

LÉZER

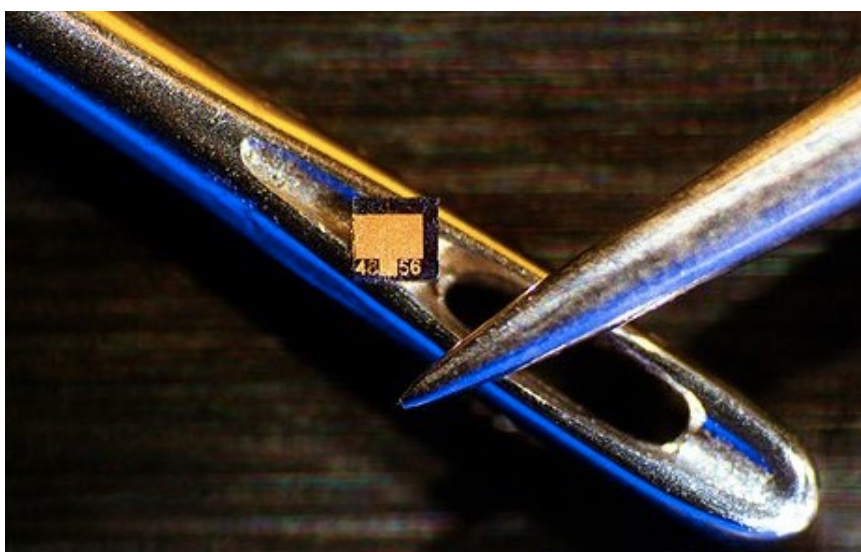
KELLERMAYER MIKLÓS



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)

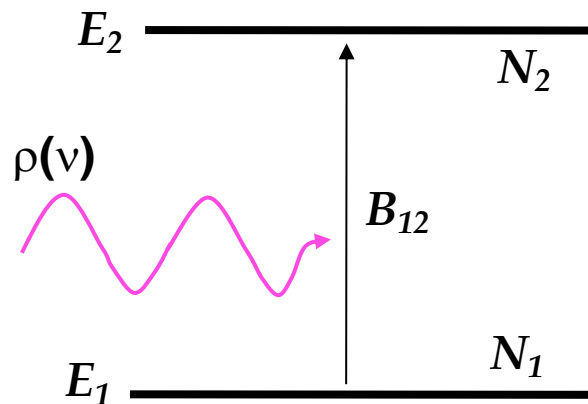


- **1917** - *Albert Einstein*: indukált emisszió elméleti predikciója.
- **1946** - *G. Meyer-Schwickerath*: első szemműtét fénnel.
- **1950** - *Arthur Schawlow és Charles Townes*: az emittált fotonok a látható tartományba eshetnek.
- **1954** - *N.G. Basow, A.M. Prochorov, és C. Townes*: ammónia mézer
- **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

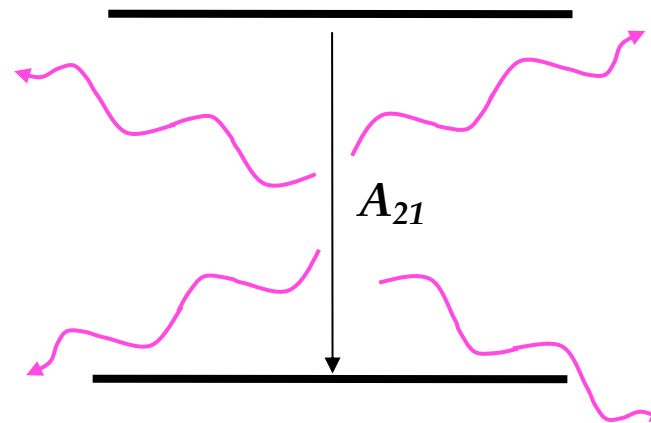
1. Abszorpció



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

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

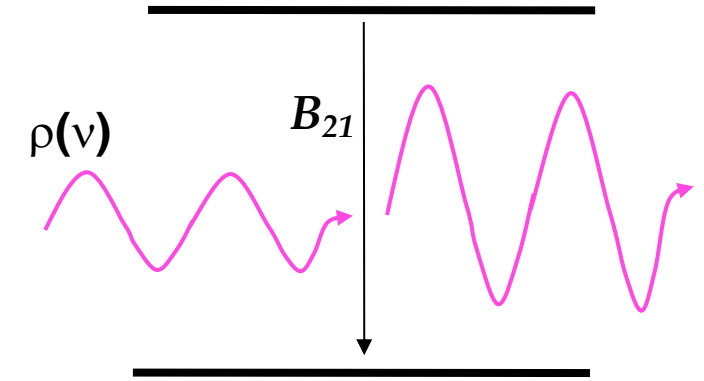
2. Spontán emisszió



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

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

3. Indukált emisszió



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

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, $E_2 > E_1$

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

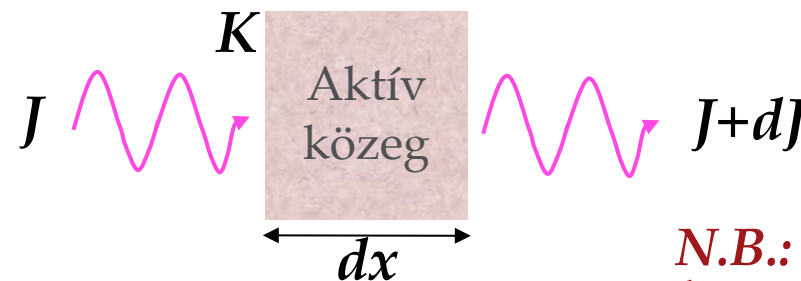
N_1, N_2 : adott energianívón levő atomok, molekulák száma

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



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

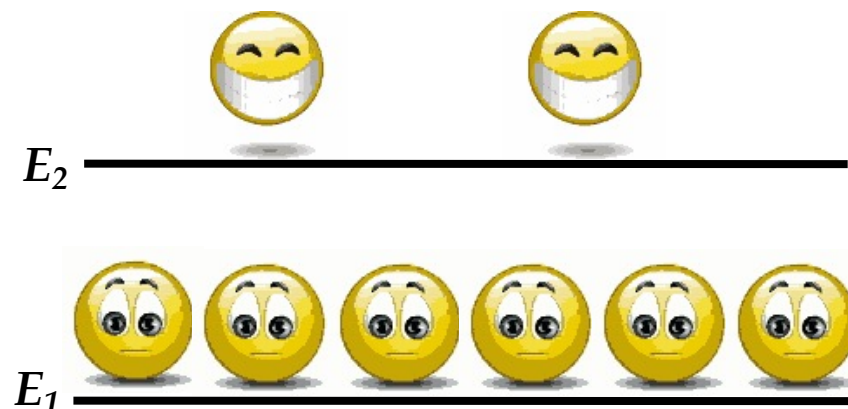
J = energiaáram-sűrűség

K = állandó

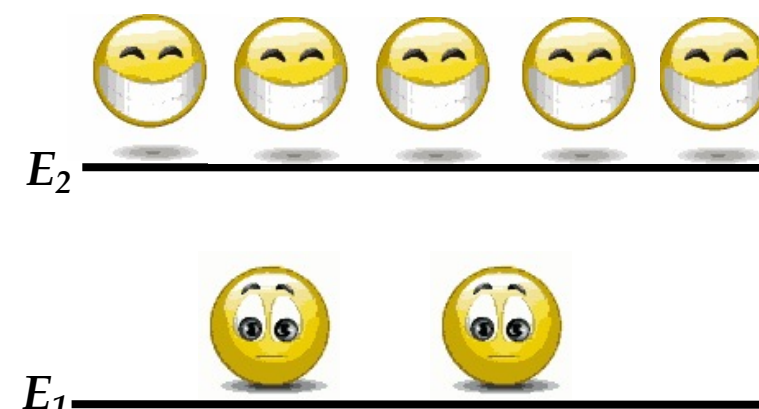
x = fény által a közegben megtett út

N_1, N_2 = atomok száma az energianívón

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

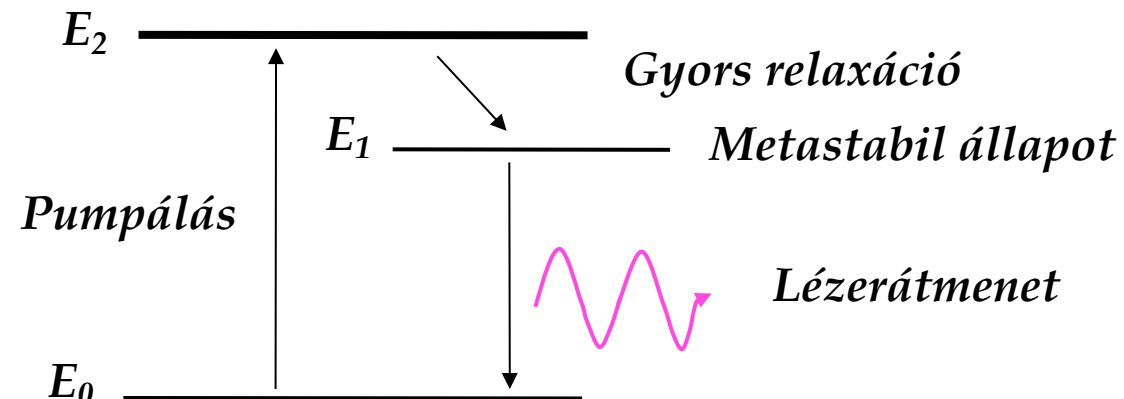


Termikus egyensúly



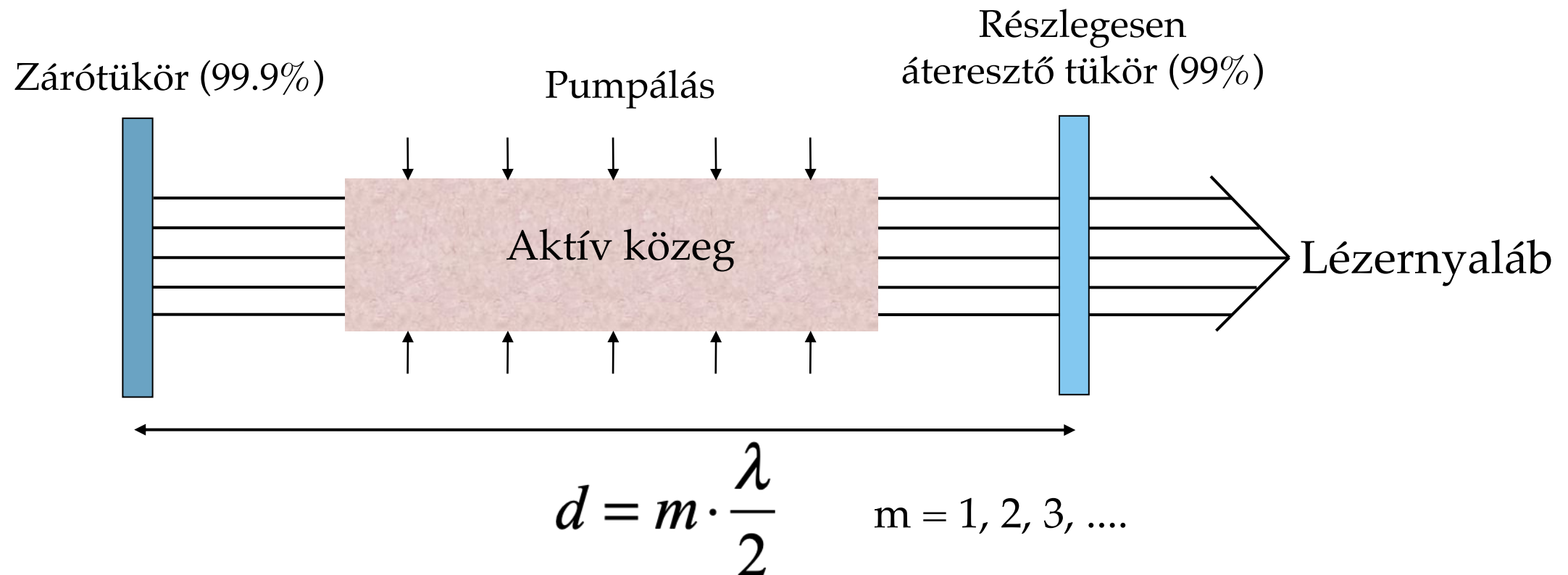
Populáció inverzió

- 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. CO₂ 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

