

# LÉZER

KELLERMAYER MIKLÓS

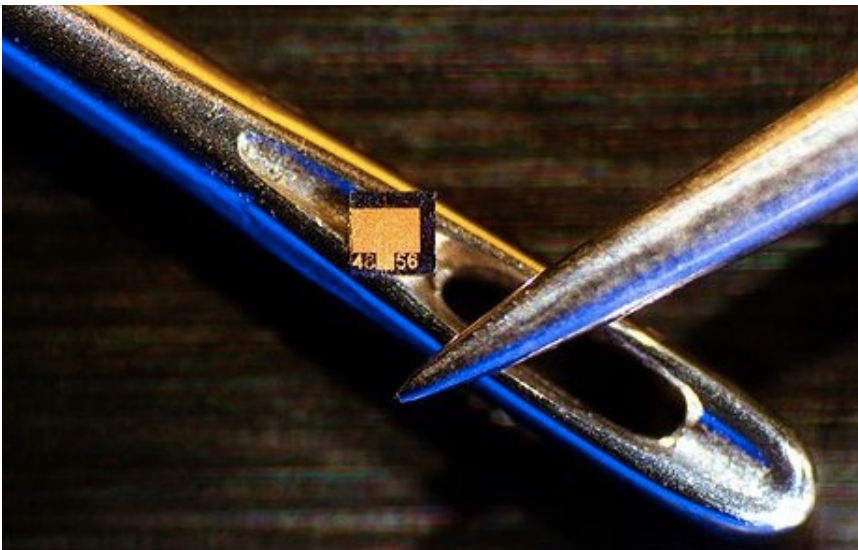




# LÉZEREK MINDENÜTT

“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)



Theodore Maiman  
(1927-2007)



Charles H. Townes  
(1915-)



Steven Chu  
(1948-)



Krausz Ferenc

Arthur L. Schawlow  
(1921-1999)



Nikolay G. Basov  
(1922-2001)



Alexander M.  
Prokhorov  
(1916-2002)



Gábor Dénes  
(1900-1979)

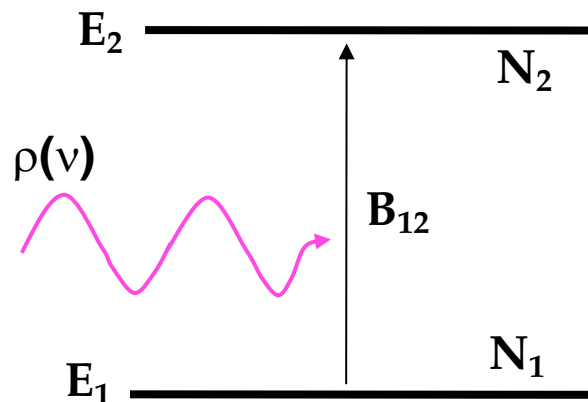


- **1917** - *Albert Einstein*: indukált emisszió elméleti predikciója.
- **1946** - *G. Meyer-Schwickerath*: első szemműtét fénnnyel.
- **1950** - *Arthur Schawlow és Charles Townes*: az emittált fotonok a látható tartományba eshetnek.
- **1954** - *N.G. Basow, A.M. Prochorov, és C. Townes*: ammónia mézer
- **1960** - *Theodore Maiman*: első lézer (rubin lézer)
- **1964** - *Basow, Prochorow, Townes (Nobel-díj)*: kvantum elektronika
- **1970** - *Arthur Ashkin*: lézercsipesz
- **1971** - *Gábor Dénes (Nobel-díj)*: holográfia
- **1997** - *S. Chu, W.D. Phillips és C. Cohen-Tanoudji (Nobel-díj)*: lézeres atomhűtés.
- **2013. október 8** - *NIF (National Ignition Facility, USA)*: magfúzió beindítása 192 lézernyalábbal, pozitív energiamérleg.
- **2017** - *ELI (Extreme Light Infrastructure)* indulása, Szeged. Attoszekundumos ( $10^{-18}$  s) fényimpulzusok előállítása.
- **2018** - Fizikai Nobel-díj: *Arthur Ashkin* (lézercsipesz), *Gérard Mourou* és *Donna Strickland* (ultrarövid lézerimpulzusok)

# A LÉZER ALAPJAI I.

## INDUKÁLT (STIMULÁLT) EMISSZIÓ

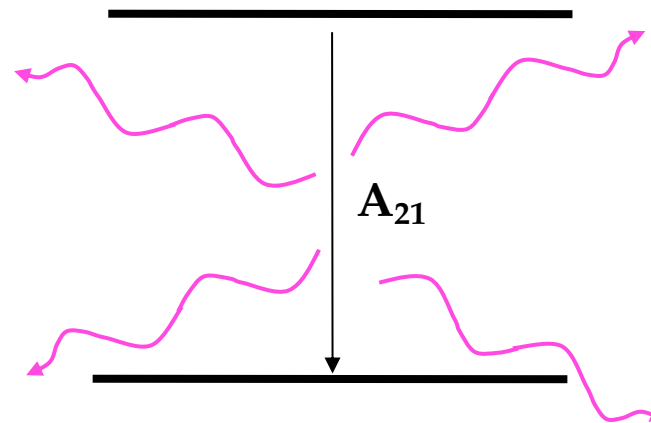
### 1. Abszorpció



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

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

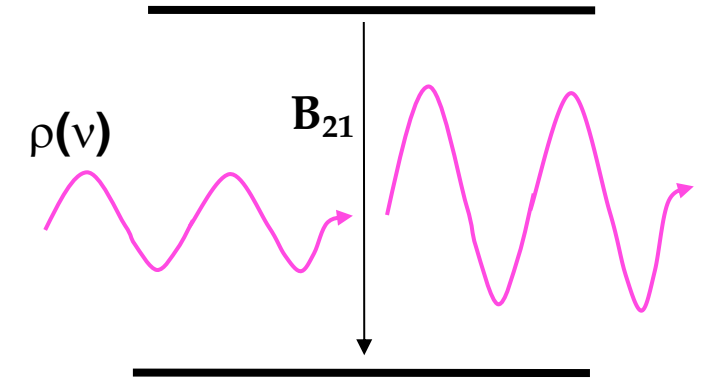
### 2. Spontán emisszió



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

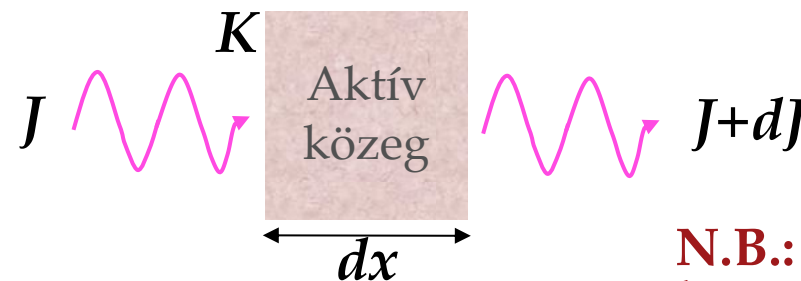
$N_1, N_2$  : adott energianívón levő atomok, molekulák száma

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

# A LÉZER ALAPJAI II.

## POPULÁCIÓ INVERZIÓ

Fényerősítés az energianívók relatív betöltöttségétől függ



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

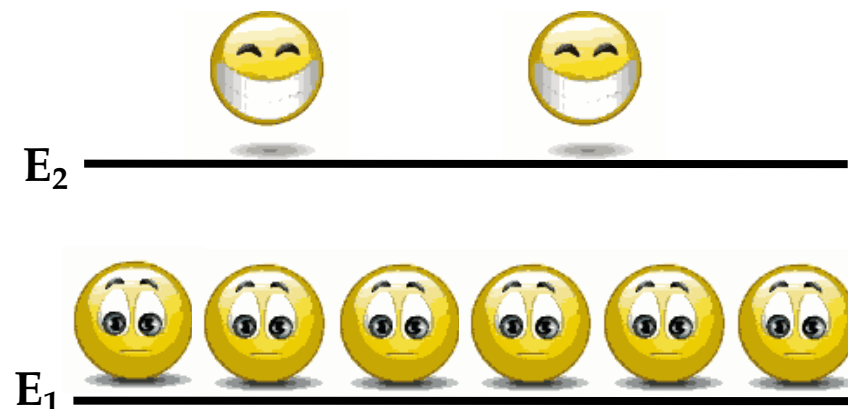
$J$  = energiaáram-sűrűség

$K$  = állandó

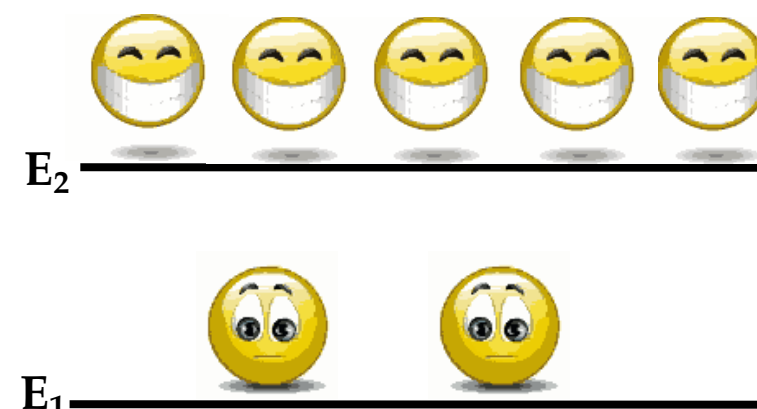
$x$  = fény által a közegben megtett út

$N_1, N_2$  = atomok száma az energianívón

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

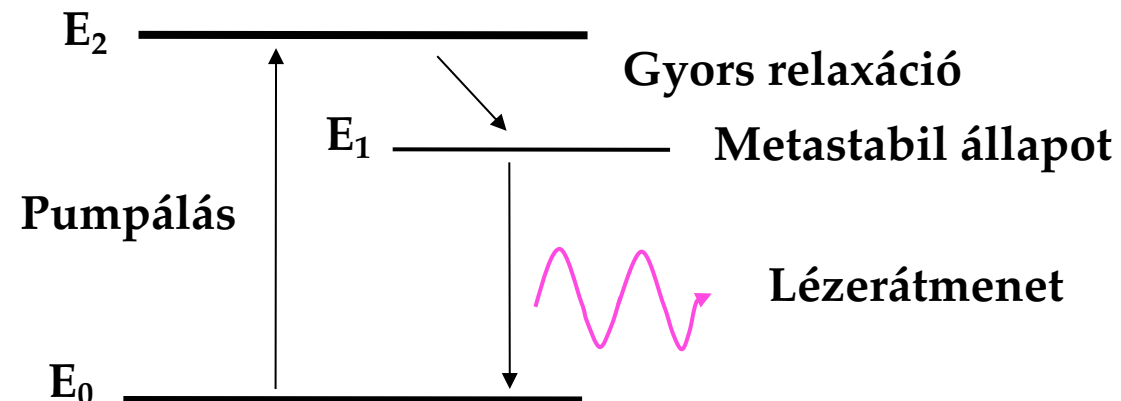


Termikus egyensúly



Populáció inverzió

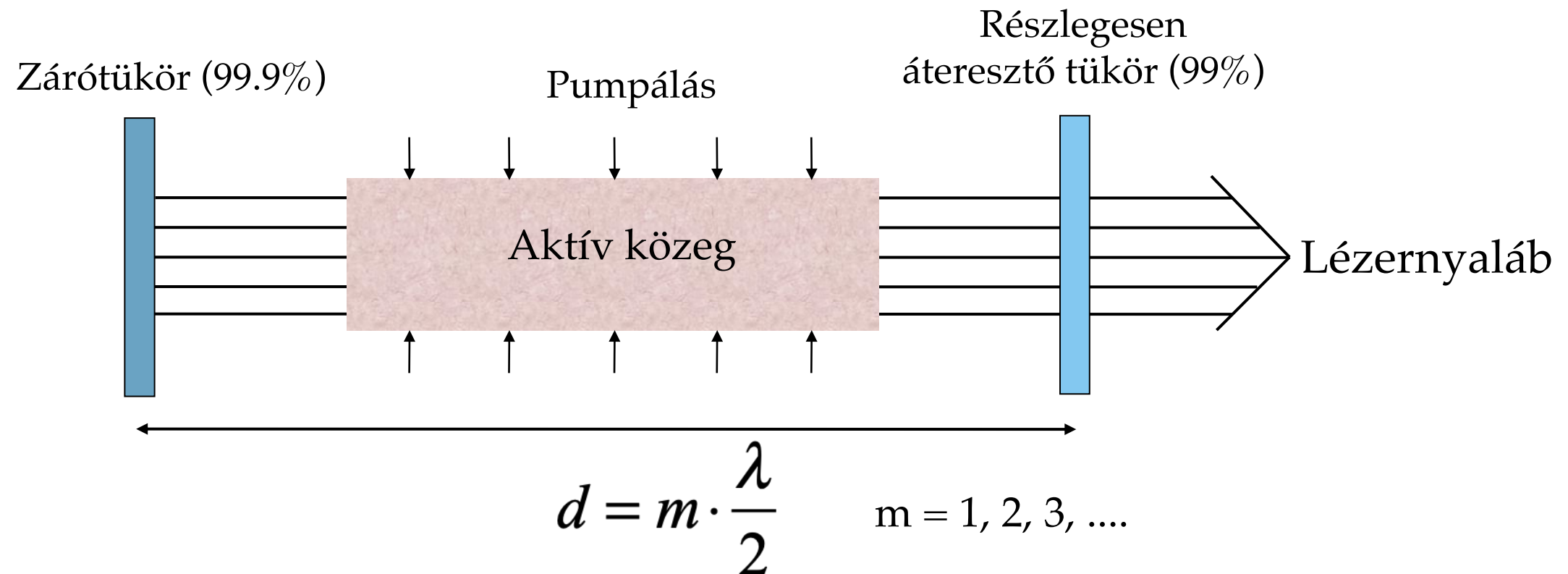
- Populáció inverzió csak többállapotú rendszerben!
- Pumpálás: elektromos, optikai, kémiai energia



