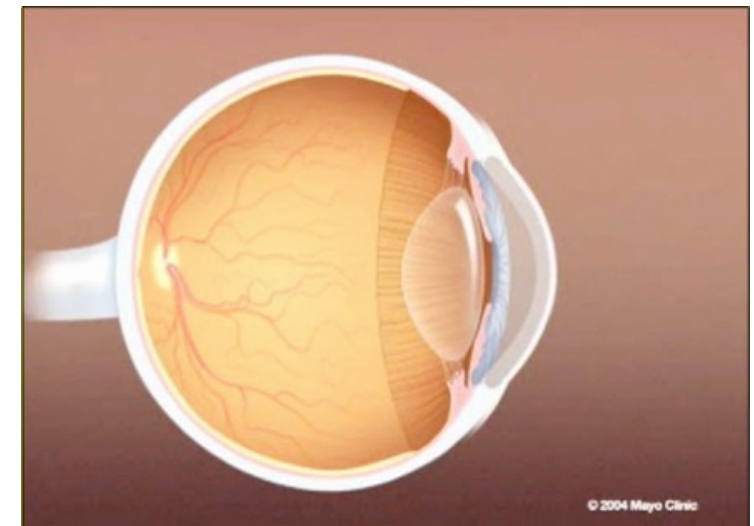
**Jose Barraquer, 1970:** microkeratome építése, mellyel a corneába lézerrel hasadékokat vágott és lemezeket alakított ki (keratomileusis).

**Lucio Buratto (Olasz) és Ioannis Pallikaris (Görög), 1990:** keratomileusis és photorefractív keratectomia kombinálása.

**Thomas and Tobias Neuhann (Németo), 1991:** automatizált microkeratome.

#### Lépések:

1. Kontaktlencse eltávolítása (7-10 nappal a beavatkozás előtt)
2. Lézeres letapogatás (kis teljesítmény): a cornea topográfiájának megrajzolása
3. Cornea felületéről egy lemez felhajtása (fs lézerrel)
4. Stroma anyagából eltávolítás (néhány 10 mikrométer vastagságban). Excimer lézer (193 nm).