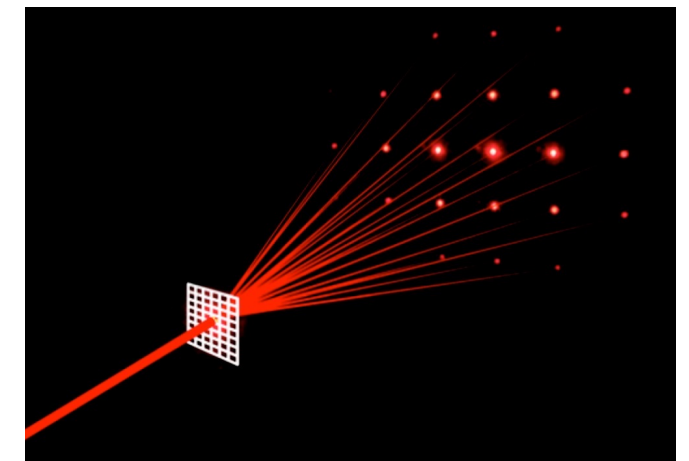
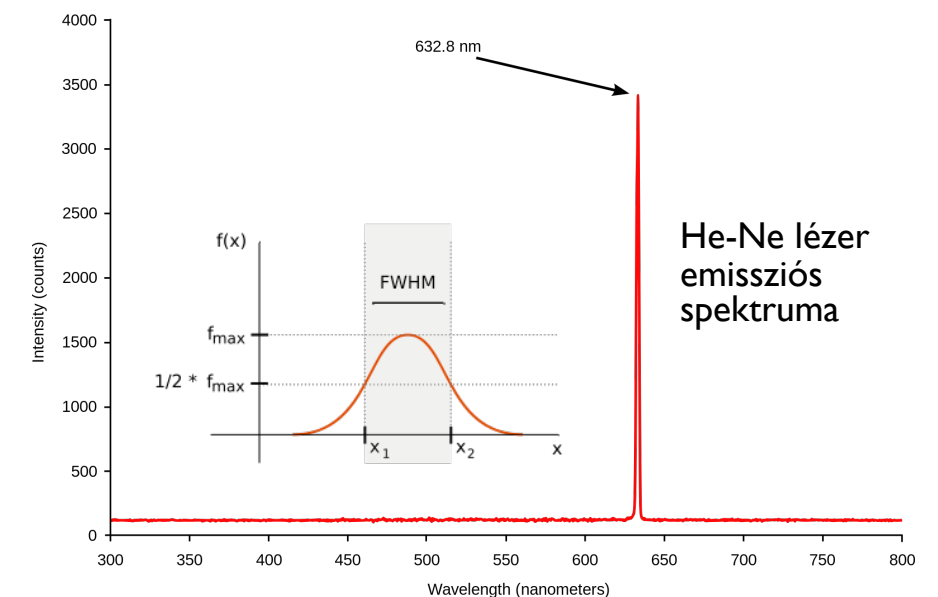
6. Koherencia

Fázisazonosság, interferenciaképesség

Időbeli koherencia (különböző időpontokban emittált fotonok fázisazonossága)

Térbeli koherencia (nyalábkeresztmetszet menti fázisazonosság)

Alkalmazás: holográfia, optikai koherencia tomográfia



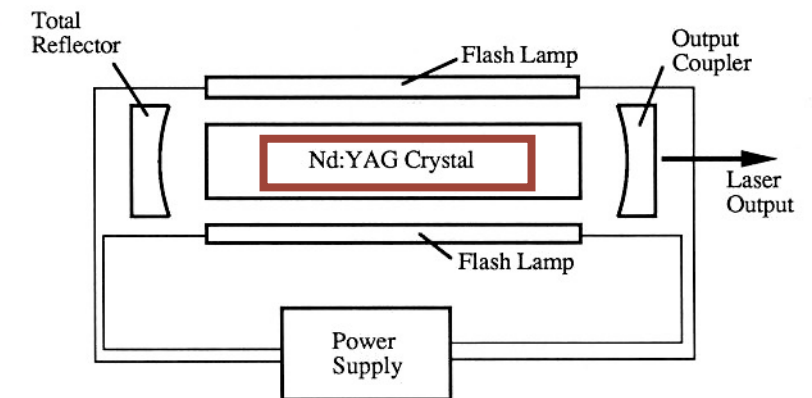
LÉZERTÍPUSOK

Fényerősítő közeg alapján:

1. Szilárdtest lézerek

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

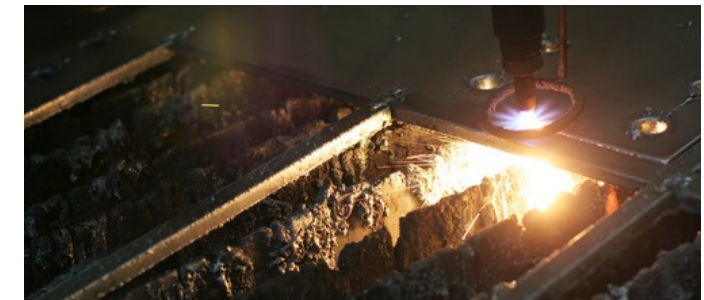
Vörös-infravörös spektrális tartomány; Folytonos, Q-kapcsolású üzemmód, nagy teljesítmény



2. Gázlézerek

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

CO₂ lézer: CO₂-N₂-He keverék; $\lambda \sim 10 \mu\text{m}$; Óriási teljesítmény (100 W)

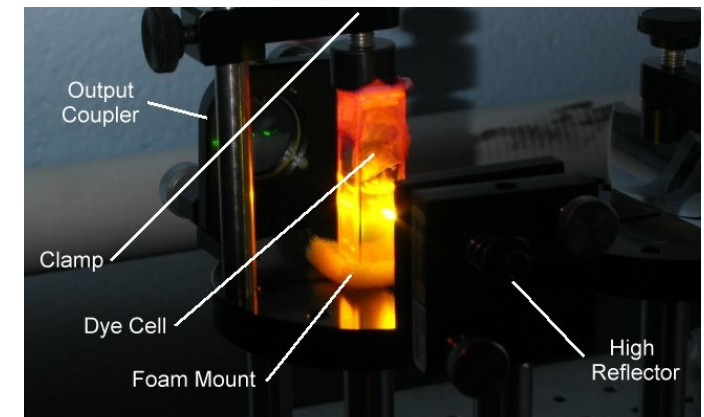


fémleap
vágása
CO₂
lézerrel

3. Festéklézerek

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

Nagy teljesítmény (Q-kapcsolt módban); Hangolható



festéklézer

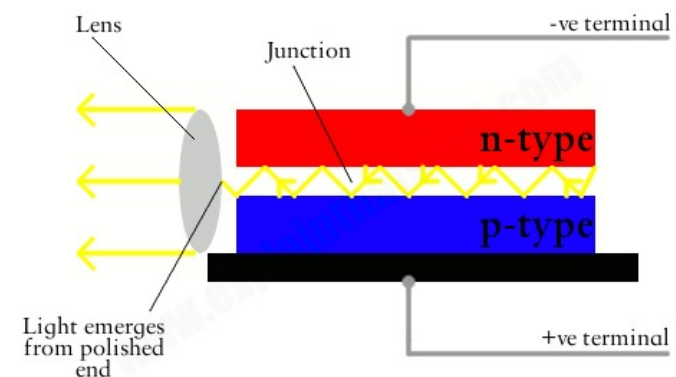
4. Félvezető (dióda) lézerek

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.

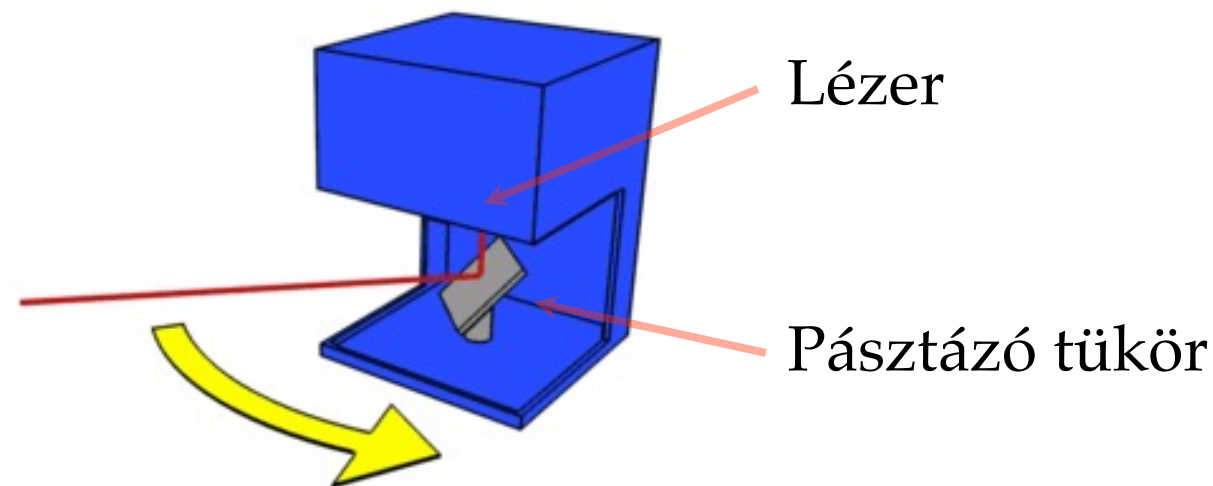
LÉZERALKALMAZÁS

SZEMPONTJAI

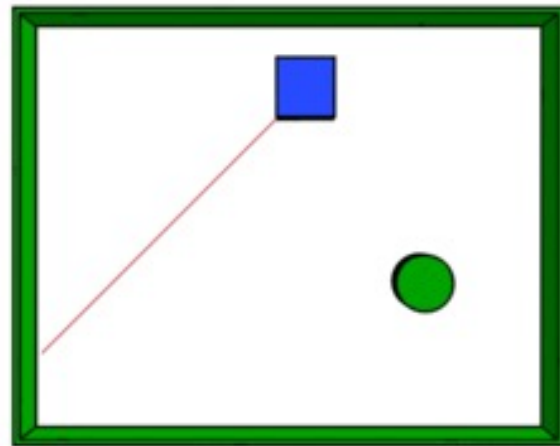
- Irányíthatóság
- Monokromaticitás
- Koherencia
- Rövid impulzusok lehetősége
- Teljesítmény:
 - 5 mW – CD-ROM meghajtó
 - 5–10 mW – DVD lejátszó vagy DVD-ROM meghajtó
 - 100 mW – Nagysebességű CD-RW író
 - 250 mW – DVD-R író
 - 1–20 W – szilárdtest-lézer mikromegmunkálásra
 - 30–100 W – sebészeti CO₂ lézer
 - 100–3000 W – ipari CO₂ lézer (lézervágó)
 - 1 kW – 1 cm diódalézer rúd

SEBESSÉGMÉRÉS LÉZERREL

LIDAR: “LIGHT DETECTION AND RANGING”