# A LÉZER ALAPJAI III.

## OPTIKAI REZONANCIA

---



### Rezonátor:

- két párhuzamos sík (vagy homorú) tükör
- a kimenő fényteljesítmény 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

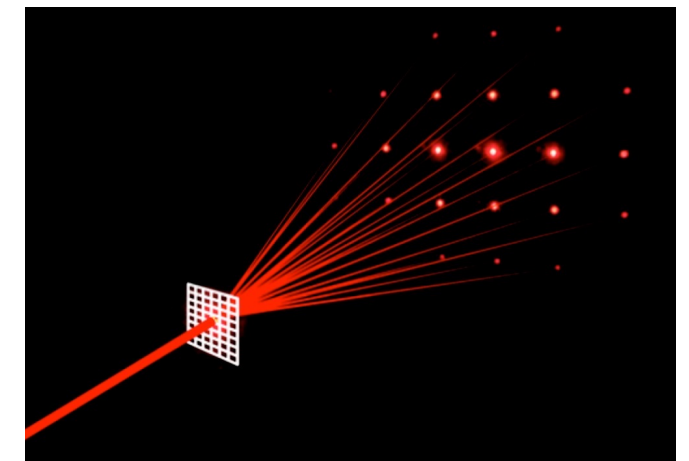
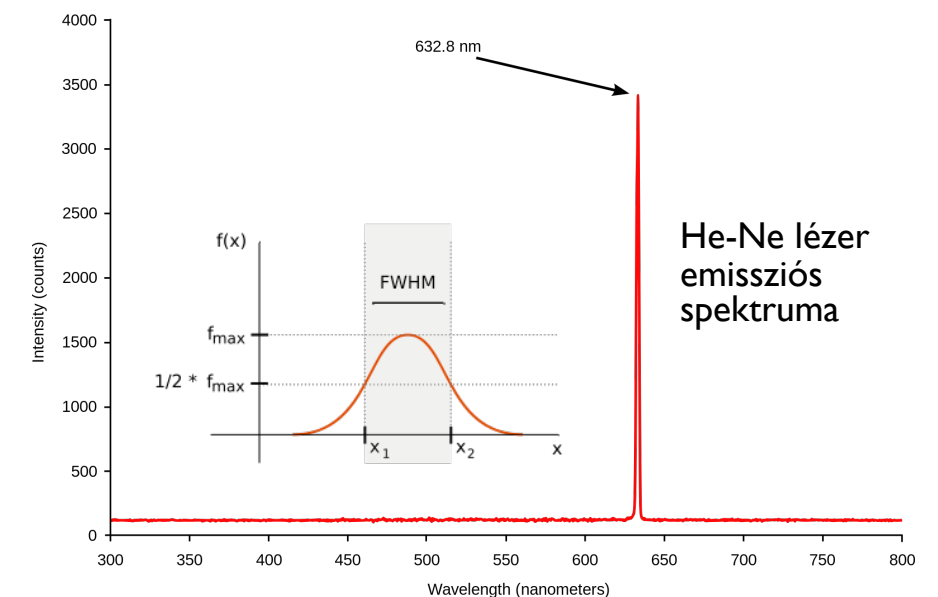
## 6. Koherencia

Fázisazonosság, interferenciaképesség

Időbeli koherencia (különböző időpontokban emittált fotonok fázisazonossága)

Térbeli koherencia (nyalábkeresztmetszet menti fázisazonosság)

Alkalmazás: holográfia, optikai koherencia tomográfia





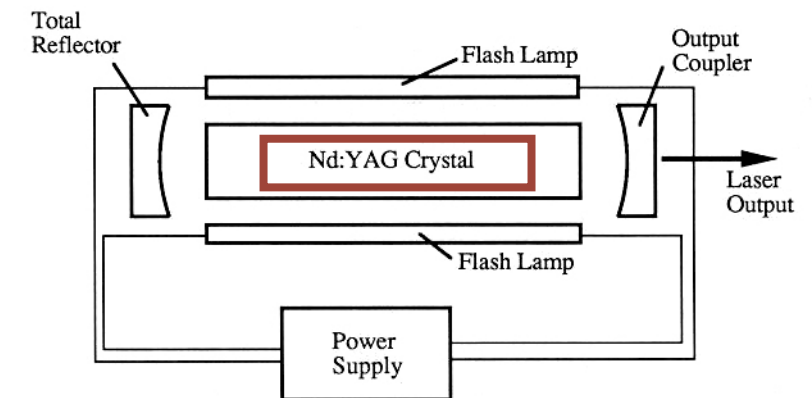
# LÉZERTÍPUSOK

## Fényerősítő közeg alapján:

### 1. Szilárdtest lézerek

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

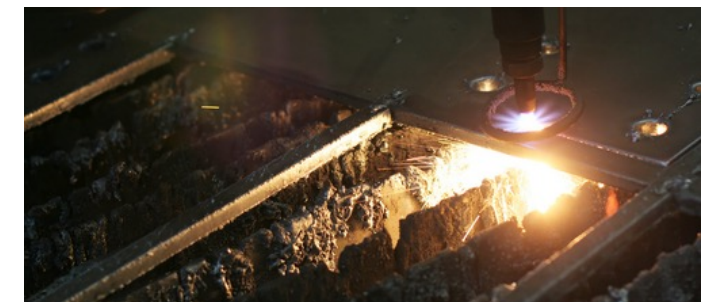
Vörös-infravörös spektrális tartomány; Folytonos, Q-kapcsolású üzemmód, nagy teljesítmény



### 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)

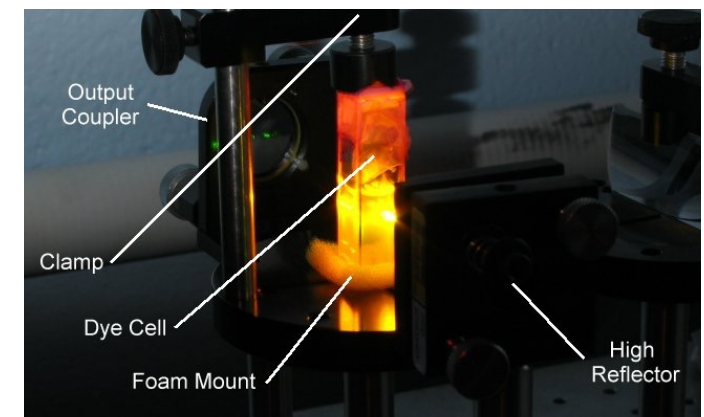


fémleap  
vágása  
CO<sub>2</sub>  
lézerrel

### 3. Festéklézerek

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

Nagy teljesítmény (Q-kapcsolt módban); Hangolható



festéklézer

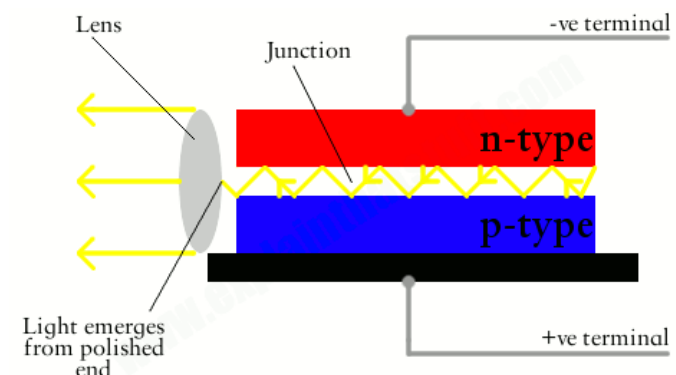
### 4. Félvezető (dióda) lézerek

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

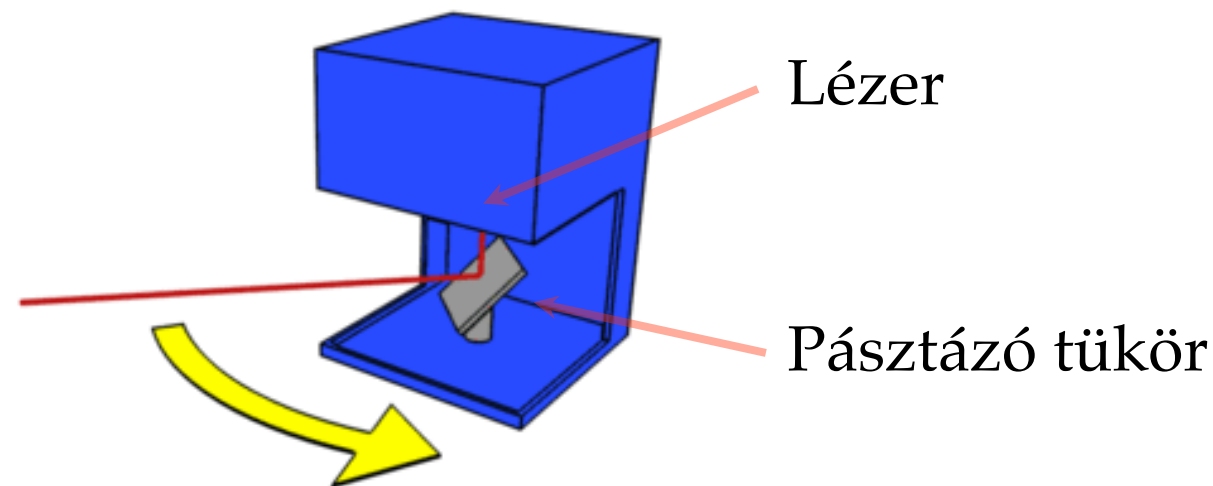
## SZEMPONTJAI

---

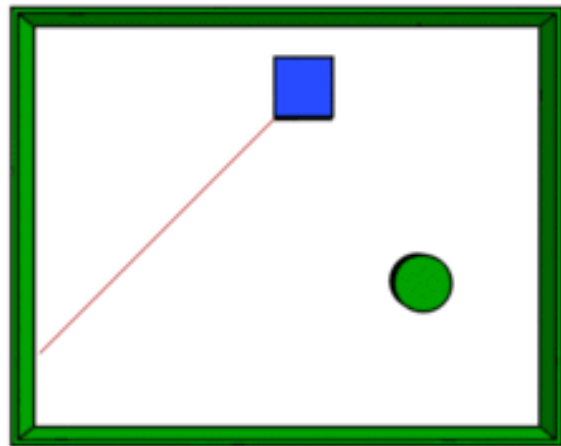
- Irányíthatóság
- Monokromaticitás
- Koherencia
- Rövid impulzusok lehetősége
- Teljesítmény:
  - 5 mW – CD-ROM meghajtó
  - 5–10 mW – DVD lejátszó vagy DVD-ROM meghajtó
  - 100 mW – Nagysebességű CD-RW író
  - 250 mW – DVD-R író
  - 1–20 W – szilárdtest-lézer mikromegmunkálásra
  - 30–100 W – sebészeti 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