# Szemészeti alkalmazások

## OCT

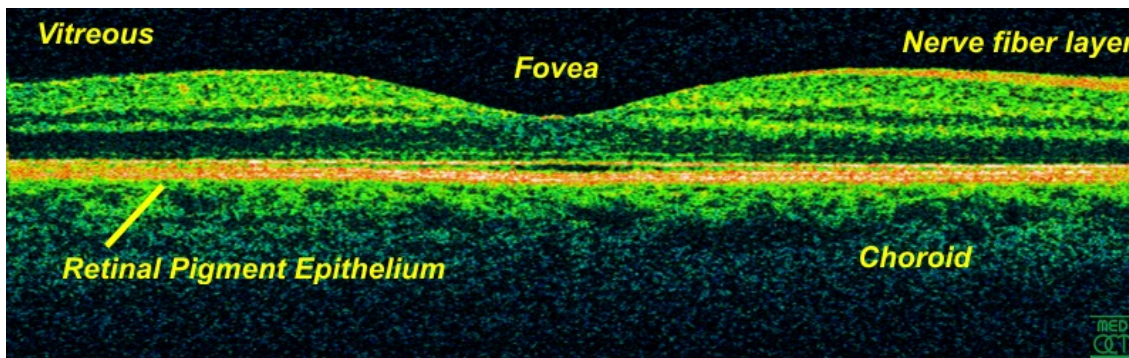
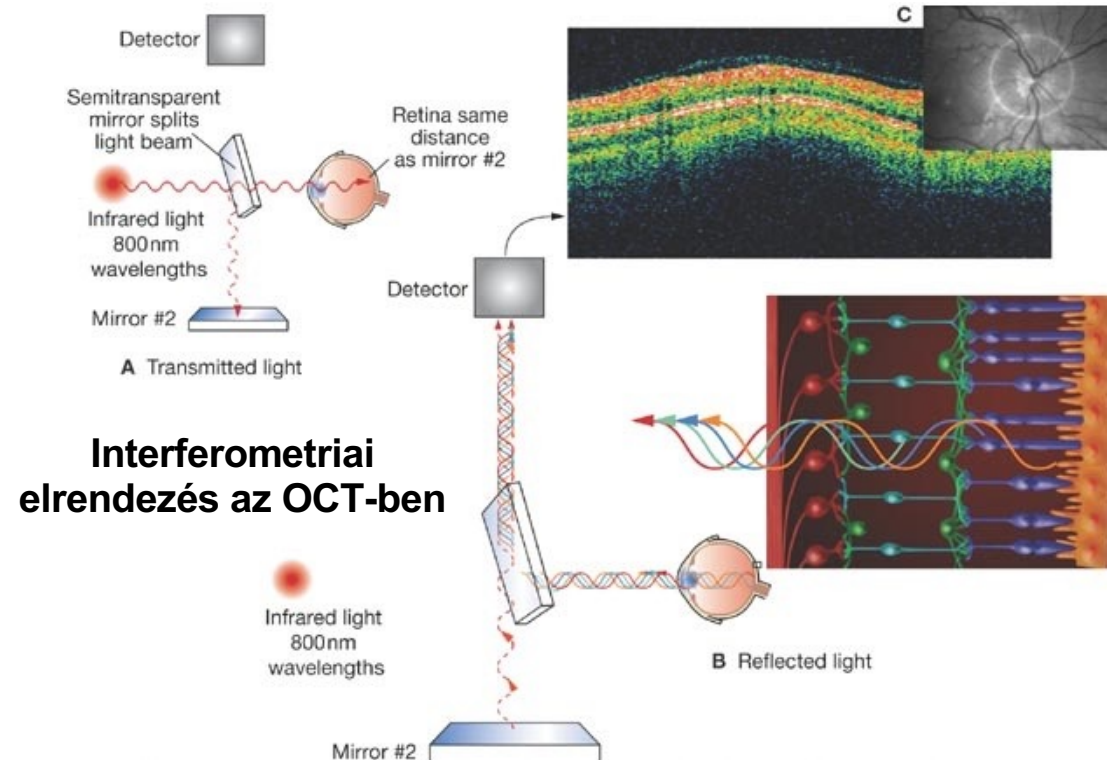
### Optikai koherencia tomográfia

(Optical Coherence Tomography):

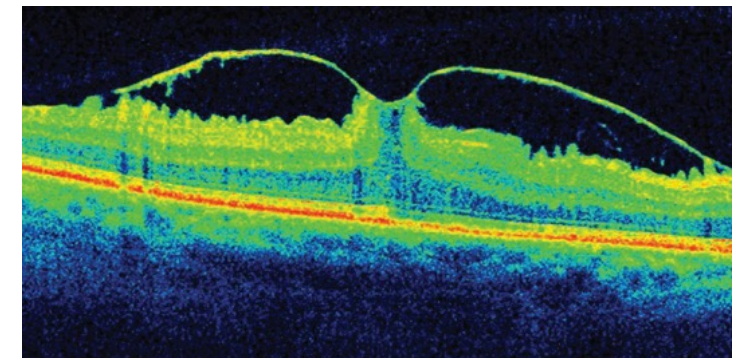
- noninvazív
- kontrasztanyagmentes
- majdnem mikroszkópikus felbontás

### Működési elv:

- A minta mélyebb részeiben visszaverődő, illetve szóródó sugarak interferometria segítségével szétválaszthatók.
- A reflektáló rétegek helyzete meghatározható.
- A minta szerkezete (1-2 mm mélységben) feltárható.



Normál retina



Macula degeneráció



# OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/index.php?feedback-qr=QKBFPNZW7O0M0GD3>