Irányíthatóság



Felülnézeti elrendezés

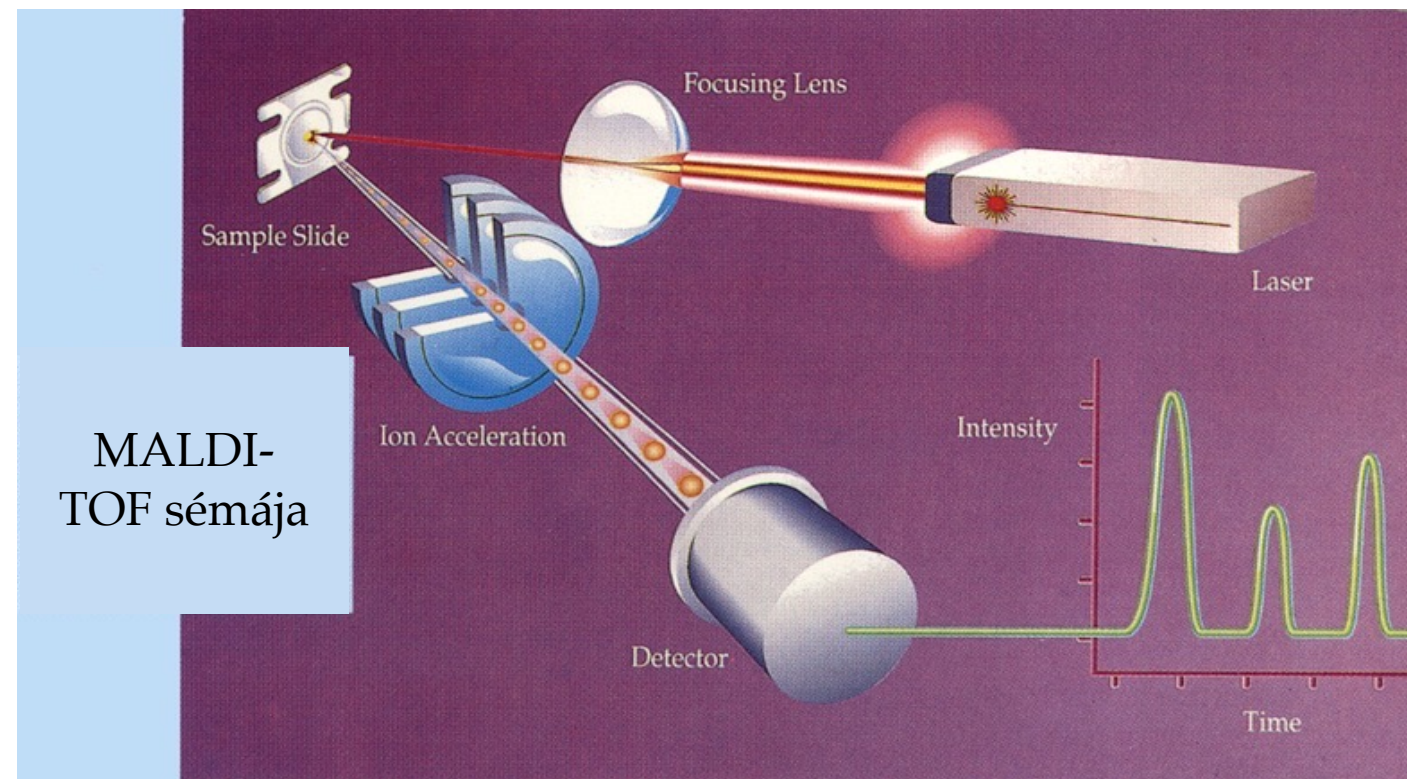


Felvétel:
rekonstruált térbeli
elhelyezkedés.
Közlekedési
sebességmérőben:
100 impulzus 0.3 s alatt

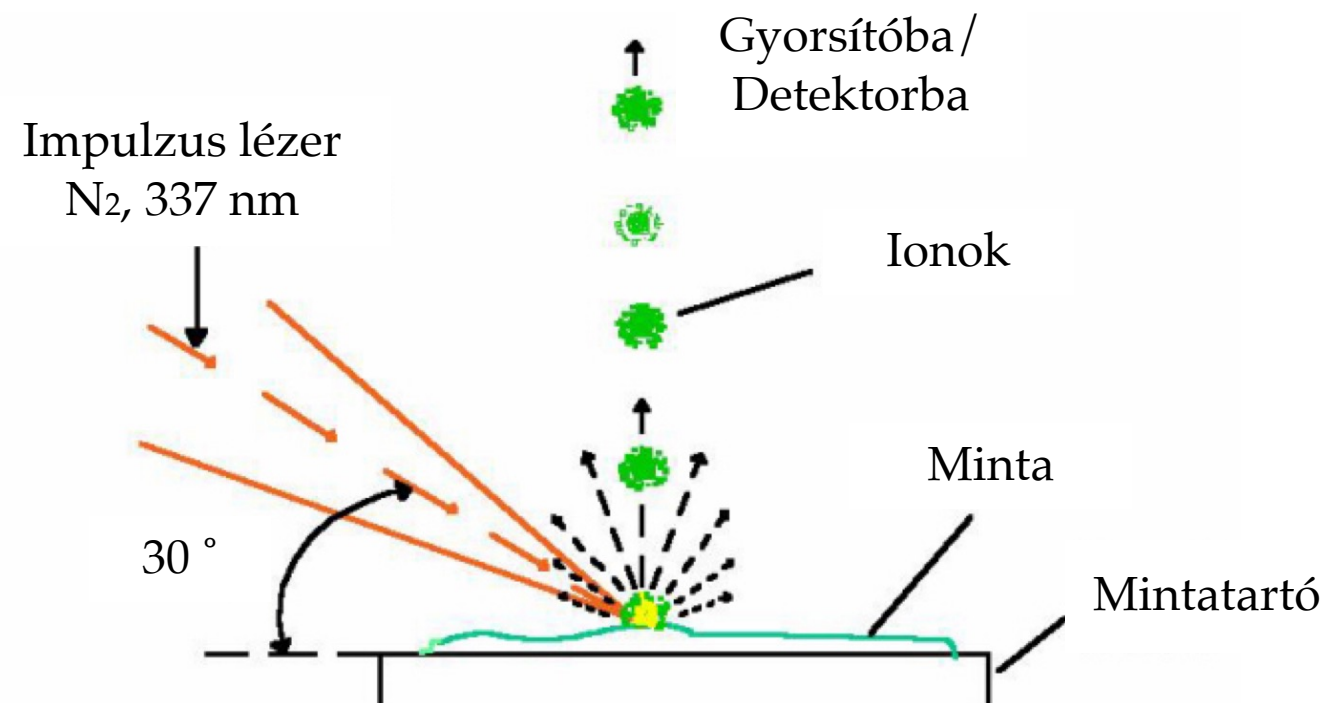


MALDI-TOF:

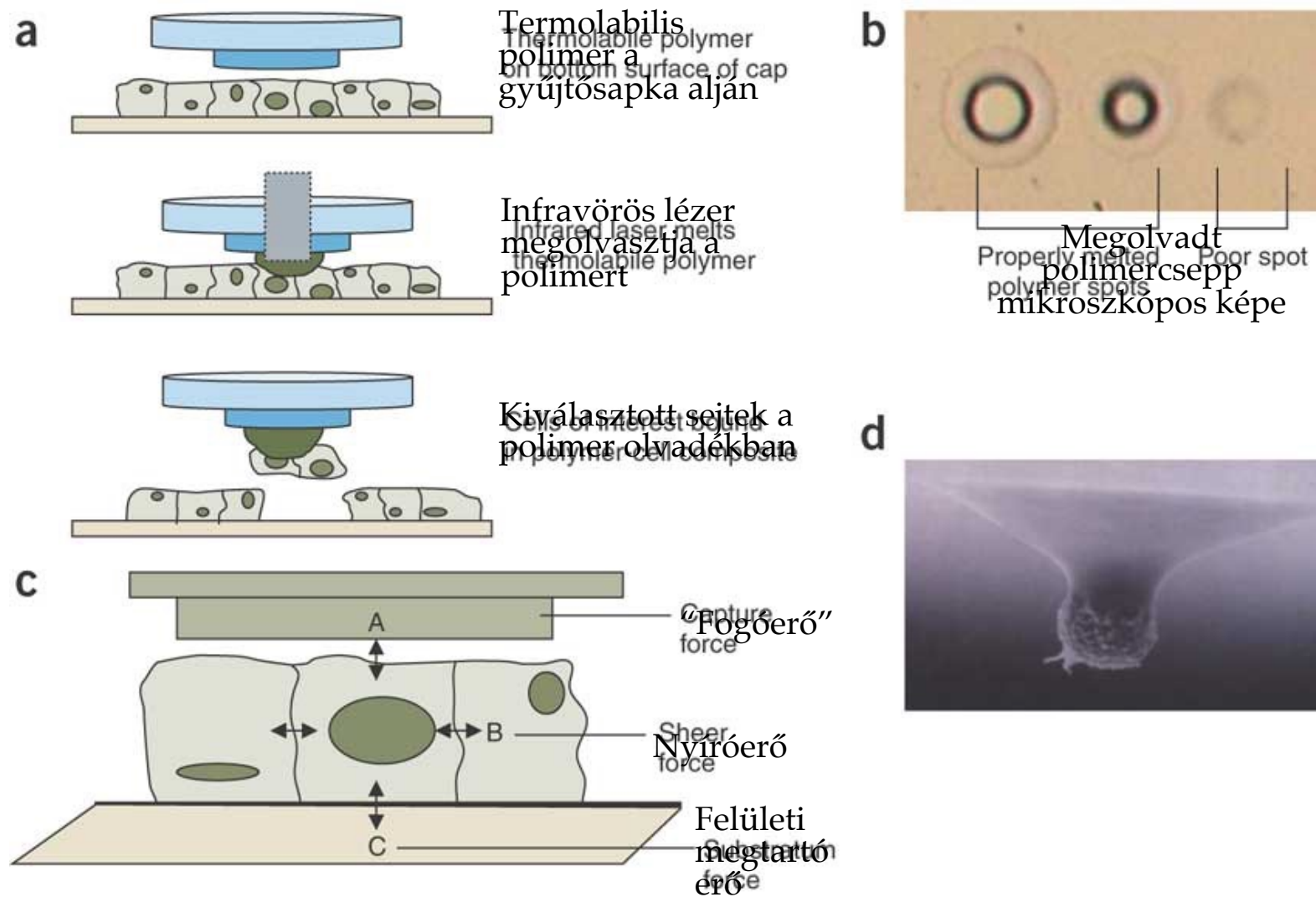
MATRIX-ASSISTED LASER DESORPTION/IONIZATION TIME OF FLIGHT MASS SPECTROMETRY



Teljesítménysűrűség



“LASER CAPTURE MICRODISSECTION”



Teljesítménysűrűség,
irányíthatóság

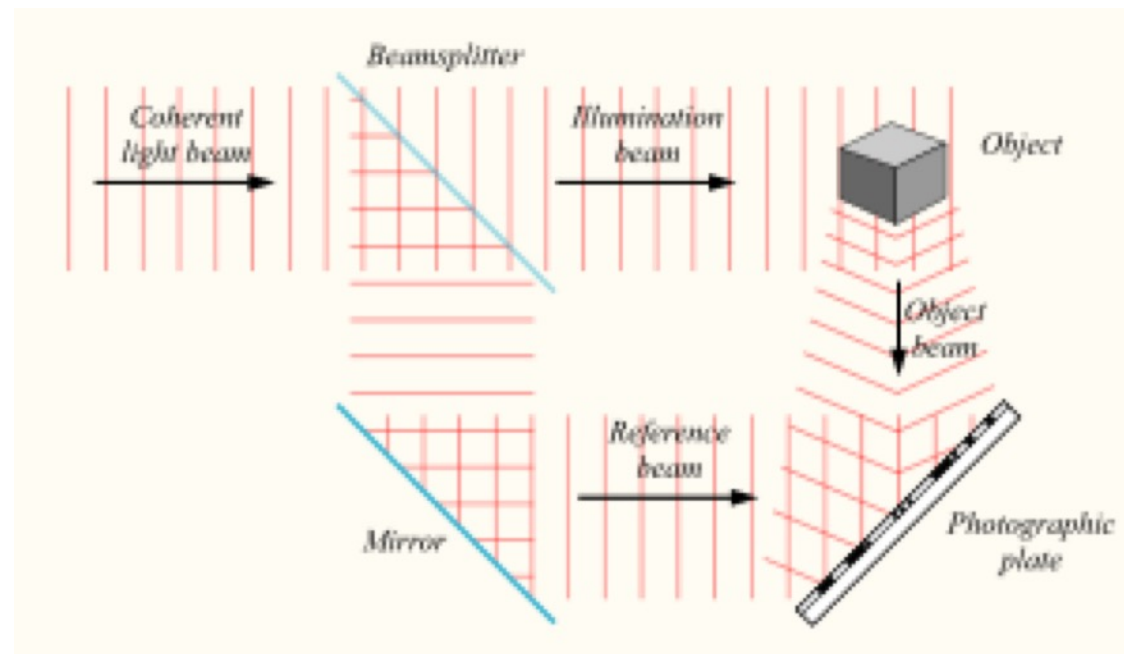
Jelentőség: lokális
analitika lehetősége
(kémia, genetika)