Felülnézeti elrendezés

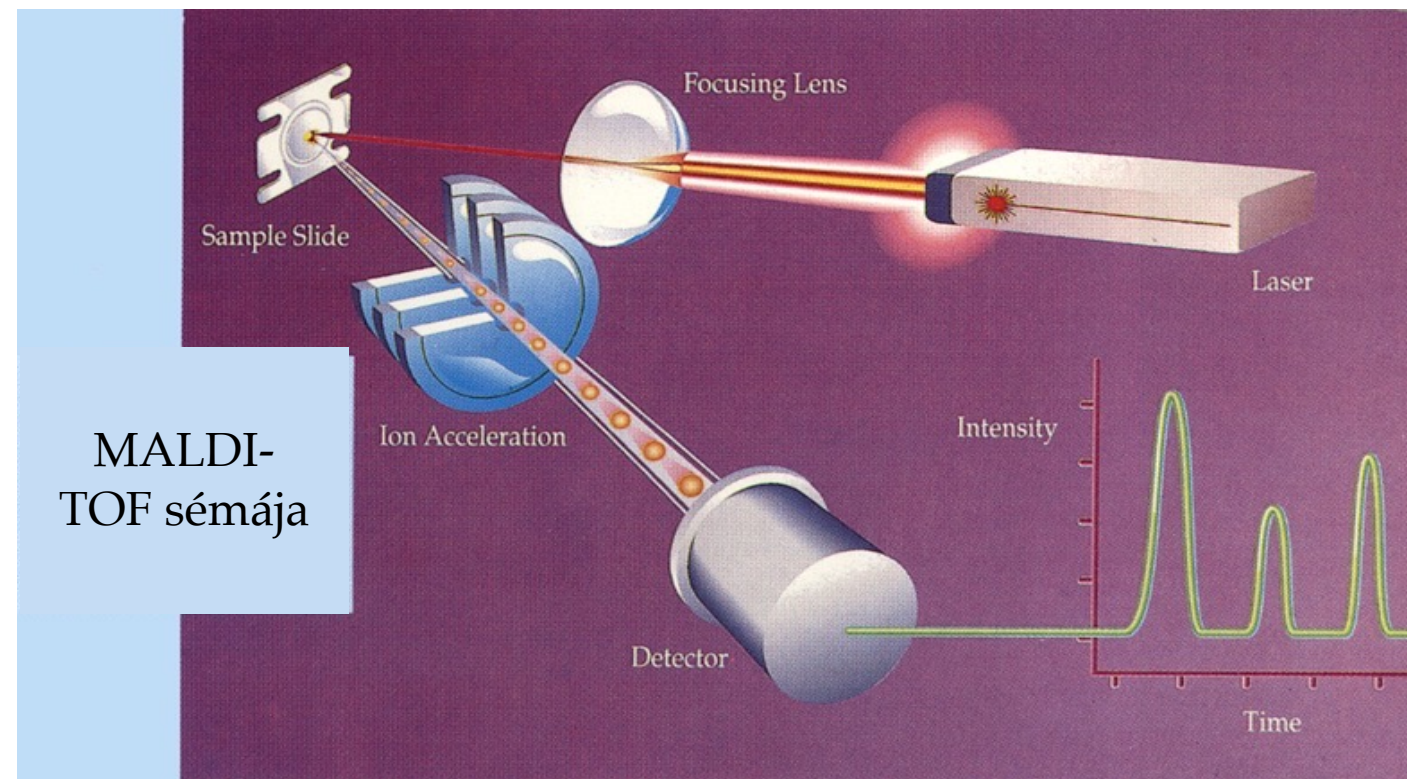


Felvétel:  
rekonstruált térbeli  
elhelyezkedés.  
Közlekedési  
sebességmérőben:  
100 impulzus 0.3 s alatt

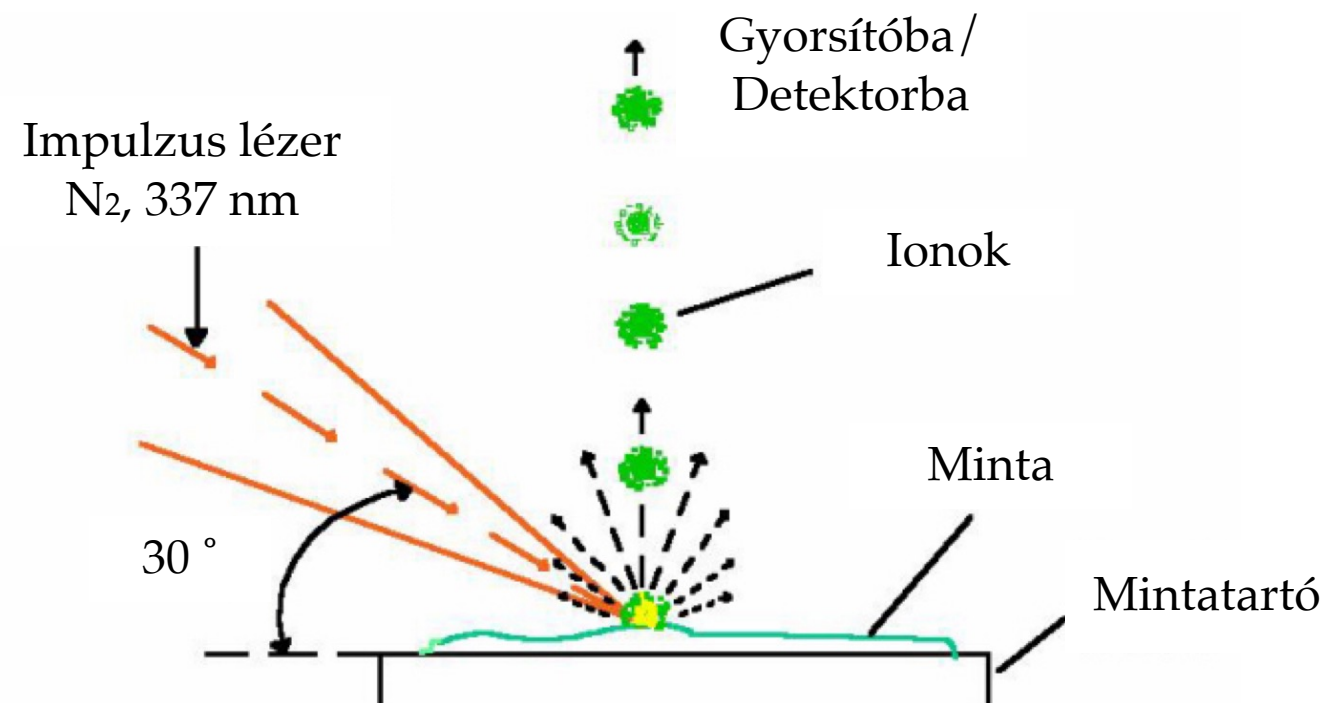


# MALDI-TOF:

## MATRIX-ASSISTED LASER DESORPTION/IONIZATION TIME OF FLIGHT MASS SPECTROMETRY

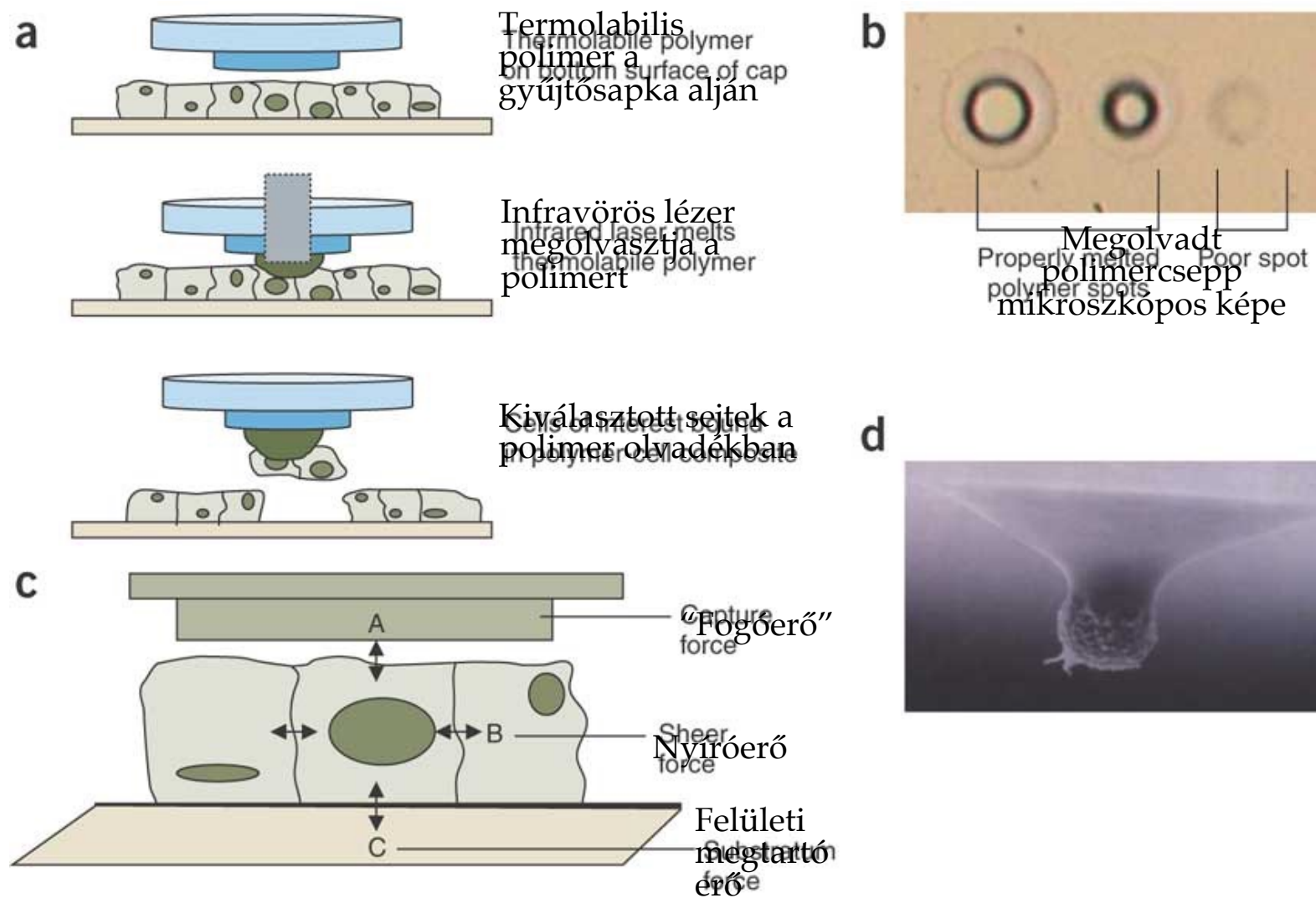


Teljesítménysűrűség

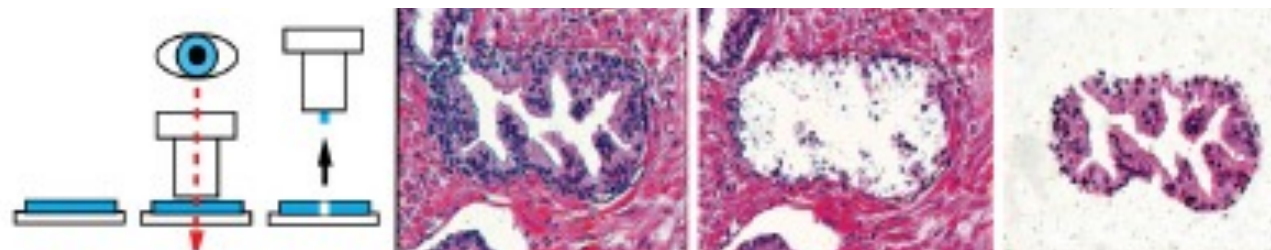




# “LASER CAPTURE MICRODISSECTION”



Teljesítménysűrűség,  
irányíthatóság



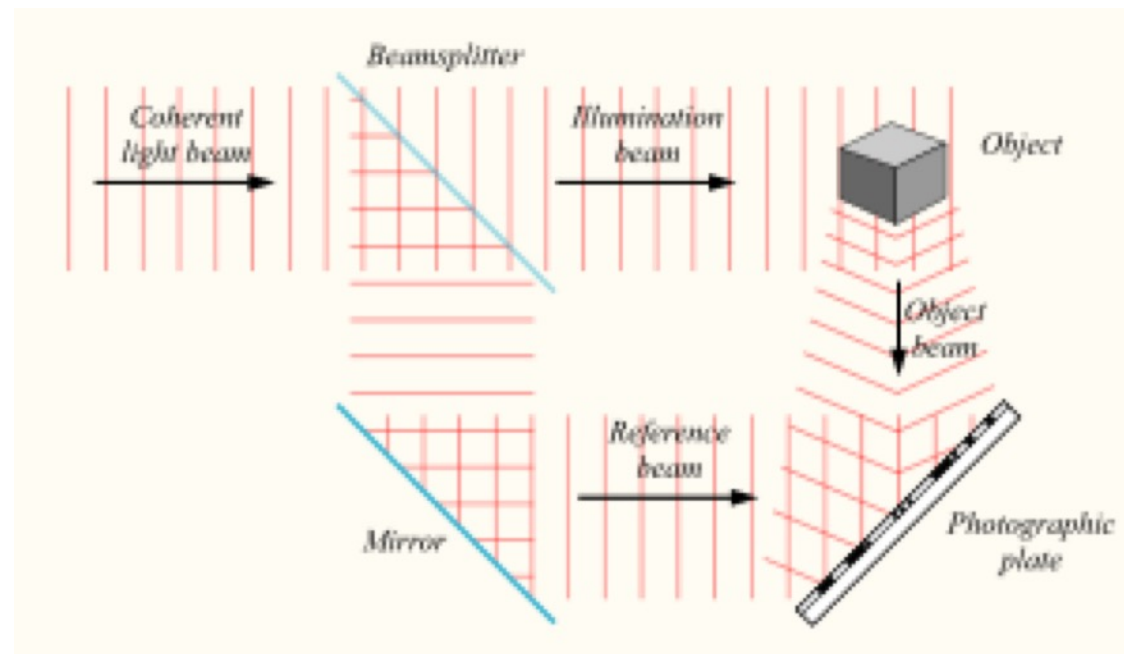
**Jelentőség:** lokális  
analitika lehetősége  
(kémia, genetika)

# HOLOGRÁFIA

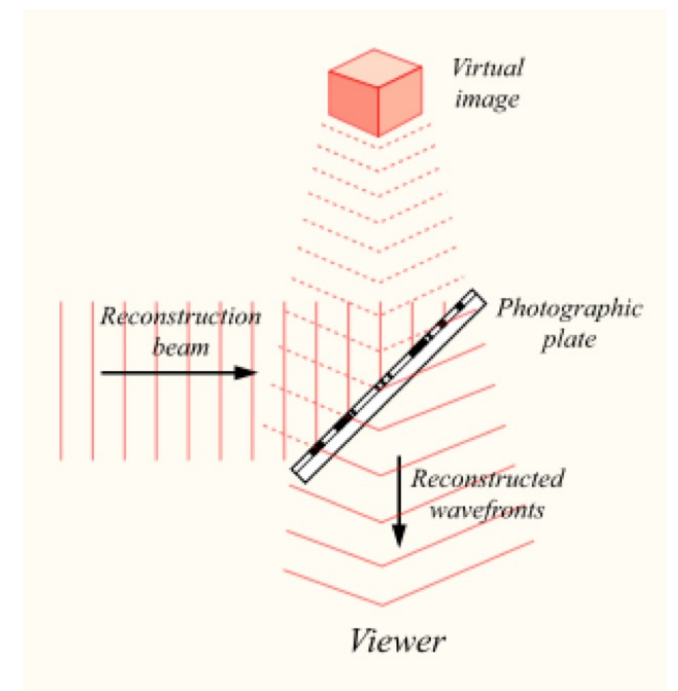
## Koherencia



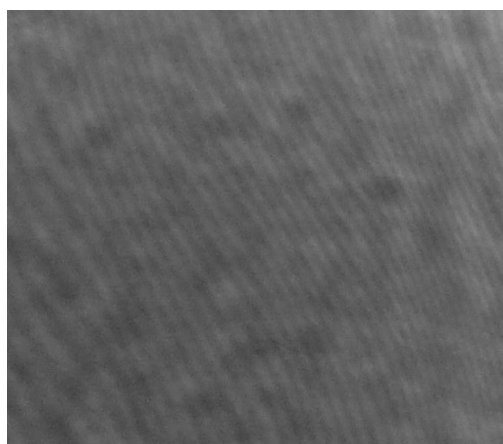
Gábor Dénes  
(1900-1979)



Hologram felvétele



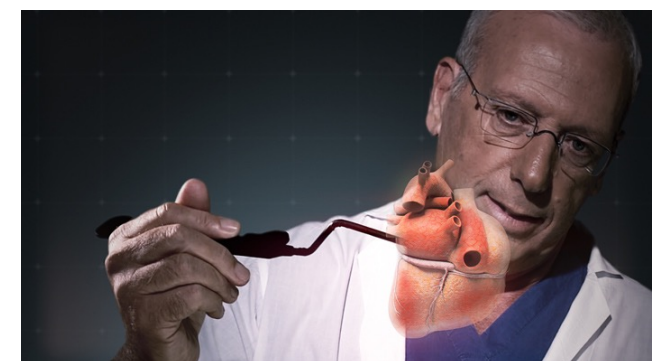
Hologram megtekintése



Hologram fotolemez felülete

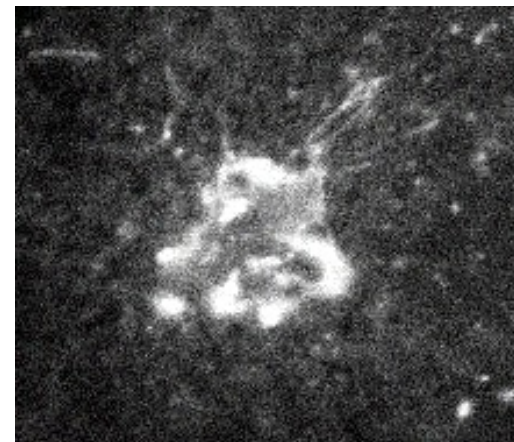
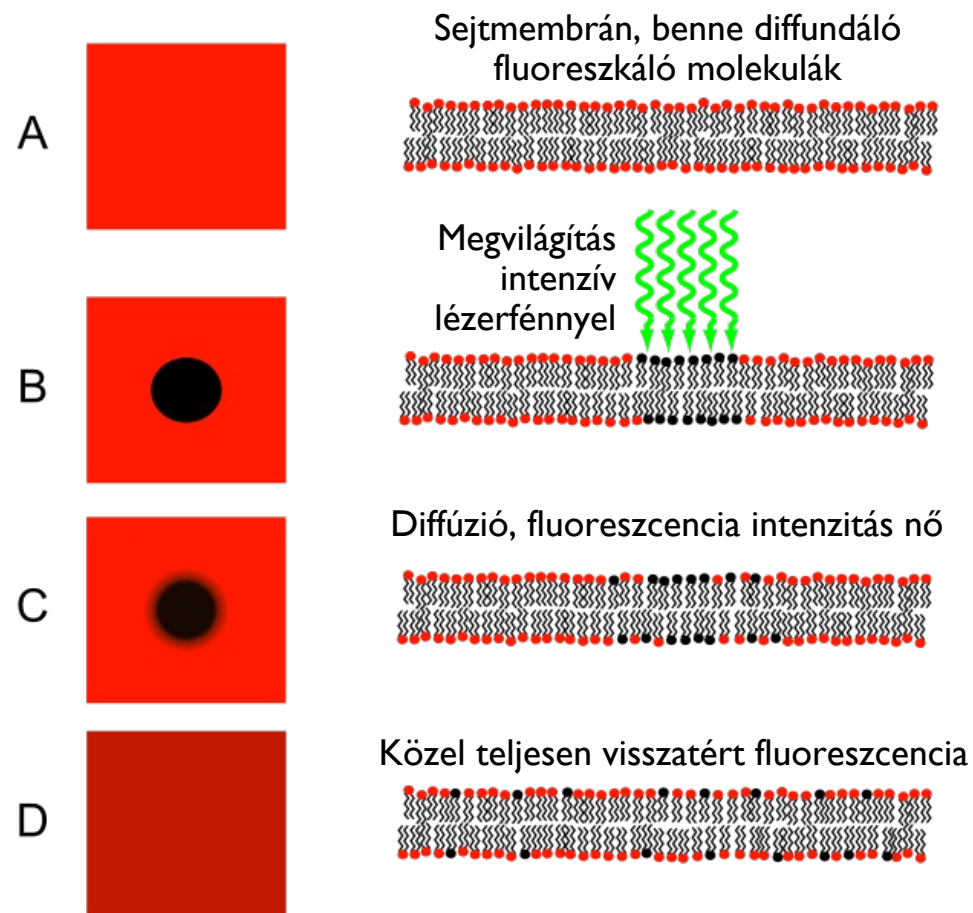


Hologramok

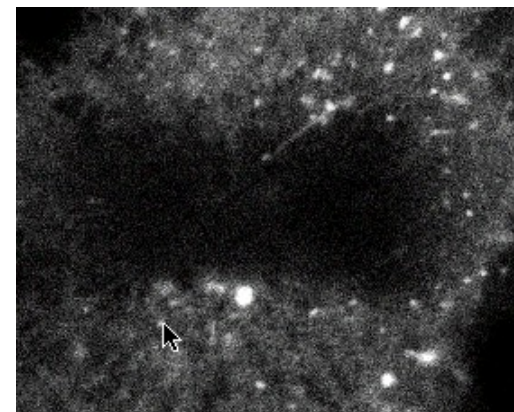




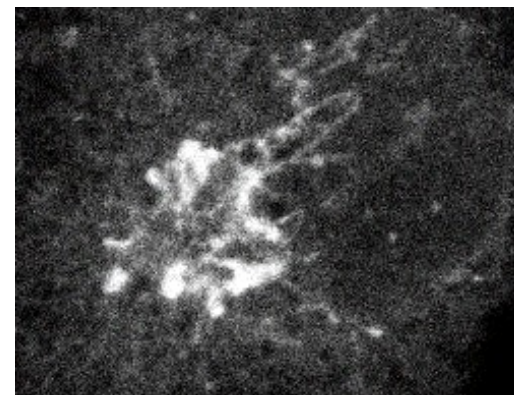
# Fluorescence Recovery After Photobleaching (FRAP)



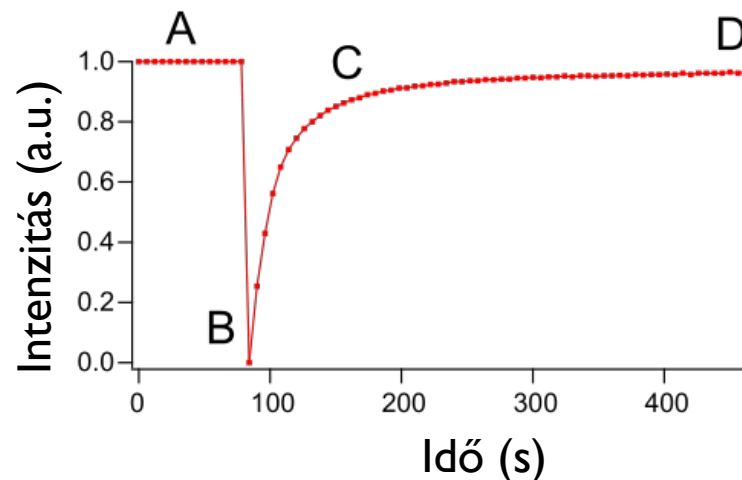
Kifehérítés előtti kép



Kifehérítést azonnal követő kép



Fluoreszcencia visszatérése



Teljesítménysűrűség,  
irányíthatóság

N.B.:

“Bleaching”: fehérítés

“Photobleaching”: fotokifehérítés

Diffúziós állandó  
meghatározható a fluoreszcencia  
intenzitás visszatérésének időbeli  
lefutásából:

$$D = \frac{w^2}{4t_D}$$

$D$  = diffúziós állandó

$w$  = kifehérített terület átmérője

$t_D$  = időállandó

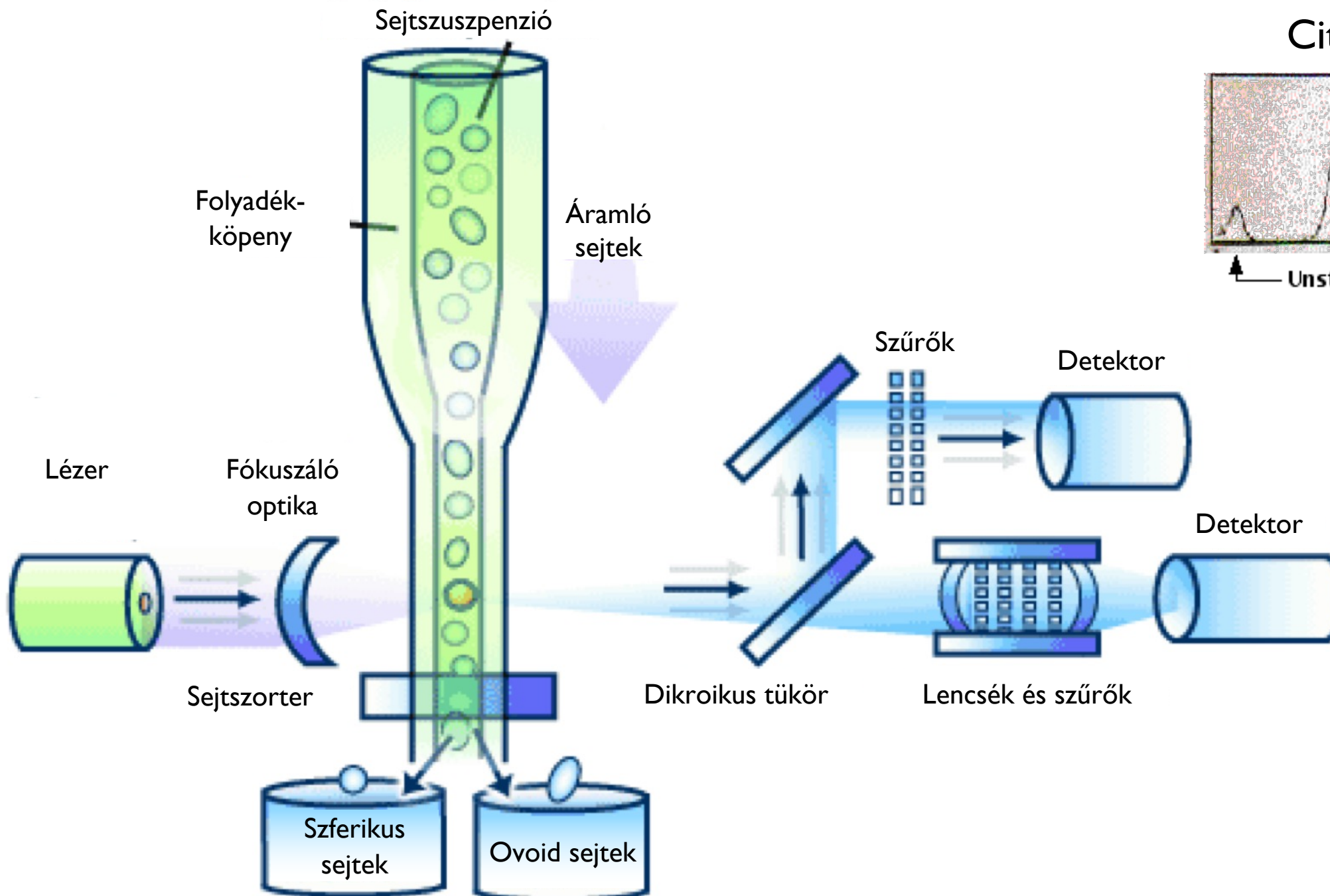


# Fluorescence activated cell sorter (FACS)

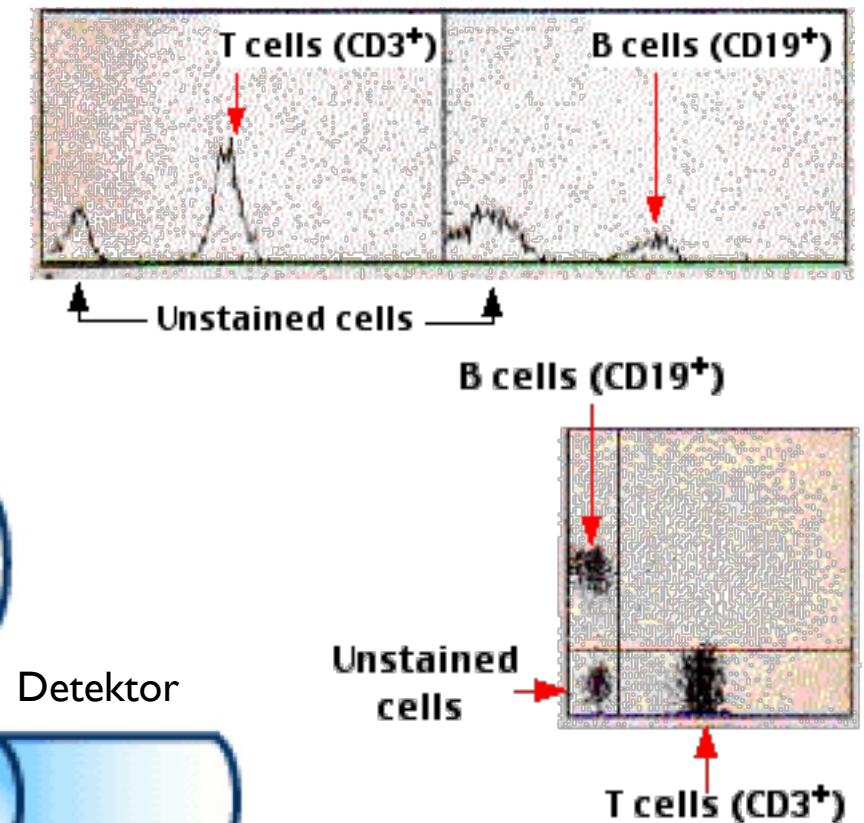
Fluoreszcencia aktivált sejtválogatás; Áramlási citometria (flow cytometry)

- Fluoreszcensen fajlagosan megjelölt sejtuszpenziót sejtenként analizálunk
- Sok paramétert mérünk (fluoreszcencia intenzitás különböző hullámhosszokon, szórás)
- Statisztikai analízist végzünk
- Szükség esetén a sejteket szétválogathatjuk a paraméterek alapján

Monokromaticitás



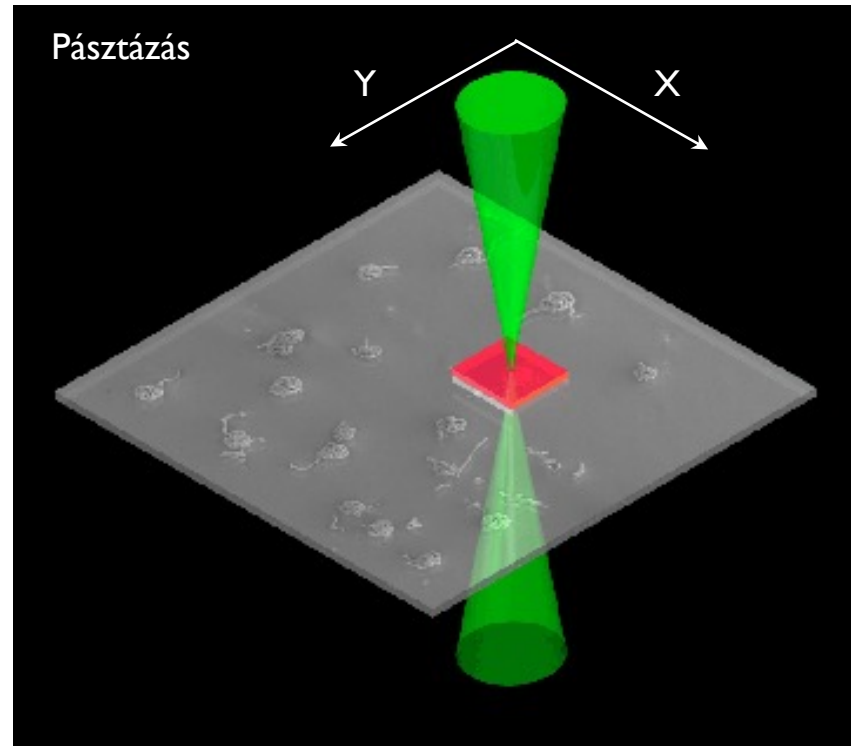
Citometriás statisztika



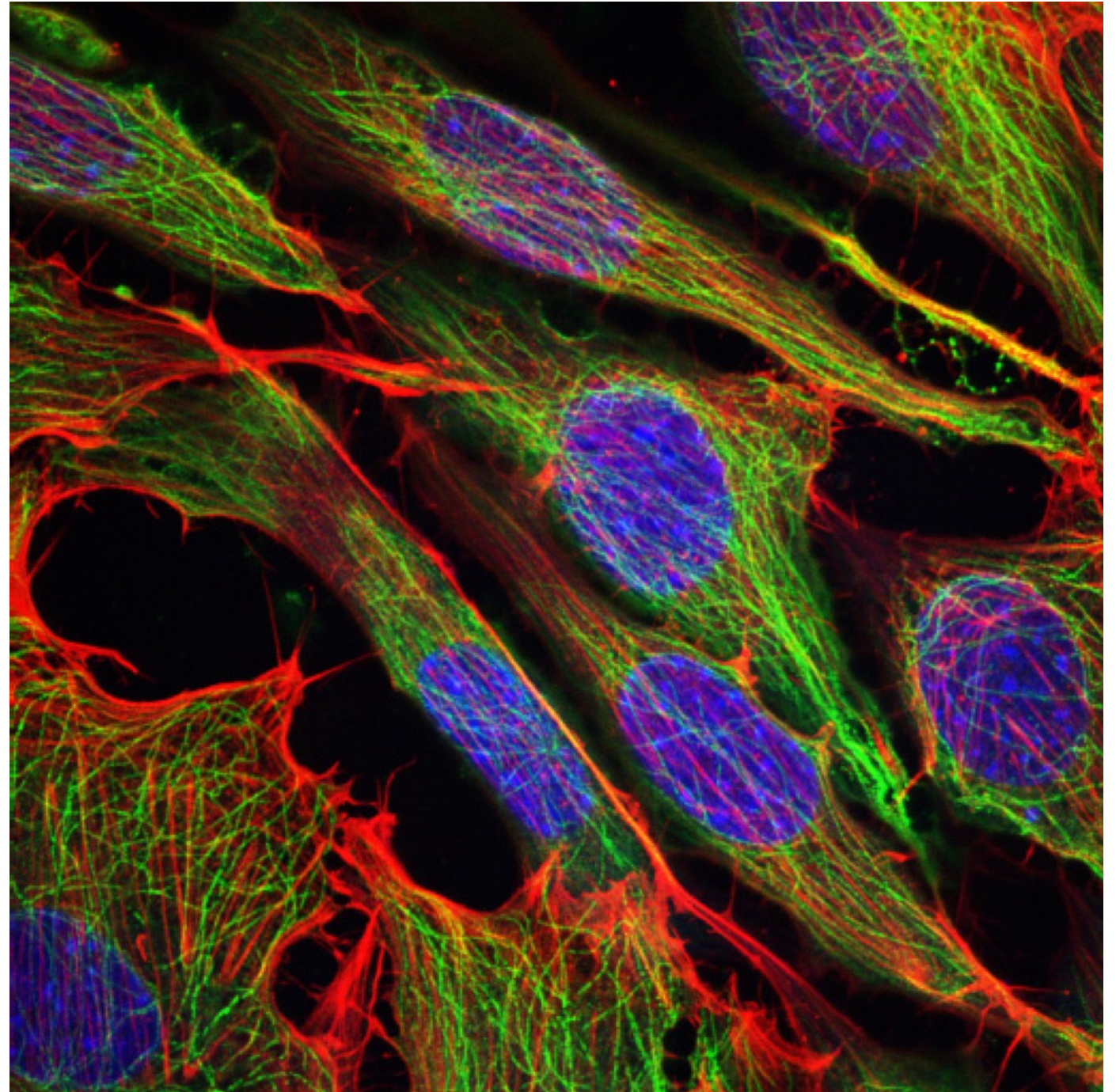
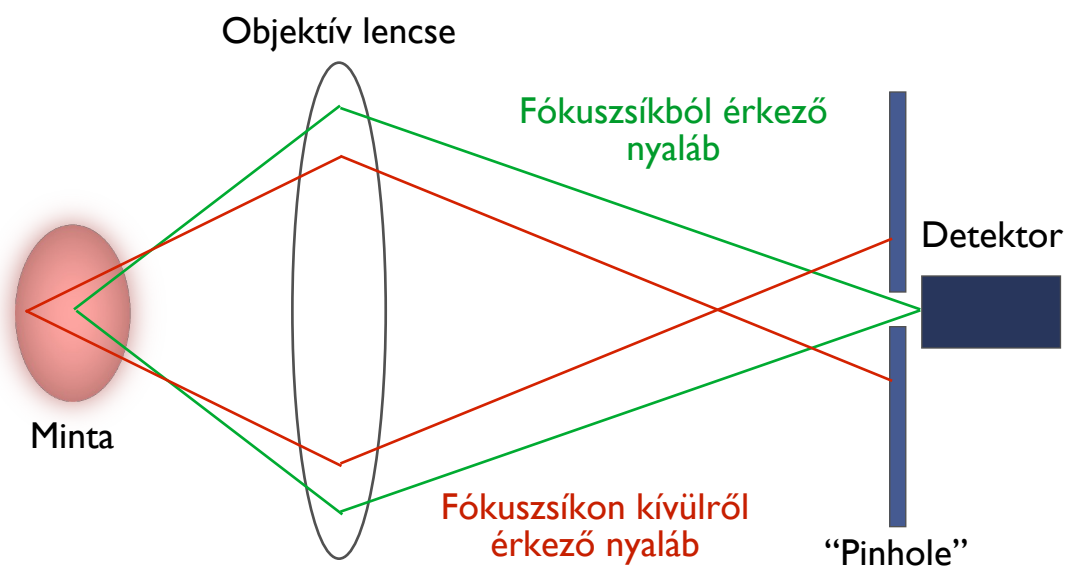