HOLOGRÁFIA

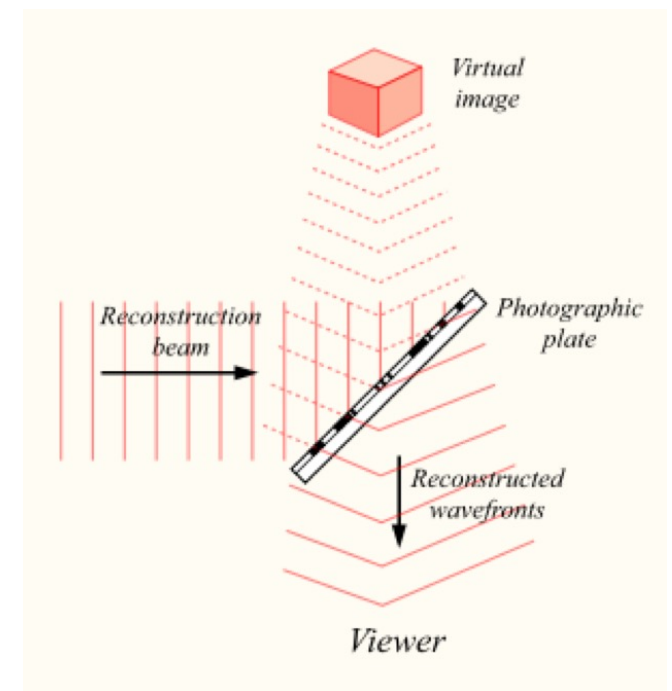
Koherencia



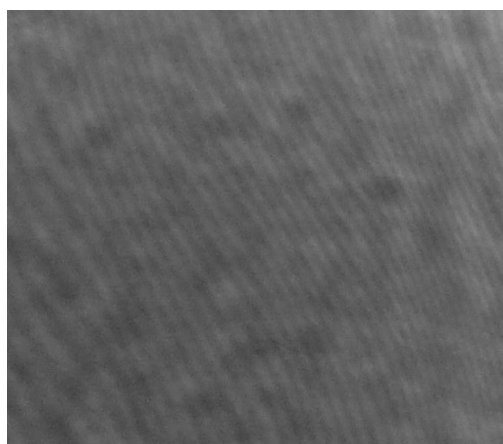
Gábor Dénes
(1900-1979)



Hologram felvétele



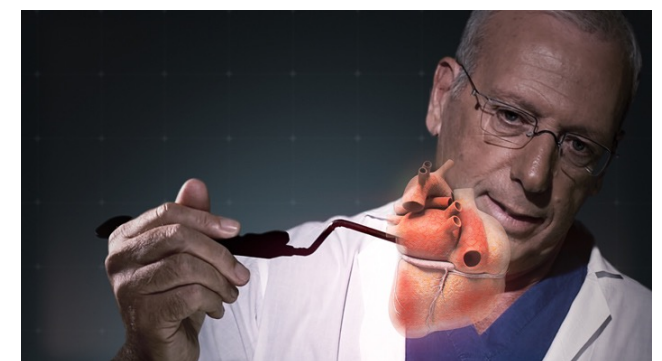
Hologram megtekintése



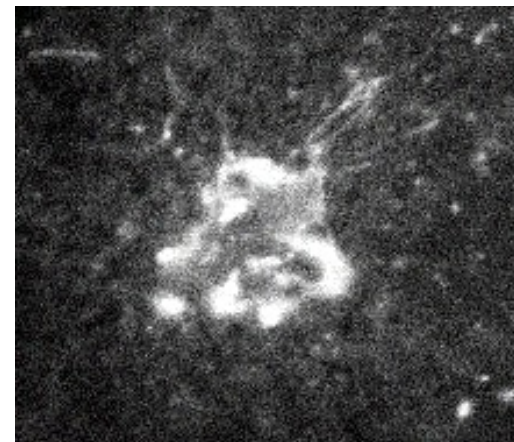
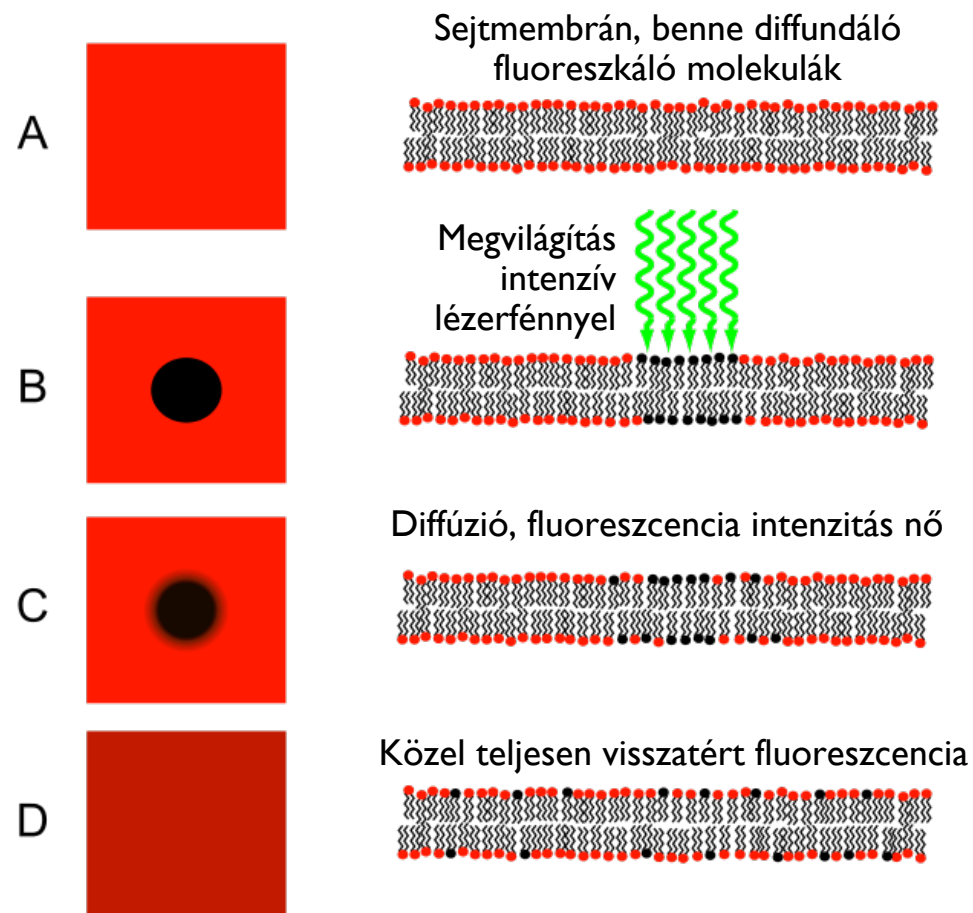
Hologram fotolemez felülete



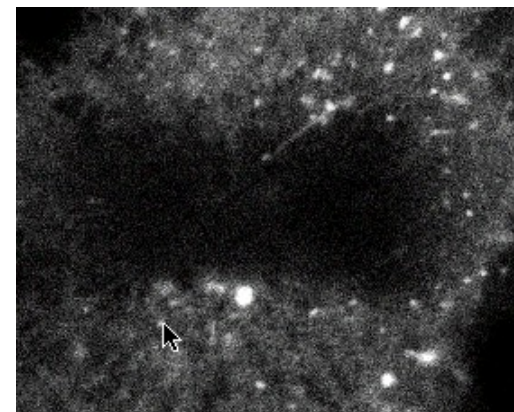
Hologramok



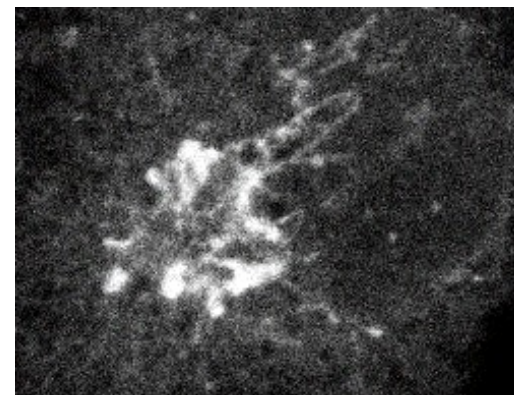
Fluorescence Recovery After Photobleaching (FRAP)



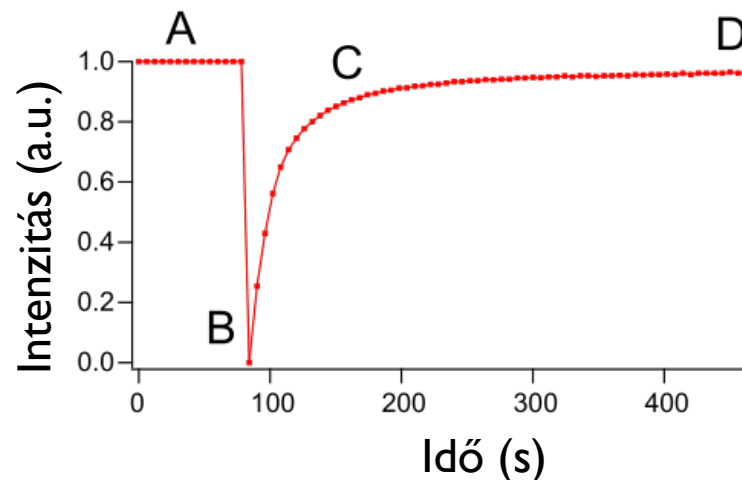
Kifehérítés előtti kép



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

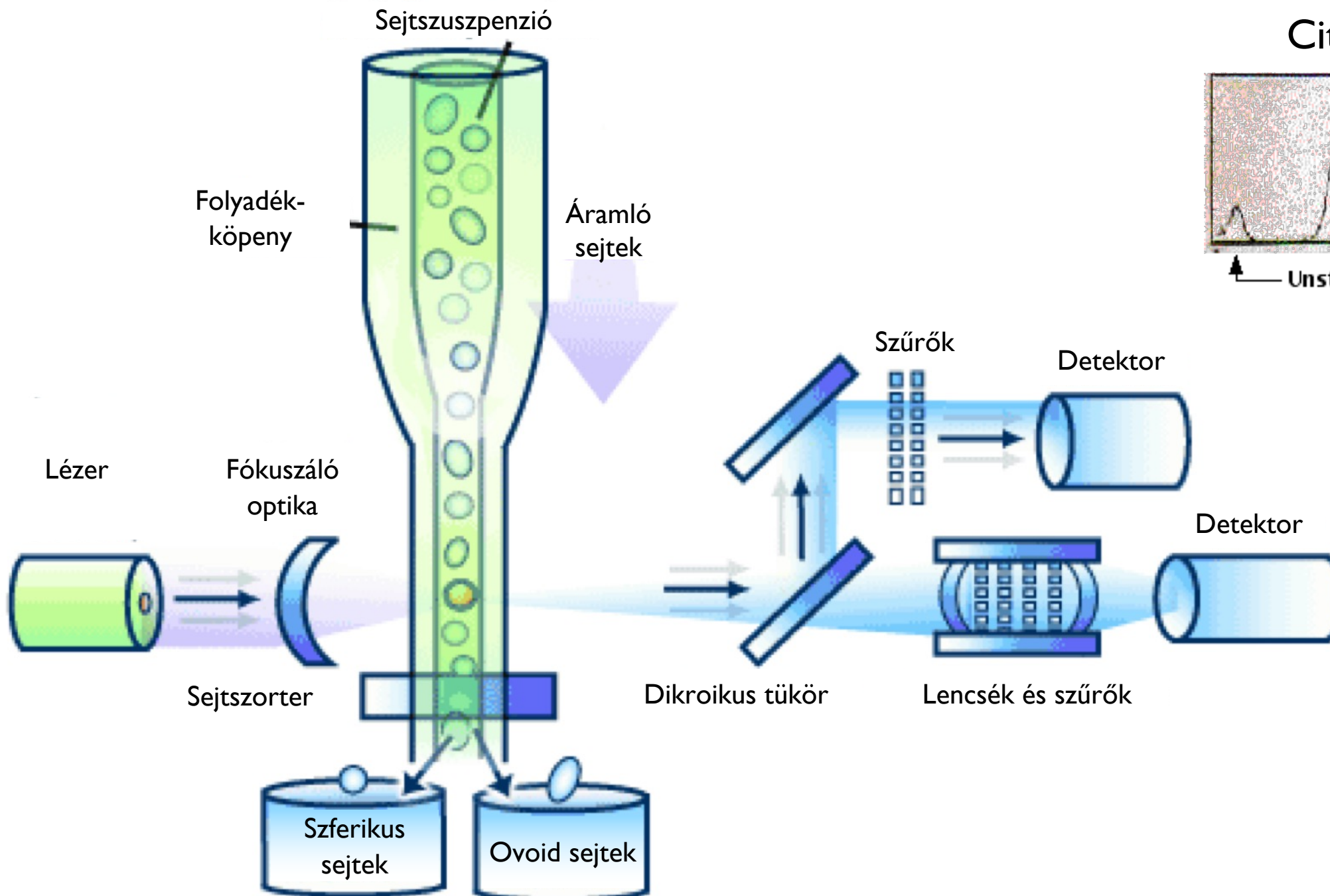
t_D = időállandó

Fluorescence activated cell sorter (FACS)

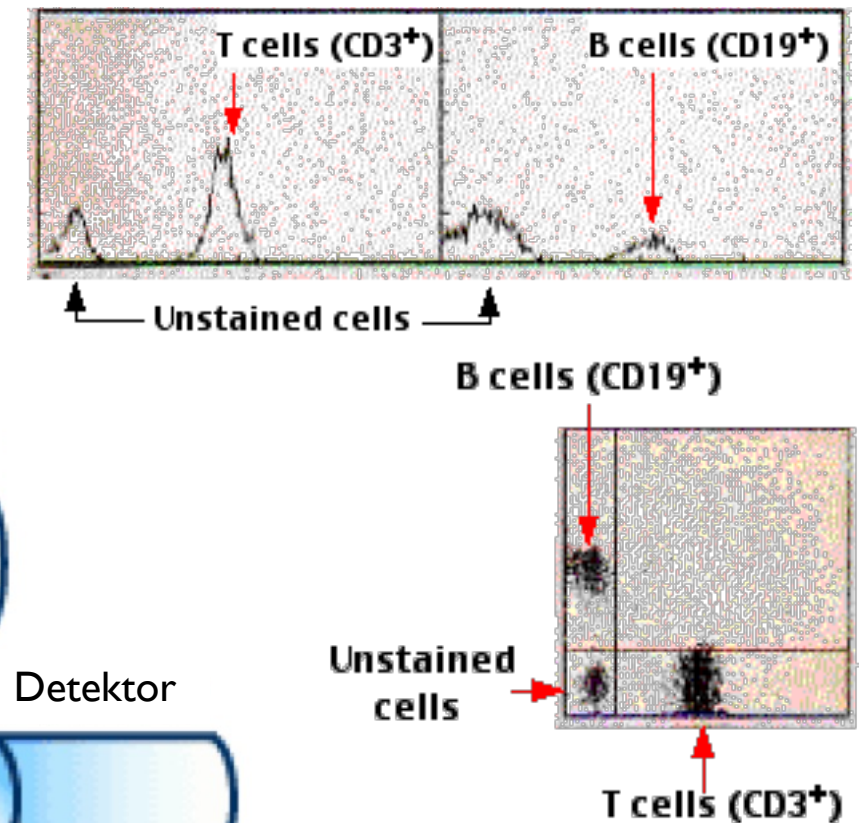
Fluoreszcencia aktivált sejtválogatás; Áramlási citometria (flow cytometry)

- 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

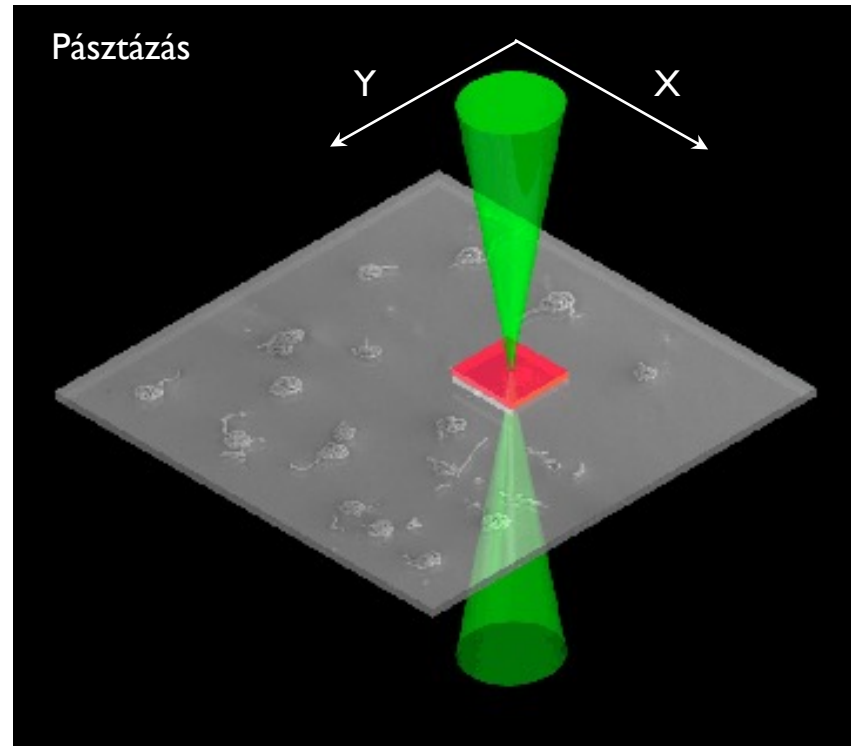


Citometriás statisztika

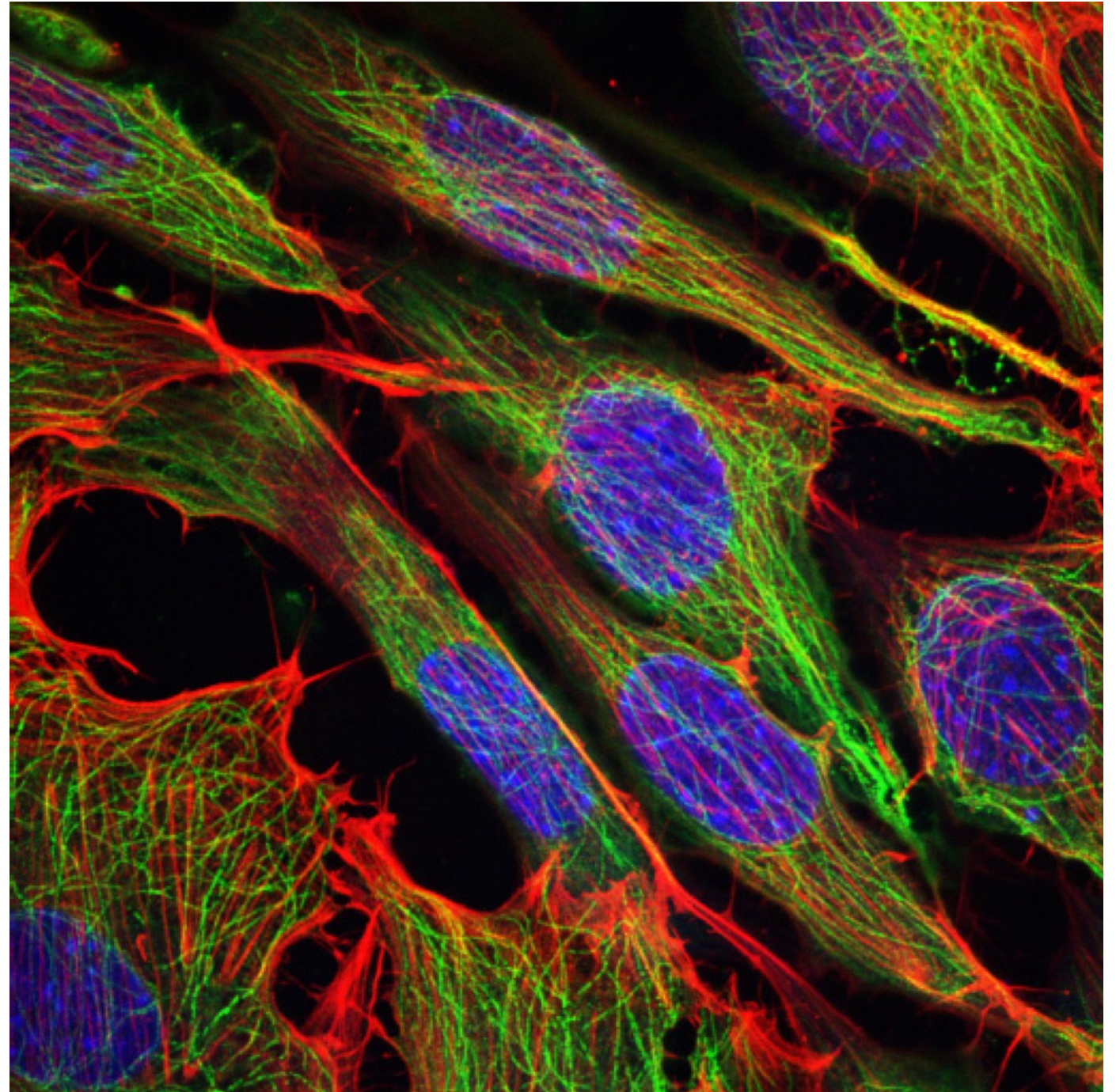
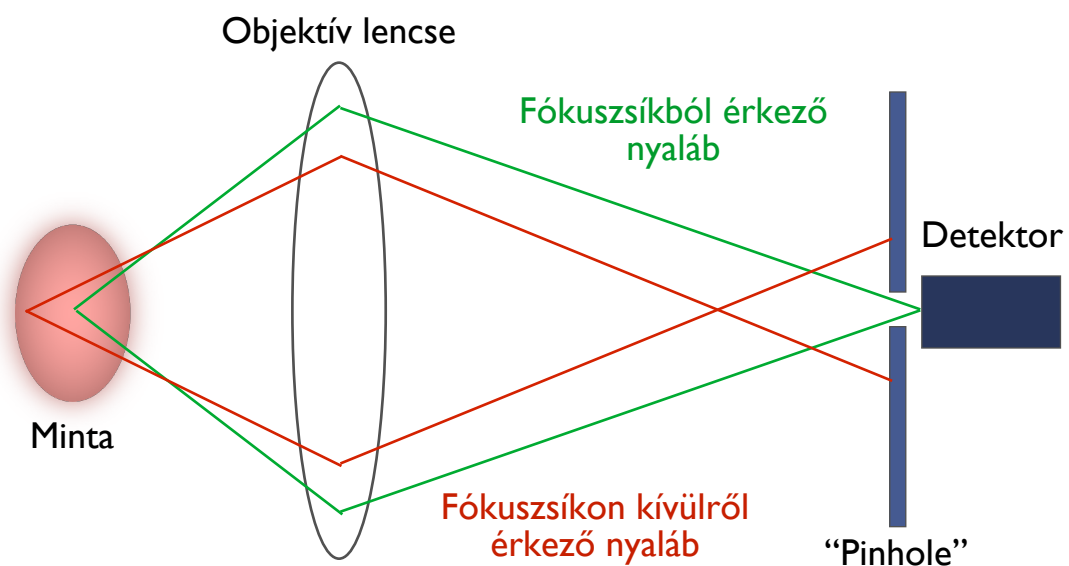