# Lézer pásztázó konfokális mikroszkópia

Monokromaticitás, irányíthatóság



## “Konfokális elv”



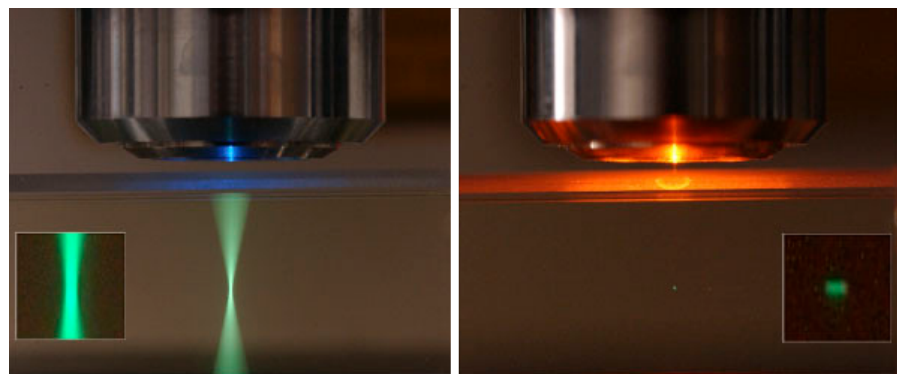
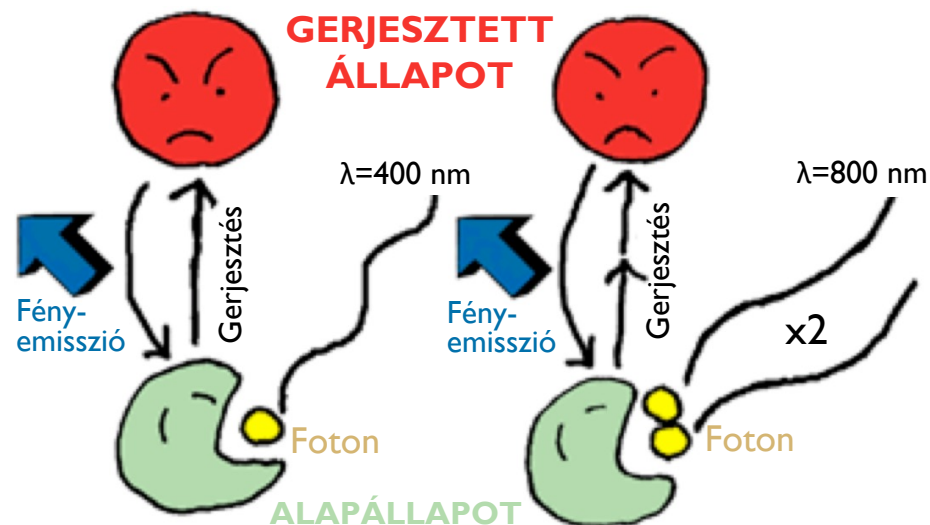
Zöld: mikrotubulusok; Vörös: aktin; Kék: sejtmag



# Multifoton fluoreszcencia mikroszkópia

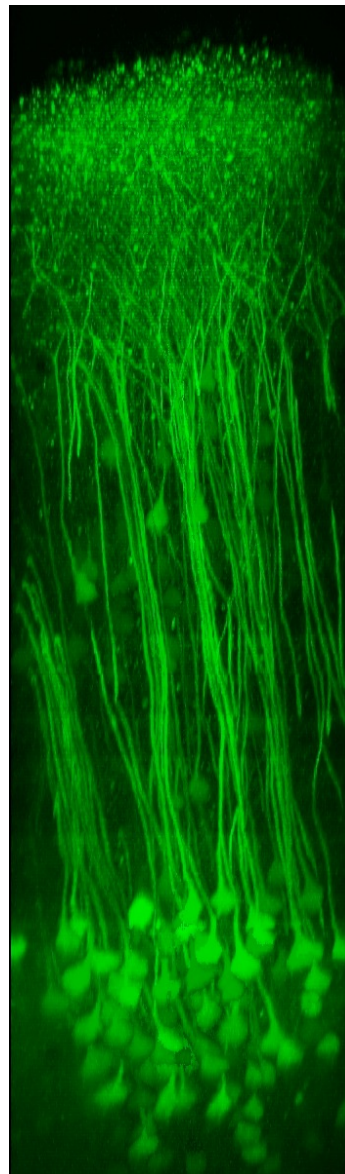
Monokromaticitás, irányíthatóság, rövid impulzusok

- Két (vagy több) foton energiája összeadódik a gerjesztéskor
- Gerjesztés (következésképp emisszió) csak a fókuszpontban (limitált fotokárosítás)
- Gerjesztés nagy (közele IR) hullámhosszú, rövid (fs) fényimpulzusokkal
- Nagy hullámhossz miatt mély optikai behatolás (akár 2 mm)

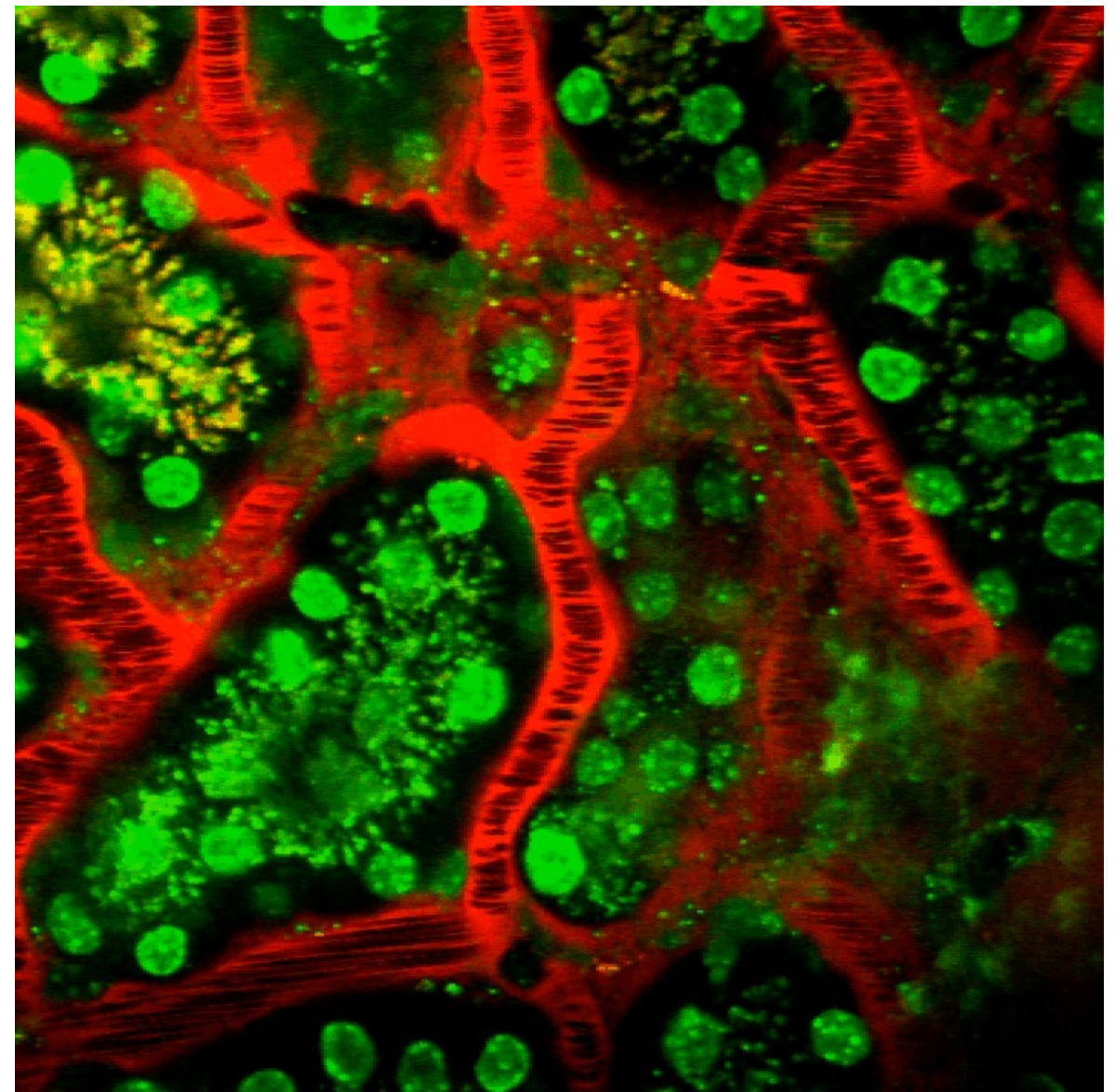


Egyfoton  
fluoreszcencia

Kétfoton  
fluoreszcencia



Agykérgi piramissejtek

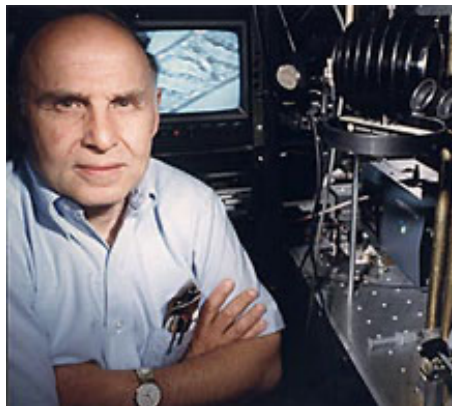


Zöld: proximális vesetubulusok; Vörös: albumin (plazma)