Lézer pásztázó konfokális mikroszkópia

Monokromaticitás, irányíthatóság



“Konfokális elv”

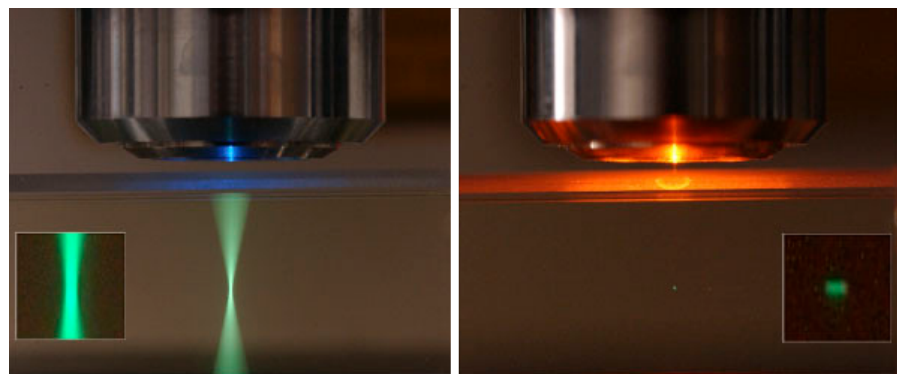
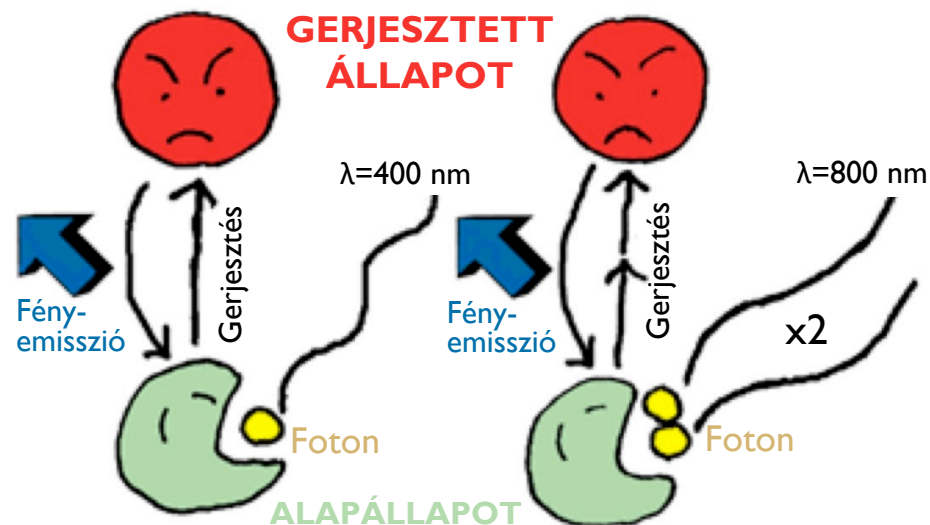


Zöld: mikrotubulusok; Vörös: aktin; Kék: sejtmag

Multifoton fluoreszcencia mikroszkópia

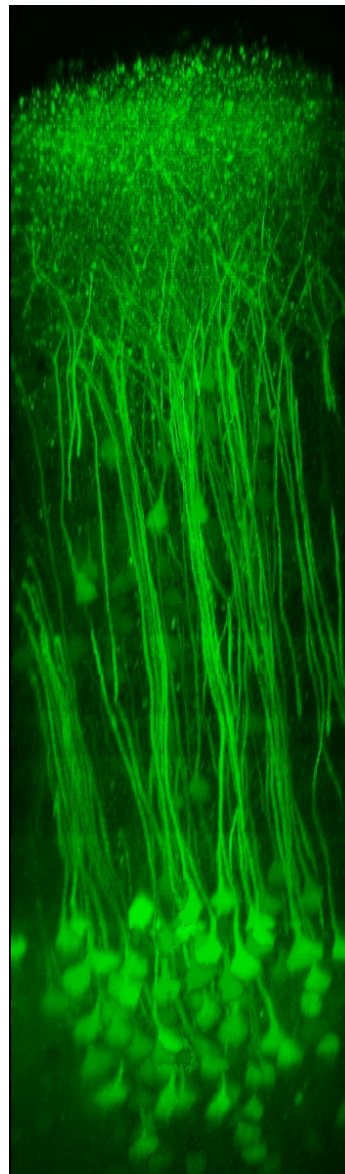
Monokromaticitás, irányíthatóság, rövid impulzusok

- 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)

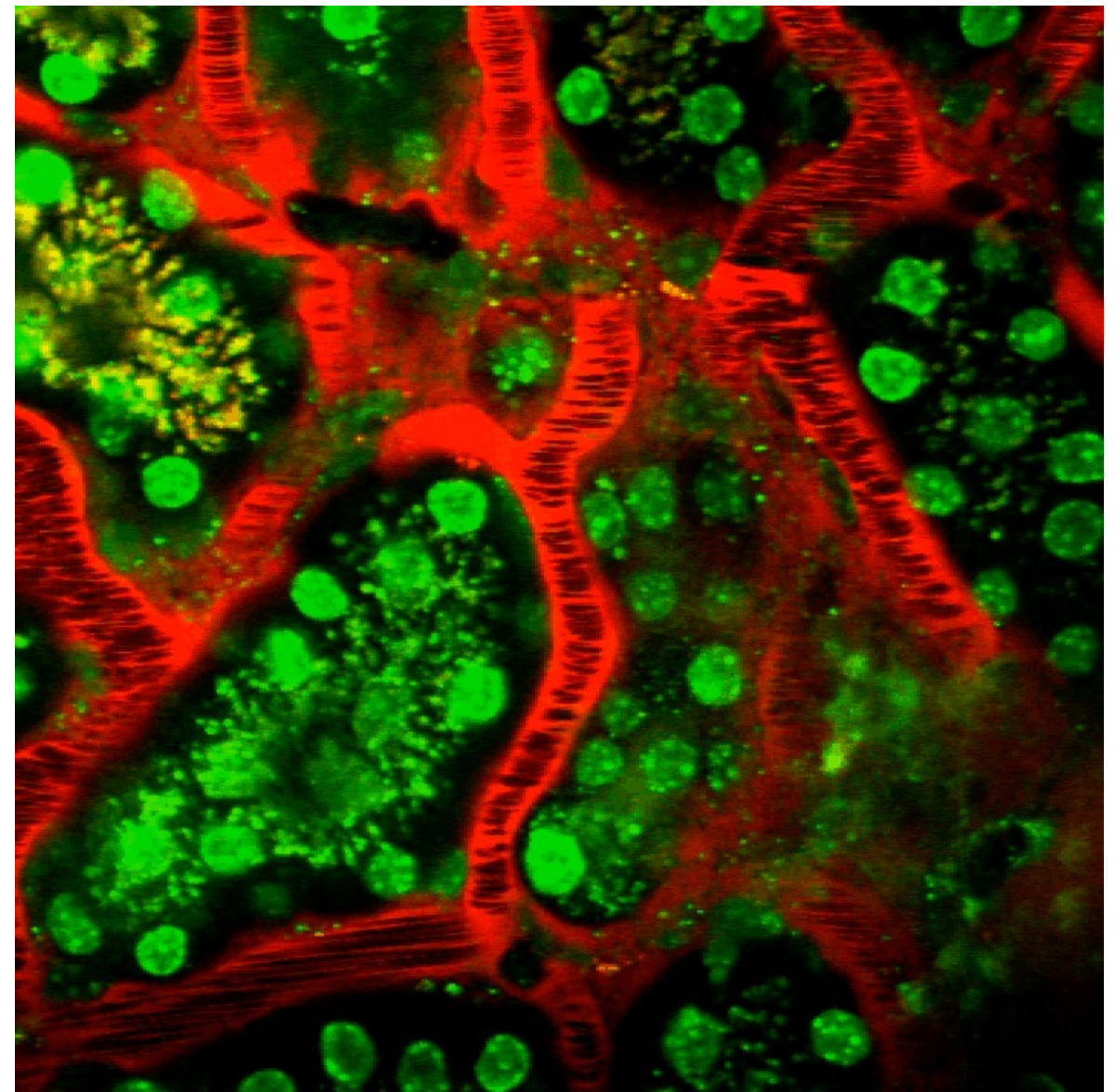


Egyfoton
fluoreszcencia

Kétfoton
fluoreszcencia



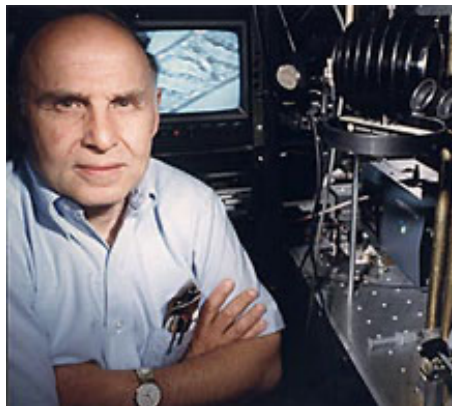
Agykérgi piramissejtek



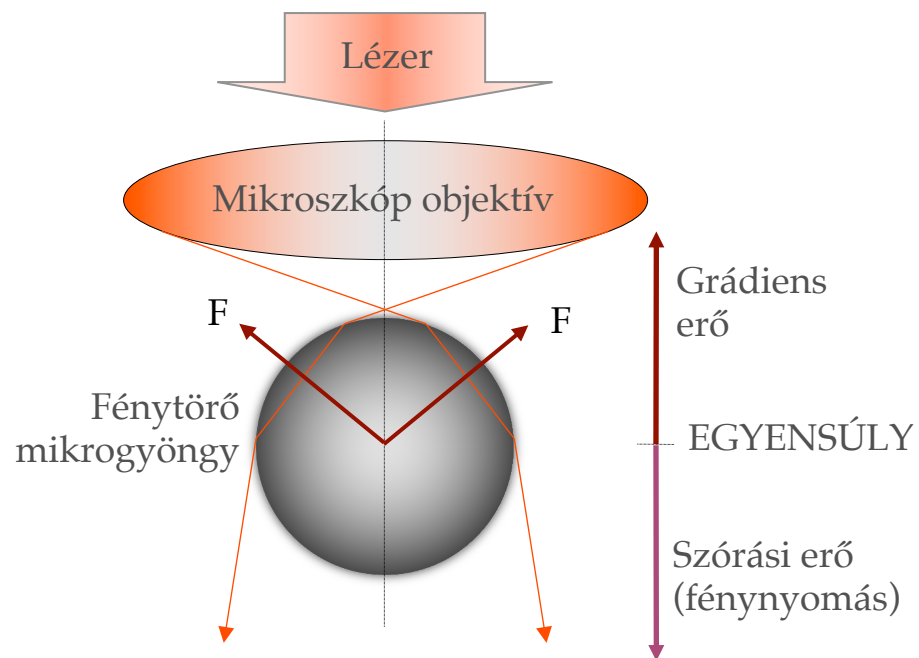
Zöld: proximális vesetubulusok; Vörös: albumin (plazma)