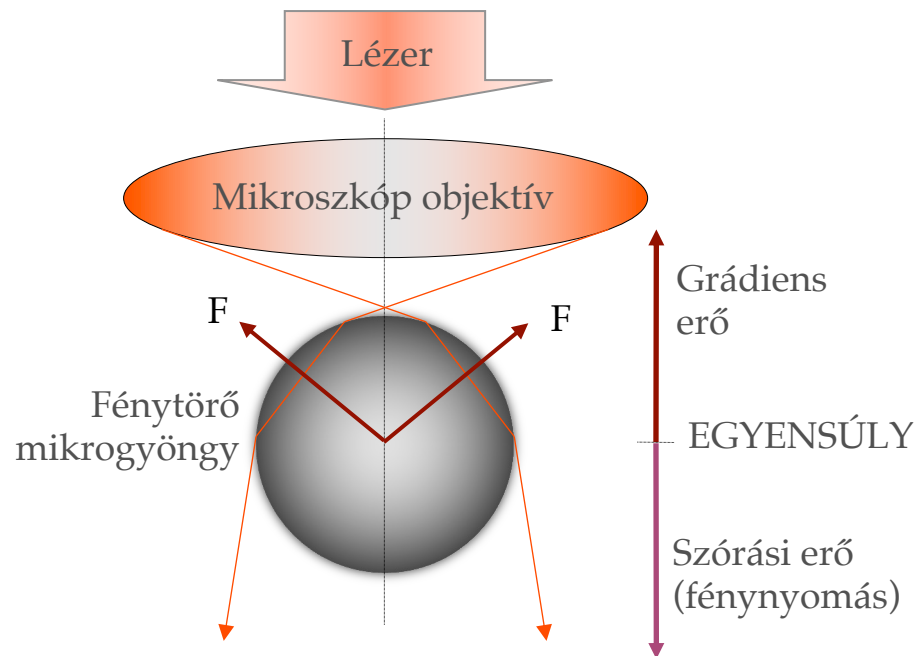


# LÉZERCSIPESZ

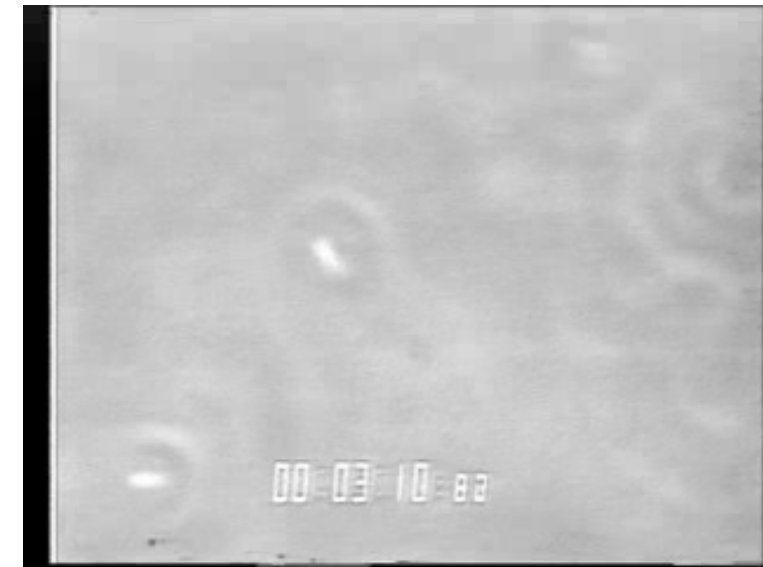
Teljesítménysűrűség, irányíthatóság



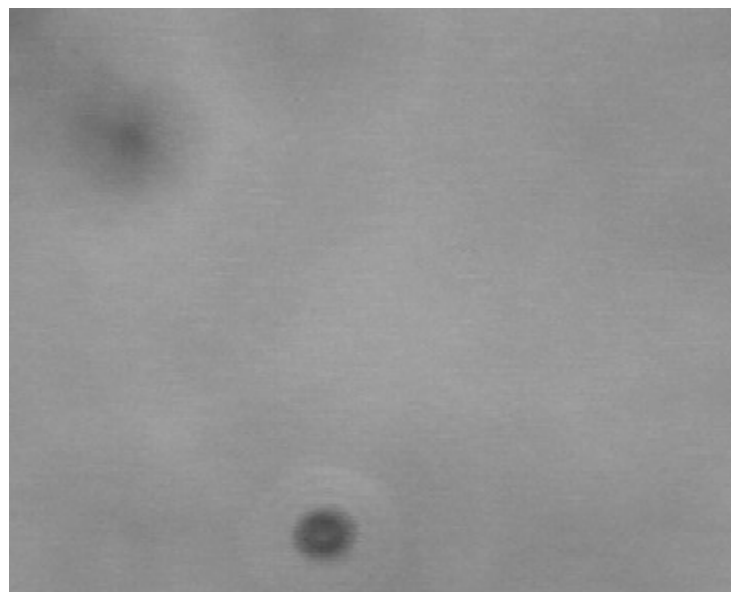
Arthur Ashkin (1970)



*A lézercsipeszben a fotonok és a fénytörő részecske között impulzuscsere lép fel*

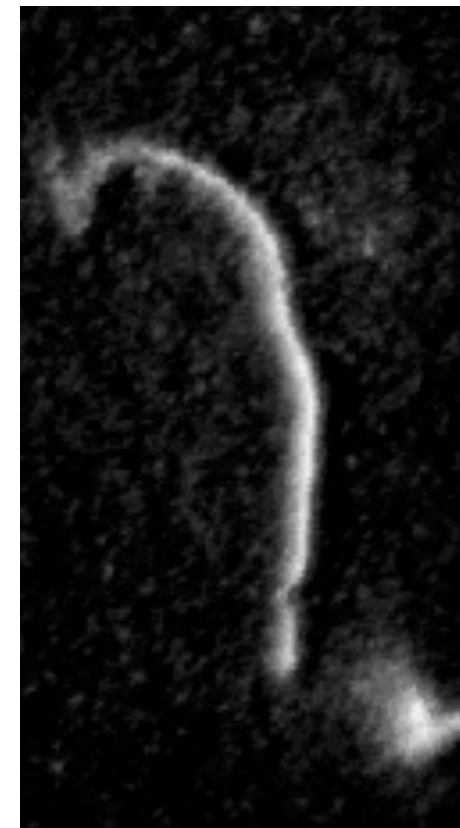


Baktérium sejt manipulálása lézercsipeszszel



3  $\mu\text{m}$  átmérőjű latex (polistírol) mikrogöngyök optikai csipeszben

Molekula manipulálása lézercsipeszszel



Aktin filamentum



dsDNS

Molekuláris erőmérés lehetősége!

# A LÉZER ORVOSI ALKALMAZÁSAI

---

Beeső lézernyaláb

Reflexió

Refrakció

Abszorpció

Szóródás

Emisszió

**Biológiai szövet!**

Megfontolandó  
lézertulajdonságok:

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

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

# A LÉZER ORVOSI ALKALMAZÁSAI

---

**Sebészeti szakmák:** “lézerszike”, koaguláció, vérzés nélküli operáció. Daganateltávolítás. CO<sub>2</sub> és Nd:YAG lézer. Holmium lézer lithotripsia (urológia).

**Bőrgyógyászat:** rendkívül kiterjedt alkalmazás - anyajegyek, tetoválások, felületi érzettség, szőrzet, daganat eltávolítása, stb.

**Fogászat:** szuvas részek preferáltan abszorbeálnak.

**Photodynamiás tumorterápia:** fotoszenzitív, tumor által preferáltan felvett kémiai anyagok aktiválása lézerrel.

**Szemészet:** Retinaleválás, szemfenék fotokoagulációja, glaucoma, fotorefraktív keratektomia (PRK).



# BŐRGYÓGYÁSZATI ALKALMAZÁSOK

---

## LÉZERES SZŐRTELENÍTÉS

Phototricholysis, photoepiláció

Alapja: szelektív photothermolysis  
chromophorok általi szelektív abszorpció

Alkalmazott chromophorok:

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



Kezelés előtt

Kezelés után

# BŐRGYÓGYÁSZATI ALKALMAZÁSOK

---

## TETOVÁLÁS ELTÁVOLÍTÁS



Kezelés előtt



Kezelés után

## ANYAJEGY (NAEVUS) ELTÁVOLÍTÁS



Kezelés előtt

Kezelés után



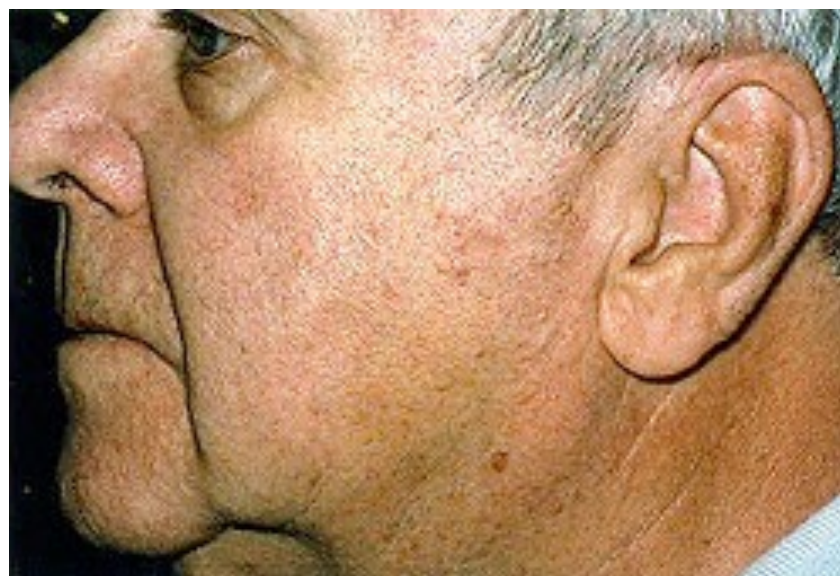
# BŐRGYÓGYÁSZATI ALKALMAZÁSOK:

---

## 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.

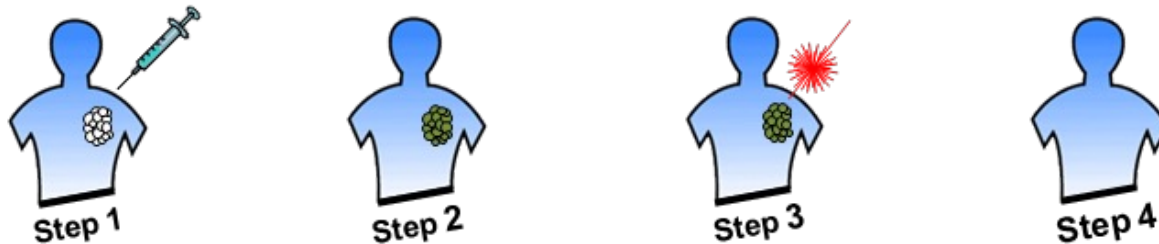
### Háromkomponensű tumorterápiás módszer:

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

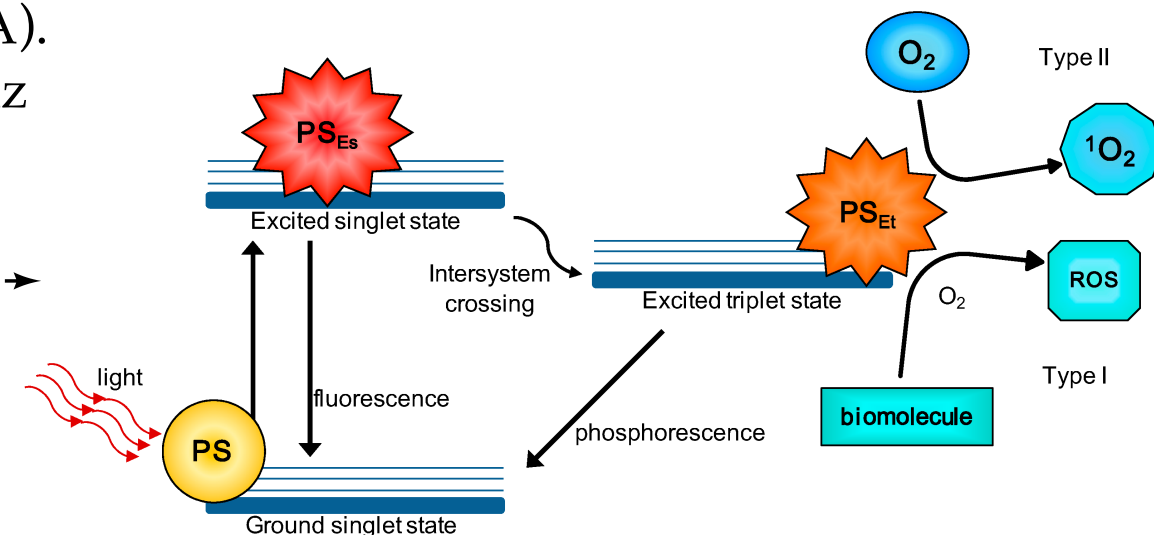


Fény szervezetbe juttatása: felületi megvilágítás, optikai kábel

### 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 diódalézerrel (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.

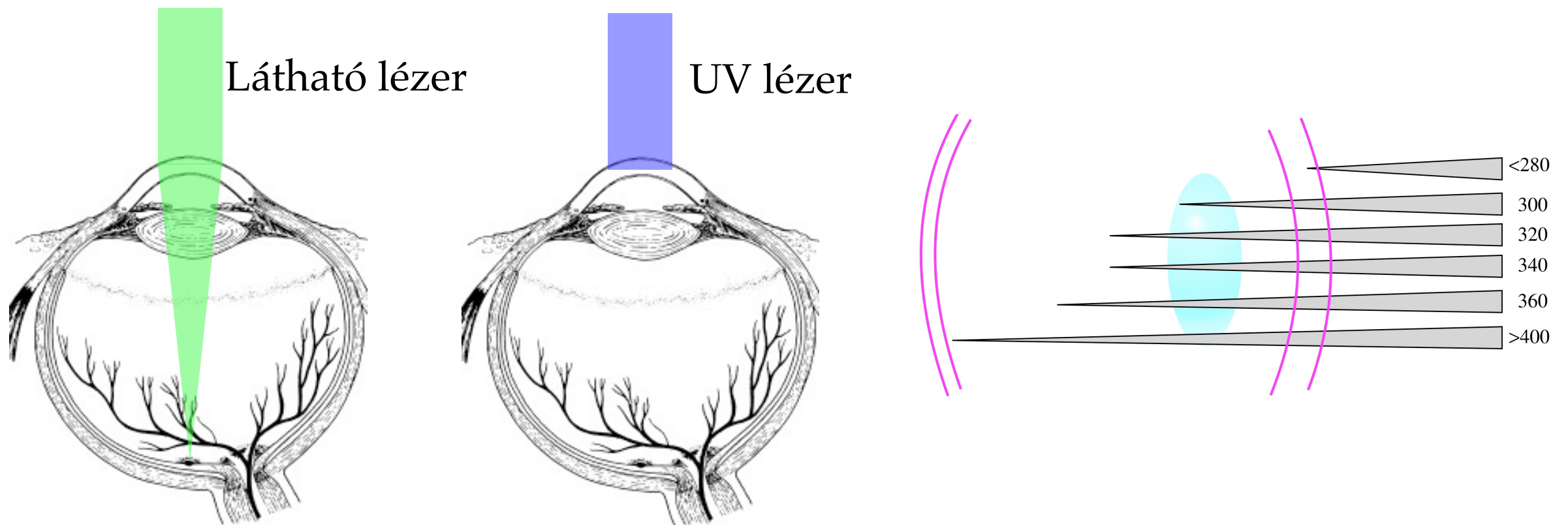


# SZEMÉSZETI ALKALMAZÁSOK:

## ÁLAPELVEK

---

Az optikai közegek transzmittivitása hullámhossz-függő





# SZEMÉSZETI ALKALMAZÁSOK:

## LASIK

---

### “Laser-assisted In Situ Keratomileusis”

A refraktív lézer-szemsebészet egy fajtája

#### Történet:

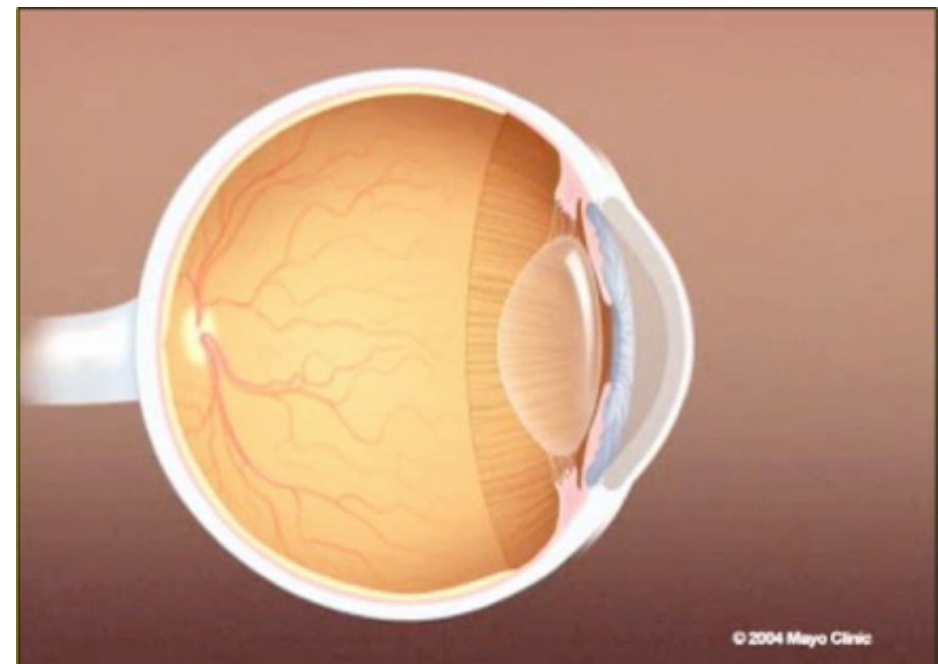
**Jose Barraquer, 1970:** microkeratome építése, mellyel a corneába lézerrel hasadékokat vágott és lemezeket alakított ki (keratomileusis).

**Lucio Buratto (Olasz) és Ioannis Pallikaris (Görög), 1990:** keratomileusis és photorefraktív 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:

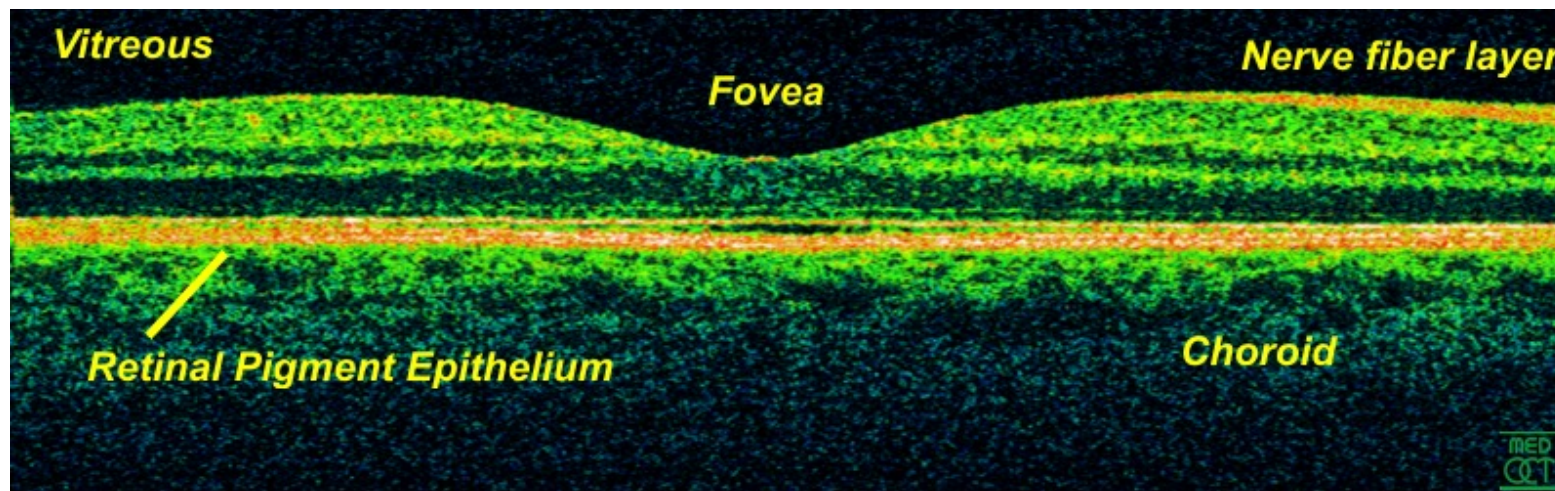
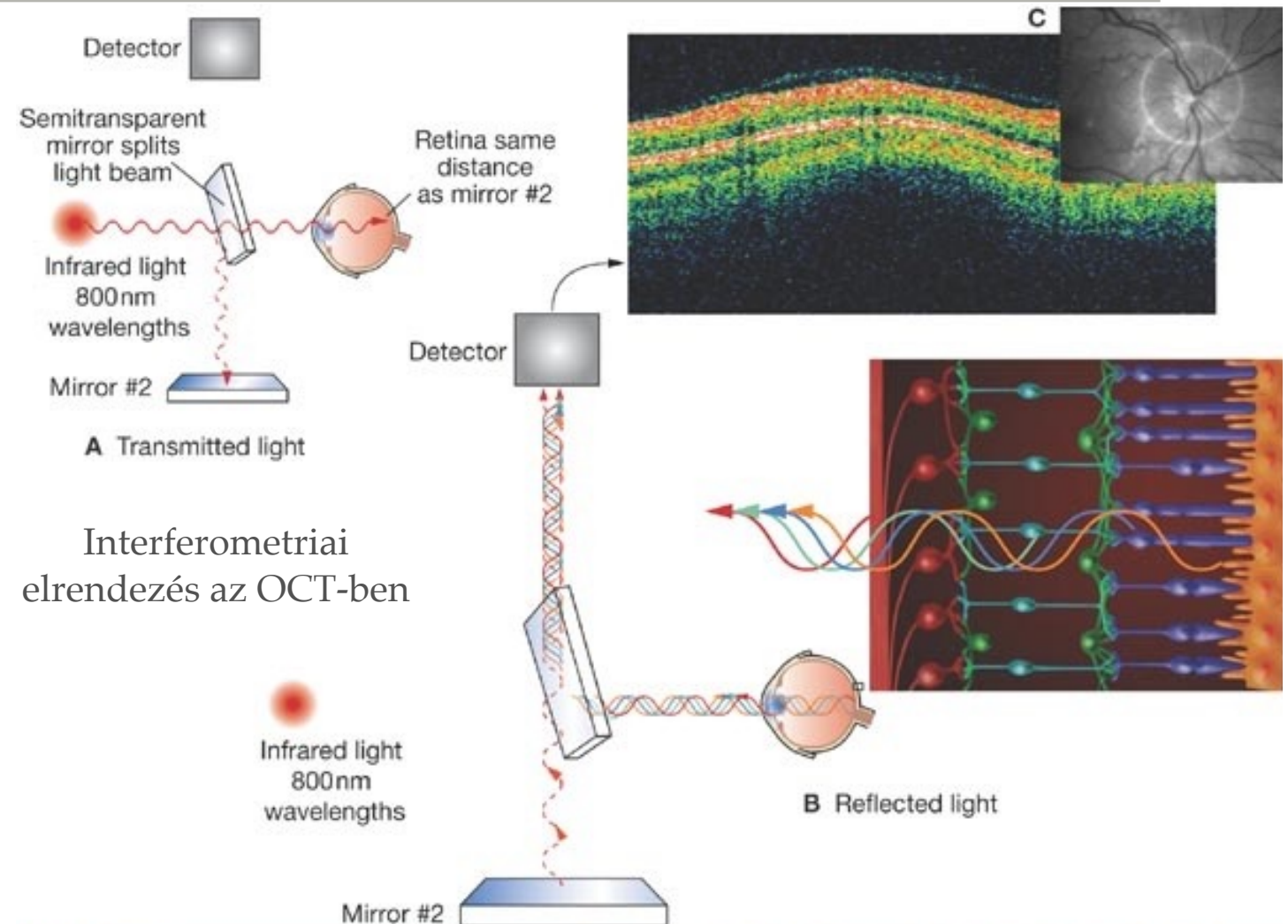
## OCT

*Optikai koherencia tomográfia* (Optical Coherence Tomography):

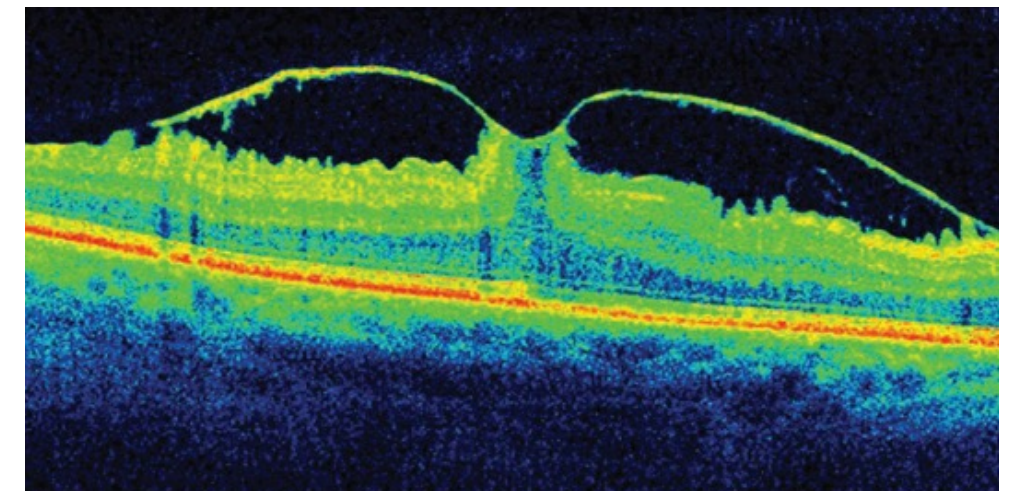
- noninvazív
- kontrasztanyagmentes
- majdnem mikroszkópikus felbontás

*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/pre-show-qr.php?type=feedback&qr=33HVG06CJAOY2GRX>