LÉZERCSIPESZ

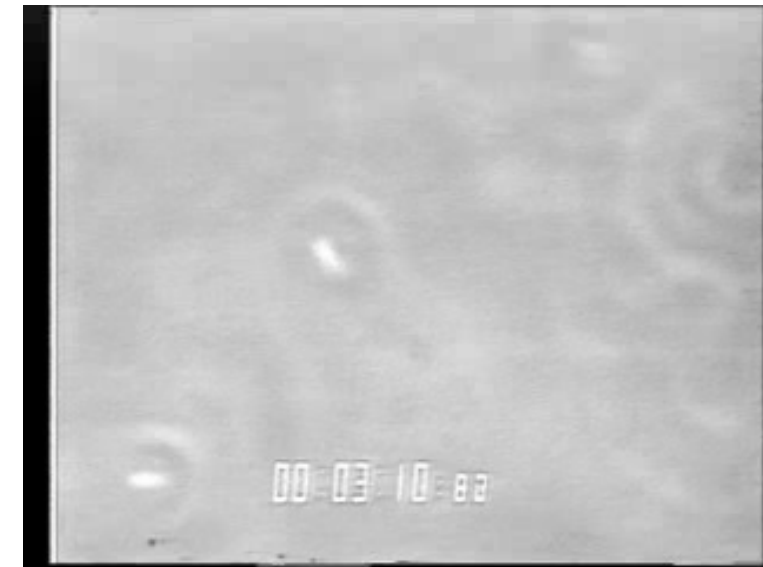
Teljesítménysűrűség, irányíthatóság



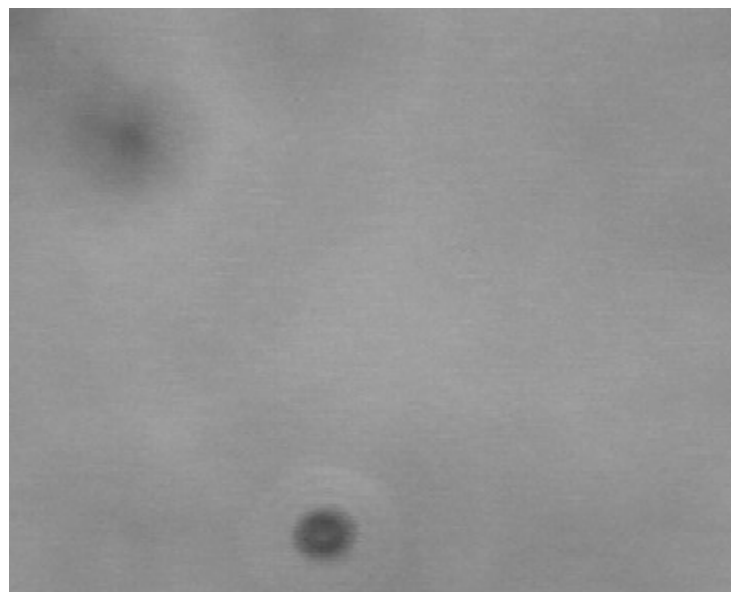
Arthur Ashkin (1970)



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

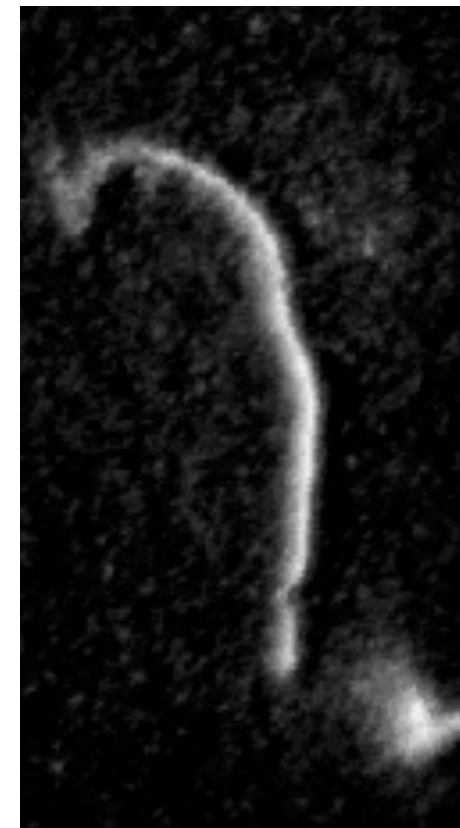


Baktérium sejt manipulálása lézercsipeszsel



3 μm átmérőjű latex (polistírol) mikrogyöngyök optikai csipeszben

Molekula manipulálása lézercsipeszsel



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 abszorbanancia)
- Koherencia (interferencia, képalkotás)

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

A LÉZER ORVOSI ALKALMAZÁSAI

Sebészeti szakmák: "lézerszike", koaguláció, vérzés nélküli operáció. Daganateltávolítás. CO₂ és Nd:YAG lézer. Holmium lézer lithotripsia (urológia).

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

Fogászat: szuvas részek preferáltan abszorbeálóknak.

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

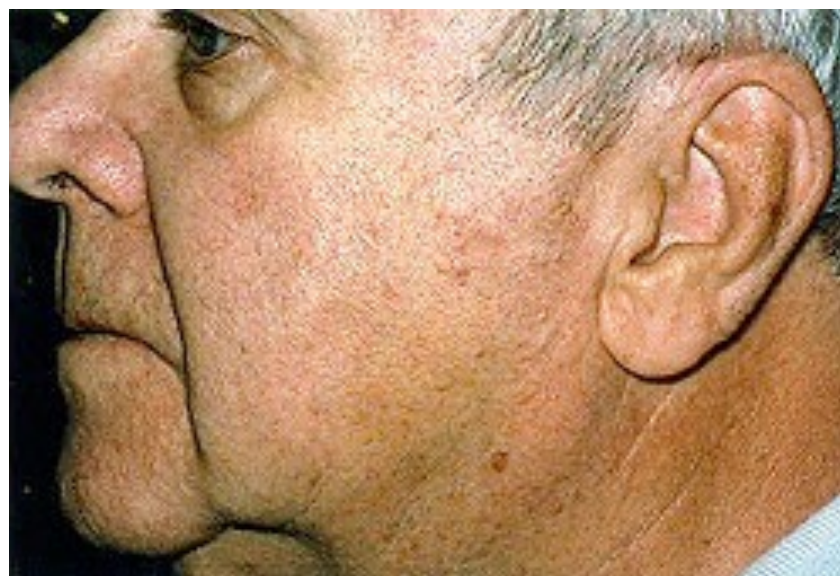
Kezelés után

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.

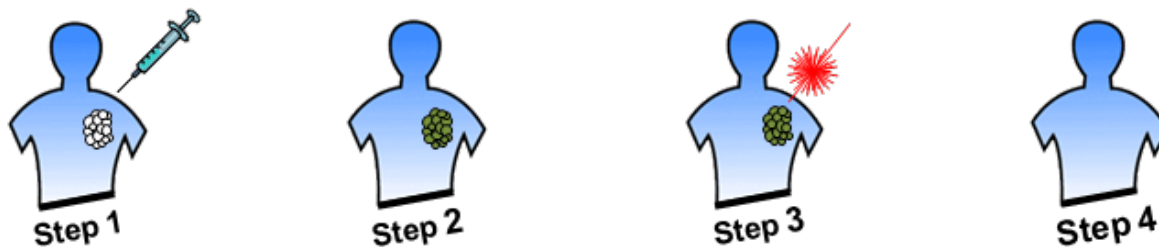
Háromkomponensű tumorterápiás módszer:

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

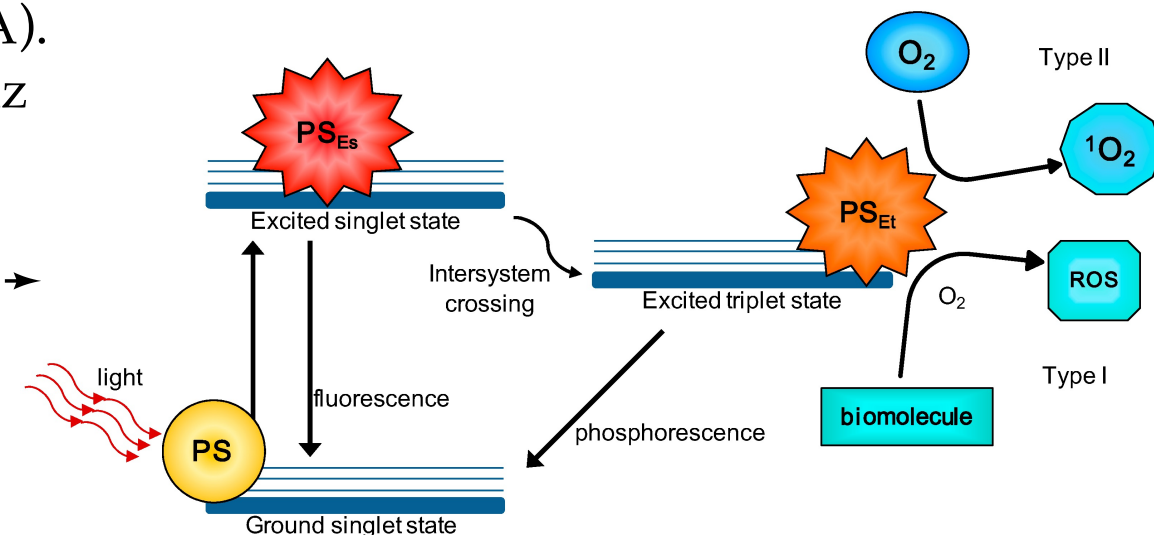


Fény szervezetbe juttatása: felületi megvilágítás, optikai kábel

Lépések:



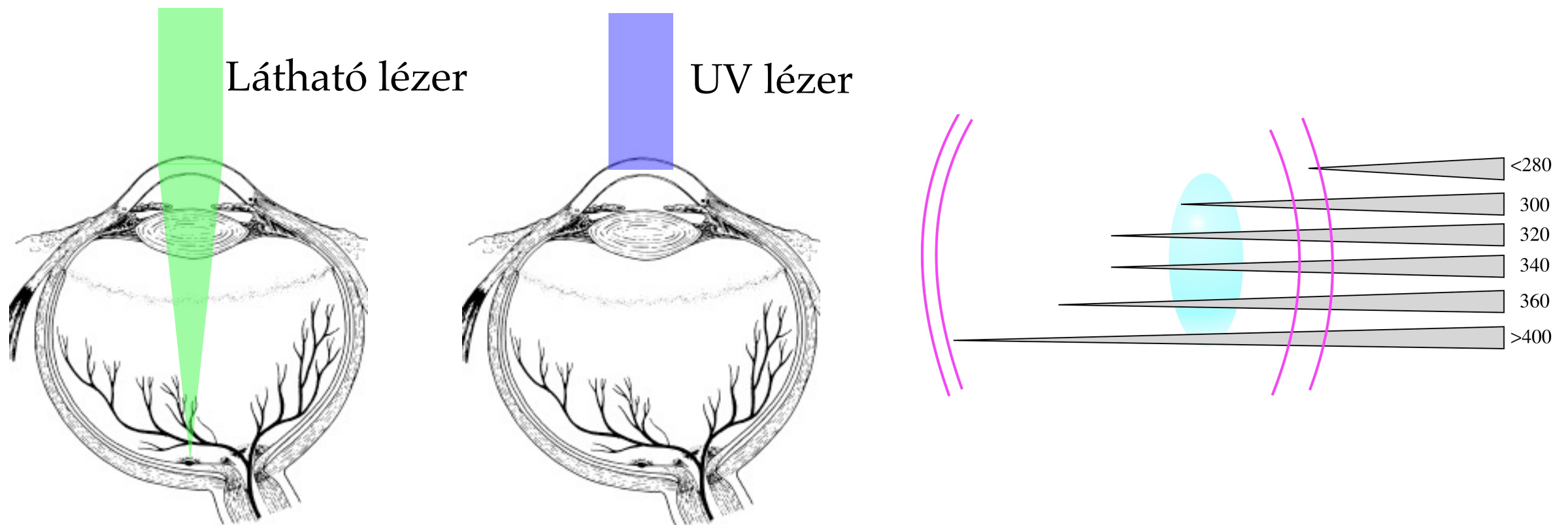
1. Fotoszenzitizáló prekursor beadása (aminolevulinsav, ALA).
2. Néhány órás inkubációs idő koncentráció a tumorban. Az ALA protoporphyrin IX-é alakul.
3. A célterület megvilágítása diódalézerrel (néhány perc).
4. Protoporphyrin abszorbeál \rightarrow gerjesztett szingulett állapot \rightarrow triplett 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:

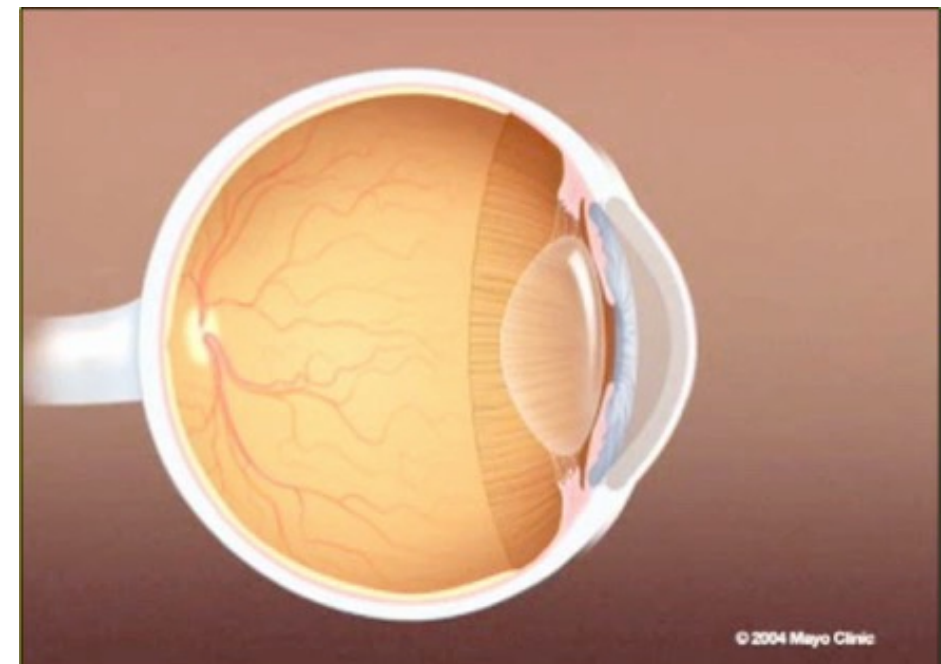
Jose Barraquer, 1970: microkeratome építése, mellyel a corneába lézerrel hasadékokat vágott és lemezeket alakított ki (keratomileusis).

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:

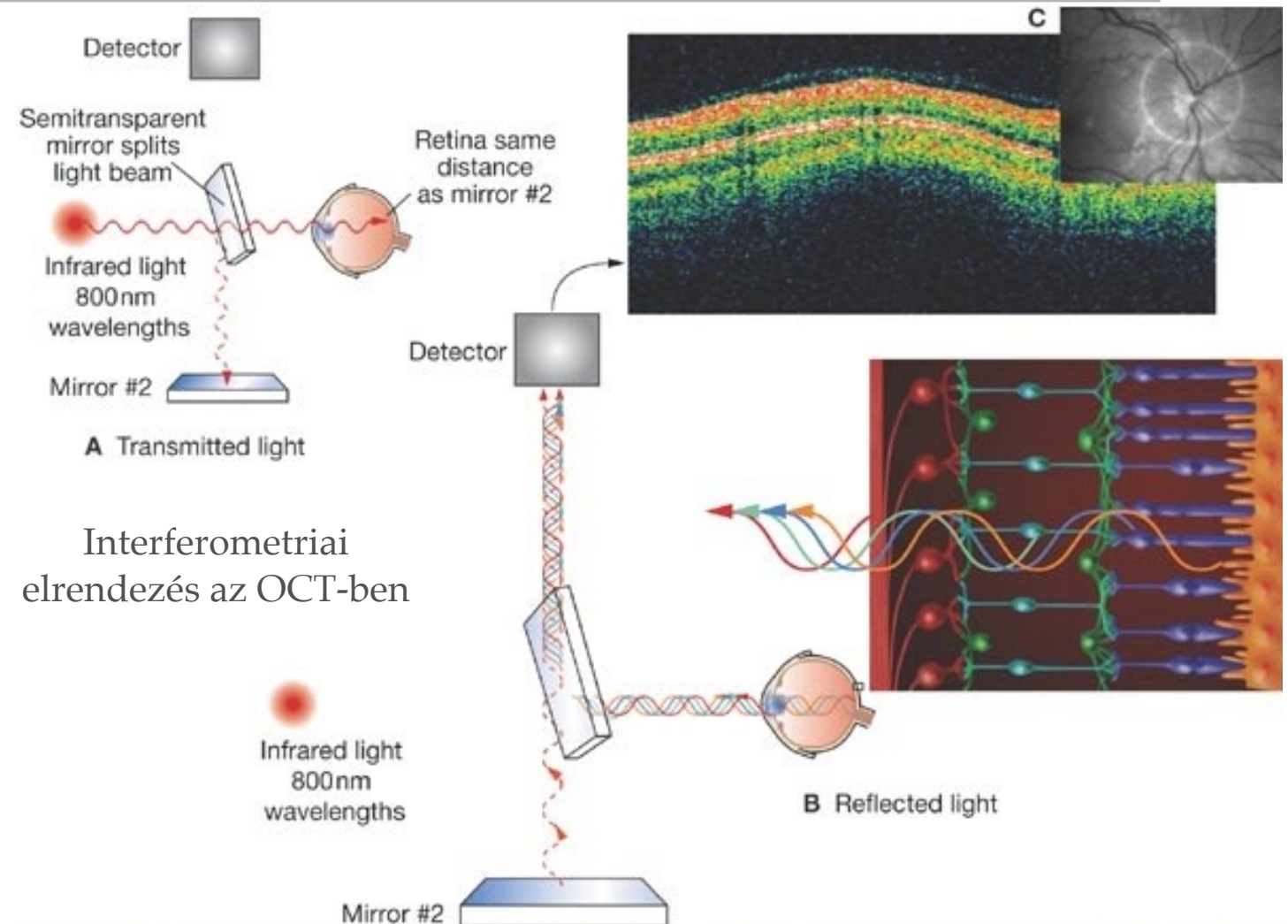
OCT

Optikai koherencia tomográfia (Optical Coherence Tomography):

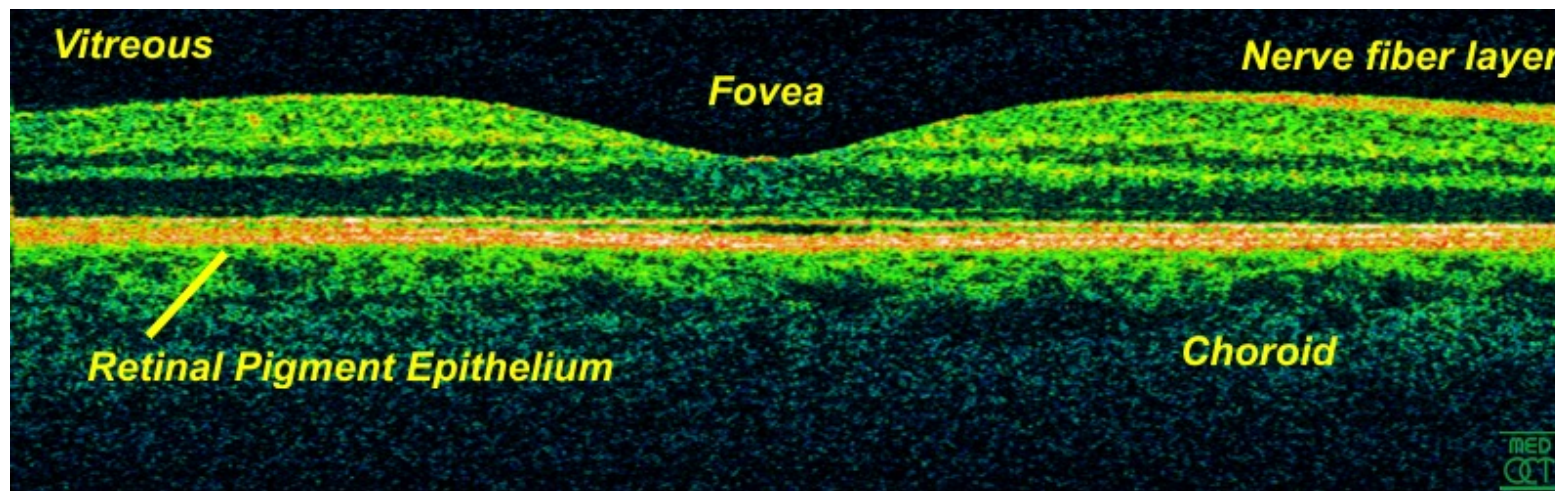
- noninvazív
- kontrasztanyagmentes
- majdnem mikroszkópikus felbontás

Működési elv:

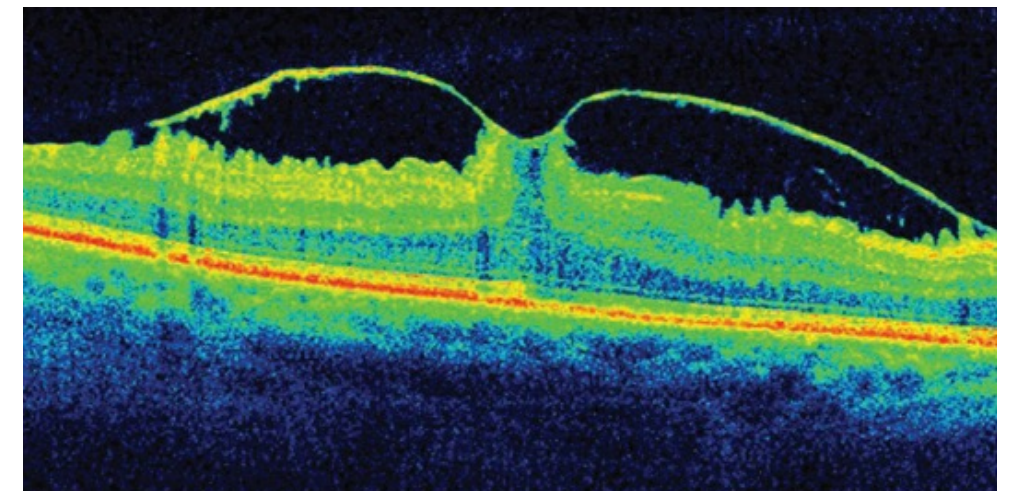
- A minta mélyebb részeiben visszaverődő, illetve szóródó sugarak interferometria segítségével szétválaszthatók.
- A reflektáló rétegek helyzete meghatározható.
- A minta szerkezete (1-2 mm mélységben) feltárható.



Interferometriai
elrendezés az OCT-ben



Normál retina



Macula degeneráció

OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/pre-show-qr.php?type=feedback&qr=MFIR63LEQ0MBP91B>